



การหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (ETC) ของวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น
กรณีค่าความพรุนเปลี่ยนแปลง

Estimation of Effective Thermal Conductivity (ETC) on the Spherical
Packed - bed Porous Media with Various the Porosity

ไพลิน หาญขุนทด¹, จัตุพล ป้องกัน² และบัณฑิต กฤตาคม^{2*}

ห้องปฏิบัติการวิจัยการพัฒนาในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน

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

¹โปรแกรมวิชาช่างจักรกลหนัก วิทยาลัยนวัตกรรมการอาชีพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

744 ถนนสุรนารายณ์ ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000

*ติดต่อ: E-mail: pilin.ha@rmuti.ac.th และ bundit.kr@rmuti.ac.th โทรศัพท์ 044 233 073 โทรสาร 044 233 074

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีความมุ่งหมายเพื่อการทดสอบหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (ETC, λ_{eff}) ของวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าวัสดุพรุน (ϕ) วัสดุพรุนที่เลือกมาทำการทดลอง คือ หินตุ้ปลา แต่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.33 1.65 และ 2.3 cm ส่งผลให้มีค่าความพรุน (ϕ) เท่ากับ 0.387 0.414 และ 0.463 ตามลำดับ วิธีการทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 พลังงานความร้อนที่ให้แก่ระบบจะมีค่าคงที่คือ 350 W โดยมีการปรับอุณหภูมิหรือเรียกว่าอุณหภูมิด้านสูง (T_H) แล้วทำการทดลองให้อยู่ในช่วง 350 - 600 K ส่วนอุณหภูมิด้านต่ำ (T_L) จะปรับตั้งให้คงที่ประมาณ 298 ± 3 K จากการทดลองพบว่าค่า λ_{eff} ของหินตุ้ปลาทั้ง 3 ชนิดมีแนวโน้มลดลง เมื่อ T_H สูงขึ้น ซึ่งเป็นไปตามสมบัติทางธรรมชาติของหินตุ้ปลา เมื่อพิจารณาที่ T_H ใด ๆ พบว่าค่า λ_{eff} มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่า ϕ ที่เพิ่มขึ้นเพราะวัสดุพรุนที่มีช่องว่างเพิ่มขึ้นจะเกิดการแผ่รังสีความร้อนที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่า λ_{eff} มีค่ามากขึ้น

คำหลัก: ค่าประสิทธิผลการนำความร้อน, วัสดุพรุน, ค่าความพรุน, หินตุ้ปลา, อุณหภูมิด้านสูง

Abstract

The aim of this research is to evaluate the effective thermal conductivity (ETC, λ_{eff}) of spherical packed-bed porous media for variation of porosity (ϕ). The pebbles is used as porous media. The average diameters of tested porous media are 1.33, 1.65 and 2.3 cm and, thus, the porosities become 0.387, 0.414 and 0.463 respectively. The experimental procedure is based on ASTM E1225. The electrical power supplied to the system is kept at 350 W generated a hot temperature and it is defined as a higher temperature (T_H) with the range of 350 – 600 K. On the other hand, a lower temperature (T_L) is 298 ± 3 K. From the experiment, it is found that λ_{eff} of three pebbles are decreased as increasing ϕ owing to this is the natural property of the pebbles. Considering to constant

of T_H , the λ_{eff} is increased with ϕ increasing because a higher radiative transfer is yielded with a raiser porosity leading to λ_{eff} is increased.

Keywords: Effective thermal conductivity, Porous media, Porosity, Pebbles, Higher temperature

