

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของ  
เชื้อเพลิงและอากาศอย่างเป็นจังหวะ  
Cyclic Flow Reversal Combustion (CFRC) of Liquid Fuel within Porous Medium

สำเรีง จักรใจ\* ชนินทร์ โพธิยา  
ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องยนต์และการเผาไหม้  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี  
91 ถนนประชาอุทิศ (สุขสวัสดิ์ 48) แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Sumremg Jugjai\* , Chanin Phothiya  
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 Kharu District, Bangkok 10140

E-mail: [sumrueng.jug@kmutt.ac.th](mailto:sumrueng.jug@kmutt.ac.th)

**บทคัดย่อ**

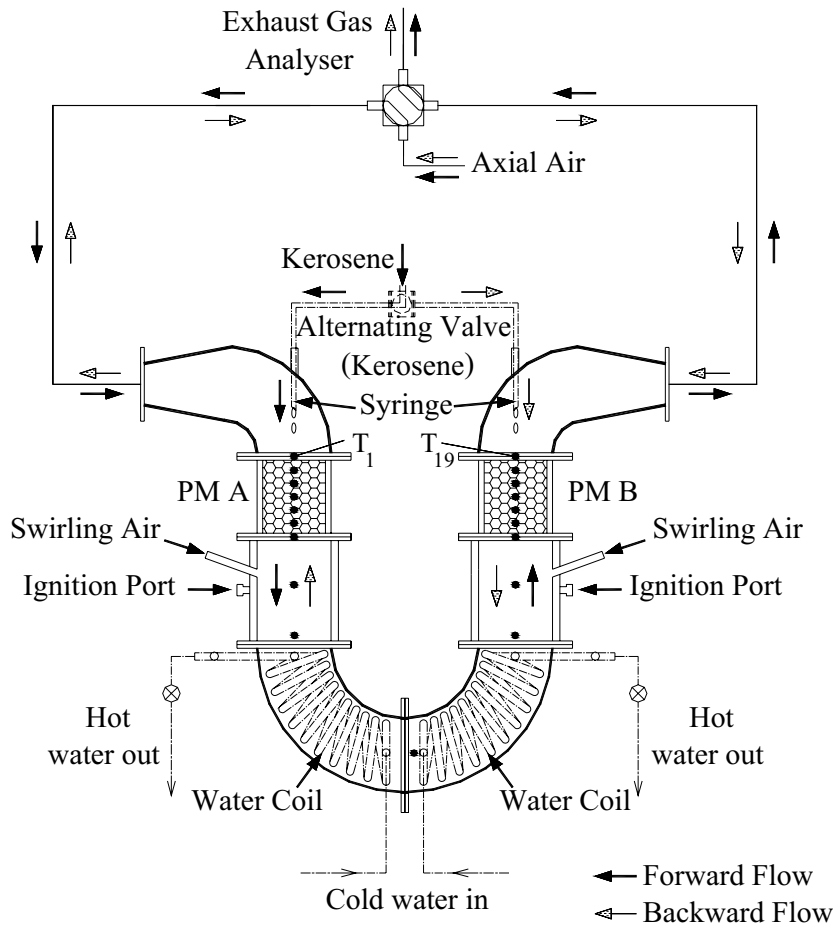
งานวิจัยนี้กล่าวถึงแนวคิดใหม่ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศอย่างเป็นจังหวะ (Cyclic Flow Reversal Combustion, CFRC) น้ำมันก๊าดถูกทำให้ระเหยโดยวัสดุพรุนสองชุดโดยปราศจากการสเปรย์ การระเหยตามด้วยการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนสามารถทำให้เกิดขึ้นในวัสดุพรุนชุดหนึ่งชุดใดเมื่อเชื้อเพลิงและอากาศไหลผ่านชุดนั้น ในขณะที่การสะสมความร้อนจะเกิดขึ้นที่อีกชุดหนึ่งเพื่อใช้ในการระเหยและการเผาไหม้ในจังหวะสลับทิศทางการไหลถัดไป วัตถุประสงค์หลักของงานนี้เพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิด CFRC จึงได้ออกแบบอุปกรณ์การทดลอง สร้างพร้อมติดตั้งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อการใช้ประโยชน์ และทดลองเก็บข้อมูล ได้แก่การกระจายอุณหภูมิภายในเตาปริมาณมลพิษ CO และ NO<sub>x</sub> และประสิทธิภาพเชิงความร้อนเพื่อศึกษาและเข้าใจปรากฏการณ์อันซับซ้อนต่างๆที่เกิดขึ้น ผลการทดลองได้การเผาไหม้แบบมีการหมุนเวียนความร้อนภายในประสิทธิภาพสูง ให้ปริมาณ NO<sub>x</sub> ต่ำมากในขณะที่ให้ปริมาณ CO ค่อนข้างสูงแต่ยอมรับได้ และให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงน่าพอใจ ระบบ CFRC นับเป็นพื้นฐานอย่างดีของการพัฒนาระบบการเผาไหม้ขั้นสูงและทันสมัยในอนาคต

