

ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนในวัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเม็ดทองเหลือง

Effective Thermal Conductivity of a Brass Packed-bed Sphere Porous Medium

บัณฑิต กฤตาคม* วีระศักดิ์ สงสุรีย์ พิพัฒน์ อมตฉายา
ห้องปฏิบัติการการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (DITO-Lab)
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Bundit Krittacom* Veerasuk Songsuree Pipatana Amatachaya
Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DITO-Lab),
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture,
Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhonratchasima, 30000
Tel: 0-4423-3073 E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การทดลองหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (effective thermal conductivity, k_{eff}) ของวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการนำและการแผ่รังสีความร้อนเป็นจุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้ วัสดุพรุนที่ทำการทดลองคือเม็ดทองเหลืองกลม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และค่าความพรุน (ϕ) เท่ากับ 5 mm และ 0.452 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 โดยมีวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าการนำความร้อน (k_{solid}) คือทองเหลืองทึบ (70% Cu, 30% Zn) อุณหภูมิด้านสูง (T_H) ได้รับจากขดลวดความร้อนที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350 W และอุณหภูมิด้านต่ำ (T_L) เกิดจากชุดระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นที่ตำแหน่งปลายอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์ การทดลองจากการทดลองพบว่าค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H สูงขึ้น และสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ที่มีความเหมาะสมในรูปสมการยกกำลังได้ ($k_{fit} = 3562 (T_H/100)^{-2.69}$) เพราะมีค่า $R^2 = 0.952$ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเฉลี่ยของ k_{eff} (k_{avg}) มีแนวโน้มสูงกว่าค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนรวมของช่องว่างกับเนื้อเม็ดทองเหลือง (k_p) เล็กน้อย ($k_{avg} > k_p$) เพราะค่า k_{avg} พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน อย่างไรก็ตาม ค่า k_{solid} มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ

กับกรณีอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุทึบไม่คิดค่าการนำความร้อนของรูพรุนหรือช่องว่าง

คำหลัก ประสิทธิภาพการนำความร้อน วัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น การแผ่รังสีความร้อน

Abstract

The experimental investigation of an effective thermal conductivity (k_{eff}), influenced by conductive and radiative heat transfer, of the brass packed-bed sphere porous medium was the goal of this research. The brass ball having diameter of 5 mm and porosity (ϕ) of 0.452 was examined. The experimental procedure was based on ASTM E1225. Brass solid (70%Cu, 30%Zn) was used as the references material in this experiment. A higher temperature (T_H) was obtained from the wire heater with a constant electrical power of 350 W. A lower temperature (T_L) was generated by the water cooling set installed at the end opposite side of the experiment. From the experiment, it was found that k_{eff} decreased with increasing T_H and the relation between k_{eff} and T_H can be appropriately proposed by a power equation ($k_{fit} = 3562(T_H/100)^{-2.69}$) owing

to $R^2 = 0.952$. In addition, the average quantity of k_{eff} (k_{avg}) is slightly higher than the thermal conductivity combined by void and solid ($k_{\phi,s}$), i.e., $k_{\text{avg}} > k_{\phi}$, because of the effect of conduction and radiation is regarded in k_{avg} . However, the value of k_{solid} is the highest in among the proposed k because the effect of conduction from porosity or void volume is not taken into account for solid material.

Keywords: Effective thermal conductivity, packed-bed sphere porous media, radiation heat transfer

1. บทนำ

วัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (packed-bed sphere porous media) มีการใช้งานอย่างมากมายในระบบทางความร้อนของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในสภาวะอุณหภูมิสูง ๆ [1] เช่น การประยุกต์ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทางเคมี (chemical reactor) ขบวนการความร้อนกลับคืน (heat recovery process) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) ห้องเผาไหม้ (combustor) อุปกรณ์กักเก็บความร้อน (thermal storage unit) ฉนวน (insulator) และเตาปฏิกรณ์ทางเคมี (fusion reactor) [2] เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นมีจุดเด่นอย่างหนึ่งที่สำคัญ คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับปริมาตรที่สูง ด้วยเหตุนี้ การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นจึงนิยมพิจารณาให้อากาศหรือของไหลที่แทรกอยู่ในช่องว่างของความพูนหยุดนิ่ง (stagnant fluid) ไม่มีการไหล ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีเพียงแต่การนำและการแผ่รังสีความร้อน (conductive and radiative heat transfer) โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะพิจารณารูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวของเม็ดกลมอัดแน่นออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงตัวแบบเซลล์ (cell model) และแบบกึ่งเนื้อเดียว (quasi-homogeneous model) สำหรับ การวิเคราะห์ของการจัดเรียงตัวแบบแรกจะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อน จะคำนึงเฉพาะการนำความร้อนอย่างเดียว ส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการคำนวณคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (effective

