

หัวเผาวัสดุพรุนสมรรถนะสูง

High Performance Porous Burner

กนกกาญจน์ ว่องวัชรพร วศ.ด. (Kanokkarn Wongwatcharaphon, D.Eng., ME)¹

บทคัดย่อ

ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา มีนักวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการเผาไหม้ภายในวัสดุพรุนแบบเปลวชนิดผสมมาก่อน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่สะอาดและมีประสิทธิภาพสูง ภายในหัวเผาวัสดุพรุนจะมีการหมุนเวียนความร้อนผ่านโครงสร้างของของแข็งจากด้านหลังเปลวไฟไปสู่บริเวณด้านหน้าเปลวไฟ ด้วยการแผ่รังสีความร้อนและการนำความร้อนในเนื้อของแข็ง ทำให้ได้การเผาไหม้ในลักษณะ excess enthalpy flames ซึ่งการเผาไหม้ที่ได้จะมีความเร็วของเปลวไฟสูงกว่าการเผาไหม้ในบรรยากาศเปิดทั่วไป ขอบเขตการเผาไหม้ที่กว้าง ประสิทธิภาพการแผ่รังสีสูง ในขณะที่การปลดปล่อยมลภาวะต่างๆ ในโตรเจนออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ ในบทความนี้ได้นำเสนอข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการการเผาไหม้ในวัสดุพรุนที่ศึกษาด้วยการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ รวมถึงความรู้เกี่ยวกับวัสดุพรุน หลักการหมุนเวียนความร้อนในการเผาไหม้ การหมุนเวียนความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพรุน หัวเผาวัสดุพรุน สมรรถนะของหัวเผาวัสดุพรุน

คำสำคัญ: การเผาไหม้ วัสดุพรุน หัวเผาวัสดุพรุน

Abstract

In the last few decades, many researchers have been studied in the field of premixed flame within porous media, due to its clean and highly efficient. In a porous burner, the solid matrix re-circulates heat from the post-flame to the pre-flame zone through solid-to-solid radiation and conduction leading to excess enthalpy flames. These results in burning velocities are higher than those for a free flame, extended lean flammability limits, and high radiant output with low emissions of pollutants such as NO and CO. This paper reviews the processes associating with combustion within porous media, and describes related experimental and modeling study. The properties of porous materials, heat re-circulating combustion, internal heat recirculation in porous burner, the burner performance and conclusions.

Keywords: Combustion, Porous medium, Porous burner

¹ อาจารย์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



บทนำ

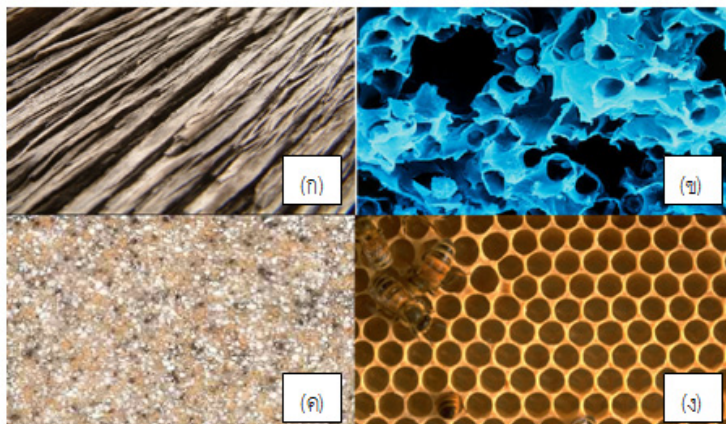
ปัจจุบันการใช้พลังงานของโลกได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil fuel) เพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีในเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานความร้อนเป็นหลัก โดยมีการนำพลังงานจากแหล่งดังกล่าวไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การผลิตกระแสไฟฟ้า การขนส่ง กระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรม และการหุงต้ม เป็นต้น ซึ่งจากสถิติที่ผ่านมา พบว่า แนวโน้มการบริโภคพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งเป็นพลังงานสิ้นเปลืองสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มขึ้นของประชากรโลก ทำให้ประสบปัญหาการขาดแคลนพลังงานประกอบกับปริมาณสำรองของเชื้อเพลิงฟอสซิลลดน้อยลง ผลักดันให้ราคาเชื้อเพลิงสูงขึ้นตามอุปสงค์พลังงาน นอกจากนี้ผลกระทบที่ตามมาของไอเสียซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ (NO_x) ยังเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกในปัจจุบัน (ลำเรียง จักรใจ, 2547) จากการศึกษาเชิงสถิติในช่วง 150 ปีที่ผ่านมา พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (Jones et al., 1999) ทำให้สมดุลตามธรรมชาติเสียไป โดยทุกประเทศทั่วโลกต่างต้องเผชิญกับปัญหาสภาพอากาศอันเลวร้าย ภาวะภัยแล้ง ฝนตกนอกฤดูกาล น้ำท่วมฉับพลัน และการเกิดภัยธรรมชาติบ่อยครั้งและรุนแรงมากขึ้น รวมถึงประเทศไทยก็ได้รับผลกระทบดังกล่าวอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ อันจะเห็นได้จากมหาอุทกภัยครั้งใหญ่ที่เกิดขึ้นในประเทศเมื่อปลายปี พ.ศ. 2554 ที่ผ่านมา (Peterson et al., 2012)

จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงเป็นแรงผลักดันให้นักวิทยาศาสตร์จำนวนมากทั่วโลกต่างพยายามศึกษาหาแนวทางเพื่อสร้างเทคโนโลยีการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพื่อนำไปสู่การใช้พลังงานที่มีคุณค่าและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ หัวเผาวัสดุพรุนเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งของการเผาไหม้สมัยใหม่ที่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากวัสดุพรุนมีความสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนระหว่างการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นหากเกิดการเผาไหม้ขึ้นภายในวัสดุพรุน จะเกิดการอุ่นไวดีด้วยความร้อนจากไอเสียโดยอาศัยกลไกการถ่ายเทความร้อนของตัววัสดุพรุนเอง โดยไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมในกระบวนการการเผาไหม้แต่อย่างใด บทความวิชาการฉบับนี้มีจุดประสงค์ที่จะนำเสนอหลักการและข้อมูลที่สำคัญของเทคโนโลยีการเผาไหม้ในวัสดุพรุน เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดความรู้ในการรับมือกับปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของโลกต่อไป

