

การประมาณค่าอัตราการไหลของของไหลร้อนในท่อจากการวิเคราะห์การสูญเสียความร้อน Estimation of Hot Fluid Mass Flow Rate in Duct by Heat loss Analysis

ทงนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์และธีชวัน ศรีสุวรรณ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่ 50200

Tanongkiat Kiatsiriroat and Theechawan Srisuwan
Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering Chiang Mai University Chiang Mai 50200

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ใช้เทคนิคของการสูญเสียความร้อนจากของไหลในท่อสู่สิ่งแวดล้อม โดยการวัดอุณหภูมิไปตามแนวของผิวท่อ และผิวนอกของฉนวน รวมทั้งอุณหภูมิอากาศรอบๆ จากคุณสมบัติของฉนวนความร้อนและขนาดของท่อ จะสามารถประเมินอัตราการไหลที่สูญเสียรวมไปถึงอัตราการไหลของของไหลในท่อด้วย จากการทดสอบของการไหลของน้ำมันร้อนที่ไหลในท่อกลม และอากาศร้อนที่ไหลในท่อกลมและท่อสี่เหลี่ยมหุ้มฉนวนอย่างต่ำ พบว่าค่าอัตราการไหลโดยที่ประเมินได้มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลอง โดยมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 10% เมื่อค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิแตกต่างระหว่างผนังท่อและของอากาศ โดยรอบที่ตำแหน่งเริ่มต้นจากการวัดอุณหภูมิ เทียบกับอุณหภูมิแตกต่างดังกล่าวที่ตำแหน่งสุดท้ายของการวัดอุณหภูมิตามแนวท่อ มีค่ามากกว่า 2 กรณีของอากาศร้อนไหลผ่านท่อกลม และมากกว่า 1.4 กรณีอากาศร้อนไหลในท่อสี่เหลี่ยม และ 1.02 กรณีน้ำมันร้อนไหลในท่อกลม

Abstract

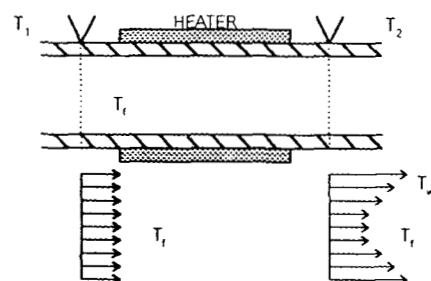
A method for estimating mass flow rate of hot fluid flowing inside insulated duct without any inserted-sensor has been proposed. With the duct surface temperature measurement, the heat loss from the fluid could be evaluated and also the fluid mass flow rate. To verify the model, some experiments have been carried out. Heated heat transfer oil and heated air of about 50-90°C are the fluids fed through different sizes circular and rectangular ducts. From the experiment, it could be found that as the temperature difference ratio $(T_{w1}-T_a)/(T_{w2}-T_a)$ is over 2 for and 1.4 for air flowing in circular and rectangular ducts and over 1.04 for hot oil flowing in circular duct, the deviation of the estimated mass flow rate from the measured value is less than 10%

Keywords : Mass flow rate estimation, flow measurement, Thermal flowmeter.

1 บทนำ

ในการตรวจสอบสภาพการใช้พลังงาน ปัญหาที่มักพบอยู่เสมอคือการวัดค่าอัตราการไหลของของไหลทำงาน ทั้งนี้ผู้ประกอบการส่วนใหญ่ไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลไว้ที่อุปกรณ์ต่างๆ และเมื่อต้องการทราบอัตราการไหล โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดเข้าไป จะต้องทำการตัดต่อท่อทางเดินของของไหล จะต้องทำการหยุดการทำงานของอุปกรณ์นั้น ซึ่งในทางปฏิบัติทางเจ้าของกิจการจะไม่ต้องการให้ดำเนินการเช่นนั้น เพราะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิต และถึงแม้ในปัจจุบันมีอุปกรณ์วัดอัตราการไหลประเภทอัลตราโซนิก (Ultrasonic Flowmeter) แต่อุปกรณ์ดังกล่าว สามารถวัดของไหลได้บางชนิดเท่านั้น อีกทั้งมีราคาค่อนข้างแพง ดังนั้นผู้ทำการตรวจสอบการใช้พลังงาน จะต้องหาเทคนิคต่างๆ มาประเมินค่าอัตราการไหลของของไหลทำงาน

เทคนิคหนึ่งที่มีการนำมาใช้มากขึ้น คือการประเมินค่าอัตราการไหลจากอุณหภูมิของผนังท่อ Wijesundera et al [1] ได้ใช้สวิตช์ความร้อนให้ความร้อนแก่น้ำที่ไหลในท่อทรงกระบอกหุ้มฉนวนอย่างดี และวัดอุณหภูมิผิวท่อตรงบริเวณก่อนและหลังของตำแหน่งที่ติดตั้งสวิตช์ความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของอุปกรณ์และอุณหภูมิของไหลภายในท่อ
โดยใช้เทคนิคของ Wijesundera et al. [1]

