

ค่าแก้ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของฟิล์มที่เกิดจากการควบแน่นทางทฤษฎี สำหรับการประยุกต์ใช้ฟิล์มของน้ำป้องกันความร้อน

Correction Factor of Film wise Condensation Heat Transfer Theoretical Coefficient for Application of Heat Protection by Using Water Film

พิสิษฐ์ เพชรคง และ สัมพันธ์ ไชยเทพ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทร 053-942004, โทรสาร 053-941352, E-mail sumpun@eng.cmu.ac.th

Pisit PETKONG and Sumpun CHAITEP

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Chiang Mai University 50200, Thailand

Tel. 053-942004, Fax. 053-941352, E-mail sumpun@eng.cmu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อใช้ค่าแก้สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากทฤษฎีการไหลแบบราบเรียบของฟิล์มของน้ำเพื่อประยุกต์ใช้ฟิล์มของน้ำในทางป้องกันความร้อน ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากผลการทดสอบเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากทฤษฎีพบว่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในช่วงของการทดสอบ ค่าแก้เป็นตัวไร้หน่วยซึ่งสร้างจากความสัมพันธ์ของตัวแปรทางด้านการถ่ายเทความร้อน พบว่า การทำนายค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดสอบโดยใช้สมการของฟิล์มของน้ำร่วมกับค่าแก้ให้ผลที่แม่นยำตลอดช่วงขอบเขตของการทดสอบ โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 10 เปอร์เซ็นต์

ABSTRACT

This study was to apply a correction factor of Nusselt's laminar flow on a vertical plate for film wise condensation heat transfer theoretical coefficient in order to use a water film as heat protection. The heat transfer coefficient from testing data in some scope of study agreed well with the predicted Nusselt's equation. The correction factor was dimensionless created from parameter of heat transfer relation. It was found that, the prediction of heat transfer coefficient obtained from Nusselt's equation and the correction factor agreed well within the scope of study and the average errors were not more than 10% .

1. บทนำ

จากการที่มีการใช้ฟิล์มของไหลเพื่อป้องกันความร้อนในหลายลักษณะของงานทางด้านวิศวกรรมยานยนต์ เช่น เครื่องยนต์กังหันก๊าซ ระบบขับเคลื่อนของเครื่องยนต์จรวด [4] และอื่นๆ ฟิล์มของน้ำซึ่งเป็นของไหลที่หาได้ง่ายและราคาถูกก็มีคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนเช่นกัน [1] และจากทฤษฎีการไหลแบบราบเรียบอย่างอิสระในแนวตั้งของฟิล์มของน้ำสำหรับฟิล์มของเหลวที่เกิดจากการควบแน่นแบบราบเรียบที่วางในแนวตั้งสามารถที่จะนำมาอธิบายพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนได้ในช่วงหนึ่งของการทดสอบ [2] เพื่อให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ได้จากการคำนวณจากสมการของฟิล์มของน้ำสามารถนำไปสู่การประยุกต์ใช้ฟิล์มของน้ำเพื่อป้องกันความร้อนในทางวิศวกรรมจึงต้องสร้างสมการของค่าแก้เพื่อใช้ร่วมกับสมการของฟิล์มของน้ำในการทำนายคุณสมบัติต่างๆทางด้านการถ่ายเทความร้อนของฟิล์มของน้ำ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การไหลแบบราบเรียบของฟิล์มที่เกิดจากการควบแน่นบนแผ่นเรียบที่วางในแนวตั้ง

ลักษณะของการควบแน่นของไอน้ำเกิดเป็นฟิล์มของเหลวบนแผ่นเรียบที่วางในแนวตั้ง [3] ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งจะได้สมการชั้นขีดผิวของฟิล์มควบแน่นดังนี้

$$\frac{\partial u_L}{\partial x} + \frac{\partial v_L}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u_L \frac{\partial u_L}{\partial x} + v_L \frac{\partial u_L}{\partial y} = \frac{(\rho_L - \rho)g}{\rho_L} + \nu_L \frac{\partial^2 u_L}{\partial y^2} \quad (2)$$

และ
$$u_L \frac{\partial T_L}{\partial x} + v_L \frac{\partial T_L}{\partial y} = \alpha_L \frac{\partial^2 T_L}{\partial y^2} \quad (3)$$