วัสดุพรุน (Porous medium)

วัสดุพรุน คือ ของแข็งที่ภายในเนื้อวัสดุมีช่องว่างหรือรูพรุนที่เชื่อมต่อกันเป็นโครงข่าย (Nield & Bejan, 2006) วัสดุพรุนตามธรรมชาติ เช่น ไม้ เนื้อเยื่อปอดของมนุษย์ หินทราย และรังผึ้ง (แสดงดังภาพที่ 1) สมบัติที่สำคัญของวัสดุพรุนคือ มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (Area to volume ratio) ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสูง อีกทั้งวัสดุพรุนเป็นของแข็งที่มีค่าการนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนสูง ทำให้วัสดุพรุนสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้ดีระหว่างความร้อนในรูปของการพาและ

การแผ่รังสี จึงกล่าวได้ว่าวัสดุพอร์ซันเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดกะทัดรัด อย่างไรก็ตามแม้ว่าวัสดุพอร์ซันจะมีอยู่มากมายหลายชนิด แต่วัสดุพอร์ซันที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ ต้องทำมาจากวัสดุที่มีความต้านทานอุณหภูมิสูง (High temperature resistant) และมีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถทนทานต่อการแตกร้าวเนื่องจากการยืดหรือหดของโครงสร้างวัสดุพอร์ซันในช่วงเริ่มทำงาน (Startup) และ ช่วงดับเตา (Shutdown)



ภาพที่ 1 วัสดุพอร์ซันตามธรรมชาติ ก) ไม้ ข) เนื้อเยื่อปอดมนุษย์
ค) หินทราย ง) รังผึ้ง ที่มา : Wongwatcharaphon, 2011

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO₂) (Wongwatcharaphon, 2011)

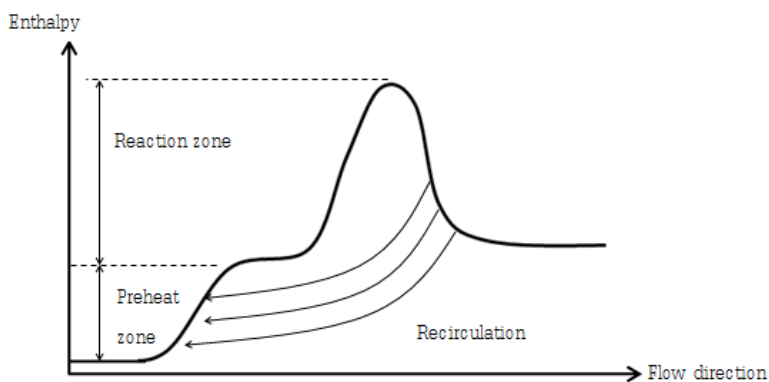
สมบัติ	หน่วย	Al ₂ O ₃	SiC	ZrO ₂
Maximum use temperature in air	°C	1900	1650	1800
Thermal expansion coefficient (20-1000 °C)	10 ⁻⁶ K ⁻¹	8	4-5	10-13
Thermal conductivity at 20 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	20-30	80-150	2-5
Thermal conductivity at 1000 °C	W m ⁻¹ K ⁻¹	5-6	20-50	2-4
Specific thermal capacity	J g ⁻¹ K ⁻¹	0.9-1	0.7-0.8	0.5-0.6
Thermal stress resistance parameter, hard shock, R (σ/Eα)	K	100	230	230
Thermal stress resistance parameter, mild thermal shock, R' (Rλ)	10 ⁻³ W m ⁻¹	3	23	1



วัสดุพื้นฐานหลัก 3 ชนิดที่ใช้ในการผลิตเซรามิกที่ใช้สำหรับเป็นหัวเผาวัสดุพูน ได้แก่ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al_2O_3) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO_2) โดยที่ อะลูมินาออกไซด์ เป็นวัสดุที่ได้รับความนิยมมากที่สุดในการนำไปใช้เป็นหัวเผาวัสดุพูนในรูปแบบของ Packed bed (Afsharvahid et al., 2003; Trimis & Durst, 1996; Xiong et al., 1995) ซิลิคอนคาร์ไบด์มักนิยมนำไปใช้ผลิตเป็นหัวเผาวัสดุพูนในรูปแบบของ Reticulated foams และเมื่อเปรียบเทียบกับ อะลูมินาออกไซด์ พบว่า ซิลิคอนคาร์ไบด์จะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนและ สัมประสิทธิ์การแผ่รังสีความร้อน ที่สูงกว่า จึงได้เปรียบในแง่ของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพูน (Afsharvahid, et al., 2008; Alavandi & Agrawal, 2008) ส่วน เซอร์โคเนียออกไซด์ เหมาะกับการใช้งานที่มีอุณหภูมิสูงๆ เนื่องจากมีความต้านทานอุณหภูมิสูงที่สุด แต่กลับมีค่าการนำความร้อนที่ต่ำที่สุดในบรรดาวัสดุทั้ง 3 ชนิดนี้ (Cannon et al., 2000; DePoorter et al., 1992) ซึ่งการจะเลือกวัสดุใดไปใช้งานนั้นยังต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเผาไหม้ เช่น ชนิดของเชื้อเพลิง อัตราส่วนผสม ภาระทางความร้อน อุณหภูมิการเผาไหม้ ขนาดและรูปร่างของหัวเผา และตำแหน่งของเปลวไฟที่ต้องการ เป็นต้น เนื่องจากรูปร่างและคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุพื้นฐานที่นำมาใช้เป็นหัวเผาวัสดุพูน ส่งผลโดยตรงกับโครงสร้างทางความร้อนของระบบการเผาไหม้ ซึ่งสมบัติเชิงความร้อนที่สำคัญของวัสดุเหล่านี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในตารางที่ 1 เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจในการเลือกใช้งานและออกแบบ

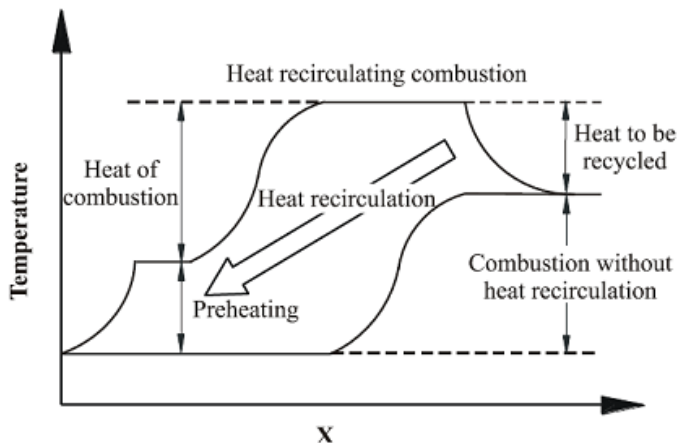
1. หลักการของการเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculating combustion)

