

## ระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นโดยใช้วัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์เปิดชนิดอะลูมินา – คอร์ดิไรท์ ที่มีค่าจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 6.0

บัณฑิต กฤตาคม<sup>1\*</sup>, พิพัฒน์ อมตฉายา<sup>1</sup>, รติภัทร แสงโชติ<sup>1</sup> และ อนุชา กล้าน้อย<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

การถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นโดยใช้วัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์เปิดในสภาวะคงที่ ได้ถูกทำการศึกษาทั้งการทดลองและการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ วัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์ที่ใช้คือ อะลูมินา – คอร์ดิไรท์ (Alumina-Cordierite, Al-Co) ที่มีค่าความพอร์ซเซิลและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว (PPI) เท่ากับ 0.873 และ 6.0 ตามลำดับ พลักซ์การแผ่รังสี ( $q_r$ ) ที่แผ่ไปยังผิวด้านบนของวัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์นั้นอยู่ในช่วง 0.988 ถึง 16.560 kW/m<sup>2</sup> แต่สำหรับอากาศที่ป้อนมาจากด้านล่างเข้าสู่ระบบมีค่าความเร็วในช่วง 0.212 ถึง 1.486 m/s ซึ่งในการนำเสนอนี้จะจัดให้อยู่ในรูปเลขเรย์โนลด์ (Re) จากการศึกษาพบว่าเมื่อปริมาณ  $q_r$  มากขึ้น และ Re หรือความเร็วอากาศเย็นไหลเข้าระบบลดลง โครงสร้างทางอุณหภูมิจากสถานะแก๊สและของแข็งในแผ่นวัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นสำหรับค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก ( $\eta_T$ ) จะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและเมื่อ  $Re > 70$  จะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งมีค่าประมาณ 97% ส่วนประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ( $\eta_C$ ) พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตาม Re แต่จะสูงขึ้นเมื่อ  $q_r$  เพิ่มขึ้น ผลการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณและการทดลองมีความสอดคล้องกันอย่างเหมาะสม

**คำสำคัญ :** ระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น, วัสดุพอร์ซเซิลลูตาร์เปิด, พลักซ์การแผ่รังสีความร้อน

<sup>1</sup>ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนานาโนเทคโนโลยีของวัสดุพอร์ซเซิล, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

<sup>2</sup>สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติประยุกต์, คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

\* ผู้ติดต่อ, อีเมล: bundit.kr@rmuti.ac.th และ sangchot@gmail.com รับเมื่อ 24 กรกฎาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 8 พฤศจิกายน 2555

## Transpiration Cooling System using Open-cellular Alumina-Cordierite Porous Media having Pore Per Inches (PPI) of 6.0

Bundit Krittacom<sup>1\*</sup>, Pipatana Amatachaya<sup>1</sup>, Ratipat Sangchot<sup>1</sup> and Anucha Klamnoi<sup>2</sup>

### Abstract

Analysis of numerical model and experimental study on steady-state heat transfer characteristics of combined convection and radiation of the air transpiration cooling system using the open-cellular porous material was investigated. The Alumina-Cordierite (Al-Co) open - cellular plates, having porosity of 0.873 and pores per inch (PPI) of 6.0, was used as porous media. The upper surface of porous plate was heated by the heat flux ( $q_R$ ) of incoming radiation varying from 0.988 to 16.560 kW/m<sup>2</sup> whereas air injection velocity fed into the lower surface was varied from 0.212 to 1.486 m/s. To report the results in the paper, the air velocity was rearranged as Reynolds number (Re). From study, the results showed that the temperature profile of both gas and solid phase increased when  $q_R$  increased and Re decreased. The temperature efficiency ( $\eta_T$ ) increased first and then was taken to constant level about of 97% for Re > 70. The conversion efficiency ( $\eta_C$ ) increased slightly with Re but depend strongly with  $q_R$ . The agreement between theoretical and experiential data was satisfactory.

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

---

<sup>1</sup>Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab), Department of Mechanical Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

<sup>2</sup>Department of Mathematics and Applied Statistics, Faculty of Sciences and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan.

\*Corresponding author, E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th and sangchot@gmail.com Received 24 July 2012, Accepted 8 November 2012

## 1. บทนำ

งานบางงานในภาคอุตสาหกรรม หรือระบบขนส่งจะมีโครงสร้างของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง ๆ เช่น เครื่องจักรที่อยู่ใกล้เตาหลอมเหล็ก ท่อส่งอากาศจากเครื่องอัดอากาศไปยังอุปกรณ์ใช้ลมที่อยู่ใกล้แหล่งความร้อนสูง ใบพัดของแก๊สเทอร์ไบน์ปีกเครื่องบินบริเวณใกล้เคียงกับเครื่องยนต์ การเผาไหม้อย่างรุนแรงของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนที่หัวฉีดเชื้อเพลิงในยานอวกาศ [1-5] เป็นต้น โครงสร้างและอุปกรณ์เหล่านี้จำเป็นต้องมีกำบังความร้อน (Thermal shield) หรือระบบระบายความร้อน (Cooling system) ที่เพียงพอและเหมาะสมเพื่อป้องกันความเสียหายเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง โดยทั่วไปการระบายความร้อนจากแหล่งความร้อนสูง จะนิยมใช้อากาศหรือของไหลเป็นสารตัวกลางในการหล่อเย็น [1] ระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นจะมีอากาศไหลทะลุผ่านแหล่งความร้อนที่ต้องการระบายตลอดทั่วทั้งเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ โดยเครื่องจักรแบบนี้มีโครงสร้างเป็นวัสดุพอร์ซเลน ทำให้สามารถระบายความร้อนได้โดยตรง ขณะเดียวกันเครื่องจักรที่เป็นวัสดุพอร์ซเลนก็ยังทำหน้าที่เป็นเสมือนกำบังความร้อนไปในตัว

ระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น เป็นเทคนิคที่รู้จักกันแพร่หลายและมีการศึกษาอย่างต่อเนื่อง Duwez และ Wheeler [2] เสนอวิธีการส่งเสริมการระเหยสารตัวกลาง ในกรณีที่อยู่ในสภาวะที่มีการถ่ายเทความร้อนสูง ดังพบเห็นในเครื่องยนต์เจ็ท (Jet engine) เป็นการใช้อนุพอร์ซเลนร่วมกับของไหลที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านวัสดุพอร์ซเลนในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของความร้อน โดยเรียกวิธีระบายความร้อนดังกล่าวว่า Sweat cooling (หรือ Transpiration cooling) Grootenhuis [3] ศึกษาการระบายความร้อนจากผิวที่มีอุณหภูมิสูง เช่น ใบกังหันและผนังของกังหันไอน้ำหรือฉนวนหุ้มห้องเผาไหม้ โดยการใช้อากาศความดันสูงเป่าผ่านวัสดุพอร์ซเลนที่ดูดซับความร้อนไว้ และทำให้เกิดชั้นของ ฉนวนกันความร้อนใต้ผิวที่ปะทะความร้อนโดยตรง เป็นเสมือน

กำบังความร้อน Kubota [4] ได้วิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หามิติเดียวภายใต้สภาวะไม่คงตัว (Unsteady state) โดยระบบระบายความร้อนประกอบด้วย วัสดุพอร์ซเลนที่อัดรังสี และการจ่ายอากาศที่ใช้ดูดซับความร้อนจากการแผ่รังสี โดยอาศัยการพาความร้อน ผลการคำนวณพบว่าอุณหภูมิที่ผิวและการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพอร์ซเลนทางด้านหลังจะตอบสนองอย่างรวดเร็วต่อรังสีความร้อนที่ตกกระทบ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของของไหล ทำให้อุณหภูมิในวัสดุพอร์ซเลนลดลง Maruyama และคณะ [5] ทำการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับระบบฉนวนความร้อนที่มีลักษณะเป็นเสมือนกำบังความร้อน ในการศึกษาของพวกเขาพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อน ความลึกที่ความร้อนสามารถเคลื่อนที่ไปในวัสดุได้นั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราการพ่นก๊าซเข้าไป และมีค่ามากกว่าในกรณีที่มีการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว Wang และคณะ [6] ทดลองใช้เทคนิคการสร้างภาพโดยอาศัยคลื่นความร้อนอินฟราเรด (Infrared thermal imaging technique; IRTIT) ในการบอกสมรรถนะการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นจากการศึกษาพบว่าความเสถียรของระบบการวัดเกิดขึ้นในวัสดุพอร์ซเลนที่ทำด้วยโลหะ โครเมียม-นิกเกิล ที่มีความพอร์ซเลน 21 % Kamiuto และคณะ [7] ได้ศึกษาทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาและการแผ่รังสีความร้อนของระบบการระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นด้วยอากาศ โดยการใช้วัสดุพอร์ซเลนชนิดโฟมเซลล์เปิดหรือเซลล์าร์เปิด (Open-cell foam or open-cellular materials) จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความเร็วของอากาศเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิ่มตัว ส่วนค่าประสิทธิภาพอุณหภูมิจะมีค่าคงที่ และจะมีค่าสูงกว่า 90% วัสดุพอร์ซเลนโฟมเซลล์เปิดสามารถใช้เป็นกำบังความร้อนได้ดี ถ้าความหนาเชิงแสง (Optical thickness) ของวัสดุพอร์ซเลน มีค่ามากกว่า 5 แต่พวกเขาอธิบายเกี่ยวกับโครงสร้างภายในแผ่นวัสดุพอร์ซเลนเพียงเล็กน้อย

เมื่อเร็ว ๆ นี้คณะผู้วิจัย [8] ได้เลือกใช้วัสดุพูนเซลลูลาร์เปิดชนิด Ni-Cr ที่มีค่าความพูนและ PPI เท่ากับ 0.93 และ 21.5 ตามลำดับ มาศึกษาทั้งทางด้านทฤษฎีและการทดลองระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น ผลการศึกษาของพวกเรา พบว่าประสิทธิภาพทั้งสอง คือ เชิงอุณหภูมิจากและการเปลี่ยนแปลงพลังงานเพิ่มขึ้นตามค่า Re และผู้เข้าสู่ค่าคงที่เมื่อ  $Re > 10$  และยังนำเสนอเกี่ยวกับโครงสร้างทางอุณหภูมิกายในวัสดุพูนทั้งสถานะแก๊สและของแข็ง นอกจากนี้ผลการเปรียบเทียบระหว่างคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับผลการทดลอง พบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

