



ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นในวัสดุพอร์โฟมเซลล์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่า PPI เท่ากับ 8.5 TRANSPIRATION COOLING SYSTEM IN Ni-Cr OPEN-CELLED FOAM HAVING PPI OF 8.5

รติภัทร แสงโชติ^{1*} บัณฑิต กฤตาคม² มงคล คธาพันธ์¹ พิพัฒน์ อมตฉายา² และคมเพ็ชร อินลา¹
¹วิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันนครราชสีมา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมยานยนต์
²มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสานนครราชสีมา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพอร์

บทคัดย่อ

ระบบระบายความร้อนชนิดทรานสไปเรชั่นในโฟมเซลล์เปิดแบบหนึ่งมิติถูกดำเนินการทั้งด้วยการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข เพื่อศึกษาหาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสี วัสดุพอร์ที่เลือกใช้ในการทดลอง คือ นิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) ที่มีค่าความพอร์และจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 0.92 และ 8.5 ตามลำดับ ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน ($q_{\text{rx},f}$) ที่แผ่ไปยังผิวด้านบนของวัสดุพอร์นั้นอยู่ในช่วง 0.97 ถึง 16.59 kW/m² แต่สำหรับอากาศป้อนมาจากด้านล่าง มีค่าความเร็ว (u_f) ในช่วง 0.364 ถึง 1.274 m/s ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ในการแสดงผลการศึกษาจะอธิบายด้วย 2 ประสิทธิภาพ นั่นคือ ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (η_T) และการเปลี่ยนพลังงาน (η_C) จากการศึกษาพบว่าในช่วงแรก η_T เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วของอากาศ (Re) ที่จ่ายให้กับระบบเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อค่า Re มากกว่า 30 สำหรับ η_C จะมีค่าลดลงเล็กน้อยตามการเพิ่มขึ้นของ $q_{\text{rx},f}$ และ u_f (Re) ที่ป้อนให้กับระบบ ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับการทดลองจะสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

คำสำคัญ: ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่น, วัสดุพอร์ชนิดเซลล์เปิด, ฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน

ABSTRACT

One-dimensional transpiration cooling system in open-celled foam has been conducted experimentally and numerically to investigate the heat transfer characteristics of combined convection and radiation. The Nickel -Chrome (Ni-Cr) open-cell foam having porosity of 0.92 and pores per inch (PPI) of 8.5 was employed. The upper surface of porous plate was heated by the heat flux of incoming radiation ($q_{\text{rx},f}$) varying from 0.97 – 16.59 kW/m² whereas air injection velocity (u_f) fed into the lower surface was varied from 0.364 – 1.274 m/s, and was then rearranged as Reynolds number (Re). For the report of the results in the present study, two efficiencies including of temperature (η_T) and conversion efficiency (η_C) were presented. The η_T increased rapidly with the air injection velocity (Re). It was then saturated and had a constant value at Re higher than 30. For the result of η_C , it was decreased slightly with increasing of $q_{\text{rx},f}$ and u_f (Re). The numerical predictions also agreed with experimental data very well.

KEYWORDS: Transpiration cooling system, Open-cellular porous materials, Radiative heat flux.

Ratipat Sangchot^{1*} Bundit Krittacom² Mongkol Kathapant¹ Pipatana Amatachaya² and Kompet Inla¹

¹Phanomwa College of Technology Nakhonratchasima, Faculty of Engineering, Automotive Engineering

²Rajamangala University of Technology Isan Nakhonratchasima, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering,
Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab)