Weinberg (1971) ได้เสนอแนวคิด การเผาไหม้ที่มีการหมุนเวียนความร้อนภายใน (Internal heat recirculation combustion) โดยการยืมความร้อน (Borrowed heat) จากบริเวณเปลวไฟเพื่อนำมาอุ่นไอดีที่ไหลเข้าสู่ระบบก่อนเกิดการเผาไหม้และเมื่อเกิดการเผาไหม้เสร็จสิ้นแล้ว ไอดีนั้นจะต้องมีการใช้คืนความร้อนกลับคืนเข้าสู่ระบบก่อนที่จะไหลออกสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่งหลักการของการเผาไหม้แอดเจ็คทีฟแบติกที่มีการหมุนเวียนความร้อนมาใช้ในการอุ่นไอดีแสดงดังภาพที่ 2 Hardesty & Weinberg (1974) ได้เรียกระบบการเผาไหม้ในลักษณะนี้ว่า "Excess enthalpy combustion"



ภาพที่ 2 แสดงหลักการเพิ่มเอนทาลปีในระบบการเผาไหม้ของ Weinberg (1971)

ภาพที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบการทำงานของระบบที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อนโดยพิจารณาให้ระบบทั้งสองทำงานภายใต้สภาวะแอดิแบติก (Adiabatic system) ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ จะไหลเข้ามาทางซ้ายมือแล้วเกิดการเผาไหม้ หากพิจารณาระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนความร้อน (Combustion without Heat Recirculation) กราฟเส้นล่างจะมีอุณหภูมิการเผาไหม้เท่ากับอุณหภูมิทางทฤษฎี (Adiabatic flame temperature) จากนั้นก๊าซไอเสียร้อนจะไหลออกทางด้านขวา เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการเผาไหม้ที่มี การหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculating combustion) ของกราฟเส้นบน ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับ อากาศจะได้รับการอุ่น (Preheating) ให้อุ่นก่อน โดยความร้อนส่วนนี้จะมาจากการอุ่นเตาหรือระบบในตอน แรกเท่านั้น จากนั้นจะเกิดการเผาไหม้ที่ให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าทางทฤษฎี (Adiabatic flame temperature) และก่อนที่ก๊าซไอเสียร้อนออกจากระบบ จะคืนความร้อนหมุนเวียน (Heat recirculation) ส่วน นี้ เพื่อเอาไปอุ่นส่วนผสมที่จะเข้ามาใหม่อย่างต่อเนื่อง โดยความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ยังคงเท่าเดิม (เท่ากับ Heat of combustion) แต่ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าช่วยส่งเสริมการเผาไหม้ ทำให้ทั้งประสิทธิภาพการ เผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบเพิ่มขึ้นรวมถึงความเข้มการเผาไหม้สูง ทำให้สามารถออกแบบ ให้ระบบมีขนาดกะทัดรัดกว่าปกติและขยายขอบเขตการเผาไหม้ในด้านส่วนผสมที่เจือจางมากขึ้น หรืออีกนัย หนึ่งคือเผาเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ๆ เกินกว่าที่ระบบปกติจะสามารถเผาได้ จากหลักการดังกล่าวจึงมีนัก วิจัยจำนวนมากพยายามที่จะศึกษาและนำเสนอรูปแบบการเผาไหม้และหัวเผาชนิดต่างๆ ที่มีการอุ่นส่วนผสม ก่อนการเผาไหม้เพื่อให้ได้การเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง หนึ่งในนั้น คือ เทคโนโลยีหัวเผาวัสดุพอร์ซ

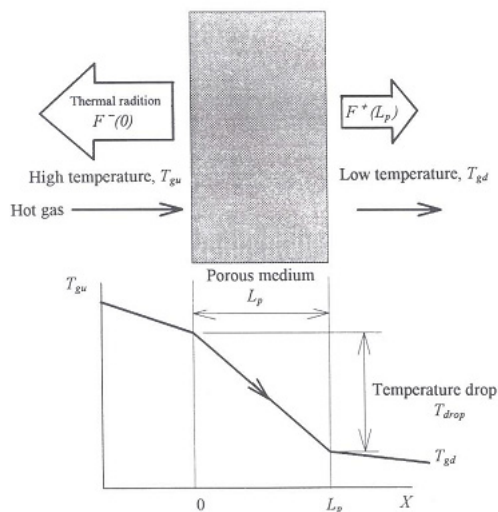


ภาพที่ 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิการเผาไหม้ของระบบที่มีและไม่มี การหมุนเวียนความร้อน
ที่มา : Jugjai และ Pongsai, 2007



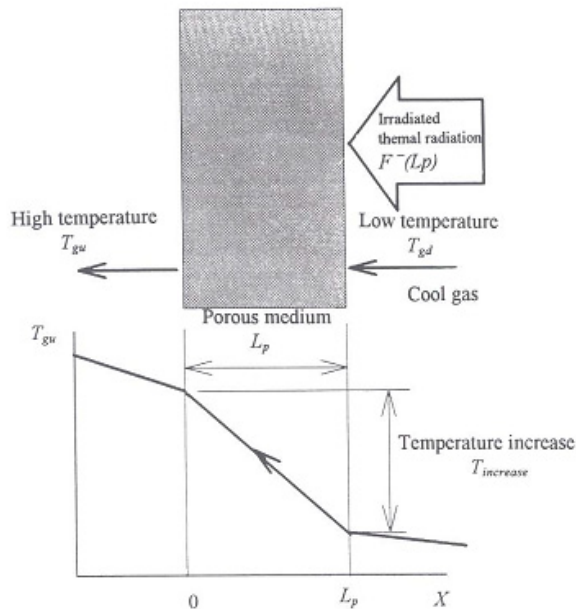
2. หลักการหมุนเวียนความร้อนด้วยวัสดุพรุน

วัสดุพรุนสามารถทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ เนื่องจากมีความสามารถในการเปลี่ยนรูปพลังงานความร้อนได้ดี ระหว่างเอนทัลปีของก๊าซร้อน (Enthalpy of the hot gas) กับพลังงานในรูปของการแผ่รังสี (Thermal radiation) โดยผ่านกลไกของการพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) เนื่องจากวัสดุพรุนเป็นของแข็งที่มีรูพรุนซึ่งของไหลสามารถไหลผ่านได้ทำให้มีข้อดีคือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรมาก ทำให้มีความสามารถในการพาความร้อนได้ดี รวมทั้งลักษณะที่เป็นของแข็งจึงมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการแผ่รังสีสูงกว่าก๊าซมาก หลักการทำงานของวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีแสดงดังภาพที่ 4 เมื่อก๊าซร้อนไหลผ่านวัสดุพรุนที่ตำแหน่ง $X = 0$ ความร้อนจะถูกถ่ายเทจากก๊าซร้อนไปให้กับวัสดุพรุนด้วยการพาความร้อนทำให้อุณหภูมิของก๊าซลดลงเอนทัลปีจากก๊าซร้อนที่ถูกวัสดุพรุนดูดกลืนไว้จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของการแผ่รังสีความร้อนออกทั้งทางด้าน Upstream และ Downstream กรณีดังกล่าวนี้วัสดุพรุนทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี (Emitter) นอกจากนี้วัสดุพรุนยังสามารถทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี (Absorber) ได้อีกด้วย กล่าวคือ เมื่อวัสดุพรุนได้รับพลังงานการแผ่รังสีมาจากแหล่งให้ความร้อน วัสดุพรุนจะดูดซับความร้อนนี้ไว้ทำให้วัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อมีก๊าซเย็นไหลผ่านวัสดุพรุน ก็จะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนจากวัสดุพรุนไปยังก๊าซที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้ก๊าซมีอุณหภูมิสูงขึ้นก่อนไหลออกจากวัสดุพรุน ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 5 จากหลักการข้างต้นจึงกล่าวได้ว่าวัสดุพรุนเป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีขนาดกะทัดรัดอีกด้วย



ภาพที่ 4 หลักการทำงานของวัสดุพรุนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี

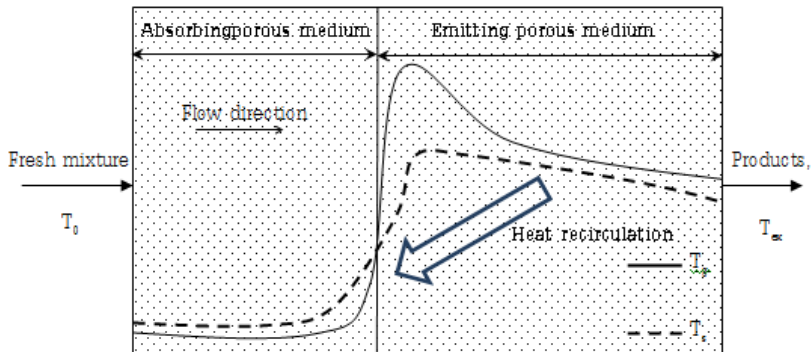
ที่มา : Jugjai et al., 1998



ภาพที่ 5 หลักการทำงานของวัสดุพอร์นที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสี

ที่มา : Jugjai et al., 1998

ดังนั้นหากเรานำวัสดุพอร์นทั้งสองชั้นที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับรังสีและตัวแผ่รังสีมาวางชิดกันแล้วนำมาใช้ประโยชน์เป็นหัวเผา ดังแสดงได้ในภาพที่ 6 โดยให้อิทธิพลผ่านตัวที่ทำหน้าที่รับรังสีได้ดีก็จะได้รับการอุ่นก่อนการเผาไหม้ จากนั้นให้อิทธิพลไหลออกจากด้านวัสดุพอร์นที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีเพื่อดูดซับเอนทาลปีจากไอเสียร้อนเอาไว้ก่อนที่จะไหลออกจากห้องเผาไหม้และนำความร้อนส่วนนี้ไปหมุนเวียนเพื่อใช้ในการอุ่นไอดีในกระบวนการเผาไหม้ต่อไป จากหลักการนี้จะได้อิทธิพลที่มีการหมุนเวียนความร้อนภายในที่มีประสิทธิภาพสูงและขนาดกะทัดรัด โดยไม่มีความจำเป็นต้องติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติมเพื่อใช้ในการอุ่นไอดี นอกจากนี้เนื่องจากการเผาไหม้มีอุณหภูมิที่สูงตลอดห้องเผาไหม้ทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ต่ำ ในขณะที่บริเวณเปลวไฟนั้น ก๊าซร้อนจากการเผาไหม้จะถ่ายเทความร้อนให้กับวัสดุพอร์นอย่างทันทีทันใด ทำให้การปลดปล่อยไนโตรเจนออกไซด์ (NOx) จะมีค่าต่ำ จากเหตุผลข้างต้นสามารถกล่าวได้ว่าหัวเผาวัสดุพอร์นเป็นหัวเผาประสิทธิภาพสูงและที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม



ภาพที่ 6 การหมุนวนความร้อนจากไอเสียไปใช้ในการอุ่นไอดีโดยหัวเผาวัสดุพรุน

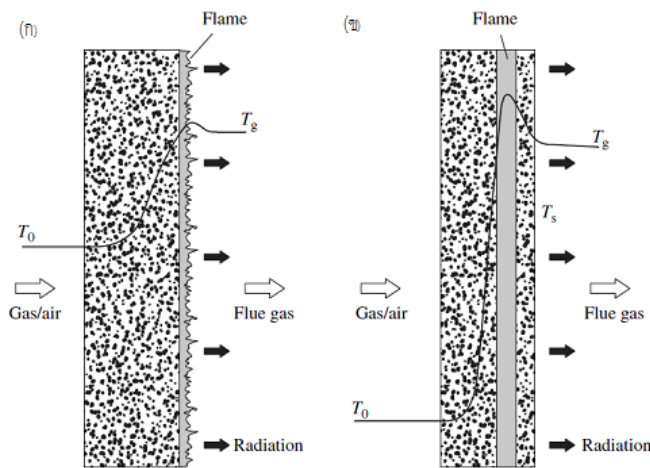
ที่มา : Wongwatcharaphon, 2011

3. หัวเผาวัสดุพรุน (Porous burner)

