

การนำและการแผ่รังสีความร้อนที่เกิดขึ้นพร้อมกันในวัสดุพรุนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดทองเหลือง

Simultaneous Conductive and Radiative Heat Transfer in the Brass Packed-bed Sphere Porous Media

วีระศักดิ์ สงสุรีย์, พิพัฒน์ อมตฉายา และบัณฑิต กฤตาคม*

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

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ผู้ติดต่อ: E-mail: wee_rasak_song@hotmail.com, โทรศัพท์: +664-423-3073 ต่อ 3411, โทรสาร: +664-423-3074

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อทดสอบค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (Effective thermal conductivity, k_{eff}) ของวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการนำและการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งวัสดุพรุนที่ทำการทดลอง คือ เม็ดทองเหลืองกลม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความพรุน (ϕ) เท่ากับ 5 mm และ 0.452 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 กล่าวคือวัสดุพรุนจะติดตั้งอยู่ตรงกึ่งกลางอุปกรณ์การทดลองและถูกประกบด้วยวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าการนำความร้อนในที่นี้คือทองเหลืองทึบ ความร้อนที่จ่ายให้แก่ระบบมีค่ากำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350 W ทำมาจากขดลวดความร้อน (Wire heater) จะเรียกอุณหภูมิที่ตำแหน่งขดลวดความร้อนนี้ว่าอุณหภูมิด้านสูง (T_H) สำหรับอุณหภูมิด้านต่ำ (T_L) จะมีการระบายความร้อนด้วยน้ำเย็นเพื่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตลอดระยะความยาวตามแนวแกนของอุปกรณ์การทดลอง จากการทดลองพบว่าค่าการนำความร้อนของเม็ดทองเหลืองอัดแน่นมีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H สูงขึ้น สมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ซึ่งสร้างด้วยวิธีสมการกำลังสองต่ำสุด (Least square) มีความสัมพันธ์ คือ $k_{eff,fit}(T_H) = 195.8(1 - 0.001466T_H)$ นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลการนำความร้อนเฉลี่ยที่ได้จากการทดลอง ($k_{eff,avg}$) กับค่าประสิทธิผลการนำความร้อนรวมของช่องว่างกับเนื้อเม็ดทองเหลือง ($k_{\phi,solid} = \phi k_{air} + (1-\phi)k_{solid}$) แสดงผลว่า $k_{eff,avg}$ มีแนวโน้มต่ำกว่า $k_{\phi,solid}$ เล็กน้อย เพราะค่า $k_{eff,avg}$ พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน อย่างไรก็ตามค่าการนำความร้อนของเม็ดเหล็กทึบ (k_{solid}) มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับกรณีอื่น ๆ เนื่องจากวัสดุทึบไม่คิดค่าการนำความร้อนของรูพรุนหรือช่องว่าง

คำหลัก: ประสิทธิภาพการนำความร้อน, วัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น, การแผ่รังสีความร้อน

Abstract

This paper aimed to investigate an effective thermal conductivity (k_{eff}), influenced by conductive and radiative heat transfer, of the packed-bed sphere porous media. The brass beads having diameter of 5 mm and porosity (ϕ) of 0.452 were examined. The experimental procedure was operated based on ASTM E1225. The tested porous sample was sandwiched by the references materials that a known thermal conductivity was used (Brass solid, k_{solid}). The energy heat supplied to system was obtained from electrical wire heater of 350 W and the temperature of this position was defined as a higher temperature (T_H). To make sure the temperature gradient from T_H along the length of experiment, the opposite side was cooled by water and thus the temperature of this position was called as a lower temperature (T_L). From the experiment, it was found that k_{eff} of brass beads decreased with increasing T_H and the relation between k_{eff} and T_H was proposed by an empirical

equation, $k_{\text{eff}}(T_H) = 195.8(1 - 0.001466T_H)$, established from a least square method. In addition, the comparison result between the average effective thermal conductivity obtained by experiment ($k_{\text{eff,avg}}$) and the thermal conductivity combined by void and solid ($k_{\phi,\text{solid}} = \phi k_{\text{air}} + (1-\phi)k_{\text{solid}}$) showed that the values of $k_{\text{eff,avg}}$ was slightly lower than $k_{\phi,\text{solid}}$ owing to the effect of conduction and radiation was regarded in $k_{\text{eff,avg}}$. However, the value of k_{solid} was highest because the solid materials not taken into account the effect of conduction of porosity or void volume.

