

# ระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นในสภาวะคงที่โดยใช้วัสดุพอร์นเซลลูลาร์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่าจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 39.5

## Steady State Transpiration Cooling System using 39.5 PPI of Ni-Cr Open-cellular Porous Media

บัณฑิต กฤตาคม<sup>1\*</sup>, พิชฌน์ อมตฉายา<sup>1</sup>, รติภัทร แสงโชติ<sup>1</sup> และอนุชา กล้าน้อย<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนานาโนเทคโนโลยีของวัสดุพอร์น

(Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory: DITO-Lab)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

<sup>2</sup> สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

E-mail: bundit.kr@muth.ac.th

### บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่นโดยใช้วัสดุพอร์นชนิดเซลลูลาร์เปิดในสภาวะคงที่ ได้ถูกทำการศึกษาทั้งการทดลองและการคำนวณ วัสดุพอร์นที่เลือกใช้ คือ นิกเกิล - โครม (Nickel-Chrome) ที่มีค่าความพอร์นและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (Pores per inch, PPI) เท่ากับ 0.899 และ 39.5 ตามลำดับ ฟลักซ์การแผ่รังสี (Radiative heat flux,  $q_R$ ) ที่แผ่ไปยังผิวด้านบนของวัสดุพอร์นนั้นอยู่ในช่วง 1.9 ถึง 15.4 kW/m<sup>2</sup> แต่สำหรับอากาศที่ป้อนมาจากด้านล่างเข้าสู่ระบบมีค่าความเร็วในช่วง  $2.122 \times 10^{-4}$  ถึง  $12.73 \times 10^{-4}$  m/s ซึ่งในการนำเสนอนี้จะจัดให้อยู่ในรูปเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) จากการศึกษพบว่าเมื่อปริมาณ  $q_R$  เพิ่มขึ้น และ Re หรือความเร็วอากาศเย็นไหลเข้าระบบลดลง โครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊สและของแข็งในแผ่นวัสดุพอร์นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สำหรับค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจากอุณหภูมิ (Temperature efficiency,

$\eta_T$ ) จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและเมื่อ Re มากกว่า 6 จะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 98% ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency,  $\eta_C$ ) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม Re แต่จะสูงขึ้นเมื่อ  $q_R$  เพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลอง มีความสอดคล้องกันอย่างเหมาะสม

### Abstract

In this research, 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<sup>2</sup> whereas air injection velocity fed into the lower surface was varied from 2.122×10<sup>-4</sup> to 12.73×10<sup>-4</sup> m/s. The air velocity was rearranged as Reynolds number (Re) to report the results in this paper. The results of study show that the temperature profile of both gas and solid phases increased when  $q_R$  increases and Re decreases. The temperature efficiency ( $\eta_T$ ) increased initially and remains constant level about of 98% when Re > 6. The conversion efficiency ( $\eta_C$ ) increased slightly with Re but increases significantly with  $q_R$ . The agreement between theoretical and experiential data was satisfactory.

## 1. บทนำ

งานบางงานในภาคอุตสาหกรรม หรือระบบขนส่งจะมีโครงสร้างของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ เช่น เครื่องจักรที่อยู่ใกล้เตาหลอมเหล็ก ท่อส่งอากาศจากเครื่องอัดอากาศไปยังอุปกรณ์ใช้ลมที่อยู่ใกล้แหล่งความร้อนสูง ใบพัดของแก๊สเทอร์โบปิกเครื่องบินบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ การเผาไหม้อย่างรุนแรงของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่หัวฉีดเชื้อเพลิงในยานอวกาศ [1-5] เป็นต้น โครงสร้างและอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีกำบังความร้อน (Thermal shield) หรือระบบระบายความร้อน (Cooling system) ที่เพียงพอและเหมาะสม เพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง โดยทั่วไปการระบายความร้อนจากแหล่ง