**คำหลัก:** วัสดุพรุน/การเผาไหม้หมุนเวียนความร้อน/เชื้อเพลิงเหลว

**Abstract**

A new concept of Cyclic Flow Reversal Combustion (CFRC) of liquid fuel through porous medium has been proposed. Kerosene was vaporized through two sets of Porous Media (PM) without atomization. Evaporation followed by combustion can be taken place within a set of PM as the fuel and combustion air flow flows through it, whereas thermal accumulation is taken place at another set of PM for the subsequent evaporation and combustion as the flow direction is reversed. The main objective of the present study is to prove the concept of the CFRC. Experimental apparatus was designed and constructed with heat extraction for utilization. Experiment was performed and data were collected to study and understand the complicated phenomena within the CFRC. Results have shown that highly efficient heat re-circulating combustion with relatively low emission of NO<sub>x</sub> but with acceptable high CO was achieved with favorably high thermal efficiency. The CFRC can provide the basis for further development of efficient combustion system in the future.

**Keywords:** Porous Medium/ Heat Re-circulating Combustion/ Liquid Fuels



รูปที่ 1 อุปกรณ์การทดลองระบบ CFRC สำหรับเชื้อเพลิงเหลว

1. บทนำ

การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพอร์นแบบทั่วไปที่มีทิศทาง การไหลคงที่ (One Way Flow Combustion, OWFC) ชนิดไร้การสเปรย์ เป็นผอมละออง [1] ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและประสบความสำเร็จมาแล้วในระดับหนึ่ง แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก เพราะยังไม่สามารถทำให้บริเวณการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ภายในวัสดุพอร์น (Matrix-stabilized Flame) ยิ่งบริเวณการเผาไหม้เกิดภายในวัสดุพอร์นมากเท่าไรยิ่งเป็นผลดีมากเท่านั้น เพราะให้อุณหภูมิ การเผาไหม้สูง ให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง ในขณะที่ปลดปล่อย ปริมาณมลพิษ CO และ NO<sub>x</sub> ต่ำเหมือนเช่นที่ประสบความสำเร็จมาแล้วของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สโดยวัสดุพอร์น [2, 3] จึงได้พัฒนา เทคนิคการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวโดยวัสดุพอร์นแบบใหม่ขึ้นเป็นการเผาไหม้แบบสลับทิศทาง การไหลอย่างเป็นจังหวะ (Cyclic Flow Reversal Combustion, CFRC) ผ่านวัสดุพอร์นแทนการเผาไหม้แบบดั้งเดิมที่มีทิศทาง การไหลคงที่ (OWFC) ทั้งนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมุนเวียน ความร้อนจากแก๊สไอเสียสู่อากาศและเชื้อเพลิงเหลว ทำให้สามารถฝัง บริเวณการเผาไหม้ทั้งหมดภายในวัสดุพอร์นได้ ผลลัพธ์ที่ตามมาคือได้ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่สูง ให้ช่วงการทำงานที่กว้างกว่าเดิม มีความเข้มของการเผาไหม้ที่สูงกว่า ทำให้ห้องเผาไหม้มีขนาดเล็กลง ใน

งานวิจัยนี้จะแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของแนวคิดแบบ CFRC มีการแสดงให้เห็นถึงปรากฏการณ์ต่าง ๆ อันซับซ้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุพอร์น ได้แก่การถ่ายเทความร้อน การระเหย และการเผาไหม้ตลอดจน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะและระหว่างปรากฏการณ์ต่างๆที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจอย่างถ่องแท้ถึงกลไกการเผาไหม้และทราบสมรรถนะ ของเทคนิคการเผาไหม้แบบใหม่ CFRC นี้ เพื่อเป็นพื้นฐานของการต่อยอดการพัฒนาหรือนำไปประยุกต์ใช้งานจริงในอนาคตต่อไป

2. แนวคิด อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองระบบ CFRC สำหรับเชื้อเพลิงเหลวซึ่งสร้างขึ้นตามแนวคิดสามเหลี่ยมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะดังแสดงในรูปที่ 2 แนวคิดดังกล่าวประกอบด้วยขั้นตอนหลักสามประการคือ

