

การศึกษาเชิงทดลองคุณสมบัติฉนวนความร้อนไหลของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสแผ่นคู่ Experimental Study of Flow Insulation Characteristics of double plates Stainless Steel Cross Mesh

อำพล ทัศนไชย,¹ อมรทัศน์ จั่วแจ่มใส,¹ วสันต์ ศรีเมือง,² ปรีชา ชันดีโกมล^{1*}

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยพัฒนาพลังงานทดแทน (RDREL) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

² ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและท่อความร้อน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, 744 ถ.สุรนารายณ์ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

ผู้ติดต่อ: preecha@rmu.ac.th เบอร์โทรศัพท์ 08-0470-5287, เบอร์โทรสาร 044-233-074

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนสำหรับแก๊สร้อนไหล (Flow Insulation) ของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสแผ่นคู่ โดยใช้อากาศร้อนเป็นสารทำงาน (Working Fluid) ใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้าให้ความร้อนแก่อากาศใช้วัสดุพรุนตาข่ายสแตนเลสขนาด 16, 30 และ 50 ช่องต่อตารางนิ้ว ในการทดสอบให้อากาศร้อนไหลผ่านแผ่นตาข่ายสแตนเลส สองแผ่น ในแนวตั้งฉากซึ่งวางห่างกัน 1 มิลลิเมตร โดยทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหลเชิงปริมาตรตั้งแต่ 3-12 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เพิ่มครั้งละ 1 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ควบคุมอุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อนโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิตั้งแต่ 200-500 องศาเซลเซียส ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลสแผ่นคู่ สามารถทำหน้าที่เป็นฉนวนความร้อนสำหรับแก๊สร้อนไหลได้ ซึ่งจะทำหน้าที่ได้ดีที่อุณหภูมิสูงและความเร็วอากาศต่ำ นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุพรุนที่มีช่องต่อตารางนิ้วที่มากจะให้ประสิทธิภาพทางความร้อนดีกว่า

คำหลัก: ฉนวนความร้อนไหล, วัสดุพรุน, ตาข่ายสแตนเลส, อุณหภูมิตกคร่อม

Abstract

Flow insulation characteristics of double plates stainless steel cross mesh has been studied experimentally. The hot air was employed as working fluid that heated by electric heater controlled by the thermal controller. The stainless steel cross mesh as 16, 30 and 50 mesh/in² are examined as the flow insulator. The porous materials were placed normal to the flow direction, which was divided by 1 mm free space. The air volume flow was varied from 3-12 m³/hr with 1 m³/hr increment. The inlet air temperature was varied from 200-500 °C. The result reveals that the double plates stainless steel cross mesh can be acted as good flow insulator at high temperature and low volume flow rate. Furthermore, high mesh per square inch of the porous is more thermal efficiency than the lower one.

Keywords : Flow insulator, porous material, stainless cross mesh, temperature drop

บทนำ

วัสดุพรุนเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการแลกเปลี่ยนความร้อนได้เป็นอย่างดี เนื่องจากมีพื้นผิวสัมผัสมาก ส่งผลให้วัสดุพรุนสามารถรับพลังงานทั้งโดยการพาความร้อนและการแผ่รังสี ซึ่งการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาจะมีบทบาทโดดเด่นเมื่อของไหลที่ไหลผ่านวัสดุพรุนมีความเร็วสูง ในขณะที่เดียวกับการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาจะมีบทบาทโดดเด่นเมื่อวัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูง เมื่อของไหลร้อนเคลื่อนที่ผ่านวัสดุพรุนจะมีการถ่ายเทพลังงานโดยการพาผ่านวัสดุพรุน

ทำให้แผ่นวัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิของของไหลนั้นลดลง หลักการดังกล่าวเป็นพฤติกรรมเช่นเดียวกับฉนวนความร้อน ในระบบนี้จะเรียกว่าฉนวนความร้อนสำหรับการไหลของของไหล (Flow insulator) ซึ่งระบบนี้ได้ถูกนำเสนอโดย Echigo [1] ในปี ค.ศ. 1982 การวิจัยดังกล่าวได้ใช้แผ่นวัสดุพรุนเซลล์รูเปิด (Open-cellular) ชนิดนิกเกิลโครเมียม อะลูมินา (NiCr-Al) ผลการศึกษาพบว่าแผ่นวัสดุพรุนหนา 15 mm สามารถลดอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่านได้มากกว่า 60% ต่อมา Wang และ Tien [2] อาศัยแนวคิดจาก Echigo