จากการศึกษาที่กล่าวมา พบว่ามีทั้งด้านทฤษฎีและการทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น แต่การศึกษาส่วนใหญ่สนใจเพียงการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection heat transfer) เป็นหลัก ส่วนอิทธิพลการแผ่รังสีมีการศึกษาเพียงเล็กน้อย ทำให้สมรรถนะที่ได้ยังมีค่าต่ำและไม่มีความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริงนอกจากนี้แม้ว่าจะมีงานวิจัยของคณะผู้เขียนบทความ [8] ได้เคยนำเสนอมาบ้างแล้วเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนร่วมระหว่างการพาความร้อนกับการแผ่รังสีความร้อน แต่ก็เป็นวัสดุพูนชนิดอื่นรวมทั้งเป็นการศึกษาค้นคว้าค่าความพูนและ PPI เพียงค่าเดียว ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาคูณลักษณะการถ่ายเทความร้อน โดยการพาพร้อมกับการแผ่รังสีความร้อนในระบบการระบายความร้อนที่ใช้วัสดุพูนแบบเซลลูลาร์เปิดชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite) เพิ่มเติม โดยศึกษาวัสดุพูนที่มีค่าความพูนและจำนวนรูต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว เท่ากับ 0.873 และ 6.0 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการเลือกวัสดุพูนชนิดนี้มากยิ่งขึ้น ในการใช้เป็นอุปกรณ์ระบายความร้อนของระบบ ทรานส์ไพเรชั่นหรือกักเก็บความร้อนต่อไป

## 2. รายการสัญลักษณ์

$c_f$  ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (J/kg K)

$D_s$  เส้นผ่าศูนย์กลางของแท่งก้ำสมมูล (m)  
 $G$  รังสีที่แผ่ในวัสดุพูน ( $W/m^2$ )  
 $h_v$  สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร ( $W/m^3 K$ )  
 $k_f$  ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะแก๊ส ( $W/m^2 K$ )  
 $k_s$  ค่าคงที่การนำความร้อนสถานะของแข็ง ( $W/m^2 K$ )  
 $PPI$  จำนวนรูพูนต่อหนึ่งหน่วยนิ้ว ( $in^{-1}$ )  
 $q_R$  ค่าฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน ( $W/m^2$ )  
 $Re$  เลขเรย์โนลด์ ( $=\rho_f u_f D_s / \mu_f$ )  
 $T_f$  อุณหภูมิของอากาศ (K)  
 $T_o$  อุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้า (K)  
 $T_R$  อุณหภูมิการแผ่รังสี (K)  
 $T_s$  อุณหภูมิของวัสดุพูน (K)  
 $T_{SB}$  อุณหภูมิผิวด้านหลังของวัสดุพูน (K)  
 $T_{SF}$  อุณหภูมิผิวด้านหน้าของวัสดุพูน (K)  
 $u_f$  ความเร็วของอากาศ (m/s)  
 $x_o$  ความหนาของชั้นงาน (m)

## สัญลักษณ์กรีก

$\beta$  สัมประสิทธิ์การลื่นสุญ ( $m^{-1}$ )  
 $\phi$  ค่าความพูน  
 $\eta_T$  ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก  
 $\eta_C$  ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน  
 $\rho_f$  ความหนาแน่นของอากาศ ( $kg/m^3$ )  
 $\rho_s$  ความหนาแน่นของของแข็ง ( $kg/m^3$ )  
 $\mu_f$  ความหนืดของอากาศ (Pa·s)  
 $\sigma$  ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลท์ซมานน์ ( $W/m^2 K^4$ )  
 $\tau$  ความหนาเชิงแสง  
 $\omega$  อัลเบโด (Albedo)

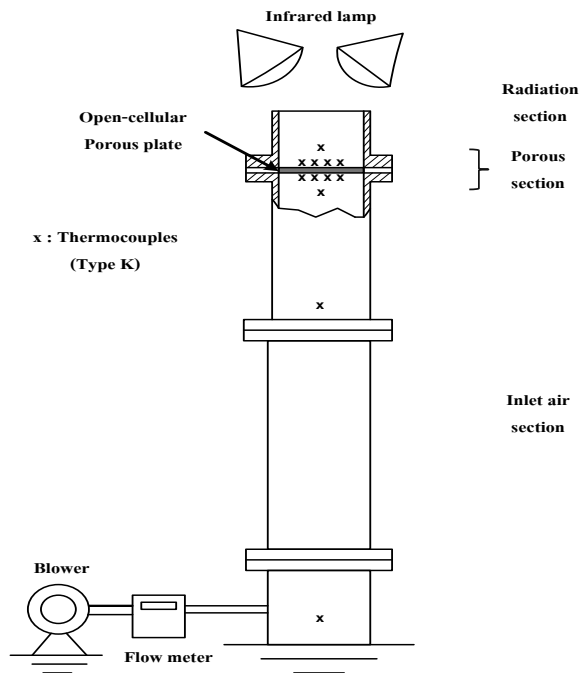
## 3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### 3.1 อุปกรณ์การทดลอง

แผนผังอุปกรณ์การทดลองได้แสดงไว้ในรูปที่ 1 ประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญ ได้แก่ ส่วนที่หนึ่งเป็นส่วน

