

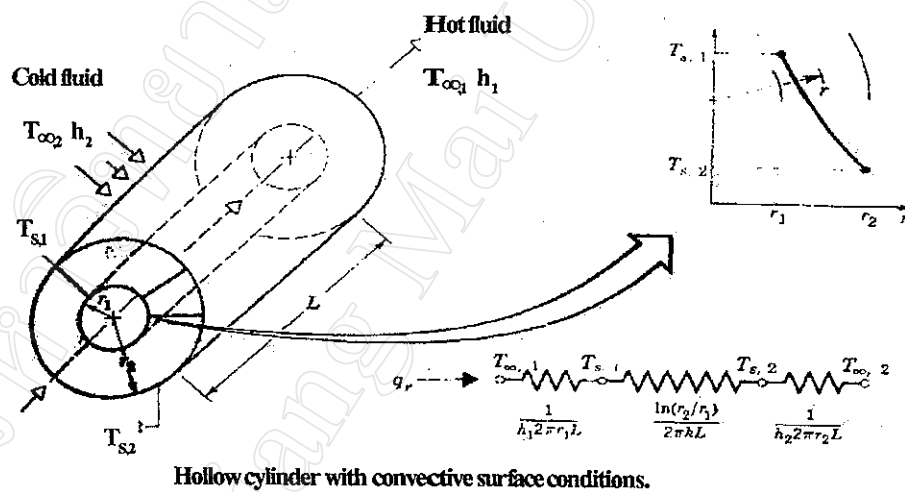
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 การนำความร้อนในสภาวะสม่ำเสมอ (Steady-state conduction)

2.1.1 การนำความร้อนผ่านวัตถุทรงกระบอกกลวง (Hollow cylinder)

ถ้าไม่มีแหล่งกำเนิดความร้อนภายใน และผิวด้านนอกและผิวด้านในมีอุณหภูมิแตกต่างกันดัง
สามารถแสดงในรูป 2.1



รูป 2.1 แสดงทรงกระบอกกลวงที่มีการนำความร้อนจากผิวในออกสู่ผิวนอก

(Incropera and DeWitt, 1990)

อัตราการถ่ายเทความร้อน (Q) สามารถหาได้จาก

$$dQ/dx = -2\pi k(T_{S,1} - T_{S,2})/\ln(r_2/r_1) \quad (2.1)$$

ดังนั้นเมื่อนำมาประยุกต์กับการนำความร้อนผ่านฉนวนที่ผิวในมีอุณหภูมิ T_w และผิวนอกมีอุณหภูมิ T_s

$$dQ/dx = 2\pi k_f(T_w - T_s)/\ln(r_2/r_1) \quad (2.2)$$

หากกำหนดให้ $T_w - T_s$ มีการกระจายตามแกน X เป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลดังนี้

$$T_w - T_s = A \cdot e^{(-Bx)} \quad (2.3)$$

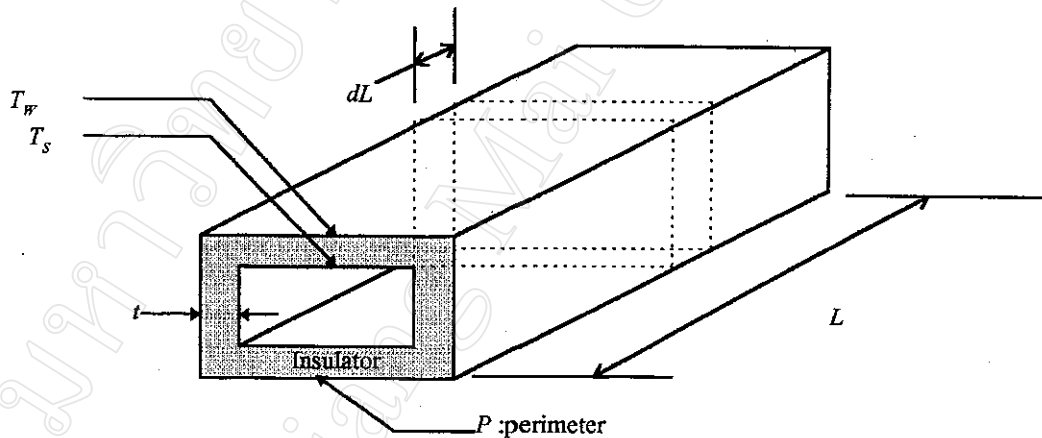
เมื่อ A และ B คือ ค่าคงที่

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวท่อ L จะมีค่าเป็น

$$\int_0^L dQ = \frac{2\pi \cdot k_I \cdot A}{(\ln(r_2^2/r_1^2)) \cdot (-B)} \int_0^L e^{-Bx} d(-Bx) \quad (2.4)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_I \cdot A}{(-B) \ln(r_2^2/r_1^2)} [e^{-BL} - 1] \quad (2.5)$$