[1] ศึกษาเชิงทฤษฎีโดยเพิ่มเทอมการกระจายรังสี (scattering) ได้รายงานว่าคุณสมบัติการลดอุณหภูมิและพลังงานที่ถูกกักเก็บมีค่าสูงขึ้น Echico และคณะ [3] เพิ่มการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพอร์ซัน โดยวิธีกำเนิดความร้อนภายใน ใช้ตาข่ายสแตนเลสวางติดกัน 3 ชั้น ชั้นขาเข้าหนา 1 มิลลิเมตร ตรงกลางหนา 10 มิลลิเมตร ชั้นขาออกหนา 2 มิลลิเมตร แก๊สร้อนที่เกิดจากการเผาไหม้ไหลผ่านวัสดุพอร์ซันทั้ง 3 ชั้น วัสดุพอร์ซันที่วางไว้ด้านหน้าที่มีความหนาน้อยที่สุดทำให้อุณหภูมิของแก๊สเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและลดลงเมื่อผ่านวัสดุตัวที่ 2 และ 3 Khantikomol และคณะ [5] ได้เสนอหลักการออกแบบตัวแปลงเอนทาลปีของก๊าซเป็นรังสีความร้อน (Gas enthalpy-radiation-converter) โดยใช้วัสดุพอร์ซันชนิดโพรมเซิลเปิด Ni-Cr และ ps ZrO₂ ด้วยวิธีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และศึกษาในส่วนที่ยังขาดจากงานวิจัยเดิม Echigo [1], Wang และ Tien [2] ผลการศึกษาพบว่ารังสีความร้อนจากบริเวณด้านขาเข้า (Upstream region) มีอิทธิพลต่อการลดลงของอุณหภูมิของก๊าซร้อนผ่านแผ่นวัสดุพอร์ซัน และยังพบอีกว่าวัสดุพอร์ซันจะทำหน้าที่เป็นตัวแปลงเอนทาลปีของก๊าซเป็นรังสีความร้อน (Gas enthalpy-radiation-temperature) ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิเสมือนของการแผ่รังสีความร้อนจากวัสดุดำ (Equivalent black body radiation temperature) ที่มาจากด้านหน้า (T_{bu}) มีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของก๊าซขาเข้า (Inlet gas temperature, T_0) เท่านั้น Gandjalikhan Nassab S A [6] สร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสามชั้น ใช้วัสดุพอร์ซันทำหน้าที่แปลงเอนทาลปีของก๊าซร้อนเป็นการแผ่รังสีความร้อน การวิจัยได้ทำทั้งในด้านการทดลองและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อความถูกต้องแม่นยำผลที่ได้จากการทดลองถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณและงานวิจัยก่อนหน้า ผลจากการวิจัยพบว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าวให้ประสิทธิภาพความร้อนสูงและมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้วัสดุพอร์ซันที่มีค่าความพรุนสูงและค่าการสะท้อนรังสีที่ผิวต่ำ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องแม่นยำ

Echico [1] และ Yoshida [4] ได้เสนอการลดลงของอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่านตาข่ายสแตนเลสขนาด 50 ช่องต่อตารางนิ้ว จำนวน 40 แผ่น ซึ่งวางซ้อนติดกันความหนา 16 มิลลิเมตร ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิด้านขาออกมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิด้านขาเข้า