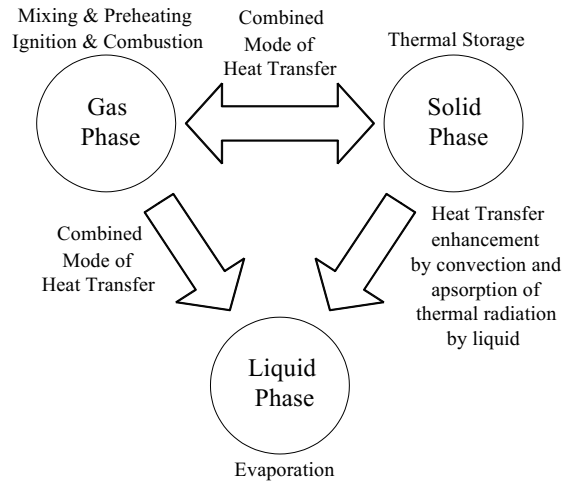
การสะสมความร้อน (Thermal Storage) จะเกิดขึ้นในสถานะของแข็ง (Solid Phase) หรือในวัสดุพอร์น เนื่องจากของแข็งมีความร้อนจำเพาะที่สูง ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะ แก๊ส-ของแข็ง (Gas-solid Phase Interaction) ผ่านทางการถ่ายโอนความร้อนแบบผสม (Combined Mode of Heat Transfer) มีอิทธิพลมากต่อการสะสมความร้อนของของแข็ง (วัสดุพอร์น) ความร้อนจะถ่ายโอนจากแก๊สไปสะสมไว้ที่

ของแข็ง ยิ่งสะสมไว้มากเท่าไร ยิ่งเป็นผลดีต่อการอุ่น (Preheating) ทั้ง อากาศเผาไหม้ (Gas Phase) และ เชื้อเพลิงเหลว (Liquid Phase) และการระเหย (Evaporation) มากเท่านั้น

การระเหย (Evaporation) จะเกิดขึ้นกับสถานะของเหลว (Liquid Phase) ภายหลังจากที่เชื้อเพลิงเหลวถูกอุ่น (Preheating) จนมี อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดเดือด ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะของแก๊ส-ของเหลว (Gas-liquid Phase Interaction) ผ่านทางการถ่ายโอนความร้อนแบบผสม (Combined Mode of Heat Transfer) มีอิทธิพลมากต่อการอุ่นและอัตราการระเหยของเชื้อเพลิงเหลว ยิ่งกว่านั้น การระเหยยังถูกส่งเสริมให้ดียิ่งขึ้นไปอีกโดยปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะของแข็ง-ของเหลว (Solid-liquid Phase Interaction) ผ่านทางการถ่ายโอนความร้อนแบบการพา (Convection) และการดูดกลืนรังสีความร้อนของของเหลว ทำให้ของเหลวมีอัตราการระเหยสูงยิ่งขึ้น

การเผาไหม้ (Combustion) จะเกิดขึ้นทันทีในสถานะแก๊ส (Gas Phase) ภายหลังจากการผสมกันอย่างดีระหว่างไอของเชื้อเพลิงเหลวและอากาศเนื่องจากความปั่นป่วนภายในโพรงของวัสดุพรุน การอุ่นอากาศเผาไหม้และส่วนผสม (ระหว่างไอเชื้อเพลิงเหลวและอากาศ) ได้รับความร้อนจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะแก๊ส-ของแข็ง (Gas-solid Phase Interaction) ผ่านทางการถ่ายโอนความร้อนแบบผสม (Combined Mode of Heat Transfer) พลังงานที่ใช้ในการอุ่นมาจากความร้อนที่สะสมไว้ในวัสดุพรุนนั่นเอง ทำให้ส่วนผสมมีอุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงจุดติดไฟอัตโนมัติ (Auto-ignition Temperature) เกิดการติดไฟ (Ignition) แล้วตามด้วยการเผาไหม้ (Combustion) ความร้อนจากการเผาไหม้ส่วนหนึ่งจะถูกคืนกลับมาสะสมอยู่ในวัสดุพรุนอีกครั้งเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะแก๊ส-ของแข็ง (Gas-solid Phase Interaction) โดยความร้อนจะถ่ายโอนจากแก๊สไปสะสมไว้ในช่องว่างที่ของแข็งเป็นการทำงานที่ครบวัฏจักรอย่างสมบูรณ์ ทำให้การเผาไหม้ดำรงอยู่ได้ด้วยตัวเอง (Self-sustaining Combustion) ตรวจจับยังมีการป้อนเชื้อเพลิงเหลวและอากาศเข้าสู่วัสดุพรุนตลอดช่วงคาบเวลาที่พิจารณา

