บทที่ 3
ทฤษฎี

การถ่ายเทความร้อนเป็นการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง โดยมีอุณหภูมิของระบบเป็นสิ่งที่บอกถึงระดับของพลังงานดังกล่าว ระบบที่มีอุณหภูมิสูงแสดงว่าโมเลกุลของระบบมีการเคลื่อนไหวกันอย่างมาก ส่วนระบบที่มีอุณหภูมิต่ำแสดงว่าโมเลกุลมีการเคลื่อนไหวน้อย เมื่อโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่อย่างรุนแรงปะทะกับโมเลกุลที่เคลื่อนที่อย่างเชื่องช้าในระบบที่มีอุณหภูมิต่ำ โมเลกุลที่เชื่องช้าจะถูกกระตุ้นให้มีพลังงานสูงขึ้นทำให้ระบบที่มีอุณหภูมิต่ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะเดียวกันในระบบที่มีอุณหภูมิสูงก็จะมีระดับพลังงานลดลงเนื่องจากได้มีการสูญเสียพลังงานบางส่วนออกไป ทำให้ระบบที่มีอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิลดลงเช่นกัน จากหลักการข้างต้นทำให้มนุษย์ได้ทำการพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือเครื่องใช้ต่างๆ สำหรับการถ่ายทอดพลังงานจากส่วนหนึ่งไปยังอีกส่วนหนึ่ง ดังจะสามารถพบเห็นได้ทั่วไปทั้งในชีวิตประจำวัน และวงการอุตสาหกรรม แต่โดยทั้งหมดนี้การถ่ายเทความร้อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง สามารถเกิดขึ้นได้จากเหตุผล 3 ประการคือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งเพื่อความสะดวกในการคำนวณทางวิศวกรรมเรามักจะพิจารณาการถ่ายเทความร้อนแยกกันในแต่ละประเภทและนำมารวมกันในผลสุดท้าย

3.1 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

3.1.1 การนำความร้อน (Conduction Heat Transfer)

การนำความร้อนหมายถึงการส่งผ่านพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวกลาง อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านตัวกลางจากด้านที่มีอุณหภูมิสูงไปยังด้านที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการส่งถ่ายความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งสู่อีกโมเลกุลหนึ่งอย่างต่อเนื่องกัน โดยที่โมเลกุลดังกล่าวจะมีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนสามารถเกิดขึ้นได้ดีมากในตัวกลางที่เป็นของแข็ง และสามารถเกิดขึ้นได้บ้างในตัวกลางที่เป็นของเหลว และก๊าซ และความร้อนที่เคลื่อนที่โดยการนำความร้อนเกิดขึ้นได้โดยการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ นอกจากนี้อิเลคตรอนยังเคลื่อนที่ไปได้โดยการสั่นสะเทือนของโมเลกุลภายในของแข็งในลักษณะของพลังงานความสั่นสะเทือนอีกด้วย โดยทั่วไปจะพบว่าโลหะจะสามารถนำความร้อนได้ดีกว่าอโลหะ เนื่องจากโลหะมีโมเลกุลที่มีการจัดเรียงอยู่อย่างเป็นระเบียบ ความร้อนจึงถูกถ่ายเทผ่านไปในลักษณะของพลังงานของความสั่นสะเทือนได้อย่างสะดวก และโลหะก็ยังมีจำนวนอิเลคตรอนจำนวนมาก ซึ่งช่วยให้การส่งผ่านพลังงานความร้อนได้ดีมากยิ่งขึ้น

การนำความร้อนโดยการนำความร้อนสามารถหาได้โดยอาศัยกฎของฟูเรียร์ (Fourier's law) ซึ่งกล่าวไว้ว่า สำหรับการนำความร้อนผ่านตัวกลางทิศทางใดทิศทางหนึ่ง อัตราการถ่ายเท

ความร้อนโดยการนำความร้อน (Q_x) ผ่านตัวกลางในทิศทางนั้นเป็นปฏิภาคโดยตรงกับพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่ตั้งฉากกับทิศทางของการไหลของความร้อน (A) และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวกลางในทิศทางดังกล่าว dT/dx สำหรับการนำความร้อนในทิศทาง x ภายใต้สภาวะคงตัว (Steady state)

$$Q_x = -kA_x \frac{dT}{dx} \tag{3.1}$$

หรือ

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \tag{3.2}$$

เมื่อ Q_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด A_x , $Watt$

q_x คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน , W/m^2

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal conductivity) , W/m^oC

A_x คือ พื้นที่หน้าตัดของผนังราบที่ตั้งฉากกับทิศทางการนำความร้อน, m^2

$\frac{dT}{dx}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงระยะทาง dx , ^oC

