

ค่าประสิทธิผลการนำความร้อนในวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเม็ดเหล็ก
บัณฑิต กฤตาคม^{1*} วีระศักดิ์ สงสุรีย์¹ ปฏิวัติ วรามิตร¹ และรพีพงศ์ เปี่ยมสุวรรณ²

**Effective Thermal Conductivity of an Iron Globule Packed-bed Sphere
Porous Medium**

Bundit Krittacom^{1*} Veerasuk Songsuree¹ Pathiwat Waramit¹
and Rapeepong Peamsuwan²

¹ห้องปฏิบัติการการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพูน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*Corresponding author. E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

การทดลองหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (Effective thermal conductivity, k_{eff}) ของวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่นซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการนำและการแผ่รังสีความร้อนเป็นจุดมุ่งหมายในงานวิจัยนี้ วัสดุพูนที่ทำการทดลองคือเม็ดเหล็กกลม ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) และค่าความพูน (ϕ) เท่ากับ 5.5 mm และ 0.475 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 กล่าวคือวัสดุพูนจะติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางอุปกรณ์การทดลองและถูกประกบด้วยวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าการนำความร้อน (k_{solid}) ในที่นี้คือทองเหลืองที่บ (70% Cu, 30% Zn) ความร้อนที่จ่ายให้แก่ระบบเป็นขดลวดความร้อนที่มีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350W เรียกอุณหภูมิที่ตำแหน่งขดลวดความร้อนนี้ว่าอุณหภูมิด้านสูง (T_H) เพื่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตลอดระยะความยาวตามแนวแกนของอุปกรณ์การทดลอง จะสร้างจากชุดระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นซึ่งติดตั้งอยู่ปลายอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์การทดลอง และเรียกว่าอุณหภูมิด้านต่ำ (T_L) จากการทดลองพบว่าค่า k_{eff} ของเม็ดเหล็กกลมอัดแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H สูงขึ้น และสามารถสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ที่มีความเหมาะสมในรูปสมการยกกำลังได้ ($k_{eff} = 3880(T_H/100)^{-2.77}$) เพราะมีค่า $R^2 = 0.983$ นอกจากนี้ยัง

พบว่าค่าเฉลี่ยของ k_{eff} (k_{avg}) มีแนวโน้มสูงกว่าค่าการนำความร้อนรวมของช่องว่างกับเนื้อเม็ดเหล็ก ($k_{\phi,s}$) เล็กน้อย ($k_{avg} > k_{\phi,s}$) เพราะค่า k_{avg} พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน อย่างไรก็ตามค่า k_{solid} มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุที่บีบไม่คิดค่าการนำความร้อนของรูพรุนหรือช่องว่าง

คำสำคัญ: ประสิทธิภาพการนำความร้อน, วัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น, การแผ่รังสีความร้อน

Abstract

The investigation of an effective thermal conductivity (k_{eff}), influenced by conductive and radiative heat transfer, of the packed-sphere porous medium is the goal of this research. The iron globule having diameter of 5.5 mm and porosity (ϕ) of 0.475 is examined. The experimental procedure is based on ASTM E1225. The tested porous sample is sandwiched by the reference materials that a known thermal conductivity (k_{solid}), Brass solid (70%Cu, 30%Zn), is used. The energy heat rate supplied to the system at one end is obtained from electrical wire heater with a constant value at 350 W and the temperature of this position is defined as the higher temperature (T_H). To ensure that the temperature gradient measured along the length of the bed, the other end is cooled by water and thus the temperature of this position is called as the lower temperature (T_L). From the experiment, it was found that k_{eff} is decreased with increasing T_H and the relation between k_{eff} and T_H can be appropriately proposed by a power equation ($k_{fit} = 3880(T_H/100)^{-2.77}$) owing to $R^2 = 0.983$. 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., $k_{avg} > k_{\phi,s}$, because of the effect of conduction and radiation is regarded in k_{avg} . However, the value of k_{solid} is highest because the solid materials do not take into account the effect of conduction from porosity or void volume.

