

อุปกรณ์ทำหน้าสู่วัตถุพรุนชนิดเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของส่วนผสม อย่างเป็นจังหวะ โดยเปลวไฟสามารถติดภายในกลุ่มท่อหน้าได้อย่างมีเสถียรภาพ

Cyclic Operation of Porous Combustor-Heater with Flame Stabilization within Water Tube Bank

ปริญญา ภูเก็ดสิน¹, สำเร็จ จักรใจ²

ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์ และการเผาไหม้

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* ติดต่อ: โทรศัพท์: (662) 4709128, โทรสาร: (662) 4709111,

E-mail: ¹prinya_poo@hotmail.com, ²sumrueng.jug@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

เตาเผาไหม้วัสดุพรุนที่มีกลุ่มท่อหน้าฝังอยู่ในวัสดุพรุน (Porous Combustor-Heater, PCH) ร่วมกับเทคนิคการเผาไหม้แบบสลับทิศทางการไหลของส่วนผสมภายในวัสดุพรุนอย่างเป็นจังหวะ (Cyclic flow Reversal Combustion, CFRC) ได้มีการศึกษาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเตาเผาไหม้แบบ PCH นั้นยังไม่สามารถทำให้เปลวไฟติดอยู่ภายในกลุ่มท่อหน้าได้อย่างมีเสถียรภาพได้ เนื่องจากระยะห่างระหว่างกลุ่มท่อหน้าแคบเกินไปทำให้เปลวไฟดับ (Flame quenching) ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือทำให้เปลวไฟสามารถติดอยู่ภายในกลุ่มท่อหน้าได้อย่างมีเสถียรภาพ กระทำได้โดยการขยายระยะห่างระหว่างท่อหน้าให้เหมาะสม ปรากฏการณ์ที่เปลวไฟสามารถติดอยู่ภายในกลุ่มท่อหน้าได้นี้เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากสำหรับเตาเผาไหม้แบบ PCH เนื่องจากให้โครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ กล่าวคือ อุณหภูมิสูงบริเวณกลุ่มท่อหน้า ส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง ตัวแปรที่ทำการศึกษา ได้แก่ อิทธิพลของค่าอัตราส่วนผสมมวล (ϕ) ที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนในเตาเผาไหม้ ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{total}) และปริมาณมลพิษ (\overline{CO} และ \overline{NO}_x) และได้ทำการเปรียบเทียบกับกรณีของระบบการเผาไหม้ที่ไม่มีการสลับทิศทางการไหล (One Way Flow Combustion, OWFC) จากผลการศึกษาพบว่า เปลวไฟสามารถติดอยู่ภายในกลุ่มท่อหน้าได้อย่างมีเสถียรภาพในช่วงการทำงานที่เหมาะสม ($\phi < 0.50$, $t_{hp} = 60s$, $CL = 21kW$) และให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงถึง 95% ในขณะที่เปลวไฟสามารถลามจนทับกับแถวของกลุ่มท่อหน้าพอดี ในขณะที่ปลดปล่อยมลพิษ \overline{NO}_x ต่ำ (8 ppm) แต่ \overline{CO} ที่ปลดปล่อยออกมาแม้ว่าจะมีค่าสูง (635 ppm) เนื่องจาก Quenching effect แต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ จึงจัดว่าเป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ทางความร้อน เช่น หม้อไอน้ำ ที่ให้ประสิทธิภาพสูงและปลดปล่อยมลพิษต่ำ เพื่อการใช้พลังงานอย่างยั่งยืนต่อไป

คำหลัก: Porous combustor-heater, Cyclic flow reversal combustion, Flame stabilization

Abstract

Base on the concept of cyclic flow reversal combustion (CFRC) of gas mixture within packed bed of porous medium, the research on a new porous combustor heater (PCH) embedded with water tube bank within porous medium was extensively explored. From previous study of PCH, flame cannot move in to the tube bank and stabilized implying a strong quenching effect provided by the small pitch distance used in the experiment. The new PCH give flame stabilization within water tube bank by expanding the pitch distance which reduce the quenching effect. This phenomenon is of interest for PCH which give favorable high temperature zone within the tube bank, yielding the high thermal efficiency (η_{th}). The effect of equivalence ratio (ϕ) was investigated and compared with conventional one way flow combustion (OWFC) to understand the thermal structure, heat transfer performance, and emission characteristics (\overline{CO} and \overline{NO}_x). Results show that new PCH give the favorable thermal structure when operated at suitable conditions ($\phi < 0.50$, $t_{hp} = 60s$, $CL = 21kW$). Also, the new PCH gives high thermal efficiency (i.e. 95%) and significantly low \overline{NO}_x emission (i.e. 8 ppm) when the flame locate over the row of the tube bank. However, \overline{CO} emission (i.e. 635 ppm) still high due to the quenching effect but still at acceptable value. This new PCH concept can provide the basis for development of technology for more advance thermal systems, such as with high thermal efficiency and low pollutant emission for efficient utilization of energy.

