

การศึกษาเชิงทดลองคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนไหลของวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์เปิด
คอร์ดิไรท์แผ่นคู่

Experimental Study of Flow Insulation Characteristics of Double Plates
Cordierite Open-Cellular Porous Material

ธีระ สวบลุนทด¹, อมรทัศน์ จั่วแจ่มใส¹, บัณฑิต กฤตาคม², ปรีชา ชันติโกมล^{1*}

¹ห้องปฏิบัติการวิจัยพัฒนาพลังงานทดแทน (REREL) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
²ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาเทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์ (DITOL) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000
ผู้ติดต่อ: preecha@rmuti.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-0470-5287, เบอร์โทรสาร 044-233-074

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงการทดลองของระบบฉนวนความร้อนสำหรับของไหลร้อนเคลื่อนที่ (Flow insulation system) โดยใช้วัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์เปิดคอร์ดิไรท์แผ่นคู่ ถูกทำการศึกษาเพื่ออธิบายคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อน วัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์ที่เลือกใช้ในการทดลองคือ คอร์ดิไรท์ (Cordierite) ที่มีค่าความพรุน (Porosity, f) 0.873 และ 0.875 วัสดุแต่ละแผ่นมีความหนา 10 มิลลิเมตร ในการทดลองวางแผ่นวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์ 2 แผ่น ห่างกัน 1 mm ขวางทิศทางการไหลในแนวตั้งฉาก ใช้อากาศร้อนเป็นสารทำงาน ซึ่งถูกให้ความร้อนโดยตัวทำความร้อนไฟฟ้า โดยการควบคุมการทำงานโดยใช้ชุดควบคุมอุณหภูมิอัตโนมัติ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศร้อนมีการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 3 m³/hr จนถึง 12 m³/hr อุณหภูมิมีการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 200 °C จนถึงอุณหภูมิ 500 °C ผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิตกคร่อมของอากาศผ่านแผ่นวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์และประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงที่ความเร็วอากาศต่ำและอุณหภูมิอากาศขาเข้าแผ่นวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์สูง ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์แผ่นเดี่ยวอย่างเห็นได้ชัด แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์แผ่นคู่มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนได้ดีขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้นและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะลู่เข้าจนสู่ภาวะคงที่

คำหลัก : ฉนวนความร้อนไหล, วัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์เปิด, อุณหภูมิตกคร่อม, วัสดุพอร์ซันิตเซลลูลาร์แผ่นคู่

Abstract

The flow insulation characteristics using double plates ceramic open-cellular porous material was investigated experimentally. Two types of the cordierite open-cellular porous materials having porosity of 0.873 and 0.875 respectively, which each plate have 10 mm thickness, were examined. Double plates porous which 1 mm free space were placed normally to the flow direction. An air was used as working fluid heated by the electric heater which was controlled by the automatic temperature controller. The volume flow rate of the air was varied from 3 m³/hr to 12 m³/hr. The air temperature was varied from 200 °C to 500 °C. The results revealed that the air temperature drop across the porous plates and thermal efficiency were high at low volume flow rate and high temperature. Obviously, they were higher than that of the single plate one. It illustrated that the double plates porous have higher flow insulation characteristics. Also, It then was asymptotic to constant values.

Keywords: Flow insulation, porous materials, open-cell foam, temperature drop

1. บทนำ

การกู้คืนพลังงานจากไอเสียอุณหภูมิสูงมีวิธีการหนึ่งที่จะสามารถนำพลังงานย้อนกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด วัสดุพอรุนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติโดดเด่นด้านการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสต่อหน่วยปริมาตรสูง นอกจากนั้นยังพบอีกว่าวัสดุพอรุนสามารถกักเก็บพลังงานไว้กับตัวเองจากการรับพลังงานจากการพาความร้อนหรือการแผ่รังสีได้เป็นอย่างดี และแผ่รังสีไปสู่สิ่งแวดล้อมรอบๆ ได้ ส่งผลให้ของไหลร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านแผ่นวัสดุพอรุนมีค่าลดลง Kamiuto และคณะ [1, 2] แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอรุนมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดีเยี่ยมโดยเฉพาะโหมดการพาความร้อน ในกรณีความเร็วของไหลสูง ในขณะที่โหมดการแผ่รังสีความร้อนแสดงบทบาทในการถ่ายเทความร้อนได้ดีเยี่ยมที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากวัสดุพอรุนมีพื้นที่ผิวสัมผัสมาก จึงมีการนำมาใช้งานทางด้านเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนเป็นจำนวนมาก