Keywords: Effective thermal conductivity, Packed-bed sphere porous media, Radiative heat transfer.

1. บทนำ

วัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (Packed-bed sphere porous media) มีการใช้งานอย่างมากมายในระบบทางความร้อนของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในสถานะอุณหภูมิสูง ๆ เช่น การประยุกต์ใช้ในเตาปฏิกรณ์ทางเคมี (Chemical reactor) ขบวนการความร้อนกลับคืน (Heat recovery process) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) ห้องเผาไหม้ (Combustor) อุปกรณ์กักเก็บความร้อน (Thermal storage unit) ฉนวน (Insulator) และ เตาปฏิกรณ์ทางเคมีเป็นต้น (Fusion reactor) [1] เป็นต้น เนื่องจากวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นมีจุดเด่น อย่างหนึ่งที่สำคัญคือ มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับปริมาตรที่สูง ด้วยเหตุนี้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นจึงนิยมพิจารณาให้อากาศหรือของไหลที่แทรกอยู่ในช่องว่างของความพูนหยุดนิ่ง (Stagnant fluid) ไม่มีการไหล ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีเพียงแค่การนำและการแผ่รังสีความร้อน (Conductive and radiative heat transfer) โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทางทฤษฎีจะพิจารณารูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวของเม็ดกลมอัดแน่นออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงตัวแบบเซลล์ (Cell model) [2-3] และ แบบกึ่งเนื้อเดียว (Quasi-homogeneous model) [4-5] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มากกว่าการทดลอง ดังนั้นความถูกต้องของข้อมูลต้องใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลคำนวณเท่านั้น ซึ่งมีความยุ่งยาก โดยเฉพาะกรณีของรูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวเม็ดกลมอัดแน่นแบบกึ่งเนื้อเดียว เนื่องจากมีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หากต้องการผลที่แม่นยำ นอกจากนี้ยังคงขาดข้อมูลหรือผลการทดลองของ

วัสดุหลายชนิด ทำให้ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือในการออกแบบระบบทางความร้อนจริง ๆ

จากเหตุผลและงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้จึงจะขอเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองในการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นอย่างง่ายแต่มีความน่าเชื่อถือ วัสดุพูนที่เลือกใช้ คือ เม็ดทองเหลืองกลม (Brass beads) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความพูน (ϕ) เท่ากับ 5 mm และ 0.452 ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 เพราะมีความสะดวกในการทดลองไม่ยุ่งยากแต่ให้ผลการทดลองที่แม่นยำ