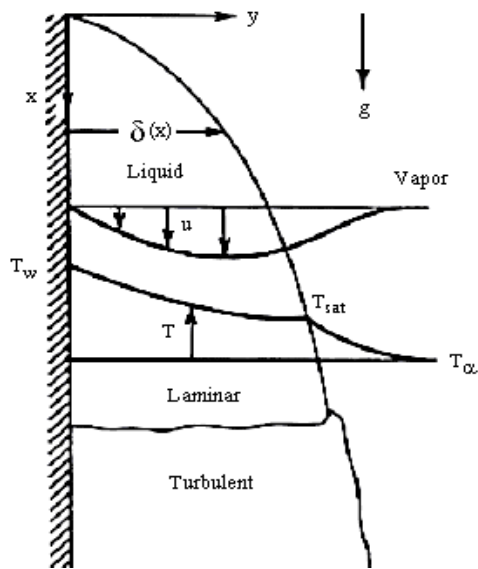
ที่ $y = \delta$ จะได้

$$\rho_L \left(v_L - u_L \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) = \rho \left(v - u \frac{\partial \delta}{\partial x} \right)$$

$$-k_L \left(\frac{\partial T_L}{\partial y} - \frac{\partial T_L}{\partial x} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) = -k \left(\frac{\partial T}{\partial y} - \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) - h_{fg} \rho_L \left(v_L - u_L \frac{\partial \delta}{\partial x} \right)$$

จะได้ว่า
$$\mu_L \frac{\partial u_L}{\partial y} = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, u_L = u, \text{ และ } T_L = T_s$$

ที่ $y = 0$ $u_L = 0, v_L = 0, \text{ และ } T_L = T_w$



รูปที่ 1 ลักษณะของการควบแน่นของไอน้ำเกิดเป็นฟิล์มของเหลวบนแผ่นเรียบที่วางในแนวตั้ง

สมมติว่าไอน้ำเป็นไออ้อมตัว และไม่มีแรงเฉือนระหว่างชั้นของของไหล ทำให้ไม่ต้องคิดการกระจายของอุณหภูมิ และความเร็วของไอ จะได้ ความหนาของฟิล์มทางทฤษฎี [3]

$$\delta = 2^{\frac{1}{2}} \left[1 - \frac{1}{4} \frac{C_{PL}(T_S - T_W)}{h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}} \left[\frac{x(T_S - T_W) \nu_L k_L}{g h_{fg} (\rho_L - \rho)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

และ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนทางทฤษฎี [3]

$$h = \frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} k \left[\frac{g(\rho_L - \rho) P_r}{x \rho_L \nu_L^2} \frac{h_{fg}}{C_P(T_S - T_W)} \right]^{\frac{1}{4}} K \quad (5)$$

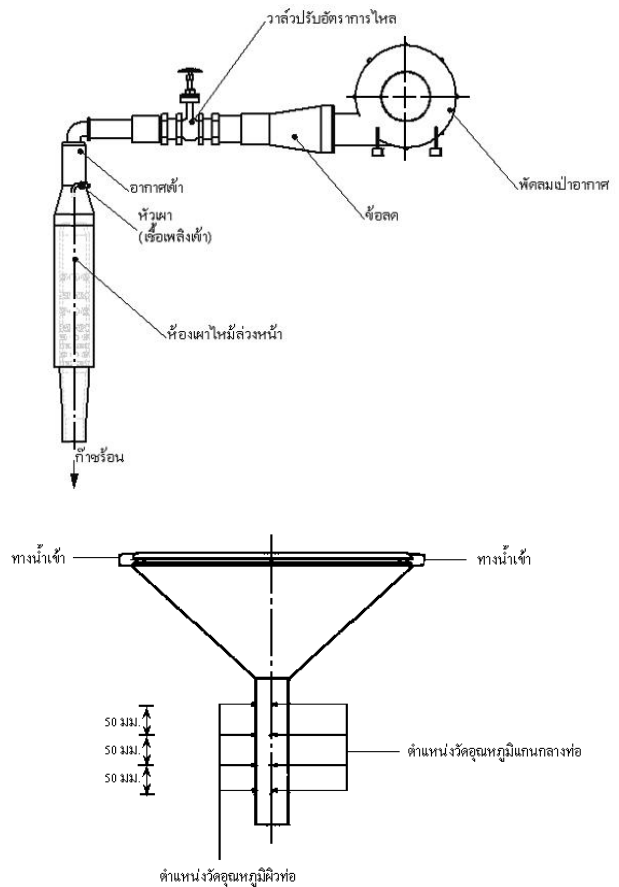
โดยที่

$$K \approx \left[1 + \frac{\frac{3}{4} C_{PL}(T_S - T_W)}{h_{fg}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ

ชุดทดสอบการป้องกันความร้อนโดยใช้ฟิล์มของน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาวะการเคลื่อนที่ของก๊าซร้อนผ่านท่อในแนวดิ่ง จากด้านบนสู่ด้านล่าง โดยมีฟิล์มของน้ำเป็นตัวกั้นเพื่อแยกก๊าซร้อนออกจากผนังของท่อ โดยมีส่วนประกอบหลักๆ ของอุปกรณ์ 2 ส่วน คือ ห้องเผาไหม้ล่วงหน้า (Pre-Combustion Chamber) ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งเป็นส่วนที่มีการสันดาปของเชื้อเพลิง (ก๊าซหุงต้มกับอากาศ) เพื่อให้กำเนิดก๊าซร้อน ซึ่งจะถูควบคุมอุณหภูมิโดยการปรับอัตราส่วนระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง โดยก๊าซร้อนที่เกิดขึ้นในส่วนนี้จะเคลื่อนที่จากด้านบนสู่ด้านล่างอันเนื่องมาจากความแตกต่างของความดันในส่วนห้องเผาไหม้ด้านบน กับทางออกด้านล่าง



รูปที่ 3 ชุดสร้างฟิล์มของน้ำและท่อทดสอบ

อุปกรณ์ส่วนที่ 2 คือ ชุดสร้างฟิล์มของน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3. ทำงานโดยการปล่อยให้น้ำตกลงบนด้านในของส่วนที่เป็นรูปกรวย และไหลเป็นฟิล์มของน้ำลงสู่ด้านล่างของกรวย โดยด้านล่างของกรวยจะประกอบอยู่กับการต่อท่อลมซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอุณหภูมิในสองตำแหน่ง คือ ตำแหน่งผิวนอกของท่อจำนวน 4 จุด และตรงตำแหน่งแกนกลางของท่อ 1 จุด รวม 5 จุดต่อระดับตามแนวดิ่ง 1 ระดับ ซึ่งระดับที่ใช้วัดค่าอุณหภูมิในแนวดิ่งมีทั้งหมด 4 ระดับ โดยห่างกันระดับละ 5 เซนติเมตร รวมจุดวัดอุณหภูมิทั้งสิ้น 20 จุด



รูปที่ 4 ชุดอุปกรณ์ทดสอบ

3.2 วิธีการทดสอบ

3.2.1 ติดตั้งเครื่องมือวัดและอุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับชุดทดสอบการป้องกันความร้อนโดยใช้ฟิล์มของน้ำ ดังรูป 4

3.2.2 ทำการทดสอบ วัดค่าตัวแปรต่างๆ

3.2.3 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

1) สมการคำนวณค่าความหนาของฟิล์มจากผลการทดสอบซึ่งได้จากจากกฎทรงมวล $Q_f = v_f A_f$

v_f คือความเร็วของฟิล์มคำนวณจากสมการเบอร์นูลลีโดยตำแหน่งที่ 1 คือ ตรงรูปสอยน้ำลงไปเป็นฟิล์มตำแหน่งที่ 2 คือจุดวัดอุณหภูมิ จะได้ว่า