จากข้อดีของวัสดุพรุนที่ได้กล่าวมาข้างต้น ทำให้ในช่วงไม่กี่ทศวรรษที่ผ่านมา มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้ประยุกต์ใช้หลักการของวัสดุพรุน (Porous Medium) ในการเผาไหม้ เนื่องจากวัสดุพรุนจะช่วยทำให้เกิดการหมุนเวียนความร้อนภายในระบบ ซึ่งมีข้อดีคือ ทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้สูงกว่าการเผาไหม้แบบปกติที่สภาวะเดียวกัน นอกจากนี้ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning Velocity) สูงขึ้น ค่าความเข้มของการเผาไหม้สูง (High combustion intensity) รวมถึงค่าความเข้มของการแผ่รังสีความร้อนที่สูงขึ้นและยังสามารถเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำซึ่งไม่สามารถเผาไหม้ในอุปกรณ์การเผาไหม้แบบปกติได้ (Conventional burner) ทำให้สามารถออกแบบเตาที่มีขนาดกะทัดรัดช่วยลดต้นทุนและพื้นที่ในการติดตั้ง โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงก๊าซกับอากาศในวัสดุพรุนนั้นมีจำนวนมาก ทั้งในลักษณะของการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

จากการศึกษาที่ผ่านมา สรุปได้ว่าการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นในหัวเผาวัสดุพรุนเป็นไปได้ 4 ลักษณะ (Vafai, 2005) ดังนี้ (1) การเผาไหม้เกิดขึ้นที่ผิววัสดุพรุนทั้งหมด (Surface flame) โดยการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยเปลวไฟเล็กๆจำนวนมาก (Small multiple flames) (2) ปฏิกิริยาการเผาไหม้บางส่วนเกิดขึ้นภายในรูพรุน และไอดีที่เหลือจะเกิดการเผาไหม้ต่อที่ผิวของวัสดุพรุน (3) การเผาไหม้ทั้งหมดเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ภายในวัสดุพรุน (Matrix stabilized flame or embedded flame) (4) การเผาไหม้ที่ไม่มีเสถียรภาพ (Unstable combustion) เกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Flame flash-back) เมื่อความเร็วในการเผาไหม้ (Flame-speed) มีค่ามากกว่าความเร็วไหลของส่วนผสม (Flow velocity) ความแตกต่างระหว่างการเกิดเปลวไฟที่ผิววัสดุพรุนกับเปลวไฟที่ฝังอยู่ในวัสดุพรุนแสดงดังภาพที่ 7 จากภาพจะเห็นได้ว่าการเผาไหม้ในกรณีที่เปลวไฟนั้นติดอยู่ในวัสดุพรุนจะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการหมุนเวียนความร้อนได้มากกว่ากรณีที่เปลวไฟ

เกิดขึ้นที่ผิววัสดุพรุน เนื่องจากเนื้อวัสดุพรุนที่อยู่บริเวณด้านหลังเปลวไฟ (Post flame zone) นั้นทำหน้าที่ในการดูดซับเอนทาลปีจากก๊าซร้อนไว้ก่อนที่ไอเสียจะไหลออกนอกวัสดุพรุน ซึ่งสังเกตได้จากอุณหภูมิของก๊าซไอเสียที่ต่ำลง โดยความร้อนส่วนนี้ระบบจะหมุนเวียนไปใช้ในการอุ่นไอดีนั้นเองดังนั้นในกรณีที่คุณภาพของไอดีเดียวกันการเผาไหม้ในกรณีที่เปลวไฟฝังอยู่ในวัสดุพรุนจะให้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีการปลดปล่อยมลภาวะที่ต่ำกว่าด้วย อย่างไรก็ตามการใช้งานในทางปฏิบัติที่ต้องการให้ภาวะทางความร้อนสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรง การเผาไหม้แบบเปลวไฟเกิดที่ผิวหัวเผาวัสดุพรุนจะมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า



ภาพที่ 7 เปลวไฟที่เกิดขึ้น (ก) ที่ผิว (ข) ฝังอยู่ในหัวเผาวัสดุพรุน
ที่มา : Vafia, 2005

ในช่วงแรกหัวเผาวัสดุพรุนจะทำจากวัสดุชนิดเดียวแบบหนึ่งชั้น เรียกว่า Single layer porous burner โดยการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งแบบการเผาไหม้แบบทางเดียว และการเผาไหม้แบบสลับทิศทาง ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Chen et al. (1987), Sathe et al. (1990), Hsu et al. (1993), Yoshizawa et al. (1988) Echigo et al. (1986), De Soete (1966) และ Bubnovich et al. (2006) เป็นต้นจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า เปลวไฟจะสามารถเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้ได้รวมถึง ต้องมีสมดุลของพลังงานระหว่างความร้อนที่หมุนเวียน (Heat recirculation) ความร้อนที่ปลดปล่อยออกมาจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ (Heat release) และความร้อนสูญเสีย (Heat losses) ชนิดของการเกิดเปลวไฟในวัสดุพรุนแบบผสมมาก่อนมีลักษณะเหมือนกับการเผาไหม้แบบผสมมาก่อนที่เกิดขึ้นภายในบรรยากาศเปิดทั่วไปซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ (สำเร็จ จักรใจ, 2547) คือ เปลวไฟแบบอยู่กับที่ (Stationary flame) และ เปลวไฟแบบลามเคลื่อนที่ (Propagation flame) โดยในกรณีที่ความเร็วของ