ความร้อนสูง จะนิยมใช้อากาศหรือของไหลเป็นสารตัวกลางในการหล่อเย็น [1] ระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่นจะมีอากาศไหลทะลุผ่านแหล่งความร้อนที่ต้องการระบายตลอดทั่วทั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ โดยเครื่องจักรแบบนี้มีโครงสร้างเป็นวัสดุพอรุน ทำให้สามารถระบายความร้อนได้โดยตรง ขณะเดียวกันเครื่องจักรที่เป็นวัสดุพอรุนก็ยังทำหน้าที่เป็นเสมือนกำบังความร้อนไปในตัว

ระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น เป็นเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง Duwez และ Wheeler [2] เสนอวิธีการส่งเสริมการระเหยสารตัวกลาง ในกรณีที่อยู่ในสภาวะที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง ดังพบเห็นในเครื่องยนต์เจ็ท (Jet engine) เป็นการใช่วัสดุพอรุนร่วมกับของไหลที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านวัสดุพอรุนในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของความร้อน โดยเรียกวิธีการระบายความร้อนดังกล่าวว่า Sweat cooling (หรือ Transpiration cooling) Grootenhuis [3] ศึกษาการระบายความร้อนจากผิวที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใบกังหันและผนังของกังหันไอน้ำหรือฉนวนหุ้มห้องเผาไหม้ โดยการใช้อากาศความดันสูงเป่าผ่านวัสดุพอรุนที่ดูดซับความร้อนไว้ และทำให้เกิดชั้นของฉนวนกันความร้อนใต้ผิวที่ปะทะความร้อนโดยตรง เป็นเสมือนกำบังความร้อน Kubota [4] ได้วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์มิติเดียวภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) โดยระบบระบายความร้อนประกอบด้วย วัสดุพอรุนสะท้อนรังสี และการจ่ายอากาศที่ใช้ดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสี

โดยอาศัยการพาความร้อน ผลการคำนวณพบว่า อุณหภูมิที่ผิวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนทางด้านหลังจะตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อรังสีความร้อนที่ตกกระทบ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหล ทำให้อุณหภูมิในวัสดุพูนลดลง Maruyama และคณะ [5] ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฉนวนความร้อนที่มีลักษณะเป็นเสมือนกำแพงความร้อน ในการศึกษาของพวกเขาพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อน ความลึกที่ความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปในวัสดุได้นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการพ่นก๊าซเข้าไป และมีค่ามากกว่าในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว Wang และคณะ [6] ทดลองใช้เทคนิคการสร้างภาพโดยอาศัยคลื่นความร้อนอินฟราเรด (Infrared thermal imaging technique; IRTIT) ในการบอกสมรรถนะการระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น จากการศึกษาพบว่าความเสถียรของระบบการวัดเกิดขึ้นในวัสดุพูนที่ทำด้วยโลหะโครเมียม-นิกเกิลที่มีความพูน 21 % Kamiuto และคณะ [7] ได้ศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่นด้วยอากาศ โดยการใช้วัสดุพูนชนิดโฟมเซลเปิดหรือเซลลูลาร์เปิด (Open-cell foam or open-cellular materials) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ส่วนค่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ และจะมีค่าสูงกว่า 90% วัสดุพูนโฟมเซลเปิดสามารถใช้เป็นกำแพงความร้อนได้ดี ถ้าความหนาเชิงแสง (Optical

thickness) ของวัสดุพูน มีค่ามากกว่า 5 แต่พวกเขาอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างภายในแผ่นวัสดุพูนเพียงเล็กน้อย

เมื่อเร็ว ๆ นี้คณะผู้วิจัย [8] ได้เลือกใช้วัสดุพูนเซลลูลาร์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่าความพูนและ PPI เท่ากับ 0.93 และ 21.5 ตามลำดับ มาศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น ผลการศึกษาของเรา พบว่าประสิทธิภาพทั้งสอง คือ เชิงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นตามค่า Re และเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ  $Re > 10$  และยังนำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างทางอุณหภูมิกภายในวัสดุพูนทั้งสถานะแก๊สและของแข็ง นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลองมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