1. บทนำ

วัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (Packed-bed sphere porous media) มีการใช้งานอย่างมากมายในระบบทางความร้อนของอุตสาหกรรม โดยเฉพาะในสถานะอุณหภูมิสูง 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 มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวสัมผัสกับปริมาตรสูง ด้วยเหตุผลนี้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นจึงนิยมพิจารณาให้อากาศหรือของไหลที่แทรกอยู่ในช่องว่างของความพูนหยุดนิ่ง (Stagnant fluid) ไม่มีการไหล ส่งผลให้กลไกการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นมีเพียงการนำและการแผ่รังสีความร้อน (Convective and radiative heat transfer) โดยทั่วไปการวิเคราะห์ทางทฤษฎีเกี่ยวกับการถ่ายเทความร้อนของวัสดุพูนจะพิจารณารูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวออกเป็น 2 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ การจัดเรียงตัวแบบเซลล์ (Cell model) และแบบกึ่งเนื้อเดียว (Quasi-homogeneous model) สำหรับการวิเคราะห์การจัดเรียงตัวแบบแรกจะไม่คำนึงถึงอิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อน จะคำนึงถึงเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว ส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในการคำนวณเกี่ยวกับคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนเนื่องจากในการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (Effective Thermal Conductivity, ETC หรือ λ_{eff}) ของการจัดเรียงแบบเซลล์นี้ จะต้องมีส่วนที่ต้องปรับค่าหลายตัวเพื่อให้ได้คำตอบ ดังนั้นการศึกษานี้จึงนิยมใช้วิธีการทดลองเป็นหลัก [3-6] สำหรับแบบกึ่งเนื้อเดียวจะ

พิจารณาอิทธิพลของการแผ่รังสีร่วมกับการนำความร้อน ทำให้การศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของแบบกึ่งเนื้อเดียวมีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะศึกษาด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์และบางครั้งมีการสร้างอุปกรณ์การทดลองเพื่อมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย [7-11] อย่างไรก็ตามในงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (ETC) ด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์มากกว่าการทดลอง ซึ่งความถูกต้องของข้อมูลต้องใช้จากการเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลคำนวณเท่านั้น ซึ่งมีความยุ่งยากโดยเฉพาะกรณีของรูปแบบกายภาพการจัดเรียงตัวแบบกึ่งเนื้อเดียวยังมีความซับซ้อนในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้ได้ผลที่แม่นยำ นอกจากนี้ยังคงขาดข้อมูลหรือผลการทดลองของวัสดุหลายชนิด ทำให้ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้งาน รวมทั้งข้อมูลทางเทคนิคในการออกแบบระบบทางความร้อนจริง

จากเหตุผลและงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น บทความวิจัยนี้ขอนำเสนอผลการศึกษาเชิงทดลองในการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (ETC) ของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น ซึ่งวัสดุที่ใช้ คือ หินตุ้ปลา ที่มีค่าความพูน (ϕ) แตกต่างกัน 3 ค่าได้แก่ 0.334 0.414 และ 0.463 ซึ่งเกิดจากกรณีหินตุ้ปลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ขนาด คือ 1.33 1.65 และ 2.03 cm ตามลำดับ การทดลองจะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 [12] เพราะมีความสะดวกในการทดลองไม่ยุ่งยากแต่ให้ผลการทดลองที่แม่นยำน่าเชื่อถือ

2. รายการสัญลักษณ์

- A พื้นที่หน้าตัดด้านในของอุปกรณ์การทดลอง (m^2)
- d เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเม็ดหินตุ้ปลา (m)
- k_{air} ค่าการนำความร้อนของช่องว่าง (W/m^2K)

λ_{avg}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนเฉลี่ยของหินตุ้ปลา (W/m ² ·K)
λ_{eff}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (W/m ² ·K)
λ_{fit}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนจากสมการความสัมพันธ์ (W/m ² ·K)
k_{solid}	ค่าการนำความร้อนของหินตุ้ปลา (W/m ² ·K)
λ_{ϕ}	ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของช่องว่างรวมกับเนื้อเม็ดหินตุ้ปลา (W/m ² ·K)
\dot{Q}	อัตราการถ่ายเทความร้อนจากฮีตเตอร์ (W)
T_H	อุณหภูมิด้านสูง (K)
T_L	อุณหภูมิด้านต่ำ (K)
ΔT	ผลต่างอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิด้านสูงและด้านต่ำ (K)
Δx	ผลต่างของระยะห่างสองจุด (m)
ϕ	ค่าความพรุน

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์การทดลอง

รูปที่ 1 แสดงแผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (ETC, λ_{eff}) ของวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น สร้างโดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 [12] แบ่งได้ 3 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 การให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ (Heater section) ส่วนที่ 2 คือวัสดุอ้างอิงหรือวัสดุพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น (References and packed-bed sphere porous section) และส่วนที่ 3 คือส่วนการระบายความร้อน (Cooling section) เป็นส่วนที่ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ

จากรูปที่ 1 หลักการทำงานของอุปกรณ์การทดลองสามารถอธิบายได้ดังนี้คือ ระบบให้ความร้อนโดยใช้ขดลวดความร้อน (Wire heater) เพื่อสร้างความร้อนและเรียกอุณหภูมิความร้อนนี้ว่า อุณหภูมิด้านสูง (Higher temperature, T_H) ซึ่งจะถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุอ้างอิงและวัสดุพรุนต่อไป โดยขดลวดความร้อนจะขดอยู่ในแผ่นเซรามิกซ์ สาเหตุที่ใช้แผ่นเซรามิกซ์เพื่อป้องกันการลัดวงจรทางไฟฟ้าระหว่างขดลวดโดยติดตั้งประกบอยู่ส่วนบนของอุปกรณ์ทดลอง ส่วนตำแหน่งด้านล่างสุดของ

อุปกรณ์การทดลองจะเป็นการติดตั้งระบบระบายความร้อน (Cooling system) จะใช้วัสดุท่อทองแดงขดม้วนเป็นท่ออยู่ที่ด้านอุณหภูมิต่ำ (Lower temperature, T_L) และใช้น้ำเป็นสารทำงานในการระบายความร้อน เพื่อสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature gradient, ΔT) ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อน

3.2 วัสดุพรุน

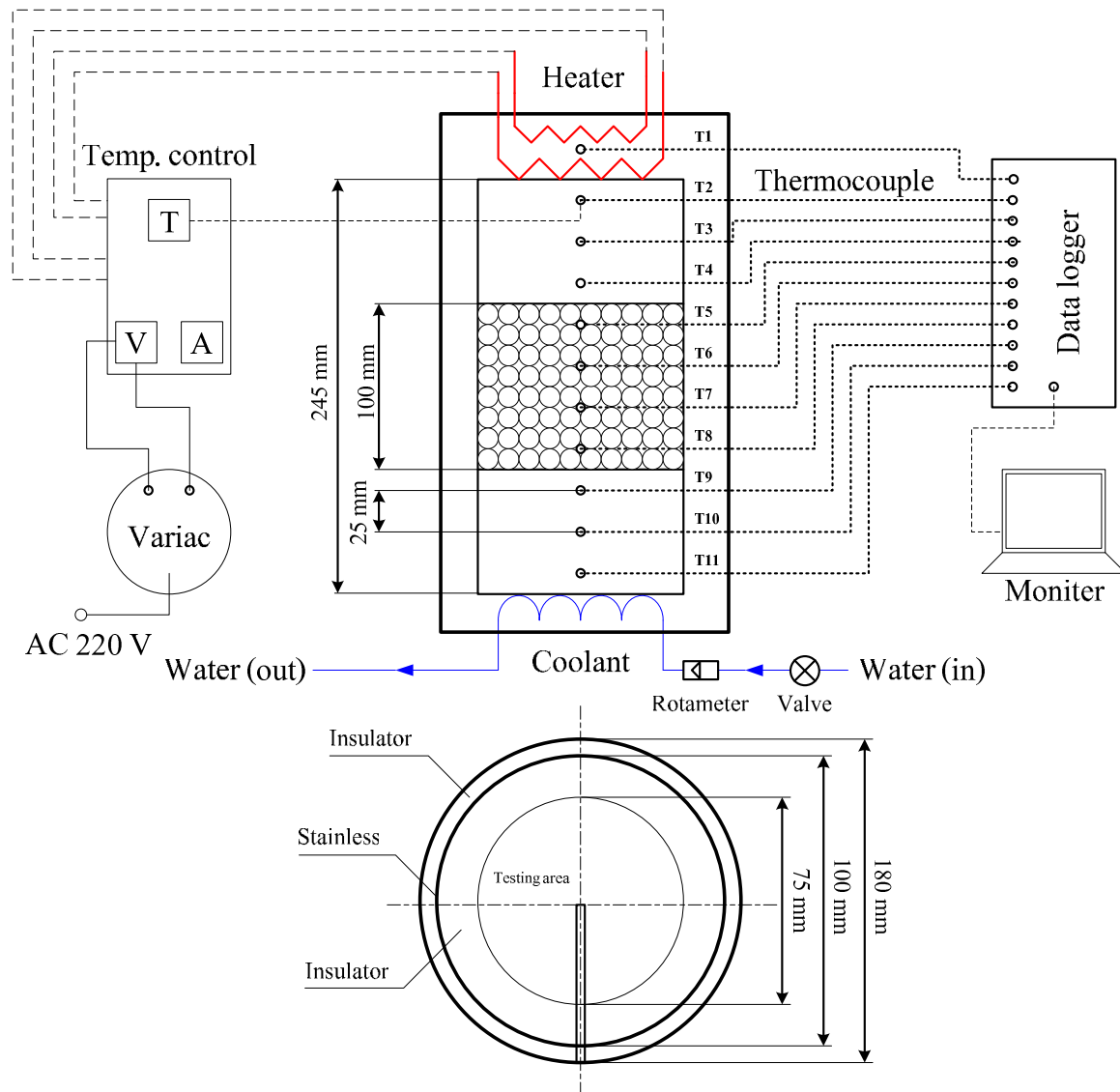
วิธีการหาค่าความพรุน (Porosity, ϕ) ของเม็ดกลมหินตุ้ปลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.33 1.65 และ 2.03 cm ซึ่งนำมาบรรจุในทรงกระบอกทดลอง เพื่อเป็นวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น (Packed-bed sphere porous medium) มีขั้นตอนดังนี้ นำเม็ดหินตุ้ปลาใส่ลงในภาชนะทรงกระบอกที่มีความสูง 11 cm ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 7.5 cm จนเต็มภาชนะ จากนั้นตวงน้ำที่ทราบปริมาตรแน่นอน ด้วยภาชนะตวงในที่นี้คือ ปีกเกอร์ (Beaker) แล้วทำการเติมน้ำอีกครั้งให้เต็มภาชนะจนถึงระดับผิวด้านบนของวัสดุพรุน อ่านค่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปจากปีกเกอร์ ปริมาตรน้ำที่เติมลงไปนี้คือ ปริมาตรช่องว่างที่น้ำเข้าไปแทนที่ได้ (Void-space volume, V_S) นำปริมาตรน้ำนี้ ไปหารกับปริมาตรทรงกระบอกภายในทั้งหมด (Total or bulk volume, V_T) จะสามารถคำนวณหาค่า ϕ ได้จาก

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

ซึ่งในงานวิจัยนี้เม็ดหินตุ้ปลาทั้ง 3 ขนาดมีค่า V_S เป็น 188 cm³ 201.5 cm³ และ 225 cm³ $V_T = 485.965$ ค่า ϕ ที่ได้คือ 0.387 0.414 และ 0.463 ตามลำดับ

3.2 วิธีการทดลอง

การตรวจวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่าง ๆ ตามแนวความยาวของอุปกรณ์การทดลอง โดยจะใช้เทอร์โมคัปเปิลชนิด K (Type-K thermocouple) จำนวน 10 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 mm ติดตั้งตามแนวความยาวของอุปกรณ์การทดลอง ซึ่งในการนำเสนอผลการศึกษานั้นจะแสดง ΔT ตาม Δx แยกออกเป็นทั้งหมด 6 ช่วง กำหนดเป็น L1, L2, L3, L4, L5



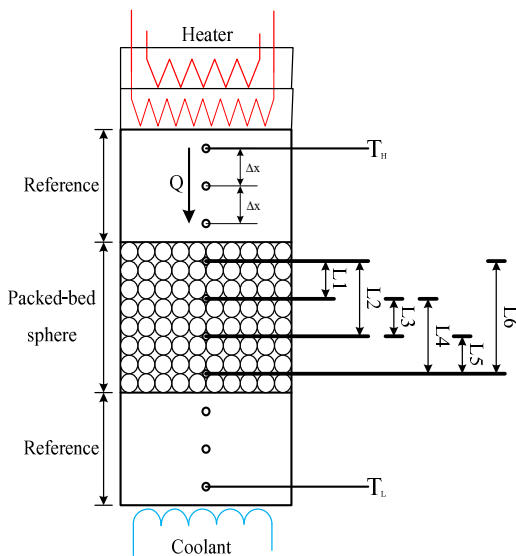
รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของการหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

และ L6 ตามลำดับ สาเหตุที่มีการตรวจวัดหลาย ๆ ช่วงของ Δx เพื่อนำมาเปรียบเทียบและแสดงการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนตัวของความร้อนจาก T_H ไปยัง T_L ให้มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด อุปกรณ์การทดลองถูกหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน (Thermal insulation) รอบตัวเครื่อง เพื่อป้องกันความร้อนสูญเสียออกสู่ภายนอกตามแนวรัศมี ด้วยเหตุนี้ความร้อนจึงเสมือนถูกบังคับให้เคลื่อนตัวตามแนวแกนเพียงแนวเดียว ส่งผลให้การ

ทดลองเป็นการถ่ายเทความร้อนแบบหนึ่งมิติ (One-dimensional heat transfer) เท่านั้น ในการทดลองจะควบคุมปรับตั้งพลังงานไฟฟ้าให้คงที่เท่ากับ 350 W และปรับเปลี่ยนอุณหภูมิด้านสูง T_H จำนวน 5 ระดับ คือ 400, 450, 500, 550 และ 600 K ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันจะป้อนน้ำเข้าสู่ส่วนการระบายความร้อนเพื่อหล่อเย็นและรักษาอุณหภูมิ T_L ให้คงที่ ซึ่งอยู่ในช่วง 28 – 38 °C เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะ

คงที่ (Steady state) ทำการบันทึกผลการทดลอง และ คำนวณหาค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน λ_{eff} ของ วัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นจากสมการฟูริเออร์ (Fourier's law of heat conduction) [13] ดังนี้

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

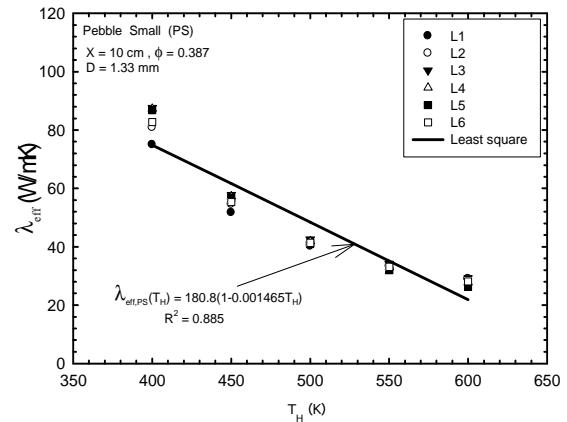


รูปที่ 2 แสดงระยะตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ (L1 – L6) ตามแนวความยาวของอุปกรณ์ทดลอง

แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{eff} กับ T_H ของหินตู้ปลาเม็ดเล็กนี้ ด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square method) [14] ได้สมการความสัมพันธ์ คือ

$$\lambda_{eff,PS}(T_H) = 180.8(1-0.001465T_H) \quad (3)$$

ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of determination, R^2) เท่ากับ 0.885 แสดงถึงความเหมาะสมต่อการเลือกใช้สมการนี้ เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ 1



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_{eff} กับ T_H กรณี $\phi_{PS} = 0.387$

4. การวิเคราะห์และผลการทดลอง

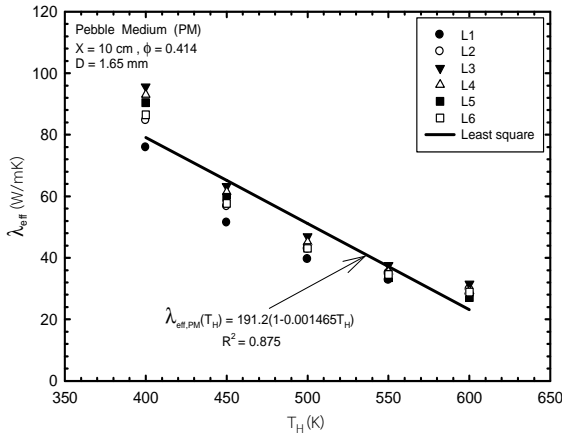
4.1 ค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน

รูปที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (λ_{eff}) กับ T_H ที่จ่ายให้กับวัสดุพูนชนิดหินตู้ปลาเม็ดเล็ก ซึ่งมีค่าความพูน $\phi_{PS} = 0.387$ ในการทดลองทำการวัดอุณหภูมิภายในวัสดุพูน 4 จุด แต่ละจุดแสดงค่า λ_{eff} ทั้งหมด 6 ค่า ซึ่งหามาจากระยะ L ทั้ง 6 ค่า ดังได้แสดงไว้อย่างละเอียดในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงด้วยรูปสัญลักษณ์ต่างๆ จากผลที่ได้พบว่าค่า λ_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดหินตู้ปลาเม็ดเล็ก ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟ

รูปที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ_{eff} กับ T_H ที่จ่ายให้กับวัสดุพูนชนิดหินตู้ปลาเม็ดกลาง ซึ่งมีค่าความพูน $\phi_{PM} = 0.414$ ผลการทดลองจากระยะทั้ง 6 ค่า (L_1 ถึง L_6) ซึ่งแสดงผลด้วยรูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ นั้นพบว่า λ_{eff} มีแนวโน้มลดลง เมื่อ T_H เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดหินตู้ปลาเม็ดกลางลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังได้ทำการสร้างกราฟแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{eff} กับ T_H ของหินตู้ปลาเม็ดกลางด้วยวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) ได้ความสัมพันธ์ คือ

$$\lambda_{\text{eff,PM}}(T_H) = 191.2(1-0.001465T_H) \quad (4)$$

ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีค่า R² เท่ากับ 0.875 แสดงถึงความเหมาะสมเพียงพอต่อการเลือกใช้สมการเพียงพอต่อการนี้เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ 1



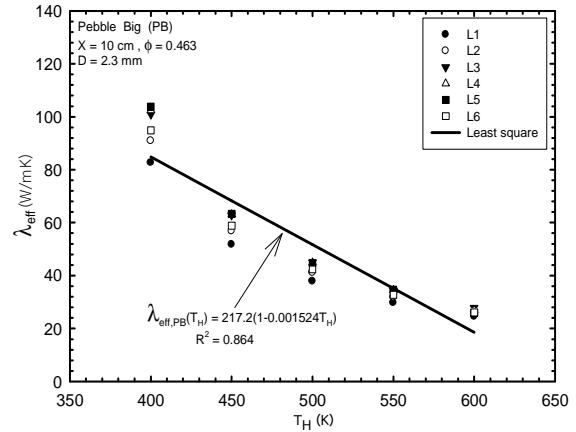
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_{eff} กับ T_H กรณี

$$\phi_{\text{PM}} = 0.414$$

รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า λ_{eff} กับ T_H ที่จ่ายให้กับวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลาเม็ดใหญ่ ซึ่งมีค่าความพูน $\phi_{\text{PB}} = 0.463$ ผลการทดลองจากระยะทั้ง 6 ค่า (L₁ ถึง L₆) ซึ่งแสดงผลด้วยรูปสัญลักษณ์ต่าง ๆ นั้นพบว่าค่า λ_{eff} มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการนำความร้อนของวัสดุพูนชนิดหินตุ้ปลาเม็ดใหญ่ลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ยังได้ทำการสร้างกราฟแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่า λ_{eff} กับ T_H ของหินตุ้ปลาเม็ดใหญ่โดยมีความสัมพันธ์ คือ

$$\lambda_{\text{eff,PB}}(T_H) = 217.2(1-0.001524T_H) \quad (5)$$

ซึ่งสมการความสัมพันธ์นี้มีค่า R² เท่ากับ 0.864 แสดงถึงความเหมาะสมเพียงพอต่อการเลือกใช้สมการนี้ เพราะมีค่าใกล้เคียงกับ 1



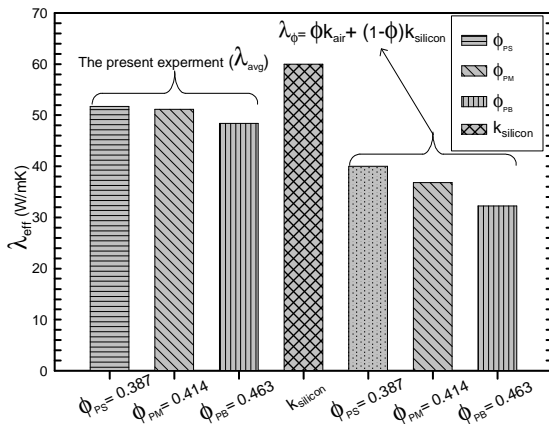
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง λ_{eff} กับ T_H กรณี

$$\phi_{\text{PB}} = 0.463$$

4.2 การตรวจสอบค่าความถูกต้องของค่า λ_{eff}

เพื่อยืนยันถึงความแม่นยำของผลการทดลองในงานวิจัยนี้รูปที่ 6 นำค่าประสิทธิภาพการนำความร้อน (ETC, λ_{eff}) ที่ได้จากการทดลองของวัสดุพูนชนิดเม็ดหินตุ้ปลาทั้ง 3 ค่าความพูนมาทำการเฉลี่ย (Average effective thermal conductivity pebble packed - bed sphere, $\lambda_{\text{avg,PM}}$, $\lambda_{\text{avg,PS}}$, $\lambda_{\text{avg,PB}}$) เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการนำความร้อนของหินตุ้ปลาที่บด ในที่นี้เป็นซิลิกอนคาไบด์ (Thermal conductivity of silicon carbide, k_{silicon}) และค่าการนำความร้อนของช่องว่างรวมกับเนื้อหินตุ้ปลาที่บด (Thermal conductivity of combined void and solid beads, $\lambda_{\phi} = \phi k_{\text{air}} + (1-\phi)k_{\text{silicon}}$) [12] จากการสังเกตเปรียบเทียบพบว่าค่า k_{silicon} มีค่าสูงที่สุดตามมาด้วยค่า $\lambda_{\text{avg,PS}}$, $\lambda_{\text{avg,PM}}$, $\lambda_{\text{avg,PB}}$ และ λ_{ϕ} ตามลำดับ ซึ่งอธิบายได้ด้วยอิทธิพลของช่องว่างเพราะการนำความร้อนจะเกิดได้ไม่ดีในสถานะแก๊ส แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง λ_{eff} และ λ_{ϕ} ที่พิจารณาอิทธิพลของช่องว่างเหมือนกัน จะพบว่า λ_{eff} มีค่าสูงกว่า λ_{ϕ} เนื่องจากค่า λ_{ϕ} นั้น จะรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่งกับวัสดุที่บดเข้าด้วยกันเสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ในกรณี λ_{eff} จากการทดลองจะพิจารณาทั้งการนำ

และการแผ่รังสีความร้อน ส่งผลให้เกิดค่าประสิทธิผลการนำความร้อนที่สูงกว่า หรืออาจกล่าวได้ว่า อิทธิพลของการแผ่รังสีความร้อนในช่องว่างจะมีความสำคัญต่อกลไกการถ่ายเทความร้อนในวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นหินตู้ปลา