$$Q_f = [\sqrt{v_1 + 2g(z_1 - z_2)}] A_f$$

และ $A_f = \pi D_i t$

ซึ่งจะได้ความหนาของฟิล์ม (t) คือ

$$t = \frac{Q_f}{[\sqrt{v_1 + 2g(Z_1 - Z_2)}] \pi D_i} \quad (7)$$

2) สมการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน $q_g = q_w$

$$\text{หรือ } \dot{m}_g c_{pg} (T_{g,in} - T_{g,out}) = h A_C (T_S - T_W)$$

สุดท้ายจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากผลการทดสอบ

$$h = \frac{\rho_g V_g D_i (T_{g,in} - T_{g,out})}{4L(T_S - T_W)} \quad (8)$$

3) สมการคำนวณหาความต้านทานความร้อน

$$R = \frac{1}{h} \quad (9)$$

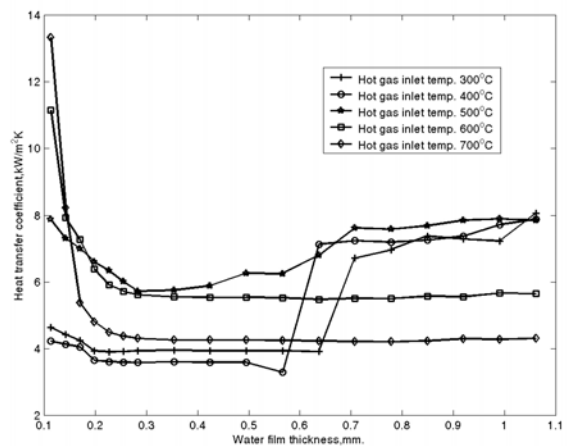
4) สมการคำนวณหาเลขเซลท์นัมเบอร์

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (10)$$

4. ผลการทดสอบ

ผลของความหนาของฟิล์มซึ่งคำนวณตามสมการ (7) ต่อสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งคำนวณตามสมการ (8) แสดงได้ในรูปที่ 5 พบว่า สำหรับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่ที่ 300°C และ 400°C เมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องสอดคล้องกับทฤษฎีของนัสเซลท์ซึ่งแสดงในรูปที่ 8 เนื่องจากฟิล์มของน้ำทำหน้าที่คล้ายกับฉนวนป้องกันการถ่ายเทความร้อนซึ่งยิ่งความหนาเพิ่มขึ้นก็จะยิ่งป้องกันได้ดีขึ้น จนถึงจุดหนึ่งก็จะเริ่มคงที่ โดยจะเริ่มคงที่ที่ค่าการถ่ายเทความร้อนต่ำสุดที่ความหนาของฟิล์มประมาณ 0.2 มิลลิเมตร โดยจะคงที่ไปจนกระทั่งความหนาของฟิล์มประมาณ 0.6 มิลลิเมตร แล้วหลังจากนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใด เนื่องจากฟิล์มของน้ำมีการแตกตัวกลายเป็นละอองน้ำ แล้วดูดซับความร้อนจากก๊าซร้อนออกไป และคงที่อีกครั้งเมื่อความหนาของฟิล์มมากกว่า 0.6 มิลลิเมตร สำหรับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า 500°C สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงค่าต่ำสุดประมาณ $4 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ที่ความหนาของฟิล์มประมาณ 0.3 มิลลิเมตร จากนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ประมาณ $7 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ที่ความหนาฟิล์มประมาณ 0.7 มิลลิเมตร

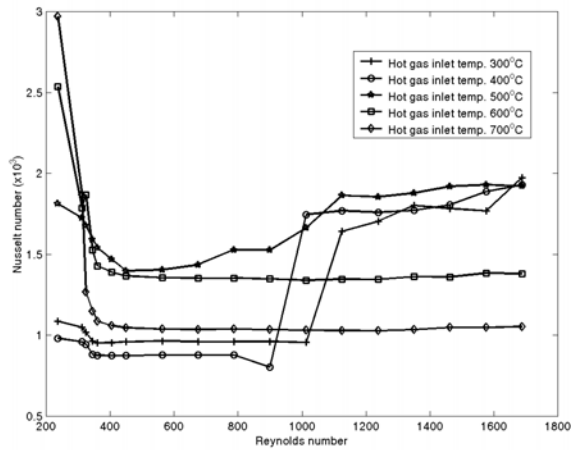
สำหรับอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่ที่ 600°C และ 700°C พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจะลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงค่าต่ำสุดและเริ่มคงที่ที่ความหนาฟิล์มประมาณ 0.3 มิลลิเมตร โดยไม่มีการเพิ่มขึ้นอีกครั้ง และ จากการที่พบว่าอุณหภูมิของก๊าซร้อนขาออกลดลงอย่างฉับพลันในช่วงเริ่มต้นพอที่จะตั้งสมมุติฐานได้ว่าฟิล์มของน้ำมีการแตกตัวเป็นละอองน้ำตั้งแต่เริ่มทดสอบ โดยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนต่ำสุดที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่ที่ 600°C และ 700°C ประมาณ $5.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ และ $4.3 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ตามลำดับ