Viskanta [3] ได้ให้ข้อสังเกตไว้ว่าวัสดุพอรุนชนิดนี้มีความพรุนสูง ส่งผลให้มีการถ่ายเทความร้อนได้มาก จึงมีการนำไปใช้งานหลากหลาย ได้แก่ ฉนวนความร้อน (Thermal-insulations) วัสดุซับเสียง (Sound-absorbers) อิเล็กโทรด (Electrodes) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat-exchangers) หัวเผา (Burners) และอุปกรณ์อื่น ๆ โดยทั่วไปแล้ววัสดุพอรุนชนิดเซลล์เปิด (Open-cellular) จะประกอบด้วยโครงสร้างเซลล์สามมิติเหมือนรูปทรงสิบหน้า (Dodecahedron-like) ประกอบด้วยผนังรูปทรงห้าเหลี่ยมหรือหกเหลี่ยมมีพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การสิ้นสุดของการแผ่รังสี (Radiation extinction coefficient) ที่สูงแต่มีการสูญเสียความดันต่ำ Viskanta [3] ยังให้ข้อสังเกตอีกว่าในวัสดุพอรุนชนิดโฟมเซลล์ลาร์ (Cellular-foam) ที่ทำจากพลาสติก เซรามิกส์และโลหะนั้นมีความสามารถในการลดและเพิ่มการถ่ายเทความร้อนด้วยการแผ่รังสีได้เป็นอย่างดี มาก ถึงแม้ว่าวัสดุพอรุนจะมีความหนาแน่นน้อยๆ ก็ตาม แต่

สำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงแล้วการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพอรุนจะมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

Echigo [8] ได้แสดงให้เห็นว่าเมื่อแก๊สไอเสียซึ่งมีอุณหภูมิสูงไหลผ่านวัสดุพอรุนชนิดโฟมเซลล์เปิด (Open-cellular) เอนทาลปีของก๊าซจะถูกเปลี่ยนเป็นรังสีความร้อนและถูกแผ่ออกไปด้านหน้า ส่งผลให้อุณหภูมิของแก๊สไอเสียลดลงเมื่อไหลผ่านวัสดุพอรุน ดังนั้น Echigo [8] จึงได้เสนอแนวคิดใหม่ในการวางแผนวัสดุพอรุนวางไหลของแก๊สไอเสียในท่อ ซึ่งต่อมาเป็นที่รู้จักกันในชื่อฉนวนความร้อนสำหรับการไหลของไหล (Flow insulation) ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงของแก๊สไอเสียเมื่อผ่านวัสดุพอรุนโฟมเซลล์เปิด Ni-Cr-Al ที่มีความหนา 15 mm มีค่าสูงถึง 60%

Wang and Tien [9] ได้เสนอหลักการของระบบฉนวนความร้อนสำหรับของไหลเคลื่อนที่ โดยใช้แนวคิดจาก [8] โดยพิจารณาทอมการกระจายรังสี (Scattering) จากวัสดุพอรุน และสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธี Two flux model

Khantikamol และคณะ [10] ได้เสนอหลักการออกแบบตัวแปลงเอนทาลปีของแก๊สเป็นรังสีความร้อน (Gas enthalpy radiation converter) โดยใช้วัสดุพอรุนชนิดโฟมเซลล์เปิด Ni-Cr และ ps ZrO₂ ด้วยวิธีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และศึกษาในส่วนที่ยังขาดจากงานวิจัยเดิม Echigo [8] และ Wang and Tien [9] ผลการศึกษาพบว่ารังสีความร้อนจากบริเวณด้านขาเข้า (Upstream Region) มีอิทธิพลต่อการลดลงของอุณหภูมิแก๊สร้อนผ่านตัวแปลงพลังงาน (Converter) และยังพบอีกว่าวัสดุพอรุนจะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงเอนทาลปีของแก๊สเป็นรังสีความร้อน (Gas enthalpy radiation temperature) ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยของการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุดำ (Equivalent black body radiation temperature) ที่มาจากด้านหน้า (T_{bu}) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของแก๊สขาเข้า (Inlet gas temperature, T_0) เท่านั้น

Khantikomol และคณะ [11] ได้ศึกษาผลกระทบของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ผิว (Surface reflectivity) โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุพูนโพลีเมอร์เปิด Ni-Cr กับตัวอย่างวัสดุพูนชนิด Ni-Cr ที่พ่นผิวให้เป็นสีดำ (ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำสุด) พบว่าวัสดุพูนชนิดที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนต่ำมีผลต่อการลดลงของอุณหภูมิอากาศร้อนได้มากกว่า นอกจากนี้ยังได้สร้างเครื่องมือวัดรังสีความร้อนชนิดสองสี (Two-color radiation-meter) วัดค่าเสมือนของการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุดำ จากการศึกษาพบว่า กรณีที่อากาศร้อนไหลผ่านแผ่นวัสดุพูน โดยไม่มีความร้อนกระทบมาจากภายนอกแล้ว อุณหภูมิเสมือนของการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุดำซึ่งมาจากบริเวณด้านขาเข้า (T_{bu}) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาเข้า (T_0) นอกจากนี้ค่า T_{bu} ยังแปรผันโดยตรงกับ T_0 ด้วย

Krittacom [12] ได้ใช้วัสดุพูนชนิด Ni-Cr Open-cellular สร้างเตาเผาแบบหลายชั้น (Multilayer) โดยใช้แผ่นวัสดุพูนชนิดโพลีเมอร์เปิดสองแผ่นซึ่งวางแยกออกจากกัน รายงานผลว่าวัสดุพูนหลายแผ่นมีประสิทธิภาพในการเผาไหม้เชื้อเพลิงได้ดีกว่าชนิดแผ่นเดี่ยว เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่า