Keywords: Effective thermal conductivity, Packed-sphere porous medium, Radiative heat transfer

บทนำ

วัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น มีการใช้งานอย่างมากมายในระบบทางความร้อนของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในสภาวะอุณหภูมิสูง ๆ (Kamiuto *et al.*, 1980) เช่นการประยุกต์ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทางเคมี ขบวนการความร้อนกลับคืน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ห้องเผาไหม้ อุปกรณ์กักเก็บความร้อน ฉนวน และเตาปฏิกรณ์ทางเคมี เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นมีจุดเด่นอย่างหนึ่งที่สำคัญ คือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับปริมาตรที่สูง ด้วยเหตุนี้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นจึงนิยมพิจารณาให้อากาศหรือของไหลที่แทรกอยู่ในช่องว่างของพูนหยุดนิ่ง (Stagnant fluid) ไม่มีการไหล ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีเพียงแค่การนำและการแผ่รังสีความร้อน โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะพิจารณารูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวของเม็ดกลมอัดแน่นออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงตัวแบบเซลล์ และแบบกึ่งเนื้อเดียว สำหรับการวิเคราะห์ของการจัดเรียงตัวแบบแรกจะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อน จะคำนึงเฉพาะการนำความร้อนอย่างเดียวส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการคำนวณคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของการจัดเรียงแบบเซลล์นี้ จะต้องมีตัวแปรที่ต้องปรับค่าหลายตัวเพื่อให้ได้คำตอบ ดังนั้นการศึกษานี้จึงนิยมใช้วิธีการทดลองเป็นหลัก (Yagi and Kunii, 1957; Schotte, 1960; Graßmann and Peters, 1999; Buonanno *et al.*, 2003) สำหรับแบบกึ่งเนื้อเดียวจะพิจารณาอิทธิพลของการแผ่รังสีร่วมกับการนำความร้อน ทำให้การศึกษาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของแบบกึ่งเนื้อเดียวมีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะศึกษาด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์และบางครั้งมีการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อีกด้วย (Chen and Churchill, 1963; Chan and Tien, 1974; Kamiuto *et al.*, 1993; Polesek-Karczewska, 2003; Bahramiet *et al.*, 2006) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มากกว่าการทดลอง ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลต้องใช้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลคำนวณเท่านั้น มีความยุ่งยาก หลายขั้นตอน โดยเฉพาะกรณีการจัดเรียงตัวเม็ดกลมอัดแน่นแบบกึ่งเนื้อเดียวยังมีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ หากต้องการผลที่แม่นยำ นอกจากนี้ยังคงขาดข้อมูลหรือผลการทดลองของวัสดุหลายชนิด ทำให้ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน รวมทั้งข้อมูลทางเทคนิคในการออกแบบระบบทางความร้อนจริง

จากเหตุผลและงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองในการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งวัสดุพูนที่เลือกใช้คือ เม็ดเหล็กกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความพูน (ϕ) เท่ากับ 5.55 mm และ 0.475 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 เพราะมีความสะดวกในการทดลองไม่ยุ่งยากแต่ให้ผลการทดลองที่แม่นยำน่าเชื่อถือ