2. รายการสัญลักษณ์

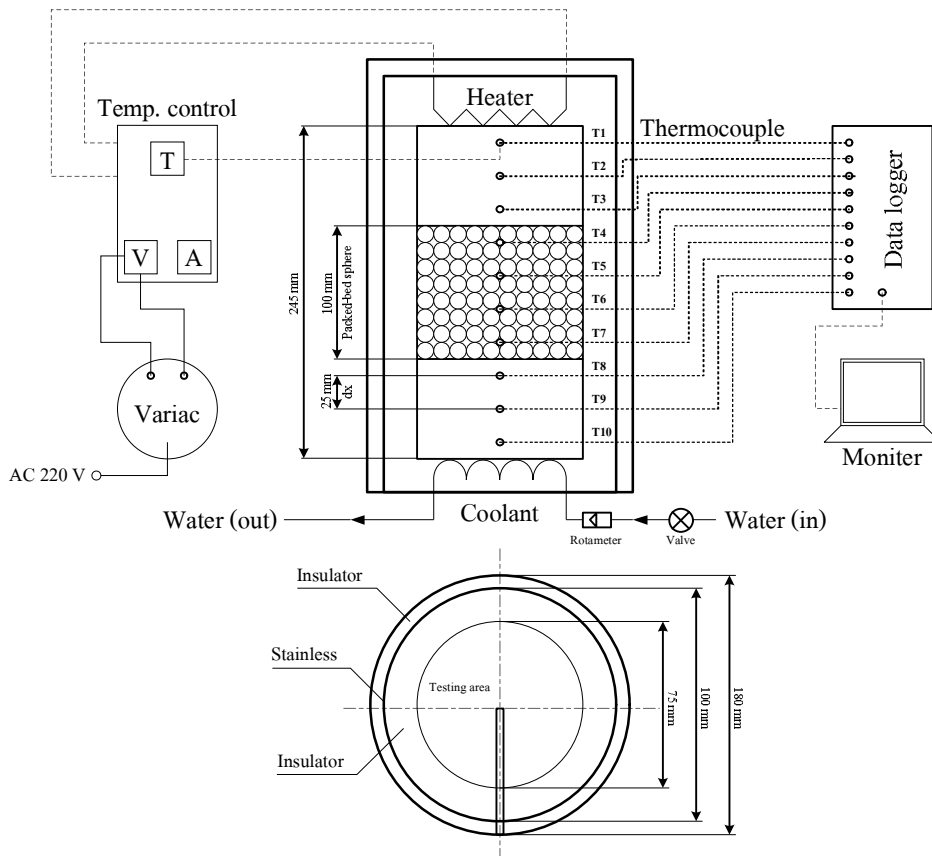
k_{air}	ค่าการนำความร้อนของช่องว่าง (W/m ² ·K)
k_{eff}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (W/m ² ·K)
$k_{\text{eff,avg}}$	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนเฉลี่ยของเม็ดทองเหลือง (W/m ² ·K)
$k_{\text{eff,fit}}$	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ (W/m ² ·K)
k_{solid}	ค่าการนำความร้อนของทองเหลืองทึบ (W/m ² ·K)
$k_{\phi,\text{solid}}$	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของช่องว่างรวมกับเนื้อเม็ดทองเหลือง (W/m ² ·K)
L1 – L6	ช่วงการวัดอุณหภูมิเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (m)
T_H	อุณหภูมิด้านสูง (K)
T_L	อุณหภูมิด้านต่ำ (K)
V_S	ปริมาตรช่องว่าง (m ³)
V_T	ปริมาตรภายในทั้งหมด (m ³)
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิด้านสูงและด้านต่ำ (K)
Δx	ผลต่างของระยะห่างสองจุด (m)
ϕ	ค่าความพูน

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งแบ่งได้ 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ (Heater section) ส่วนที่ 2 คือส่วนวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (Reference and packed bed sphere porous section) และส่วนที่ 3 คือส่วนการระบายความร้อน (Cooling section) เพื่อให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิตลอดความยาวของอุปกรณ์การทดลองจากรูปที่ 1 หลักการทำงานของอุปกรณ์การทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ระบบให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (Wire heater) เพื่อสร้างความร้อนและเรียกอุณหภูมิความร้อนนี้ว่า อุณหภูมิด้านสูง (Higher temperature, T_H) ซึ่งจะ

