

การเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้โดยใช้วัสดุพรุน

Increasing the Combustion Efficiency by Using Porous Media

ฐกฤต ปานชลิบ *

Thakrit Panklib *

หลักสูตรการจัดการพลังงานและสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม

Energy and Environmental Management Program, Graduate School, Siam Technology College

*Corresponding author, E-mail: drthakrit@gmail.com

บทคัดย่อ

ปริมาณการใช้พลังงานของประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และส่วนใหญ่จะต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศในรูปแบบผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม แม้ว่าประเทศไทยจะมีแหล่งทรัพยากรด้านพลังงานของตนเอง อาทิเช่น แก๊สธรรมชาติ น้ำมันดิบ และถ่านหิน แต่ก็ยังไม่พอเพียงกับความต้องการและการใช้งานภายในประเทศซึ่งเพิ่มขึ้นทุกๆปี และมีแนวโน้มว่าจะเกิดการขาดแคลนในอนาคต ดังนั้นการใช้พลังงานที่อย่างมีประสิทธิภาพ การค้นคว้าเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อใช้ทรัพยากรที่เหลืออยู่อย่างคุ้มค่าจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่ง ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการเผาไหม้แบบหลายสถานะในวัสดุพรุน ซึ่งพบว่าการเผาไหม้ดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง ในขณะที่ปลดปล่อยมลภาวะสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ไนโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ในปริมาณที่ต่ำ แต่เนื่องจากความเร็วในการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้โดยปกติทั่วไป จึงทำให้สามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่เจือจางหรือค่าความร้อนต่ำได้เป็นอย่างดี

บทความทางวิชาการนี้ได้นำเสนอถึงคุณสมบัติในเชิงกายภาพของวัสดุพรุน กระบวนการหรือกลไกการเผาไหม้ การศึกษาค้นคว้าและการทดลองที่เกี่ยวข้อง รวมถึงคุณลักษณะพิเศษที่สำคัญต่างๆ ของวัสดุพรุน เช่น การหมุนเวียนความร้อน ความร้อนขณะเกิดการเผาไหม้ ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ รวมถึงการสรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาในเทคโนโลยีดังกล่าวต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: การเผาไหม้ วัสดุพรุน การเผาไหม้แบบหลายสถานะ

Abstract

The total energy consumption in Thailand has been continually increasing. Most of the fuel used in Thailand is imported such as petroleum products. Although Thailand can provide some of its own energy resources such as natural gas crude oil and coal, the domestic energy resources are not sufficient because of the increasing demand and the limitation of these energy resources. So, utilization of remaining energy efficiency and researching new technologies for energy conservation becomes absolutely necessary. In the last few decades, many researchers have been studied in the field of multiphase combustion within porous media, due to its clean and highly efficient. The burning velocities are higher than normal combustion, extended lean flammability limits, and high radiant output with low emissions of pollutants such as NO_x and CO. This paper reviews the physical properties and combustion processes within porous media, and describes related experimental and study. Including the unique of porous

media such as heat re-circulating combustion, internal heat recirculation in porous burner, the burner performance and conclusions.