thermal conductivity, k_{eff}) ของการจัดเรียงแบบเซลล์นี้จะต้องมีตัวแปรที่ต้องปรับค่าหลายตัวเพื่อให้ได้คำตอบ ดังนั้นการศึกษาจึงนิยมใช้วิธีการทดลองเป็นหลัก [3-6] สำหรับแบบกึ่งเนื้อเดียวจะพิจารณาอิทธิพลของการแผ่รังสีรวมกับการนำความร้อน ทำให้การหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของแบบกึ่งเนื้อเดียวมีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะศึกษาด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์และบางครั้งมีการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกด้วย [7-11] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มากกว่าการทดลอง ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลต้องใช้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลคำนวณเท่านั้น มีความยุ่งยาก หลายขั้นตอน โดยเฉพาะกรณีการจัดเรียงตัวเม็ดกลมอัดแน่นแบบกึ่งเนื้อเดียวยังมีความซับซ้อน ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากต้องการผลที่แม่นยำ นอกจากนี้ยังคงขาดข้อมูลหรือผลการทดลองของวัสดุหลายชนิด ทำให้ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน รวมทั้งข้อมูลทางเทคนิคในการออกแบบระบบทางความร้อนจริง

จากเหตุผลและงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้จะขอเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองในการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (k_{eff}) ของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นอย่างง่ายแต่มีความน่าเชื่อถือ วัสดุพูนที่เลือกใช้ คือ เม็ดทองเหลืองกลม (brass beads) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และค่าความพูน (ϕ) เท่ากับ 5 mm และ 0.452 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 [12] เพราะมีความสะดวกในการทดลอง ไม่ยุ่งยาก และมีการสอบเทียบความแม่นยำ (accuracy calibration) ของการทดลองไปพร้อมกันด้วยวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าการนำความร้อนซึ่งรวมในอุปกรณ์การทดลองชุดเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ผลการทดลองที่ได้จึงมีความแม่นยำยอมรับได้

2. รายการสัญลักษณ์

- A พื้นที่หน้าตัดด้านในของอุปกรณ์การทดลอง (m^2)
- d เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดทองเหลืองกลม (mm)
- k_{air} ค่าการนำความร้อนของช่องว่าง ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

k_{avg}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนเฉลี่ยของเม็ดทองเหลือง (W/m·K)
k_{eff}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (W/m·K)
k_{fit}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ (W/m·K)
k_{solid}	ค่าการนำความร้อนของทองเหลืองทึบ (W/m·K)
k_{ϕ}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของช่องว่างรวมกับเนื้อเม็ดทองเหลือง (W/m·K)
$\dot{Q}$	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องฮีตเตอร์ (W)
T_H	อุณหภูมิด้านสูง (K)
T_L	อุณหภูมิด้านต่ำ (K)
V_s	ปริมาตรช่องว่าง (m^3)
V_T	ปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (m^3)
ΔT	ผลต่างระหว่างอุณหภูมิด้านสูงและด้านต่ำ (K)
Δx	ผลต่างของระยะห่างสองจุด (m)
ϕ	ค่าความพรุน

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (k_{eff}) ของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น สร้างโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 [12] แบ่งได้ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่ 1 การให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ (heater section) ส่วนที่ 2 คือ ส่วนวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (reference and packed-bed sphere porous section) ซึ่งวัสดุพูนที่ต้องการทดสอบจะติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางของอุปกรณ์การทดลองและถูกประกบด้วยวัสดุอ้างอิง (reference material) ที่ทราบค่าการนำความร้อน (k_{solid}) ในที่นี้คือทองเหลืองทึบ (70% Cu, 30% Zn) และส่วนที่ 3 คือส่วนการระบายความร้อน (cooling section) มีหน้าที่เพื่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิหรืออุณหภูมิตกคร่อมตามความยาวของอุปกรณ์การทดลอง