จากแนวคิดดังกล่าวสามารถสร้างอุปกรณ์การทดลองจริงได้ดังแสดงในรูปที่ 1 เตาเผาไหม้มีลักษณะเป็นท่อรูปตัว U มีส่วนประกอบที่สำคัญสามส่วนคือ วัสดุพรุน (Porous Medium, PM) จำนวนสองชุดคือ PM A และ PM B เหตุผลที่มีสองชุดเพื่อการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียสู่เชื้อเพลิงเหลวและอากาศอย่างมีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องอาศัยวาล์วสลับทิศทางการไหล (Alternating Valves) ของทั้งอากาศและเชื้อเพลิง มีห้องภาชนะความร้อน (Water Coils) เพื่อการใช้ประโยชน์ ขั้นตอนหลักทั้งสามดังกล่าวข้างต้นจะเกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนแต่ละชุดสลับไปมาขึ้นกับทิศทางการไหลของอากาศและเชื้อเพลิง ซึ่งถูกควบคุมโดยวาล์วสลับทิศทางการไหล ระยะเวลาการสลับทิศทางการไหลเรียกว่า Half-period ( $t_{hp}$ ) เช่น เมื่ออากาศและเชื้อเพลิงไหลผ่าน PM A PM A จะทำหน้าที่เป็นหัวเผา ในขณะที่ PM B จะทำหน้าที่เป็นตัวกักเก็บความร้อนเพื่อทำหน้าที่เป็นหัวเผาในจังหวะสลับทิศทางการไหลต่อไปเมื่ออากาศและเชื้อเพลิงไหลผ่าน PM B ทั้ง PM A และ PM B ทำจาก Packed Bed ของก้อนหินขนาด 10 mm ข้างล่างวัสดุพรุนแต่ละชุดคือปริมาตรว่างเปล่ามีการป้อนอากาศหมุนวนเข้ามาเพื่อทำหน้าที่เป็นห้องเผาไหม้เพื่อการอุ่นเตาตอนเริ่มต้นด้วยเชื้อเพลิง



รูปที่ 2 แนวคิดสามเหลี่ยมปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะของระบบ CFRC สำหรับเชื้อเพลิงเหลว

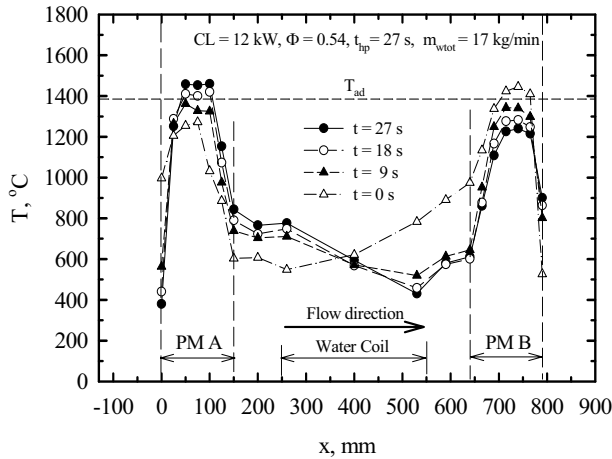
แก๊ส ในส่วนนี้จะมี Ignition Port เพื่อช่วยในการจุดเตาโดยสอดเปลวไฟ ล้อผ่านเข้าไป มี Water Coils ทำหน้าที่ดูดซับความร้อนจากแก๊สไอเสีย เพื่อการใช้ประโยชน์ มีสองชุด แต่ละชุดแยกเป็นอิสระกันและติดตั้งอยู่คนละด้านของบริเวณส่วนโค้งรูปตัว U ของเตา อัตราการไหลน้ำรวมของ Water Coils ( $m_{w,tot}$ ) ทั้งสองกำหนดให้คงที่

วิธีการทดลอง กำหนดให้การไหลของอากาศตามแนวแกน (Axial Air) ในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาเรียกว่า Forward Flow ในขณะที่ทิศทางการไหลตามเข็มนาฬิกาเรียกว่า Backward Flow การติดเตาโดยตรงจากเชื้อเพลิงเหลวไม่สามารถทำได้เพราะไม่ได้อาศัยการสเปร์ย์ ดังนั้นต้องมีการอุ่นเตาให้ร้อนเสียก่อนโดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สสูงๆ สิ่งสำคัญคือต้องทำให้เกิดการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนทั้งสองชุดแบบสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะโดยใช้เชื้อเพลิงแก๊สให้ได้เสียก่อนแล้วจึงเริ่มป้อนและเพิ่มอัตราการไหลเชื้อเพลิงเหลว ขณะเดียวกันก็ห้หรืออัตราการไหลเชื้อเพลิงแก๊สร่วมปรับค่า Equivalence ratio,  $\Phi$  อย่างเหมาะสมเพื่อรักษาสภาพการเผาไหม้ที่ดี ทำเช่นนั้นเชื้อเพลิงแก๊สปิดสนิท จึงได้การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะอย่างในที่สุด การเผาไหม้จะดำเนินไปอย่างต่อเนื่องตรงตามที่มีการป้อนอากาศและเชื้อเพลิงเหลวเข้าสู่เตาสลับไปมาตลอดเวลา

