

**ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นในสถานะคงที่โดยใช้วัสดุพรุนเซลลูลาร์เปิด
ที่มีค่าจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 39.5**
**Steady State Transpiration Cooling System using Open-cellular Porous Media
having Pore per Inches (PPI) of 39.5**

รติภัทร แสงโชติ^{1*}, บัณฑิต กฤตาคม¹, พิพัฒน์ อมตฉายา¹ และรพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ²

¹ ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory)

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

² สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: sangchot@gmail.com และ bundit.kr@rmutt.ac.th, โทรศัพท์: +664-423-3073 ต่อ 3411, โทรสาร: +664-423-3074

บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นโดยใช้วัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิดในสถานะคงที่ ได้ถูกทำการศึกษาทั้งการทดลองและการคำนวณ วัสดุพรุนที่เลือกใช้ คือ นิกเกิล - โครม (Nickel-Chrome) ที่มีค่าความพรุนและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (Pores per inch, PPI) เท่ากับ 0.899 และ 39.5 ตามลำดับ ฟลักซ์การแผ่รังสี (Radiative heat flux, q_R) ที่แผ่ไปยังผิวด้านบนของวัสดุพรุนนั้นอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 15.4 kW/m^2 แต่สำหรับอากาศที่ป้อนมาจากด้านล่างเข้าสู่ระบบมีค่าความเร็วในช่วง 2.122×10^{-4} ถึง 12.73×10^{-4} m/s ซึ่งในการนำเสนอจะจัดให้อยู่ในรูปเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณ q_R มากขึ้น และ Re หรือความเร็วอากาศเย็นไหลเข้าระบบลดลง โครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊สและของแข็งในแผ่นวัสดุพรุนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency, η_c) ซึ่งจะหมายถึงความสามารถของวัสดุพรุนในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพาความร้อน (Convective heat transfer) หลังจากวัสดุพรุนได้ดูดซับความร้อนจากการรังสีความร้อนที่แผ่เข้ามา มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามค่า Re แต่จะสูงขึ้นเมื่อ q_R เพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลอง มีความสอดคล้องกันอย่างเหมาะสม

คำหลัก: ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่น, วัสดุพรุนชนิดเซลลูลาร์เปิด, ฟลักซ์การแผ่รังสี

Abstract

Numerical and experimental study on heat transfer characteristics of combined convection and radiation of the air transpiration cooling system using the open-cellular porous material was investigated. The Nickel-Chrome (Ni-Cr) open cellular plates, having porosity of 0.899 and pores per inch (PPI) of 39.5, was used as porous media. The upper surface of porous plate was heated by the heat flux (q_R) of incoming radiation varying from 1.9 to 15.4 kW/m^2 whereas air injection velocity fed into the lower surface was varied from 2.122×10^{-4} to 12.73×10^{-4} m/s . The air velocity was rearranged as Reynolds number (Re) to report the results in the paper. From study, the results showed that the temperature profile of both gas and solid phase increased when q_R increased and Re decreased. The conversion efficiency (η_c), which regard as the ability of porous materials in transferring energy by convection after absorbed from heat radiation, increased slightly with Re but depend strongly with q_R . The agreement between theoretical and experimental data was satisfactory.

Keywords: Transpiration cooling system, Open-cellular porous materials, Raditive heat flux.

1. บทนำ

งานบางงานในภาคอุตสาหกรรม หรือระบบขนส่งจะมีโครงสร้างของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ เช่น เครื่องจักรที่อยู่ใกล้เตาหลอมเหล็ก ท่อส่งอากาศจากเครื่องอัดอากาศไปยังอุปกรณ์ใช้ลมที่อยู่ใกล้แหล่งความร้อนสูง ใบพัดของแก๊สเทอร์ไบน์ปีกเครื่องบินบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่หัวฉีดเชื้อเพลิงในยานอวกาศ [1-5] เป็นต้น โครงสร้างและอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีกัมบังความร้อน (Thermal shield) หรือระบบระบายความร้อน (Cooling system) ที่เพียงพอและเหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง โดยทั่วไปการระบายความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง จะนิยมใช้อากาศหรือของไหลเป็นสารตัวกลางในการหล่อเย็น [1] ระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นจะมีอากาศไหลทะลุผ่านแหล่งความร้อนที่ต้องการระบายตลอดทั่วทั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ โดยเครื่องจักรแบบนี้มีโครงสร้างเป็นวัสดุพอร์ซเลน ทำให้สามารถระบายความร้อนได้โดยตรง ขณะเดียวกันเครื่องจักรที่เป็นวัสดุพอร์ซเลนก็ยังมีหน้าที่เป็นเสมือนกัมบังความร้อนไปในตัว

ระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น เป็นเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง Duwez และ Wheeler [2] เสนอวิธีการส่งเสริมการระเหยสารตัวกลาง ในกรณีที่อยู่ในสภาวะที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง ดังพบเห็นในเครื่องยนต์เจ็ท (Jet engine) เป็นการใช้วัสดุพอร์ซเลนร่วมกับของไหลที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านวัสดุพอร์ซเลนในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของความร้อน โดยเรียกวิธีการระบายความร้อนดังกล่าวว่า Sweat cooling (หรือ Transpiration cooling) Grootenhuis [3] ศึกษาการระบายความร้อนจากผิวที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใบกังหันและผนังของกังหันไอน้ำหรือฉนวนหุ้มห้องเผาไหม้ โดยการใช้อากาศความดันสูงเป่าผ่านวัสดุพอร์ซเลนที่ดูดซับความร้อนไว้ และทำให้เกิดชั้นของ ฉนวนกันความร้อนใต้ผิวที่ปะทะความร้อนโดยตรง เป็นเสมือนกัมบังความร้อน Kubota [4] ได้วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หิมิตเดียวภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) โดยระบบระบายความร้อนประกอบด้วย วัสดุพอร์ซเลน สะท้อนรังสี และการจ่ายอากาศที่ใช้ดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสี โดยอาศัยการพาความร้อน ผลการคำนวณ

พบว่าอุณหภูมิที่ผิวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพอร์ซเลนทางด้านหลังจะตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อรังสีความร้อนที่ตกกระทบ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหล ทำให้อุณหภูมิในวัสดุพอร์ซเลนลดลง Maruyama และคณะ [5] ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฉนวนความร้อนที่มีลักษณะเป็นเสมือนกัมบังความร้อน ในการศึกษาของพวกเขาพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อน ความลึกที่ความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปในวัสดุได้นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการพ่นก๊าซเข้าไป และมีค่ามากกว่าในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว Wang และคณะ [6] ทดลองใช้เทคนิคการสร้างภาพโดยอาศัยคลื่นความร้อนอินฟราเรด (Infrared thermal imaging technique; IRTIT) ในการบอกสมรรถนะการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น จากการศึกษาพบว่าความเสถียรของระบบการวัดเกิดขึ้นในวัสดุพอร์ซเลนที่ทำด้วยโลหะโครเมียม – นิกเกิล ที่มีความพอร์ซ 21 % เมื่อเร็ว ๆ นี้ Kamiuto และคณะ [7] ได้ศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นด้วยอากาศ โดยการใช้วัสดุพอร์ซเลนชนิดโฟม เซลเปิดหรือเซลลูลาร์เปิด (Open-cell foam or open-cellular materials) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ส่วนค่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ และจะมีค่าสูงกว่า 90% วัสดุพอร์ซเลนโฟมเซลเปิดสามารถใช้เป็นกัมบังความร้อนได้ดี ถ้าความหนาเชิงแสง (Optical thickness) ของวัสดุพอร์ซเลน มีค่ามากกว่า 5 แต่พวกเขาอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างภายในแผ่นวัสดุพอร์ซเลนเพียงเล็กน้อย

จากการศึกษาที่กล่าวมา พบว่ามีทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น แต่การศึกษาส่วนใหญ่สนใจเพียงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นหลักส่วนอิทธิพลการแผ่รังสีมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย ทำให้สมรรถนะที่ได้ยังมีค่าต่ำและไม่มี ความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยการพาความร้อนร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนในระบบการระบายความร้อนที่ใช้วัสดุพอร์ซเลนแบบเซลลูลาร์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) ที่มีค่าความพอร์ซและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยเนื้อ เท่ากับ 0.899 และ