E-mail: sangchot@gmail.com^{1*} and bundit.kr@rmuti.ac.th²

1. บทนำ

ระบบขนส่งหรืองานบางงานในภาคอุตสาหกรรม จะมีโครงสร้างของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงๆ เช่น เครื่องจักรที่อยู่ใกล้เตาหลอมเหล็ก ท่อส่งอากาศจากเครื่องอัดอากาศไปยังอุปกรณ์ใช้ลมที่อยู่ใกล้แหล่งความร้อนสูง ใบพัดของแก๊สเทอร์โบปิกเครื่องบินบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ การเผาไหม้อย่างรุนแรงของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่หัวฉีดเชื้อเพลิงใน ยานอวกาศ [1-5] เป็นต้น โครงสร้างและอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีก้ำบังความร้อน (Thermal shield) หรือระบบระบายความร้อน(Cooling system) ที่เพียงพอและเหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง โดยทั่วไปการระบายความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง จะนิยมใช้อากาศหรือของไหลเป็นสารตัวกลางในการหล่อเย็น [1] ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่นจะมีอากาศไหลทะลุผ่านแหล่งความร้อนที่ต้องการระบายตลอดทั่วทั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ โดยเครื่องจักรแบบนี้มีโครงสร้างเป็นวัสดุพูน ทำให้สามารถระบายความร้อนได้โดยตรง ขณะเดียวกันเครื่องจักรที่เป็นวัสดุพูนก็ยังทำหน้าที่เป็นเสมือนก้ำบังความร้อนไปในตัว

ระบบการระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น เป็นเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง Duwez และ Wheeler [2] เสนอวิธีการส่งเสริมการระเหยสารตัวกลาง ในกรณีที่อยู่ในสภาวะที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง ดังพบเห็นในเครื่องยนต์เจ็ท (Jet engine) เป็นการใชวัสดุพูนร่วมกับของไหลที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านวัสดุพูนในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของความร้อน โดยเรียกวิธีการระบายความร้อนดังกล่าวว่า Sweat cooling (หรือ Transpiration cooling) Grootenhuis [3] ศึกษาการระบายความร้อนจากผิวที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใบกังหันและผนังของกังหันไอน้ำหรือฉนวนหุ้มห้องเผาไหม้ โดยการใช้อากาศความดันสูงเป่าผ่านวัสดุพูนที่ดูดซับความร้อนไว้ และทำให้เกิดชั้นของฉนวนกันความร้อนใต้ผิวที่ปะทะความร้อนโดยตรง เป็นเสมือนก้ำบังความร้อน Kubota [4] ได้วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบการระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์มิติเดียวภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) Maruyama และคณะ [5] ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฉนวนความร้อนที่มีลักษณะเป็นเสมือนก้ำบังความร้อน ในการศึกษาของพวกเขาพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อน ความลึกที่ความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปในวัสดุได้นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงจากการพ่นก๊าซเข้าไป และมีค่ามากกว่าในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว Wang และคณะ [6] ทดลองใช้เทคนิคการสร้างภาพโดยอาศัยคลื่นความร้อนอินฟราเรด (Infrared thermal imaging technique; IRITIT) ในการบอกสมรรถนะการระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น Kamiuto และคณะ [7] ได้ศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบการระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่นด้วยอากาศ โดยการใช้วัสดุพูนชนิดโฟมเซลล์เปิดหรือเซลล์ลาร์เปิด (Open-cell foam or open-cellular materials) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพของอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ส่วนค่าประสิทธิภาพของอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ และจะมีค่าสูงกว่า 90% วัสดุพูนโฟมเซลล์เปิดสามารถใช้เป็นก้ำบังความร้อนได้ดี ถ้าความหนาเชิงแสง (Optical thickness) ของวัสดุพูน มีค่ามากกว่า 5 แต่พวกเขาอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างภายในแผ่นวัสดุพูนเพียงเล็กน้อย

เมื่อเร็วๆ นี้คณะผู้วิจัย [8] ได้เลือกใช้วัสดุพูนเซลล์ลาร์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่าความพูนและ PPI เท่ากับ 0.93 และ 21.5 ตามลำดับ มาศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองระบบระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น ผลการศึกษาของพวกเขา พบว่าประสิทธิภาพทั้งสอง คือ เชิงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นตามค่า Re และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ $Re > 10$ และยังนำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างทางอุณหภูมิภายในวัสดุพูนทั้งสถานะแก๊สและของแข็ง นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