จากการศึกษาที่กล่าวมา พบว่ามีทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น แต่การศึกษาส่วนใหญ่สนใจเพียงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นหลัก ส่วนอิทธิพลของการแผ่รังสีมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย ทำให้สมรรถนะที่ได้ยังมีค่าต่ำและไม่มีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงนอกจากนี้แม้ว่าจะมีงานวิจัยของคณะผู้เขียนบทความ [8] ได้เคยนำเสนอมาบ้างแล้วเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อน แต่ก็ยังเป็นเพียงวัสดุพูนที่มีค่าความพูนและ PPI เดียว ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อนโดยการพา ร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนในระบบการระบายความร้อนที่ใช้วัสดุพูนแบบเซลลูลาร์เปิดชนิด

นิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) เพิ่มเติม โดยศึกษาวัสดุพอร์นที่มีค่าความพอร์นและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว เท่ากับ 0.899 และ 39.5 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการเลือกวัสดุพอร์นชนิดนี้มากยิ่งขึ้นในการใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนของทรานส์ไปเรชั่นหรือกำลังความร้อนต่อไป

## 2. รายการสัญลักษณ์

- $c_f$  ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K)
- $G$  รั้งสีที่แผ่ในวัสดุพอร์น ( $W/m^2$ )
- $h_v$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ( $W/m^3 K$ )
- $k_f$  ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะแก๊ส ( $W/m^2 K$ )
- $k_s$  ค่าคงที่การนำความร้อนของของแข็ง ( $W/m^2 K$ )
- PPI จำนวนรูพอร์นต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว ( $in^{-1}$ )
- $q_R$  ค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน ( $W/m^2$ )
- Re เลย์เรย์โนลด์
- $T_f$  อุณหภูมิของอากาศ (K)
- $T_o$  อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า (K)
- $T_R$  อุณหภูมิการแผ่รังสี (K)
- $T_s$  อุณหภูมิของวัสดุพอร์น (K)
- $T_{SB}$  อุณหภูมิผิวด้านหลังของวัสดุพอร์น (K)
- $T_{SF}$  อุณหภูมิผิวด้านหน้าของวัสดุพอร์น (K)
- $u_f$  ความเร็วของอากาศ (m/s)
- $x_o$  ความหนาของชิ้นงาน (m)

### สัญลักษณ์กรีก

- $\beta$  สัมประสิทธิ์การลื่นสุญญ ( $m^{-1}$ )
- $\phi$  ค่าความพอร์น
- $\eta_T$  ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ
- $\eta_C$  ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

- $\rho_f$  ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )
- $\rho_s$  ความหนาแน่นของของแข็ง ( $kg/m^3$ )
- $\sigma$  ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์ ( $W/m^2 K^4$ )
- $\tau$  ความหนาเชิงแสง
- $\omega$  อัลเบโด (Albedo)

## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วนของอากาศที่ไหลเข้าระบบ (Inlet air section) ส่วนที่สองเป็นวัสดุพอร์น (Porous section) ส่วนที่สามเป็นส่วนแผ่รังสีความร้อน (Radiation section) โดยส่วนอากาศไหลเข้าหรือส่วนที่หนึ่งจะเป็นท่อทำมาจากสแตนเลส ยาว 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 สำหรับสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้จะแสดงไว้ในตารางที่ 1

### 3.2 วิธีการทดลอง

จากส่วนประกอบทั้งหมดของระบบระบายความร้อนแบบนี้มีหลักการทำงาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