2.1.2 การนำความร้อนผ่านฉนวนที่หุ้มท่อภาคตัดสี่เหลี่ยม



รูป 2.2 แสดงการนำความร้อนผ่านฉนวนที่หุ้มท่อสี่เหลี่ยม

ด้วยการประยุกต์สมการการนำความร้อนชนิดหนึ่งมิติของหนังสือจาก Incropera and DeWitt (1990) ได้ว่า

$$dQ = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.6)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่ที่ตัดฉากกับการนำความร้อน

X คือ แกนตามความหนาของผนัง

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนัง

จากนั้น นำสมการดังกล่าวมาประยุกต์กับการนำความร้อนผ่านฉนวนที่หุ้มท่อภาคตัดสี่เหลี่ยมได้ว่า

$$dQ = -k_I P \cdot dL \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.7)$$

หากกำหนดให้ $T_w - T_s$ มีการกระจายตามแกน X เป็นฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียลดังนี้

$$T_w - T_s = A \cdot e^{(-Bx)} \quad (2.8)$$

$$\int_0^L dQ = \int_0^L \frac{k_I P \cdot dL}{t} (T_w - T_s) \quad (2.9)$$

สุดท้ายอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านการนำของฉนวนมีค่าเท่ากับ

$$Q = \frac{k_I P \cdot A}{(-B) \cdot t} [e^{-BL} - 1] \quad (2.10)$$

2.2 การพาความร้อนแบบบังคับกรณีของไหลไหลภายในท่อ (Internal flow forced-convection)

2.2.1 การไหลของของไหลในท่อกลม

การไหลลักษณะนี้เป็นการไหลที่พบได้บ่อยครั้งในงานวิศวกรรม เพราะการส่งของไหลต่าง ๆ ก็มักส่งถ่ายโดยอาศัยท่อกลมอยู่เสมอๆ และเมื่อของไหลภายในท่อมีการถ่ายเทความร้อนกับของไหลที่อยู่ภายนอกท่อ ปริมาณที่เราสนใจศึกษาและนำมาคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผนังไปสู่ของไหลก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับนั่นเอง (h) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ให้ไว้ต่อไปนี้มีเงื่อนไขว่า การไหลต้องอยู่ในช่วงการพัฒนาโดยสมบูรณ์แล้ว (Fully developed region)

(1) การไหลในท่อกลมแบบราบเรียบ (Laminar flow)

ในการศึกษาการไหลแบบราบเรียบจะพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับ มีค่าขึ้นกับเงื่อนไขทางความร้อนอีกด้วยนั่นคือ

$$\text{Constant heat flux : } \bar{Nu}_D = 4.36 \quad (2.11)$$

$$\text{Constant wall temperature : } \bar{Nu}_D = 3.66 \quad (2.12)$$

โดยความสัมพันธ์นี้เกิดขึ้นในช่วง $Re_D < 2300$

(2) การไหลในท่อกลมแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

ค่าตัวเลข $\bar{Nu}_D$ ในการไหลแบบนี้สามารถใช้ได้ทั้งแบบ constant heat flux และ constant wall temperature Incropera and DeWitt (1990) เสนอให้ใช้ความสัมพันธ์ที่เสนอโดย Gnielinski ในการคำนวณดังนี้

$$\bar{Nu}_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (2.13)$$

$$\text{สำหรับท่อผิวเรียบ} \quad f = (0.79 \ln Re_D - 1.64)^{-2} \quad (2.14)$$

ความสัมพันธ์นี้ยอมรับได้ในช่วง $0.5 < Pr < 2000$ และ $2300 < Re_D < 5 \times 10^6$

2.2.2 การไหลของของไหลในท่อสี่เหลี่ยม (Flow inside rectangular duct)

สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับที่เกิดขึ้นที่ภาคตัดสี่เหลี่ยม เราอาจเลือกใช้งานความสัมพันธ์ได้สองแบบคือ

- (1) ใช้ความสัมพันธ์เดิมที่ใช้กับท่อกลมของ Gnielinski โดยดัดแปลงการหาค่า Re_D และ $\bar{Nu}_D$ จาก

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.15)$$

D_h เรียกว่า เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
 A_c คือ พื้นที่ภาคตัดท่อ
 P คือ เส้นรอบรูปของท่อที่สัมผัสกับของไหล

- (2) ใช้ความสัมพันธ์ของท่อเหลี่ยม

ในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้สมการของ Perkins *et al.* ที่ปรากฏใน Kreith and Bohn (1996) ดังต่อไปนี้

$$\bar{Nu}_{DH} = 0.021 Re_{DH}^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{T_s}{T_b} \right)^{-0.7} \left[1 + \left(\frac{L}{D_H} \right)^{-0.7} \left(\frac{T_s}{T_b} \right)^{0.7} \right] \quad (2.16)$$