ค่าอัตราการความร้อนที่ลวดความร้อนให้แก่ของไหล Q จะก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนให้กับของไหล โดย

$$Q = hA(T_w - T_f) \quad (1)$$

เนื่องจาก T_f จะมีค่าใกล้เคียงกับ T_1 และ T_2 มีค่าใกล้เคียงกับ T_w ดังนั้น

$$Q = hA(T_2 - T_1) \quad (2)$$

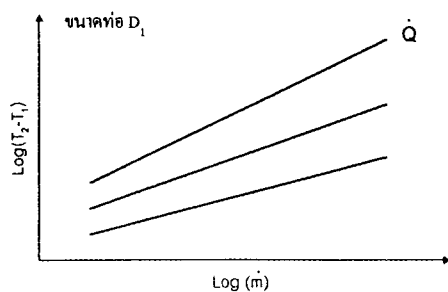
สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน h จะขึ้นกับอัตราการไหลของของไหล

$$h = f_1 \left(\dot{m} \right) \quad (3)$$

จากสมการ (2) และ (3) อาจกล่าวได้ว่า อัตราการไหลโดยมวลจะขึ้นกับอัตราการความร้อนจากลวดความร้อน และอุณหภูมิแตกต่างที่ผิวผนังท่อ $(T_2 - T_1)$ โดย

$$\dot{m} = f_2 [Q, (T_2 - T_1)] \quad (4)$$

ทางคณะผู้วิจัยจึงได้หาความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล และผลต่างของอุณหภูมิ $(T_2 - T_1)$ ในท่อขนาดต่างๆ โดยมีลักษณะแสดงในรูปที่ 2

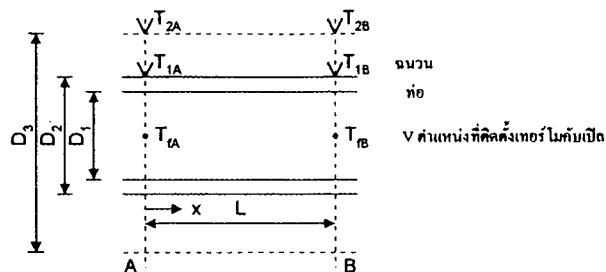


รูปที่ 2 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล

กับ Q และ $(T_2 - T_1)$ ที่ขนาดท่อต่างๆ

ดังนั้นในการใช้เทคนิคดังกล่าว จะต้องมีการทดสอบกับท่อขนาดเดียวกันกับที่ต้องการจะไปทำการวัดจริง และหาความสัมพันธ์ก่อน

ทงเกียรติ และประสิทธิ์ โจมงาม [2] ได้ใช้เทคนิคที่ตรงข้ามกันคือแทนที่จะป้อนความร้อนให้แก่ของไหล จะพิจารณาความร้อนที่สูญเสียจากของไหลร้อนในท่อสู่สิ่งแวดล้อม โดยทำการวัดอุณหภูมิของผิวท่อและผิวฉนวนของท่อ ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งตำแหน่งของอุณหภูมิวัดดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งอุณหภูมิในการประเมินอัตราการไหล

ค่าอัตราการไหลสูญเสียความร้อน จากของไหลสู่ภายนอกต่อหน่วยความยาวสามารถคำนวณโดย

$$Q'_{loss} = \frac{2\pi k_1 (T_1 - T_2)}{\ln(D_2/D_1)} \quad (5)$$

ดังนั้นอัตราการความร้อนสูญเสียตลอดความยาวจากตำแหน่ง A ถึง B ที่ทำการวัดอุณหภูมิ Q'_{loss} จะคำนวณได้โดย

$$Q_{loss} = \int_A^B Q'_{loss} dx = \int_A^B \frac{2\pi k_1 (T_{11} - T_2)}{\ln(D_3/D_2)} dx$$

ในการศึกษาได้ใช้ค่าอุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ย ดังนั้น

$$Q_{loss} = \frac{(T_1 - T_2)_{ave}}{\frac{1}{2\pi k_1} \ln(D_3/D_2)} L \quad (6)$$

$$\text{โดย } (T_1 - T_2)_{ave} = \frac{(T_1 - T_2)_A + (T_1 - T_2)_B}{2}$$

ค่าอัตราการสูญเสียความร้อนต่อหน่วยความยาวที่หน้าตัดใดๆ ในสมการ (5) ยังอาจคำนวณได้จาก

$$Q_{loss} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi k_1} \ln(D_3/D_2)} = \frac{T_f - T_2}{\frac{1}{\pi h_1 D_1} + \frac{1}{2\pi k_p} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) + \frac{1}{2\pi k_1} \ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)} = \frac{T_f - T_2}{\frac{1}{\pi U_1 D_1}}$$

$$\text{หรือ } T_f = T_2 + \frac{(1/\pi U_1 D_1)}{(1/2\pi k_1) \ln(D_3/D_2)} (T_1 - T_2)$$

$$\text{นั่นคือ } T_{fA} = T_{2A} + \frac{(1/\pi U_1 D_1)(T_1 - T_2)_A}{(1/2\pi k_1) \ln(D_3/D_2)}$$

$$T_{fB} = T_{2B} + \frac{(1/\pi U_1 D_1)(T_1 - T_2)_B}{(1/2\pi k_1) \ln(D_3/D_2)} \quad (7)$$