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัดและทดสอบ โดยทั่วไปค่าสภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิ ซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิสมบูรณ์และค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวต่างๆ ยกเว้น น้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิสัมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริงจะใช้ค่าสภาพการนำความร้อนคงที่ ซึ่งหาได้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ค่าสภาพการนำความร้อนของวัสดุต่างๆ (ที่ 300 K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน, $W/m^{O}C$
เงิน	429
ทองแดง	401
ทอง	317
อะลูมิเนียม	237
เหล็ก	80.2
ปรอท	8.54
แก้ว	1.4
อิฐ	0.72
น้ำ	0.613
ผิวหนังของคน	0.37
สารทำความเย็น R-12	0.072
อากาศ	0.026

3.1.2 การพาความร้อน (Convection Heat transfer)

การพาความร้อนคือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการเคลื่อนพาของของไหล โดยเฉพาะอย่างยิ่งการถ่ายความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลที่พัดผ่านไปบนพื้นผิวของแข็งนั้น โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวของแข็งกับของไหลอาจจะเป็นการนำความร้อนอย่างเดียว ในกรณีที่มีการเคลื่อนของของไหลเทียบกับพื้นผิวของแข็ง โดยการถ่ายเทความร้อนโดยการพาสามารถแบ่งออกได้ 2 แบบ คือ การพาตามธรรมชาติ (Natural convection) และ การพาโดยบังคับ (Force convection) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อของไหลมีความเร็วอยู่แล้วด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลมหรือเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น โดยการไหลแบบบังคับสามารถแบ่งการไหลออกเป็นสองแบบคือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) โดยการไหลแบบราบเรียบ ของไหลจะไหลเป็นชั้นๆขนานกัน ความร้อนจะถ่ายเทจากผิวของของแข็งโดยการนำและถ่ายเทต่อๆ กันไปในของไหลโดยการนำผ่านแต่ละชั้นของของไหล ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน ของไหลจะเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ การเคลื่อนที่ของความร้อนส่วนใหญ่ จะเกิดจากอนุภาคของของไหลที่ได้รับความร้อนมา แล้วเคลื่อนที่นำความร้อนไปยังที่อื่น ดังนั้นหากการไหลยิ่งมีความปั่นป่วนมากเท่าใดก็จะมีการเคลื่อนที่ของความร้อนมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนโดยการพา จะมีความสัมพันธ์อย่างมากกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของของไหล

สำหรับการพาความร้อนนั้น สมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาจะเป็นไปตามกฎการทำให้เย็นตัวลงของนิวตัน (Newton's law of cooling) คือ

$$Q_{conv.} = hA(T_s - T_f) \quad (3.3)$$

หรือ $$q_{conv.} = h(T_s - T_f) \quad (3.4)$$

โดย $T_s > T_f$

เมื่อ $Q_{conv.}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพาผ่านพื้นที่หน้าตัด A , $Watt$

$q_{conv.}$ คือ ฟลักซ์ความร้อนโดยการพา, W/m^2

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2C

T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน , ^oC

T_f คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล , ^oC

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลของของไหลบางชนิดและบางประเภทของการพาความร้อนไว้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของไหล	ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน, W/m^2C
การพาความร้อนแบบอิสระของอากาศ	5 – 25
การพาความร้อนแบบอิสระของน้ำ	20 – 100
การพาความร้อนแบบบังคับของอากาศ	10 – 200
การพาความร้อนแบบบังคับของน้ำ	50 – 10,000
น้ำในระหว่างการระเหย	3,000 – 100,000
น้ำในระหว่างการควบแน่น	5,000 – 100,000

3.1.3 การแผ่รังสีความร้อน (Thermal Radiation)

การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อนนั้น วัตถุจะเปลี่ยนพลังงานส่วนหนึ่งของตัวเอง ไปเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เมื่อคลื่นเหล่านี้เคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุอื่นในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วแสง พลังงานส่วนหนึ่งของคลื่นเหล่านี้จะถูกดูดไว้แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน วัตถุที่แผ่รังสีจะสูญเสียพลังงานของตัวเอง และถ้าวัตถุนั้นไม่ได้รับพลังงานจากแหล่งอื่นเข้ามา อุณหภูมิของวัสดุนั้นก็จะลดลง โดยอุณหภูมิของวัสดุจะคงที่ก็ต่อเมื่ออัตราการสูญเสียความร้อนเท่ากับอัตราการรับความร้อน การแผ่รังสีความ