Jugjai และคณะ [13] ได้ใช้แนวความคิด CFRC โดยใช้วัสดุพูนเป็นชุดหัวเผาในการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวแบบสลับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศอย่างเป็นจังหวะ ผลการทดลองพบว่าการเผาไหม้แบบมีการหมุนเวียนความร้อนภายในประสิทธิภาพสูง แสดงให้เห็นได้ว่าปรากฏการณ์อันซับซ้อนที่เกิดขึ้นในวัสดุพูน ได้แก่ การถ่ายเทความร้อน การสะสมความร้อน การระเหย และการเผาไหม้ตลอดจนปฏิสัมพันธ์ระหว่างสถานะ ซึ่งเป็นผลให้การเผาไหม้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

Lapirattanakun และคณะ [14] ได้นำวัสดุพูนมาเป็นชุดหัวเผาเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ ผลการทดลองพบว่าชุดหัวเผาวัสดุพูนทำให้เกิดการเผาไหม้ที่มีอุณหภูมิเปลวไฟค่อนข้างต่ำส่งผลให้ปริมาณ NO_x ที่ได้จากการเผาไหม้มีปริมาณที่ต่ำ ประสิทธิภาพการเผา

ไหม้มีค่ามากกว่า 99 % การเผาไหม้ที่เกิดขึ้นค่อนข้างเสถียรโดยเฉลี่ยอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 1000 C

Lekpradit และคณะ [15] ได้ใช้หัวเผาวัสดุพูนร่วมกับวัสดุพูนที่ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสี จากการทดลองพบว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิและการเผาไหม้มีค่าสูงขึ้น

Huabkhuntod และคณะ [16] ได้ศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนสำหรับแก๊สร้อนไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุพูนเซรามิคคอร์ดีไรท์ แผ่นเดี่ยว พบว่าระบบที่มีความพูนของวัสดุมากจะมีการถ่ายเทความร้อนได้สูงกว่า อุณหภูมิอากาศร้อนตกคร่อมแผ่นวัสดุพูนมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ดังนั้นความพูนของวัสดุมีอิทธิพลต่อความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อน อุณหภูมิตกคร่อมของอากาศร้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขาเข้าและจะลดลงเมื่อความเร็วของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพทางความร้อนจะมีแนวโน้มลดลงตามความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวัสดุพูนชนิดโพลีเมอร์เปิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับพลังงานและถ่ายเทพลังงานได้เป็นอย่างดี ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนสำหรับแก๊สร้อนไหลที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุพูนเซรามิคคอร์ดีไรท์แผ่นคู่ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับออกแบบระบบฉนวนความร้อนต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 การถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทพลังงานระหว่าง 2 บริเวณที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน ซึ่งการถ่ายเทความร้อนได้แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

2.1.1 การนำความร้อน

การนำความร้อนคือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆหรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันโดยทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำโดยที่ตัวกลางไม่เคลื่อนที่

ซึ่งอัตราการถ่ายเทพลังงานต่อพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่าง (Temperature gradient, $\frac{\partial T}{\partial x}$) ซึ่งเขียนอยู่ในรูปสมการได้ว่า

$$\dot{Q} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

เมื่อ \dot{Q} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน (W), T คือ อุณหภูมิ (K), k คือ ค่าการนำความร้อนของวัสดุ (W/m.K), และ A คือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อน (m^2)

2.1.2 การพาความร้อน

กระบวนการถ่ายเทความร้อน แบบการพาความร้อน เป็นปรากฏการณ์การเคลื่อนที่ของพลังงานจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำกว่า โดยที่โมเลกุลของสารตัวกลางมีการเคลื่อนที่ไปด้วย ตัวอย่างเช่น การเคลื่อนที่ของอากาศผ่านขดลวดร้อน ทำให้อากาศมีอุณหภูมิสูงไปด้วย การพาความร้อน สามารถจำแนกได้เป็น 2 แบบ คือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติและการพาความร้อนแบบบังคับ สามารถหาค่าได้จาก

$$\dot{Q} = hA(T_w - T_\infty) \quad (2)$$

เมื่อ \dot{Q} คืออัตราการถ่ายเทความร้อน (W), A คือพื้นที่ผิวสัมผัส (m^2), h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ($W/(m^2.K)$), T_w คือ อุณหภูมิที่ผิว (K) และ T_∞ คือ อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (K)

2.1.3 การแผ่รังสีความร้อน

กลไกการถ่ายเทความร้อนโดยการนำและการพาความร้อนมีตัวกลาง แต่การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะจะเป็นบริเวณที่เป็นสุญญากาศ โดยการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า อันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างหรือการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) จากหลักเทอร์โมไดนามิกส์วัตถุแผ่รังสีความร้อนอุดมคติหรือวัตถุดำจะแผ่พลังงานในอัตราที่เป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุดำกำลังสี่ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวและเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\dot{Q} = SA T^4 \quad (3)$$