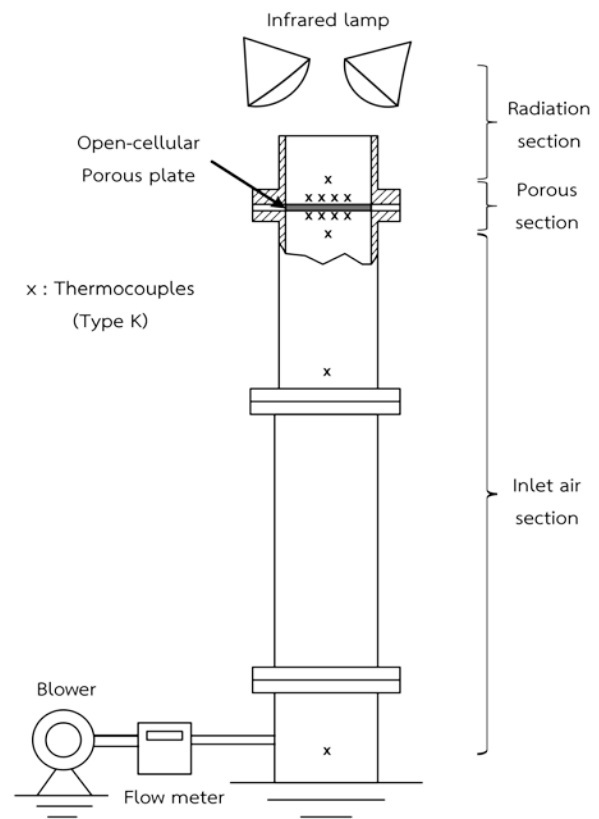
1) อากาศเย็นถูกดูดมาจากพัดลมดูด (Blower) ด้านล่างผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) โดยมีค่าความเร็วที่ใช้ทดลอง อยู่ในช่วง  $2.122 \times 10^{-4}$  ถึง  $12.73 \times 10^{-4}$  m/s และส่งอากาศเย็นนี้ขึ้นไปในแนวตั้งตามท่อเข้าสู่วัสดุทดลอง หรือวัสดุพูน

2) วัสดุพูนที่ทำการทดลองจะได้รับการแผ่รังสีความร้อนมากจากหลอดไฟอินฟราเรด โดยได้รับพลังงานอยู่ในช่วง 1.9 ถึง  $15.4 \text{ kW/m}^2$  และตรวจวัดพลังงานด้วยเครื่องวัดฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (Heat flux sensor) ยี่ห้อ Hukseflux Thermal Sensors รุ่น HFP01-05

3) เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกจากวัสดุพูนรวมทั้งอุณหภูมิของวัสดุพูนที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type K thermocouples) ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ จะนำไปวิเคราะห์และหาประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เป็นวัสดุระบายความร้อนหรือ กำบังความร้อนต่อไป

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพูนแบบเซลล์าร์เปิดชนิดนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome)

สัมประสิทธิ์	ค่ากายภาพ
ค่าความพรุน	$\phi$ 0.899
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว	PPI 39.5
ความหนา	x 0.0103 m
Extinction coefficient	$\beta$ $633.3 \text{ m}^{-1}$
ความหนาเชิงแสง	$\tau$ 6.523



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น

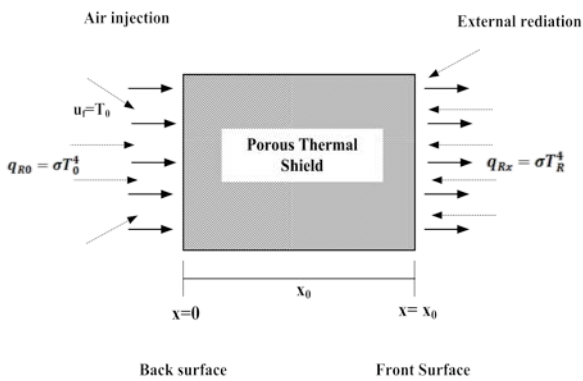
#### 4. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

##### 4.1 แบบจำลองทางกายภาพและสมการควบคุม

รูปที่ 2 จะแสดงรูปแบบกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นและในการคำนวณจำเป็นต้องมีสมมุติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้

- 1) วัสดุพูนเป็นแบบเซลล์าร์เปิดซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเท่านั้น
- 2) ที่ผิวหน้าและผิวหลังของวัสดุพูนได้รับการแผ่รังสีจากภายนอกแบบวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิการแผ่รังสีเป็น  $T_R$  และ  $T_0$  ตามลำดับ
- 3) อากาศอุณหภูมิต่ำหรืออากาศเย็น ( $T_0$ ) ไหลเข้าวัสดุพูนที่ผิวหลังด้วย

ความเร็ว  $u_f$  และไม่คิดการแผ่รังสีของอากาศ  
 4) วัสดุพอร์นสามารถดูดซับ, กระจาย และสะท้อนรังสีความร้อนได้ แต่คุณสมบัติการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ 5) สมบัติทางกายภาพของระบบไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ 6) สภาวะการคำนวณของสถานะของแข็ง (วัสดุพอร์น) และของสถานะแก๊ส (อากาศ) เป็นสภาวะที่ต่อเนื่อง และ 7) การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอร์นอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 2 รูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น