Keywords: Combustion, Porous medium, Multiphase combustion

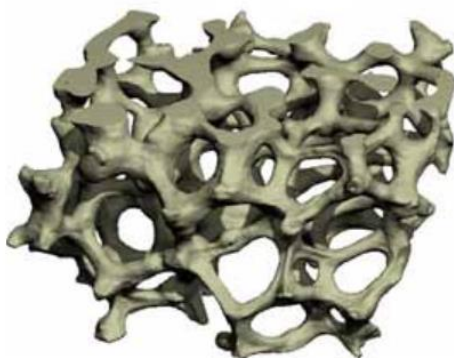
1. บทนำ

สถานการณ์ด้านพลังงานในปัจจุบัน ความต้องการและปริมาณการใช้พลังงานของประเทศเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเฉลี่ย 6.42 เปอร์เซ็นต์ ในแต่ละปี [1] ที่สำคัญจำเป็นต้องนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นปริมาณมาก ส่วนใหญ่อยู่ในรูปผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม แม้ว่าประเทศไทยจะมีแหล่งพลังงานของตนเอง อาทิเช่น แก๊สธรรมชาติ และน้ำมันดิบจากอ่าวไทย ถ่านหินจากภาคเหนือ แต่ก็ยังไม่พอเพียงกับการใช้งานภายในประเทศ มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่ใช้ทั้งหมดภายในประเทศ ถูกใช้ไปกับ 3 ภาคส่วนที่สำคัญ คือ ภาคพลังงานไฟฟ้า ภาคการขนส่ง และภาคการผลิต [2] ส่งผลให้ปริมาณพลังงานสำรองของประเทศและโลกลดลงอย่างต่อเนื่อง และยังส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมซึ่งเกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลกันมาเป็นเวลานานโดยปราศจากการควบคุมที่ถูกต้อง และได้ปลดปล่อยแก๊สไอเสียสู่สภาพแวดล้อม เช่น CO_2 และ N_2O ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดปัญหาสภาวะเรือนกระจกในปัจจุบัน จากเหตุผลดังกล่าวทำให้มีความจำเป็นในการค้นคว้าหาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้และใช้พลังงานที่ยังคงเหลืออยู่อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด Jugjai, S., et al, (1998) [3] ได้ประสบความสำเร็จในการทดลองเพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการเผาไหม้แบบที่มีทั้งสถานะแก๊สและของแข็งอยู่รวมกัน (Multiphase combustion) ซึ่งเทคนิคการเผาไหม้ดังกล่าว กระทำโดยเผาไหม้ในวัสดุพูน (Porous medium) ที่ทนความร้อน จากผลการวิจัยพบว่าวัสดุพูนมีคุณสมบัติพิเศษในการสะสมพลังงานและแผ่รังสีออกมา ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้และการถ่ายเทความร้อนได้เป็นอย่างดี

โดยในการศึกษานี้จะนำเสนอเกี่ยวกับชนิดและคุณลักษณะพิเศษของวัสดุพูน กลไกการเผาไหม้ การเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้โดยวัสดุพูน ผลงานการวิจัยที่ผ่านมา รวมถึงแนวทางในการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวต่อไปในอนาคต

2. วัสดุพูน

วัสดุพูน (Porous medium) คือของแข็งที่มีลักษณะคล้ายกับฟองน้ำ ภายในมีช่องว่างหรือรูพูนกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอเป็นโครงข่ายทั่วทั้งวัสดุ คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุพูนหรือมีความพูน (Porosity) หรือมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตร (Area to volume ratio) สูง โดยโครงสร้างภายในของวัสดุพูนมีลักษณะดังแสดงไว้ในภาพที่ 1 ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ในหลากหลายรูปแบบ แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงการนำมาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้เท่านั้น ซึ่งวัสดุพูนดังกล่าวผลิตจากส่วนประกอบที่มีความแข็งแรงและทนต่อความร้อน และจากการที่มีพื้นที่ผิวมากจึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) สูงขึ้นตามไปด้วย รวมถึงมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนโดยกระบวนการอื่นๆ คือ การนำความร้อน (Conduction heat transfer) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) ในเวลาเดียวกัน จึงอาจกล่าวได้ว่าภายในตัวของวัสดุพูนเองมีคุณลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ที่มีประสิทธิภาพ โดยวัสดุพูนที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ จะต้องผลิตจากวัสดุทนความร้อนได้สูง (High temperature resistant) มีความยืดหยุ่นและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของห้องเผาไหม้ได้เป็นอย่างดี [4-5]



ภาพที่ 1 ลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุพูน

2.1 วัสดุพื้นฐานที่ใช้เป็นส่วนประกอบของวัสดุพูน

วัสดุที่นำมาผลิตเป็นวัสดุพูนเพื่อใช้ในการเผาไหม้ในปัจจุบัน มีอยู่หลายประเภททั้งที่เป็นโลหะและอโลหะ แต่ในปัจจุบันเซรามิกนับเป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากอุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ภายในวัสดุดังกล่าวมีความเสถียร โดยมีวัสดุพื้นฐานที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตด้วยกัน 3 ชนิด คือ อะลูมินา (Al_2O_3) เซอร์โคเนียม (ZrO_2) และ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) [6-7]

อะลูมินา (Alumina) เป็นวัสดุที่ถูกเลือกในการนำไปประยุกต์ใช้กับหัวเผาในรูปแบบพร้อมใช้งาน (Packed bed) มีความทนทาน แข็งแรง ทนอุณหภูมิได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาทางเคมีได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่มีอยู่ต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (Thermal shock) ได้ไม่ดีนัก แต่อย่างไรก็ตามอะลูมินาก็ยังคงได้รับความนิยมเพื่อใช้ในการเผาไหม้เบื้องต้นและเหมาะสมอย่างยิ่งในส่วนของ การเพิ่มความร้อนในระยะแรกของห้องเผาไหม้วัสดุพูน