จากการศึกษาที่กล่าวมา พบว่ามีทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น แต่การศึกษาส่วนใหญ่สนใจเพียงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นหลัก ส่วนอิทธิพลการแผ่รังสีมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย ทำให้สมรรถนะที่ได้ยังมีค่าต่ำและไม่มีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงนอกจากนี้แม้ว่าจะมีงานวิจัยของคณะผู้เขียนบทความ [8] ได้เคยนำเสนอมาบ้างแล้วเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพากับการแผ่รังสีความร้อน แต่ก็ยังเป็นเพียงวัสดุพูนที่มีค่าความพูนและ PPI เดียว ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการพาพร้อมกับการแผ่รังสีความร้อนในระบบการระบายความร้อนที่ใชวัสดุพูนแบบเซลล์ลาร์เปิด ชนิดนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) เพิ่มเติม โดยศึกษาวัสดุพูนที่มีค่าความพูนและPPIเท่ากับ 0.92 และ 8.5 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ข้อมูลใน

การเลือกวัสดุพอร์ซันนี้มากยิ่งขึ้น ในการใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนของทรานสไพเรชั่นหรือกักเก็บความร้อนต่อไป

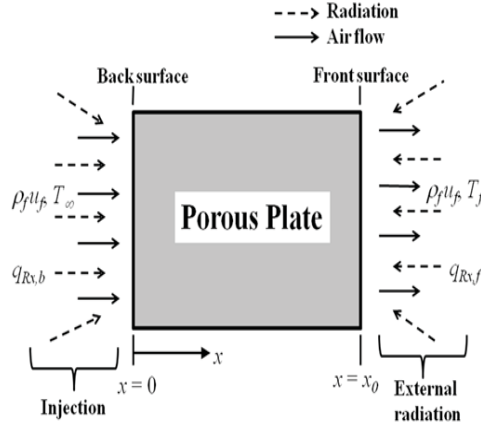
2. รายการสัญลักษณ์

c_f	ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K)	สัญลักษณ์กรีก	
G	รังสีที่แผ่ในวัสดุพอร์ซัน (W/m^2)	β	สัมประสิทธิ์การสั่นสุญ (m^{-1})
h_v	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ($W/m^3 K$)	ϕ	ค่าความพอร์ซัน
k_f	ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะแก๊ส ($W/m^2 K$)	η_T	ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิต
k_s	ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะของแข็ง ($W/m^2 K$)	η_C	ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
PPI	จำนวนรูพอร์ซันต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (in^{-1})	ρ_f	ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
$q_{R,x,f}$	ค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)	ρ_s	ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/m^3)
Re	เลขเรย์โนลด์	σ	ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมานน์ ($W/m^2 K^4$)
T_f	อุณหภูมิของอากาศ (K)	τ	ความหนาเชิงแสง
T_o	อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า (K)	ω	อัลเบโด (Albedo)
T_R	อุณหภูมิการแผ่รังสี (K)		
T_s	อุณหภูมิของวัสดุพอร์ซัน (K)		
T_{SB}	อุณหภูมิผิวด้านหลังของวัสดุพอร์ซัน (K)		
T_{SF}	อุณหภูมิผิวด้านหน้าของวัสดุพอร์ซัน (K)		
u_f	ความเร็วของอากาศ (m/s)		
x_o	ความหนาของชั้นงาน (m)		

3. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

3.1 แบบจำลองทางกายภาพและสมการควบคุม

รูปที่ 1 จะแสดงรูปแบบกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่นและในการคำนวณจำเป็นต้องมีสมมติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) วัสดุพอร์ซันเป็นแบบเซลล์รูเปิดซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเท่านั้น 2) ที่ผิวหน้าและผิวหลังของวัสดุพอร์ซันได้รับการแผ่รังสีจากภายนอกแบบวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิการแผ่รังสีเป็น T_R และ T_o ตามลำดับ 3) อากาศอุณหภูมิต่ำหรืออากาศเย็น (T_o) ไหลเข้าวัสดุพอร์ซันที่ผิวหลังด้วยความเร็ว u_f และไม่คิดการแผ่รังสีของอากาศ 4) วัสดุพอร์ซันสามารถดูดซับ, กระจาย และสะท้อนรังสีความร้อนได้ แต่คุณสมบัติการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ 5) คุณสมบัติทางกายภาพของระบบไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 6) สภาวะการคำนวณของสถานะของแข็ง (วัสดุพอร์ซัน) และสถานะแก๊ส (อากาศ) เป็นสภาวะที่ต่อเนื่อง และ 7) การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอร์ซันอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 1 จากสมมติฐานทั้ง 7 ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equations) ประกอบไปด้วย