และอัตราการสูญเสียความร้อนจากของไหลจากตำแหน่ง A ถึง B

$$Q_{\text{loss}} = m C_p (T_{fA} - T_{fB})$$

หรือ

$$m = \frac{Q_{\text{loss}}}{C_p (T_{fA} - T_{fB})} \quad (8)$$

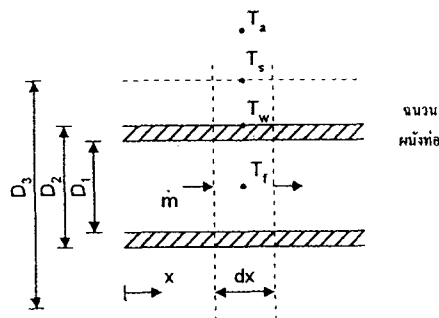
Q_{loss} , T_{fA} และ T_{fB} สามารถประเมินจากสมการ (6) และ (7) ซึ่งจะทำให้สามารถคำนวณอัตราการไหลของของไหลได้

เทคนิคดังกล่าวสามารถทำได้แม่นยำขึ้น ถ้าทำการวัดอุณหภูมิ T_1 และ T_2 ตลอดความยาวของท่อ และ หาความสัมพันธ์ของ $(T_1 - T_2)$ ตามระยะทางของท่อ

สำหรับในงานวิจัยนี้ เป็นการพัฒนางานของทงเกียรติและประสิทธิ์ โดยทำการวัดเพียงอุณหภูมิของผนังท่อและอุณหภูมิของอากาศรอบๆ และหาเทคนิคในการไหลของไหลร้อนในท่อลักษณะต่างๆ ทั้งท่อกลมและสี่เหลี่ยมรวมถึงการหาขีดจำกัดของเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น

2. เทคนิคการประเมินค่าอัตราการความร้อน

จากรูปที่ 4 ของไหลร้อนไหลในท่อและมีการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อพิจารณาที่ ตำแหน่ง dx จะได้สมดุลพลังงาน ดังนี้



รูปที่ 4 ลักษณะของท่อ และอุณหภูมิที่พิจารณา

$$-m C_p dT_f = U_3 \pi D_3 (T_f - T_a) dx$$

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของไหล T_f กับ ระยะทางที่ตำแหน่ง x ได้ๆ ตามทิศทางการไหลได้เป็น

$$T_f(x) - T_a = C_1 e^{-U_3 \pi D_3 x / m C_p} \quad (9)$$

จะเห็นว่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของไหล และอุณหภูมิอากาศโดยรอบแปรตามระยะทาง x ในลักษณะของ exponential

ขณะเดียวกัน อัตราความร้อนสูญเสียต่อหน่วยความยาว จากของไหลสู่อากาศรอบๆ ที่สภาวะคงตัว จะเท่ากับอัตราการสูญเสียความร้อนต่อหน่วยความยาวจากผนังท่อไปยังอากาศรอบๆ โดย

$$U_3 \pi D_3 (T_f - T_a) = U_2 \pi D_2 (T_w - T_a)$$

หรือ

$$T_w - T_a = \frac{U_3 D_3}{U_2 D_2} (T_f - T_a)$$

นั่นคือ ค่าความแตกต่างของอุณหภูมิผนังกับอากาศ $(T_w - T_a)$ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับ $(T_f - T_a)$ จะได้

$$T_w - T_a = C_2 e^{-U_3 \pi D_3 x / m C_p} = C_2 e^{-Bx} \quad (10)$$

โดย $C_2 = C_1 U_3 D_3 / U_2 D_2$ และ $B = U_3 \pi D_3 / m C_p$

จากสมการ (10) จะเห็นว่า ถ้าทำการวัดค่าอุณหภูมิแตกต่างระหว่าง $T_w - T_a$ ตามระยะทางในทิศทางการไหลของของไหล x จะสามารถทำ curve fitting และหาค่า C_2 และ B ได้ และเนื่องจาก

$B = U_3 \pi D_3 / m C_p$ จะสามารถคำนวณอัตราการไหลโดยมวลโดย

$$m = U_3 \pi D_3 / B C_p \quad (11)$$

อย่างไรก็ตามค่า U_3 ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวมจากของไหลในท่อมายังอากาศรอบๆ ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นกับ อัตราการไหลของของไหลเช่นกัน ดังนั้นในการหาค่าอัตราการไหล m จะต้องทำการสมมติค่าอัตราการไหล และทำการคำนวณแบบลองผิด-ลองถูกจะสามารถค่าที่ถูกต้องได้
ค่า U_3 สามารถคำนวณโดย

$$\frac{1}{U_3} = \frac{D_3}{D_1 h_1} + \frac{D_3 \ln(D_2/D_1)}{2k_p} + \frac{D_3 \ln(D_3/D_2)}{2k_f} + \frac{1}{h_o} \quad (12)$$

ในกรณีที่ท่อไม่หุ้มฉนวนค่าความต้านทาน $D_3 \ln(D_3/D_2)/2k_f$ จะมีค่าเป็นศูนย์ และถ้าท่อเป็นสี่เหลี่ยม ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะพิจารณาในแต่ละด้าน แทนที่จะเป็นลักษณะของท่อกลม

ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของของไหลในท่อ h_1 สามารถคำนวณจาก

$$h_1 D_1 / k = 3.66 ; \text{Re}_D < 2000$$

$$= \frac{(f/8)(\text{Re}_D - 1000) Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2} (Pr^{1/3} - 1)} ; \text{Re}_D > 2300 \quad (13)$$