Keywords: Porous combustor-heater, Cyclic flow reversal combustion, Flame stabilization

1. บทนำ

เตาเผาไหม้วัสดุพอร์นที่มีกลุ่มท่อน้ำฝังอยู่ภายในวัสดุพอร์น (Porous Combustor-Heater, PCH) เป็นเตาเผาไหม้ที่นำเทคนิคของ Surface Combustor Heater (SCH) มาประยุกต์ใช้ โดยเทคนิคดังกล่าวทำการโดยการฝังกลุ่มท่อน้ำเย็น เข้าไปในวัสดุพอร์นที่มีการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแก๊ส ซึ่งเป็นการรวมอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) และห้องเผาไหม้ (Combustor) เข้าเป็นหน่วยเดียวกัน ผิวท่อน้ำเย็นจะอยู่ใกล้กับบริเวณเปลวไฟอุณหภูมิสูงซึ่งเกิดขึ้นในวัสดุพอร์นที่มีคุณสมบัติดูดกลืนและแผ่รังสีที่ดีกว่า แก๊สมาก ทำให้เกิดข้อดีที่เหนือกว่าเตาเผาไหม้แบบทั่วไปที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และห้องเผาไหม้ มักจะถูกออกแบบให้แยก ออกจากกัน ดังนั้นจึงเป็นผลให้ การถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟสู่ท่อ น้ำเย็นหรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกควบคุม

โดยการพาความร้อนเป็นหลัก ทำให้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จากเปลวไฟสู่ท่อ น้ำเย็นไม่สูงเท่าที่ควร นอกจากนี้ อาจเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Flame Quenching ทำให้อุณหภูมิเปลวไฟบางส่วนที่สัมผัสกับท่อ น้ำเย็นลดต่ำลงมากจนอาจเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ได้

ด้วยจุดเด่นข้างต้นของ PCH ทำให้เตาเผาไหม้แบบ PCH นั้นสามารถดึงความร้อนออกจากระบบการเผาไหม้ได้โดยตรง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่าเตาเผาไหม้แบบทั่วไป ลดปล่อยมลพิษ NO_x ที่ต่ำ เนื่องจากความร้อนจากเปลวไฟอุณหภูมิสูงถูกถ่ายเทไปให้กลุ่มท่อ น้ำเย็นและวัสดุพอร์นอย่างทันทีทันใดพร้อมๆ กับการเผาไหม้ ดังนั้น อุณหภูมิการเผาไหม้จึงถูกดัดให้อยู่ในระดับที่ต่ำพอเหมาะตลอดเวลาจน NO_x ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ทันที นอกจากนี้เตาเผาไหม้แบบ PCH ไม่มีปัญหาเรื่อง Flame Quenching แม้ว่าท่อ น้ำเย็นจะอยู่ใกล้กับเปลว

ไฟที่มีอุณหภูมิสูงก็ตามทั้งนี้เพราะการเผาไหม้เกิดขึ้นภายในโพรงของวัสดุพอร์นและรอบผิววัสดุพอร์น ส่งผลให้ CO ต่ำอีกด้วย

Xiong และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาเตาเผาไหม้แบบ PCH ที่ทำงานในลักษณะ One-way Flow Combustion (OWFC) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อธิบายถึงอิทธิพลของตำแหน่งเปลวไฟที่มีผลต่อกลไกการถ่ายเทความร้อน และมลพิษที่เกิดขึ้น ต่อมา Jugjai และคณะ [2] ได้นำเทคนิคของการสลับทิศทางการไหล (Cyclic Flow Reversal Combustion, CFRC) มาประยุกต์ใช้กับเตาเผาไหม้แบบ PCH โดยส่วนผสมของอากาศและเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้จะถูกบังคับให้สลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะ โดยช่วงเวลาในการสลับทิศทางการไหลจะถูกเรียกว่า คาบของการสลับทิศทางการไหล (Half period, t_{hp}) ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเตาเผาไหม้แบบ PCH ในระบบ CFRC ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่า และให้ปริมาณมลพิษ (CO และ NO_x) ต่ำกว่าระบบ OWFC นอกจากนี้ยังพบว่าที่บางเงื่อนไขการทดลอง เปลวไฟสามารถลามเข้าไปและติดอยู่ภายในกลุ่มท่อหน้าได้ แม้ว่าจะมีอิทธิพลของ Flame quenching ของกลุ่มท่อน้ำเย็น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เป็นปรากฏการณ์ที่น่าสนใจมากสำหรับเตาเผาไหม้แบบ PCH เนื่องจากให้โครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ กล่าวคือ อุณหภูมิสูงบริเวณกลุ่มท่อน้ำ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้ได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูง และให้มลพิษที่ต่ำ แต่จากการทดลอง ก็ยังไม่สามารถอธิบายถึงสถานะเงื่อนไขที่ทำให้เปลวไฟสามารถติดอยู่ภายในกลุ่มท่อน้ำอย่างมีประสิทธิภาพได้

Jugjai และ Nungniyom [3] ได้ทำการศึกษาต่อเนื่องจาก [2] โดยศึกษาอิทธิพลของคาบเวลาในการสลับทิศทางการไหล โดยคาดว่าจะทำให้เข้าใจถึงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเปลวไฟกับกลุ่มท่อน้ำ ที่จะนำไปสู่สถานะโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ได้ แต่จากผลการทดลองพบว่า แม้ว่าเตาเผาไหม้แบบ PCH ในระบบ CFRC ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่สูงกว่า และให้ปริมาณมลพิษ