เมื่อ S คือ ค่าคงที่ของ สเตฟาน-โบลตซ์มันน์ มีค่าเท่ากับ 5.669×10^{-8} ($W/m^2.K^4$)

2.2 ประสิทธิภาพทางความร้อน

ระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่สารตัวกลางใด ๆ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสารตัวกลางนั้น ๆ จะมีการสูญเสียออกจากระบบส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งถูกสารตัวกลางดูดซับเอาไว้ อัตราส่วนความร้อนที่สารตัวกลางดูดซับเอาไว้ต่อความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบ เรียกว่า ประสิทธิภาพทางความร้อน สำหรับการหาประสิทธิภาพทางความร้อนของวัสดุพุนหาได้จากสมการที่ 4

$$h_t = \frac{\dot{Q}_{porous}}{\dot{Q}_{total}} \quad (4)$$

เมื่อ \dot{Q}_{porous} คือ พลักซ์ความร้อนที่แลกเปลี่ยนระหว่างแผ่นวัสดุพุนกับอากาศร้อน (W/m^2) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{porous} = m \dot{c}_p (T_1 - T_2) \quad (5)$$

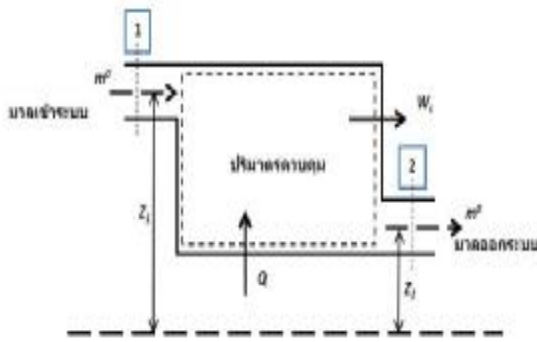
และ \dot{Q}_{total} คือ พลักซ์ความร้อนรวมทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (W/m^2) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\dot{Q}_{total} = m \dot{c}_p (T_\infty - T_2) \quad (6)$$

เมื่อ $m \dot{c}_p$ คืออัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าสู่ระบบ (kg/s), c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ ($J/Kg.K$), T_∞ คืออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าระบบ (K), T_1 คืออุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าแผ่นวัสดุพุน (K) และ T_2 คืออุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผ่นวัสดุพุน (K)

2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นฐานและสมการที่ใช้ในการคำนวณ

ในทางวิศวกรรมระบบที่เราสนใจมักประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำงานในลักษณะที่มีมวลมีการไหลเข้าและไหลออก เช่นการไหลของก๊าซผ่านกังหันก๊าซ การไหลของน้ำผ่านปั๊ม การไหลของอากาศผ่านคอคอดในท่อ ลักษณะเช่นนี้ต้องวิเคราะห์ที่โดยอาศัยแนวคิดของปริมาตรควบคุมหรือบริเวณที่กำหนดขึ้นมาเพื่อทำการศึกษ



รูปที่ 1 แสดงปริมาณควบคุมระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับปริมาณควบคุม กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาณควบคุมของระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ (steady flow) มีลักษณะที่สำคัญคือมวลสารไหลข้ามขอบเขตเข้าและออกจากระบบด้วยอัตราสม่ำเสมอและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมอยู่ในระบบ นั่นคือ $\Delta E = 0$ และ $m_{in} = m_{out}$ ซึ่งสามารถหาค่าพลังงานได้จากสมการพลังงานของระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ (steady flow energy equation) การหาค่าสมการพลังงานของระบบนี้สามารถใช้สมการอนุรักษ์พลังงานหาได้ดังนี้
พลังงานที่เข้าสู่ระบบ-พลังงานที่ออกจากระบบ=การเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่อยู่ในระบบ

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E \quad (7)$$

แต่ในระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอคือ $\Delta E = 0$ และ $m_{in} = m_{out}$

$$\text{ดังนั้น} \quad E_{in} = E_{out} \quad (8)$$

จากสมการที่ 8 หมายความว่าในระบบเปิดใดๆที่มีการไหลสม่ำเสมอผลรวมของพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ออกจากระบบ

จากรูปที่ 1 ในระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ โดยที่ทางเข้ามีสารตัวกลางจำนวน m หน่วยความดัน P ปริมาตร V พลังงานภายใน U ความเร็ว C และทางเข้า

สูงจากระดับอ้างอิง Z ขณะที่สารตัวกลางไหลผ่านระบบมีงานออกจากระบบ W_s และสารตัวกลางรับความร้อนเข้าสู่ระบบ Q , จากสมการที่ 8 สามารถเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$PE_1 + KE_1 + U_1 + Q + P_1V_1 = PE_2 + KE_2 + U_2 + P_2V_2 + W_s \quad (9)$$