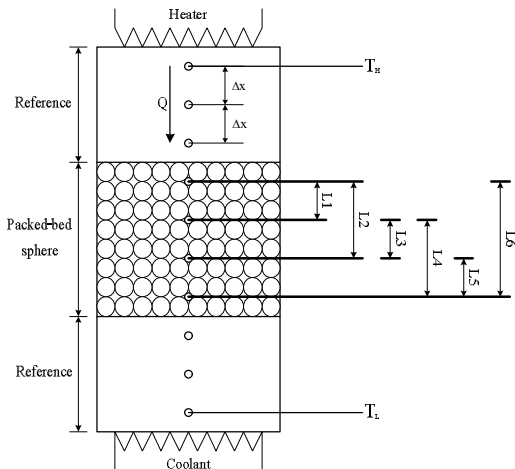
ถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอ้างอิง (Reference material) และวัสดุพูนต่อไป โดยขดลวดความร้อนจะขดอยู่ในแผ่นตัวเรือนซึ่งทำมาจากเซรามิกซ์เพื่อป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าระหว่างขดลวด โดยฮีตเตอร์นี้จะติดตั้งอยู่ด้านบนของอุปกรณ์ทดลองและด้านล่างสุดของอุปกรณ์การทดลองจะเป็นตำแหน่งของระบบระบายความร้อน เป็นท่อทองแดงขดม้วนอยู่ ซึ่งเป็นการสร้างอุณหภูมิแตกต่างระหว่างด้านบนและด้านล่าง ดังนั้นจึงเรียกอุณหภูมิของระบบหล่อเย็นนี้ว่าอุณหภูมิด้านต่ำ (Lower temperature, T_L) และใช้น้ำเป็นสารทำงานในการระบายความร้อน จากโครงสร้างอุปกรณ์การทดลองดังกล่าว ความร้อนจะถูกส่งถ่ายหรือเคลื่อนตัวจาก T_H ไปยัง T_L ผ่านวัสดุอ้างอิงและวัสดุพูน ก่อให้เกิดผลต่างอุณหภูมิ (Temperature gradient, ΔT) ในแต่ละช่วงความยาว (Δx) ของอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

3.2 วิธีการทดลอง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความยาวของอุปกรณ์การทดลองจะใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K (Type-K thermocouple) จำนวน 10 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ซึ่งในการนำเสนอผลการศึกษานั้นจะแสดง ΔT ตาม Δx ออกเป็นทั้งหมด 6 ช่วง กำหนดเป็น L1, L2, L3, L4, L5 และ L6 ตามลำดับ โดยมีรายละเอียด ตามรูปที่ 2 สาเหตุที่มีการตรวจวัดหลาย ๆ ช่วง Δx เพื่อนำมาเปรียบเทียบและแสดงการเคลื่อนตัวของความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด อุปกรณ์การทดลองถูกหุ้มฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) รอบตัวเครื่องเพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่ภายนอกตามแนวรัศมี ด้วยเหตุนี้ความร้อนจึงเสมือนถูกบังคับให้เคลื่อนตัวตามแนวแกนเพียงแนวเดียว ส่งผลให้การศึกษาดทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบ 1 มิติ (One-dimensional heat transfer) เท่านั้น การทดลองจะเริ่มด้วยปรับตั้งกำลังไฟฟ้าที่ฮีตเตอร์ให้คงที่เท่ากับ 350 W และกำหนดตั้ง T_H ไว้ที่ 400 K ซึ่งในขณะเดียวกันทำการป้อนน้ำเข้าสู่ส่วนการระบายความร้อน เพื่อหล่อเย็นและรักษาอุณหภูมิ T_L ให้คงที่ ในงานวิจัยนี้จะอยู่ในช่วง 25 – 30 °C เมื่อเกิดการถ่ายเทความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L แล้วรอจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) จึงทำการบันทึกผลการทดลอง หลังจากนั้นทำการทดลองใหม่อีกครั้ง โดยยังคงตั้งกำลังไฟฟ้าของฮีตเตอร์ให้คงที่เท่ากับ 350 W แต่เปลี่ยนค่า T_H เป็น 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ



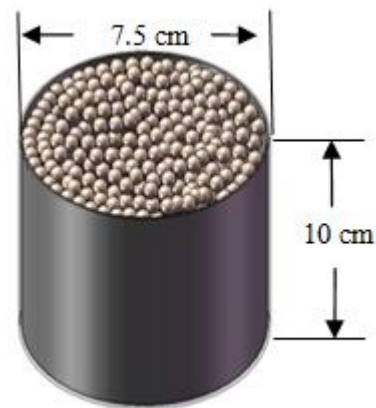
รูปที่ 2 แสดงระยะตรวจวัดอุณหภูมิต่าง ๆ ตามแนวความยาวของอุปกรณ์ทดลอง