ความสัมพันธ์นี้ยอมรับได้ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเท่านั้น และพบว่าในกรณีที่ท่อที่พิจารณาอยู่ห่างจากทางเข้ามาก พจน์ $(L/D_H)^{-0.7}$ จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

2.3 การพาความร้อนตามธรรมชาติ กรณีท่อทรงกระบอกยาว (Free convection for long-horizontal cylinder)

นอกจากการอินทิเกรตอุณหภูมิเพื่อหาอัตราการนำความร้อนที่ผ่านฉนวนออกสู่สิ่งแวดล้อมแล้ว ในกรณีท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวนใดๆ เราก็สามารถหาค่าอัตราการสูญเสียความร้อนตลอดทั้งความยาวได้จาก

$$Q = h_o P \cdot L \cdot \Delta T_{lm} \quad (2.17)$$

โดยที่ P คือ ความยาวเส้นรอบรูปภายนอกท่อ

ΔT_{lm} คือ Log mean temperature difference มีค่า $\frac{(T_{w1} - T_a) - (T_{w2} - T_a)}{\ln\left(\frac{T_{w1} - T_a}{T_{w2} - T_a}\right)}$

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติซึ่งอาจหาได้จากความสัมพันธ์จาก Incropera and DeWitt (1990) ดังนี้

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = 0.48 \cdot Ra_D^{0.25} \quad (2.18)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขการใช้งานที่ $10^4 < Ra_D < 10^7$

เมื่อ
$$Ra_D = \frac{g\beta \cdot (T_s - T_a) D^3}{\nu\alpha} \quad (2.19)$$

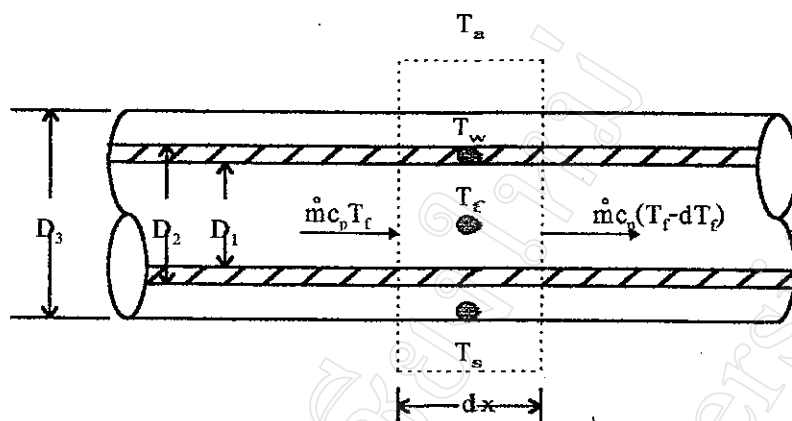
2.4 ลักษณะการลดลงของอุณหภูมิตามแนวยาวของท่อ (Temperature distribution along longitudinal axis)

พิจารณาท่อแนวระดับที่มีของไหลร้อนไหลอยู่ภายใน ท่อดังกล่าวหุ้มฉนวนไว้แล้วและขณะดังกล่าวของไหลกำลังถ่ายเทความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกที่มีอุณหภูมิคงที่ดังรูป 2.3

เมื่อเราแยกพิจารณาเฉพาะส่วนเล็กๆที่มีความยาว dx พบว่า ระดับพลังงานที่ลดลงจากการลดอุณหภูมิของไหลในท่อจะเท่ากับพลังงานที่ของไหลในท่อถ่ายเทสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกดังสมการนี้

$$-\dot{m} c_p dT_f = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3 (T_f - T_a) \cdot dx \quad (2.20)$$

และเพื่อสะดวกในการอินทิเกรต กำหนดให้ $\theta = T_f - T_a$, $dT_f = d\theta$ จะได้



รูป 2.3 แสดงลักษณะท่อและอุณหภูมิที่พิจารณา

$$-\dot{m}c_p d\theta = U \cdot 2\pi \cdot r_3 \cdot \theta \cdot dx \quad (2.21)$$

หรือ

$$\frac{1}{\theta} d\theta = \frac{U \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3}{-\dot{m}c_p} dx \quad (2.22)$$

พิจารณาแล้วเราสามารถทำการอินทิเกรตทั้งสองข้างของสมการได้

$$\int \frac{1}{\theta} d\theta = \int \frac{U \cdot 2\pi \cdot r_3}{-\dot{m}c_p} dx \quad (2.23)$$

จะได้

$$\ln|\theta| = \frac{U \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_3}{-\dot{m}c_p} x + C \quad (2.24)$$