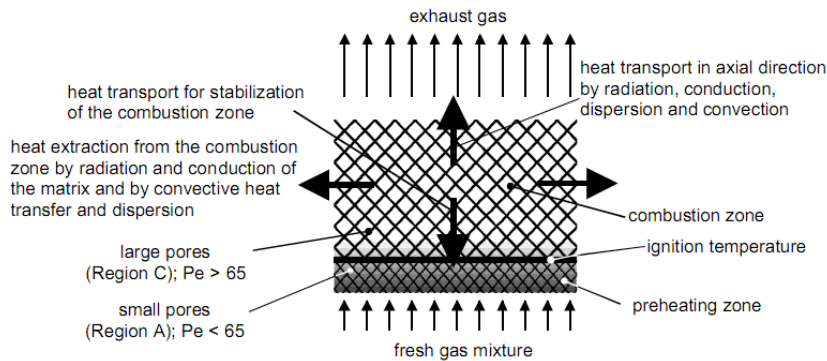
เปลวไฟ (Flame speed) มีค่าเท่ากับ ความเร็วในการไหลของส่วนผสม (Flow velocity) เปลวไฟที่เกิดขึ้นภายในวัสดุพรุนจะมีลักษณะเป็น เปลวไฟแบบอยู่กับที่แต่หากความเร็วของเปลวไฟไม่เท่ากับความเร็วในการไหลของส่วนผสม เปลวไฟก็จะเคลื่อนที่ โดยในกรณีที่ความเร็วในการไหลมากกว่าความเร็วของเปลวไฟนั้น เปลวไฟจะลามไปทางด้าน Downstream ในทางกลับกันหากความเร็วของเปลวไฟมากกว่าความเร็วในการไหล เปลวไฟจะลามไปทางด้าน Upstream ซึ่งดัชนีที่ชี้วัดว่าโครงสร้างของวัสดุพรุนที่พิจารณานั้นสามารถทำให้เกิดเปลวไฟที่เสถียร (Flame stabilization) ได้หรือไม่คือ ขนาดของช่องว่างภายในวัสดุพรุน (Pore size) โดยที่ถ้าขนาดของช่องว่างภายในวัสดุพรุนมีค่าน้อยกว่าขนาดช่องว่างวิกฤต (Critical pore size) เปลวไฟจะดับเนื่องจากถูกหล่อเย็น(Quench)ในทางกลับกันหากขนาดของช่องว่างภายในวัสดุพรุนมีค่ามากกว่าขนาดช่องว่างวิกฤตเปลวไฟจะสามารถลามได้ (Flame propagate)

Babkin et al. (1991) ได้ทำการศึกษาโดยการทดลองของการเผาไหม้แบบเปลวไฟผสมมาก่อนภายในหัวเผาวัสดุพรุน และสรุปผลการศึกษาไว้ว่าการลามได้ของเปลวไฟในวัสดุพรุนสามารถระบุได้จากตัวแปรไร้หน่วยที่เรียกว่า Peclet number (Pe) ซึ่งนิยามไว้ว่า

$$Pe = \frac{s_L d_M c_p}{k} \quad (1)$$

โดยที่	s_L	คือ Laminar flame speed
	d_M	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องว่างเสมือน (Equivalent pore diameter)
	c_p	คือ ความจุความร้อนจำเพาะของก๊าซ (Specific heat of gas)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (Density of gas)
	k	คือ สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของก๊าซ (Thermal conductivity of gas)
ในงานวิจัยนี้ระบุว่า		ในกรณีที่ $Pe \leq 65$ เปลวไฟจะดับ (Flame quenching) ส่วนในกรณีที่ $Pe > 65$ เปลวไฟจะลามได้ (Flame propagate)

จากหลักการของตัวแปรไร้หน่วย Pe ได้นำไปสู่การออกแบบหัวเผาวัสดุพรุนในลักษณะวัสดุพรุนแบบสองตอน (Bi-layered porous burner) ที่เสนอโดยนักวิจัยจาก University of Erlangen-Nuremberg โดย Durst et al. (2002) หัวเผาลักษณะนี้จะประกอบด้วยวัสดุพรุนสองชั้น ส่วนที่ติดตั้งอยู่ทางด้าน upstream จะมีขนาดของช่องว่างที่มีขนาดเล็ก โดยต้องออกแบบให้มี $Pe < 65$ ทำหน้าที่เป็นตัวกั้นไม่ให้เกิดการย้อนกลับของเปลวไฟ(Flash-back)เข้าไปบริเวณที่มีการป้อนส่วนผสมเพื่อความปลอดภัยในการใช้งาน นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการอุ่นส่วนผสมไปในตัวก่อนที่จะเกิดการเผาไหม้ในวัสดุพรุนชั้นที่สองที่ติดตั้งอยู่ทางด้าน downstream ซึ่งจะมีขนาดช่องว่างที่มีขนาดใหญ่ โดยต้องออกแบบให้มี $Pe > 65$ รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 กลไกการถ่ายเทความร้อนภายในหัวเผาวัสดุพรุนแบบสองตอน
ที่มา : Durst and Trimis, 2002

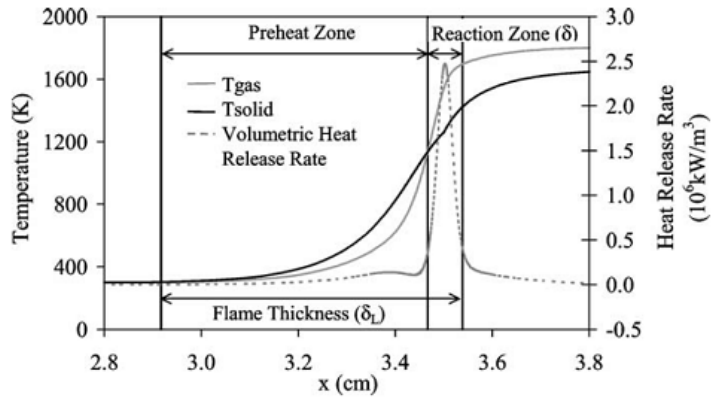
Barra และ Ellzey (2004) ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์ปรากฏการณ์การหมุนเวียนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาวัสดุพรุนซึ่งปริมาณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบ 1 มิติ ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงมีเทน (Methane) กับอากาศแบบเปลวไฟชนิดผสมมาก่อน (Premixed flame) ในวัสดุพรุนแบบสองตอน การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์และพิจารณาการเผาไหม้ของเปลวไฟแบบผสมมาก่อนเหมือนกับการวิเคราะห์ของ Mallard และ Le Chatelier (Glassman, 1996) ดังนี้ เปลวไฟจะถูกแบ่งออกเป็นสองบริเวณคือ Preheat zone และ Reaction zone (ภาพที่ 9) ซึ่งนิยามดังนี้

Preheat zone คือ บริเวณที่อุณหภูมิของก๊าซเริ่มมีค่ามากกว่าอุณหภูมิที่ทางเข้า 1% และสิ้นสุดที่ตำแหน่งที่ก๊าซเริ่มเกิดปฏิกิริยาการเผาไหม้

Reaction zone คือ บริเวณที่ก๊าซเริ่มเกิดการเผาไหม้และสิ้นสุด ณ ตำแหน่งที่ Heat release rate มีค่าเท่ากับศูนย์