ของอากาศที่ไหลเข้าระบบ (Inlet air section) ส่วนที่สองเป็นวัสดุพรุน (Porous section) ส่วนที่สามเป็นส่วนแผ่รังสีความร้อน (Radiation section) โดยส่วนอากาศไหลเข้าหรือส่วนที่หนึ่งจะเป็นท่อทำมาจากสแตนเลส ยาว 600 mm หนา 2 mm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 108 mm จะมีวัสดุทดลอง วางอยู่ด้านบนของท่อ ซึ่งเป็นวัสดุพรุนแบบเซลล์รูเปิดชนิดอะลูมินา – คอร์ดีไรท์ (Al-Co) ขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 120 mm หนา 10.3 mm (ส่วนที่สอง) และด้านบนสุดจะติดตั้งหลอดไฟอินฟราเรดขนาด 250 W จำนวน 4 หลอด (ส่วนที่สาม) เพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อนเสมือนการแผ่รังสีเข้ามายังวัสดุทดลอง สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรุนที่นำมาทดลองในงานวิจัยนี้ จะแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไปเรชั่น

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพรุนแบบเซลล์รูเปิดชนิดอะลูมินา – คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite)

สัมประสิทธิ์	ค่ากายภาพ
ค่าความพรุน	$\phi$ 0.873
จำนวนช่องต่อหนึ่งหน่วยนี้ว	PPI 6.0
ความหนา	x 0.0103 m
Extinction coefficient	$\beta$ 112.65 m <sup>-1</sup>
ความหนาเชิงแสง	$\tau$ 1.161

### 3.2 วิธีการทดลอง

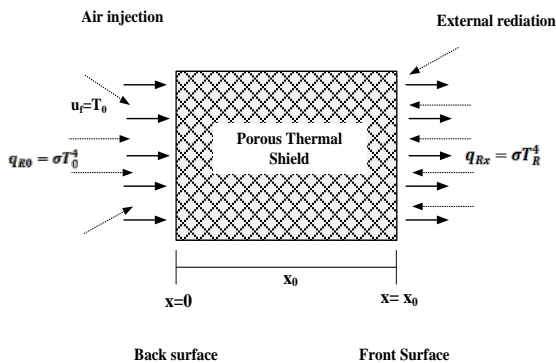
จากส่วนประกอบทั้งหมดของระบบระบายความร้อนแบบนี้มีหลักการการทำงาน คือ อากาศเย็นถูกดูดมาจากพัดลมดูด (Blower) ด้านล่างผ่านอุปกรณ์วัดอัตราการไหลของอากาศ (Flow meter) และส่งอากาศเย็นนี้ขึ้นไปในแนวตั้งตามท่อเข้าสู่วัสดุทดลองหรือ วัสดุพรุนที่ได้รับการแผ่รังสีจากหลอดไฟอินฟราเรดภายนอก ซึ่งพลังงานการแผ่รังสีความร้อนถูกตรวจวัดด้วยเครื่องวัดฟลักซ์การแผ่รังสีความร้อน (Heat flux sensor) ยี่ห้อ Hukseflux Thermal Sensors รุ่น HFP01-05 เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state) ทำการวัดอุณหภูมิของอากาศที่ทางเข้าและทางออกจากวัสดุ

พรุนรวมทั้งอุณหภูมิของวัสดุพรุนที่ผิวด้านหน้าและด้านหลัง โดยใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (K-Type thermocouples) ค่าอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้จะนำไปวิเคราะห์และหาประสิทธิภาพเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้เป็นวัสดุระบายความร้อนหรือกักเก็บความร้อนต่อไป

4. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์

4.1 แบบจำลองทางกายภาพและสมการควบคุม

รูปที่ 2 จะแสดงรูปแบบกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่นและในการคำนวณจำเป็นต้องมีสมมติฐานที่สำคัญดังต่อไปนี้ 1) วัสดุพรุนเป็นแบบเซลลูลาร์เปิดซึ่งพิจารณาการถ่ายเทความร้อนในหนึ่งมิติเท่านั้น 2) ที่ผิวหน้าและผิวหลังของวัสดุพรุนได้รับการแผ่รังสีจากภายนอกแบบวัตถุดำ (Black body) ที่มีอุณหภูมิการแผ่รังสีเป็น  $T_R$  และ  $T_0$  ตามลำดับ 3) อากาศอุณหภูมิต่ำหรืออากาศเย็น ( $T_0$ ) ไหลเข้าวัสดุพรุนที่ผิวหลังด้วยความเร็ว  $u_f$  และไม่เกิดการแผ่รังสีของอากาศ 4) วัสดุพรุนสามารถดูดซับ, กระจาย และสะท้อนรังสีความร้อนได้ แต่คุณสมบัติการแผ่รังสีไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและอุณหภูมิ 5) คุณสมบัติทางกายภาพของระบบไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ 6) สภาวะการคำนวณของสถานะของแข็ง (วัสดุพรุน) และของสถานะแก๊ส (อากาศ) เป็นสภาวะที่ต่อเนื่อง และ 7) การถ่ายเทความร้อนในวัสดุพรุนอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady state)



รูปที่ 2 รูปแบบทางกายภาพของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบระบายความร้อนแบบทรานส์ไพเรชั่น

จากสมมติฐานทั้ง 7 ข้อ สมการควบคุมหลัก (Governing equations) ประกอบไปด้วย

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

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

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

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

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) จึงได้ถูกนำมาแก้ปัญหา สมการโดยประมาณ แบบ  $P_1$  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 วิธีการคำนวณและหาผลลัพธ์