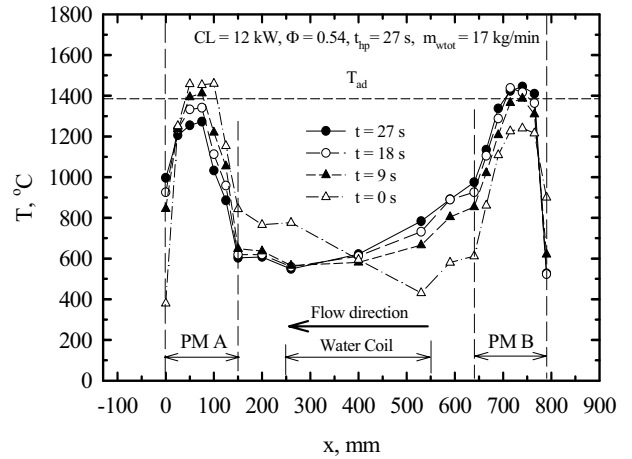
### 3. ผลการทดลอง

ปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุน เช่น การสะสมความร้อน การอุ่น การระเหย และการเผาไหม้สามารถทราบได้จากการศึกษาการแปรเปลี่ยนอุณหภูมิ (T) ภายในวัสดุพรุนเทียบกับเวลา (t) ที่ Heat Supply (CL),  $t_{hp}$ ,  $\Phi$  และ  $m_{w,tot}$  คงที่

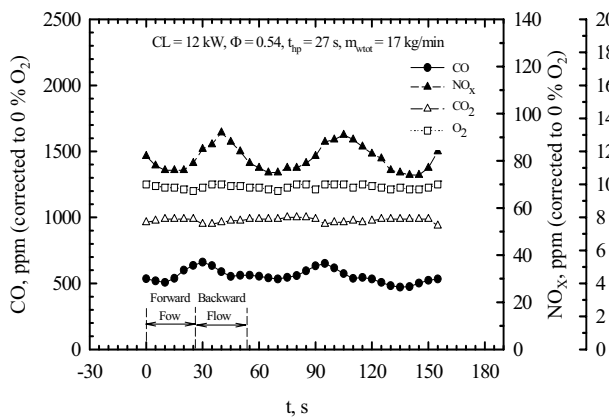
รูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงตัวอย่างการแปรเปลี่ยน T ภายในวัสดุพรุนเทียบกับ t ของการไหลแบบ Forward Flow และ Backward Flow ตามลำดับ ที่เงื่อนไขการทดลองเดียวกันคือ CL = 12 kW,  $\Phi = 0.54$ ,  $t_{hp} = 27$  s. และ  $m_{w,tot} = 17$  kg/min เนื่องจากในแต่ละทิศทางการไหลให้แนวโน้มเหมือนกัน จึงอธิบายเฉพาะทิศทางการไหลเดียวคือ Forward Flow ตามรูปที่ 3



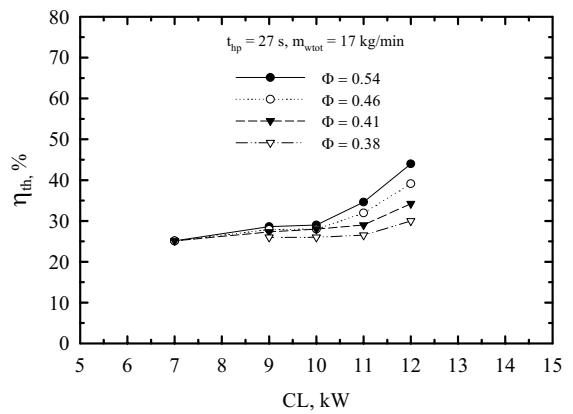
รูปที่ 3 T แปรเปลี่ยนตาม x ที่ t ใดๆ (Forward Flow)



รูปที่ 4 T แปรเปลี่ยนตาม x ที่ t ใดๆ (Backward Flow)



รูปที่ 5 ตัวอย่างปริมาณ CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> และ O<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา t ใดๆ



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน  $\eta_{th}$  ที่ CL และ  $\Phi$  ต่างๆ (Forward Flow)