โดย

$$f = \left(0.79 \ln \left(\frac{\text{Re}_D}{D} \right) - 1.64 \right)^{-2} \text{ กรณีท่อเรียบ} \quad (14)$$

สำหรับท่อที่ไม่เป็นทอกลม ค่า D_1 จะใช้ค่าของเสียผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิก โดย

$$D_1 = 4Ac / P \quad (15)$$

Ac คือพื้นที่หน้าตัดในการไหล และ P คือเส้นรอบรูปของท่อที่สัมผัสกับของไหล

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนด้านนอกที่สัมผัสกับอากาศ h_o สามารถคำนวณได้โดยตรง จากค่าอัตราความสูญเสียความร้อนที่ประเมินจากอุณหภูมิผิวท่อ และอุณหภูมิฉนวนตลอดความยาวที่วัดอุณหภูมิโดย

$$Q'_{loss} = \int_0^L \left(\frac{T_w - T_s}{\frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{D_3}{D_2}} \right) dx$$

เช่นเดียวกัน

$$\frac{T_w - T_s}{\frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{D_3}{D_2}} = \frac{T_f - T_a}{U_3 \pi D_3}$$

ดังนั้น $(T_w - T_s)$ สามารถเขียนในรูป

$$(T_w - T_s) = C_3 e^{-Bx} \quad (16)$$

นั่นคือ

$$Q'_{loss} = \int_0^L \left(\frac{C_3 e^{-Bx}}{\frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{D_3}{D_2}} \right) dx = \frac{2\pi k_1 C_3}{-B \ln \frac{D_3}{D_2}} [e^{-BL} - 1] \quad (17)$$

สำหรับท่อสี่เหลี่ยม

$$Q_{loss} = \frac{k_1 PC_3}{-Bt} [e^{-BL} - 1] \quad (18)$$

t คือความหนาของฉนวน และ P คือ ความยาวเส้นรอบรูปด้านนอกของฉนวน จากการวัดอุณหภูมิ T_w และ T_s ตลอดความยาว L ที่ทดสอบ ค่าที่ได้สามารถทำ curve fitting ในรูปของสมการ (16) ซึ่งจะได้ค่า C_3 และ B และสามารถมาคำนวณ Q'_{loss} สมการ (16) ได้ ค่า B ที่ได้ควรมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำ curve fitting ของ $(T_w - T_a)$ กับค่า x ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h_o จะหาจาก

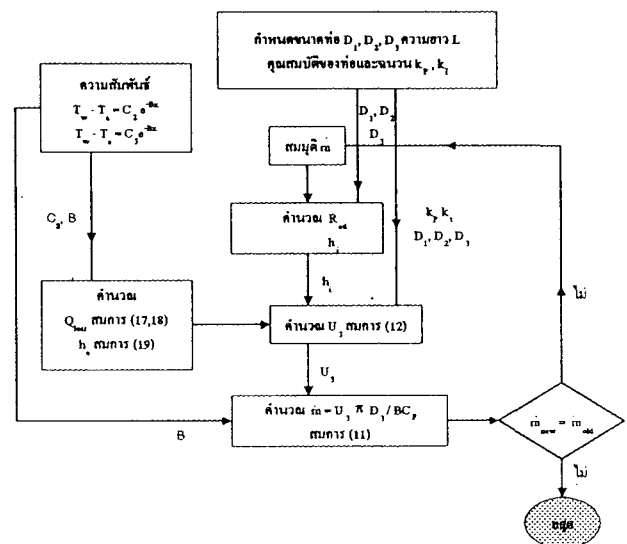
$$h_o = \frac{Q_{loss}}{\pi D_3 L (\Delta T)_{ln}} \text{ ในกรณีท่อทรงกระบอก} \\ = \frac{Q_{loss}}{PA(\Delta T)_{ln}} \text{ กรณีท่อสี่เหลี่ยม} \quad (19)$$

$$\text{โดย} \quad (\Delta T)_{ln} = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{\ln \left(\frac{T_{w1} - T_a}{T_{w2} - T_a} \right)} \quad (20)$$

T_{w1} และ T_{w2} คืออุณหภูมิผิวท่อที่ต้นทางและปลายทางของการวัดอุณหภูมิที่ $x = 0$ และ $x = L$ ตามลำดับ

กรณีท่อเปลี่ยนที่ไม่ได้หุ้มฉนวนค่า h_o อาจประเมินโดยตรงจากสมการข้อมูลของการถ่ายเทความร้อน โดยพิจารณาจากสภาพการถ่ายเทความร้อนที่สิ่งแวดล้อมว่าเป็นลักษณะใด โดยอาจอยู่ในรูปของการพาความร้อนแบบบังคับหรือแบบอิสระ ทั้งนี้อาจมีผลของการแผ่รังสีความร้อน ประกอบด้วย

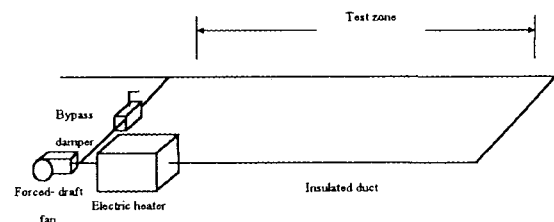
ขั้นตอนในการคำนวณค่าความสามารถแสดงได้ในรูปที่ 5