จากสมมติฐานทั้ง 7 ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equations) ประกอบไปด้วย

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

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial G}{\partial x} + 3(1 - \omega\tilde{g})\beta q_R = 0 \quad (6)$$

จากสมการควบคุมทั้งหมดสภาวะขอบเขต (Boundary condition) ของการคำนวณกำหนดโดย

$$\left. \begin{aligned} x = 0; & T_f = T_0, \frac{dT_s}{dx} = 0, G + 2q_R = 4\sigma T_0^4 \\ x = x_0; & \frac{dT_f}{dx} = \frac{dT_s}{dx} = 0, G - 2q_R = 4\sigma T_R^4 \end{aligned} \right\} (7)$$

## 4.2 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิและการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอ 2 ประสิทธิภาพที่สำคัญ ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ (Temperature efficiency,  $\eta_T$ ) มีความหมายทางกายภาพ คือ ค่าการเปรียบเทียบความใกล้เคียงกันระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุพอร์นกับอุณหภูมิของอากาศขาเข้า และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency,

$\eta_c$ ) ซึ่งมีความหมายทางกายภาพ คือ ความสามารถของวัสดุพอรุนในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพาความร้อนหลังจากที่วัสดุพอรุนได้ดูดซับความร้อนจากรังสีที่แผ่เข้ามา สามารถคำนวณหาค่าทั้ง 2 ประสิทธิภาพได้ดังต่อไปนี้

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

$$\eta_c = \rho_f c_f u_f [T_f(x_0) - T_f(0)] / q_R \quad (9)$$

## 5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

### 5.1 โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณีอิทธิพลของความเร็วจานอากาศไหลเข้าสู่ระบบ ( $u_f$ )

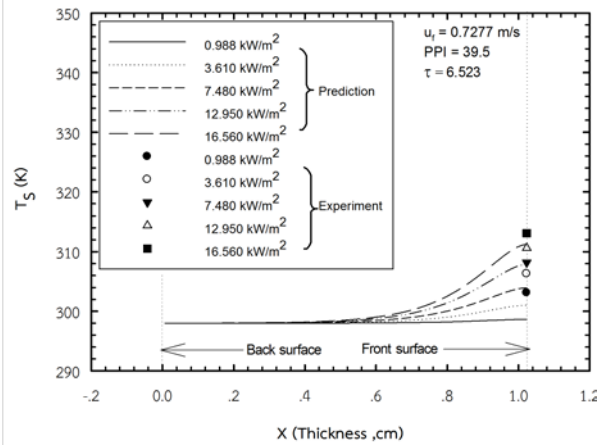
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของความเร็วจานอากาศไหลเข้าสู่ระบบ (Air flow velocity,  $u_f$ ) แต่จะแปลงและนำเสนอด้วยเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนา (Thickness,  $x$ ) ของแผ่นวัสดุพอรุนในที่นี้จะเรียกว่า โครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) โดยรูปที่ 3 (ก) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (Solid phase temperature profile,  $T_s$ ) และรูปที่ 3 (ข) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (Gas phase temperature profile,  $T_f$ ) ในการคำนวณดำเนินการที่สภาวะ  $q_R = 12.95 \text{ kW/m}^2$  และเป็นของวัสดุพอรุนนิกเกิล-โครม (Nickel-Chrome) ตำแหน่ง  $x = 0$  และ  $1.03 \text{ cm}$  คือด้านผิวหลัง (Back surface) และด้านผิวหน้า (Front surface) ของแผ่นวัสดุตามลำดับ จากรูปที่ 3 (ก) พบว่า  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอรุนเนื่องจากที่ตำแหน่งผิวหน้า ( $x = 1.03$ ) เป็นตำแหน่งที่ได้รับการแผ่รังสี มา