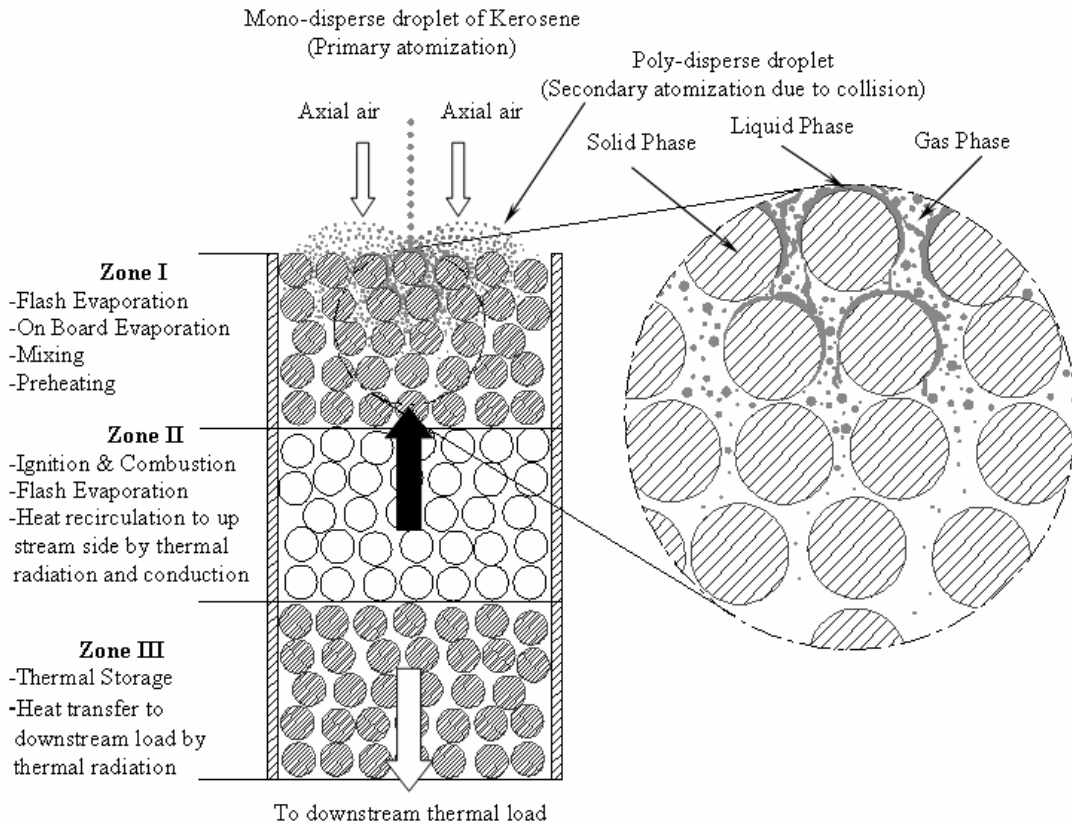
ที่  $t = 0$  s. คือการเริ่มต้นของ Forward Flow กราฟนี้แสดงให้เห็นว่า PM A มีการสะสมความร้อนที่มากเพียงพอที่จะระเหยเชื้อเพลิงเหลวได้ สังเกตได้จากทางเข้าของ PM A ( $x = 0$ ) มี T สูงถึง  $1,000$  °C และสูงถึง  $1,280$  °C ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของ PM A ซึ่งสูงกว่า Ladenfrost Temperature มาก

ที่  $t = 9$  s T ที่บริเวณต้นทาง ( $0 \leq x \leq 25$ ) T จะลดลงอย่างมากเนื่องจากเป็นบริเวณเย็นตัว (Cooling Zone) ของ PM A แสดงถึงการอุ่น และการระเหยเกิดขึ้นในบริเวณนี้ เกรเดียนต์ของ T ที่สูงขึ้นขึ้นแสดงถึงการติดไฟตามด้วยการเผาไหม้ อุณหภูมิสูงสุด  $T_{max}$  ที่ตอนกลางของ PM A แสดงถึงบริเวณการเผาไหม้ (Combustion Zone) ขณะเดียวกันการเพิ่มขึ้นของ T ทางด้านปลายของ PM A ( $25 \leq x \leq 150$ ) แสดงถึงบริเวณให้ความร้อน (Heating Zone) ของ PM A การสะสมความร้อน (Thermal Storage) ของวัสดุพอร์นจะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ เกรเดียนต์ของ T ที่ค่อยๆลดลงไปทางด้านปลายของคอยล์น้ำแสดงให้เห็นว่ามีการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปสู่คอยล์น้ำส่วนที่ PM B

จะเกิดบริเวณเย็นตัวด้านต้นทาง ( $640 \leq x \leq 765$ ) และเกิดบริเวณให้ความร้อนทางด้านปลายทาง ( $765 \leq x \leq 790$ ) อย่างพร้อมกัน ในบริเวณนี้  $T_{max}$  จะลดลงเพราะไม่เกิดการเผาไหม้ และทางด้านปลายทางนี้เองจะเป็นบริเวณที่มีการสะสมความร้อนเช่นกันเพื่อใช้ในการส่งเสริมการระเหยและการเผาไหม้ในจังหวะถัดไป

ที่  $t = 18$  s. เป็นสภาวะที่พัฒนามาจากเวลา  $t = 9$  s PM A ส่งเสริมการระเหยและการเผาไหม้ได้ดี  $T_{max}$  พุ่งสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ PM B จะสะสมความร้อนเพิ่มขึ้นมากในบริเวณด้านปลายทาง แก๊สเผาไหม้จะถ่ายโอนความร้อนสู่คอยล์น้ำเพิ่มมากขึ้นตามเกรเดียนต์ T ที่เพิ่มขึ้นกับ t

ที่  $t = 27$  s. เป็นเวลาสุดท้ายของการทำงานในจังหวะ Forward Flow ก่อนสลับทิศทางการไหลเพื่อเริ่มต้นจังหวะ Backward Flow สังเกตจาก T ของการเผาไหม้ใน PM A ได้เพิ่มขึ้นสูงสุดเพื่อถ่ายเทความร้อนสู่คอยล์น้ำ ขณะเดียวกันการสะสมความร้อนใน PM B ก็มากที่สุดเช่นกัน สำหรับการดำเนินงานในจังหวะ Backward Flow ก็สามารรถ