จากคุณสมบัติพิเศษของวัสดุพอร์ซันเช่นที่กล่าวมา จึงมีการนำไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพความร้อนให้กับเตาถลุงเหล็กในอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า ต่อมา มีนักวิจัยหลายท่านนำเอาวัสดุพอร์ซันทั้งที่เป็นเซรามิกส์และโลหะไปทดลองใช้กับห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ Takami และคณะ (1998) [7] ได้ทำการวิจัยเชิงทดลองการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนแฝงในการระเหยกลายเป็นไอสูง โดยไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงผ้อยละของที่ดีหรือไม่ น้ำมันก๊าดถูกหยดจากด้านบนผ่านแผ่นตาข่าย เพื่อช่วยกระจายน้ำมันเชื้อเพลิงให้สม่ำเสมอตลอดทั้งผิวของเตาแล้วทะลุลงบนผิวด้านบนของแผ่นวัสดุพอร์ซัน เกิดการระเหยตัวในชั้นวัสดุพอร์ซันและผสมกับอากาศบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพอร์ซัน เกิดการเผาไหม้เกือบสมบูรณ์ตลอดค่าอัตราส่วนสมมูล (Equivalence ratio) อยู่ระหว่าง 0.5-0.9 อย่างไรก็ตามมีเพียงโครงสร้างทางความร้อนภายในห้องเผาไหม้เท่านั้นที่ทำการวัดและอธิบายผล แต่ยังไม่มีการศึกษาอย่างละเอียดภายในชั้นวัสดุพอร์ซัน ด้วยเหตุผลดังกล่าว สำเร็จ จักใจ และคณะ [8] จึงได้ทำการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงเหลวลักษณะคล้ายคลึงกับ Takami และคณะ [7] แต่วัสดุพอร์ซันทำมาจากตาข่ายสแตนเลสขนาด 16 ช่องต่อตารางนิ้ว ตัดเป็นวงกลมวางซ้อนทับกันความหนา 70 มิลลิเมตร เพื่ออธิบายคุณลักษณะของการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นและกลไกการระเหยตัวในชั้นวัสดุพอร์ซัน จึงทำการวัดอุณหภูมิในแนวรัศมีและแนวแกนทั้งในห้องเผาไหม้และในชั้นวัสดุพอร์ซัน รวมทั้งวัดคุณลักษณะของแก๊สไอเสีย ผลการทดลองพบว่า กลไกการระเหยตัวของน้ำมันเชื้อเพลิงระเหยตัวกลายเป็นไอจนหมดในชั้นวัสดุพอร์ซัน เพราะได้รับอิทธิพลมาจากการแผ่รังสีความร้อนของเปลวไฟที่เผาไหม้อยู่ด้านล่างของชั้นวัสดุพอร์ซัน ซึ่งทำหน้าที่ช่วยส่งเสริมการระเหยตัวกลายเป็นไอของน้ำมันเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันมลภาวะที่เกิดจากการเผาไหม้มีค่าลดลงเป็นอย่างมาก

จากข้อมูลงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุพอร์ซันมีอิทธิพลต่อการแผ่รังสีความร้อนเป็นอย่างมาก สามารถนำไปใช้งานกับอุปกรณ์อุณหภูมิสูงได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามยังขาดข้อมูลด้านการเป็นฉนวนความร้อนไหลของวัสดุพอร์ซันชนิดตาข่ายสแตนเลส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาเชิงการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนของวัสดุพอร์ซันแผ่นคู่ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบอุปกรณ์ฉนวนความร้อนไหลต่อไป

2. ทฤษฎี (Theory)

2.1 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

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

2.1.1 การนำความร้อน

(Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนคือปรากฏการณ์ที่พลังงานความร้อนถ่ายเทภายในวัตถุหนึ่งๆหรือระหว่างวัตถุสองชิ้นที่สัมผัสกันโดยทิศทางการเคลื่อนที่ของพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำโดยที่ตัวกลางไม่เคลื่อนที่ซึ่งอัตราการถ่ายเทพลังงานต่อพื้นที่ของการถ่ายเทความร้อนจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิแตกต่าง (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

(Convection Heat Transfer)

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

(Radiation Heat Transfer)

กลไกการถ่ายเทความร้อนโดยการนำและการพาความร้อนมีตัวกลาง แต่การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีเกิดขึ้นได้แม้ว่าจะเป็นบริเวณที่เป็นสุญญากาศ โดยการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในที่นี้จะกล่าวถึงเพียงการแผ่รังสีแม่เหล็กไฟฟ้า อันเป็นผลเนื่องจากอุณหภูมิแตกต่างหรือการแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) จากหลักเทอร์โมไดนามิกส์วัตถุแผ่รังสีความร้อนอุดมคติหรือวัตถุดำจะแผ่พลังงานในอัตราที่เป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ของวัตถุดำกำลังสี่ และเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิวและเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\dot{Q} = \sigma AT^4 \quad (3)$$

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

2.2 ประสิทธิภาพทางความร้อน (Heat efficiency, η_t)

ระบบที่มีการถ่ายเทความร้อนไปสู่สารตัวกลางใด ๆ พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทให้กับสารตัวกลางนั้น ๆ จะมีการสูญเสียออกจากระบบส่วนหนึ่งและอีกส่วนหนึ่งถูกสารตัวกลางดูดซับเอาไว้ อัตราส่วนความร้อนที่สารตัวกลางดูดซับเอาไว้ต่อความร้อนที่สูญเสียออกจากระบบเรียกว่า ประสิทธิภาพทางความร้อน สำหรับการหาประสิทธิภาพทางความร้อนของวัสดุพูนหาได้จากสมการที่ 4