จากแหล่งกำเนิดความร้อนใด ๆ ( $q_R$ ) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรด (Infrared lamp) หากพิจารณาที่ตำแหน่งความหนาของที่ใด ๆ พบว่า  $T_s$  จะลดลงเมื่อ Re เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อน (Heat convection) ที่ระบายความร้อนออกจากแผ่นวัสดุพอรุน ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างอุณหภูมิของสถานะแก๊ส ( $T_f$ ) แสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี  $T_s$  นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $T_f$  กับ  $T_s$  จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า  $T_s$  มีค่าสูงกว่า  $T_f$  ซึ่งเป็นพฤติกรรมตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอรุน อธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุพอรุนดูดซับพลังงานจากหลอดไฟอินฟราเรดไว้แล้ว วัสดุพอรุนจะทำการถ่ายโอนพลังงานให้กับอากาศเย็นที่ไหลผ่านเกิดการระบายความร้อนขึ้นในแผ่นวัสดุพอรุน สรุปกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ คือ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ของวัสดุพอรุนไปยังอากาศเย็นและแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยวิธีการพา [9]

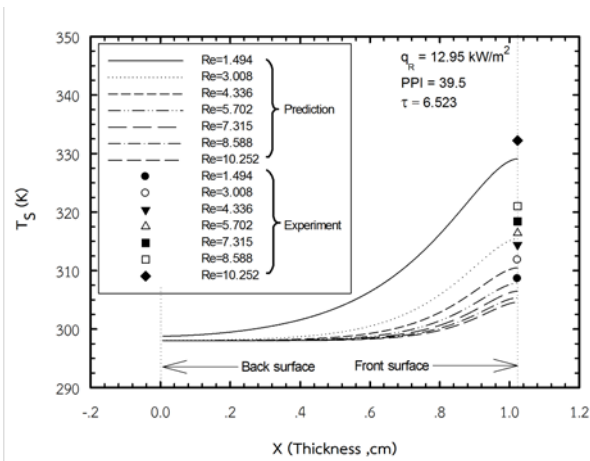
### 5.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณีอิทธิพลของค่าพลักซ์ความร้อน

รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของค่าพลักซ์ความร้อน (Heat flux,  $q_R$ ) ที่แผ่มายังวัสดุพอรุนที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ ซึ่งรูปที่ 4 (ก) เป็นของสถานะของแข็ง ( $T_s$ ) และรูปที่ 4 (ข) เป็นของสถานะแก๊ส ( $T_f$ ) โดยทำการศึกษาที่สภาวะ  $u_f = 0.7277 \text{ m/s}$  จากรูปที่ 4 (ก) พบว่า  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอรุน ( $x$ ) เนื่องจากที่ตำแหน่ง  $x = 1.03 \text{ mm}$  เป็นตำแหน่งด้านผิวหน้าของวัสดุพอรุนที่ได้รับพลังงานมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนใด ๆ

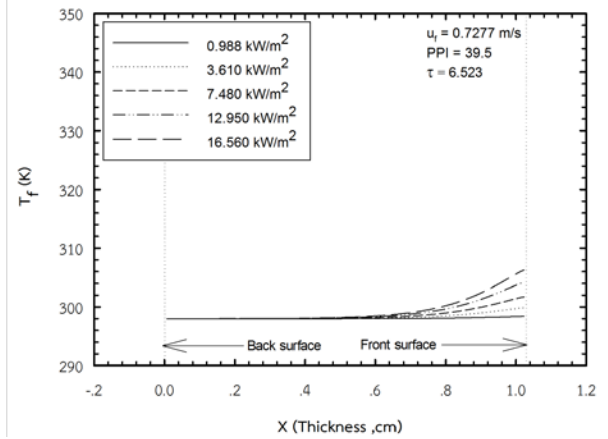
( $q_R$ ) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรดและหากสังเกตที่ตำแหน่ง  $x$  คงที่ใด ๆ พบว่าเมื่อ  $q_R$  เพิ่มขึ้น  $T_s$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเพราะระบบได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีมากขึ้น ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊ส ( $T_f$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่า  $T_f$  มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี  $T_s$  แต่มีค่าต่ำกว่า เพราะวัสดุพูนเป็นตัวรับพลังงานจาก  $q_R$  แล้วค่อยถ่ายเทไปยังอากาศ ( $T_f$ ) ที่ไหลเข้าสู่ระบบเพื่อระบายความร้อน จึงเป็นเหตุให้  $T_f$  ต่ำกว่า  $T_s$