รายการสัญลักษณ์

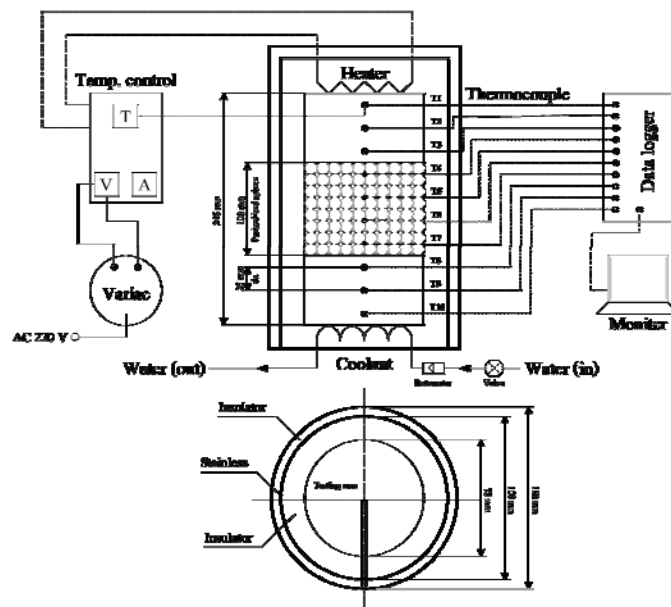
A	พื้นที่หน้าตัดด้านในของอุปกรณ์การทดลอง (m^2)
d	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของเม็ดเหล็กกลมหรือวัสดุพูน (m)
k_{air}	ค่าการนำความร้อนของช่องว่าง (W/m·K)
k_{avg}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนเฉลี่ยของเม็ดเหล็ก (W/m·K)
k_{eff}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (W/m·K)
k_{fit}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ (W/m·K)
k_{solid}	ค่าการนำความร้อนของเหล็กทึบ (W/m·K)
k_{ϕ_s}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของช่องว่างรวมทั้งเนื้อเม็ดเหล็ก (W/m·K)
L1 – L6	ช่วงการวัดอุณหภูมิเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน(m)
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากเครื่องฮีตเตอร์ (=350 W)
T_H	อุณหภูมิด้านสูง (K)
T_L	อุณหภูมิด้านต่ำ (K)
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิด้านสูงและด้านต่ำ (K)
Δx	ผลต่างของระยะห่างสองจุด (m)
ϕ	ค่าความพูน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

รูป 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งแบ่งได้ 3 ส่วนหลัก ๆ คือ ส่วนที่ 1 การให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ ส่วนที่ 2 คือส่วนวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น และส่วนที่ 3 คือส่วนการระบายความร้อนเพื่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิหรืออุณหภูมิตกคร่อมตามความยาวของอุปกรณ์การทดลอง

จากรูป 1 หลักการทำงานของอุปกรณ์การทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้คือพลังงานความร้อนที่ใช้ในการทดลองสร้างจากขดลวดความร้อน โดยเรียกอุณหภูมิความร้อนที่สร้างขึ้นนี้ว่า อุณหภูมิด้านสูง (T_H) ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอ้างอิง และวัสดุพจนต่อไปโดยขดลวดความร้อนจะขดอยู่ในแผ่นตัวเรือนซึ่งทำมาจากเซรามิกซ์เพื่อป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าระหว่างขดลวด ตัวฮีตเตอร์นี้จะติดตั้งอยู่ด้านบนของอุปกรณ์ทดลองส่วนตำแหน่งด้านล่างสุดของอุปกรณ์การทดลองจะเป็นตำแหน่งของระบบระบายความร้อนที่ใช้น้ำเป็นสารทำงาน สร้างจากท่อทองแดงขดม้วน เพื่อก่อให้เกิดอุณหภูมิแตกต่างหรืออุณหภูมิตกคร่อมระหว่างด้านบนและด้านล่าง โดยน้ำที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ การทดลองจะมีอุณหภูมิขาเข้าอยู่ในช่วง $25 - 26.5$ °C และอุณหภูมิน้ำขาออกอยู่ในช่วง $30.5 - 31$ °C สำหรับอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำในระบบหล่อเย็นนี้จะอยู่ในช่วง $0.015 - 0.025$ kg/s ซึ่งการทดลองจะทำการปรับอัตราการไหลเชิงมวลเพื่อรักษาให้ค่าพลังงานความร้อนที่ระบายออกมีค่าประมาณ 350 ± 5 kW ดังนั้นอุณหภูมิของระบบหล่อเย็นนี้จะเรียกว่าอุณหภูมิด้านต่ำ (T_L) จากโครงสร้างอุปกรณ์การทดลองดังกล่าว ความร้อนจะถูกถ่ายโอนหรือเคลื่อนตัวจาก T_H ไปยัง T_L ผ่านวัสดุอ้างอิงและวัสดุพจนก่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิ (Temperature gradient, ΔT) ในแต่ละช่วงความยาว (Δx) ของอุปกรณ์การทดลอง