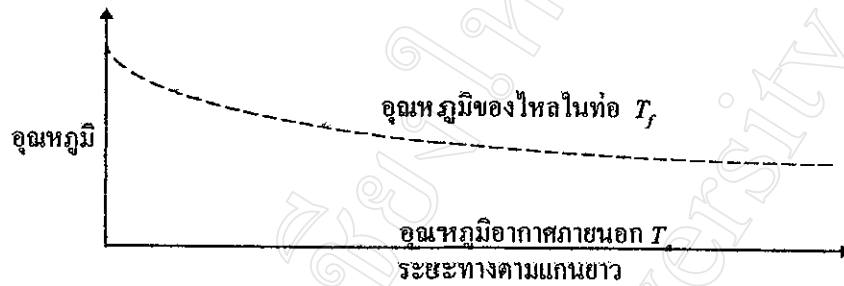
เมื่อ C เป็นค่าคงที่ใดๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับเงื่อนไขเริ่มต้น และสมการข้างต้นสามารถจัดรูปได้ใหม่ได้เป็น

$$\theta = \pm C_1 e^{-\frac{U \cdot 2\pi \cdot r_3}{\dot{m}c_p} x} \quad (2.25)$$

กรณีที่ ของไหลมีอุณหภูมิสูงกว่าภายนอกท่อ $T_f > T_a$ เราจะใช้ค่า C_1 ที่เป็นค่าบวกเท่านั้น ทำให้ได้ว่า

$$T_f(x) - T_a = C_1 e^{-\frac{U \cdot 2\pi \cdot r_3}{\dot{m}c_p} x} \quad (2.26)$$

จากสมการดังกล่าวเราจึงกล่าวได้ว่าในช่วงความยาวท่อที่กำลังสนใจ ผลต่างของอุณหภูมิของไหลในท่อกับอากาศภายนอกท่อจะมีการลดลงแบบเอกโปเนนเชียลตามแนวแกนของท่อ ซึ่งแสดงได้ในรูป 2.4



รูป 2.4 แสดงลักษณะการลดลงของอุณหภูมิของไหลในท่อ

ที่ระยะ x ใดๆ และพิจารณาปริมาตรควบคุมที่มีความยาวน้อยๆ (dx)

พิจารณาการส่งผ่านความร้อนตั้งแต่ของไหลถึงอากาศนอกท่อ

$$\frac{dQ}{dx} = U \cdot \pi \cdot D_3 (T_f - T_a) \quad (2.27)$$

พิจารณาการส่งผ่านความร้อนตั้งแต่ผิวท่อด้านนอกถึงอากาศนอกท่อ

$$\frac{dQ}{dx} = U_{24} \cdot \pi \cdot D_3 (T_w - T_a) \quad (2.28)$$

U_{24} คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient) ตั้งแต่ผิวท่อจนถึงอากาศภายนอกท่อ และจากสมการ (2.27) และ สมการ (2.28) จะได้ว่า

$$T_w - T_a = \frac{U}{U_{24}} (T_f - T_a) \quad (2.29)$$

จากสมการ (2.26) และ (2.29) ทำให้ได้ว่า

$$T_w - T_a = \frac{U}{U_{24}} C_1 e^{\frac{-U \cdot \pi \cdot D_3 x}{mc_p}} \quad (2.30)$$

เมื่อพิจารณาสมการดังกล่าวแล้วจะพบว่า สมการมีลักษณะคล้ายกับสมการ (2.26) สิ่งต่างออกไปก็มีเพียงสัมประสิทธิ์ที่อุณหภูมิพื้นผิวก่อน ส่วนเลขชี้กำลังยังคงเท่าเดิม

2.5 วิธีการคำนวณเพื่อประมาณค่าอัตราการไหลเชิงมวล

การคำนวณเพื่อประมาณค่าอัตราการไหลเชิงมวลวิธีนี้มีเงื่อนไขว่า เราต้องทราบการกระจายอุณหภูมิของผิวท่อและผิวฉนวนตามแนวยาวท่อ ตลอดจนถึงค่าการนำความร้อนของฉนวน และคุณสมบัติของของไหลที่อุณหภูมิต่างๆ แล้วจึงเริ่มการคำนวณด้วยระเบียบวิธีทางตัวเลขได้ดังนี้

2.5.1 วิธีการคำนวณสำหรับท่อที่หุ้มฉนวน

ทำการวัดอุณหภูมิผิวท่อ (T_w) และอุณหภูมิผิวฉนวน (T_s) ที่ระยะต่างๆ ตลอดทั้งช่วงความยาวท่อที่พิจารณา จากนั้นจึงวิเคราะห์หาสมการการถดถอยของ $T_w - T_a = f(x)$ และ $T_w - T_s = f(x)$ ซึ่งในการวิจัยนี้เลือกใช้สมการเส้นถดถอยในรูปฟังก์ชันเอกซ์โปเนนเชียล จึงได้การกระจายอุณหภูมิตามแนวแกนของท่อว่า

$$T_w - T_a = A_1 \cdot e^{-B_1 x} \quad (2.31)$$

$$T_w - T_s = A \cdot e^{-Bx} \quad (2.32)$$

นั่นคือ เราได้ค่าคงที่ B และ B_1 จากการทดลอง

ขั้นตอนต่อไปให้ทำการหาอัตราการสูญเสียความร้อนทั้งหมดตลอดความยาว L ด้วยการอินทิเกรตผลต่างอุณหภูมิผิวท่อและผิวฉนวน ($T_w - T_s$) ตามสมการ (2.9) ได้ผลดังนี้

$$Q = \frac{2\pi \cdot k_1 A}{(-B) \ln\left(\frac{D_3}{D_2}\right)} [e^{-BL} - 1] \quad (2.33)$$