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิผลการนำความร้อนกรณีต่าง ๆ

5. สรุป

จากการศึกษาและทดสอบหาค่าประสิทธิผลการนำความร้อน (ETC, λ_{eff}) ของวัสดุพูนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นทั้ง 3 รูปแบบ ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน 3 ขนาด คือ 1.33 1.65 และ 2.3 cm และมีค่าความพรุน (ϕ) เท่ากับ 0.387 0.414 และ 0.463 ตามลำดับ โดยอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1225 สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1) ค่า λ_{eff} ของวัสดุพูนเม็ดกลมอัดแน่นทั้ง 3 รูปแบบ มีแนวโน้มลดลงเมื่อ T_H เพิ่มขึ้น และได้สมการความสัมพันธ์โดยสร้างจากวิธีกำลังสองต่ำสุด (Least square) คือ

$$\lambda_{eff,PS}(T_H) = 180.8(1-0.001465T_H)$$

$$\lambda_{eff,PM}(T_H) = 191.2(1-0.001465T_H)$$

$$\lambda_{eff,PB}(T_H) = 217.2(1-0.001524T_H)$$

2) ค่า λ_{eff} มีระดับต่ำกว่าวัสดุทึบ ($k_{solid} = k_{silicon}$) เพราะการนำความร้อนมีการสูญเสียจากอิทธิพลของช่องว่าง (อากาศนิ่ง) และค่า λ_{eff} ซึ่งถูกหาเป็นค่าเฉลี่ย

λ_{avg} จะมีระดับสูงกว่า λ_ϕ เพราะค่า λ_{avg} จะเกิดจากการพิจารณาทั้งการนำและการแผ่รังสีความร้อน แต่ค่า λ_ϕ จะเกิดจากการรวมเอาค่าการนำความร้อนของอากาศนิ่ง (k_{air}) กับวัสดุทึบเข้าด้วยกัน ($\lambda_\phi = \phi k_{air} + (1-\phi)k$) เสมือนคิดเฉพาะการนำความร้อนเพียงอย่างเดียวเท่านั้น ส่งผลให้ λ_{avg} สูงกว่า λ_ϕ สามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

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

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนบทความขอขอบคุณนายอภิเดช ปากสวัสดิ์, นายชชิต ปั้นประสงค์ และ นายนัทวุฒิ สดมพฤกษ์ นักศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดลองเก็บข้อมูล และขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ได้ให้การสนับสนุนเงินทุนและสถานที่ในการศึกษาและปฏิบัติงานวิจัยในครั้งนี้จนทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kamiuto, K., Nakagawa, K., Echigo, R. Heseqawa, 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*, vol. 17(6), pp. 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*, vol. 3, pp. 373-381.

[4] Schotte, W. 1960. Thermal conductivities of packed beds, *AIChE Journal*, vol. 6, pp 63-67.



- [5] Graßmann, A. and Peters, F. (1999) Experimental investigation of heat conduction in wet sand, *Heat and Mass Transfer*, vol. 35, pp. 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*, vol. 125, pp. 693–702.
- [7] Chen, J. C. and Churchill, S. W. (1963). Radiant heat transfer in packed beds, *AIChE Journal*, vol. 9, pp. 35-41.
- [8] Chan, C. K. and Tien, C. L. (1974). Radiative transfer in packed spheres, *ASME Journal of Heat Transfer*, vol. 96, pp 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*, vol. 7(3), pp. 496-501.
- [10] 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.
- [11] Bahrami, M., Yovanovich, M.M. and Culham, J.R. (2006). Effective thermal conductivity of rough spherical packed beds, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, pp. 3691-3701.
- [12] Anter Corporation. (2007). Principal Methods of Thermal Conductivity Measurements. <http://www.anter.com/TN67.htm>.
- [13] Cengel, Y.A. (2006). *Heat and Mass Transfer (3rd ed.)*, New York: McGraw Hill.
- [14] สมชาย วงศ์วิเศษ. (2541). การออกแบบการหาสภาพที่เหมาะสมที่สุดทางความร้อน, กรุงเทพฯ: โครงการส่งเสริมการสร้างตำรา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.