ร้อนสามารถส่งผ่านสูญญากาศได้ ซึ่งต่างจากการนำความร้อนและการพาความร้อนซึ่งจะต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน

เมื่อวัตถุใดมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ วัตถุนั้นจะแผ่รังสีออกมาตลอดเวลา ที่ทุกๆความยาวคลื่น โดยทั่วไปวัตถุจะแผ่รังสีออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆ กัน ปริมาณความร้อนทั้งหมดที่วัตถุแผ่รังสีออกมา สามารถหาได้โดยการรวมความร้อนที่วัตถุนี้แผ่ออกมาที่ความยาวคลื่นต่างๆกัน โดยอัตราการแผ่รังสีความร้อนทั้งหมดต่อหน่วยพื้นที่เรียกว่า พลังงานการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลักษณะพื้นผิววัตถุ

$$Q_{rad} = A_{rad}\varepsilon\sigma T_s^4 \tag{3.5}$$

Q_{rad} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีความร้อน, *Watt*

A_{rad} คือ พื้นที่ผิวที่มีการแผ่รังสีความร้อน, m^2

ε คือ สภาพการแผ่รังสีของพื้นผิวมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

σ คือ ค่าคงที่สเตฟาน-โบลตซ์มันน์ เท่ากับ $5.7\text{x}10^{-8}$

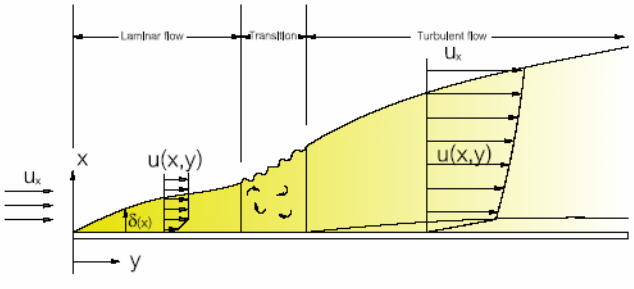
T_s คือ อุณหภูมิผิวของวัตถุ, *K*

ซึ่งโดยทั่วไปที่หากอุณหภูมิผิวของวัสดุใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อม ผลกระทบจากการแผ่รังสีความรอนนี้จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผลกระทบดังกล่าวมีค่าน้อยมากเช่นกัน ดังนั้นจึงไม่นำผลดังกล่าวมาพิจารณาในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.2 ทฤษฎีพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อนโดยการพา

3.2.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลชนิดการไหลภายนอก

การไหลภายนอก คือ การไหลของของไหลที่มิได้จำกัดให้ไหล ไหลในบริเวณที่กำหนด แต่เป็นการไหลผ่านผิวนอกของของแข็งหรือของวัสดุ เช่น การไหลผ่านผนังราบ การไหลตั้งฉากกับวัตถุรูปทรงกระบอก การไหลของของไหลมากระทบกับของแข็งรูปร่างลักษณะต่างๆ ในทิศทางใดก็ได้



รูปที่ 3.1 แสดงชั้นชิดผิวความเร็วสำหรับการไหลบนแผ่นราบ

จากรูปที่ 3.1 แสดงของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว U_x ไหลผ่านไปบนพื้นผิวแบนราบ ผลของความหนืดจะทำให้ของไหลที่อยู่ติดกับพื้นผิวของแข็งมีความเร็วเท่ากับพื้นผิว (เท่ากับศูนย์ในกรณีนี้) ส่วนของไหลที่อยู่ห่างออกไปก็จะมีความเร็วสูงขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งมีความเร็วเท่ากับ U_x ณ.จุดที่ห่างออกไประยะหนึ่ง ของไหลที่อยู่ห่างออกไปจากพื้นที่ผิวมากกว่าระยะดังกล่าวจะไม่ได้รับผลกระทบจากพื้นผิว กล่าวคือจะมีความเร็วเป็น U_x ชั้นของของไหลที่มีความเร็วมีการแปรเปลี่ยนจากศูนย์จนถึง U_x อันเนื่องจากอิทธิพลของความหนืดของของไหลนี้เรียกว่าชั้นชิดผิวของความเร็ว (Velocity boundary layer)

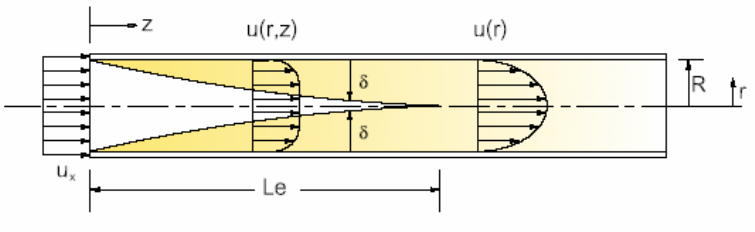
ในขณะเดียวกันกับที่พื้นผิวของแข็งทำให้ความเร็วของของไหลในชั้นชิดผิวลดลง ของไหลจะทำให้เกิดแรงฉุดต่อพื้นผิวในทิศทางการไหลของของไหล