หลังจากนั้นด้วยค่า Q จากสมการ (2.33) จึงเริ่มคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนรวม เมื่อคิดตั้งแต่ผิวท่อด้านนอกผ่านฉนวนจนถึงอากาศภายนอกท่อ (h_o) จากสมการต่อไปนี้

$$h_o = \frac{Q}{\pi \cdot D_3 L \cdot \Delta T_{lm}} \quad (2.34)$$

โดยที่ ΔT_{lm} คือ
$$\frac{T_{w1} - T_{w2}}{\ln\left(\frac{T_{w1} - T_a}{T_{w2} - T_a}\right)}$$

จากความรู้ในหัวข้อ 2.4 เมื่อทำการเทียบสัมประสิทธิ์ระหว่างสมการ (2.30) กับ (2.31) แล้วพบความสัมพันธ์ว่า

$$B_1 = \frac{U \cdot \pi \cdot D_3}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (2.35)$$

และ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม โดยคิดตั้งแต่ของไหลภายในท่อจนถึงอากาศภายนอกท่อ ซึ่งกรณีนี้เราสามารถหาค่า U ได้จาก

$$\frac{1}{U} = \frac{D_3}{D_1 \cdot h_i} + \frac{D_3 \cdot \ln(D_2 / D_1)}{2 \cdot k_p} + \frac{1}{h_o} \quad (2.36)$$

โดยที่ h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับที่เกิดขึ้นด้านในท่อ

k_p คือ ค่าความนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณ พจน์ที่สองทางขวาของสมการ (2.36) สามารถไม่นำมาคำนวณได้ เนื่องจาก ค่า k_p มีค่าสูง อีกทั้ง D_2 และ D_1 มีค่าต่างกันไม่มาก สมการ (2.36) จึงลดรูปเป็น

$$\frac{1}{U} = \frac{D_3}{D_1 \cdot h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.37)$$

$$\text{และด้วยความสัมพันธ์} \quad h_i = h_i(\text{Re}_D, \text{Pr}, f/8, k_f, D_1) \quad (2.38)$$

ซึ่งสมการ (2.38) นี้เราสามารถเลือกใช้ได้ตามกรณีที่เหมาะสมกับลักษณะท่อ สภาวะการไหล ซึ่งงานวิจัยนี้เลือกใช้สมการ (2.13) สำหรับท่อกลม สมการ (2.13) และ (2.16) สำหรับท่อเหลี่ยม และสมการ (2.12) สำหรับการไหลแบบราบเรียบ

และเราสามารถคำนวณ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ เพื่อใช้ในสมการ (2.38) ได้จาก

$$\text{กรณีท่อกลม} \quad \text{Re}_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_1 \mu} \quad (2.39)$$

$$\text{กรณีท่อสี่เหลี่ยม} \quad \text{Re}_{DH} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{P \cdot \mu} \quad (2.40)$$

ต่อจากนี้จึงเริ่มทำการคำนวณ แบบกลับป้อน (Iterative) เพื่อหาค่า $\dot{m}$ ที่ทำให้ระบบสมการเป็นจริง โดยเริ่มคำนวณจากการ สมมุติค่าเริ่มต้นของ $\dot{m}$ แล้วแทนค่าในสมการ (2.39) ทำให้ได้ค่า Re_D นำไปแทนต่อในสมการ (2.38) จะได้ค่า h_i แล้วจึง นำ h_i ไปแทนสมการ (2.37) จะทำให้ได้ค่า U ด้วยค่า U นี้เองเมื่อนำไปแทนในสมการ (2.35) ก็จะทำให้ได้ค่า $\dot{m}$ ค่าใหม่ ซึ่งค่า $\dot{m}$ ค่าใหม่นี้ จะนำกลับไปแทนในสมการที่ (2.39) เป็นรอบที่

สองและวนซ้ำเดิมจนกว่า ตัวแปรทุกตัวมีการลู่เข้าหาคำตอบ ซึ่งคำตอบลู่เข้าแล้วเราจึงสามารถนำค่าอัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$) ที่ปรากฏในรอบการคำนวณหลังสุดไปแสดงเป็นคำตอบได้

การคำนวณแบบซ้ำกลับไปมา (Iterative) ข้างต้นสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและง่ายดายโดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งลำดับและขั้นตอนการคำนวณสามารถแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนดังรูป 2.5