จากสมการควบคุมหลัก (สมการที่ (1) ถึง (4)) สมการโดยประมาณแบบ  $P_1$  (สมการที่ (5) และ (6)) และขอบเขตการคำนวณ (สมการที่ (7)) ทั้งหมด จะพบว่าตัวแปรต้น (Independent variables) ที่ทำการคำนวณ ประกอบไปด้วยความเร็วของอากาศไหลเข้า ( $u_p$ ) ค่าฟลักซ์ความร้อนที่แผ่นมาจากหลอดไฟอินฟราเรด ( $q_R$ ) และสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ของของไหลและวัสดุพูน ( $\rho_p, c_p, k_p, k_r, h_p, \phi, \beta$  และ  $\omega$ ) ด้วยเหตุนี้ตัวแปรตาม (Dependent variables) หรือผลลัพธ์ของการคำนวณ คือ  $T_r, T_s$  และ  $G$  ซึ่งวิธีการคำนวณนั้นจะเลือกใช้วิธีการกำจัดแบบเกาส์ (Gaussian eliminated method) โดยจัดรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปสมการผลต่างโดยปริยาย (Implicit finite difference equation) ทำการแบ่งช่วงแบบจำลองกายภาพของสมการอนุรักษ์พลังงานสถานะแก๊ส (สมการที่ (1)) สถานะของแข็ง (สมการที่ (2)) และสมการ ความต่อเนื่อง (สมการที่ (4)) ออกเป็นช่องเล็กที่เท่า ๆ กัน (Node) จำนวน 200 Node แต่การคำนวณการแผ่รังสีความร้อน (สมการที่ (3)) จะใช้สมการโดยประมาณแบบ  $P_1$  (สมการที่ (5) และ (6)) ซึ่งจะแบ่งช่วงวัสดุพูนออกเป็น 400 Node

ในการคำนวณนั้น เริ่มแรกทำการสมมุติเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial value condition) เพื่อคำนวณสมการที่ (1) และ (2) จะได้คำตอบ 2 ค่าที่สำคัญ คือ  $T_r$  และ  $T_s$  หลังจากนั้นนำค่า  $T_s$  ที่ได้ไปคำนวณหาค่า  $G$  ในสมการโดยประมาณแบบ  $P_1$  ทำให้ได้คำตอบครบทั้ง 3 ตัวแปร ( $T_r, T_s$  และ  $G$ ) นำผลลัพธ์ใหม่นี้ไปใช้แทนที่เงื่อนไขเริ่มต้นเป็นการคำนวณครั้งที่ 2 เพื่อหาค่า  $T_r, T_s$  และ  $G$  ต่อไป ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะคำนวณและแทนค่าเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เป็นการคำนวณแบบทำซ้ำ ซึ่งคำตอบที่แท้จริงจะได้รับหรือหยุดการคำนวณเมื่อคำตอบทั้ง 3 ตัวแปรเข้าสู่ค่าคงที่ (Convergent) โดยในการคำนวณของงานวิจัยนี้กำหนดให้หยุดการทำซ้ำหรือได้ผลลัพธ์เมื่อความแตกต่างระหว่างคำตอบครั้งใหม่

กับครั้งก่อนหน้ามีค่าความคลาดเคลื่อน (Criteria) น้อยกว่า  $10^{-4}$

#### 4.3 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจากการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

เพื่อแสดงถึงสมรรถนะของระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่น ในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอ 2 ประสิทธิภาพที่สำคัญ ได้แก่ ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิจาก (Temperature efficiency,  $\eta_T$ ) มีความหมายทางกายภาพ คือ ค่าการเปรียบเทียบความใกล้เคียงกันระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยของวัสดุพูนกับอุณหภูมิของอากาศขาเข้า และประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency,  $\eta_C$ ) ซึ่งมีความหมายทางกายภาพ คือ ความสามารถของวัสดุพูนในการส่งถ่ายพลังงานด้วยการพาความร้อนหลังจากที่วัสดุพูนได้ดูดซับความร้อนจากรังสีที่แผ่เข้ามา สามารถคำนวณหาค่าทั้ง 2 ประสิทธิภาพได้ดังต่อไปนี้

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

$$\eta_C = \rho_p c_p u_p [T_r(x_0) - T_r(0)] / q_R \quad (9)$$

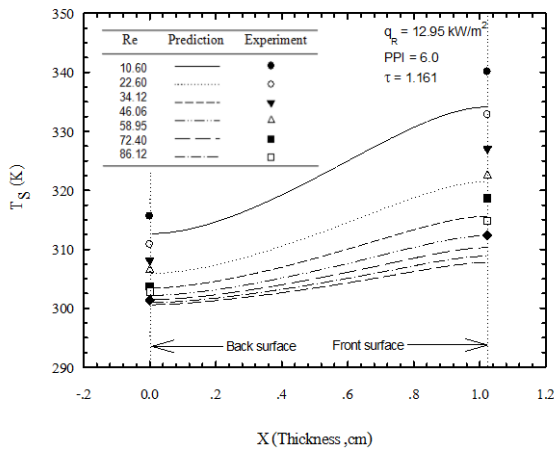
### 5. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