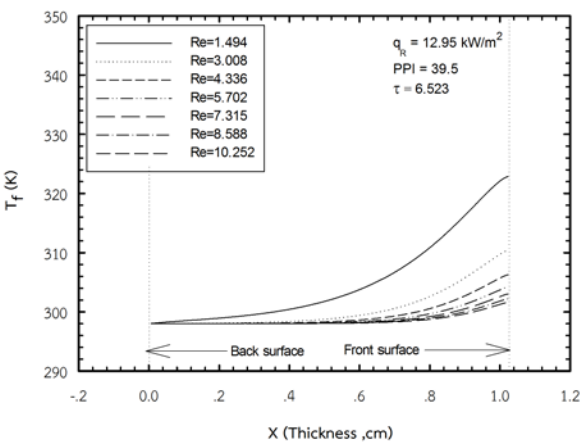
(n) Solid phase ( $T_s$ )



(n) Solid phase ( $T_s$ )



(ข) Gas phase ( $T_f$ )



(ข) Gas phase ( $T_f$ )

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_s$  และ  $T_f$  กับความหนาของแผ่นวัสดุพูนที่สภาวะ  $q_R = 12.95 \text{ kW/m}^2$

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_s$  และ  $T_f$  กับความหนาของแผ่นวัสดุพูนที่สภาวะ  $u_r = 0.7277 \text{ m/s}$

### 5.3 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ ( $Re$ ) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก (Temperature efficiency,  $\eta_T$ ) โดยทำการศึกษาที่กรณี Ni-Cr มีค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness,  $\tau$ ) เท่ากับ 6.523 พบว่าค่า  $\eta_T$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น และจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งมีค่า  $\eta_T$  ประมาณ 98% โดยเฉพาะเมื่อ  $Re$  มากกว่า 6 จากผลที่ได้แสดงให้เห็น



เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นซึ่งทำหน้าที่เป็นกำแพงความร้อน มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลให้กับระบบเพื่อทำการระบายความร้อน หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า  $\eta_T$  ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ  $q_R$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นกับอุณหภูมิของอากาศไหลเข้าระบบมีความแตกต่างกันมากขึ้น

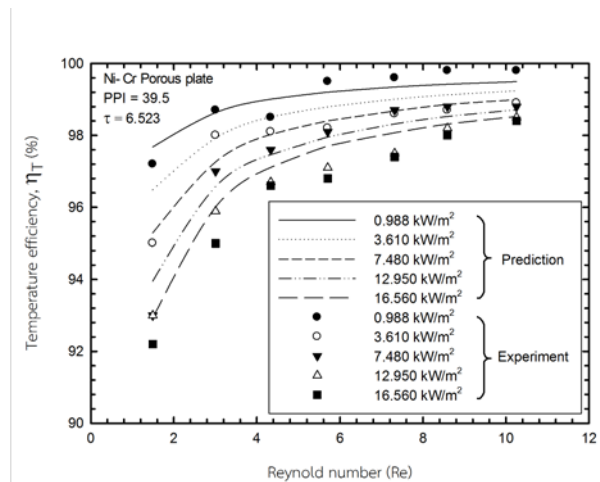
สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ โดยกำหนดให้กราฟเส้นเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนรูปสัญลักษณ์จะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย เนื่องจากในสมมติฐานของการคำนวณได้กำหนดให้สมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์นและของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ซึ่งในความเป็นจริงสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