39.5 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการเลือกวัสดุพรมชนิดนี้ในการใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนของทรานส์ไปเรชั่นหรือกำลังความร้อนต่อไป

2. รายการสัญลักษณ์

- C_f ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
- G รั้งสีที่แผ่ในวัสดุพรม (W/m^2)
- h_v สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ($W/m^3 K$)
- k_f ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะแก๊ส ($W/m^2 K$)
- k_s ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะของแข็ง ($W/m^2 K$)
- PPI จำนวนรูพรมต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (in^{-1})
- q_R ค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (W/m^2)
- Re Reynolds number
- T_f อุณหภูมิของอากาศ (K)
- T_o อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า (K)
- T_R อุณหภูมิการแผ่รังสี (K)
- T_s อุณหภูมิของวัสดุพรม (K)
- T_{SB} อุณหภูมิผิวด้านหลังของวัสดุพรม (K)
- T_{SF} อุณหภูมิผิวด้านหน้าของวัสดุพรม (K)
- u_f ความเร็วของอากาศ (m/s)
- x_0 ความหนาของชิ้นงาน (m)

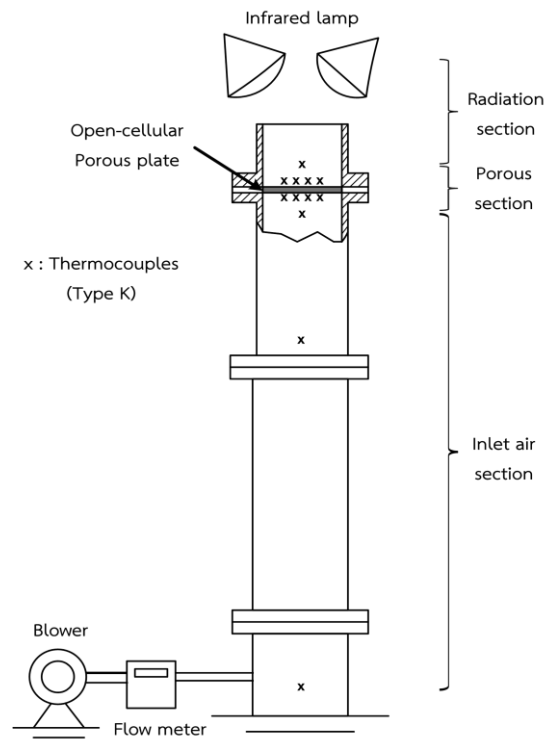
สัญลักษณ์กรีก

- β สัมประสิทธิ์การสิ้นสุญ (m^{-1})
- ϕ ค่าความพรม
- η_c ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน
- ρ_f ความหนาแน่นของอากาศ (kg/m^3)
- ρ_s ความหนาแน่นของของแข็ง (kg/m^3)
- σ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์มานน์ ($W/m^2 K^4$)
- τ ความหนาเชิงแสง
- ω Albedo

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของอากาศที่ไหลเข้าระบบ (Inlet air section) ส่วนที่สองเป็นวัสดุพรม (Porous section) ส่วนที่สามเป็นส่วนแผ่รังสีความร้อน (Radiation section) โดยส่วนอากาศที่ไหลเข้าหรือส่วนที่หนึ่งจะเป็นท่อทำมาจากสแตนเลส ยาว

600 mm หนา 2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 108 mm จะมีวัสดุทดลอง วางอยู่ด้านบนของท่อ ซึ่งเป็นวัสดุพรมแบบเซลลูลาร์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Ni-Cr) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120 mm หนา 10.3 mm (ส่วนที่สอง) และด้านบนสุดจะติดตั้งหลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด (ส่วนที่สาม) เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนเสมือนการแผ่รังสีเข้ามาถึงวัสดุทดลอง สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรมที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ จะแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรมแบบเซลลูลาร์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome)