(CO, NO_x) ที่ต่ำกว่าระบบ OWFC แต่ยังไม่สามารถหาเงื่อนไขการทดลองที่นำไปสู่สถานะโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ได้ โดยโครงสร้างทางความร้อนที่ได้จากงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นรูปตัว U (U-shape) กล่าวคือมีตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดที่เป็นตัวแทนของตำแหน่งเปลวไฟอยู่ภายนอกกลุ่มท่อน้ำ ทั้งนี้การที่เปลวไฟไม่สามารถลามเข้ามาติดอย่างมีประสิทธิภาพภายในกลุ่มท่อน้ำได้นั้น เนื่องจาก Flame quenching ของกลุ่มท่อน้ำ ซึ่งจากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการจัดเรียงตัวของกลุ่มท่อน้ำมีอิทธิพลอย่างมากต่อการเกิดโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ ต่อมาพิสิฐและคณะ [4] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะพิตช์ของกลุ่มท่อน้ำที่มีต่อโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ โดยทำการศึกษาในระบบ OWFC พบว่าที่ระยะพิตช์ที่เหมาะสม คือ $S_D=53.4$ มม. $S_T=50.0$ มม. $S_L=47.3$ มม. ให้เปลวไฟลามเข้าไปติดภายในกลุ่มท่อน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้โครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์คืออุณหภูมิสูงบริเวณกลุ่มท่อน้ำ

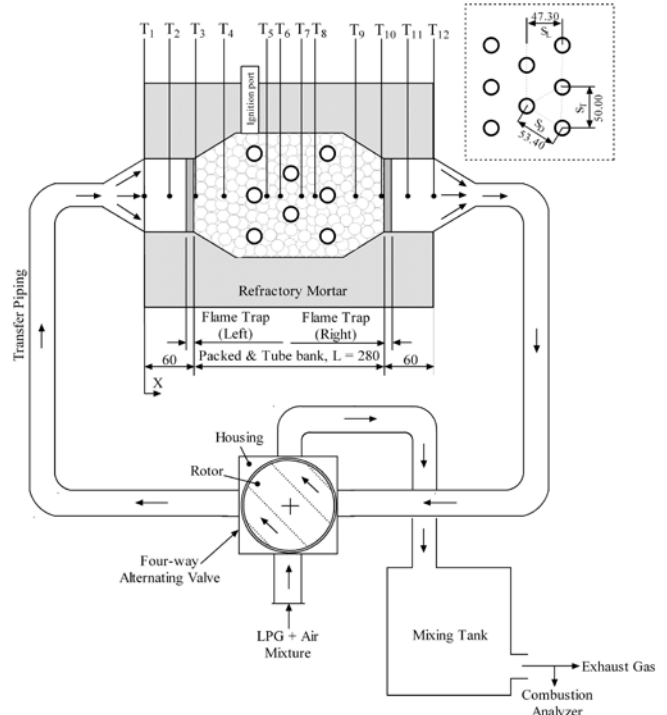
ดังนั้นถ้านำระยะพิตช์จาก [4] มาใช้กับระบบที่เป็น CFRC ก็คาดว่าจะยอมส่งผลให้เกิดโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ได้เช่นกัน ซึ่งประเด็นดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการพัฒนางานวิจัยในครั้งนี้ โดยในการศึกษาจะทดลองเก็บข้อมูล เพื่อหาเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ (อุณหภูมิสูงบริเวณกลุ่มท่อน้ำ) และคาดว่าโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์จะส่งผลดีต่อสมรรถนะการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากว่าเปลวไฟที่เกิดขึ้นทับกับบริเวณกลุ่มท่อน้ำจึงเกิดการถ่ายเทความร้อนอย่างทันทีทันใดจึงเพิ่มประสิทธิภาพทางความร้อนรวมของระบบ รวมถึงปริมาณมลพิษที่ปลดปล่อยออกมาต่ำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวิจัย และพัฒนาเตาเผาไหม้ต่อไป

2. อุปกรณ์การทดลอง

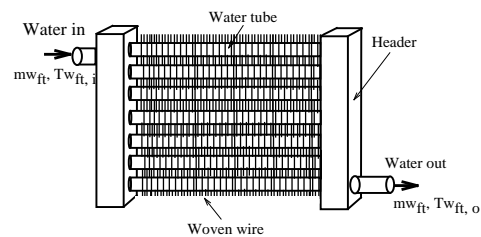
2.1 เตาเผาไหม้แบบ PCH

เตาเผาไหม้แบบ PCH ร่วมกับระบบ CFRC ได้อ้างอิงจาก [3] ซึ่งเป็นเตาเผาไหม้แบบ PCH ที่สามารถทำงานได้ทั้งระบบ OWFC และ CFRC โดยเตาเผาไหม้ประกอบไปด้วยชั้นของวัสดุพรุน (Packed Bed of Porous Medium) ที่มีการฝังกลุ่มท่อสามแถวที่จัดเรียงตัวแบบ Staggered Tube Bank ไว้ภายใน โดยมีระยะพิตช์ของกลุ่มท่อ $S_D=53.4$ มม. $S_T=50.0$ มม. $S_L=47.3$ มม. ดังแสดงในรูปที่ 1 การสลับทิศทางการไหลของไอดีอย่างเป็นจังหวะจะควบคุมด้วย Four-way alternating valve โดยการไหลในลักษณะตามเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า Forward flow และการไหลแบบทวนเข็มนาฬิกาจะเรียกว่า Backward flow โดยไอดีที่ผสมมาแล้ว (Premixed Combustible Gases) ระหว่าง liquefied petroleum gas (LPG) กับอากาศ จะถูกป้อนเข้าสู่ Alternating Valve นอกจากนี้แก๊สไอเสียของระบบ CFRC จะไหลไปยังถังผสมไอเสีย (Mixing tank) เพื่อความเป็นเนื้อเดียวกันของไอเสียก่อนที่จะทำการวัด แล้วจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศ

บริเวณชุดทดสอบ (Test section) ที่เป็นห้องเผาไหม้ มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นที่หน้าตัดขนาด 143×145 ตารางมิลลิเมตร ผนังเตาด้านในฉาบไว้ด้วยปูนทนไฟ เพื่อป้องกันการกักความร้อน ความร้อนและการสูญเสียความร้อน ภายในห้องเผาไหม้มีการบรรจุวัสดุพรุนทรงกลมที่เป็น Alumina เรียงตัวแบบสุ่ม (Random Packed Bed) โดยมีการฝังกลุ่มท่อสามไว้ในวัสดุพรุนเพื่อทำหน้าที่เป็นภาระทางความร้อน นอกจากนี้ได้มีการติดตั้ง Flame trap ดังแสดงในรูปที่ 2 ไว้บริเวณด้านปลายทั้งสองข้างของห้องเผาไหม้เพื่อควบคุม Boundary Condition และทำหน้าที่เป็นภาระทางความร้อนอีกชุดหนึ่ง เพื่อช่วยลด



รูปที่ 1 Schematic diagram ของ PCH



รูปที่ 2 Flame Trap

การสูญเสียความร้อนที่ด้านปลายทั้งสองข้างของห้องเผาไหม้ นอกจากนี้ Flame trap ยังช่วยป้องกันการเกิด flashback ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นการควบคุมให้เปลวไฟติดอยู่อย่างมีเสถียรภาพภายในชั้นของวัสดุพรุน

2.2. ระบบควบคุมและเครื่องมือวัด

เชื้อเพลิง LPG (โพรเพน 60%, บิวเทน 40%) กับอากาศที่ป้อนเข้าสู่ Alternating valve ถูกควบคุมอัตราการไหลโดย Rotameter ยี่ห้อ Bailey – Fischer & Porter GmbH ที่ได้ทำการสอบเทียบแล้ว และการหมุนของ Alternating valve เพื่อเปลี่ยนทิศทางการไหลของไอดีจะถูกควบคุมโดยชุดอุปกรณ์นิวเมติกซึ่งประกอบด้วย กระบอกสูบนิวเมติก โซลินอยด์วาล์ว

และชุดควบคุมทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถกำหนดคาบเวลาของการสลับทิศทางการไหลได้

กลไกการเผาไหม้ จะถูกอธิบายจากโครงสร้างทางความร้อน หรือการกระจายตัวของอุณหภูมิตลอดแนวแกนของเตาเผาไหม้โดยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ชนิด N ($T_1, T_2, T_3, T_{10}, T_{11}, T_{12}$), ชนิด B ($T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9$) และชนิด K (สำหรับวัดอุณหภูมิของน้ำ) ดังแสดงในรูปที่ 1 และใช้ Data Logger รุ่น DT 605 ในการรับสัญญาณและแสดงผลของอุณหภูมิที่วัดได้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยอุณหภูมิที่วัดได้นี้เป็นอุณหภูมิของของแข็ง (วัสดุพูน) ซึ่งจะนำมาใช้อธิบายถึงโครงสร้างทางความร้อนในเตาเผาไหม้ และตำแหน่งของเปลวไฟ สำหรับการทดลองในระบบ CFRC นั้นอุณหภูมิที่อ่านได้ด้วยเทอร์โมคัปเปิลสำหรับตำแหน่งต่างๆ จะแปรเปลี่ยนไปตามเวลา จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่ Quasi-Steady State ก่อนที่จะทำการบันทึกผลการทดลอง โดยจะสังเกตได้จากการแปรเปลี่ยนของอุณหภูมิเมื่อเข้าสู่สมดุลแล้วจะมีค่าและแอมพลิจูดคงที่ จากนั้นจำเป็นต้องทำการเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดหนึ่งรอบของการสลับทิศทางการไหล ทั้งจังหวะ Forward และ Backward (Cycle average solid phase temperature, \bar{T}) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของอุณหภูมิในการแสดงผลการทดลอง

การแสดงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของเตาเผาไหม้ จะแสดงในรูปของประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยรวมของระบบ ($\bar{\eta}_{total}$) ซึ่งเป็นผลรวมของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกลุ่มท่อน้ำ ($\bar{\eta}_{tb}$) ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของ Flame trap ขวา ($\bar{\eta}_{ft,right}$) และประสิทธิภาพของ Flame trap ซ้าย ($\bar{\eta}_{ft,left}$) ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\bar{\eta}_{total} = \bar{\eta}_{tb} + \bar{\eta}_{ft,right} + \bar{\eta}_{ft,left} \quad (1)$$

ในการวิเคราะห์แก๊สไอเสียที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้ วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์การ

เผาไหม้ยี่ห้อ MESSTECHNIK EHEIM รุ่น Visit – 01L ใช้ Electrochemical Sensor เพื่อวัดค่ามลพิษ CO และ NO_x ในลักษณะไอเสียแห้ง (Dry basis) โดยในการทดลองได้ทำการแก้ค่าของไอเสียที่วัดได้ไปที่ 0% ของอากาศส่วนเกิน