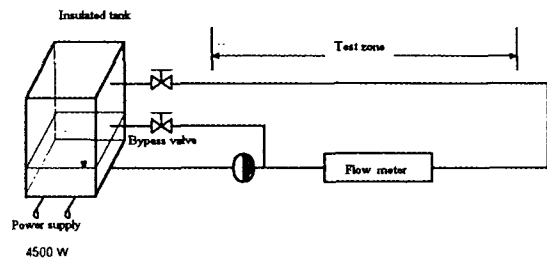
รูปที่ 5 ขั้นตอนในการคำนวณค่าอัตราการไหล

3. วิธีดำเนินการทดสอบ

ในการทดสอบความถูกต้องของวิธีการที่เสนอในหัวข้อที่แล้ว จะมี การป้อนของไหลร้อนที่เป็นก๊าซ คืออากาศและของไหลร้อนที่เป็นของเหลวได้แก่ น้ำ และน้ำมัน ให้ไหลไปตามท่อทรงกระบอกขนาดต่างๆ และในกรณีของอากาศจะมีการไหลในท่อสี่เหลี่ยมด้วย ลักษณะของชุดทดสอบแสดงในรูปที่ 6



ก. ชุดทดสอบเมื่อของไหลเป็นอากาศร้อน



ข. ชุดทดสอบเมื่อของไหลทำงานเป็นน้ำและน้ำมันร้อน

รูปที่ 6 ลักษณะของอุปกรณ์ทดสอบ

ขนาดของท่อที่ใช้ในการทดสอบกรณีอากาศ :

ท่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50.8 mm หุ้มฉนวนยาง
 ฉนวนหนา 6.35 mm
 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 mm หุ้มฉนวน
 ยางหนา 6.35 mm

ท่อสี่เหลี่ยม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm หุ้มฉนวนยาง
 ฉนวนหนา 6.35 mm

ขนาดของท่อที่ใช้ในการทดสอบกรณีน้ำมัน :

ท่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm หุ้มฉนวนยาง
 ฉนวนหนา 6.35 mm

ขนาดของท่อที่ใช้ในการทดสอบกรณีน้ำ :

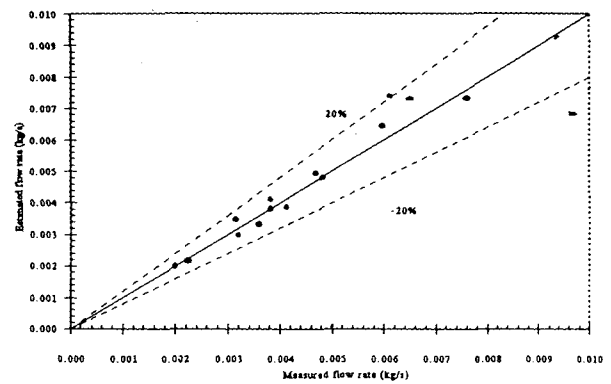
ท่อทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ไม่หุ้มฉนวน

ความยาวในการวัดอุณหภูมิผิวท่อและผิวฉนวนในบริเวณที่ทดสอบ
 จะมีค่า 2.4 และ 6 m และอุณหภูมิของไหลร้อนที่เข้าท่อทดสอบไม่เกิน
 90°C และอัตราการไหลของของไหลจะอยู่ในช่วงการไหลแบบราบเรียบ
 และแบบปั่นป่วน สำหรับอัตราการไหลของอากาศ จะวัดค่าความเร็วที่
 ตำแหน่งต่างๆ ที่พื้นที่หน้าตัดเดียวกัน แล้วมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยและ
 คำนวณอัตราการไหลโดยมวล ส่วนกรณีน้ำมันและน้ำ จะอ่านโดยตรง
 จากอุปกรณ์วัดอัตราการไหลอุณหภูมิผิวท่อและผิวฉนวน และอุณหภูมิ
 อากาศ จะวัดโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ต่อกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ใน
 การเก็บข้อมูลจะเริ่มทำเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงตัว

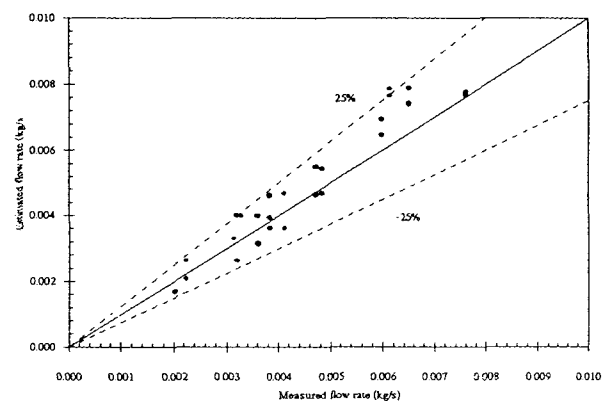
4. ผลการทดสอบ

4.1 กรณีของไหลเป็นอากาศ

รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่
 ไหลในท่อทรงกระบอกที่คำนวณได้จากวิธีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เทียบ
 กับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดอัตราการไหล ในกรณีที่ตามยาวที่พิจารณา
 ยาวมากขึ้น ผลที่ประเมินได้จะใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ถูกต้องมากขึ้น