หรือ

$$mgZ_1 + \frac{mC_1^2}{2} + U_1 + P_1V_1 + Q = mgZ_2 + \frac{mC_2^2}{2} + U_2 + P_2V_2 + W_s \quad (10)$$

พิจารณาต่อหนึ่งหน่วยมวล

$$gZ_1 + \frac{C_1^2}{2} + U_1 + P_1V_1 + Q = gZ_2 + \frac{C_2^2}{2} + U_2 + P_2V_2 + W_s \quad (11)$$

สำหรับงานทดลองที่มีทางเข้าออกหนึ่งทางและอยู่ในระดับเดียวกันและไม่มีการเกิดชั้นในระบบจึงไม่คิดค่าพลังงานศักย์พลังงานจลและงานในระบบ ดังนั้นสมการที่ 11 จึงลดรูปเป็น

$$U_1 + P_1V_1 + Q = U_2 + P_2V_2 \quad (12)$$

แต่ $U + PV =$ เอนทัลปี (Enthalpy; H) สมการที่ 12 จัดรูปใหม่ได้

$$Q = H_2 - H_1 \quad (13)$$

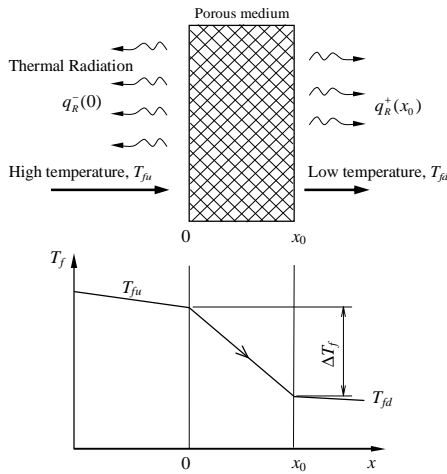
เมื่อเอนทัลปี คือผลรวมระหว่างพลังงานภายในกับพลังงานที่เกิดจากการไหลซึ่งเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ในกรณีที่สารตัวกลางเป็นก๊าซสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีได้จากสมการ $\Delta H = mc_p\Delta T$ ดังนั้นสมการที่ 13 จัดรูปใหม่ได้

$$Q = mC_p(T_2 - T_1) \quad (14)$$

เมื่อ Q คือ ปริมาณความร้อนของระบบ (W), m คือ อัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าสู่ระบบ (kg/s), c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ ($J/Kg.K$) และ ΔT คือ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากสภาวะที่ 1 ไปสู่สภาวะที่ 2 (K)

สมการที่ 14 คือสมการที่ใช้คำนวณหาการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปสู่แผ่นวัสดุพูนชนิดเซลล์ลูการ์เปิดคอร์ติโรท์แผ่นคู่

2.4 หลักการแปลงเอนทาลปี-รังสีความร้อน



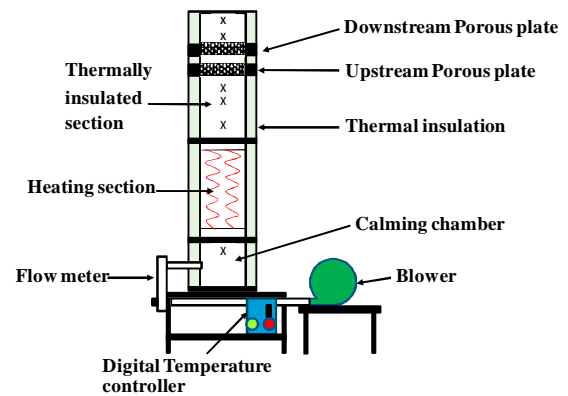
รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศร้อนเป็นการแผ่รังสีความร้อน

จากรูปที่ 2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศร้อนเป็นการแผ่รังสีความร้อน เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านแผ่นวัสดุพรุน พลังงานความร้อนถูกถ่ายเทให้กับวัสดุพรุน เมื่อวัสดุพรุนดูดซับเอาพลังงานความร้อนเหล่านั้นไว้ ทำให้วัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการแผ่รังสีความร้อนย้อนไปยังด้านหน้า เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศร้อนซ้ำอีก เมื่อพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ถูกวัสดุพรุนดูดซับเอาไว้ที่เหลือจึงค่อย ๆ ลดลงเมื่อไหลออกจากวัสดุพรุน

3. การทดลอง

รูปที่ 3 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนแรกเป็นส่วนความร้อน (Heating section) สูง 600 mm ส่วนที่สองเป็นส่วนฉนวนความร้อน (Thermally insulated section) สูง 300 mm และส่วนที่สามเป็นวัสดุพรุน (Porous section) ชุดอุปกรณ์ทำจากท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 120 mm หนา 2 mm ติดตั้งฉนวนกันความร้อนและภายนอกท่อโดยใช้ฉนวนชนิดไฟเบอร์เซรามิก (Ceramic fiber) ทำให้เหลือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 120 mm วัสดุพรุนเป็น เซลลูโลสไฟเบอร์ 2 เบอร์ ทดสอบโดยใช้แบบเดี่ยว