3.3 การหาค่าความพรุนของเม็ดกลมอัดแน่น

รูปที่ 3 วิธีการหาค่าความพรุน (Porosity, ϕ) ของวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (เม็ดทองเหลือง) มีขั้นตอนดังนี้ นำเม็ดทองเหลืองใส่ลงไปในภาชนะรูปทรงกระบอกที่มีความสูง 10 cm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 9.5 cm จนเต็มภาชนะเติมน้ำให้เต็มภาชนะหรือถึงระดับด้านบนผิววัสดุพรุน ทิ้งไว้ 5 นาทีเพื่อให้ น้ำซึมเข้าไปในเนื้อวัสดุพรุนแล้วเทน้ำออกจากภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอนด้วยภาชนะตวงในที่นี้ คือบีกเกอร์ (Beaker) แล้วทำการเติมน้ำอีกครั้งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพรุน อ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากบีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้ คือปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (Void-space volume, V_s) นำปริมาตรน้ำนี้ไปหารกับปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume, V_T) จะสามารถคำนวณหาค่า ϕ ได้จาก

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

ซึ่งในงานวิจัยนี้เม็ดทองเหลืองมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยเท่ากับ 5 mm มีค่า V_s เป็น 200 cm³ ดังนั้นจากสมการ (1) ค่า ϕ ที่ได้คือ 0.452



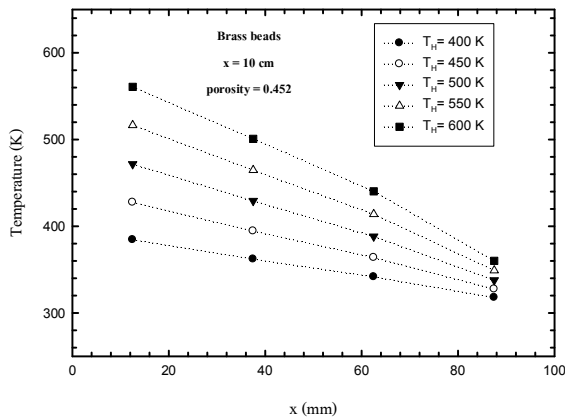
รูปที่ 3 อุปกรณ์การหาค่าความพรุน

4. ผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 โครงสร้างอุณหภูมิตามความยาวในแนวแกน

รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิของวัสดุพรุนชนิดเม็ดทองเหลืองตามความยาวในแนวแกน ($T_4 - T_7$) ซึ่งมีระยะในการทดลองเท่ากับ 100 mm โดยแบ่งออกเป็น 3 ช่วง

แต่ละช่วงมีระยะห่างเท่ากับ 25 mm ในการทดลอง T_H จาก Heater ที่มีกำลังไฟฟ้าคงที่เท่ากับ 350 W จะส่งถ่ายความร้อนมายังวัสดุพูน โดยกำหนดให้ T_H มีค่าคงที่แตกต่าง 5 ระดับคือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ พิจารณาที่ T_H ใด ๆ พบว่าอุณหภูมิภายในวัสดุพูนเม็ดทองเหลือง (Temperature of brass porous bead) ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของการวัด ซึ่งก็เป็นปรากฏการณ์ตามธรรมชาติของการถ่ายเทความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ที่ถูกควบคุมด้วยการหล่อเย็นของน้ำ แต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ พบว่า อุณหภูมิภายในเม็ดทองเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า 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



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิภายในวัสดุพูนตามความยาวในแนวแกน

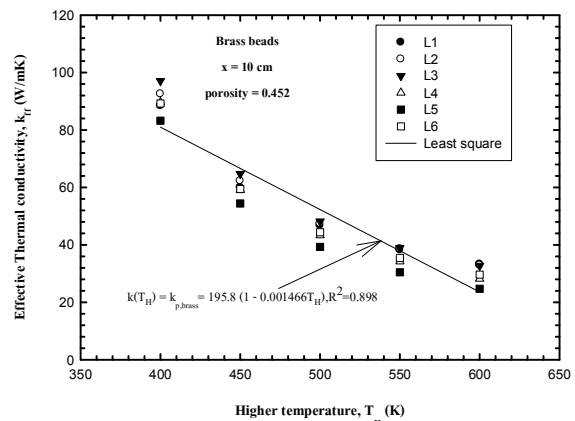
4.2 ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (Effective thermal conductivity, 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 ทั้ง 6 ค่า ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงด้วยรูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ พบว่าค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น ทำให้ทราบว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดทองเหลืองลดลงตามอุณหภูมิ

นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า k_{eff} ตาม T_H ของวัสดุพูนเม็ดทองเหลืองนี้ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) [10] ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$k_{eff,fit}(T_H) = 195.8(1 - 0.001466T_H) \quad (2)$$

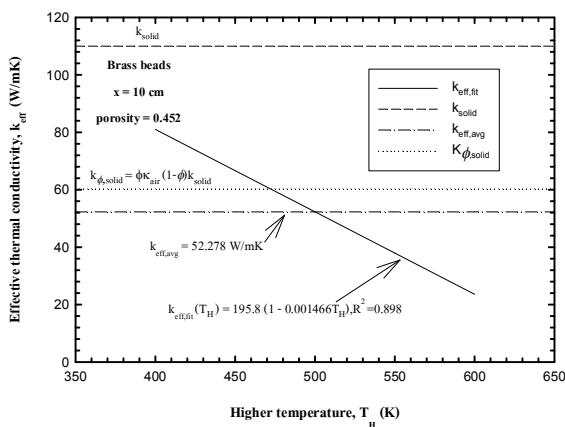
ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.898 แสดงถึงความเหมาะสมต่อการเลือกใช้สมการนี้เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ 1 นอกจากนี้เพื่อยืนยันถึงความแม่นยำของผลการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (k_{eff}) กับอุณหภูมิด้านสูง (T_H)

รูปที่ 6 แสดงค่าการนำความร้อนของทองเหลืองทึบ (Thermal conductivity of solid brass beads, k_{solid}) [7] และ ค่าการนำความร้อนของช่องว่างความพูนรวมกับเนื้อทองเหลืองทึบ (Thermal conductivity of combined void and solid brass beads, $k_{\phi,solid}$) [11] ถูกแสดงโดยกราฟเส้นประ (Dash line) และจุดไข่ปลา (Dot line) ตามลำดับ จากการสังเกตพบว่าค่า k_{solid} มีค่าสูงที่สุดตามมาด้วยค่า $k_{eff,fit}$ และ $k_{\phi,solid}$ ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ด้วยอิทธิพลของช่องว่างเพราะการนำความร้อนจะเกิดไม่ดีในสถานะแก๊ส แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง $k_{eff,fit}$ และ $k_{\phi,solid}$ ที่พิจารณาอิทธิพลของช่องว่างด้วยกันทั้ง 2 ค่า จะพบว่า $k_{eff,fit}$ มีค่าสูงกว่า $k_{\phi,solid}$ ซึ่งอธิบายได้ว่ากรณี $k_{\phi,solid}$ นั้นจะรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่งกับวัสดุทึบเข้าด้วยกันเสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น แต่ในกรณี $k_{eff,fit}$ จะเกิดจากการทดลองที่วัดหรือพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อนส่งผลให้เกิดเป็นค่า

ประสิทธิภาพการนำความร้อนที่สูงกว่าหรืออาจกล่าวได้ว่าอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนในช่องว่างจะมีความสำคัญต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น และเพื่อให้เห็นเด่นชัดยิ่งขึ้นค่าเฉลี่ยของ $k_{eff,fit}$ (Average effective thermal conductivity of iron packed bed sphere, $k_{eff,avg}$) ถูกแสดงด้วยกราฟเส้นประและจุด (Dash and dot line) ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับ $k_{\phi,solid}$ แต่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยเนื่องจาก $k_{eff,avg}$ พิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ $k_{\phi,solid}$ พิจารณาการนำความร้อนเท่านั้นซึ่งก็ขึ้นอยู่กับค่าความพูนด้วย



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนกรณีต่าง ๆ

5. สรุปผลการทดลอง

5.1 รูปภาพและตาราง

จากการศึกษาและทดลองหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นชนิดเม็ดทองเหลืองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าความพูนเท่ากับ 5 mm และ $\phi = 0.452$ ตามลำดับ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 มาตรฐาน สามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