ผลการคำนวณอุณหภูมิของก๊าซและของแข็งที่ความเร็วของก๊าซที่ไหลเข้าระบบ 60 cm/s อัตราส่วนสมมูล (equivalence ratio, ϕ) เท่ากับ 0.65 แสดงดังภาพที่ 9

เมื่อเกิดการเผาไหม้ที่บริเวณเปลวไฟ (Reaction zone) อุณหภูมิของก๊าซจะสูงขึ้นมากเกิดการถ่ายเทความร้อนจากเปลวไฟไปยังวัสดุพรุน จากนั้นความร้อนจะถูกถ่ายเทไปยังด้าน Upstream และ Downstream โดยอาศัยการนำและการแผ่รังสีความร้อนไปตามเนื้อวัสดุพรุน ทำให้บริเวณ Pre-Flame อุณหภูมิของของแข็งจะสูงกว่าก๊าซที่ไหลเข้าสู่ระบบ จึงเกิดการถ่ายเทความร้อนจากของแข็ง (เนื้อวัสดุพรุน) ไปสู่ก๊าซซึ่งเป็นการอุ่นไอดีก่อนเกิดการเผาไหม้ ส่วนด้าน Post-Flame เมื่อก๊าซไอเสียจากการเผาไหม้ซึ่งมีอุณหภูมิสูงกว่าของแข็งไหลผ่านวัสดุพรุนออกจากระบบไปยังด้าน Downstream ก็จะมีการถ่ายเทความร้อนไปยังของแข็งทำให้ก๊าซไอเสียมีอุณหภูมิลดลงก่อนไหลออกจากระบบและความร้อนส่วนนี้เองที่จะถูกหมุนเวียนกลับเข้าไปในระบบต่อไป จากผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่ามีการหมุนเวียนความร้อนจากไอเสียไปสู่ไอดีโดยอาศัยวัสดุพรุนเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งจะทำให้ได้อุณหภูมิการเผาไหม้ที่สูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้แอดิเยแบติก



ภาพที่ 9 อุณหภูมิของก๊าซและของแข็งในหัวเผาวัสดุพูน

ที่มา : Barra & Ellzey, 2004

จากผลการศึกษา พบว่ากระบวนการหมุนเวียนความร้อนเกิดขึ้นจากกลไกสำคัญ 2 อย่าง คือ การนำความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนของของแข็งที่สามารถคำนวณหาได้จากการถ่ายเทความร้อนจากเนื้อของแข็งไปให้กับไอที่ที่เกิดขึ้นใน Preheat zone นอกจากนี้ในการศึกษานี้ยังได้แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณหา ประสิทธิภาพของการหมุนเวียนความร้อน (Heat recirculation efficiency) และ ประสิทธิภาพของการแผ่รังสีความร้อน (Output radiant efficiency) ซึ่งเป็นพลังงานส่วนที่สามารถเอาไปใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนกับภาระทางความร้อนที่ต้องการ ไว้ดังนี้

$$\text{Heat recirculation efficiency} = \frac{\text{solid - to - gas convection in preheat zone}}{\text{firing rate}} \quad (2)$$

$$\text{Output radiant efficiency} = \frac{\text{output radiation}}{\text{firing rate}} \quad (3)$$

สมการทั้งสองนี้เป็นสมการที่มีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ปริมาณความร้อนที่สำคัญที่ของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นภายในหัวเผาวัสดุพูน และนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการออกแบบเพื่อการใช้งานในทางปฏิบัติต่อไป

4. สมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูน

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเห็นการรายงานสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพูนมักรายงานอยู่ในรูปของประสิทธิภาพการแผ่รังสี ซึ่งได้นิยามไว้ในสมการที่ (3) และการปลดปล่อยมลภาวะของก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพการแผ่รังสีของหัวเผาวัสดุพูนจะมีช่วงกว้างมากและมีค่าสูงได้ถึง 40% ซึ่งมีความผันผวนสูงเนื่องจากไม่มีมาตรฐานที่แน่นอนในการทดสอบ

รวมถึงความแตกต่างในแง่ของการออกแบบและเงื่อนไขในการทำงาน (Wood & Harris, 2008) โดยที่เงื่อนไขของการเผาไหม้ในกรณีที่ส่วนผสมเจือจาง (Lean mixture) จะมีการปลดปล่อยมลพิษที่ต่ำมากทั้งก๊าซไนโตรเจนออกไซด์และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มีค่าไม่เกิน 40 ppm นอกจากนี้การรายงานสมรรถนะของหัวเผาวัสดุพอร์นอาจรายงานอยู่ในรูปของขอบเขตการเผาไหม้ (Flammability limit) ความเร็วในการเผาไหม้ (Burning velocity) และ Turn down ratio