#### 5.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

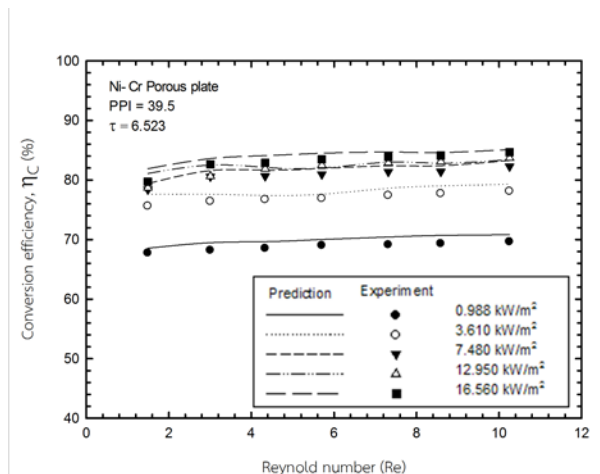
รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของความเร็วมวลอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency,  $\eta_C$ ) โดยทำการศึกษาที่กรณี Ni-Cr มีค่า  $\tau$  เท่ากับ 6.523 พบว่าแม้ Re จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $\eta_C$  แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากผลที่ได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าอากาศเย็นที่ป้อนเข้าวัสดุพอร์นเพื่อระบายความร้อนนั้นไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจากวัสดุพอร์น แม้จะเพิ่มความเร็วอากาศ (Re) ไปมากกว่านี้ก็ตาม หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า  $\eta_C$  เพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $q_R$

ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุได้รับพลังงานมากขึ้นจึงมีการแผ่รังสีความร้อน

การเปรียบเทียบผลการทดลอง (รูปสัญลักษณ์) กับการคำนวณ (กราฟเส้น) พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยด้วยเหตุผลเดียวกันกับกรณี  $\eta_T$  (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ ( $\eta_T$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวัสดุพอร์น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ( $\eta_C$ ) กับเลขเรย์โนลด์ (Re) ของวัสดุพอร์น

## 6. สรุปผล

จากการศึกษาระบบระบายความร้อนแบบ ทรานส์ไปเรชั่น โดยใช้วัสดุพูนเซลล์ลูตารีเปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่า PPI เท่ากับ 39.5 สรุปผลการศึกษาได้ ดังต่อไปนี้

1) โครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊ส ( $T_f$ ) และของแข็ง ( $T_s$ ) จะเพิ่มขึ้นตามการแผ่รังสีภายนอก ( $q_R$ ) และลดลงตามความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ หรือเลขเรย์โนลด์ ( $Re$ )

2) โครงสร้างทางอุณหภูมิจาก  $T_s$  จะสูงกว่า  $T_f$  เนื่องจากวัสดุพูนหรือของแข็งเป็นตัวดูดซับรังสี ความร้อน แล้วจึงถ่ายเทไปยังสถานะแก๊สด้วยการพาความร้อน (Heat convection)

3) ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก ( $\eta_T$ ) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง  $Re$  ต่ำๆ และจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อ  $Re > 6$  แต่ค่า  $\eta_T$  จะลดลงเล็กน้อย เมื่อ  $q_R$  เพิ่มขึ้น

4) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ( $\eta_C$ ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า  $Re$  แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดตามปริมาณ  $q_R$

5) ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้ มีค่าสูงกว่าผลที่ได้จากการทดลองเพียงเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถคำนวณ  $\eta_T$  และ  $\eta_C$  ได้อย่างน่าเชื่อถือ

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำ งานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ

นายนิธิภัทร์ สำเร็จศิลป์ นายศักดิ์ดา สิมาชัย นายสมภพ ภิญโยวงษ์ นายสิทธิพงศ์ สีลาดเลา นายคมเพชร อินลา นักศึกษาด้านสาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกลซึ่งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิจัย การพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน (DITO-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลอง บางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Boyce, M. P. "Gas turbine engineering handbook", Gulf Professional Publishing (GPP), Houston.
- [2] Duwez, P. and Wheeler, H. L. "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. "The mechanism and application of effusion cooling", Journal of the Royal Aeronautic Society, vol. 63, February 1959, pp. 73 - 89.
- [4] Kubota, H. "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. "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. "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. "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.

[8] Amatachaya, P., Khantikomol, P., Sangchot, R. and Krittacom, B. "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] บัณฑิต กฤตาคม และพิพัฒน์ อมตฉายา. "การเปรียบเทียบผลเฉลยของสมการการแผ่รังสีความร้อนในวัสดุพูนโดยวิธีสมการมาตรฐานทั่วไป กับผลเฉลยจากวิธีสมการโดยประมาณ  $P_1$ ", วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม, เล่มที่ 16, 2551, หน้า 20 ถึง 31