#### 5.1 โครงสร้างทางอุณหภูมิก่อนอิทธิพลของความเร็วอากาศไหลเข้าสู่ระบบ ( $u_p$ )

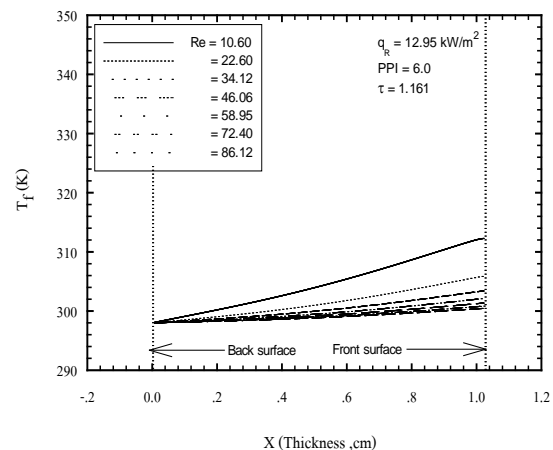
รูปที่ 3 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศไหลเข้าสู่ระบบ (Air flow velocity,  $u_p$ ) แต่จะแปลงและนำเสนอด้วยเลขเรย์โนลด์ (Reynold number, Re) (แสดงรายละเอียดการคำนวณค่า Re ใน Kamiuto และคณะ [7]) ต่อโครงสร้างทางความร้อน ซึ่งแสดงอยู่ในรูปการกระจายตัวของอุณหภูมิตามความหนา (Thickness,  $x$ ) ของแผ่นวัสดุพูนในที่นี่จะเรียกว่าโครงสร้างทางอุณหภูมิ (Temperature profile) โดยรูปที่ 3 (ก) เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะของแข็ง (Solid phase temperature profile,  $T_s$ ) และรูปที่ 3 (ข)

เป็นโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส (Gas phase temperature profile,  $T_g$ ) ในการศึกษาจะดำเนินการที่สภาวะ  $q_R = 12.95 \text{ kW/m}^2$  และเป็นของวัสดุพอร์อะลูมินา – คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite) ตำแหน่ง  $x = 0$  และ  $1.03 \text{ cm}$  คือ ด้านผิวหลัง (Back surface) และด้านผิวหน้า (Front surface) ของแผ่นวัสดุตามลำดับ จากรูปที่ 3 (ก) พบว่า  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอร์เนื่องจากที่ตำแหน่งผิวหน้า ( $x = 1.03$ ) เป็นตำแหน่งที่ได้รับการแผ่รังสีมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนใดๆ ( $q_R$ ) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรด (Infrared lamp) หากพิจารณาที่ตำแหน่งความหนาของที่ใดๆ พบว่า  $T_s$  จะลดลงเมื่อ  $Re$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลของการพาความร้อน (Heat convection) ที่ระบายความร้อนออกจากแผ่นวัสดุพอร์ สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลอง (รูปสัญลักษณ์) กับการคำนวณ (กราฟเส้น) ในรูปที่ 3(ก) พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบสอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่า

เนื่องจากในสมมติฐานของการคำนวณได้กำหนดให้คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุพอร์และของแก๊สไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งในความเป็นจริงคุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างอุณหภูมิของสถานะแก๊ส ( $T_g$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3 (ข) พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี  $T_s$  นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า  $T_g$  กับ  $T_s$  จะสังเกตเห็นได้ชัดว่า  $T_s$  มีค่าสูงกว่า  $T_g$  ซึ่งเป็นพฤติกรรมตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนภายในวัสดุพอร์ อธิบายได้ว่าเมื่อวัสดุพอร์ดูดซับพลังงานจากหลอดไฟอินฟราเรดไว้แล้ว วัสดุพอร์จะทำการถ่ายโอนพลังงานให้กับอากาศเย็นที่ไหลผ่านเกิดการระบายความร้อนขึ้นในแผ่นวัสดุพอร์ [9] สรุปกลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นได้ คือ จะเกิดการแผ่รังสีความร้อน (Heat radiation) ของวัสดุพอร์ไปยังอากาศเย็นด้วยวิธีการพาความร้อน



(ก) Solid phase ( $T_s$ )



(ข) Gas phase ( $T_g$ )

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

5.2 โครงสร้างทางอุณหภูมิกรณีอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน

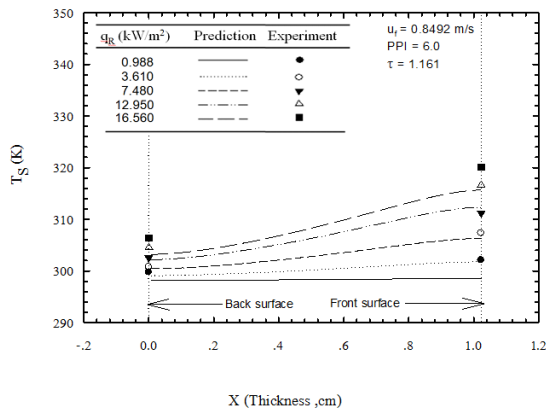
รูปที่ 4 แสดงอิทธิพลของค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux,  $q_R$ ) ที่แผ่มายังวัสดุพอร์ที่มีผลต่อโครงสร้างทางอุณหภูมิ