2.5.2 วิธีการคำนวณสำหรับท่อที่ไม่ได้หุ้มฉนวน

ในกรณีที่ต้องการประยุกต์ใช้การประมาณอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลในท่อด้วยการวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียกับท่อที่ไม่หุ้มฉนวนก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับท่อที่หุ้มฉนวน เพียงแต่ทำการคำนวณหาค่าอัตราการสูญเสียความร้อนของของไหล ที่เราไม่สามารถหาได้จากการอินทิเกรตผลต่างอุณหภูมิที่ผิวฉนวนและผิวท่อได้ ดังนั้นในการคำนวณจึงต้องอาศัยการหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติ (h_o) จากสูตรอิมพิริกัลมาทดแทน ซึ่งรายละเอียดการคำนวณจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

เริ่มต้นขั้นตอนแรกด้วยการวัดอุณหภูมิผิวท่อที่ระยะต่างกันตลอดความยาวท่อที่กำลังพิจารณา (T_w) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาสมการการถดถอยของ ผลต่างอุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิอากาศภายนอกท่อ ($T_w - T_a$) ซึ่งเราจะได้สมการการถดถอยเช่นเดียวกับสมการ (2.31) จากนั้นนำข้อมูลอุณหภูมิผิวท่อและอุณหภูมิห้องไปคำนวณค่า สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายนอกท่อ จากสมการ

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}_o D_2}{k_a} = 0.48 \cdot Ra_D^{0.25} \quad (2.41)$$

ซึ่งมีเงื่อนไขการใช้งานที่ $10^4 < Ra_D < 10^7$

เมื่อ
$$Ra_D = \frac{g\beta \cdot (T_w - T_a) D_2^3}{\nu \alpha} \quad (2.42)$$

เมื่อได้ค่า h_o ตามต้องการแล้วจึงคำนวณอัตราการสูญเสียความร้อนของท่อให้กับอากาศภายนอกจากสมการดังนี้

$$Q = h_o P \cdot L \cdot \Delta T_{lm} \quad (2.43)$$

โดยที่ P คือ ความยาวเส้นรอบรูปภายนอกท่อ กรณีนี้ใช้ค่า D_2

ΔT_{lm} คือ Log mean temperature difference มีค่า
$$\frac{(T_{w1} - T_a) - (T_{w2} - T_a)}{\ln \left(\frac{T_{w1} - T_a}{T_{w2} - T_a} \right)}$$

h_o คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนตามธรรมชาติที่เกิดขึ้นภายนอกท่อ

จากความรู้ในหัวข้อ 2.4 สำหรับท่อเปลือย พบความสัมพันธ์ว่า

$$B_1 = \frac{U \cdot \pi \cdot D_2}{\dot{m} \cdot c_p} \quad (2.44)$$

ซึ่ง B_1 เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลองวัดอุณหภูมิผิวท่อและทำการหาสมการการกระจายอุณหภูมิ
 U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยรวมตั้งแต่ของไหลภายในท่อจนถึงอากาศภายนอกท่อ ซึ่งกรณี
 นี้เราสามารถหาค่า U ได้จาก

$$\frac{1}{U} = \frac{D_2}{D_1 \cdot h_i} + \frac{D_2 \cdot \ln(D_2 / D_1)}{2 \cdot k_p} + \frac{1}{h_o} \quad (2.45)$$

โดยที่ h_i คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบบังคับที่เกิดขึ้นด้านในท่อ

k_p คือ ค่าความนำความร้อนของวัสดุที่ใช้ทำท่อ

และเพื่อความสะดวกในการคำนวณ พจน์ที่สองทางขวาของสมการ (2.45) สามารถไม่นำมา
 คำนวณได้ เนื่องจาก ค่า k_p มีค่าสูง อีกทั้ง D_2 และ D_1 มีค่าต่างกันไม่มาก สมการ (2.45) จึงลดรูปเป็น

$$\frac{1}{U} = \frac{D_2}{D_1 \cdot h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (2.46)$$