จากรูปที่ 1 หลักการทำงานของอุปกรณ์การทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองสร้างจากขดลวดความร้อน (wire heater) โดยเรียกอุณหภูมิความร้อนที่สร้างขึ้นนี้ว่า อุณหภูมิด้านสูง (higher temperature, T_H) ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูนต่อไป

โดยขดลวดความร้อนจะขดอยู่ในแผ่นตัวเรือนซึ่งทำมาจากเซรามิกซ์เพื่อป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าระหว่างขดลวด ตัวฮีตเตอร์นี้จะติดตั้งอยู่ด้านบนของอุปกรณ์ทดลอง ส่วนตำแหน่งด้านล่างสุดของอุปกรณ์การทดลองจะเป็นตำแหน่งของระบบระบายความร้อน (cooling system) ที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน สร้างจากท่อทองแดงขดม้วนเพื่อก่อให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างหรืออุณหภูมิตกคร่อมระหว่างด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นจึงเรียกอุณหภูมิของระบบหล่อเย็นนี้ว่าอุณหภูมิด้านต่ำ (lower temperature, T_L) จากโครงสร้างอุปกรณ์การทดลองดังกล่าว ความร้อนจะถูกถ่ายโอนหรือเคลื่อนตัวจาก T_H ไปยัง T_L ผ่านวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูน ก่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิ (temperature gradient, ΔT) ในแต่ละช่วงความยาว (Δx) ของอุปกรณ์การทดลอง

3.2 วัสดุพูน

รูปที่ 2 แสดงเม็ดกลมทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 5 mm ซึ่งนำมาบรรจุในทรงกระบอกทดลองเพื่อเป็นวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (packed-bed sphere porous medium) การหาค่าความพรุน (Porosity, ϕ) ของเม็ดทองเหลืองนี้มีขั้นตอนดังนี้ นำเม็ดทองเหลืองใส่ลงไปในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm จนเต็มภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวง ในที่นี้คือ ปีกเกอร์ (Beaker) แล้วทำการเติมน้ำอีกครั้งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพูน อ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากปีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้ คือ ปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (void-space volume, V_s) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume, V_T) จะสามารถคำนวณหาค่า ϕ ได้จาก

$$\text{Porosity } (\phi) = \frac{V_s}{V_T} \quad (1)$$

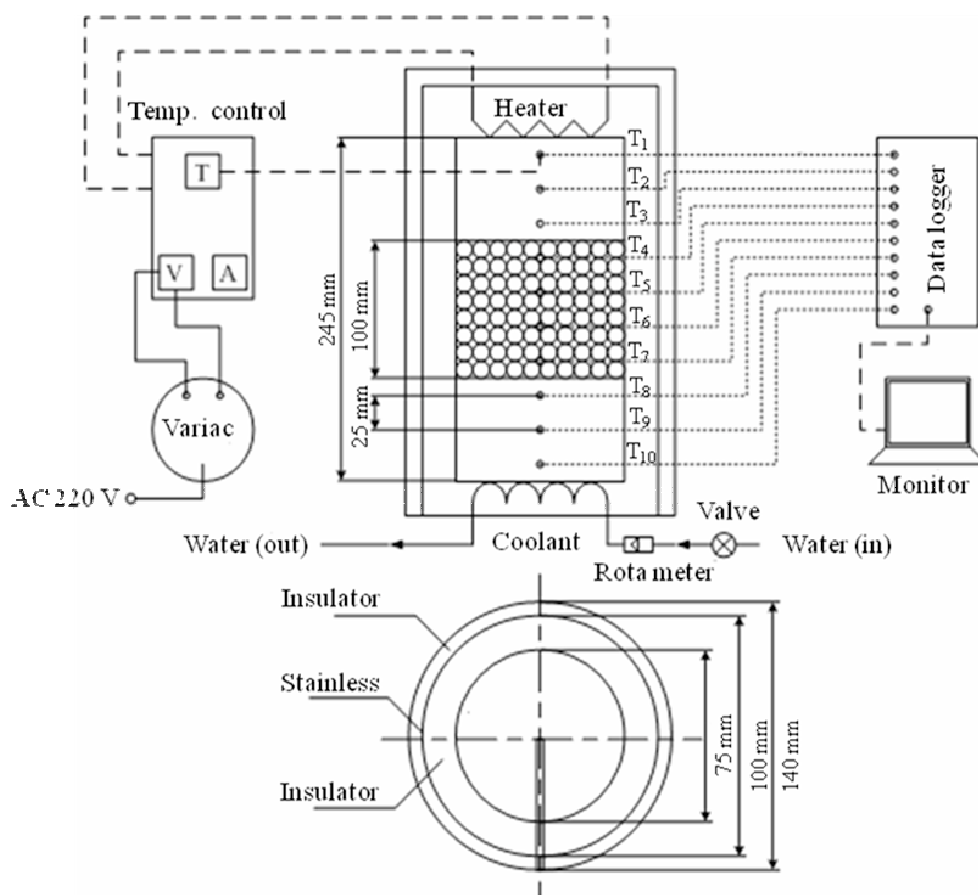
ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เม็ดทองเหลืองมีค่า V_s เป็น 320 cm^3 ($V_T = 708.821 \text{ cm}^3$) ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า ϕ ที่ได้คือ 0.452