รูป 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพจนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

3.2 ค่าความพรุนของเม็ดเหล็กกลมอัดแน่น

วิธีการหาค่าความพรุน(Porosity, ϕ) ของเม็ดเหล็กกลมที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 5.5mm ในงานวิจัยนี้นั้น มีขั้นตอนดังนี้ นำเม็ดเหล็กกลมมาบรรจุในภาชนะรูปทรงทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm จนเต็มภาชนะจากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวง ในที่นี้คือ บีกเกอร์ แล้วทำการเติมน้ำให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพรุน อ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้ คือ ปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (V_s) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (V_T) จะสามารถคำนวณหาค่า ϕ ได้จาก

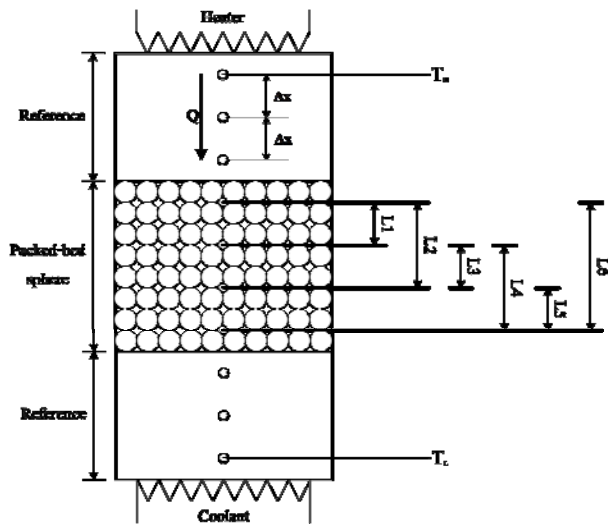
$$\text{Porosity } (\phi) = \frac{V_s}{V_T} \quad (1)$$

สำหรับงานวิจัยนี้เม็ดเหล็กกลมอัดแน่นที่บรรจุอยู่ในทรงกระบอกมีค่า V_s เป็น 336 cm^3 ($V_T = 708.821 \text{ cm}^3$) ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า ϕ ที่ได้คือ 0.475

วิธีการทดลอง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความยาวของอุปกรณ์การทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K จำนวน 10 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ซึ่งในการนำเสนอผลการศึกษานั้นจะแสดง ΔT ตาม Δx ออกเป็นทั้งหมด 6 ช่วง กำหนดเป็น L1, L2, L3, L4, L5 และ L6 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียดตามรูป 2 สาเหตุที่มีการตรวจวัดหลาย ๆ ช่วง Δx เพื่อนำมาเปรียบเทียบและแสดงการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนตัวของความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด อุปกรณ์การทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน รอบตัวเครื่องเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่ภายนอกตามแนวรัศมี ด้วยเหตุนี้ความร้อนจึงเสมือนถูกบังคับให้เคลื่อนตัวตามแนวแกนเพียงแนวเดียว ส่งผลให้การทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ เท่านั้น ในการทดลองจะควบคุมปรับตั้งพลังงานไฟฟ้าให้คงที่เท่ากับ 350 W และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านสูง (T_H) จำนวน 5 ระดับ คือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับในขณะเดียวกันน้ำที่ป้อนเข้าสู่ส่วนการระบายความร้อนเพื่อหล่อเย็นจะรักษาอุณหภูมิ T_L ให้คงที่ในช่วง $28 - 38^\circ\text{C}$ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ทำการบันทึกผลการทดลองและคำนวณหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (k_{eff}) ของวัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่นจากสมการฟูริเออร์ (Cengel and Ghajar, 2011) ดังนี้

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

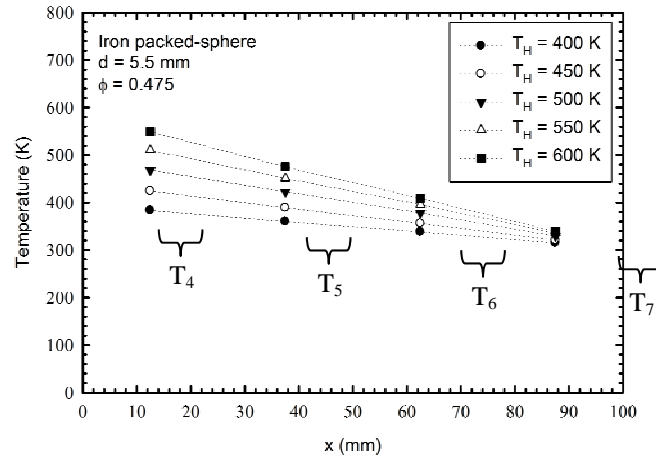


รูป 2 ระยะตรวจวัดอุณหภูมิต่าง ๆ (L1 – L6) ตามแนวความยาวของอุปกรณ์ทดลอง

ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงสร้างอุณหภูมิตามความยาวในแนวแกน

รูป 3 แสดงอุณหภูมิของวัสดุพูนชนิดเม็ดเหล็กตามความยาวในแนวแกน ($T_4 - T_7$) ซึ่งมีระยะในการทดลองเท่ากับ 100 mm โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง แต่ละช่วงมีระยะห่างเท่ากับ 25 mm ในการทดลองระดับ T_H ที่ได้จากตัวฮีตเตอร์จะมีกำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350 W ส่งถ่ายพลังงาน ความร้อนมายังวัสดุพูน โดยกำหนดให้ T_H มีค่าคงที่แตกต่าง 5 ระดับคือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ พิจารณาที่ T_H ใด ๆ พบว่าอุณหภูมิภายในวัสดุพูนเม็ดเหล็ก ($T_4 - T_7$) ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของการวัด ซึ่งก็เป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ที่ถูกควบคุมด้วยการหล่อเย็นของน้ำ แต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ พบว่าอุณหภูมิภายในเม็ดเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า T_H นอกจากนี้ยังพบว่าความชันกราฟ (Slope) จะเพิ่มมากขึ้นตาม T_H เนื่องจากระบบมีค่า T_L แทบจะเป็นค่าเดียวกัน ซึ่งในการทดลองนี้มีค่าประมาณ 34 °C ดังนั้นวัสดุพูนจึงพยายามถ่ายเทความร้อนจาก T_H ต่าง ๆ ให้มีค่าใกล้เคียงกับ T_L มากที่สุด ส่งผลให้ความชันของกราฟกรณี T_H สูง ๆ มีค่าความชันสูงตามไปด้วย



รูป 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในวัสดุพูนตามความยาวในแนวแกน