ก. ความยาวที่พิจารณา 6 m

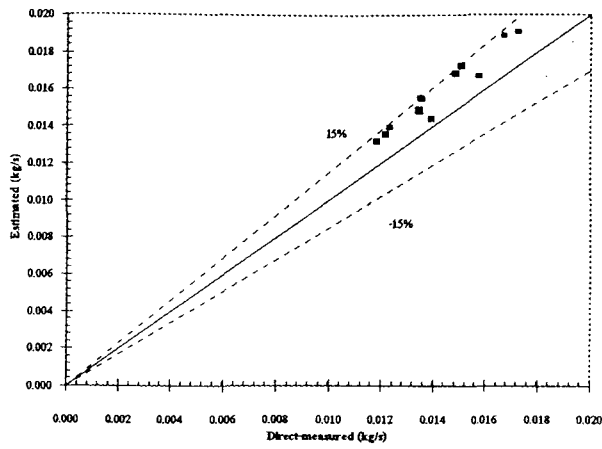


ข. ความยาวที่พิจารณา 4 m

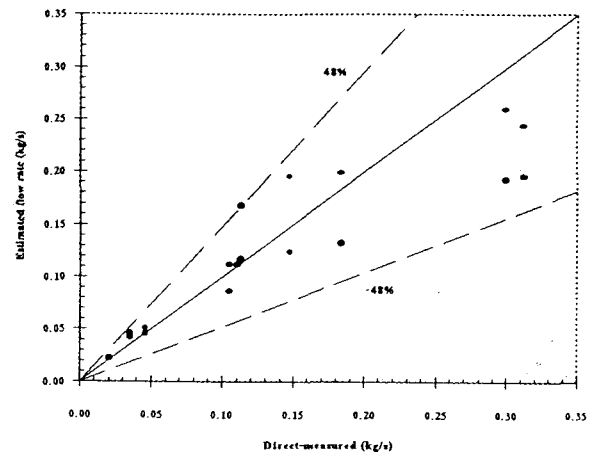
รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบการไหลของอากาศที่คำนวณจาก
 เทคนิคที่นำเสนอเทียบกับผลการวัดค่าอัตราการไหลจากอุปกรณ์วัด
 กรณีอากาศไหลในท่อทรงกระบอก โดยระยะทางที่วัดอุณหภูมิ มีระยะ
 ต่างๆ กัน และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 50.8 mm หุ้มฉนวนยาง
 ฉนวนหนา 6.35 mm

การที่ ระยะในการวัดอุณหภูมิยาวขึ้น จะมีค่าอุณหภูมิแตกต่างกันตาม
 ระยะทางมากขึ้น ทำให้ความไม่แน่นอน (uncertainty) ของอุณหภูมิที่
 ได้จากการวัดมีผลต่อค่า B ในสมการ (16) และ (18) น้อยลง กล่าวคือ
 ค่า B จะมีความแม่นยำสูงขึ้น ดังนั้นในการกำหนดระยะเพื่อวัดอุณหภูมิ
 ควรมีระยะทางที่ยาวเพียงพอที่จะทำให้อุณหภูมิลดลงอย่างชัดเจน

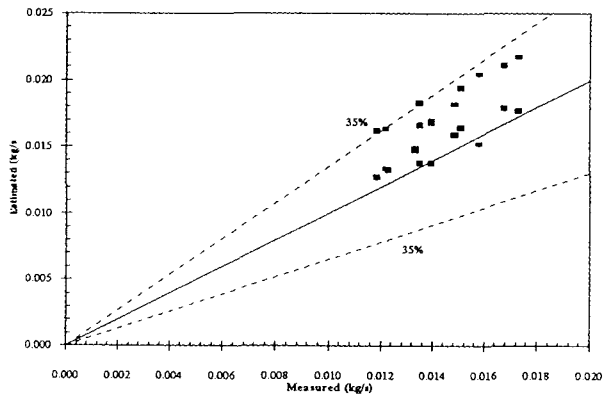
รูปที่ 8 แสดงผลการคำนวณอัตราการไหลจากวิธีที่นำเสนอ กรณี
 ของอากาศไหลในท่อสี่เหลี่ยม เทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัด เช่น
 เดียวกันพบว่าเมื่อระยะทาง ที่ใช้ทดสอบในการวัดอุณหภูมิยาวขึ้น ค่า
 ทั้งสองจะมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น



ก. ความยาวที่พิจารณา 6 m



ข. ความยาวที่พิจารณา 3 m

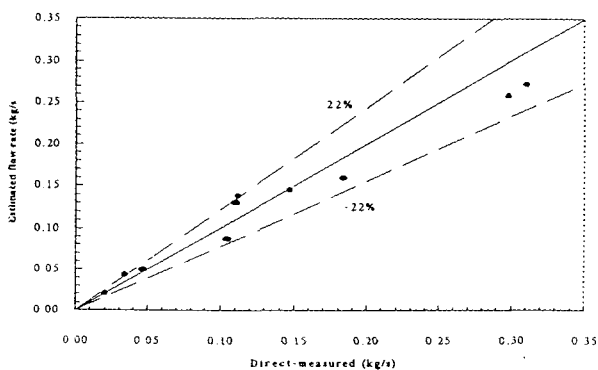


ข. ความยาวที่พิจารณา 4 m

รูปที่ 8 การไหลของอากาศในท่อสี่เหลี่ยมขนาด 101.6 m x 101.6 m
หุ้มฉนวนยางดำหนา 6.35 mm