3. ขั้นตอนการทดลอง

ในการทดลอง จะเริ่มต้นจากระบบ OWFC โดยการไหลของไอดีอยู่ในจังหวะ Forward ก่อนที่จะทำการสลับทิศทางการไหลเปลี่ยนเป็นระบบ CFRC การติดไฟเริ่มจากการอุ่นชั้นของวัสดุพูน โดยใช้เปลวไฟล่อ (Pilot flame) พ่นผ่านทางช่องด้านบนของเตาเผาไหม้ (Ignition Port) ดังรูปที่ 1 จนชั้นของวัสดุพูนร้อนแล้วจึงปล่อยส่วนผสมตามภายหลัง ในช่วงนี้ Flame trap จะถูกบ่อน้ำด้วยอัตราสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง (9.35 kg/min) เพื่อป้องกันการเกิด flashback แต่ยังไม่บ่อน้ำเข้าสู่กลุ่มท่อน้ำ

ส่วนผสมของไอดีที่ ปรับค่า อัตราส่วนผสมมวล (ϕ) เข้าใกล้ 1 ถูกบ่อนเข้าสู่เตาเผาไหม้ โดยมี ค่าอัตราการเผาไหม้ (ผลคูณระหว่างอัตราการไหลกับค่าความร้อนของเชื้อเพลิง LPG ที่ใช้ในการทดลอง) หรือ Firing rate (CL) เท่ากับ 6.5 kW เมื่อเปลวไฟติดอยู่ในวัสดุพูนได้แล้ว จึงนำเปลวไฟล่อออก และปล่อยน้ำให้ไหลผ่านกลุ่มท่อน้ำ โดยปล่อยน้ำในอัตราการไหลที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการกลายเป็นไอของน้ำ จากนั้นปรับเพิ่ม CL เพื่อรักษาอุณหภูมิภายในเตาไม่ให้เกิดจมน้ำไป รอให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล แล้วจึงเก็บข้อมูลของระบบ OWFC ให้เรียบร้อยก่อน สลับทิศทางการไหลเปลี่ยนไปเป็นระบบ CFRC ก่อนที่จะสลับทิศทางการไหล ต้องแน่ใจว่า ชั้นของวัสดุพูนบริเวณด้านท้ายน้ำของเตาเผาไหม้ ต้องมีอุณหภูมิประมาณ $600^\circ C$ เพื่อให้เกิดการติดไฟด้วยตัวเองของไอดีที่จะบ่อนเข้ามาเมื่อสลับทิศทางการไหล เงื่อนไขการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 1

4. ผลการทดลอง

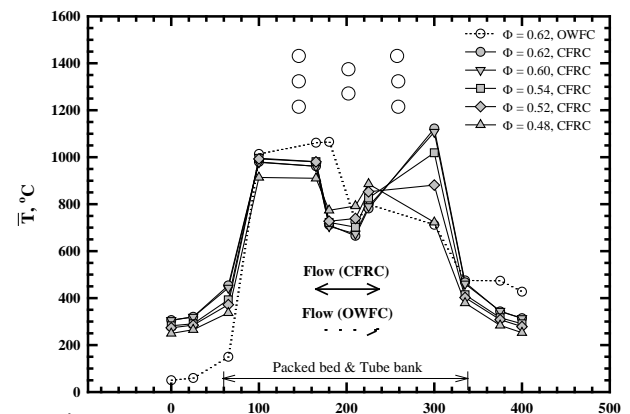
จากผลการทดลองพบว่า เตาเผาใหม่แบบ PCH ร่วมกับระบบ CFRC สามารถให้โครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ กล่าวคืออุณหภูมิสูงบริเวณกลุ่มท่อน้ำหรืออาจกล่าวได้ว่าเปลวไฟสามารถลามเข้ามาติดภายในกลุ่มท่อน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในสภาวะการทำงานที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าค่าอัตราส่วนสมมูลเป็นตัวแปรสำคัญที่สามารถทำให้ได้มาซึ่งโครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ โดยในการทดลองจะให้อัตราการเผาไหม้ให้คงที่ $CL = 21 \text{ kW}$ และค่า half period, $t_{hp} = 60$ วินาที จากนั้นทำการปรับค่าอัตราส่วนสมมูล $\phi = 0.48 - 0.62$ โดยการปรับอัตราการไหลของอากาศ

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูล (ϕ) ต่อโครงสร้างทางความร้อนของ PCH ทั้งแบบ CFRC และ OWFC สำหรับเตาเผาใหม่แบบ PCH ในระบบ CFRC โครงสร้างทางความร้อน จะถูกแสดงในรูปอุณหภูมิเฉลี่ย (\bar{T}) ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดหนึ่งรอบของการสลับทิศทางการไหล ทั้งจังหวะ Forward และ Backward ตำแหน่งอุณหภูมิสูงสุดเป็นตัวแทนของตำแหน่งเปลวไฟ พบว่าที่ค่า ϕ ที่มีค่าสูง ($\phi > 0.52$) อุณหภูมิเฉลี่ยที่บริเวณของกลุ่มท่อน้ำ ($T_5 - T_8$) จะมีค่าต่ำ และเมื่อ ϕ ลดลง ($\phi < 0.52$) อุณหภูมิเฉลี่ยบริเวณกลุ่มท่อน้ำจะยกตัวสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่าเปลวไฟสามารถลามเข้าไปในบริเวณกลุ่มท่อน้ำได้มากขึ้น ทั้งนี้อัตราการไหลของอากาศที่เพิ่มขึ้นจะช่วยดันเปลวไฟให้เข้าไปในกลุ่มท่อน้ำที่ค่า $\phi < 0.52$ พบว่าเปลวไฟสามารถลามเข้าไปติดอยู่