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าความยาวที่เป็นคุณสมบัติเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าตัวเลขเรย์โนลด์คือระยะ x ที่วัดจากขอบส่วนหัว ดังนั้นที่ส่วนหัวซึ่ง x = 0 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ เท่ากับศูนย์ เมื่อเคลื่อนไปตามพื้นผิวในทิศทางของการไหลค่า x จะเพิ่มขึ้นทำให้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นพร้อมกันนั้นความหนาของชั้นชิดผิว จะหนาขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ในส่วนแรกของชั้นชิดผิวนั้นการไหลจะเป็นแบบราบเรียบ เมื่อค่า x เพิ่มขึ้นจนค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ $5x10^5$ การไหลจะเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งของไหลจะมีการผสมกันอย่างรุนแรง เป็นผลให้ความหนาของชั้นชิดผิวเพิ่มขึ้นอย่างมากและแรงฉุดที่กระทำต่อพื้นผิวก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แม้ในขณะที่การไหลในชั้นชิดผิวเปลี่ยนไปเป็นแบบปั่นป่วนแล้ว แต่ละชั้นของไหลบางๆที่อยู่ชิดกับพื้นผิวโดยที่การไหลภายในชั้นดังกล่าวยังคงมีการไหลแบบราบเรียบ เรียกว่าชั้นราบเรียบชิดผิว (Laminar sub layer)

3.2.2 ลักษณะการเคลื่อนที่ของของไหลชนิดการไหลภายในท่อ

การไหลภายในเป็นการไหลที่ของไหลถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ในบริเวณที่จำกัด เช่นการไหลของของไหลในท่อกลม ท่อรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและอื่นๆ เป็นต้น

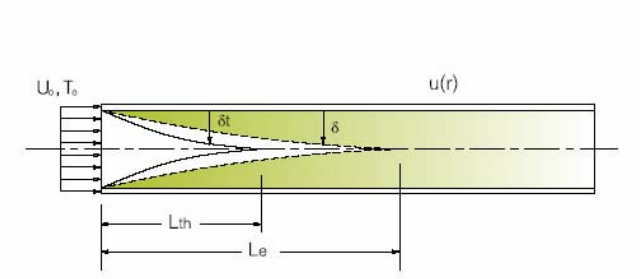


รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะการไหลภายในท่อ

การไหลในท่อจะมีสภาพคล้ายคลึงกับที่บรรยายข้างต้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 3.2 ชั้นชิดผิวจะเริ่มต้นขึ้นที่ขอบส่วนหัวซึ่งเป็นปากทางเข้าของท่อ ในช่วงแรกการไหลจะเป็นแบบราบเรียบ ความหนาของชั้นชิดผิวจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตามการไหล จนกระทั่งชั้นชิดผิวบรรจบกันที่

ศูนย์กลางท่อ เกิดเป็นการไหลที่เรียกว่า พัฒนาสมบูรณ์ (Fully developed) ส่วนการไหลในช่วงก่อนที่จะเกิดเป็นการไหลที่พัฒนาสมบูรณ์นั้นเรียกว่า การไหลบริเวณทางเข้า (Entrance region flow) การไหลที่พัฒนาสมบูรณ์ในท่ออาจจะเป็นการไหลแบบราบเรียบหรือปั่นป่วนก็ได้ ขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขเรย์โนลด์ว่ามีค่าต่ำกว่าหรือสูงกว่า 2,300 โดยการไหลทั้งสองแบบจะมีลักษณะการแจกแจงความเร็วที่แตกต่างกัน

สำหรับชั้นชิดผิวของความเร็ว (δ) และชั้นชิดผิวของอุณหภูมิ (δ_t) ไม่จำเป็นจะต้องหนาเท่ากัน ของไหลที่มีความหนืดมาก เช่น น้ำมันหล่อลื่นชั้นชิดผิวของความเร็วจะหนากว่า ส่วนของเหลวซึ่งนำความร้อนได้ดีจะมีชั้นชิดผิวของอุณหภูมิหนากว่า กล่าวคือความสัมพันธ์ของชั้นชิดผิวของความเร็วและอุณหภูมิ จะขึ้นอยู่กับตัวเลขไร้หน่วยของของไหลหรือที่เรียกว่าตัวเลขพรันต์ (Prandtl number ; *Pr*) ซึ่งสามารถจำแนกได้ดังนี้