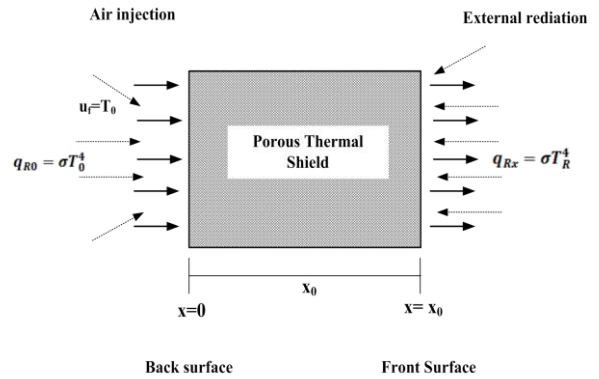
สัมประสิทธิ์	ค่ากายภาพ
ค่าความพรม	ϕ 0.899
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว	PPI 39.5
ความหนา	x 0.0103 m
Extinction coefficient	β $633.3 m^{-1}$
ความหนาเชิงแสง	τ 6.523

จากส่วนประกอบทั้งหมดของระบบระบายความร้อนแบบนี้มีหลักการทำงาน คือ อากาศเย็นถูกดูดมาจากพัดลมดูด(Blower) ด้านล่างผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) และส่งอากาศเย็นนี้ขึ้นไปในแนวตั้งตามท่อเข้าสู่วัสดุทดลองหรือ วัสดุพอรุนที่ได้รับการแผ่รังสีจากหลอดไฟอินฟราเรดภายนอก ซึ่งพลังงานการแผ่รังสีความร้อนถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดพลังซ์การแผ่รังสีความร้อน (Heat flux sensor) ยี่ห้อ Hukseflux Thermal Sensors รุ่น HFP01-05 เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกจากวัสดุพอรุน รวมทั้งอุณหภูมิของวัสดุพอรุนที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouples) ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จะนำไปวิเคราะห์และหาประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เป็นวัสดุระบายความร้อนหรือกำบังความร้อนต่อไป

4. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

4.1 แบบจำลองทางกายภาพและสมการควบคุม

รูปที่ 2 จะแสดงรูปแบบกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นและในการคำนวณจำเป็นต้องมีสมมติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) วัสดุพอรุนเป็นแบบเซลลูลาร์เปิดซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเท่านั้น 2) ที่ผิวหน้าและผิวหลังของวัสดุพอรุนได้รับการแผ่รังสีจากภายนอกแบบวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิการแผ่รังสีเป็น T_R และ T_0 ตามลำดับ 3) อากาศอุณหภูมิต่ำหรืออากาศเย็น (T_0) ไหลเข้าวัสดุพอรุนที่ผิวหลังด้วยความเร็ว u_f และไม่คิดการแผ่รังสีของอากาศ 4) วัสดุพอรุนสามารถดูดซับ, กระจาย และสะท้อนรังสีความร้อนได้ แต่คุณสมบัติการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ 5) คุณสมบัติทางกายภาพของระบบไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ 6) สภาวะการคำนวณของสถานะของแข็ง (วัสดุพอรุน) และของสถานะแก๊ส (อากาศ) เป็นสภาวะที่ต่อเนื่อง และ 7) การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอรุนอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 2 รูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่น

จากสมมติฐานทั้ง 7 ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equations) ประกอบไปด้วย

$$\rho_f u_f c_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + \phi k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_v (T_f - T_s) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{1}{3} (1 - \phi) k_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} + h_v (T_f - T_s) - \frac{dq_r}{dx} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{dq_r}{dx} = 4\beta(1 - \omega)(\sigma T_s^4 - \frac{G}{4}) \tag{3}$$

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

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) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหาที่สมการโดยประมาณแบบ P_1 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{\partial q_r}{\partial x} + (1 - \omega)\beta(G - 4\sigma T_s^4) = 0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial G}{\partial x} + 3(1 - \omega)\beta q_r = 0 \tag{6}$$