เซอร์โคเนียม (Zirconia) ทนต่อความร้อนได้ดีมาก โดยอาจนำไปผสมกับอะลูมินาเพื่อใช้ในส่วนของห้องเผาไหม้ แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ยังคงต่ำ และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเฉียบพลันได้ไม่ดีเช่นกัน ส่วนใหญ่มักถูกใช้ในการเผาไหม้เบื้องต้นและการเพิ่มความร้อนในระยะแรกก่อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เท่านั้น

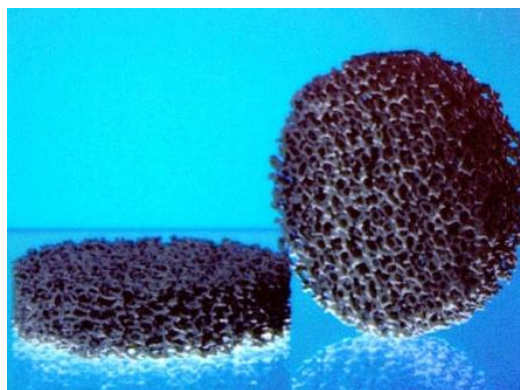
ซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon-Carbide) ทนต่อความร้อนได้ดีที่สุด มักนำไปใช้ในส่วนประกอบที่สำคัญในห้องเผาไหม้ มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ดี และทนต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแบบเฉียบพลัน (Thermal shock) ได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดในด้านของการสึกกร่อนเมื่อใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง

2.2 รูปแบบโครงสร้างของวัสดุพูนที่ใช้ในงานในปัจจุบัน

แบบแรกเป็นโครงสร้างวัสดุพูนแบบแยกจากกัน (Discrete Elements) นิยมใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการเผาไหม้ในวัสดุพูน อาจมีลักษณะเป็นทรงกลม (Ceramic balls) รูปทรงก้อนกรวด (Ceramic pebbles) รูปทรงอานม้า (Ceramic saddles) หรือรูปทรงอื่นๆ ตามความเหมาะสม ดังแสดงในภาพที่ 2 แม้ว่าในปัจจุบันการออกแบบห้องเผาไหม้ที่นิยมใช้วัสดุพูนที่มีโครงสร้างแบบชิ้นเดียวมากกว่า แต่ก็ยังมีความจำเป็นในเรื่องของการศึกษา ค้นคว้า และการวิจัย ส่วนแบบที่สองเป็นโครงสร้างวัสดุพูนแบบชิ้นเดียวหรือแบบโครงข่าย (Cellular Structures) รูปแบบนี้เป็นที่นิยมมากที่สุดใน การประยุกต์ใช้กับการเผาไหม้ในวัสดุพูน ซึ่งมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายไปทุกที่มากกว่า 70 % ของปริมาตร โดยตัวอย่างวัสดุพูนเซรามิกที่มีโครงสร้างเป็นโครงข่ายดังแสดงในภาพที่ 3

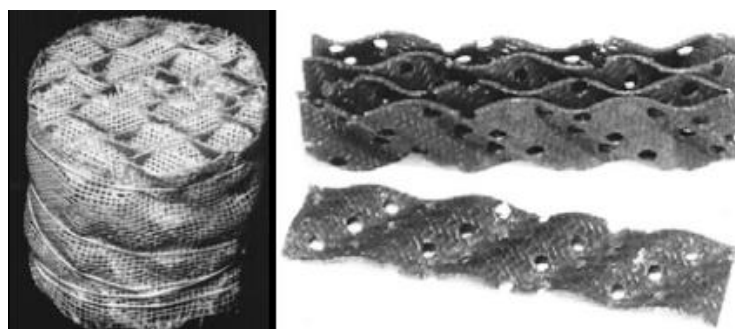


ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างวัสดุพูนแบบแยกจากกัน รูปทรงอานม้า (Ceramic saddles) ขณะใช้งาน