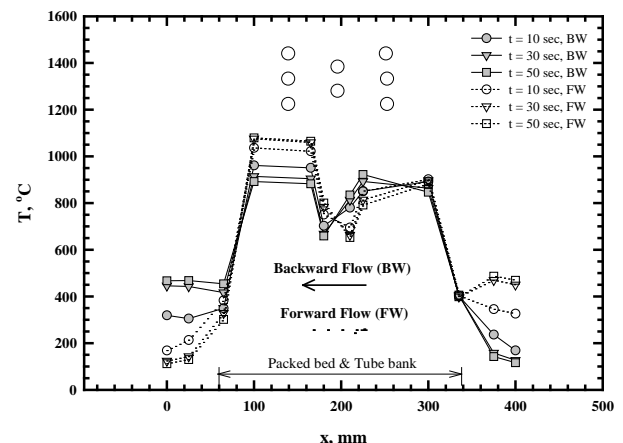
ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลอง

Quantity	Value
Diameter of alumina pellets	16 mm
Equivalence ratio, ϕ	0.48 - 0.62
Firing rate, CL	21 kW
Inlet temperature of water	303 K
Inlet gas temperature	303 K
Longitudinal pitch, S_L	47.3 mm
Transverse pitch, S_T	50.0 mm

Diagonal pitch, S_D	53.4 mm
LHV of LPG	115 MJ/m ³ [normal]
Number of tubes of tube bank	8
Half period, t_{hp}	60 sec
Total water flow rate at tube bank, $m_{w,fb}$	7.44 kg/min
Total water flow rate at flame traps, $m_{w,fb}$	9.35 kg/min



รูปที่ 3 อิทธิพลของของ ϕ โครงสร้างทางความร้อนของเตาเผาใหม่แบบ CFRC และ OWFC



รูปที่ 4 การกระจายตัวของอุณหภูมิตามเวลาทุก 20 วินาทีของระบบ CFRC ที่ $\phi = 0.52$ และ $t_{hp} = 60$ วินาที ทั้งจังหวะ Forward และ Backward

ภายในกลุ่มท่อน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ สังเกตได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ ระหว่างแถวของกลุ่มท่อน้ำ (T_8) มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่วัดได้ภายนอกกลุ่มท่อน้ำ (T_9) นอกจากนี้อิทธิพลของการสลับทิศทางการไหลยังช่วยให้อุณหภูมิเฉลี่ยภายนอกชั้นวัสดุพูน ($T_1-T_3, T_{10}-T_{12}$) ของระบบ CFRC มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งสองด้านทั้งซ้ายและขวา (ประมาณ 200°C) เป็นผล

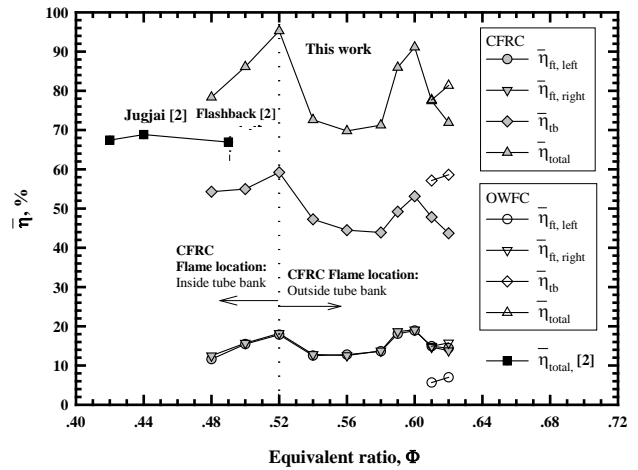
ให้ Flame Trap ทั้งด้านซ้ายและขวารับความร้อน ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ผิดกับระบบ OWFC ที่อุณหภูมิสูงเพียงด้านเดียว ทำให้ Flame Trap ทางด้านซ้ายที่รับความร้อนในปริมาณที่มากกว่าด้านขวา

รูปที่ 4 แสดงการลามของเปลวไฟจากภายนอกกลุ่มท่อเข้าไปในกลุ่มท่อน้ำอย่างเห็นได้ชัดเจน ของระบบ CFRC ที่ $\phi = 0.52$ โดยแสดงในรูปของอุณหภูมิที่วัดได้จริง ณ เวลาที่ทำการทดลอง (T) ซึ่งตำแหน่งสูงสุดของอุณหภูมิจะเปลี่ยนตำแหน่งจากภายนอกกลุ่มท่อน้ำ (T_9) มาเป็นภายในกลุ่มท่อน้ำ (T_8) ในช่วงท้ายคาบของการสลับทิศทางกรไหล ในจังหวะ Backward ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ $\phi = 0.52$ ตำแหน่งของเปลวไฟได้ลามเข้ามาทับกับกลุ่มท่อน้ำแล้ว