จากสมการควบคุมทั้งหมดสถานะขอบเขต (Boundary condition) ของการคำนวณกำหนดโดย

$$x = 0; T_f = T_0, \frac{dT_s}{dx} = 0, G + 2q_R = 4\sigma T_0^4$$

$$x = x_0; \frac{dT_f}{dx} = \frac{dT_s}{dx} = 0, G - 2q_R = 4\sigma T_R^4$$

4.2 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอในรูปของประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency, η_c) มีความหมายทางกายภาพ คือ ความสามารถของวัสดุพอรุนในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพาความร้อนหลังจากที่วัสดุพอรุนได้ดูดซับความร้อนจากรังสีที่แผ่เข้ามา สามารถหาได้ดังต่อไปนี้

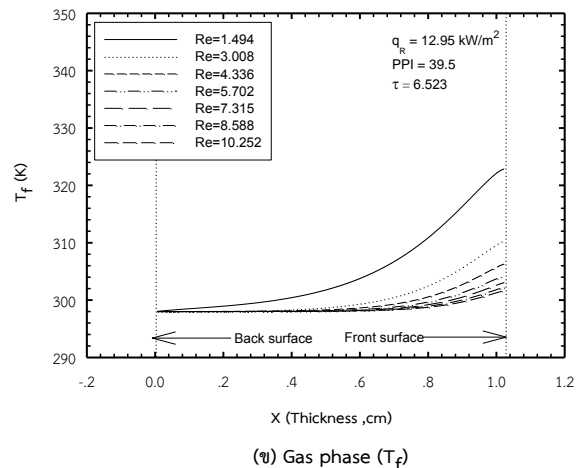
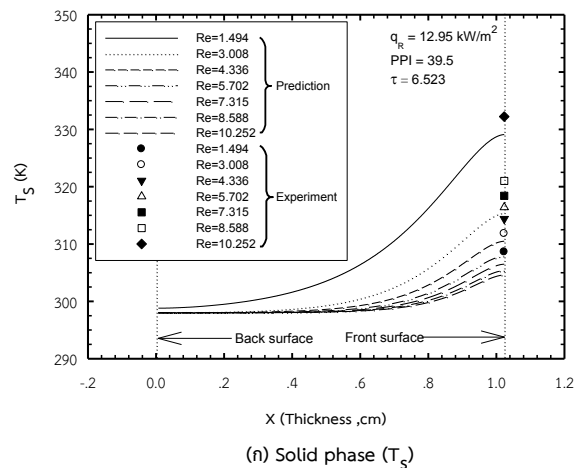
$$\eta_c = \rho_f c_f u_f [T_f(x_0) - T_f(0)] / q_R$$

5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณีอิทธิพลของความเร็วอากาศไหลเข้าสู่ระบบ (u_f)

รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศไหลเข้าสู่ระบบ (Air flow velocity, u_f) แต่จะแปลงและนำเสนอด้วยเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนา (Thickness, x) ของแผ่นวัสดุพอรุนในที่นี้จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) โดยรูปที่ 3 (ก) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (Solid phase temperature profile, T_s) และรูปที่ 3 (ข) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (Gas phase Temperature profile, T_f) ในการคำนวณดำเนินการที่สถานะ $q_R = 12.95 \text{ kW/m}^2$ และเป็นของวัสดุพอรุนนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) ตำแหน่ง $x = 0$ และ 1.03 cm คือด้านผิวหลัง (Back surface) และด้านผิวหน้า (Front surface) ของแผ่นวัสดุตามลำดับ จากรูปที่ 3 (ก) พบว่า T_s จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอรุนเนื่องจากที่ตำแหน่งผิวหน้า ($x = 1.03$) เป็นตำแหน่งที่ได้รับการแผ่รังสี มาจากแหล่งกำเนิดความร้อนใด ๆ (q_R) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรด (Infrared lamp) หากพิจารณาที่ตำแหน่งความหนาคงที่ใด ๆ พบว่า T_f จะลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อน (Heat convection) ที่ระบายความร้อนออกจาก