ภาพที่ 3 ลักษณะโครงสร้างวัสดุพูนแบบชิ้นเดียว ผลิตจากซิลิคอนคาร์ไบด์

โดยภาพแสดงให้เห็นโครงสร้างของวัสดุที่มีโพรงหรือช่องเชื่อมต่อกันตลอดทั้งก้อนช่วยทำให้แก๊สเชื้อเพลิงและอากาศผสมกันได้อย่างดี มีน้ำหนักเบา และแรงดันตกคร่อมห้องเผาไหม้น้อย ทำให้เป็นที่นิยมในการนำไปประยุกต์ใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามข้อด้อยโครงสร้างแข็งดังกล่าวก็คือเรื่องของความทนทาน โดยแบบโครงสร้างเป็นโครงข่ายใช้เผาไหม้ในกรณีที่คุณสมบัติที่สูงได้เป็นอย่างดี และแบบที่สามเป็นโครงสร้างวัสดุพูนแบบผสม (Mixer Structures) โครงสร้างดังกล่าวพบเห็นกันบ่อยๆ ในงานวิจัย ซึ่งเป็นการผสมผสานกันระหว่างชั้นบางๆ แบบสามมิติ ดังแสดงในภาพที่ 4

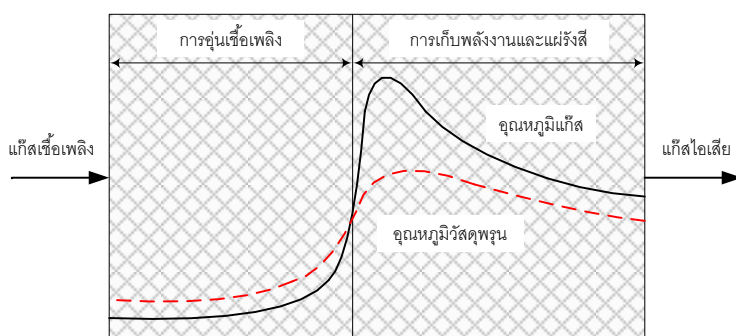


ภาพที่ 4 ลักษณะโครงสร้างวัสดุพูนแบบผสม ผลิตจากอะลูมินาและซิลิคอนคาร์ไบด์

ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นบางๆ ของแข็งรูปคลื่น ที่ถูกเจาะให้เป็นรู อาจทำจากโครงสร้างที่เป็นโลหะหรือเซรามิกก็ได้ โครงสร้างประเภทนี้มีคุณลักษณะความพรุน (Porosity) สูง มีพื้นผิวสัมผัสมาก และมีคุณสมบัติในการแผ่รังสี (Radiation) เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดบางประการก็คือคุณสมบัติในการถ่ายเทความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอตลอดเนื้อของวัสดุ [8]

3. คุณลักษณะพิเศษของวัสดุพรุน

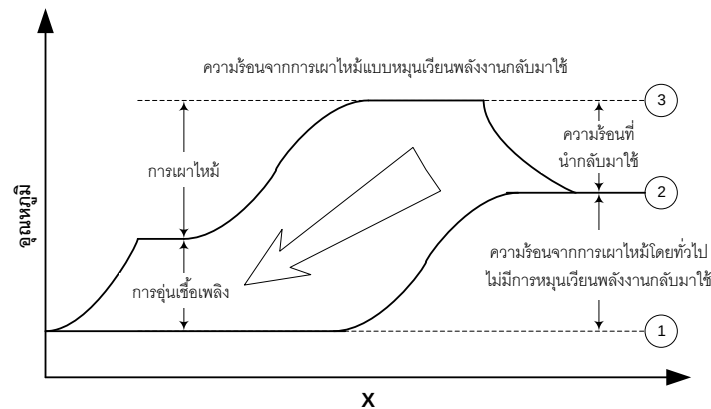
วัสดุพรุนมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปของพลังงานความร้อนได้เป็นอย่างดี โดยเมื่อแก๊สร้อนไหลผ่าน โครงสร้างของวัสดุพรุนซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็งและมีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วหรือมีพื้นผิวต่อปริมาตรมากๆ ที่บริเวณ ปลายทาง (Down-stream) จะมีการดูดซับหรือถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection) ไปยังวัสดุพรุน หลังจาก ที่วัสดุพรุนดูดซับเอนทาลปีหรือพลังงานของแก๊สร้อน (Enthalpy of hot gas) จะทำให้แก๊สร้อนที่ไหลผ่านมีอุณหภูมิลดต่ำลง โดยเอนทาลปีของแก๊สร้อนที่ถูกดูดซับเอาไว้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานในรูปของการแผ่รังสีความร้อน (Radiation heat transfer) และการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ย้อนกลับไปยังต้นทาง (Upstream) และเมื่อเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ ระบบจากต้นทาง (Upstream) วัสดุพรุนก็จะทำหน้าที่อุ่น (Preheat) ให้เชื้อเพลิงที่ไหลเข้าสู่ระบบมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น จึงอาจ กล่าวได้ว่าวัสดุพรุนมีคุณสมบัติเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ในตัวที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดเล็กกะทัดรัดอีกประเภท โดยกระบวนการดังกล่าวได้แสดงไว้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงการดูดซับพลังงานของแก๊สร้อนแล้วถ่ายเทโดยการนำและการแผ่รังสีความร้อน
ย้อนกลับไปยังต้นทางในวัสดุพรุน