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

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

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

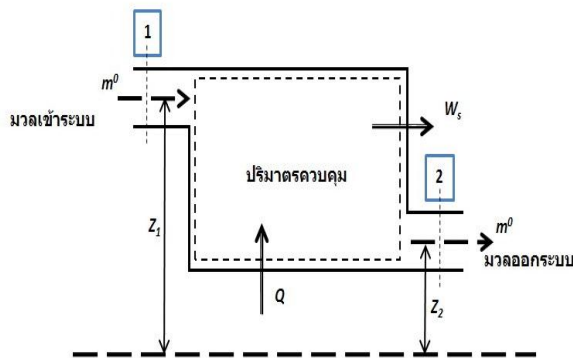
และ \dot{Q}_{total} คือ พลังค์ความร้อนรวมทั้งหมดที่ป้อนเข้าสู่ระบบ (W/m^2) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

เมื่อ \dot{m} คืออัตราการไหลของมวลอากาศที่เข้าสู่ระบบ (kg/s), c_p คือ ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (J/Kg.K), T_∞ คืออุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าระบบ (K), T_1 คืออุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าแผ่นวัสดุพูน (K) และ T_2 คืออุณหภูมิของอากาศที่ออกจากแผ่นวัสดุพูน (K)

2.3 การแลกเปลี่ยนความร้อนพื้นฐานและสมการที่ใช้ในการคำนวณ

ในทางวิศวกรรมระบบที่เราสนใจมักประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำงานในลักษณะที่มวลมีการไหลเข้าและไหลออก เช่นการไหลของก๊าซผ่านกังหันก๊าซ การไหลของน้ำผ่านปั๊ม การไหลของอากาศผ่านคอคอดในท่อ ลักษณะเช่นนี้ต้องวิเคราะห์โดยอาศัยแนวคิดของปริมาตรควบคุมหรือบริเวณที่กำหนดขึ้นมาเพื่อทำการศึกษา



รูปที่ 1 แสดงปริมาตรควบคุมระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ

กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์สำหรับปริมาตรควบคุม

กฎการอนุรักษ์พลังงานสำหรับปริมาตรควบคุมของระบบเปิดที่มีการไหลสม่ำเสมอ (steady flow) มีลักษณะที่สำคัญคือมวลสารไหลข้ามขอบเขตเข้าและออกจากระบบด้วยอัตราสม่ำเสมอและไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่สะสมอยู่ในระบบนั้นคือ $\Delta E = 0$ 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 หมายความว่าในระบบเปิดใด ๆ ที่มีการไหลสม่ำเสมอผลรวมของพลังงานที่เข้าสู่ระบบจะเท่ากับผลรวมของพลังงานที่ออกจากระบบ

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

$$mgZ_1 + mg \frac{C_1^2}{2} + U_1 + P_1V_1 + Q = mgZ_2 + mg \frac{C_2^2}{2} + U_2 + P_2V_2 + W_s \quad (10)$$

พิจารณาต่อหนึ่งหน่วยมวล

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

สำหรับงานทดลองที่มีทางเข้าออกหนึ่งทางและอยู่ในระดับเดียวกันและไม่มีการเกิดขึ้นในระบบจึงไม่คิดค่าพลังงานศักย์พลังงานจลและงานในระบบ ดังนั้นสมการที่ 11 จึงลดรูปเป็น

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

แต่ $U + PV =$ เอนทาลปี (Enthalpy; H)

สมการที่ 12 จัดรูปใหม่ได้

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

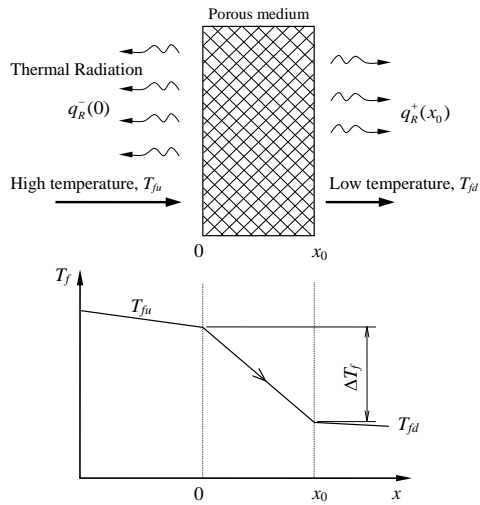
เมื่อเอนทาลปี คือผลรวมระหว่างพลังงานภายในกับพลังงานที่เกิดจากการไหลซึ่งเป็นคุณสมบัติทางเทอร์โมไดนามิกส์ในกรณีที่สารตัวกลางเป็นก๊าซสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของเอนทาลปีได้จากสมการ $\Delta H = mc_p\Delta T$ ดังนั้นสมการที่ 13 จัดรูปใหม่ได้

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

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

สมการที่ 14 คือสมการที่ใช้คำนวณหาการถ่ายเทความร้อนจากแก๊สร้อนไปสู่แผ่นวัสดุพูนชนิดตาข่ายแตนเลส