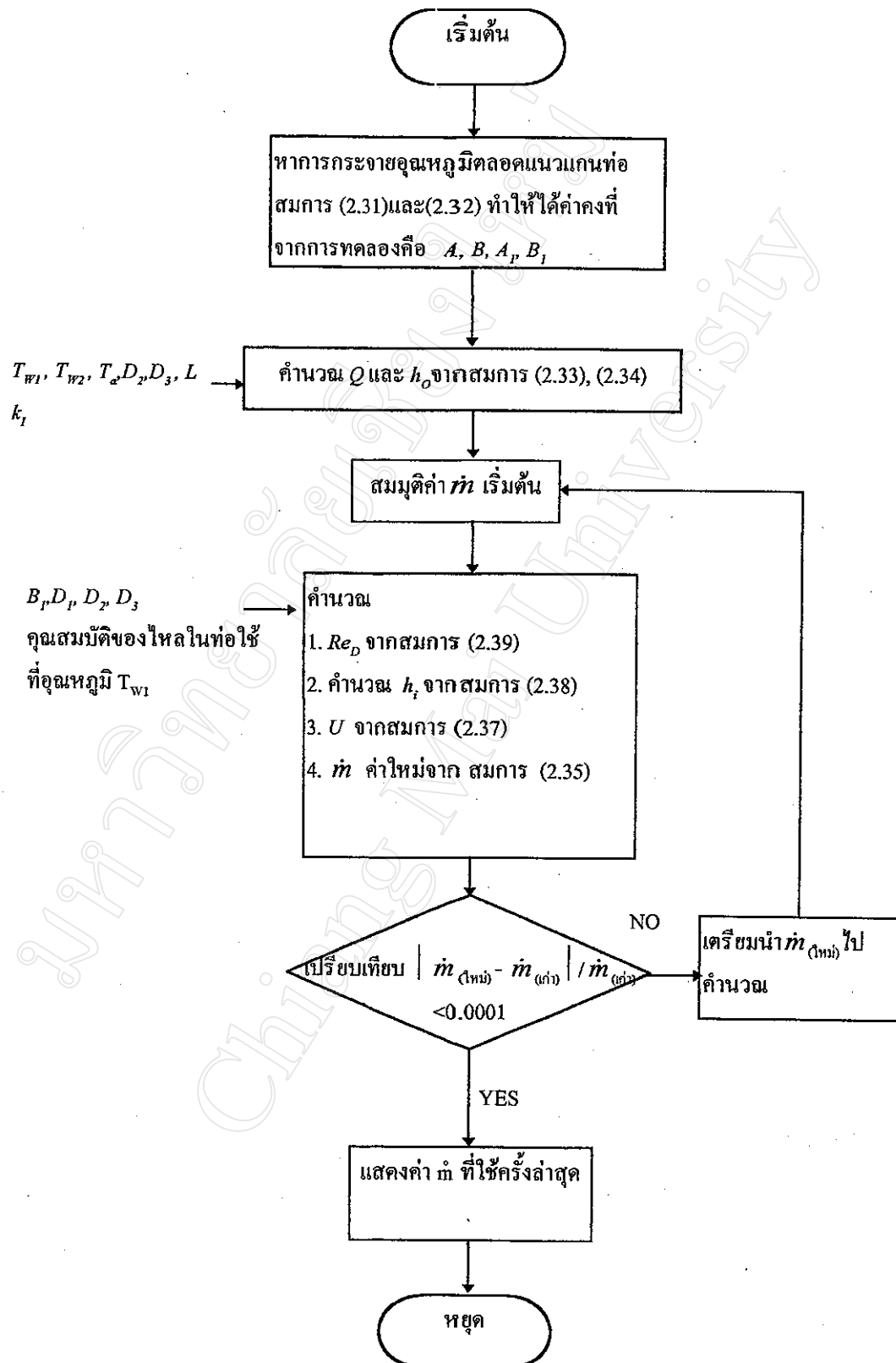
$$\text{และด้วยความสัมพันธ์} \quad h_i = h_i(\text{Re}_D, \text{Pr}, f/8, k_f, D_1) \quad (2.47)$$

ซึ่งสมการ (2.47) นี้เราสามารถเลือกใช้ได้ตามกรณีที่เหมาะสมกับลักษณะท่อ สภาวะการไหล ซึ่งงานวิจัยนี้เลือก
 ใช้สมการ (2.13) สำหรับท่อกลม สมการ (2.13) และ (2.16) สำหรับท่อเหลี่ยม และสมการ (2.12) สำหรับการไหล
 แบบราบเรียบ