Weinberg. (1971) ได้เสนอแนวคิดวิธีการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนกลับมาใช้ภายใน (Internal heat recirculation combustion) [9] ซึ่งกระบวนการดังกล่าวก็คือ การนำเอาความร้อนจากบริเวณเปลวไฟมาอุ่นไอดีหรือแก๊ส เชื้อเพลิงที่ไหลเข้ามาสู่ระบบก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ โดยจะมีการดูดซับเอาความร้อนบางส่วนจากไอเสียคืนกลับเข้าสู่ระบบการเผาไหม้ด้วยวัสดุพรุน โดยเรียกระบบการเผาไหม้ดังกล่าวว่า “Excess enthalpy combustion” ซึ่งแสดงได้ดัง ภาพที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของระบบที่มีการหมุนเวียนพลังงานความร้อนกลับมาใช้ (Heat recirculation) โดยวัสดุพรุน และระบบการเผาไหม้โดยทั่วไป โดยอุณหภูมิในตำแหน่งที่ (1) คืออุณหภูมิห้อง ส่วนตำแหน่งที่ (2) คือ อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้โดยทั่วไปหรืออุณหภูมิทางทฤษฎี (Adiabatic temperature) และตำแหน่งที่ (3) คืออุณหภูมิจากระบบที่มีการหมุนเวียนพลังงานความร้อนกลับมาใช้ในการเผาไหม้ โดยระบบจะนำความร้อนบางส่วนจากแก๊สไอเสีย ก่อนที่จะออกจากระบบมาใช้ในการอุ่น (Preheat) เชื้อเพลิงและอากาศที่เข้าสู่ระบบให้ร้อนขึ้นก่อนเข้าสู่กระบวนการเผาไหม้ ทำให้อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้สูงกว่าอุณหภูมิทางทฤษฎี (Super adiabatic temperature) หรือการเผาไหม้โดยทั่วไป เท่ากับว่าหากพิจารณาแบบที่มีขนาดเท่ากัน อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้ในระบบที่ใช้วัสดุพรุนจะสูงกว่า และที่สำคัญ

ระบบดังกล่าวยังสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมเจือจาง (Lean) หรือมีค่าความร้อน (Heating value) ต่ำๆ ได้เป็นอย่างดีขณะที่ระบบการเผาไหม้แบบปกติไม่สามารถกระทำได้ [10]



ภาพที่ 6 แสดงการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนนำเอาพลังงานความร้อนกลับมาใช้

โดยหากพิจารณาความสัมพันธ์ของ ปฏิกริยาการเผาไหม้ การถ่ายเทความร้อนทั้งในส่วนที่เป็นแก๊ส (เชื้อเพลิงและไอเสีย) และในส่วนที่เป็นของแข็ง (วัสดุพูน) สามารถอธิบายโดยสมการแสดงความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้อง โดยจะแยกพิจารณาเฉพาะในส่วนที่สำคัญหลักได้ดังต่อไปนี้

สมการแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในเชิงกายภาพ (Species equation)

$$\rho \frac{\partial y}{\partial t} + \rho u \frac{\partial y}{\partial x} = D\rho \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + W \quad (1)$$

โดยที่ อัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ $W = A\rho(1 - Y)\exp(-E / RT)$ (2)

สมการแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในสถานะแก๊ส (Gas phase equation)

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u c_p \frac{\partial T}{\partial x} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + h_o w - h_p n_p A_p (T - T_s) \quad (3)$$