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ จะทำการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ถึง 12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ใช้เครื่องเป่าลม (Blower) เป่าอากาศเข้าไปผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล ไหลเข้าสู่ฮีตเตอร์ขนาด 5 kW ใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์ 220 โวลต์ ชนิดเฟสเดียว ควบคุมอุณหภูมิของอากาศโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ (Thermal Controller) หลังจากนั้นอากาศร้อนจะถูกส่งผ่านไปในส่วนฉนวนความร้อน (Insulated section) ยาว 300 mm และไหลผ่านวัสดุพรุน ซึ่งวางวางทางการไหล เจาะผนังท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 mm เพื่อสอดเทอร์โมคัปเปิลในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type-K thermocouple) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 mm ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศทางขาเข้า (Inlet gas temperature) ตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส สัญญาณอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล เป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสตรง ต่อเข้ากับเครื่องบันทึก (Data logger)



รูปที่ 3 แผนผังการทดลอง (Schematic diagram of experimental apparatus)

วัสดุพรุนที่ใช้ในการวิจัยนี้คือวัสดุพรุนเซลลูโลสเปิดคอร์ดีไรท์เป็นวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างทางกายภาพเป็นตาข่ายสานกันดังแสดงในรูปที่ 4 มีคุณสมบัติทางกายภาพดังตารางที่ 1



รูปที่ 4 วัสดุพอร์ซันชนิดชนิดเซลลูลาร์เปิดคอร์ดีไรท์

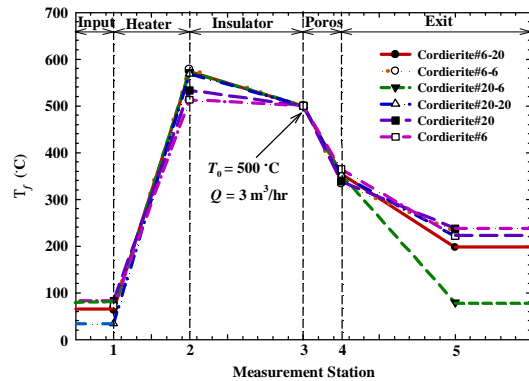
ตารางที่ 1 คุณลักษณะทางกายภาพของวัสดุพอร์ซันชนิดชนิดเซลลูลาร์เปิดคอร์ดีไรท์

Materials	Porosity , f	PPI	x_0 (mm)
Cordierite#6	0.873	6	10.00
Cordierite#20	0.875	20	10.00

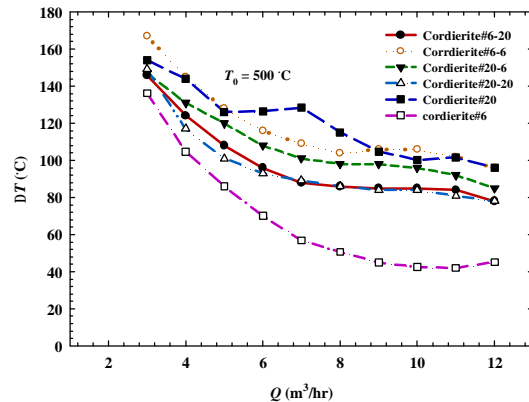
4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิในแต่ละสถานีวัดของชุดอุปกรณ์การทดลอง เมื่อตำแหน่งที่ 1 คือสถานีวัดอุณหภูมิอากาศ ณ ตำแหน่งก่อนเข้าสู่ชุดทำความร้อนไฟฟ้า ตำแหน่งที่ 2 คือตำแหน่งอุณหภูมิของอากาศหลังจากออกจากชุดทำความร้อนไฟฟ้า ตำแหน่งที่ 3 คือสถานีวัดอุณหภูมิอากาศร้อนก่อนเข้าสู่ชุดวัสดุพอร์ซัน ซึ่งตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งควบคุมอุณหภูมิ (T_0) ตำแหน่งที่ 4 คือตำแหน่งอุณหภูมิอากาศหลังจากออกจากแผ่นวัสดุพอร์ซัน และตำแหน่งที่ 5 คือตำแหน่งทางออกชุดทดลอง ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิของอากาศที่ระดับอัตราการไหลเชิงปริมาตร $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ และอุณหภูมิทางเข้าของวัสดุพอร์ซัน T_0 เท่ากับ 500°C ของชุดวัสดุพอร์ซัน (หรือฉนวนความร้อน) ที่แตกต่างกัน ทั้งแบบวัสดุพอร์ซันแผ่นเดี่ยว Cordierite#6 และ Cordierite#20 วัสดุพอร์ซันแผ่นคู่ Cordierite#6-6, Cordierite#6-20, Cordierite#20-20 และ Cordierite#20-6 ซึ่ง Cordierite#6-20 หมายถึง วัสดุพอร์ซันแผ่นหน้าคือ Cordierite#6 และวัสดุพอร์ซันแผ่นหลังคือ Cordierite#20 ตามลำดับ จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ที่ระดับอุณหภูมิทางเข้าชุดวัสดุพอร์ซันและอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เท่ากัน อุณหภูมิ ณ ทางออกตัวรับความร้อนของวัสดุพอร์ซัน