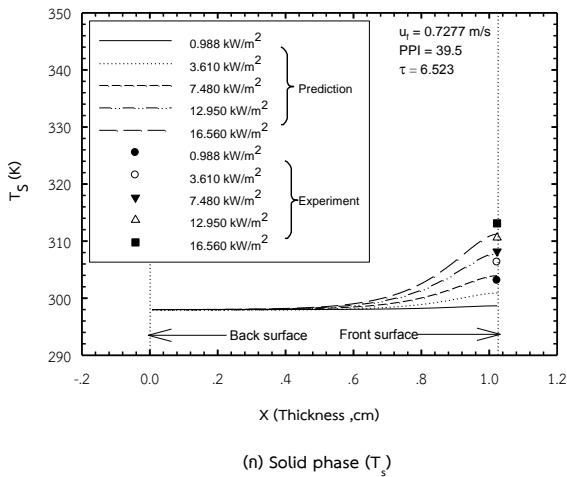
แผ่นวัสดุพอรุน ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (T_s) แสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี T_s นอกจากนี้หากพิจารณาเปรียบเทียบค่า T_f กับ T_s จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า T_s มีค่ามากกว่า T_f ซึ่งเป็นพฤติกรรมตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอรุน อธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุพอรุนดูดซับพลังงานจากหลอดอินฟราเรดไว้แล้ว วัสดุพอรุนจะทำการถ่ายโอนพลังงานให้กับอากาศเย็นที่ไหลผ่านเกิดการระบายความร้อนขึ้นในแผ่นวัสดุพอรุน สรุปกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ คือ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ของวัสดุพอรุนไปยังอากาศเย็นด้วยวิธีการพาความร้อน



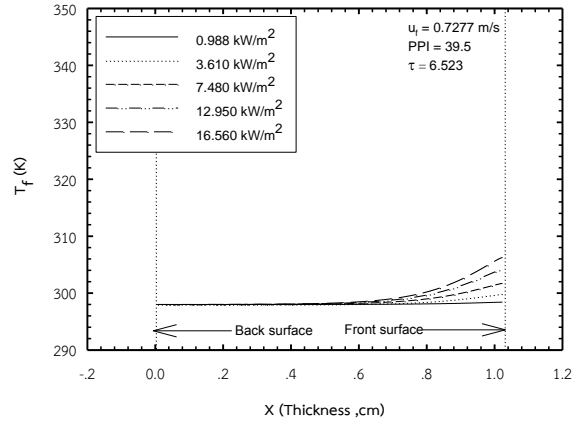
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของของแข็งและแก๊สกับความหนาของแผ่นวัสดุพอรุนที่สถานะ $q_R = 12.95 \text{ kW/m}^2$

5.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณีอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux, q_R) ที่แผ่มายังวัสดุพอร์ซเลนที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิซึ่งรูปที่ 4 (ก) เป็นของสถานะของแข็ง (T_s) และรูปที่ 4 (ข) เป็นของสถานะแก๊ส (T_f) โดยทำการศึกษาที่สภาวะ $u_f = 0.7277$ m/s จากรูปที่ 4 (พบว่า (ก) T_s จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอร์ซเลน (x) เนื่องจากที่ตำแหน่ง $x = 1.03$ เป็นตำแหน่งด้านผิวหน้าของวัสดุพอร์ซเลนที่ได้รับพลังงานมาจากแหล่งกำเนิด ความร้อนใดๆ (q_R) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรดและหากสังเกตมีตำแหน่ง x คงที่ใดๆ พบว่าเมื่อ q_R เพิ่มขึ้น T_s จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเพราะระบบได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีมากขึ้น ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างทางอุณหภูมิของสภาวะของแข็ง (T_s) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่า T_f มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี T_s แต่มีค่าต่ำกว่า เพราะวัสดุเป็นตัวรับพลังงานจาก q_R แล้วค่อยถ่ายเทไปยังอากาศ (T_f) ที่ไหลเข้าสู่ระบบเพื่อระบายความร้อน จึงเป็นเหตุให้ T_f ต่ำกว่า T_s



(ก) Solid phase (T_s)



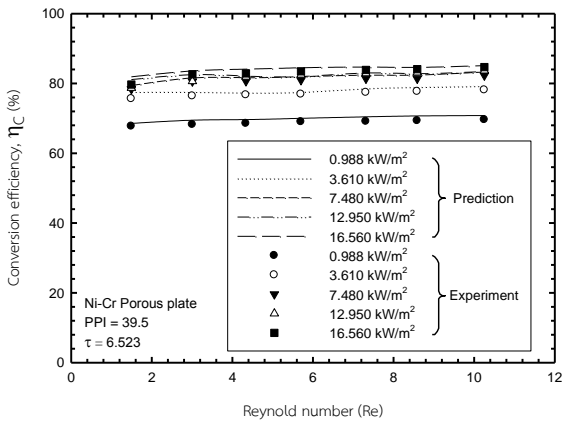
(ข) Gas phase (T_f)