3.3 วิธีการทดลอง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความยาวของอุปกรณ์การทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type-K thermocouple) จำนวน 10 เส้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ซึ่งในการนำเสนอผลการศึกษานั้นจะแสดง ΔT ตาม Δx ออกเป็นทั้งหมด 6 ช่วง กำหนดเป็น L1, L2, L3, L4, L5 และ L6 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดตามรูปที่ 2 สาเหตุที่มีการตรวจวัดหลาย ๆ ช่วง Δx เพื่อนำมาเปรียบเทียบและแสดงการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนตัวของความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด อุปกรณ์การทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน (thermal insulation) รอบตัวเครื่องเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่ภายนอกตามแนวรัศมี ด้วยเหตุนี้ความร้อนจึงเสมือนถูกบังคับให้เคลื่อนตัวตามแนวแกนเพียง

แนวเดียว ส่งผลให้การทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ (one-dimensional heat transfer) เท่านั้น ในการทดลองจะควบคุมปรับตั้งพลังงานไฟฟ้าให้คงที่เท่ากับ 350 W และปรับเปลี่ยน T_H จำนวน 5 ระดับ คือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันน้ำที่ป้อนเข้าสู่ส่วนการระบายความร้อนเพื่อหล่อเย็นจะรักษา T_L ให้คงที่ในช่วง 28 – 38 °C เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) ทำการบันทึกผลการทดลอง และคำนวณหาค่า k_{eff} ของวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นจากสมการฟูริเออร์ (Fourier's law of heat conduction) [13] ดังนี้

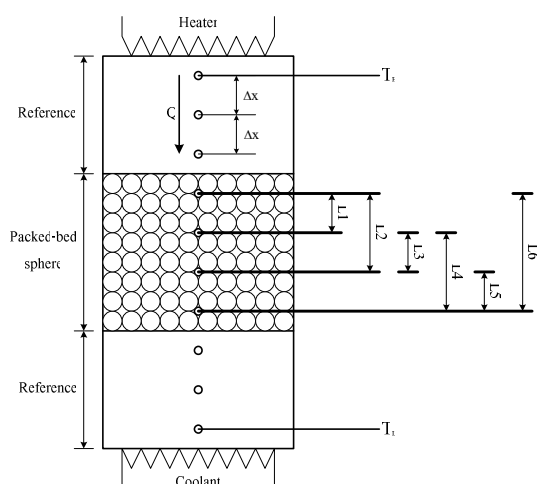
$$k_{eff} = -\frac{\dot{Q} \Delta x}{A \Delta T} \quad (2)$$



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น



รูปที่ 2 เม็ดทองเหลืองกลมซึ่งบรรจุลงในอุปกรณ์การทดลอง เพื่อเป็นวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น