สรุปและขอเสนอแนะ

การเผาไหม้ภายในหัวเผาวัสดุนั้นเกิดขึ้นในโพรงของเนื้อของแข็ง ขณะเกิดการเผาไหม้จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างแก๊สและเนื้อของแข็ง ทำให้เกิดการเผาไหม้ในลักษณะที่มีการหมุนเวียนความร้อนภายใน การอุ่นส่วนผสมด้วยความร้อนจากแก๊สไอเสียก่อนการเผาไหม้ทำได้โดยอาศัยโครงสร้างของวัสดุพอร์น โดยไม่ต้องมีการติดตั้งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มเติม การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพสูงอุณหภูมิการเผาไหม้ที่ได้มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิการเผาไหม้แอดิแบติก (Adiabatic flame temperature) ทำให้สามารถเผาไหม้ส่วนผสมที่เจือจางที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ด้วยหัวเผาบรยากาศเปิดทั่วไป ทำให้ค่าการปลดปล่อยมลภาวะทั้งไนโตรเจนออกไซด์และคาร์บอนมอนอกไซด์ต่ำ โดยวัสดุพื้นฐานที่ได้รับการนิยมไปผลิตเป็นหัวเผาวัสดุพอร์นในปัจจุบันมี 3 ชนิด คือ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) อะลูมินาออกไซด์ (Al₂O₃) และเซอร์โคเนียออกไซด์ (ZrO₂) ซึ่งการจะเลือกวัสดุใดไปใช้งานนั้นยังต้องตัดสินใจจากปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการเผาไหม้ เนื่องจากรูปร่างและคุณสมบัติเชิงความร้อนของวัสดุพื้นฐาน ส่งผลโดยตรงกับโครงสร้างทางความร้อนของระบบการเผาไหม้ ซึ่งควรมีการศึกษาและวิเคราะห์อิทธิพลของชนิดวัสดุพอร์นด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นำร่องก่อนการออกแบบใช้งานจริงก่อนก็จะทำให้ได้หัวเผาวัสดุพอร์นที่เหมาะสมต่อการใช้งานที่สุดอย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าหัวเผาวัสดุพอร์นมีข้อได้เปรียบมากมายเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเผาบรยากาศเปิดทั่วไป แต่ในแง่ของการใช้งานเชิงปฏิบัติยังมีข้อควรระวังอยู่บ้าง เนื่องจากการเผาไหม้ที่ได้มีความเร็วในการเผาไหม้สูง ในกรณีการเผาไหม้ส่วนผสมมีค่าเข้าใกล้ส่วนผสมทางทฤษฎี (Near stoichiometric mixture) จะควบคุมการเผาไหม้ได้ยาก เนื่องจากเสี่ยงต่อการเกิดการย้อนกลับของเปลวไฟดังนั้นในกรณีที่ต้องการที่จะใช้หัวเผาวัสดุพอร์นเผาไหม้ส่วนผสมดังกล่าว อาจจะต้องมีการพิจารณาการเผาไหม้ที่มีความปลอดภัยสูงชนิดไม่มีการผสมมาก่อน (Non-premixed combustion) แทน ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเปลวไฟชนิดไม่ผสมมาก่อนภายในวัสดุพอร์นยังมีไม่มาก ยังต้องการการศึกษาเพิ่มเติมในอนาคต

รายการอ้างอิง

- ลำเรียง จักรใจ. (2547). **การเผาไหม้**. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Afsharvahid, S., Ashman, P.J., & Dally, B.B. (2008). Investigation of NO_x conversion characteristics in a porous medium. **Combustion and Flame**, **152**, 604-615.



- 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.
- Alavandi, S.K. & Agrawal, A.K. (2008). Experimental study of combustion of hydrogen syngas/methane fuel mixtures in a porous burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, **33**, 1407-1415.
- Babkin, V.S., Korzhavin, A.A. & Buner, V.A. (1991). Propagation of premixed explosion flames in porous media. **Combustion and Flame**, **87**, 182-190.
- Barra, J.A. & Ellzey, L.J. (2004). Heat recirculation and heat transfer in porous burners, **Combustion and flame**. **137**, 230-241.
- Bubnovich, V.I., Zhdanok, S.A., & Dobrego, K.V. (2006). Analytical study of the combustion waves propagation under filtration of methane-air mixture in a packed bed. **International Journal of heat and mass transfer**, **49**, 2578-2586.
- Cannon, R.W., Guge, E., Leimer, & Woetting, G. (2000). Advance structural products. In **Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 7 th ed.** New York: Wiley.
- Chen, Y.K., Matthews, R. D. & Howell, J.R. (1987). The Effect of Radiation on the Structure of a Premixed Flame within a Highly Porous Inert Medium, in Radiation, Phase Change Heat Transfer, and Thermal Systems. **ASME Publication HTD**, **81**, 35-42.
- De Soete, G. (1966). Stability and propagation of combustion waves in inert porous media, **Eleventh Symposium. (Int.) on Combustion, The combustion institute**, 959-966.
- DePoorter, G.L., Brog, T.K. & Ready, M.J. (1992). Properties and application of structural ceramics. **In properties and selection: Nonferrous alloys and special-propose materials, vol. 2 of the ASM handbook**, Materials Park, Ohio, ASM International.
- Durst, F. & Trimis, D. (2002). Combustion by free flames versus combustion reactors. **Clean Air**, **3**, 1-20.
- Echigo, R., Yoshizawa, Y., Hanamura, K. & Tomimura, T. (1986). Analytical and experimental studies on radiative propagation in porous media with internal heat generation, Proc. 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco. **CA**, **2**, 827-832.
- Glassman, I. (1996). **Combustion, Academic Press**. San Diego, p. 127.
- Hardesty, D. R. & Weinberg, F. J. (1974). Burners producing large excess enthalpies. **Combustion Science and Technology**, **8**, 201-214.



- Hsu, P. F., Evans, W. D. & Howell, J. R. (1993). Experiment and numerical study of premixed combustion within Nonhomogeneous Porous Ceramics. **Combustion Science and Technology, 90**, 149-172
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S. & Rigor, I.G. (1999). Surface air temperature and its changes over the past 150 years. **Reviews of Geophysics, 37**, 173-199.
- Jugjai, S. & Pongsai, C. (2007). Liquid fuels-fired porous burner. **Combustion Science and Technology, 179**, 1823-1840.
- Jugjai, S., Sanitjai, S., Aimmanee, S., & Boonprasert, T. (1998). Heat transfer enhancement to cooling water pipe by a surface combustor heater equipped with a convection-radiation converter. **REREC International Energy Journal, 20** (2), 91-105.
- Nield, D.A. & Bejan, A. (2006). **Convection in porous media third edition**. Springer, USA
- Peterson, C.T., Stott, A.P., & Herring, S. (2012). Explaining extreme event of 2011 from a climate perspective. **American Meteorological Society**, 1041-1067.
- Sathe, S. B., Peck, R. E. & Tong, T. W. (1990). Flame stabilization and multi-mode heat transfer in inert porous media, a numerical study. **Combustion Science and Technology, 70**, 93-109.
- Trimis, D. & Durst, F. (1996). Combustion in a porous medium: Advance and applications. **Combustion Science and Technology, 121**, 153-168.
- Vafai, K. (2005). **Handbook of porous media** (2nded.). Taylor and Franscis, USA
- Weinberg, F.J. (1971). Combustion temperature: the future?. **Nature, 233**, 239-241.
- 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.
- Wood, S. & Harris, A.T. (2008). Porous burners for lean-burn applications. **Progress in Energy and Combustion Science, 34**, 667-684.
- Xiong, T-Y, Khinkis, M.J. & Fish, F.F. (1995). Experimental study of a high-efficiency, low emission porous matrix combustor-heater. **Fuel, 74**, 1641-1647.
- Yoshizawa, Y., Sasaki, K. & Echigo, R. (1988). Analytical study of the structure of radiation controlled flame. **International Journal of Heat and Mass Transfer, 31**, 311-319.