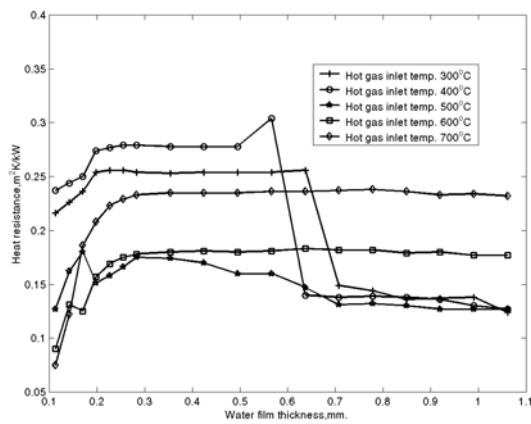
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์มกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่

ตัวแปรไร้มิติซึ่งแปรผันตรงกับความหนาของฟิล์ม คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ของฟิล์ม [3] กับตัวแปรไร้มิติซึ่งแปรผันตรงกับ

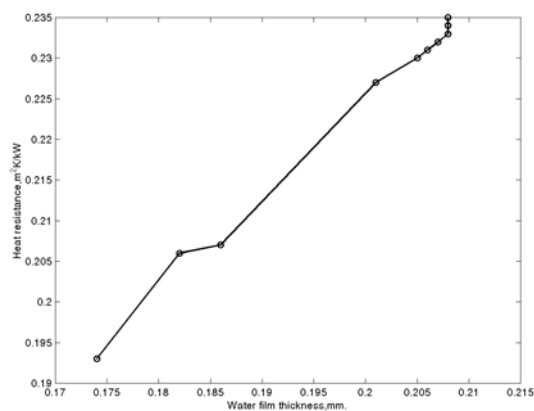
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน คือ นัสเซลท์นัมเบอร์ตามสมการที่ (10) นั้น มีความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 6



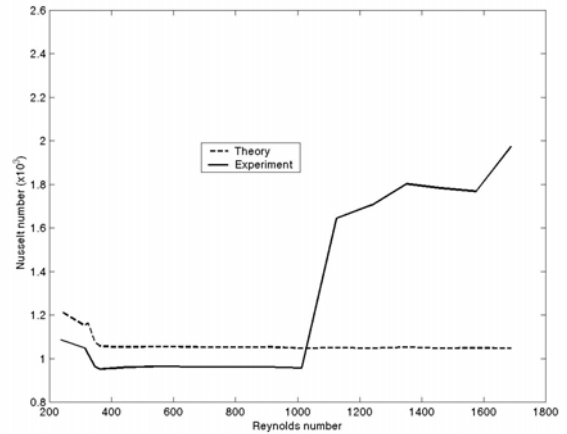
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของเรย์โนลด์นัมเบอร์ของฟิล์ม กับนัสเซลท์นัมเบอร์ที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์มกับความต้านทาน ความร้อนที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์มและความต้านทาน ความร้อนตามทฤษฎีของนัสเซลท์



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบนัสเซลท์นัมเบอร์จากทฤษฎีและการทดสอบ ที่อุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้าคงที่ 300°C

จากผลการเปรียบเทียบทฤษฎีของนัสเซลท์กับผลการทดสอบในช่วงอุณหภูมิก๊าซร้อนขาเข้า 300°C ถึง 450°C พบว่า ผลการทดสอบ สอดคล้องกับทฤษฎีของนัสเซลท์ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ของฟิล์ม 200-1,000 สำหรับช่วงที่ผลการทดสอบไม่สอดคล้องกับทฤษฎีของนัสเซลท์นั้น พบว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีการเปลี่ยนแปลง โดยเพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดเพราะอุณหภูมิขาออกของก๊าซลดลงอย่างฉับพลัน ทั้งนี้ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นไปได้ที่มีอนุภาคของน้ำ ผสมอยู่ในก๊าซร้อน หรือ ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจจะเกิดจากพฤติกรรมในการถ่ายเทความร้อนของของไหลเอง ซึ่งในการทดสอบไม่สามารถสังเกตเห็นได้ และเมื่อใช้ค่าแก้ (C) คูณกับค่าสัมประสิทธิ์จากสมการของนัสเซลท์ [3] เพื่อใช้ในการทำนายผล ซึ่งจะได้ว่า