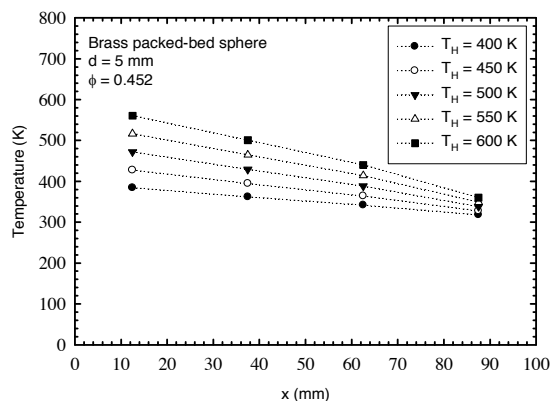
รูปที่ 3 แสดงระยะตรวจวัดอุณหภูมิต่าง ๆ ($L_1 - L_6$) ตามแนวความยาวของอุปกรณ์ทดลอง

4. การวิเคราะห์และผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างอุณหภูมิตามความยาวในแนวแกน

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของวัสดุพูนชนิดเม็ดทองเหลืองตามความยาวในแนวแกน ($T_4 - T_7$) ซึ่งมีระยะในการทดลองเท่ากับ 100 mm โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง แต่ละช่วงมีระยะห่างเท่ากับ 25 mm ในการทดลองระดับ T_H ที่ได้จากตัวฮีตเตอร์จะมีกำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350 W ส่งถ่ายพลังงานความร้อนมายังวัสดุพูน โดยกำหนดให้ T_H มีค่าคงที่ที่แตกต่างกัน 5 ระดับ คือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ พิจารณาที่

T_H ใด ๆ พบว่าอุณหภูมิภายในวัสดุพูนเม็ดทองเหลืองลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของการวัด ซึ่งก็เป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ที่ถูกควบคุมด้วยการหล่อเย็นของน้ำ แต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ พบว่าอุณหภูมิภายในเม็ดเหล็ก มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า T_H นอกจากนี้ยังพบว่าความชันของเส้นกราฟ (slope) จะเพิ่มมากขึ้นตาม T_H เนื่องจากระบบมีค่า T_L แทบจะเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 34 °C (307 K) ดังนั้นวัสดุพูนจึงพยายามถ่ายเทความร้อนจากระดับ T_H ต่าง ๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับ T_L มากที่สุด ส่งผลให้ความชันของกราฟกรณี T_H สูง ๆ มีค่าความชันสูงตามไปด้วย



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในวัสดุพูนกับความยาวในแนวแกน

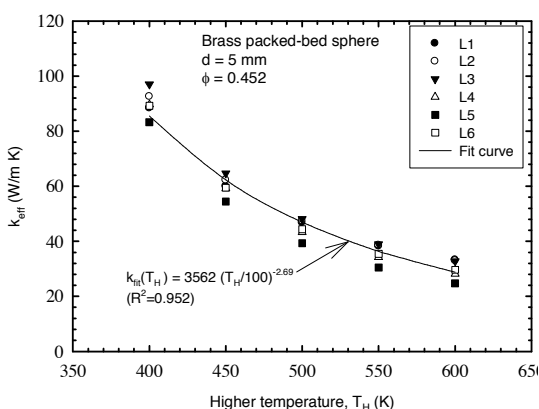
4.2 ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (k_{eff}) กับ T_H ที่จ่ายให้แก่วัสดุพูนชนิดเม็ดทองเหลืองซึ่งมีค่า $\phi = 0.452$ โดยในการทดลองกำหนด T_H อยู่ในช่วง 400 – 600 K และทำการวัดอุณหภูมิภายในวัสดุพูน 4 จุด แต่ในการนำเสนอจะแสดงค่า k_{eff} ทั้งหมด 6 ค่า ซึ่งหามาจากระยะ L จำนวน 6 ความยาว (รายละเอียดแสดงในรูปที่ 3) ซึ่งแสดงด้วยรูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ จากผลที่ได้พบว่าค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดทองเหลืองลดลงตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่า k_{eff} กับ T_H ของวัสดุพูนเม็ด

ทองเหลืองนี้ ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (least square method) [14] ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$k_{fit}(T_H) = 3562 (T_H/100)^{-2.62} \quad (2)$$