รูปที่ 7 การจำลองปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นในวัสดุพอร์ซเลน [4]

อธิบายได้เช่นเดียวกับจังหวะ Forward Flow

เมื่อระบบทำงานสลับไปมาอย่างเป็นจังหวะระหว่าง Forward Flow และ Backward Flow ด้วยค่า  $t_{hp}$  ที่กำหนดแล้วจะก่อให้เกิด Heat Re-circulating Combustion เนื่องจากมีความร้อนส่วนหนึ่งถูกหมุนเวียนอยู่ในระบบตลอดเวลาเพื่อใช้ส่งเสริมการถ่ายโอนความร้อนและการเผาไหม้ ความร้อนดังกล่าวคือความร้อนที่ถูกสะสมไว้ในวัสดุพอร์ซเลนนั่นเอง ทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่ได้สูงกว่าค่าแอดิเยแบติก ( $T_{ad}$ )

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างปริมาณ CO, NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> และ CO<sub>2</sub> ที่เปลี่ยนแปลงไปตาม t CO ก่อนข้างสูงประมาณ 500 ppm อาจเนื่องมาจากการผสมไม่คอยดี ขณะที่ NO<sub>x</sub> ต่ำประมาณ 80 ppm CO ได้รับอิทธิพลจากการสลับทิศทางไหลของเชื้อเพลิงและอากาศอย่างเป็นจังหวะมากที่สุด ในบรรดาแก๊สไอเสียจนแกว่งลักษณะคล้ายกับ Sine Curve

รูปที่ 6 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อน  $\eta_{th}$  ที่ CL และ  $\Phi$  ต่างๆ พบว่า  $\eta_{th}$  เพิ่มขึ้นตาม CL ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อ CL > 9 kW เป็นต้นไป  $\eta_{th}$  เพิ่มขึ้นอย่างมากตาม  $\Phi$  ที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด อย่างไรก็ตาม  $\eta_{th}$  ที่ได้ค่อนข้างต่ำอาจเนื่องมาจาก พื้นที่การถ่ายโอนความร้อนและเกรเดียนต์ T ที่ต่ำของ Water Coil

จากหลักฐานการวัด T เทียบกับ t ใน PM A (รูปที่ 3) และ PM B (รูปที่ 4) สามารถจำลองแสดงปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นอย่างซับซ้อนภายในวัสดุพอร์ซเลนหนึ่งอันใดก็ได้ซึ่งเหมือนกัน ให้ปรากฏเห็นอย่างเป็น

รูปธรรมได้ดังรูปที่ 7 [4] ซึ่งแบ่งออกได้ 3 Zones ได้แก่

Zone I เรียกว่า Cooling Zone เพราะความร้อนถ่ายโอนจากของแข็งร้อน (วัสดุพอร์ซเลน) ให้แก่อากาศและน้ำมันก๊าดสูงซึ่งเย็น T ของอากาศและน้ำมันก๊าดสูงซึ่งเย็นของวัสดุพอร์ซเลนลง สิ่งนี้ไปสู่ปรากฏการณ์ 4 ประการอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ประการที่หนึ่ง Preheating เกิดจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะทั้งสาม ได้แก่ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สซึ่งอยู่ในสภาวะ Thermal Non-equilibrium ประการที่สอง Flash Evaporation ของละอองขนาดใหญ่ที่ชนกับวัสดุพอร์ซเลนร้อน หรือของแผ่นของเหลวหนา (Thick Liquid Sheath) (เกิดจากการรวมตัวของละออง) ไหลสัมผัสวัสดุพอร์ซเลนร้อนและซึมลึกลงไปตามโพรงของวัสดุพอร์ซเลนร้อนนั้น ประการที่สาม Onboard Evaporation ของละอองขนาดเล็กมากที่ไหลไปพร้อมกับอากาศและเล็ดลอดไปตามโพรงของวัสดุพอร์ซเลนร้อนโดยไม่มีโอกาสชนกับวัสดุพอร์ซเลน และประการสุดท้ายคือ Mixing ระหว่างไอระเหยของเชื้อเพลิงและอากาศ ความเป็นเนื้อเดียวกันขึ้นกับลักษณะการระเหย ความดันไอ (Vapor Pressure) ของน้ำมันก๊าด และระดับความปั่นป่วน (Turbulence) ภายในโพรงของวัสดุพอร์ซเลน

Zone II เรียกว่า Combustion Zone เกิดการติดไฟและตามด้วยการเผาไหม้เนื่องจากอิทธิพลการอุ่นส่วนผสมจนมีอุณหภูมิสูงถึงจุดติดไฟด้วยตัวเอง นอกจากนี้ยังอาจมีการระเหยแบบ "Flash Evaporation" เกิดขึ้นใน Zone II นี้ก็ว่าได้หากการระเหยเกิดไม่สมบูรณ์ภายใน Zone I ทำให้ต้องมาระเหยต่อใน Zone II ใน Zone II นี้ ความร้อนส่วนหนึ่งจะ