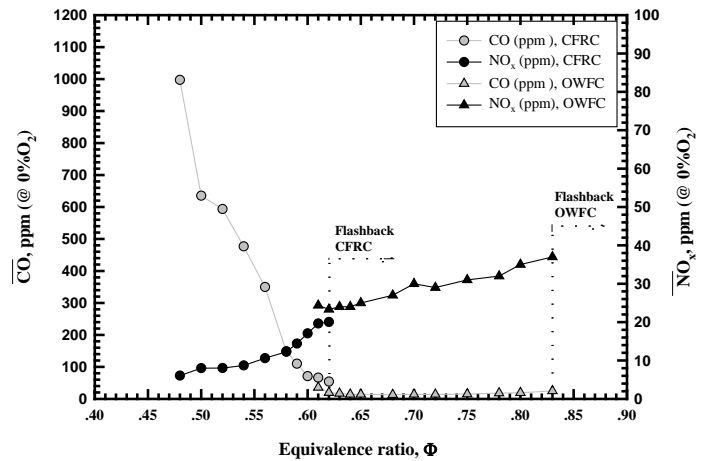
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของอัตราส่วนผสม (ϕ) ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบ PCH พบว่า $\bar{\eta}_{total}$ ของระบบ OWFC มีค่าสูงกว่าระบบ CFRC ที่ค่า ϕ เดียวกันคือ 0.61 และ 0.62 โดย $\bar{\eta}_{tb}$ ของระบบ OWFC มีค่าสูงกว่าระบบ CFRC ทั้งนี้เนื่องจากที่ $\phi = 0.61 - 0.62$ นั้น ระบบ CFRC เปลวไฟติดอยู่ภายนอกกลุ่มท่อน้ำ และยังอยู่ห่างจากกลุ่มท่อน้ำมาก เนื่องจากคาบของการสลับทิศทางกรไหลที่ใช้มีค่าสั้น (t_{hp}) ทำให้ไม่มีเวลาเพียงพอที่จะทำให้เปลวไฟลามเข้ามาติดอยู่ภายในกลุ่มท่อน้ำ แต่ในระบบ OWFC นั้นเปลวไฟได้ลามเข้ามาติดอยู่ภายในกลุ่มท่อน้ำอย่างมีเสถียรภาพแล้ว จึงให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกลุ่มท่อน้ำที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมของ Flame Trap ทั้งสองข้าง ($\bar{\eta}_{ft, right} + \bar{\eta}_{ft, left}$) ของระบบ CFRC สูงกว่าระบบ OWFC ทั้งนี้เนื่องจาก อิทธิพลของการสลับทิศทางกรไหล ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น

อย่างไรก็ตาม $\bar{\eta}_{total}$ ของระบบ CFRC จากรูปที่ 5 มีลักษณะเป็นสองยอด ที่ค่าอัตราส่วนผสม 0.60 ($\bar{\eta}_{total} = 91\%$) และที่ค่าอัตราส่วนผสม 0.52 ($\bar{\eta}_{total} = 95\%$) ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของการลามของเปลวไฟเข้าไปในกลุ่มท่อน้ำ ทำให้ต้องแยกพิจารณา

ออกเป็นสองกรณีคือ ตำแหน่งเปลวไฟอยู่นอกกลุ่มท่อน้ำ ($\phi > 0.52$) และตำแหน่งเปลวไฟอยู่ภายในกลุ่มท่อน้ำ ($\phi < 0.52$) โดยในกรณีที่ตำแหน่งเปลวไฟอยู่นอกกลุ่มท่อน้ำ จะพบว่าที่ $\phi > 0.60$ แม้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ย (\bar{T}) จะมีค่าสูง แต่กลับให้ $\bar{\eta}_{total}$ ที่ต่ำกว่า OWFC เพราะเปลวไฟอยู่ห่างจากกลุ่มท่อน้ำมากเกินไป ทำ



รูปที่ 5 อิทธิพลของ ϕ ต่อประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาไหม้แบบ PCH



รูปที่ 6 อิทธิพลของ ϕ ต่อการปลดปล่อยมลพิษ CO และ NO_x ของเตาเผาไหม้แบบ PCH

ให้การถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟมายังกลุ่มท่อน้ำนั้นไม่ดีเท่าที่ควร แต่ที่ $\phi = 0.60$ เปลวไฟเริ่มลามเข้ามาใกล้กลุ่มท่อน้ำมากขึ้นจึงให้ $\bar{\eta}_{total}$ ที่สูงขึ้น และที่ $\phi < 0.60$ พบว่า $\bar{\eta}_{total}$ ลดต่ำลงอีก ทั้งนี้เนื่องจากค่า ϕ ที่ลดลงทำให้อุณหภูมิเปลวไฟลดลง สังเกตได้จากอุณหภูมิเฉลี่ยที่ลดต่ำลงเป็นผลให้ความแตกต่างของ

อุณหภูมิ (Temperature Gradient) ของการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังกลุ่มท่อน้ำลดลง อย่างไรก็ตามที่ค่า $\phi = 0.52$ ค่า $\bar{\eta}_{total}$ สูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากเปลวไฟได้ลามเข้ามาทับกับกลุ่มท่อน้ำแถวแรก (ในจังหวะ Backward ของรูปที่ 4) ส่งผลให้ได้ $\bar{\eta}_{total}$ ที่สูง และที่ $\phi < 0.52$ เปลวไฟได้ลามลึกเข้าไปมากขึ้นไประหว่างแถวของกลุ่มท่อน้ำเป็นผลให้ $\bar{\eta}_{total}$ ลดลง เนื่องจากพื้นที่ถ่ายเทความร้อนของกลุ่มท่อน้ำลดลงจากสามแถวเหลือเพียงสองแถว