สมการความสัมพันธ์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.952 แสดงถึงความเหมาะสมอย่างมากในการเลือกใช้สมการนี้ เพราะค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มาก ดังนั้นความคลาดเคลื่อนในการใช้งานจึงอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำ

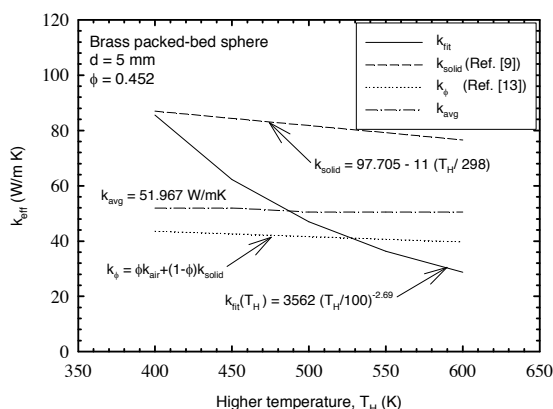


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eff} กับอุณหภูมิด้านสูง (T_H)

4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของค่า k_{eff}

เพื่อยืนยันถึงความแม่นยำของผลการทดลองในงานวิจัยนี้ รูปที่ 6 ได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่า k_{fit} (k_{eff}) ที่ได้จากการทดลอง (กราฟเส้นทึบ) กับค่าการนำความร้อนที่เกี่ยวข้องอีก 2 ค่าที่สำคัญ ได้แก่ ค่าการนำความร้อนของทองเหลืองทึบ (thermal conductivity of solid brass, k_{solid}) [9] และค่าการนำความร้อนของช่องว่างความพรุนรวมกับเนื้อของทองเหลืองทึบ (thermal conductivity of combined void and solid brass, $k_\phi = \phi k_{air} + (1-\phi)k_{solid}$) [12] โดยค่าการนำความร้อนทั้งสองถูกแสดงด้วยกราฟเส้นประ (Dash line) และจุดไข่ปลา (Dot line) ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าค่า k_{solid} มีค่าสูงที่สุดตามมาด้วยค่า k_{fit} และ k_ϕ ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ด้วยอิทธิพลของช่องว่างเพราะการนำความร้อนจะเกิดไม่ดีในสถานะแก๊ส แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง k_{fit} และ k_ϕ ที่พิจารณา

อิทธิพลของช่องว่างด้วยกันทั้ง 2 ค่า จะพบว่า k_{fit} มีค่าสูงกว่า k_ϕ เนื่องจากกรณีของ k_ϕ นั้น จะรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศที่กับวัสดุทึบเข้าด้วยกัน เหมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ในกรณี k_{fit} จะมาจากการทดลองที่วัดหรือพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน ส่งผลให้เกิดเป็นค่าประสิทธิผลการนำความร้อนที่สูงกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนในช่องว่างจะมีความสำคัญต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น และเพื่อให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้นได้ทำการค่าเฉลี่ย k_{fit} (average effective thermal conductivity of brass packed-bed sphere, k_{avg}) ซึ่งถูกแสดงด้วยกราฟเส้นประและจุด (dash and dot line) ในรูปที่ 6 จากการสังเกตจะได้ค่า k_{avg} มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ k_ϕ แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจาก k_{avg} พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ k_ϕ พิจารณาเพียงการนำความร้อนเท่านั้น



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่า k_{fit} (k_{eff}) กับค่าการนำความร้อนกรณีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

5. สรุป

จากการศึกษาทดลองหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อนของวัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเม็ดทองเหลืองที่มี $d = 5$ mm และ $\phi = 0.452$ ตามลำดับ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 นั้น สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) อุณหภูมิภายในวัสดุพรุนเม็ดทองเหลืองลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของอุปกรณ์

การทดลอง แต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ระดับอุณหภูมิภายในเม็ดทองเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า T_H

2) ค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น และได้ผลการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ซึ่งนิยามด้วยค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของความสัมพันธ์จากการทดลองนี้ขึ้นมาใหม่เป็น k_{fit} แทน k_{eff} โดยสร้างจากวิธีกำลังสองต่ำสุด ซึ่งได้ผลการความสัมพันธ์ (correlation equation) คือ $k_{fit}(T_H) = 3562 (T_H/100)^{-2.69}$