2.4 หลักการแปลงเอนทาลปี-รังสีความร้อน

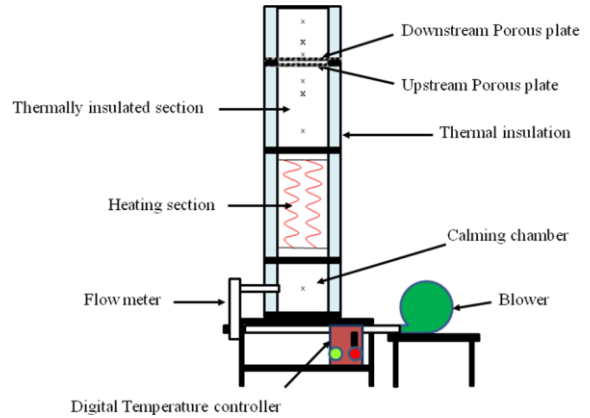


รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศ ร้อน เป็นการแผ่รังสีความร้อน

จากรูปที่ 2 กระบวนการเปลี่ยนแปลงเอนทาลปีของอากาศร้อนเป็นการแผ่รังสีความร้อน เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านแผ่นวัสดุพรุน พลังงานความร้อนถูกถ่ายเทให้กับวัสดุพรุน เมื่อวัสดุพรุนดูดซับเอาพลังงานความร้อนเหล่านั้นไว้ ทำให้วัสดุพรุนมีอุณหภูมิสูงขึ้นเกิดการแผ่รังสีความร้อนย้อนไปยังด้านหน้า เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศร้อนซ้ำอีก เมื่อพลังงานความร้อนส่วนใหญ่ถูกวัสดุพรุนดูดซับเอาไว้ ที่เหลือจึงค่อย ๆ ลดลงเมื่อไหลออกจากวัสดุพรุน

3. การทดลอง

รูปที่ 2 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลอง ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนแรกเป็นส่วนความร้อน (Heating section) สูง 600 มิลลิเมตร ส่วนที่สองเป็นส่วนฉนวนความร้อน (Thermally insulated section) สูง 300 มิลลิเมตร และส่วนที่สามเป็นวัสดุพรุน (Porous section) ชุดอุปกรณ์ทำจากท่อสแตนเลส ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 120 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ติดตั้งฉนวนกันความร้อนภายนอกท่อโดยใช้ฉนวนชนิดไฟเบอร์เซรามิก (Ceramic fiber)



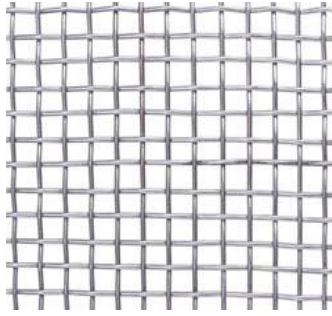
รูปที่ 3 ผังอุปกรณ์การทดลอง (Schematic diagram of experimental apparatus)

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของอากาศ จะทำการปรับเปลี่ยนตั้งแต่ 3 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ถึง 12 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ใช้เครื่องเป่าลม (Blower) เป่าอากาศเข้าไปผ่านเครื่องวัดอัตราการไหล ไหลเข้าสู่ฮีตเตอร์ขนาด 5 kW ใช้ไฟฟ้าความต่างศักย์ 220 โวลต์ ชนิดเฟสเดียว ควบคุมอุณหภูมิของอากาศโดยใช้อุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ (Temperature controller) หลังจากนั้น อากาศร้อนจะถูกส่งผ่านไปในส่วนฉนวนความร้อน (Insulated section) ยาว 300 มิลลิเมตร และไหลผ่านวัสดุพรุน ซึ่งวางขวางทาง เจาะผนังท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2 มิลลิเมตร เพื่อสอดเทอร์โมคัปเปิล ในการทดลองนี้ใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type-K thermocouple) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศทางเข้า (Inlet gas temperature) ตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส สัญญาณอุณหภูมิจากเทอร์โมคัปเปิล เป็นสัญญาณความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสตรง ต่อเข้ากับเครื่องบันทึก (Data logger)

วัสดุพรุนที่ใช้ในการวิจัยนี้คือวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส เป็นวัสดุพรุนที่มีโครงสร้างทางกายภาพสานกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 มีคุณสมบัติทางกายภาพ ดังตารางที่ 1 โดยสามารถคำนวณหาความพรุนได้จากสมการที่ 15 [9]

$$\phi = 0.6184 + 1.0203 \Phi - 1.5504 \Phi^2 \quad (15)$$

เมื่อ ϕ คือความพรุน และ Φ คือจำนวนช่องต่อตารางนี้ของวัสดุพรุน



รูปที่ 4 วัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรุนชนิดตาข่ายสแตนเลส