4.2 กรณีของไหลเป็นน้ำมัน

รูปที่ 9 แสดงผลการเปรียบเทียบของค่าอัตราการไหลที่ประเมินได้เทียบกับค่าที่วัดจริง ในกรณีของน้ำมันไหลในท่อกลม ถ้าระยะทางที่ทำให้การวัดอุณหภูมิยาวขึ้น ผลที่ได้จากคำนวณจะใกล้เคียงมากขึ้นกับค่าที่วัดจริง

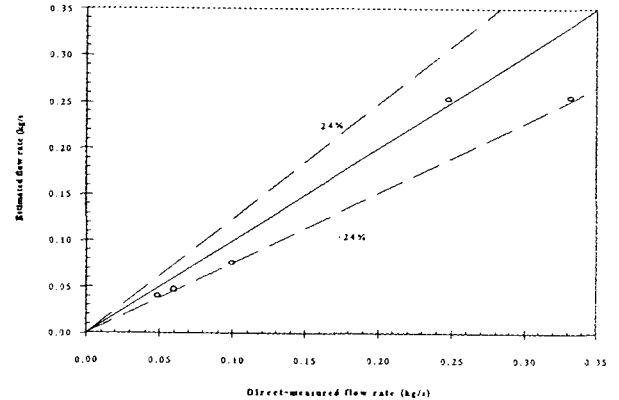


ก. ความยาวที่พิจารณา 4 m

รูปที่ 9 การไหลของน้ำมันในท่อกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
25.4 mm หุ้มฉนวนยางดำหนา 6.35 mm

4.3 กรณีของไหลเป็นน้ำ

สำหรับกรณีของน้ำ เนื่องจากค่าความจุความร้อนของน้ำมีค่าสูงของท่อที่วัดได้ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ดังนั้นเพื่อให้อุณหภูมิของผิวท่อลดลงเพื่อให้สามารถวัดค่าความแตกต่างได้ จึงใช้ท่อที่ไม่หุ้มฉนวน และค่า h_o ในสมการ (19) จะคำนวณจากข้อมูลของการถ่ายเทความร้อนกรณีของการพาความร้อนตามธรรมชาติ ซึ่งผลที่ได้จากการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จริงพอสมควร ดังแสดงในรูปที่ 10



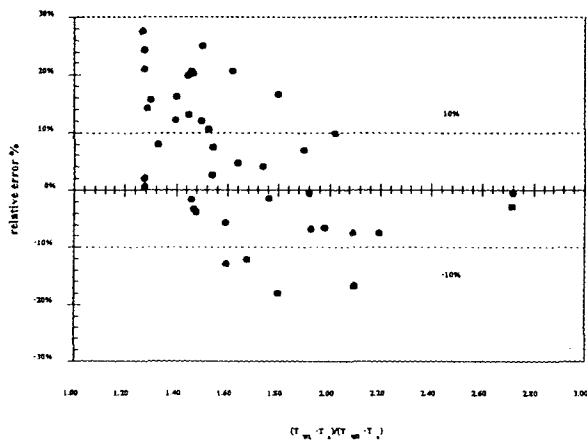
รูปที่ 10 การไหลของน้ำในท่อกลมขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 mm ไม่หุ้มฉนวน

4.4 พารามิเตอร์ที่ใช้ระบุขีดจำกัดของเทคนิคที่นำเสนอ

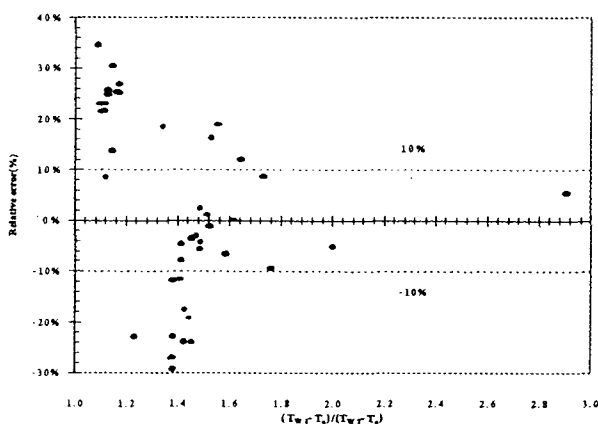
จากผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เทคนิคดังกล่าวจะมีค่าความเชื่อถือในการประเมินอัตราการไหลได้สูง เมื่ออุณหภูมิของท่อที่วัดได้ตามระยะทางของการไหลมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน ในกรณีของไหลมีอัตราการไหลสูงหรือมีค่าความจุความร้อนสูง ค่าความเชื่อมั่นลดน้อยลงเนื่องจากอุณหภูมิที่ผิวท่อไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และทำให้ค่า B ที่ได้จากการทำ curve fitting มีค่าความเชื่อถือลดลง สำหรับในงานวิจัยนี้ได้เสนอค่าอัตราส่วนอุณหภูมิแตกต่าง $(T_{w1} - T_a) / (T_{w2} - T_a)$ โดย T_{w1}

และ T_{w2} เป็นอุณหภูมิผิวท่อที่ระยะทางเริ่มต้นในการวัดและสิ้นสุดของการวัดอุณหภูมิ