จากสมมติฐานทั้ง 7 ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equations) ประกอบไปด้วย

$$\rho_f u_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \phi \frac{\partial}{\partial x} \left(k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + h_v (T_f - T_s) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{3} (1 - \phi) \frac{\partial}{\partial x} \left(k_r \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + h_v (T_f - T_s) - \frac{dq_{Rx,f}}{dx} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_R}{\partial x} = 4\beta(1 - \omega)(\sigma T_s^4 - \frac{G}{4}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_f u_f)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

เมื่อสมการที่ (1), (2), (3) และ (4) คือสมการอนุรักษ์พลังงานของสถานะแก๊สและของแข็ง (Gas and solid phase energy equation) สมการการแผ่รังสีความร้อน (Radiative heat transfer equation, RTE) และสมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) ตามลำดับ

เพื่อให้สามารถคำนวณสมการอนุรักษ์พลังงานของสถานะของแข็ง (สมการที่ (2)) ได้ สมการการแผ่รังสีความร้อน (สมการที่ (3)) จำเป็นต้องทราบคำตอบ ดังนั้นในการหาผลลัพธ์ของสมการที่ (3) วิธีโดยประมาณ P_1 (The P_1 approximation) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหานี้ สมการโดยประมาณแบบ P_1 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{dq_R}{dx} + (1 - \omega)\beta(G - 4\sigma T_s^4) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{dG}{dx} + 3(1 - \omega)\beta q_{Rx,f} = 0 \quad (6)$$

จากสมการควบคุมทั้งหมดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของการคำนวณกำหนดโดย

$$\left. \begin{aligned} x = 0 ; T_f = T_\infty, \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \quad G - 2q_{R_{x,f}} &= 4\sigma T_\infty^4 \\ x = x_0 ; \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0, \quad G + 2q_{R_{x,f}} &= 4\sigma T_R^4 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

3.2 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอในรูปของประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (Temperature efficiency, η_T) และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency, η_C) ซึ่งประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ มีความหมายทางกายภาพ คือ ค่าการเปรียบเทียบความใกล้เคียงกันระหว่างอุณหภูมิของวัสดุพอร์นกับอุณหภูมิของอากาศเข้า สำหรับความหมายทางกายภาพ คือ ความสามารถของวัสดุพอร์นในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพาความร้อนหลังจากที่วัสดุพอร์นได้ดูดซับความร้อนจากรังสีที่แผ่เข้ามา สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

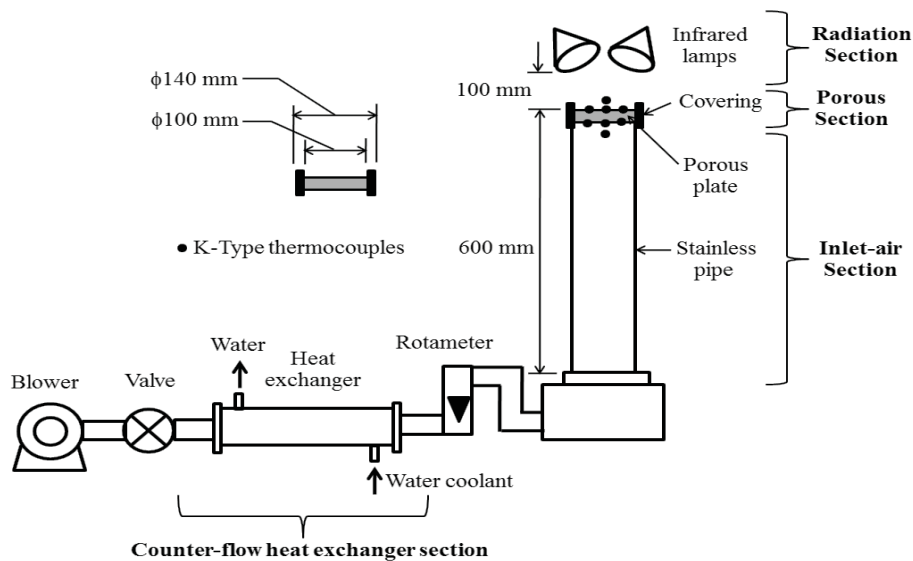
$$\eta_T = \left[T_R - \frac{T_s(0) + T_s(x_0)}{2} \right] / (T_R - T_0) \quad (8)$$