- 1) อุณหภูมิภายในวัสดุพูนเม็ดทองเหลืองลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นตามความยาวในแนวแกนของอุปกรณ์การทดลองแต่หากพิจารณาที่ตำแหน่ง x ใด ๆ ระดับอุณหภูมิภายในเม็ดทองเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า T_H
- 2) ค่า k_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น และได้สมการความสัมพันธ์ระหว่าง k_{eff} กับ T_H ซึ่งตัวย่อ k_{eff} ได้ นิยามตัวย่อใหม่เป็น $k_{eff,fit}$ โดยสร้างจากวิธีกำลังสองต่ำสุด คือ $k_{eff,fit}(T_H) = 195.8(1 - 0.001466T_H)$

3) ค่า $k_{eff,fit}$ มีระดับต่ำกว่าวัสดุทึบ (k_{solid}) เพราะการนำความร้อนมีการสูญเสียหรือลดปริมาณลงจากอิทธิพลของช่องว่าง (อากาศนิ่ง) และค่า $k_{eff,fit}$ ซึ่งถูกหาเป็นค่าเฉลี่ย $k_{eff,avg}$ จะมีระดับต่ำกว่า $k_{\phi,solid}$ เพราะค่า $k_{eff,avg}$ จะเกิดจากการพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ค่า $k_{\phi,solid}$ จะเกิดจากการรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่ง (k_{air}) กับวัสดุทึบเข้าด้วยกัน ($k_{\phi,solid} = \phi k_{air} + (1-\phi)k_{solid}$) เสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่ก็ขึ้นอยู่กับค่าความพูนด้วย ส่งผลให้เกิดเป็นค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของ $k_{\phi,solid}$ สูงกว่า $k_{eff,avg}$ ซึ่งผลการทดลองแสดงผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

$$k_{solid} > k_{eff,fit} > k_{\phi,solid} > (k_{eff,avg})$$

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนบทความขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.บัณฑิต กฤตาคม ที่กรุณาให้คำแนะนำและเสนอแนวคิดในการดำเนินการวิจัยตลอดจนให้คำปรึกษาอันเป็นประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเขียนบทความรวมทั้งขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ทุกท่านและผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (มทร.ธัญบุรี) ที่ได้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และยังขอบพระคุณท่านอาจารย์เด่น ชื่อนรัก หัวหน้าสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์และบุคลากรของสาขาวิชาออกแบบเซรามิกซ์ทุกท่าน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี นครราชสีมาที่ให้คำแนะนำและอนุเคราะห์ในการสร้างตัวเรือนของฮีตเตอร์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kikuchi, S., Kuroda, T. and Enoda, M. (1999). Preliminary thermo-mechanical analysis of ITER breeding blanket, JAERI Tech, no. 98058.
 [2] Yagi, S. and Kunii, D. (1957). Studies on Effective Thermal Conductivities in Packed Bed, *AIChE Journal*, vol. 3, March, pp. 373-381.
 [3] Schotte, W. (1960). Thermal conductivities of packed beds, *AIChE Journal*, vol. 6, February, pp. 63-67.



- [4] Graßmann, A. and Peters, F. (1999) Experimental investigation of heat conduction in wet sand, *Heat and Mass Transfer*, vol. 35, pp. 289–294
- [5] 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, *J. Heat Transfer, ASME*, vol. 125, pp. 693–702.
- [6] Chen, J. C. and Churchill, S. W. (1963). Radiant heat transfer in packed beds, *AIChE Journal*, vol. 9, January, pp. 35-41.
- [7] Chan, C. K. and Tien, C. L. (1974). Radiative transfer in packed spheres, *Journal of Heat Transfer*, vol. 96, February, pp. 52-58.
- [8] Kamiuto, K., Iwamoto, M. and Nagumo, Y. (1993). Combined conduction and correlated-radiation heat transfer in packed-beds, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 7 (3), July-September, pp. 496-501.
- [9] Polesek-Karczewska, S. (2003). Effective thermal conductivity of packed beds of spheres in transient heat transfer, *Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 375-380.
- [10] Bahrami, M., Michael Yovanovich, M. and Richard Culham, J. (2006). Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds, vol. 49, pp. 3691-3701.
- [11] สมชาย วงศ์วิเศษ (2541). การออกแบบการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดทางความร้อน, กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี