การพาความร้อนในท่อที่มีครีบเกลียวสอดอยู่ภายใน

Convection Heat Transfer in a Circular Tube with Helical Coils Inserted

*อนุสรณ์ ชินสุวรรณ (Anusorn Chinsuwan)**

บทคัดย่อ

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะหาสมการความสัมพันธ์ของการพาความร้อนสำหรับท่อที่มีครีบเกลียวหน้าตัดกลมที่เป็นฉนวนทางความร้อนสอดอยู่ภายใน โดยมีจำนวนครีบเป็น 4, 6 และ 8 ครีบ และระยะช่วงครีบ (pitch) เป็น 2, 3 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ การให้ความร้อนที่ผิวท่อเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ การทดลองทำในช่วง $4000 < Re < 20000$ โดยใช้อากาศเป็นตัวกลางความร้อน ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่า ทั้งจำนวนครีบและระยะช่วงครีบ (pitch) มีอิทธิพลต่อการพาความร้อนที่เกิดขึ้น จากผลดังกล่าวได้นำมาสร้างความสัมพันธ์ของการพาความร้อนที่อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของค่าตัวเลขนัสเสลท์ Nu (Nusselt Number) ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ Re (Reynolds Number) จำนวนครีบเกลียว และอัตราส่วนระหว่างระยะช่วงครีบ (pitch) กับขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ

Abstract

The purpose of this research was to develop the correlation of convection heat transfer in a circular tube with helical coils inserted. The coils had a circular cross section and were thermal insulation. The number of inserted coils was 4, 6 and 8 and the coil pitches were 2, 3 and 5 times of tube diameter. Constant wall temperature was the thermal condition at tubes surface. The experiments were conducted in the region $4000 < Re < 20000$ with using atmospheric air as a heat transfer media. The experimental results show that both number of coils and coil pitch have the effects on the heat transfer coefficient. Correlation of convection heat transfer was developed in the correlation of Nusselt number (Nu), Reynolds number (Re), number of coil and the ratio of coil pitch to tube diameter.

คำสำคัญ : การพาความร้อนภายในท่อ ท่อครีบเกลียว

Keywords : Convection in a Tube, Tube with Helical Coil inserted

* *ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น*

บทนำ

เพื่อที่จะทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กลง และมีอัตราส่วนของอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนต่อพื้นแลกเปลี่ยนความร้อนสูงแล้ว ท่อที่นำมาใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะต้องให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) สูง ซึ่งผลตามมาก็คือ จะทำให้ได้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีน้ำหนักเบา ขนาดเล็กลง นอกจากนั้นแล้วยังส่งผลทำให้ต้นทุนในการผลิตเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลงอีกด้วย

ในปัจจุบันนั้นได้มีการวิจัยกันอย่างกว้างขวางเพื่อหาท่อที่มีลักษณะที่สามารถให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่สูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น ท่อมีมีครีบเกลียวภายใน ท่อที่มีครีบภายนอก อย่างไรก็ตามท่อดังกล่าวนั้นมีราคาที่สูงมากและไม่สามารถผลิตได้ในประเทศไทย ดังนั้น งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้ทำการศึกษาการส่งเสริมการพาความร้อนที่เกิดขึ้นโดยวิธีการนำอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นครีบเกลียวที่มีหน้าตัดวงกลมและเป็นฉนวนทางความร้อนสอดเข้าภายในท่อผิวเรียบธรรมดา ทั้งนี้เพื่อต้องการศึกษาถึงเฉพาะผลของครีบเกลียวที่มีผลต่อการพาความร้อนที่เกิดขึ้นโดยไม่มีอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนที่ครีบเกลียวมาเกี่ยวข้อง

Kakac at al. [1990] ได้ทำการสำรวจเพื่อรวบรวมงานขอบข่ายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพาความร้อนภายในท่อที่มีครีบเกลียวอยู่ภายในไว้ดังนี้ A.P. Watkinson ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu ของการไหลภายในท่อที่มีครีบเกลียวอยู่ภายใน (internally finned tubes) โดยใช้น้ำมันที่มีค่าตัวเลขแพรนดัล (Prandtl Number) Pr ในช่วง $180 < Pr < 350$ เป็นตัวกลางในการพาความร้อน ทำการทดลองในช่วงค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ในช่วง $50 < Re < 3000$ และการให้ความร้อนที่ผิวเป็นแบบอุณหภูมิคงที่ (constant wall temperature) W.J. Marner and A.E. Bergles ได้ทำการทดลองหาค่า Nu ของการไหลภายในท่อที่ครีบตรงตามแนวแกนท่อจำนวน 16 ครีบ โดยที่ตัวกลางในการพาความร้อน และการไหลมีค่าตัวเลขแพรนดัล (Prandtl Number) Pr และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re อยู่ในช่วง $24 < Pr < 85$ และตามลำดับ การทดลองทำทั้งสภาพการให้ความร้อนและการให้ความเย็น M.H. Soliman ได้ทำการวิเคราะห์การพาความร้อนในท่อเกลียวที่มีการไหลแบบลามินาร์ (laminar) ในช่วงที่รูปร่างการแจกแจงความเร็วและอุณหภูมิคงตัวแล้ว (fully developed laminar flow) โดยมีมุมเอียงของเกลียว (helix angle) ในช่วง $1.5^\circ < \alpha < 3^\circ$ T.C. Carnavos ได้ทำการทดลองและเก็บข้อมูลเพื่อหาสมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu กับ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re โดยที่ตัวกลางในการพาความร้อนมีค่าตัวเลขแพรนดัล (Prandtl Number) Pr ในช่วง $0.6 < pr < 30$ และ ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ในช่วง $10000 < Re < 60000$ Yampolsky ได้ทำการทดลองการพาความร้อนภายในท่อที่มีผิวเป็นลอน(corrugate) ที่มีมุมเอียงของลอนเป็น 30°

การวิจัยในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re สำหรับที่ท่อที่มีครีบเกลียวที่เป็นฉนวนทางความร้อนสอดอยู่ภายใน โดยมีจำนวนครีบ n เป็น 4, 6 และ 8 ครีบ และระยะช่วงครีบ (pitch) p เป็น 2, 3 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ การให้ความร้อนที่ผิวท่อเป็นแบบอุณหภูมิ การวิจัยจะทำในช่วง $4000 < Re < 20000$ และใช้อากาศเป็นตัวกลาง

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์มิติ

หากกำหนดให้ h, ρ, μ, k, u_m, c_p, d, p และ n แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (heat transfer coefficient) ความหนาแน่นของของไหลที่ไหลภายในท่อ ความหนืดของของไหล สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล (thermal conductivity) ความเร็วเฉลี่ยของของไหลที่ไหลในท่อ ความร้อนจำเพาะของ

ของไหลที่ไหลในท่อ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ ระยะช่วงครีบ และจำนวนของครีบ ตามลำดับแล้ว พบว่า

$$h = f\left[\rho, \mu, k, u_m, d, p, n\right] \qquad (1)$$

จากสมการที่ (1) สามารถนำมาทำการวิเคราะห์มิติแล้ว (Webb, 1994) จะได้

$$\mathrm{Nu} = f\left[\mathrm{Re}, \mathrm{Pr}, \frac{p}{d}, n\right] \qquad (2)$$

เมื่อ $\mathrm{Nu} = hd/k$, $\mathrm{Pr} = \mu c_p/k$ และ $\mathrm{Re} = \rho u_m D/\mu$ ซึ่งตัวแปรดังกล่าวถูกเรียกว่า ค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu และค่าตัวเลขแพรนตัล (Prandtl Number) Pr และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในการวิจัยในครั้งนี้จะศึกษาในกรณีที่ของไหลในท่อเป็นอากาศอย่างเดียวเท่านั้น ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการที่ (2) ได้เป็น

$$\mathrm{Nu} = f\left[\mathrm{Re}, \frac{p}{d}, n\right] \qquad (3)$$

จากผลของการวิเคราะห์มิติที่ได้ดังสมการที่ (3) นี้ จะส่งผลทำให้สามารถออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ได้ ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อต่อไปนี้

ความสัมพันธ์ของทฤษฎีกับการทดลอง

เมื่อพิจารณาการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อทดสอบ หากกำหนดให้ L, $T_{a,i}$, $T_{a,o}$ และ T_s เป็นความยาวของท่อทดสอบ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่เข้าท่อทดสอบ อุณหภูมิเฉลี่ยของอากาศที่ออกจากท่อทดสอบ และอุณหภูมิเฉลี่ยของผิวท่อ ตามลำดับแล้ว

$$h\pi dL\Delta T_{\ln} = \rho u_m \frac{\pi}{4} d^2 c_p \left[T_{a,o} - T_{a,i}\right] \qquad (4)$$

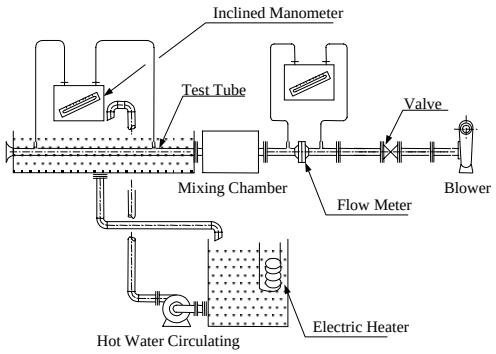
เมื่อ $$\Delta T_{\ln} = \frac{T_{a,o} - T_{a,i}}{\ln \dfrac{T_s - T_{a,i}}{T_s - T_{a,o}}}$$

ดังนั้น $$h = \frac{\rho u_m d c_p \ln\left[\dfrac{T_s - T_{a,i}}{T_s - T_{a,o}}\right]}{4L} \qquad (5)$$

หรือ $$\mathrm{Nu} = \frac{hd}{k} = \frac{\rho u_m d^2 c_p \ln\left[\dfrac{T_s - T_{a,i}}{T_s - T_{a,o}}\right]}{4kL} \qquad (6)$$

อุปกรณ์และวิธีวิจัย

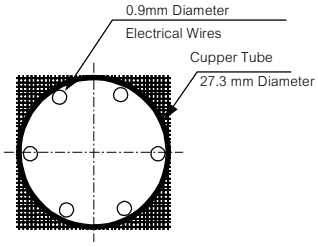
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีการจัดเรียงเป็นดังรูปที่ 1



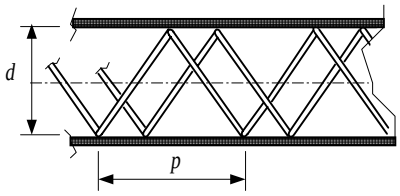
รูปที่ 1 การจัดเรียงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

อากาศจะไหลผ่านท่อทดสอบได้โดยอาศัยการทำงานของพัดลม (blower) ที่ติดตั้งอยู่ในส่วนท้ายของอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง เพื่อลดการปั่นป่วนที่อาจเกิดขึ้นจากการหมุนวนของใบพัดของพัดลม ท่อทดสอบจึงทำการติดตั้งโดยต่อเข้ากับด้านดูดของพัดลม ท่อปากแตรได้นำมาติดตั้งไว้บริเวณปากทางเข้าของท่อทดสอบ ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความไม่สม่ำเสมอของความเร็วของอากาศที่บริเวณปากทางเข้าของท่อทดสอบ อากาศที่ไหลผ่านท่อทดสอบจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกับผิวของท่อทดสอบที่ทำด้วยทองแดงที่แช่อยู่ในน้ำที่มีอุณหภูมิ $70^{\circ}C$ จากนั้นจะไหลเข้ากล่องผสม(mixing chamber) ออกสู่มาตรวัดอัตราการไหล ผ่านสู่วาล์วปรับอัตราการไหล และเข้าสู่พัดลมในที่สุด รายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์เป็นดังนี้

ท่อทดสอบเป็นท่อทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 27.3 มิลลิเมตร ความหนาตามมาตรฐานของท่อทองแดงชนิด L (type L) ยาว 125 เซนติเมตร โดยมีสายไฟฟ้าที่มีฉนวนหุ้มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.9 มิลลิเมตร ทำเป็นเกลียวโดยพันรอบกับแบบที่เป็นท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อทองแดง 3 มิลลิเมตร (22 มิลลิเมตร) แล้วสอดลวดเกลียวสร้างขึ้นเข้าภายในท่อทดสอบ หลังจากนั้นจึงดึงแบบที่เป็นท่อออก ลักษณะของท่อทดสอบที่เสร็จแล้วเป็นดังรูปที่ 2 และ รูปที่ 3



รูปที่ 2 ภาพตัดตามขวางของท่อทดสอบ

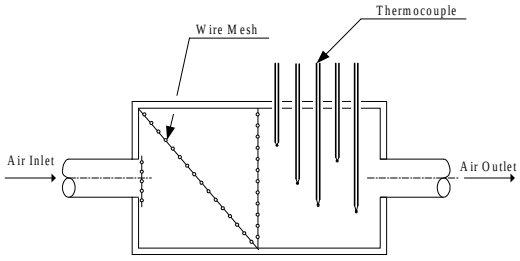


รูปที่ 3 ภาพตัดตามยาวของท่อทดสอบ (แสดงครีบเกลียวเพียงสองเส้นเท่านั้น)

ขดลวดความร้อนไฟฟ้าขนาด 6000*W* ถูกใช้เป็นแหล่งให้ความร้อนแก่น้ำในอ่างผลิตน้ำร้อน น้ำร้อนที่ผลิตถูกควบคุมให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 70 ˚*C* ด้วยการทำงานของเทอร์โมสตาร์ท น้ำร้อนจะไหลวนจากอ่างผลิตน้ำร้อนไปยังอ่างน้ำร้อนที่แช่ท่อทดสอบแล้วไหลวนกลับด้วยการทำงานของเครื่องสูบน้ำขนาด 1/2 *hp*

ทองแดงเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่สูงและท่อที่ใช้บางมาก จึงสามารถประมาณได้ว่าอุณหภูมิของผิวท่อด้านในมีค่าใกล้เคียงกับผิวด้านนอกมาก ดังนั้น อุณหภูมิเฉลี่ยของผิวด้านในท่อสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกท่อทดสอบที่บริเวณทางเข้า กึ่งกลาง และที่ทางออกของท่อทดสอบ

เนื่องจากอุณหภูมิของอากาศที่ออกจากท่อทดสอบที่บริเวณใกล้ ๆกับผิวท่อและบริเวณที่อยู่ไกลจากผิวท่อออกมาตามแนวรัศมีนั้นมีค่าต่างกันมาก ดังนั้น จึงจำเป็นต้องให้อุณหภูมิดังกล่าวเกิดการผสมกันก่อนทำการวัดหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ย ในการวิจัยครั้งนี้จึงใช้กล่องผสม (mixing chamber) ทำด้วยไม้อัดหนา 10 มิลลิเมตร มีขนาดความกว้าง ยาว และสูงเป็น 15, 30 และ 10 เซ็นติเมตร ตามลำดับ ภายนอกหุ้มด้วยฉนวนใยแก้วหนา 2 นิ้ว มีตะแกรงลวดขนาดความกว้างของช่อง 10 มิลลิเมตร ติดตั้งขวางการไหลของอากาศที่บริเวณช่องทางเข้า บริเวณแนวกึ่งกลางของกล่อง และขวางในแนวทะแยงจากขอบบนของกล่องด้านทางเข้าสู่พื้นด้านล่างบริเวณกึ่งกลางของกล่อง ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 กล่องผสม

การวัดอัตราการไหลของอากาศที่ผ่านท่อทดสอบในการวิจัยในครั้งนี้ใช้แผ่นออริฟิส (orifice plate) แบบวัดผลต่างความดันที่ D และ D/2 ซึ่งสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ISO 5167-1 (International Organization for Standardization, 1991)

หลังจากตรวจความเรียบร้อยของเครื่องมือแล้ว ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนดังต่อไปนี้ เปิดเครื่องสูบน้ำ ปรับวาล์วที่ด้านส่งของเครื่องสูบและวาล์วที่ระบายน้ำออกจากอ่างน้ำที่ท่อทดสอบแช่อยู่จนกระทั่งระดับในอ่างดังกล่าวอยู่สูงกว่าผิวท่อประมาณ 2 นิ้ว เปิดขดลวดทำความร้อน โดยตั้งอุณหภูมิที่เทอร์โมสตัทไว้ที่ 70 ˚*C*

รอจนกระทั่งอุณหภูมิที่ผิวท่อทุกจุดคงที่ ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 2 ชั่วโมง เปิดพัดลมโดยวาล์วควบคุมการไหลของอากาศอยู่ที่ตำแหน่งเปิดสุด แล้วปรับให้ได้อัตราการไหลตามต้องการ รอจนกระทั่งอุณหภูมิของผิวท่อ และอุณหภูมิที่กล่องผสมมีค่าคงที่ บันทึกผลต่างความดันที่คล่อมแผ่นออริฟิส ผลต่างความดันที่ท่อทดสอบ อุณหภูมิของผิวท่อ อุณหภูมิที่กล่องผสม และอุณหภูมิที่ทางเข้าท่อทดสอบ ลดอัตราการไหลของอากาศที่เข้าท่อทดสอบลงโดยการปรับวาล์วควบคุมการไหลของอากาศตามที่ต้องการ รอจนกระทั่งอุณหภูมิทุกจุดมีค่าคงที่ แล้วทำการบันทึกผลที่ค่าอัตราการไหลต่าง ๆ ที่ต้องการ

ผลการวิจัย

การวิจัยนั้นได้ทำการทดลองเพื่อหาข้อมูลของการพาความร้อนภายในท่อทั้งท่อเรียบและท่อที่มีครีบเกลียวสอดอยู่ภายใน

ผลของการพาความร้อนของท่อเรียบที่ได้จากการวิจัยเมื่อเทียบกับสมการทำนายผลค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu ของ Colburn (Ozisik, 1985) ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็น

$$\mathrm{Nu} = 0.023\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \qquad (7)$$

เป็นดังรูปที่ 5 จากข้อมูลที่ได้พบว่า ค่าตัวเลขนัสเสลท์มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดและเฉลี่ยเป็น -16.3% และ 17% ตามลำดับ

ผลของการพาความร้อนภายในท่อที่มีครีบเกลียวสอดอยู่ภายในที่มีความยาวของระยะช่วงครีบ (pitch) p เป็น 2, 3 และ 5 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์ มีจำนวนของครีบเกลียว n เป็น 4, 6 และ 8 เส้น โดยมีการรักษาอุณหภูมิที่ผิวท่อให้คงที่และใช้อากาศเป็นตัวกลางในการพาความร้อน เป็นไปดังรูปที่ 5 ถึงรูปที่ 7 โดยที่ ตัวเลขตามหลัง ***N*** และ ***P*** ของคำอธิบายสัญลักษณ์ในกราฟแสดงผล เป็นตัวเลขระบุจำนวนครีบเกลียวในท่อ และระยะช่วงของเกลียวตามลำดับ เช่น ***N4P2D*** หมายถึง ภายในท่อมีครีบเกลียวจำนวน 4 เส้น และมีระยะช่วงเกลียวเป็น 2 เท่าของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง หากนำผลที่ได้จากการวิจัยไปเปรียบเทียบผลที่ได้จากสมการที่ (7) แล้ว จะเป็นไปดังรูปที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ท่อที่มีครีบเกลียวสอดอยู่ภายในจะให้ค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu ที่สูงกว่าท่อเรียบเสมอสำหรับการไหลในช่วง $4000 < \mathrm{Re} < 20000$ โดยทั้งระยะช่วงครีบ (pitch) p และจำนวนครีบ n นั้นมีอิทธิกับการพาความร้อนที่เกิดขึ้นโดยการพาความร้อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะช่วงครีบ (pitch) p และจำนวนครีบ n น้อย ๆ

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ที่ได้จากการทดลองแล้ว พบว่าความสัมพันธ์ดังกล่าว เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$\mathrm{Nu} = 0.00314\,\mathrm{Re}^{1.074} \qquad (8)$$

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (8) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว จะเป็นดังรูปที่ 7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์นี้มีความสอดคล้องกับผลการทดลองค้อนข้างดี อย่างไรก็ตาม หากคำนึงถึงอิทธิพลของจำนวนครีบเกลียว และอัตราส่วนของระยะของช่วงครีบ(pitch) ต่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ p/d ที่มีผลต่อค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu แล้ว จะได้ความสัมพันธ์ ดังต่อไปนี้

$$\mathrm{Nu} = 0.0071\,\mathrm{Re}^{1.071}\,n^{-0.285}\,(p/d)^{-0.254} \qquad (9)$$

เมื่อนำความสัมพันธ์ดังสมการที่ (9) นี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง ดังรูปที่ 8 พบว่า ความสัมพันธ์นี้มีความสอดคล้องกับผลที่ได้จากการทดลองมากกว่าความสัมพันธ์ตามสมการที่ (8)

สรุปและวิจารณ์ผล

ในการวิจัยครั้งนี้ พบว่า ทั้งจำนวนครีบและระยะช่วงครีบ (pitch) p ของครีบเกลียวที่เป็นฉนวนที่สอดเข้าในท่อเรียบนั้นมีผลต่อการพาความร้อนที่เกิดขึ้นภายในท่อโดยมีความสัมพันธ์ของการพาความร้อนเป็นไปตามสมการที่ (9) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับตัวกลางการพาความร้อนที่เป็น

อากาศที่การไหลอยู่ในช่วง โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดและเฉลี่ยเป็น -16.3% และ 17% ตามลำดับ

ผลของการวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการส่งเสริมการพาความร้อนภายในท่อเรียบได้โดยเพียงสอดครีบเกลียวที่เป็นฉนวนเข้าไปในท่อ ซึ่งครีบดังกล่าวอาจจะทำมาจากวัสดุที่หาได้ทั่วไปที่สามารถทนความร้อนได้ อย่างเช่น วัสดุที่เป็นเครื่องปั้นดินเผา เป็นต้น

อนึ่ง การสอดครีบเกลียวเข้าไปในท่อเรียบนี้จะทำให้เกิดความดันลดเพิ่มขึ้น ดังนั้น ในการนำการส่งเสริมพาความร้อนวิธีนี้ไปใช้ จึงต้องมีการเผื่อกำลังของพัดลมสำหรับความดันลดที่เพิ่มในส่วนนี้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้เป็นส่วนหนึ่งของ โครงการวิจัยการพาความร้อนภายในท่อที่มีครีบเกลียวอยู่ภายใน ซึ่งได้รับทุนวิจัย ประเภทอุดหนุนทั่วไป จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น ประจำปีงบประมาณ 2543 ผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

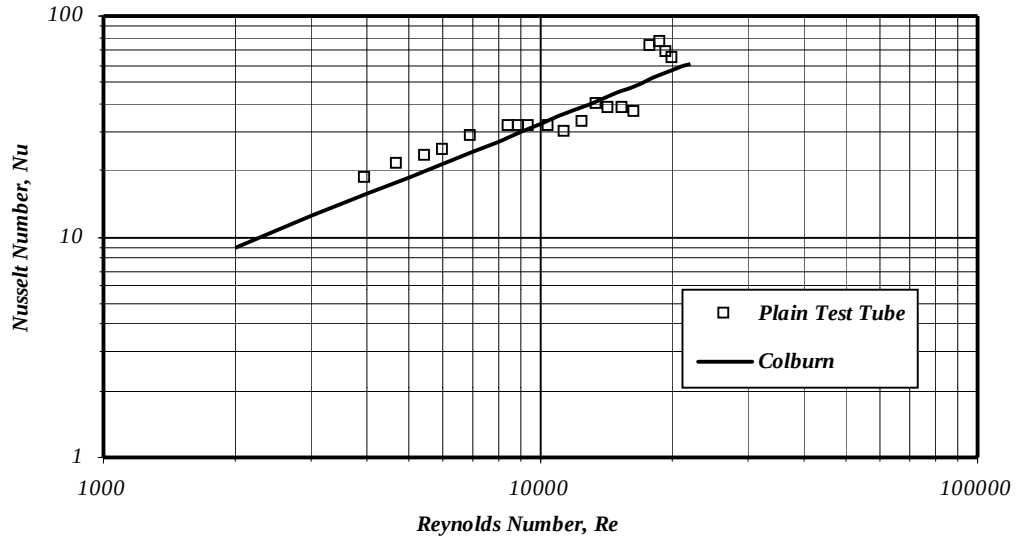
เอกสารอ้างอิง

Kakac, S., Shah R.K., and Aung W.. 1990. **Hand Book of Single-Phase Heat Transfer**. New York: John Wiley & Sons.

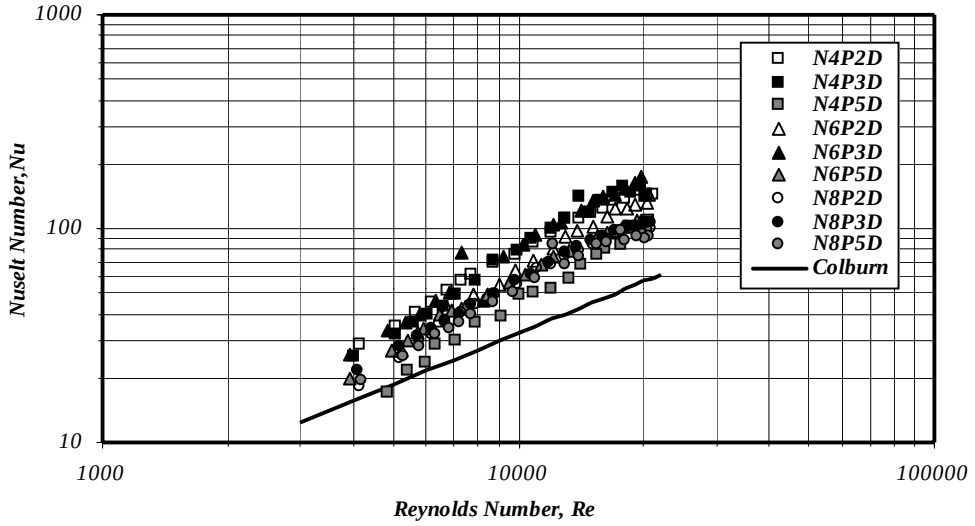
International Organization for Standardization. 1991. **Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure differential devices, Part 1**.

Ozisik, M.N.. 1985. Heat Transfer. McGraw-Hill

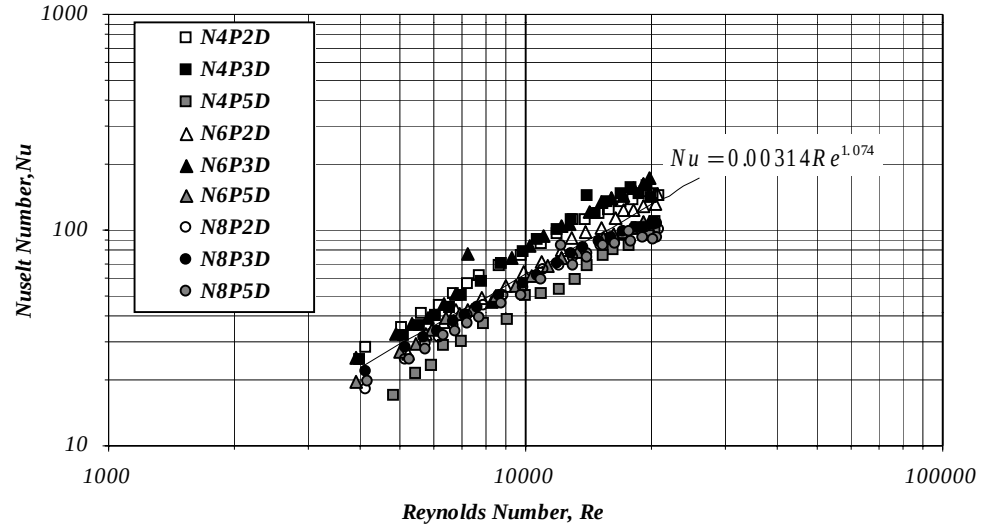
Webb, R.L., 1994. **Principles of Enhanced Heat Transfer**. New York: John Wiley & Sons.



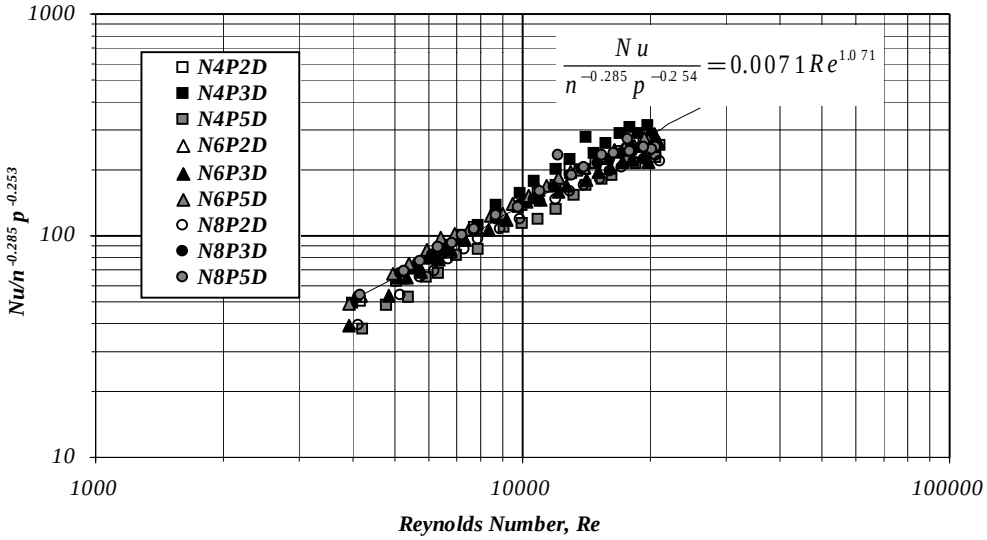
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการของ Colburn



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu และค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number) Re ที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการทดลองและสมการทำนายค่าตัวเลขนัสเสลท์(Nusselt Number) Nu ที่ได้



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบเส้นโค้งความสัมพันธ์ของตัวเลขนัสเสลท์ (Nusselt Number) Nu กับข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยที่ $P = (p/d)$