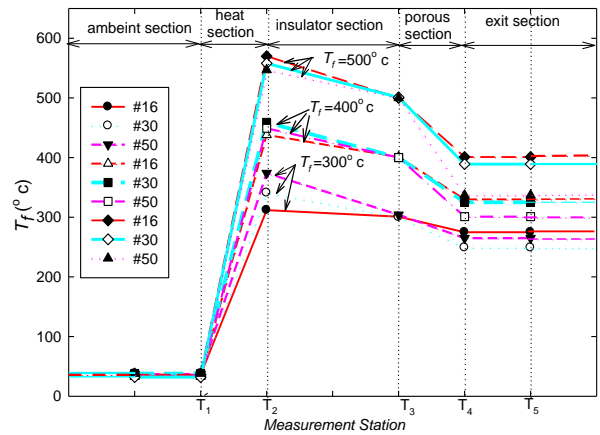
| Materials | Mesh/in ² | Wire-net diameter (d × 10 ⁻³ m) | Pitch (P × 10 ⁻³ m) | F _v | Porosity (φ) |
|-----------|----------------------|--|--------------------------------|----------------|--------------|
| STCM#16 | 16 | 0.5 | 1.587 | 0.25 | 0.752 |
| STCM#30 | 30 | 0.20 | 0.847 | 0.19 | 0.814 |
| STCM#50 | 50 | 0.15 | 0.508 | 0.23 | 0.768 |

*STL = Stainless Cross-mesh

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

รูปที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างอุณหภูมิของอากาศร้อน (T_f) ที่ไหลผ่านวัสดุพรุนชนิด 16,30 และ 50 ช่องต่อตารางนิ้ว ด้วยอัตราการไหลเชิงปริมาตรที่ 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง เมื่ออากาศไหลผ่านขดลวดความร้อน อากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นและค่อย ๆ ลดลง เมื่อไหลผ่านส่วนที่เป็นฉนวนความร้อน เนื่องจากความร้อนส่วนหนึ่งเกิดการสูญเสียผ่านฉนวนออกไป เมื่ออากาศร้อนไหลผ่านส่วนที่เป็นวัสดุพรุนอุณหภูมิลดลงอย่างมาก เนื่องจากอากาศร้อนถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับวัสดุพรุนโดยการพาความร้อน ทำให้อุณหภูมิภายในตัววัสดุพรุนมีค่าสูงขึ้น เกิดการแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังด้านหน้า เป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศร้อนทางด้านขาเข้า จากรูปที่ 5 ยังแสดงให้เห็นอีกว่า วัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วทำให้เกิดอุณหภูมิตกคร่อมที่แผ่นวัสดุพรุนมากกว่าวัสดุพรุนชนิด 16 และ 30 ช่องต่อตารางนิ้วในทุกอุณหภูมิการทดลอง ที่เป็นเช่นนั้นเนื่องจากว่า วัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้ว มีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนมากกว่าชนิด 16 และ 30 ช่องต่อตารางนิ้ว จึงดูดซับพลังงานความร้อนจากอากาศร้อนได้ดีกว่า เป็นผลให้ปริมาณความร้อนมีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้

ชัด และถ้าหากทำการเปรียบเทียบไปอีกระหว่างวัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วกับชนิด 30 ช่องต่อตารางนิ้ว ที่อุณหภูมิทดลอง 300 องศาเซลเซียส ปริมาณความร้อนเพิ่มขึ้น 18 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิทดลอง 400 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 32 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิทดลอง 500 องศาเซลเซียสเพิ่มขึ้น 65 เปอร์เซ็นต์

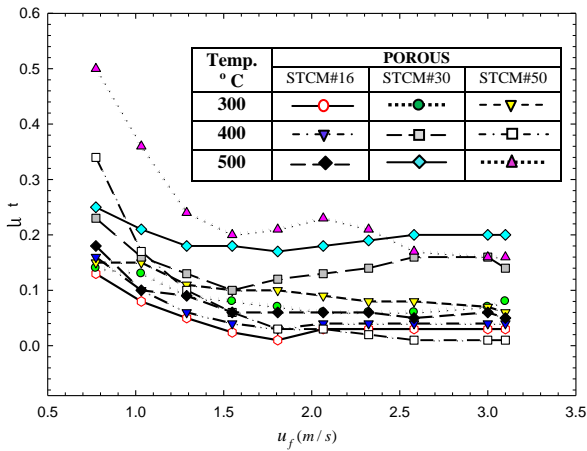


รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของ อากาศร้อนและอัตราการไหล