$$\eta_C = \rho_f c_f u_f [T_f(x_0) - T_f(0)] / q_{R_{x,f}} \quad (9)$$

4. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

4.1 อุปกรณ์การทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของอากาศที่ไหลเข้าระบบ (Inlet air section) ส่วนที่สองเป็นวัสดุพอร์น (Porous section) ส่วนที่สามเป็นส่วนแผ่รังสีความร้อน (Radiation section) โดยส่วนอากาศไหลเข้าหรือส่วนที่หนึ่งจะเป็นท่อทำมาจากสแตนเลสยาว 600 mm หนา 2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 108 mm จะมีวัสดุทดลอง วางอยู่ด้านบนของท่อ ซึ่งเป็นวัสดุพอร์นแบบเซลลูลาร์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Ni–Cr) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm หนา 10.3 mm (ส่วนที่สอง) และด้านบนสุดจะติดตั้งหลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด (ส่วนที่สาม) เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนเสมือนการแผ่รังสีเข้ามายังวัสดุทดลอง สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ จะแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทราแนสไปเร้น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนแบบโฟมเซลล์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Nickel -Chrome)

สัมประสิทธิ์	สัญลักษณ์	ค่ากายภาพ
ค่าความพรุน	ϕ	0.92
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว	PPI	8.5
ความหนา	x	0.0103 m
Extinction coefficient	β	117.8 m^{-1}
ความหนาเชิงแสง	τ	1.213

4.2 วิธีการทดลอง

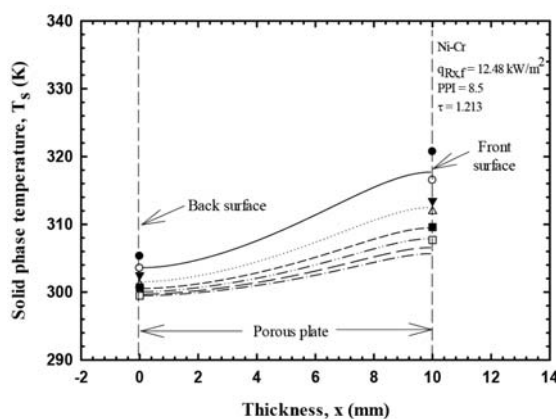
จากส่วนประกอบทั้งหมดของระบบระบายความร้อนแบบนี้มีหลักการทำงาน คือ อากาศเย็นถูกดูดมาจากพัดลมดูด (Blower) ด้านล่างผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) และส่งอากาศเย็นนี้ขึ้นไปในแนวตั้งตามท่อเข้าสู่วัสดุทดลองหรือวัสดุพูนที่ได้รับการแผ่รังสีจากหลอดไฟอินฟราเรดภายนอก ซึ่งพลังงานการแผ่รังสีความร้อนถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (Heat flux sensor) ยี่ห้อ Hukseflux Thermal Sensors รุ่น HFP01-05 เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกจากวัสดุพูนรวมทั้งอุณหภูมิของวัสดุพูนที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouples) ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้นำไปวิเคราะห์และหาประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เป็นตัวระบายความร้อนหรือกักเก็บความร้อนต่อไป

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

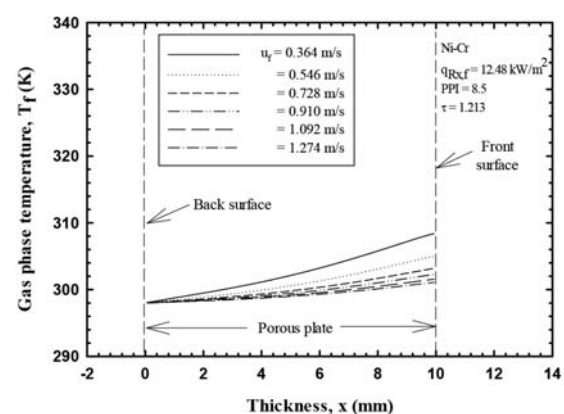
5.1 โครงสร้างทางอุณหภูมิกิจกรรมของอัตราการไหลของอากาศไหลเข้าสู่ระบบ (u_f)