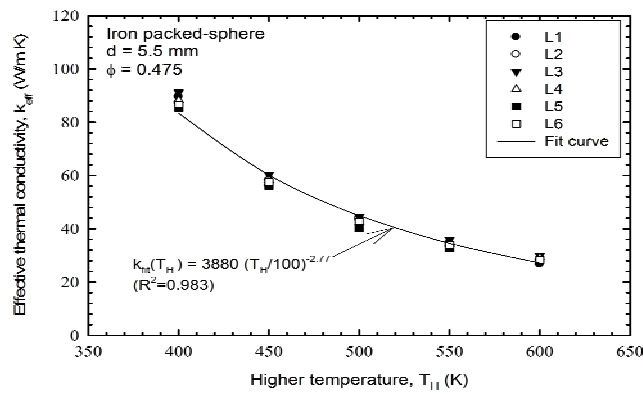
ค่าประสิทธิผลการนำความร้อน

รูป 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (k_{eff}) กับ T_H ที่จ่ายให้แก่วัสดุพูนชนิดเม็ดเหล็กซึ่งมีค่า $\phi=0.475$ โดยในการทดลองกำหนด T_H อยู่ในช่วง 400 – 600 K และทำการวัดอุณหภูมิภายในวัสดุพูน 4 จุด แต่ในการนำเสนอจะแสดงค่า k_{eff} ทั้งหมด 6 ค่า ซึ่งหามาจากระยะ L จำนวน 6 ความยาว ดังแสดงรายละเอียดในรูป 2 ซึ่งแสดงด้วยรูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ จากผลที่ได้พบว่าค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดเหล็กลดลงตามอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า k_{eff} ตาม T_H ของวัสดุพูนเม็ดเหล็กนี้ ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (สมชาย วงศ์วิเศษ, 2541) ได้สมการความสัมพันธ์คือ

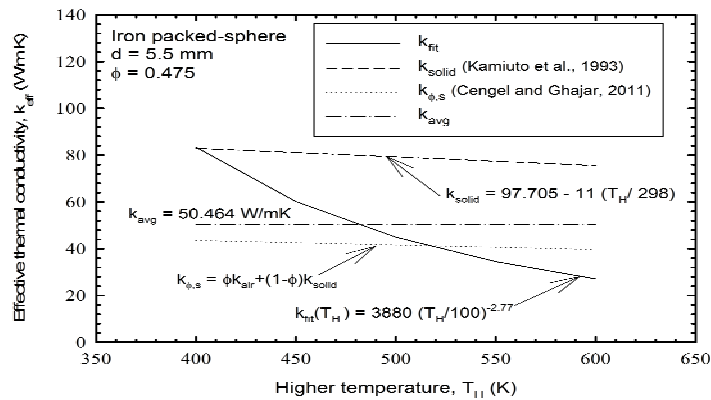
$$k_{fit}(T_H) = 3880 (T_H/100)^{-2.77} \quad (2)$$

สมการความสัมพันธ์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.983 แสดงถึงความเหมาะสมอย่างมากในการเลือกใช้สมการนี้เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 นอกจากนี้เพื่อยืนยันถึงความแม่นยำของผลการทดลองในงานวิจัยนี้ รูป 5 แสดงค่าการนำความร้อนของเหล็กทึบ (k_{solid}) (Kamiuto et al., 1993) และค่าการนำความร้อนของช่องว่างความพูนรวมกับเนื้อเหล็กทึบ ($k_{\phi,s}$) (Cengel and Ghajar, 2011) ถูกแสดงโดยกราฟเส้นประและจุดไข่ปลาตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าค่า k_{solid} มีค่าสูงที่สุดตามมาด้วยค่า k_{fit} และ $k_{\phi,s}$ ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ด้วยอิทธิพล

ของช่องว่างเพราะการนำความร้อนจะเกิดไม่ดีในสถานะแก๊ส แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง k_{it} และ $k_{\phi,s}$ ที่พิจารณาอิทธิพลของช่องว่างด้วยกันทั้ง 2 ค่า จะพบว่า k_{it} มีค่าสูงกว่า $k_{\phi,s}$ อธิบายได้ว่ากรณี $k_{\phi,s}$ นั้นจะรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่งกับวัสดุที่บีบเข้าด้วยกันเสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ในกรณี k_{it} จะมาจากการทดลองที่วัดหรือพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน ส่งผลให้เกิดเป็นค่าประสิทธิผลการนำความร้อนที่สูงกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนในช่องว่างจะมีความสำคัญต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพอร์ซันดัดเม็ดกลมอัดแน่น และเพื่อให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้นค่าเฉลี่ยของ k_{it} ถูกแสดงด้วยกราฟเส้นประและจุด ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ $k_{\phi,s}$ แต่มีค่าสูงกว่าเล็กน้อยเนื่องจาก k_{avg} พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ $k_{\phi,s}$ พิจารณาเพียงการนำความร้อนเท่านั้น



รูป 4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า k_{eff} กับอุณหภูมิด้านสูง (T_H)



รูป 5 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลการนำความร้อนกรณีต่าง ๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาทดลองหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อนของวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเม็ดเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความพูนเท่ากับ 5.55 mm และ $\phi=0.475$ ตามลำดับ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 นั้นสามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1) อุณหภูมิภายในวัสดุพูนเม็ดเหล็กทดลองอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของอุปกรณ์การทดลอง แต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ระดับ อุณหภูมิภายในเม็ดเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า T_H

2) ค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ซึ่งนิยามด้วยค่าประสิทธิผลการนำความร้อนของความสัมพันธ์จากผลการทดลองนี้ขึ้นมาใหม่เป็น k_{fit} แทน k_{eff} โดยสร้างจากวิธีกำลังสองต่ำสุด และได้สมการความสัมพันธ์ (Correlation equation) คือ $k_{fit}(T_H) = 3880 (T_H/100)^{-2.77}$

3) ค่า k_{fit} มีระดับต่ำกว่าวัสดุทึบ (k_{solid}) เพราะการนำความร้อนมีการสูญเสียหรือลดปริมาณลงจากอิทธิพลของช่องว่าง (อากาศนิ่ง) และค่า k_{fit} ซึ่งถูกหาเป็นค่าเฉลี่ย k_{avg} จะมีระดับสูงกว่า $k_{\phi,s}$ เพราะค่า k_{avg} จะเกิดจากการพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ค่า $k_{\phi,s}$ จะเกิดจากการรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่ง (k_{air}) กับวัสดุทึบเข้าด้วยกัน ($k_{\phi,solid} = \phi k_{air} + (1-\phi)k_{solid}$) เสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่งผลให้เกิดเป็นค่าประสิทธิผลการนำความร้อนของ k_{avg} สูงกว่า $k_{\phi,s}$ จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงเป็นผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้ $k_{solid} > k_{fit} > k_{avg} > k_{\phi,s}$

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังขอบพระคุณท่านอาจารย์เด่น รักซ้อน หัวหน้าสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์และอาจารย์กานต์ สุรนันทน์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมา ที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์ในการสร้างตัวเรือนของฮีตเตอร์รวมทั้งขอบคุณนายอาทิตย์ รัตนูปการ, นายพงษ์พันธ์ เอนุนารี และนายธีระพัฒน์ สมบูรณ์ นักศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ซึ่งทำงานวิจัยภายในห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพูน (DITO-Lab) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ช่วยเหลือในการสร้างอุปกรณ์การทดลองและบันทึกผลการทดลองบางส่วน

เอกสารอ้างอิง

- สมชาย วงศ์วิเศษ.(2541). การออกแบบการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดทางความร้อน.กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- Bahrami, M., Michael Yovanovich, M. and Richard Culham, J. (2006). Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 3691-3701.
- Buonanno, G., Carotenuto, A., Giovenco, 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.
- Cengel, Y. A. and Ghajar, A. J. (2011). *Heat and Mass Transfer: Fundamental and Applications* (4th ed.). Singapore: McGraw Hill.
- Chan, C. K. and Tien, C. L. (1974). Radiative transfer in packed spheres. *ASME Journal of Heat Transfer*, 96, 52-58.
- Chen, J. C. and Churchill, S. W. (1963). Radiant heat transfer in packed beds. *AIChE Journal*, 9, 35-41.
- Graßmann, A. and Peters, F. (1999) Experimental investigation of heat conduction in wet sand. *Heat and Mass Transfer*, 35, 289-294.
- 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.
- 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.
- Polesek-Karczewska, S. (2003). Effective thermal conductivity of packed beds of spheres in transient heat transfer. *Heat and Mass Transfer*, 39, 375-380.
- Schotte, W. (1960). Thermal conductivities of packed beds. *AIChE Journal*, 6, 63-67.
- Yagi, S. and Kunii, D. (1957). Studies on effective thermal conductivities in packed bed. *AIChE Journal*, 3, 373-381.