$$h = \frac{1}{2^{\frac{1}{2}}} k \left[\frac{g(\rho_L - \rho) P_r}{x \rho_L \nu_L^2} \frac{h_{fg}}{C_p (T_s - T_w)} \right]^{\frac{1}{4}} KC$$

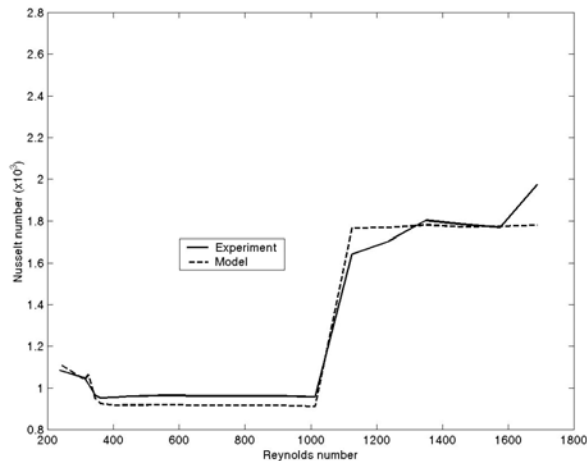
ในช่วง ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ระหว่าง 200 ถึง 1,000 นั้นฟิล์มยังไม่มี การแตกตัว สมการของค่า C จึงใช้ตัวแปรจากสมการที่ (6) ส่วนค่าคงที่ ได้มาจากการใช้วิธีการทางสถิติ จะได้ว่า

$$C = 1 - \left[C_{p,1} (T_s - T_w) / h_{fg} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{เมื่อ} \quad 200 < Re < 1,000$$

สำหรับช่วง ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 1,000 ขึ้นไปนั้น ฟิล์มมีการแตกตัวเป็นละอองน้ำ สมการของค่า C จึงใช้ $C_{p,s}$ แทน $C_{p,1}$ และ ใช้ อุณหภูมิขาออกของก๊าซร้อน ($T_{g,out}$) แทนอุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัว (T_s) ส่วนค่าคงที่ได้มาจากการใช้วิธีการทางสถิติ จะได้ว่า

$$C = 1.7 - \frac{5}{3} \left[C_{p,s} (T_{g,out} - T_w) / h_{fg} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{เมื่อ} \quad Re > 1,000$$

ผลของการใช้ค่าแก้คูณกับสมการของนัสเซลท์เพื่อทำนายผลจากการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบนัสเซลท์กับเรย์โนลด์สระหว่างผลการทดสอบกับค่าที่ได้จากสมการของนัสเซลท์คูณกับค่าแก้ที่อุณหภูมิทดสอบของก๊าซร้อนเข้าเครื่องที่ 300°C

5. สรุป

5.1 การเปรียบเทียบผลการทดสอบ กับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของการไหลแบบราบเรียบในแนวตั้งบนแผ่นแบนของฟิล์มที่เกิดจากไอควบแน่น พบว่า ผลการทดสอบที่อุณหภูมิก๊าซร้อนเข้าเครื่องที่ตั้งแต่ 300°C ถึง 450°C สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจากการทดสอบ สอดคล้องกับทฤษฎีในช่วงเรย์โนลด์สของฟิล์มตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 แต่ที่อุณหภูมิทดสอบเกิน 500°C ไม่สอดคล้อง

5.2 การทำนายผลการทดสอบโดยใช้ทฤษฎีของนัสเซลท์ ร่วมกับค่าแก้ (Correction Factor, C) ที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ของตัวแปรที่เกี่ยวข้องในกระบวนการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่สามารถใช้ได้ตลอดช่วงขอบเขตของเรย์โนลด์สของฟิล์มในการทดสอบ