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่ระบบ (Air flow velocity, u_f) แต่จะแปลงและนำเสนอด้วยเลข เรย์โนลด์ (Reynold number, Re) (แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า Re ใน Kamiuto และคณะ [7]) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดง

อยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนา (Thickness, x) ของแผ่นวัสดุพอร์นในที่นี่จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) โดยรูปที่ 3 (ก) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (Solid phase temperature profile, T_s) และรูปที่ 3 (ข) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (Gas phase temperature profile, T_g) ในการคำนวณดำเนินการที่สภาวะ $q_{Rx,f} = 12.48 \text{ kW/m}^2$ และเป็นของวัสดุพอร์นนิเกิล-โครม (Nickel-Chrome) ตำแหน่ง $x = 0 \text{ mm}$ และ 10.3 mm คือด้านผิวหลัง (Back surface) และด้านผิวหน้า (Front surface) ของแผ่นวัสดุตามลำดับ จากรูปที่ 3 (ก) พบว่า T_s จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอร์นเนื่องจากที่ตำแหน่งผิวหน้า ($x = 10.3 \text{ mm}$) เป็นตำแหน่งที่ได้รับการแผ่รังสี มาจากแหล่งกำเนิดความร้อนใดๆ ($q_{Rx,f}$) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรด (Infrared lamp) หากพิจารณาที่ตำแหน่งความหนาใดๆ ใดๆ พบว่า T_s จะลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อน (Heat convection) ที่ระบายความร้อนออกจากแผ่นวัสดุพอร์น ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (T_g) แสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี T_s นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า T_g กับ T_s จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า T_s มีค่าสูงกว่า T_g ซึ่งเป็นพฤติกรรมตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอร์น อธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุพอร์นดูดซับพลังงานจากหลอดไฟอินฟราเรดไว้แล้ว วัสดุพอร์นจะทำการถ่ายโอนพลังงานให้กับอากาศเย็นที่ไหลผ่านเกิดการระบายความร้อนขึ้นในแผ่นวัสดุพอร์น สรุปกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ คือ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ของวัสดุพอร์นไปยังอากาศเย็นด้วยวิธีการพาความร้อน ขึ้นในแผ่นวัสดุพอร์น [9] สรุปกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ คือ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ของวัสดุพอร์นไปยังอากาศเย็นด้วยวิธีการพาความร้อน



(ก)

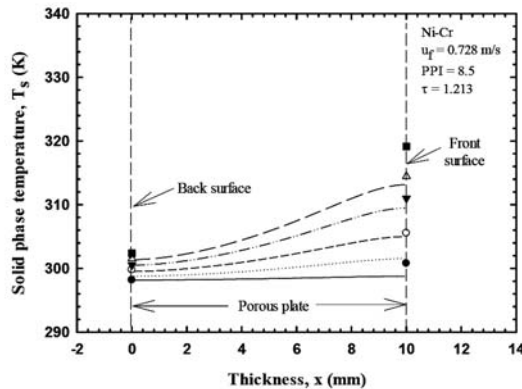


(ข)

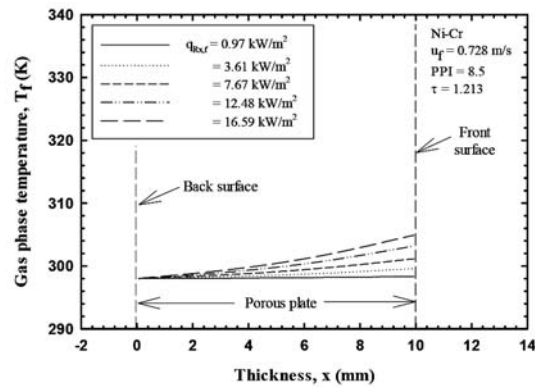
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_s และ T_g กับ x ที่สภาวะ $q_{Rx,f} = 12.48 \text{ kW/m}^2$