รูปที่ 11 แสดงค่าความเบี่ยงเบนของค่าที่ได้จากการคำนวณโดยวิธีที่นำเสนอ จากค่าการวัดจริงในกรณีของไหลที่เป็นอากาศ ไหลในท่อทรงกระบอกขนาดต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิตั้งกล่าวมีค่าน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นว่า T_{w1} และ T_{w2} มีค่าต่างกันไม่มากจะมีความแม่นยำค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อ T_{w1} และ T_{w2} มีค่าแตกต่างกันมากหรือค่าอัตราส่วนของอุณหภูมิมียิ่งมากขึ้น ค่าความแม่นยำจะเพิ่มขึ้น จากรูปจะเห็นว่ากรณีของอากาศไหลในท่อกลมค่าความผิดพลาดจะอยู่ในช่วง $\pm 10\%$ เมื่อค่าอัตราส่วนอุณหภูมิแตกต่างมีค่ามากกว่า 2



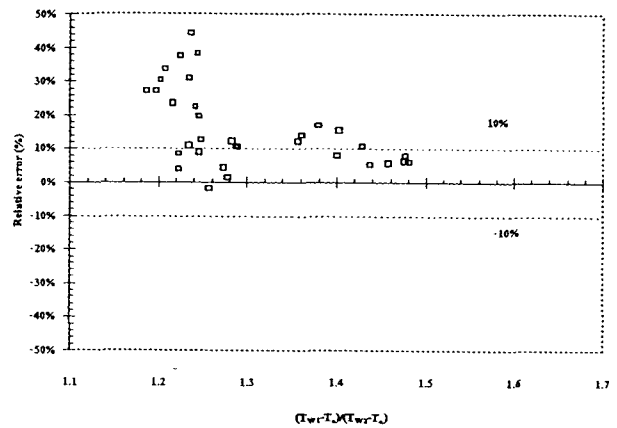
ก. ท่อขนาด 50.8 mm



ข. ท่อขนาด 101.6 mm

รูปที่ 11 ความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการคำนวณเทียบกับค่าที่วัดจริง กรณีอากาศไหลในท่อทรงกระบอก

เช่นเดียวกัน กรณีหาอากาศร้อนไหลในท่อสี่เหลี่ยมขนาด 101.6 mm x 101.6 mm ค่าความแม่นยำจะเบี่ยงเบนไม่เกิน $\pm 10\%$ เมื่อค่าอัตราส่วนอุณหภูมิแตกต่างมากกว่า 1.4 ผลที่เกิดขึ้นแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ความคลาดเคลื่อนกรณีของอากาศไหลในท่อสี่เหลี่ยมขนาด 101.6 mm x 101.6 mm

สำหรับกรณีของน้ำมันร้อนไหลในท่อทรงกระบอก พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะอยู่ในช่วงไม่เกิน $\pm 10\%$ เมื่อค่าอัตราส่วนอุณหภูมิแตกต่างมีค่ามากกว่า 1.02

5. สรุป

จากการศึกษาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคที่นำเสนอสามารถนำมาใช้ประเมินค่าอัตราการไหลของของไหล ที่เป็นก๊าซคืออากาศหรือของเหลว เช่นน้ำมัน หรือน้ำร้อน ได้ โดยที่อุณหภูมิแตกต่างของผิวท่อที่วัดตามระยะทางในทิศทางการไหลต้องมีค่าแตกต่างพอสมควร โดยในการศึกษานี้ ค่าอัตราส่วนแตกต่าง $(T_{w1} - T_a) / (T_{w2} - T_a)$ จะถูกนำมาเป็นดัชนีในการเลือกระยะในการวัดอุณหภูมิ โดยกรณีของอากาศไหลในท่อกลมค่า $(T_{w1} - T_a) / (T_{w2} - T_a)$ ควรมีค่าเกิน 2 กรณีของอากาศไหลในท่อเหลี่ยมค่า $(T_{w1} - T_a) / (T_{w2} - T_a)$ ควรมีค่าเกิน 1.4 กรณีของน้ำมันไหลในท่อกลมค่า $(T_{w1} - T_a) / (T_{w2} - T_a)$ ควรมีค่าเกิน 1.02

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนวิจัย จากเงินงบประมาณการวิจัยประจำปี 2541 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารอ้างอิง

- 1) Wijesundera, J.L. Ho and C.K. Yeo, A design of the thermal flowmeter, Proc. 4th ASEAN Energy Conf., November, 1987, Singapore, pp. 391-400.
- 2) ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และประสิทธิ์ โฉมงาม, การประเมินอัตราการไหลโดยใช้หลักการสูญเสียความร้อน, วิศวกรรมสาร, ปีที่ 43 ฉบับที่ 4, 2533, หน้า 102-104.

รายการสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน, m^2
C_p	ความจุความร้อนจำเพาะ, J/kgK
D	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง, m
k	สัมประสิทธิ์ในการนำความร้อน, W/mK
h	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 K$
L	ความยาว, m
m	อัตราการไหลโดยมวลของของไหล, kg/s
Q	อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยความยาว, W/m
Q'	อัตราการถ่ายเทความร้อน, W
T	อุณหภูมิ, $^{\circ}C$
ΔT_{lm}	ค่าอุณหภูมิแตกต่างเชิงล็อก, $^{\circ}C$