ถูกหมุนเวียนกลับไปให้ด้านต้นทาง (Zone I) โดยการแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อนผ่านโครงสร้างของวัสดุพอร์นเพื่อส่งเสริมการอุ่น ส่วนผสมใน Zone I ให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงจุดติดไฟอัตโนมัติและตามด้วยการเผาไหม้ ความร้อนส่วนที่เหลือจะถูกถ่ายโอนไปสู่ Zone III

ใน Zone III เรียกว่า Heating Zone ประกอบด้วยการสะสมความร้อน (Thermal Storage) เพราะความร้อนถูกถ่ายโอนจากแก๊สให้กับวัสดุพอร์น ทำให้วัสดุพอร์นในโซน Zone III นี้ร้อนขึ้นอย่างรวดเร็ว ขณะเดียวกันวัสดุพอร์นใน Zone III นี้ก็จะแผ่รังสีความร้อนออกไปทั้งทางด้านปลายทางให้กับภาระความร้อน (Downstream Thermal Load) และด้านต้นทางเพื่อสภาวะสมดุลความร้อน

ขอบเขตของโซนทั้งสามอาจอยู่กึ่งๆกัน หรือเคลื่อนที่ไปทางด้านปลายทางตามเวลา  $t$  ที่เพิ่มขึ้นก็ได้ ขึ้นกับความเร็วการไหลของแก๊ส เมื่อเทียบกับความเร็วการเผาไหม้ (Burning Speed) ภายในวัสดุพอร์น เมื่อเวลาผ่านไปจนครบครึ่งคาบเวลา  $t = t_{hp}$  เป็นอันจบการทำงานในจังหวะ Forward Flow จากนั้นจึงสลับทิศทางการไหลของอากาศและน้ำมันให้ทำงานในจังหวะ Backward Flow (PM B) ผลการทำงานในจังหวะ Backward Flow สามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับการทำงานในจังหวะ Forward Flow (PM A) เมื่อการไหลเกิดครบทั้ง Forward Flow และ Backward Flow โดยใช้เวลา  $t = 2t_{hp}$  แล้ว ถือว่าเป็นการทำงานที่ครบ วงจรอย่างสมบูรณ์ทำให้ได้สภาพการเผาไหม้ที่ดำรงอยู่ได้ด้วยตัวเอง (Self-sustaining Combustion) トラบที่ยังมีการป้อนอากาศและน้ำมันก็าดเข้าสู่วัสดุพอร์นแบบสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะตลอดเวลา

#### 4. สรุป

ประสบความสำเร็จในการพัฒนาแนวคิดใหม่ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวในวัสดุพอร์นแบบสลับทิศทางการไหลอย่างเป็นจังหวะ

(CFRC) เข้าใจการเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ คือ การอุ่น การระเหย การผสม การติดไฟตามการเผาไหม้ภายในวัสดุพอร์นอย่างดี ได้เปลวไฟมีเสถียรภาพดีมาก ได้การเผาไหม้แบบมีการหมุนเวียนความร้อนภายใน จึงให้อุณหภูมิสูงสุดของการเผาไหม้สูงกว่าค่าทางทฤษฎีมาก ให้ปริมาณ  $NO_x$  ต่ำ แต่ CO ก่อนข้างสูง และประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงน่าพอใจในระดับหนึ่ง ซึ่งจากสภาวะการทำงานที่เหมาะสมที่  $CL = 12$  kW,  $\Phi = 0.54$ ,  $t_{hp} = 27$  s. และ  $m_{wot} = 17$  kg/min มีการปลดปล่อยปริมาณ CO และ  $NO_x$  ต่ำสุดอยู่ที่ 500 และ 80 ppm ตามลำดับ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนอยู่ที่ 44 % แต่จำเป็นต้องหาทางพัฒนาให้ดีกว่านี้ต่อไป ระบบ CFRC นับเป็นพื้นฐานอย่างดีของการพัฒนาระบบการเผาไหม้ขั้นสูงและทันสมัยในอนาคต

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Jugjai, N. Polmart., Enhancement of evaporation and combustion of liquid fuels through porous media, Exp. Therm. Fluid Sci. 27 (2003), pp. 901-909.
- [2] S. Jugjai, W. Supawit, T. Tawan and L. Kalayarat, The surface combustor-heater with cyclic flow reversal combustion, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 25, October 2001, pp. 183-192.
- [3] S. Jugjai, S. Anantachai, The surface combustor-heater with cyclic flow reversal combustion embedded with water tube bank, Fuel, Vol. 83, December 2004, pp. 2369-2379.
- [4] M. Kaviany, 1995, Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer-Verlag, New York, Inc., pp. 603-675.