นอกจากนี้รูปที่ 5 ได้เปรียบเทียบ $\bar{\eta}_{total}$ ระหว่างงานวิจัยนี้กับงานวิจัย [2] ซึ่งทำงานที่ $t_{hp} = 15s$ CL = 16.20kW $m_{w,tb} = 6.16kg/min$ $m_{w,ft} = 1.76kg/min$ โดยพบว่าในงานวิจัยนี้สามารถขยายขอบเขตการทำงานไปยังส่วนผสมที่หนากว่าได้โดยไม่มีปัญหาการ Flashback อีกทั้งให้ $\bar{\eta}_{total}$ ที่สูงกว่า

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของ ϕ ต่อการปลดปล่อย CO และ NO_x ทั้งในระบบ OWFC และ CFRC โดยการรายงานผลของมลพิษในระบบ CFRC จำเป็นต้องแสดงผลในรูปของค่าเฉลี่ยเมื่อเทียบกับเวลา (\overline{CO} และ $\overline{NO_x}$) ซึ่งเป็นการเฉลี่ยตลอดหนึ่งรอบของการสลับทิศทางการไหล ทั้งจังหวะ Forward และ Backward เช่นเดียวกับค่าอุณหภูมิเฉลี่ย (\bar{T}) ซึ่งพบว่าในระบบ CFRC \overline{CO} มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนผสมลดลง ทั้งนี้เนื่องจากการที่อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าลดลง และ $\overline{NO_x}$ มีแนวโน้มที่จะลดลงตาม ϕ ที่ลดลง เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผาไหม้ โดยมีค่า $\overline{NO_x}$ ต่ำสุดประมาณ 6 ppm อย่างไรก็ตามระบบ CFRC ไม่สามารถทำงานที่ค่า $\phi > 0.62$ ได้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการเกิด Flashback อันเนื่องมาจากอิทธิพลการอุ่น (preheating effect) ที่สูง สำหรับการปลดปล่อยมลพิษของระบบ OWFC ให้แนวโน้มเช่นเดียวกับระบบ CFRC แต่ระบบ OWFC ไม่ควรทำงานที่ $\phi < 0.61$ เนื่องจากเปลวไฟได้ลามเข้ามาภายในกลุ่มท่อน้ำแล้ว และอุณหภูมิเฉลี่ยจึงมีค่าต่ำ ดังนั้นถ้าผืนทำการปรับลดอัตราส่วนผสมต่อไปจะให้ค่า CO ที่ค่อนข้างสูง

และไม่ควรทำงานที่ $\phi > 0.83$ เพื่อเลี่ยงปัญหาการเกิด Flashback

5. สรุปผลการทดลอง

เตาเผาไหม้แบบ PCH ร่วมกับระบบ CFRC ที่ใช้ระยะพิตช์ของกลุ่มท่อน้ำจากงานวิจัย [4] เปลวไฟสามารถลามเข้ามาติดอย่างมีเสถียรภาพภายในกลุ่มท่อน้ำได้ ส่งผลให้ได้โครงสร้างทางความร้อนที่พึงประสงค์ โดยให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมสูงสุดเท่ากับ 95% ซึ่งเป็นขณะที่เปลวไฟได้ลามมาจนทับกับแถวของกลุ่มท่อน้ำพอดี ($\phi = 0.52$) ในขณะที่ปลดปล่อยมลพิษ $\overline{NO_x}$ ต่ำมาก (8 ppm) แต่ \overline{CO} ที่ปลดปล่อยออกมาแม้ว่าจะมีค่าสูง (635 ppm) แต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แม้ว่าที่ค่าอัตราส่วนผสมมูลเดียวกัน ระบบ OWFC ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนรวมที่สูงกว่า CFRC แต่เตาเผาไหม้แบบ PCH ในระบบ CFRC สามารถขยายขอบเขตการทำงานไปเผาไหม้ส่วนผสมที่เจือจางกว่าระบบ OWFC ได้

ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอัตราส่วนผสมต่อตำแหน่งของเปลวไฟ เพื่อหาสมรรถนะของเตาเผาไหม้ ซึ่งยังมีตัวแปรอื่นๆที่คาดว่าจะส่งผลต่อสมรรถนะของเตาเผาไหม้ อาทิเช่น อิทธิพลของ คาบของการสลับทิศทางการไหล (t_{hp}) เป็นต้น ซึ่งจะทำการศึกษาในงานวิจัยครั้งต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Xiong T.Y., Khinkis M.J. and Fish, F.F. (1995). Experimental Study of a High Efficiency, Low Emission Porous Matrix Combustor-Heater, Fuel, Vol. 74, No. 11, pp. 1641-1647.
- [2] Jugjai, S., Sawananon, A. (2004). The Surface Combustor-Heater with Cyclic Flow Reversal Combustion embedded with water tube bank, Fuel, Vol. 83, pp. 2369-2379.
- [3] Jugjai S., Nungniyom V. (2007), Research and Development of Porous Combustor-Heater (PCH) with Cyclic Flow Reversal Combustion (CFRC),

paper presented in *The 21st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand 2007*, Chonburi, Thailand

[4] ภิศมฐ์ เพชรฟอง และคณะ (2549). *High-Efficiency Environment Friendly Water Heater*, วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, หน้า 32 - 43