แผ่นคู่สูงกว่าวัสดุพอร์ซันแผ่นเดี่ยวอย่างชัดเจน อธิบายได้ว่าชุดวัสดุพอร์ซันสามารถรับความร้อนและแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปด้านหน้าได้มากกว่า ซึ่งส่งผลให้อุณหภูมิตกคร่อมชุดวัสดุพอร์ซันลดลงมากเช่นกัน โดยเฉพาะชุดวัสดุพอร์ซัน Cordierite#6-6 ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6



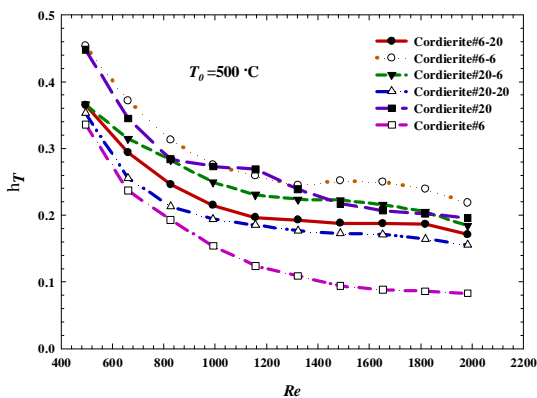
รูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในชุดทดลอง



รูปที่ 6 อุณหภูมิตกคร่อมชุดวัสดุพอร์ซัน

รูปที่ 6 แสดงอุณหภูมิตกคร่อมชุดวัสดุพอร์ซันของอากาศร้อน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าที่ความเร็วต่ำ อุณหภูมิตกคร่อมสูงเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะชุดวัสดุพอร์ซันแผ่นคู่ Cordierite#6-6 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ ให้อุณหภูมิตกคร่อม 170°C เนื่องจากที่ความเร็วของอากาศต่ำ โหมดการแผ่รังสีความร้อนแสดงบทบาทได้ชัดเจนจึงแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปด้านหน้ามาก เมื่อความเร็วอากาศ (อัตราการไหลเชิงปริมาตร) เพิ่มขึ้น โหมดการพาความร้อนแสดงบทบาทได้ชัดเจนขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิตกคร่อมชุดวัสดุพอร์ซันลดลง และมีแนวโน้มเข้าสู่ค่าคงที่

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของชุดฉนวนความร้อนสำหรับของไหลร้อนเคลื่อนที่จะหมายถึงการเปรียบเทียบพลังงานที่แผ่นวัสดุพอร์นสามารถกักเก็บแล้วทำการแผ่รังสีย้อนกลับไปข้างหน้าต่อพลังงานรวมทั้งป้อนเข้าระบบ ซึ่งพลังงานที่ชุดวัสดุพอร์นกักเก็บได้จะสมมติให้เท่ากับพลังงานลดลงของอากาศร้อนที่ไหลผ่านชุดวัสดุพอร์น ผลการทดลองได้แสดงในรูปที่ 7 เห็นได้ชัดเจนว่าแนวโน้มของประสิทธิภาพเชิงความร้อนเป็นเช่นเดียวกับอุณหภูมิตกคร่อมดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์ (Re) กับประสิทธิภาพเชิงความร้อน (h_r) ของวัสดุพอร์น

จากรูปที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นว่าสำหรับวัสดุพอร์นแผ่นคู่แล้ว แผ่นด้านหน้าควรเป็นวัสดุพอร์นที่มีค่าความพอร์นที่มีค่าความพอร์นและจำนวนรูต่อหนึ่งนิ้ว (Pores per inch, PPI) ที่สูง Cordierite#-20 และวัสดุพอร์นแผ่นหลังควรมีค่าความพอร์นและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้วที่ต่ำ ซึ่งผลการทดลองชุดวัสดุพอร์น Cordierite#20-6 ที่ระดับอัตราการไหลเชิงปริมาตร $6 \text{ m}^3/\text{hr}$ มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า Cordierite#6-20 ประมาณ 15 % ผลที่เป็นเช่นนี้เกิดจากวัสดุพอร์นแผ่นแรกทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับพลังงาน (Absorber) และวัสดุพอร์นแผ่นที่ 2 ทำหน้าที่เป็นตัวแผ่รังสีความร้อน (Emitter)

5. บทสรุป

การศึกษาเชิงการทดลองคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนไหลของวัสดุพอร์นเซรามิคเซลลูลาร์เปิดคอร์ดิไรท์แผ่นคู่ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าวัสดุพอร์น