5.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิก่อนอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux, $q_{Rx,f}$) ที่แผ่มายังวัสดุพอร์นที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ซึ่งรูปที่ 4 (ก) เป็นของสถานะของแข็ง (T_s) และรูปที่ 4 (ข) เป็นของสถานะแก๊ส (T_g) โดยทำการศึกษาที่สภาวะ $u_f = 0.728 \text{ m/s}$ จากรูปที่ 4 (ก) พบว่า T_s จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอร์น (x) เนื่องจากที่ตำแหน่ง $x = 10.3 \text{ mm}$ เป็นตำแหน่งด้านผิวหน้าของวัสดุพอร์นที่ได้รับพลังงานมาจากแหล่งกำเนิด ความร้อนใดๆ ($q_{Rx,f}$) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรดและหากสังเกตที่ตำแหน่ง x ใดๆ พบว่าเมื่อ $q_{Rx,f}$ เพิ่มขึ้น T_s จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเพราะระบบได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีมากขึ้น ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (T_g) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่า T_g มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี T_s แต่มีค่าต่ำกว่า เพราะวัสดุพอร์นเป็นตัวรับพลังงานจาก $q_{Rx,f}$ แล้วค่อยถ่ายเทไปยังอากาศ (T_g) ที่ไหลเข้าสู่ระบบเพื่อระบายความร้อน จึงเป็นเหตุให้ T_g ต่ำกว่า T_s



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง T_s และ T_g กับ x ที่สภาวะ $u_f = 0.728$ m/s

5.3 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ

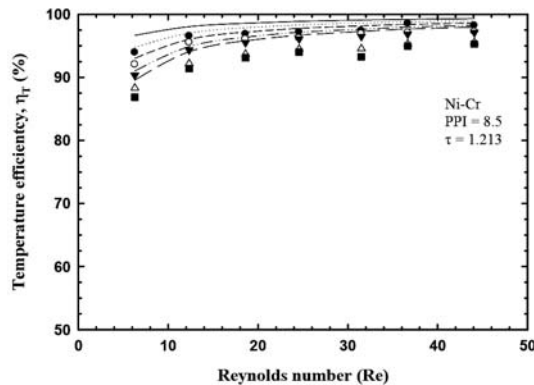
รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (Temperature efficiency, η_T) โดยทำการศึกษาที่กรณี Ni-Cr มีค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ) เท่ากับ 1.213 พบว่าค่า η_T มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ Re เพิ่มขึ้น และจะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งมีค่า η_T ประมาณ 97% โดยเฉพาะเมื่อ Re มากกว่า 30 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นซึ่งทำหน้าที่เป็นกักเก็บความร้อน มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลให้กับระบบเพื่อทำการระบายความร้อน หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า η_T ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ $q_{R,x,f}$ เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นกับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าระบบมีความแตกต่างกันมากขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ โดยกำหนดให้กราฟเส้นเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนรูปสัญลักษณ์จะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจากในสมมติฐานของการคำนวณได้กำหนดให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นและของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งในความเป็นจริงคุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

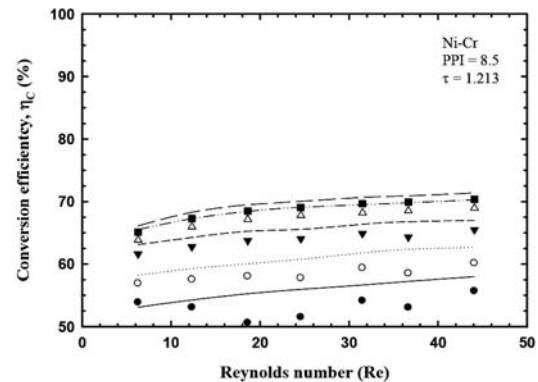
5.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency, η_c) ซึ่งหมายถึงความสามารถของวัสดุพอร์นในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพา ความร้อน (Convective heat transfer) หลังจากวัสดุพอร์นได้ดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสี (Radiation) เข้ามา โดยทำการคำนวณที่กรณี Ni-Cr มีค่า τ เท่ากับ 1.213 พบว่าแม้ Re จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า η_c แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากผลที่ได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าอากาศเย็นที่ป้อนเข้าวัสดุพอร์นเพื่อระบายความร้อนนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจากวัสดุพอร์น แม้จะเพิ่มความเร็วอากาศ (Re) ไปมากกว่านี้ก็ตาม หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า η_c เพิ่มขึ้นตามปริมาณ q_R ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุได้รับพลังงานมากขึ้นจึงมีการแผ่รังสี