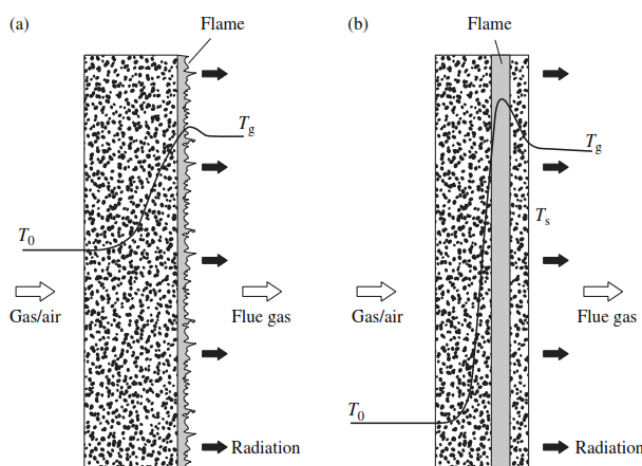
สมการแสดงความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในสถานะของแข็ง (Solid phase equation)

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} - \frac{\partial q_r}{\partial x} + h_p n_p A_p (T_s - T) \quad (4)$$

4. การประยุกต์ใช้วัสดุพูน

จากคุณลักษณะพิเศษของวัสดุพูน ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ช่วยให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นสูงกว่าการเผาไหม้แบบปกติที่สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (High combustion intensity) และค่าความเข้มในการแผ่รังสีความร้อนที่สูง แต่อีกสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคงเป็นเรื่องของการนำไปประยุกต์ใช้

งาน เมื่อนำวัสดุพูนไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ ปฏิบัติการเผาไหม้หรือเปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากการเผาไหม้โดยทั่วไป โดยได้แบ่งรูปแบบการเกิดการเผาไหม้ออกเป็น 4 ลักษณะคือ (1) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นที่ผิวของวัสดุพูน (Surface flame) (2) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนและต่อเนื่องจนถึงบริเวณผิวของวัสดุพูน (3) การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพูนทั้งหมด (Matrix stabilized or embedded flame) (4) การเผาไหม้แบบขาดเสถียรภาพ (Unstable Combustion) หรือ การเกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Flash back) เนื่องจากความเร็วของการเผาไหม้ (Flame speed) มีค่ามากกว่าความเร็วของแก๊สเชื้อเพลิง โดยความแตกต่างระหว่างการเกิดเปลวไฟที่ผิวของวัสดุพูน (a) และการเกิดเปลวไฟที่อยู่ภายในวัสดุพูน (b) รวมถึงกราฟแสดงความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิแก๊สที่ไหลผ่านวัสดุพูนและบริเวณที่เกิดการเผาไหม้ ได้แสดงไว้ในภาพที่ 7 [11]



ภาพที่ 7 (a) การเกิดเปลวไฟที่ผิวของวัสดุพูน และ (b) การเกิดเปลวไฟที่อยู่ภายในวัสดุพูน

โดยจากภาพจะเห็นได้ว่าการเกิดการเกิดเปลวไฟที่อยู่ภายในวัสดุพูนจะมีข้อได้เปรียบในการหมุนเวียนพลังงานความร้อนได้ดีกว่าในกรณีการเกิดเปลวไฟที่ผิวของวัสดุพูน เนื่องจากวัสดุพูนที่อยู่ในบริเวณด้านหลังของเปลวไฟจะทำหน้าที่ดูดซับเอาพลังงานความร้อนของแก๊สไอเสียหลังการเผาไหม้ก่อนไหลออกจากวัสดุพูน ซึ่งสังเกตได้ว่าอุณหภูมิของแก๊สไอเสียที่ไหลออกจากระบบจะลดต่ำลง โดยพลังงานความร้อนที่ถูกดูดซับไว้ในส่วนนี้จะถูกหมุนเวียนกลับไปอุ่นแก๊สเชื้อเพลิงใหม่ที่เข้าสู่ห้องเผาไหม้ โดยการรังสีและการนำความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของวัสดุพูนนั่นเอง ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ในกรณีการเกิดเปลวไฟในวัสดุพูนสูงกว่า