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแข็งและแก๊สกับความหนาของแผ่นวัสดุพอร์ซเลนที่สภาวะ $u_f = 0.7277$ m/s

5.3 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน โดยทำการคำนวณที่กรณี Ni-Cr มีค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness, τ) เท่ากับ 6.523 พบว่าแม้ Re จะเพิ่มขึ้นแต่ค่า η_c แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากผลที่ได้จึงอาจกล่าวได้ว่าอากาศเย็นที่ป้อนเข้าวัสดุพอร์ซเลนเพื่อระบายความร้อนนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจากวัสดุพอร์ซเลน แม้จะเพิ่มความเร็วอากาศ (Re) ไปมากกว่านี้ก็ตาม หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า η_c ลดลงเมื่อปริมาณเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าวัสดุพอร์ซเลนชนิดโพรมีเซล Ni-Cr ที่มี PPI เท่ากับ 39.5 นี้ มีสมรรถนะในการส่งถ่ายความร้อนได้ดี สำหรับกรณีได้รับความร้อน (การแผ่รังสี) ที่ไม่สูงมากนัก

การเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ โดยกำหนดให้กราฟเส้นจะเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนรูปสัญลักษณ์จะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจากในสมมติฐานของการคำนวณได้กำหนดให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์ซเลนและของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (η_c) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวัสดุพรุน

6. สรุปผล

จากการศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานสปิเรชัน โดยใช้วัสดุพรุนชนิดเซลลูโลสเปิดสามารถสรุปการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (T_f) และของแข็ง (T_s) จะเพิ่มขึ้นตามการแผ่รังสีภายนอก (q_R) และลดลงตามความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบหรือเลขเรย์โนลด์ (Re)
- 2) โครงสร้างทางอุณหภูมิของ T_s จะสูงกว่า T_f เนื่องจากวัสดุพรุนหรือของแข็งเป็นตัวดูดซับรังสีความร้อน แล้วจึงถ่ายเทไปยังสถานะแก๊สด้วยการพา (Convection)
- 3) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency, η_c) ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re
- 4) ค่า η_c ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้ มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถคำนวณ η_c ได้อย่างน่าเชื่อถือ

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำการวิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำตรวจสอบและช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้เงินทุนสนับสนุน

8. เอกสารอ้างอิง

[1] Boyce, M. P. (2001). *Gas turbine engineering handbook*, Gulf Professional Publishing (GPP), Houston.

[2] Duwez, P. and Wheeler, H. L. (1948). Experimental study of cooling by injection of a fluid through a porous material, *Journal of Aeronautical Sciences*, vol. 15, September 1948, pp. 509 - 521.

[3] Grootenhuis, P. (1959). The mechanism and application of effusion cooling, *Journal of the Royal Aeronautic Society*, vol. 63, February 1959, pp. 73 - 89.

[4] Kubota, H. (1977). Thermal response of a transpiration-cooled system in a radiative and convective Environment, *Transaction of the ASME: Journal of Heat Transfer*, vol. 99, November 1977, pp. 628 - 633.

[5] Maruyama, S., Viskanta, R. and Aihara, T. (1990). Analysis of an active high-temperature thermal insulation system, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 11(No.3), September 1993, pp. 196 - 203.

[6] Wang, J. H., Messner, J. and Stetter, H. (2003). An experimental investigation of transpiration cooling Part I: Application of an Infrared Measurement Technique, *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 9(No.3), April 2003, pp.153 - 161.

[7] Kamiuto, K., Unoki, K. and Andou, A. (2005). Thermal characteristics of transpiration cooling system using open-cellular porous materials in a radiative environment, *International Journal Transaction Phenomena*, vol. 7, 2005, pp. 85 - 96.