แผ่นคู่สามารถส่งเสริมความสามารถในการเป็นฉนวนความร้อนไหล อุณหภูมิตกคร่อมของอากาศผ่านแผ่นวัสดุพอร์นและประสิทธิภาพเชิงความร้อนมีค่าสูงที่ความเร็วอากาศต่ำและอุณหภูมิอากาศขาเข้าแผ่นวัสดุพอร์นสูง ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุพอร์นแผ่นเดี่ยวอย่างเห็นได้จากข้อมูลการทดลอง Cordierite#6-6 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร $3 \text{ m}^3/\text{hr}$ ให้อุณหภูมิตกคร่อม $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ชุดวัสดุพอร์นแผ่นคู่ที่แผ่นหน้ามีค่าความพอร์นสูงแผ่นหลังมีค่าความพอร์นต่ำมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงกว่า ชุดวัสดุพอร์นที่มีแผ่นหน้ามีค่าความพอร์นต่ำกับแผ่นหลังมีค่าความพอร์นสูงประมาณ 15 % เนื่องจากที่ความเร็วของอากาศต่ำ โหมดการแผ่รังสีความร้อนแสดงบทบาทได้ชัดเจนจึงแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปด้านหน้ามาก เมื่อความเร็วอากาศ (อัตราการไหลเชิงปริมาตร) เพิ่มขึ้น โหมดการพาความร้อนแสดงบทบาทได้ชัดเจนขึ้น จึงส่งผลให้อุณหภูมิตกคร่อมชุดวัสดุพอร์นลดลง แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอร์นแผ่นคู่มีคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนได้ดีขึ้น เมื่อความเร็วของอากาศร้อนสูงขึ้นและประสิทธิภาพเชิงความร้อนจะคู่เข้าจนสู่ภาวะคงที่

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (สกอ.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษาครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kamiuto, K. (2000). Combined conductive and radiative heat transfer through open-cellular porous plates, JSME Int. J., Series B, Vol. 43, 2000, pp. 273-278.
- [2] Kamiuto, K., Saito, S. and Ito, K. (1993). Numerical model for combined conductive and radiative heat transfer in annular packed beds, Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 23, pp. 433-443.

- [3] Viskanta R. (2009). Overview of radiative transfer in cellular porous materials, in: Proc. ASME 2009 Heat Transfer Summer Conf., pp.1-9.
- [4] Kamiuto, K. and Matsushita, T. (1998). High-temperature radiative properties of open-cellular porous materials, in: Proc. 11th Int. Heat Transfer Conf., 7, 1998, pp. 385-390.
- [5] Kinoshita, I., Kamiuto, K. and Hasegawa, S. (1982). Study of simultaneous conductive and radiative heat transfer in high porosity materials, in: Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 5, pp. 505-510.
- [6] Hendricks, T. J. and Howell, J. R. (1996). Absorption/Scattering coefficients and scattering phase functions in reticulated porous ceramics, ASME J. Heat Transfer, Vol. 118, pp. 79-87.
- [7] Hsu, P. F. and Howell, J. R. (1992). Measurement of thermal conductivity and optical properties of porous partially stabilized zirconia, Experimental Heat Transfer, Vol. 5(4), pp. 293-313.
- [8] Echigo, R. (1982). Effective Energy Conversion Method between Gas Enthalpy and Thermal Radiation and Application to Industrial Furnaces. Proc.7th Int. Heat Transfer Conf., Vol. 6, pp. 361-366.
- [9] Wang, K. Y. and Tien C. L. (1984). Thermal insulation in flow system: Combined radiation and convection through a porous segment, ASME. J. Heat Transfer, Vol. 106, pp. 453-459.
- [10] Khantikomol, P., Saito, S. and Kamiuto, K. (2008). Combined convection and radiation heat transfer in an open-cellular plate, 7th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conf., Sapporo Japan.
- [11] Khantikomol P., Saito S. and Yokomine T. (2010). Study on Single Layer Flow Insulation Utilizing Ni-Cr Open-cellular Porous Plate. Int. Com. Heat Mass Transfer. Vol. 37(8), pp. 1015-1024.
- [12] Krittacom, B. (2009). Studies on Thermal Characteristics of Open-cellular Porous Burners, Dissertation, Oita University, pp. 44-110.
- [13] สำเร็จ จักรใจ และ ชนินทร์ โพธิยา (2549). การเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวภายในวัสดุพรุนแบบสลับทิศทางการไหลของเชื้อเพลิงและอากาศอย่างเป็นจังหวะ, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 20, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา
- [14] อาวุธ ลภีรัตนากุล และ จารุวัตร เจริญสุข (2550). พฤติกรรมการเผาไหม้ของหัวเผาวัสดุพรุน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21, จังหวัดชลบุรี
- [15] ทวีศิลป์ เล็กประดิษฐ์ และ บัณฑิต กฤตาคม (2554). การศึกษาอิทธิพลของวัสดุพรุนตัวแปรรังสีต่อการเผาไหม้ของหัวพ่นไพชนิดวัสดุพรุนโดยใช้เชื้อเพลิงเหลว, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 25, จังหวัดกระบี่
- [16] อีระ ฮวบขุนทด, บัณฑิต กฤตาคม และ ปรีชา ชันติโกมล (2555). การศึกษาเชิงการทดลองคุณสมบัติฉนวนความร้อนไหลของวัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิดคอร์ดีไรท์แผ่นเดี่ยว, การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, จังหวัดมหาสารคาม