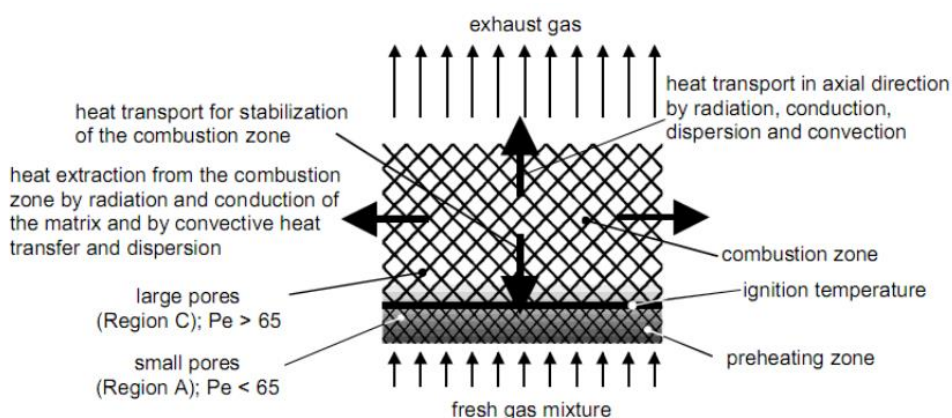
ในขณะที่เดียวกันเปลวไฟจะเกิดขึ้นภายในวัสดุพูนได้อย่างมีเสถียรภาพ ภายในวัสดุพูนเองก็ต้องมีโครงสร้างที่เหมาะสม จะต้องมีความสมดุลระหว่างความร้อนที่หมุนเวียน (Heat recirculation) ความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปฏิบัติการเผาไหม้ (Heat release) และความร้อนที่สูญเสีย (Heat losses) โดยองค์ประกอบต่างๆ ล้วนมีความสำคัญ และจะต้องควบคุมให้เหมาะสม ซึ่งการควบคุมรูปแบบการเกิดการเผาไหม้ให้เหมาะสมและตรงกับความต้องการเพื่อการใช้ประโยชน์สามารถทำได้ในหลายวิธี แต่พื้นฐานสำคัญที่จำเป็นต้องเข้าใจเพื่อที่จะควบคุมรูปแบบการเผาไหม้ก็คือ เคลื่อนที่หรือการลามของเปลวไฟ (Propagation flame)

Babkin et al. (1991) [12] ได้ทำการศึกษาการเผาไหม้และการลามของเปลวไฟ (Propagation flame) ภายในวัสดุพูน โดยสรุปว่าการลามของเปลวไฟในวัสดุพูนนั้น สามารถระบุได้โดยตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า Peclet number (P_e) ซึ่งนิยามไว้ว่า

$$P_e = \frac{S_L D_M \rho C_p}{k}$$

โดยที่	S_L	คือ Laminar flame speed
	D_M	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างเสมือน (Equivalent pore diameter)
	C_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส (Specific heat of gas)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของแก๊ส (Density of gas)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของแก๊ส (Thermal conductivity of gas)

โดยจากงานวิจัยระบุไว้ว่า หาก P_e น้อยกว่าหรือเท่ากับ 65 เปลวไฟจะดับ (Flame quenching) และหาก P_e มากกว่า 65 เปลวไฟจะติดและลามได้ (Flame propagate) จากหลักการดังกล่าวนำไปสู่การออกแบบและประยุกต์ใช้วัสดุพรุนในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ในหลายรูปแบบ และนำไปสู่การออกแบบห้องเผาไหม้วัสดุพรุนแบบสองตอน (Bi-layered porous burner) ที่เสนอโดยนักวิจัยจาก University of Erlangen-Nuremberg โดย Durst et al. (2002) [13] ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุพรุนสองชั้น ชั้นแรกจะถูกติดตั้งทางด้าน Upstream จะมีขนาดช่องว่างที่เล็ก โดยให้มีค่า P_e น้อยกว่า 65 เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการย้อนกลับของเปลวไฟ (Flash back) เข้าไปยังบริเวณที่แก๊สเชื้อเพลิงไหลเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ทั้งนี้เพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน ส่วนชั้นที่สองจะถูกติดตั้งทางด้าน Downstream ซึ่งจะมีช่องว่างขนาดใหญ่กว่า โดยออกแบบให้มีค่า P_e มากกว่า 65 ดังแสดงในรูปที่ 8



ภาพที่ 8 กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพรุนแบบสองตอน

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

จากคุณลักษณะพิเศษของวัสดุพรุน คือสามารถทำหน้าที่เสมือนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนภายในตัว อีกทั้งยังช่วยให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในระบบได้เป็นอย่างดี ทำให้อุณหภูมิของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นสูงกว่าการเผาไหม้แบบปกติที่สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ค่าความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) ค่าความเข้มของการเผาไหม้ (High combustion intensity) รวมถึงค่าความเข้มในการแผ่รังสีความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้ระบบดังกล่าวสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำๆ ได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ระบบเผาไหม้ทั่วไปไม่สามารถทำได้ และที่สำคัญ การเผาไหม้