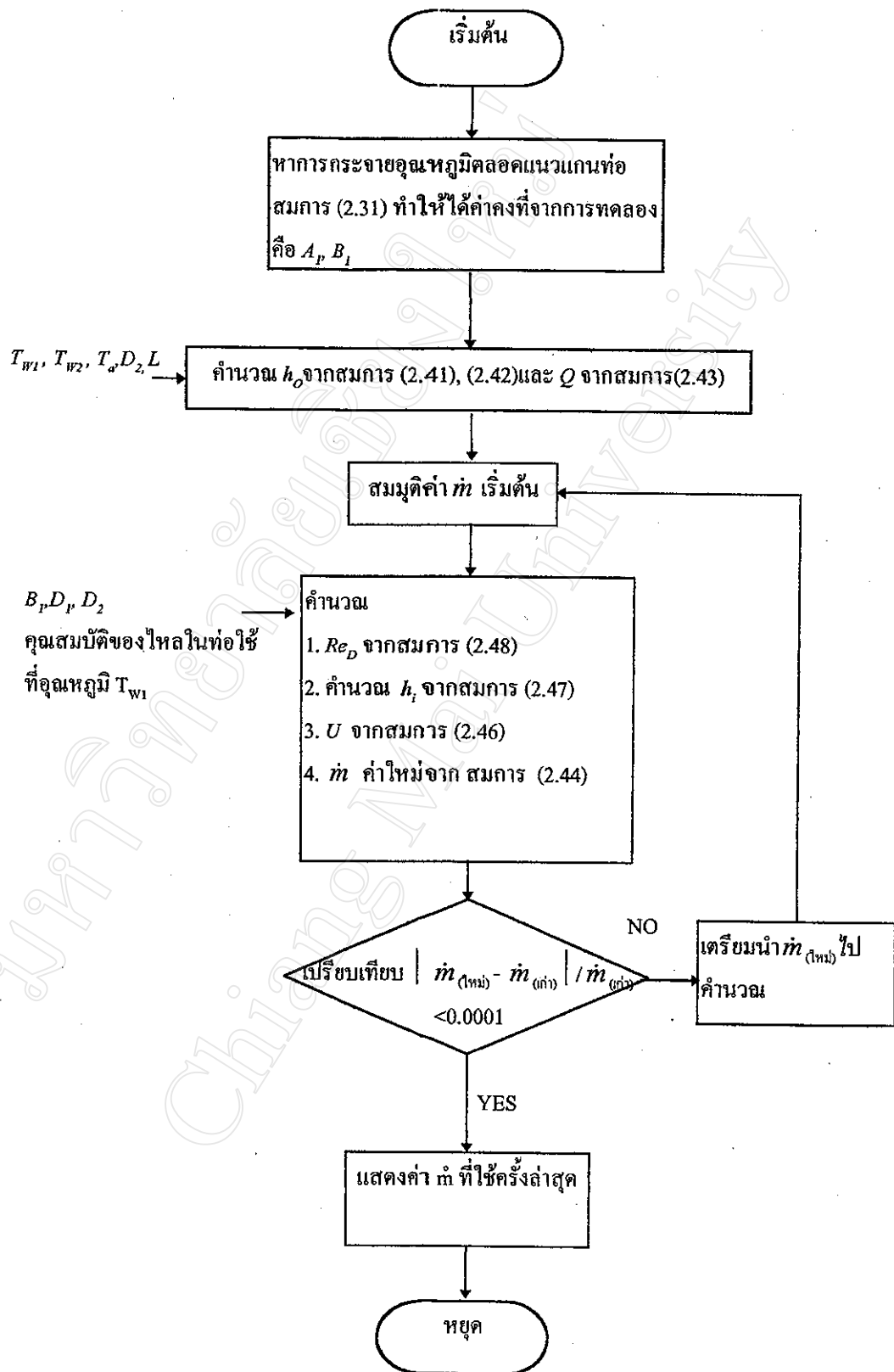
และเราสามารถคำนวณ ตัวเลขเรย์โนลด์สเพื่อใช้ในสมการ (2.47) ได้จาก

$$\text{กรณีท่อกลม} \quad \text{Re}_D = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D_1 \mu} \quad (2.48)$$

ต่อจากนี้จึงเริ่มทำการคำนวณ แบบกลับป้อนมา (Iterative) เพื่อหาค่า $\dot{m}$ ที่ทำให้ระบบสมการเป็นจริง โดยเริ่ม
 คำนวณจากการ สมมุติค่าเริ่มต้นของ $\dot{m}$ แล้วแทนค่าในสมการ (2.48) ทำให้ได้ค่า Re_D นำไปแทนต่อในสมการ
 (2.47) จะได้ค่า h_i แล้วจึง นำ h_i ไปแทนสมการ (2.46) จะทำให้ได้ค่า U แล้วนำไปแทนในสมการ (2.44)
 จะทำให้ได้ค่า $\dot{m}$ ค่าใหม่ ซึ่งค่า $\dot{m}$ ค่าใหม่นี้จะนำกลับไปแทนในสมการ (2.48) เป็นรอบที่สองและวนซ้ำเดิม
 จนกว่า ตัวแปรทุกตัวมีการสู่เข้าหาค่าตอบ ซึ่งค่าตอบสู่เข้าแล้วเราจึงสามารถนำค่าอัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}$) ที่
 ปรากฏในรอบการคำนวณหลังสุดไปแสดงเป็นคำตอบได้ เช่นเดียวกันกับการคำนวณของท่อหุ้มฉนวนลำดับการ
 คำนวณสามารถแสดงเป็นแผนภูมิได้ในรูป 2.6



รูป 2.5 แสดงแผนภูมิลำดับการคำนวณเพื่อประมาณอัตราการไหลเชิงมวลสำหรับท่อหุ้มฉนวน



รูป 2.6 แสดงแผนภูมิลำดับการคำนวณเพื่อประมาณอัตราการไหลเชิงมวลสำหรับท่อเปลือก