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ โดยกำหนดให้กราฟเส้นเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนรูปสัญลักษณ์จะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย ด้วยเหตุผลเดียวกันกับกรณี η_T (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_T กับ Re ของวัสดุพูน



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง η_C กับ Re ของวัสดุพูน

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาระบบระบายความร้อนแบบทรานสไพเรชั่น โดยใช้วัสดุพูนเซลล์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่า PPI เท่ากับ 8.5 สรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊ส (T_f) และของแข็ง (T_s) จะเพิ่มขึ้นตามการแผ่รังสีภายนอก ($q_{R_{x,f}}$) และลดลงตามความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบหรือเลขเรย์โนลด์ (Re)
- 2) โครงสร้างทางอุณหภูมิจาก T_s จะสูงกว่า T_f เนื่องจากวัสดุพูนหรือของแข็งเป็นตัวดูดซับรังสีความร้อน แล้วจึงถ่ายเทไปยังสถานะแก๊สด้วยการพาความร้อน (Heat convection)
- 3) ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก (η_T) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง Re ต่ำๆ และจะเข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อ $Re > 30$ แต่ค่า η_T จะลดลงเล็กน้อย เมื่อ $q_{R_{x,f}}$ เพิ่มขึ้น
- 4) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (η_C) ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดตามปริมาณ $q_{R_{x,f}}$
- 5) ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้ มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองเพียงเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถคำนวณ η_T และ η_C ได้อย่างน่าเชื่อถือ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยเทคโนโลยีพนมวันท์ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ นายนิธิภัทร์ สำเร็จศิลป์ นายศักดิ์ดา สิมาชัย นายสมภพ ภิญโญวงษ์ นายสิทธิพงศ์ สีลาดเลา นักศึกษาสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลซึ่งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory : DITO-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองบางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. P. Boyce, "Gas turbine engineering handbook (3rd ed.)", Gulf Professional Publishing (GPP), Houston, Texas, 2006.
- [2] P. Duwez, and H. L. Wheeler, "Experimental study of cooling by injection of a fluid through a porous material", Journal of Aeronautical Sciences, 15, September 1948, pp. 509 – 521.
- [3] P. Grootenhuis, "The mechanism and application of effusion cooling", Journal of the Royal Aeronautic Society, 63, 1959, pp.73 – 89.
- [4] H. Kubota, "Thermal response of a transpiration-cooled system in a radiative and convective Environment", Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer, 99, 1977, pp. 628 – 633.
- [5] S. Maruyama, R. Viskanta, and T. Aihara, "Analysis of an active high-temperature thermal insulation system", International Journal of

-
- Heat and Fluid Flow, 11(No.3), 1993, pp. 196 - 203.
- [6] J. H. Wang, J. Messner, and H. Stetter, "An experimental investigation of transpiration cooling Part I: Application of an Infrared Measurement Technique", International Journal of Rotating Machinery, 9 (No.3), 2003, pp.153 - 161.
- [7] K. Kamiuto, K. Unoki, and A. Andou, "Thermal characteristics of transpiration cooling system using open-cellular porous materials in a radiative environment", International Journal Transaction Phenomena, 7, 2005, pp. 85 - 96.
- [8] P. Amatachaya, P. Khantikamol, R. Sangchot, and B. Krittacom, "Steady state transpiration cooling system in Ni-Cr open-cellular porous plate.", International Conference on Fluids and Thermal Engineering : ICFTE 2011, River View Hotel, Singapore, 28-30 September 2011.
- [9] B. Krittacom and P. Amatachaya, "Comparison of solution of radiative heat transfer equation in porous materials solving by the equation of formal solution and P1 approximation equation", Engineering Journal of Siam University, 9, 2008, pp. 20-30.(in Thai)