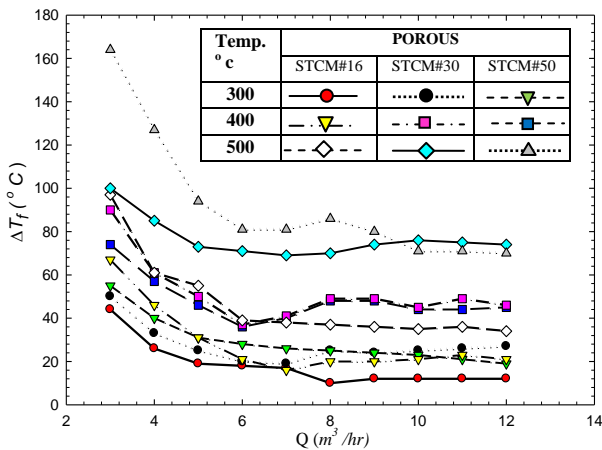
รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุพรุน (u_f) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิของวัสดุพรุนทั้งสามชนิด พบว่าเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิมีค่าลดลง ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัสดุพรุน เมื่ออุณหภูมิของอากาศร้อนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น สำหรับวัสดุพรุนที่แสดงไว้ในรูปที่ 6 วัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้ว มีประสิทธิภาพความร้อนสูงกว่าวัสดุพรุนชนิด 16 และ 30 ช่องต่อตารางนิ้ว ในทุกๆ อุณหภูมิการทดลอง

รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกของวัสดุพรุนแผ่นคู่ทั้งสามชนิด จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิแตกต่างของวัสดุพรุนทั้งสามมีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น วัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วมีอุณหภูมิแตกต่างสูงกว่าชนิด 16 และ 30 ช่องต่อตารางนิ้วในทุกอุณหภูมิการทดลอง ที่เป็นเช่นนั้นเพราะว่าวัสดุพรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้ว มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมากกว่าจึงดูดซับความร้อนเอาไว้ได้มากเมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นจึงเกิดการแผ่รังสีความร้อน

ย้อนกลับไปด้านหน้าทำให้อากาศเข้าแผ่นวัสดุพอรุนมี
อุณหภูมิเพิ่มขึ้น



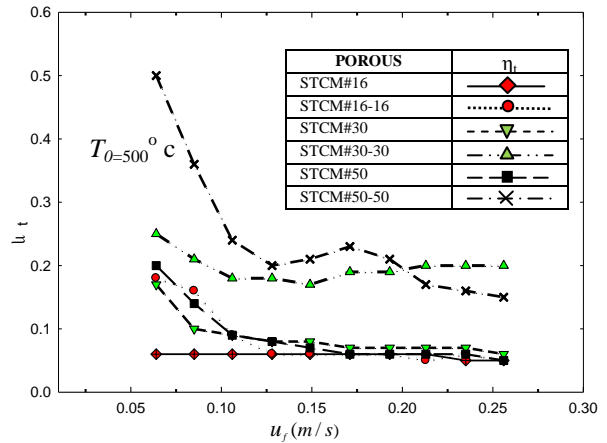
รูปที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความร้อนของวัสดุพอรุนแผ่นคู่



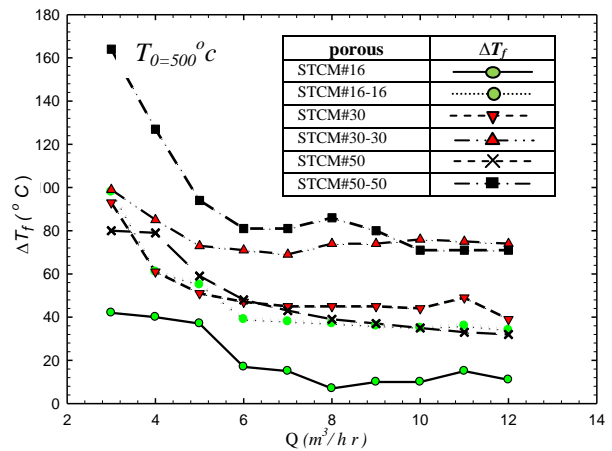
รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกของวัสดุพอรุนแผ่นคู่

รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความร้อนและอิทธิพลความเร็วของอากาศที่ไหลผ่านวัสดุพอรุน (u_f) ของวัสดุพอรุนชนิด 16,30 และ 50 ช่องต่อตารางนิ้ว โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นเดี่ยวและแผ่นคู่ ที่อุณหภูมิทดลอง 500 องศาเซลเซียส ผลจากกราฟแสดงให้เห็นว่า วัสดุพอรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ มีประสิทธิภาพความร้อนสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันที่ความเร็วของอากาศต่ำสุด ระหว่างชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นเดี่ยวและ 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่พบว่า ชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ มีประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 138 เปอร์เซ็นต์,เปรียบเทียบกันระหว่างชนิด