ดังกล่าวปลดปล่อยมลพิษหรือมลภาวะสู่สภาพแวดล้อมต่ำกว่าการเผาไหม้โดยทั่วไป จึงนับว่าเป็นการช่วยลดต้นตอหรือสาเหตุสำคัญของการเกิดปัญหามลภาวะเรือนกระจกในปัจจุบัน

แม้ว่าการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วัสดุพูนในการเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้จะเกิดขึ้นมากมายในช่วงระยะเวลาที่ผ่านมา แต่ก็ยังถูกจำกัดไว้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น เนื่องจากระบบดังกล่าวยังคงมีความซับซ้อนและยุ่งยากต่อการควบคุม ซึ่งหากมีการส่งเสริมให้มีการศึกษาและพัฒนากันอย่างจริงจัง เกี่ยวกับการนำมาประยุกต์ใช้อย่างเป็นรูปธรรม ก็มีความเป็นไปได้สูงในการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในแต่ละภาคส่วน ตั้งแต่ ภาคครัวเรือน เช่น ประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์หุงต้มต่างๆ เครื่องทำน้ำร้อน เครื่องปรับอากาศ หรือในภาคอุตสาหกรรม ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ขนาดกลาง ขนาดเล็ก รวมถึงอุตสาหกรรมในครัวเรือน เช่น เตาเผา เครื่องอบแห้ง หม้อต้มน้ำร้อน เครื่องผลิตไอน้ำ เครื่องกำเนิดความร้อนประเภทต่างๆ ระบบผลิตไฟฟ้าที่จะต้องเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ หรือแม้กระทั่งในภาคขนส่ง ก็คือการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องยนต์สันดาปภายใน โดยหากมีการนำไปใช้ประโยชน์กันอย่างจริงจังในทั่วทุกภาคส่วน เท่ากับว่าเป็นการช่วยยืดระยะเวลาให้กับพลังงานสำรองประเภทต่างๆ ของโลกที่กำลังจะหมดลง ด้วยการใช้องค์ความรู้ที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด รวมถึงยังเป็นการช่วยลดมลภาวะให้กับสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย ทั้งนี้เพื่อลูกหลานและเยาวชนรุ่นต่อไปในอนาคต

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Panklib, C. Prakasvudhisarn, & D. Khummongkol. (2011). Electricity Consumption Forecasting in Thailand, Using Artificial Neural Network and Multiple Linear Regression, Energy Sources Part B, 559520. doi:10.1080/15567249.2011.
- [2] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2007). Thailand's Energy Conservation and Renewable Energy Development Program 2008-2011, Bangkok: Ministry of Energy.
- [3] Jugjai, S., et al, 'Heat transfer Enhancement to Cooling Water Pipe by a Surface Combustor Heater Equipped with a Convection-Radiation Converter', RERIC International Energy Journal, Vol. 20, No. 2, pp 91-105, December, 1998.
- [4] Weclas, M., Porous media in internal combustion engines, [in:] Cellular Ceramics Structure, Manufacturing, Properties and Applications, Scheffler, M., Colombo, P. (eds), Wiley-VCH-Publ.2005.
- [5] Weclas, M., New strategies for homogeneous combustion in I.C. engines based on the porous medium (PM)-technology, ILASS Europe, June 2001.
- [6] Afsharvahid, S., Dally, B.B. & Christo F.C. (2003). On the Stabilization of ultra-lean methane and propane flames in porous media. The 4th Asia-Pacific Conference on Combustion, Nanjing, China, August 18-21.
- [7] Trimis, D. & Durst, F. (1996). Combustion in a porous medium: Advance and applications. Combustion Science and Technology, 121, 153-168.
- [8] C. Tierney and A.T. Harris. (2009). Journal of the Australian Ceramic Society Volume 45 [2], 2009, 20-29.
- [9] Weinberg, F.J. (1971). Combustion temperature: the future?. Nature, 233, 239-241.

- [10] Wongwatcharaphon, K. (2011). Numerical Simulation of High Efficiency Porous Burner for Liquid Fuel Combustion without Spray Atomization. D.Eng. Mechanical Engineering Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- [11] Vafai, K. (2005). Handbook of porous media (2nded.). Taylor and Franscis, USA.
- [12] Babkin, V.S., Korzhavin, A.A. & Buner, V.A. (1991). Propagation of premixed explosion flames in porous media. Combustion and Flame, 87, 182-190.
- [13] Durst, F. & Trimis, D. (2002). Combustion by free flames versus combustion reactors. Clean Air, 3, 1–20.