ซึ่ง รูปที่ 4 (ก) เป็นของสถานะของแข็ง ( $T_s$ ) และรูปที่ 4 (ข) เป็นของสถานะแก๊ส ( $T_g$ ) โดยทำการศึกษาที่สภาวะ  $u_f = 0.8492 \text{ m/s}$  จากรูปที่ 4 (ก) พบว่า  $T_s$  จะเพิ่มขึ้นตามความหนาของแผ่นวัสดุพอร์ ( $x$ ) เนื่องจากที่ตำแหน่ง  $x = 1.03$

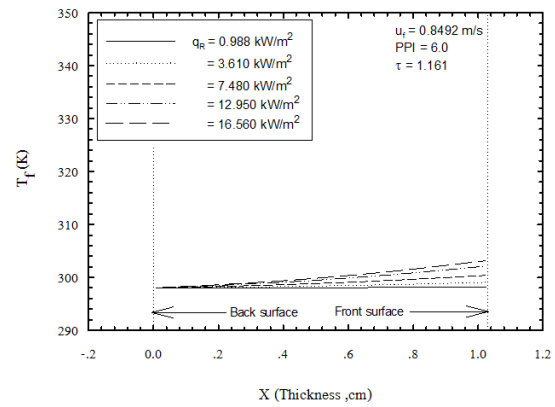


เป็นตำแหน่งด้านผิวหน้าของวัสดุพอร์นที่ได้รับพลังงานมาจากแหล่งกำเนิดความร้อนใดๆ ( $q_R$ ) ซึ่งก็คือหลอดไฟอินฟราเรดและหากสังเกตที่ตำแหน่ง  $x$  คงที่ใด ๆ พบว่าเมื่อ  $q_R$  เพิ่มขึ้น  $T_s$  จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัด เพราะระบบได้รับความร้อนจากการแผ่รังสีมากขึ้น สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลอง (รูปสัญลักษณ์) กับการคำนวณ (กราฟเส้น) ในรูปที่ 4 (ก) พบว่ามีแนวโน้ม สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าต่ำกว่าเนื่องจาก

คุณสมบัติทางกายภาพในสมมติฐานของการคำนวณได้กำหนดให้ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ในความเป็นจริงคุณสมบัติเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ขณะเดียวกันหากพิจารณาโครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส ( $T_g$ ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 (ข) พบว่า  $T_g$  มีแนวโน้มเช่นเดียวกับกรณี  $T_s$  แต่มีค่าต่ำกว่า เพราะวัสดุพอร์นเป็นตัวรับพลังงานจาก  $q_R$  แล้วค่อยถ่ายเทไปยังอากาศ ( $T_g$ ) ที่ไหลเข้าสู่ระบบเพื่อระบายความร้อน จึงเป็นเหตุให้  $T_g$  ต่ำกว่า  $T_s$



(ก) Solid phase ( $T_s$ )



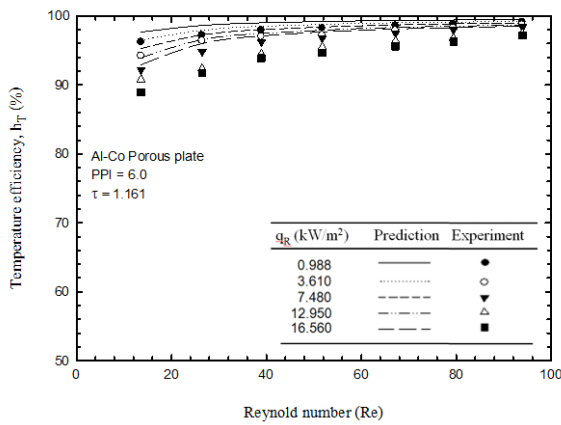
(ข) Gas phase ( $T_g$ )

รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของแข็งและแก๊สกับความหนาของแผ่นวัสดุพอร์นที่สภาวะ  $u_r = 0.8492$  m/s

5.3 ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ

รูปที่ 5 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ ( $\eta_T$ ) โดยทำการศึกษาที่กรณี Al-Co มีค่าความหนาเชิงแสง (Optical thickness,  $\tau$ ) เท่ากับ 1.161 พบว่าค่า  $\eta_T$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ Re เพิ่มขึ้น และจะเข้าสู่ค่าคงที่ซึ่งมีค่า  $\eta_T$  ประมาณ 97% โดยเฉพาะเมื่อ Re มากกว่า 70 จากผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นซึ่งทำหน้าที่เป็นกักเก็บความร้อน มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลให้กับระบบเพื่อทำการระบายความร้อน หากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใด ๆ จะพบว่า  $\eta_T$  ลดลงเล็กน้อยเมื่อปริมาณ  $q_R$  เพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดแผ่นวัสดุพอร์นกับอุณหภูมิของอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบมีความแตกต่างกันมากขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณ โดยกำหนดให้กราฟเส้นเป็นผลที่ได้จากการคำนวณของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ส่วนรูปสัญลักษณ์จะเป็นผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณมีค่าสูงกว่าเนื่องจากในการคำนวณตามสมการที่ (8) อุณหภูมิผิวด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นวัสดุพอร์นจากการทดลองมีค่าสูงกว่าการคำนวณ ส่งผลให้ผลต่างระหว่าง  $T_R$  กับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิผิวทั้งสอง  $(T_R - \{T_s(0)+T_s(x_0)\}/2)$  ของการทดลองต่ำกว่าการคำนวณ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้  $\eta_T$  จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสูงกว่าจากการทดลอง