50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่กับ 30 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ ประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 100 เปอร์เซ็นต์, เปรียบเทียบกันระหว่าง 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่กับ 30 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นเดี่ยวประสิทธิภาพความร้อนเพิ่มขึ้น 194 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพความร้อนของวัสดุพอรุนแผ่นเดี่ยวและแผ่นคู่



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกของวัสดุพอรุนแผ่นเดี่ยวและแผ่นคู่

รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิขาออกของแผ่นวัสดุพอรุนชนิด 16,30 และ 50 ช่องต่อตารางนิ้วโดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างแผ่นเดี่ยวและแผ่นคู่ ที่อุณหภูมิทดลอง 500 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า อุณหภูมิแตกต่างของแผ่นวัสดุพอรุนทั้งสามชนิด ทั้งแผ่นคู่และแผ่นเดี่ยว มีค่าลดลงเมื่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้น วัสดุพอรุนชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ มีอุณหภูมิแตกต่างสูงที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบกันที่อัตรา

การไหล 3 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ระหว่างชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นเดียวและ 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ พบว่าชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ มีอุณหภูมิแตกต่างกันเพิ่มขึ้น 114 เปอร์เซ็นต์,เปรียบเทียบกันระหว่างชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่และชนิด 30 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่ อุณหภูมิแตกต่างกันเพิ่มขึ้น 65 เปอร์เซ็นต์,เปรียบเทียบกันระหว่างชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นคู่กับชนิด 30 ช่องต่อตารางนิ้วแผ่นเดี่ยว อุณหภูมิแตกต่างกันเพิ่มขึ้น 76 เปอร์เซ็นต์

5. สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยเพื่อศึกษาคุณสมบัติการเป็นฉนวนความร้อนสำหรับแก๊สร้อนไหลของวัสดุพอร์ซันชนิดตาข่ายสแตนเลสแผ่นคู่ สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ผ่านวัสดุพอร์ซันจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อนและจะลดลงตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น วัสดุพอร์ซันชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้ว ทำให้เกิดอุณหภูมิตกคร่อมมากกว่าวัสดุพอร์ซันชนิด 16 และ 30 ช่องต่อตารางนิ้ว เนื่องจากมีค่าความพอร์ซันมากกว่าทำให้มีพื้นที่รับการถ่ายเทความร้อนจากอากาศร้อนได้มาก

2. ประสิทธิภาพความร้อน (η_r) เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิขาเข้าของอากาศร้อนและลดลงตามความเร็วของอากาศที่เพิ่มขึ้น วัสดุพอร์ซันชนิด 50 ช่องต่อตารางนิ้วมีประสิทธิภาพความร้อนสูงที่สุด

3. วัสดุพอร์ซันแผ่นคู่มีความสามารถส่งเสริมการเป็นฉนวนความร้อนไหลให้ดีขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ สำนักพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (ส.ว.ท.ช) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] 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.

[2] 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.

[3] Echigo, R. Yoshizava, Y. Hanamura, K. and Tomimura, T. (1986). Analytical and Experimental Studies on Radiative Propagation in porous media with internal heat generation. Proceeding of the 8th international heat transfer Conf, San Francisco, Vol. 2.

[4] Echigo, R. and Yochida, H. High Temperature and mass transfer in porous media. Department of mechanical Engineering. Toyo Institute of Technology, Toyo 152, Japan.

[5] Khantikomol, P. and Kamiuto, K. (2008). Combined Forced convection and Radiation Heat Transfer in an Open-Cellular Porous Plate, in: Proc. Of Int. Conf. on Thermal and Fluids Engineering (The 7th JSMEKSME), 14

[6] Gandjalikhan Nassab,S.A. (2004) Effective gas -to gas heat exchange by mean of energy conversion between gas enthalpy and thermal radiation. Proc.Instrn Mech Engers Vol. 218 Part A;J. Power and Energy

[7] Takami,H. Susuki,T. Itaya,Y. and Hasatani, Performance of Flammability of Kerosene and NO_x Emission in the porous Bruner Fuel,Vol.77 No3,1998 pp.165-171

[8] Jugjai, S. and Wongpanit, N. (2002). The combustion of Liquid Fuels using a porous medium. Experimental Thermal and Fluid Science, 26,15-23.



[9] บัณฑิต กฤตาคม (2553). หัวพ่นไฟแบบ
วัสดุพูนโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลเป็นเชื้อเพลิง,
วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ปีที่ 21, ฉบับที่
2