6. วิจารณ์

6.1 การศึกษาการป้องกันความร้อนโดยใช้ฟิล์มของน้ำ ไม่ได้จำกัดอยู่ที่ฟิล์มของของไหลว่าจะต้องเป็นน้ำเท่านั้น แต่สามารถใช้กับฟิล์มของไหลชนิดอื่นก็ได้ ทั้งของเหลวและก๊าซ

6.2 อาจจะนำค่าที่ได้จากการทดสอบนี้ในช่วงเรย์โนลด์สของฟิล์มของน้ำ เรย์โนลด์สของก๊าซร้อน ที่ให้ค่าความต้านทานความร้อนที่เหมาะสม ไปใช้ในการออกแบบระบบป้องกันผนังที่รับความร้อนได้

6.5 ค่าแก้ที่ได้เมื่อใช้ร่วมกับสมการของนัสเซลท์จะให้ค่าที่สอดคล้องกับผลการทดสอบ เฉพาะในช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ทำการทดสอบ นอกเหนือจากนั้นอาจจะมีพฤติกรรมอย่างอื่น ทางอากาศพลศาสตร์ และอุณหพลศาสตร์ของของไหล ที่จะส่งผลให้มีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดสอบมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

บทความฉบับนี้ขอมอบคุณงามความดีทั้งหลายให้กับบุพพการีผู้ให้กำเนิด ณาจารย์ผู้ให้ความรู้ และ คุณสุณีย์ สงวนประสิทธิ์ ผู้คอยให้กำลังใจจนงานสำเร็จลงไปด้วยดี

สัญลักษณ์

A_f	พื้นที่หน้าตัดของฟิล์ม m^2
A_c	พื้นที่ที่มีการถ่ายเทความร้อนโดยการพา m^2
C_p	ค่าความจุความร้อนจำเพาะ kJ/kgK
D_i	เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน m
h	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน W/m^2K
h_{fg}	ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ kJ/kg
g	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก m/s^2
k	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ W/m^2K
L	ความยาว m
Pr	Prandtl number
R	ค่าคงที่สากลของแก๊ส $(8.314) kJ/kg.K$
Re	เรย์โนลด์ส นัมเบอร์
q_g	พลังงานความร้อนที่ลดลงของก๊าซร้อน kJ
q_w	พลังงานความร้อนที่ส่งผ่านมายังผนังท่อ kJ
Q_f	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของฟิล์มน้ำ m^3/s
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ K
T_g	อุณหภูมิของก๊าซร้อน K
T_s	อุณหภูมิไอน้ำอิ่มตัว K
T_w	อุณหภูมิผิววนอกของท่อ K
u	ความเร็วในแนวแกน x m/s
v	ความเร็วในแนวแกน y m/s
X	ค่าสัดส่วนของมวลเหลวต่อมวลทั้งหมด
Z_1	ระดับอ้างอิงที่ 1
Z_2	ระดับอ้างอิงที่ 2
ρ	ความหนาแน่น kg/m^3
ν	ความหนืดจลน์
μ	ความหนืดสัมบูรณ์ kg/ms
δ	ความหนา mm

เอกสารอ้างอิง

- [1] สัมพันธ์ ไชยเทพ และพิสิษฐ์ เพชรคง (2545). การระบายความร้อนสำหรับท่อที่มีก๊าซร้อนไหลภายในโดยใช้ฟิล์มของน้ำ. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 16. กรุงเทพฯ :
- [2] สัมพันธ์ ไชยเทพ และพิสิษฐ์ เพชรคง (2546). การประยุกต์ทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของการไหลของฟิล์มควบแน่นสำหรับการระบายความร้อนแบบฟิล์มของน้ำ. การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมการบินและอากาศยานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ :
- [3] Burmeister, L.C. (1993). Convective Heat Transfer. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- [4] Cargniro, L.T. and Karvinen, C.H. (1967). Aerospace Propulsion Power Plant. 4th ed. Illinois: Educational Publishers.
- [5] Incropera, F.P., and Dewitt D.P. (2001) Introduction to Heat Transfer. 4th ed. New York : John Wiley & Sons.
- [6] Ozisik, M.N. (1985). Heat Transfer & Basic Approach. Singapore : McGraw-Hill.