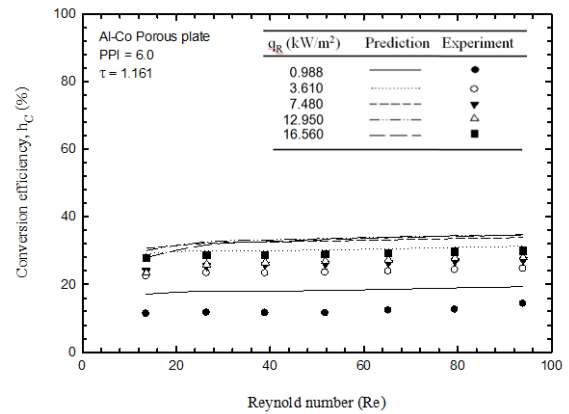
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_T$  กับ Re

5.4 ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน

รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบ (Re) เพื่อใช้ระบายความร้อนที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Conversion efficiency,  $\eta_c$ ) โดยทำการศึกษาที่กรณี Al-Co มีค่า  $\tau$  เท่ากับ 1.161 พบว่าแม้ Re จะเพิ่มขึ้น แต่ค่า  $\eta_c$  แทบไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากผลที่ได้ จึงอาจกล่าวได้ว่าอากาศเย็นที่ป้อนเข้าวัสดุพอร์นเพื่อระบายความร้อนนั้น ไม่มีผลต่อการดูดซับพลังงานจากวัสดุพอร์น แม้จะเพิ่มความเร็วอากาศ (Re) ไปมากกว่านี้ก็ตามหากพิจารณาที่ตำแหน่ง Re คงที่ใดๆ จะพบว่า  $\eta_c$  เพิ่มขึ้นตามปริมาณ  $q_R$  ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัสดุได้รับพลังงานมากขึ้นจึงมีการแผ่รังสีเกิดขึ้น

สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากการทดลอง (รูปสัญลักษณ์) กับการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (กราฟเส้น) นั้น พบว่าแนวโน้มของการศึกษาทั้งสองแบบ สอดคล้องกันเป็นอย่างดี แต่ผลจากการคำนวณจะมีค่าสูงกว่า ในการคำนวณหาค่า  $\eta_c$  จะเป็นไปตามสมการที่ (9) ผลต่างระหว่างอุณหภูมิอากาศที่ตำแหน่งผิวด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นวัสดุพอร์น ( $T_f(x_0) - T_f(0)$ ) ที่ได้จากการทดลอง (ไม่ได้แสดงผลไว้ในบทความ) มีค่าต่ำกว่าการคำนวณ รวมทั้งคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่  $\rho_f$  และ  $c_f$  ในการคำนวณกำหนดให้ไม่เปลี่ยนแปลงตาม

อุณหภูมิ จึงส่งผลให้  $\eta_c$  จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มสูงกว่าจากการทดลอง



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\eta_c$  กับ Re

6. สรุปผล

จากการศึกษาระบบระบายความร้อนแบบทรานสไปเรชั่น โดยใช้วัสดุพอร์นเซลล์ลูอาร์เปิดชนิด Al-Co ที่มีค่า PPI เท่ากับ 6.0 สรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

- 1) โครงสร้างทางอุณหภูมิของสถานะแก๊ส ( $T_g$ ) และของแข็ง ( $T_s$ ) จะเพิ่มขึ้นตามการแผ่รังสีภายนอก ( $q_R$ ) และลดลงตามความเร็วอากาศที่ไหลเข้าสู่ระบบหรือเลขเรย์โนลด์ (Re)
- 2) โครงสร้างทางอุณหภูมิของ  $T_s$  จะสูงกว่า  $T_f$  เนื่องจากวัสดุพอร์นหรือของแข็งเป็นตัวดูดซับรังสีความร้อน แล้วจึงถ่ายเทไปยังสถานะแก๊สด้วยการพาความร้อน
- 3) ประสิทธิภาพเชิงอุณหภูมิ ( $\eta_T$ ) จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง Re ต่ำๆ และจะลู่เข้าสู่ค่าคงที่ เมื่อ  $Re > 70$  แต่ค่า  $\eta_T$  จะลดลงเล็กน้อยเมื่อ  $q_R$  เพิ่มขึ้น
- 4) ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ( $\eta_c$ ) ไม่เปลี่ยนแปลงตามค่า Re แต่จะเพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดตาม  $q_R$
- 5) ผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนวณได้ มีค่าแตกต่างกับผลที่ได้จากการทดลองเล็กน้อย แต่มีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จึงกล่าวได้ว่าแบบจำลองนี้สามารถคำนวณหาค่า  $\eta_T$  และ  $\eta_c$  ได้อย่างน่าเชื่อถือ

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้ทุนสนับสนุนในการจัดทำงานวิจัยครั้งนี้ และคณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณ นักศึกษาซึ่งอยู่ภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนานาโนเทคโนโลยีของวัสดุพอรุน (DITO-Lab) สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเก็บข้อมูลการทดลองและผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บางส่วนจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] M.P.Boyce, “Gas turbine engineering handbook (3<sup>rd</sup>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, 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. Khantikomol, 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  $P_1$  approximation equation”, Engineering Journal of Siam University, 9, 2008, pp. 20-30. (in Thai)