3) ค่า k_{fit} มีระดับต่ำกว่าวัสดุที่ป (k_{solid}) เพราะการนำความร้อนเกิดขึ้นได้ไม่ดีในช่องว่าง (อากาศนี้) และค่า k_{fit} ซึ่งถูกหาค่าเฉลี่ย (k_{avg}) จะมีระดับสูงกว่า k_{ϕ} เพราะค่า k_{avg} จะเกิดจากการพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ค่า k_{ϕ} จะเกิดจากการรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนี้ (k_{air}) กับวัสดุที่ปเข้าด้วยกัน ($k_{\phi} = \phi k_{air} + (1-\phi)k_{solid}$) เสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่งผลให้ค่า k_{avg} สูงกว่า k_{ϕ} จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงเป็นผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้ $k_{solid} > k_{fit} (k_{avg}) > k_{\phi}$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (มทร.อีสาน) นครราชสีมา ที่ได้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังขอขอบพระคุณอาจารย์เด่น รักซ้อน และ อาจารย์กานต์ สุรนันทน์ หัวหน้าและอาจารย์ประจำสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์ มทร.อีสาน นครราชสีมา ตามลำดับ ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์ในการสร้างตัวเรือนของฮีตเตอร์ รวมทั้งขอขอบคุณนายอาทิตย์ รัตนูปการ, นายพงษ์พันธ์ เอนุนารี และนายธีระพัฒน์ สมบูรณ์ นักศึกษาปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มทร.อีสาน ที่ได้ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์การทดลองและบันทึกผลการทดลองบางส่วน

เอกสารอ้างอิง

[1] Kamiuto, K., Nakagawa, K., Echigo, R., Hasegawa, S and Suefuji, Y. 1980. Experimental and analytical study on

enhancement of simultaneous radiative and convective heat transfer by porous bodies with high porosity. Journal of Nuclear Science and Technology, 17(6): 425-435.

- [2] Kikuchi, S., Kuroda, T. and Enoeda, M. 1999. Preliminary thermo-mechanical analysis of ITER breeding blanket. JAERI Tech, No. 98058.
- [3] Yagi, S. and Kunii, D. 1957. Studies on effective thermal conductivities in packed bed. AIChE Journal, 3: 373-381.
- [4] Schotte, W. 1960. Thermal conductivities of packed beds. AIChE Journal, 6: 63-67.
- [5] Graßmann, A. and Peters, F. 1999. Experimental investigation of heat conduction in wet sand. Heat and Mass Transfer, 35: 289-294.
- [6] Buonanno, G., Carotenuto, A., Giovinco, G. and Massarotti, N. 2003. Experimental and theoretical modeling of the effective thermal conductivity of rough steel spheroid packed beds. ASME Journal of Heat Transfer, 125: 693-702.
- [7] Chen, J. C. and Churchill, S. W. 1963. Radiant heat transfer in packed beds. AIChE Journal, 9: 35-41.
- [8] Chan, C. K. and Tien, C. L. 1974. Radiative transfer in packed spheres. ASME Journal of Heat Transfer, 96: 52-58.
- [9] Kamiuto, K., Iwamoto, M. and Nagumo, Y. 1993. Combined conduction and correlated-radiation heat transfer in packed-beds. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 7(3): 496-501.
- [10] Polesek-Karczewska, S. 2003. Effective thermal conductivity of packed beds of spheres in transient heat transfer. Heat and Mass Transfer, 39: 375-380.
- [11] Bahrami, M., Yovanovich, M. M. and Richard Culham, J. 2006. Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds. International

Journal of Heat and Mass Transfer, 49: 3691-3701.

- [12] Anter Corporation. 2007. Principal Methods of Thermal Conductivity Measurements. <http://www.anter.com/TN67.htm>.
- [13] Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. 2011. Heat and Mass Transfer: Fundamental and Applications (4th ed.), Mc Graw Hill, Singapore.
- [14] สมชาย วงศ์วิเศษ. 2541. การออกแบบการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดทางความร้อน. กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.