รูปที่ 3.3 การพัฒนาของชั้นชิดผิวความเร็วและความร้อนภายในท่อกลม เมื่อค่า *Pr* มีค่าน้อยกว่า 1

3.3 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหลภายในท่อ

การไหลภายในท่อของของไหลสามารถแบ่งออกตามลักษณะการไหลได้เป็นสองแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ซึ่งของไหลจะเคลื่อนที่ไปอย่างมีระเบียบด้วยความเร็วค่อนข้างต่ำจึงไม่เกิดการผสมกันของกระแสของไหล และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) เป็นการไหลแบบไม่มีระเบียบ และเต็มไปด้วยความสับสนจึงเกิดการผสมกันของกระแสสูง การจำแนกการไหลภายในท่อของของไหลอาจใช้วิธีการสังเกตการไหลของของไหลที่ทางออกของท่อ โดยถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นสองลำจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นลำเดียวจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาได้จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงความหนืด (Viscous force) โดยถ้าค่าตัวเลขเรย์โนลด์น้อยกว่า 2,300 จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) หากค่าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ในช่วง 2,300 ถึง 4,000 จะเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow) และถ้าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \tag{3.6}$$

เมื่อ Re คือ ค่า Reynolds number

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, m.

μ คือ ความหนืดสัมบูรณ์ของของไหล, $kg/m.s$

กรณีท่อไม่กลม (Noncircular duct)

ในกรณีที่ท่อมีหน้าตัดไปเป็นวงกลม จะต้องพิจารณาในรูปเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter) ดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \tag{3.7}$$

กรณีเป็นท่อสี่เหลี่ยมหรือช่องขนานรูปสี่เหลี่ยม

$$D_h = \frac{4bh}{2(b+h)} \tag{3.8}$$

เมื่อ D_h คือ เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอลิค, m.

A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

P คือ ความยาวเส้นรอบของท่อ, m.

b คือ ความกว้างของช่องขนาน, m.

h คือ ความสูงของช่องขนาน, m.

3.3.1 การสมดุลพลังงาน กรณีให้ปริมาณฟลักซ์ความร้อนคงที่

การป้องกันความร้อนไหลออกนอกระบบสามารถทำได้ด้วยการหุ้มฉนวนกันความร้อนในบริเวณที่อาจก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงานสู่ภายนอกชิ้นงานทดสอบ (โดยสมมุติให้ไม่มีการสูญเสียหรือการถ่ายเทความร้อนออกนอกระบบ) ปริมาณความร้อนที่คายออกมาจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับ จากทฤษฎีการสมดุลความร้อนพบว่าความร้อนที่ของไหลได้รับจะต้องเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทออกมาจากแหล่งกำเนิด

$$Q_{air} = \dot{m} C_p (T_i - T_o) \tag{3.9}$$

$$\dot{m} = \rho Q \tag{3.10}$$

$$\dot{Q} = VA \tag{3.11}$$

เมื่อ Q_{air} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่อากาศได้รับ , *Watt*

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล, *kg/s*

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของของไหล, *kJ/kg.°C*

T_i คือ อุณหภูมิของไหลด้านเข้า, *°C*

T_o คือ อุณหภูมิของไหลด้านออก, *°C*

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, *kg/m³*

$\dot{Q}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล, *m³/s*

A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อที่ของไหลไหลผ่าน, *m²*

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, *m/s*

อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ของไหลได้รับเท่ากับ

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_f) \tag{3.12}$$

โดยที่

$$T_s = \frac{\Sigma T_n}{n} \tag{3.13}$$

$$T_f = \frac{(T_i + T_o)}{2} \tag{3.14}$$

เมื่อ Q_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนที่ของไหลได้รับ, *Watt*

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, *W/m².C*

A_s คือ พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อน, *m²*

T_s คือ อุณหภูมิผิวเฉลี่ยผนังร้อน, *°C*

T_n คือ อุณหภูมิผิวผนังร้อน, *°C*

T_f คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหล, *°C*

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน ; h

ค่าของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนกรณีเป็นท่อกลมผิวเรียบ, h จะขึ้นอยู่กับรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สภาพการไหลของของไหล, สมบัติเชิงความร้อนของของไหล และยังขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาได้จาก

$$h = \frac{Nu_D\, k}{D} \tag{3.15}$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2.C$

k คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของวัตถุ $W/m\ ^oC$

Nu_D คือ ค่าตัวเลขนัสเซิลท์

3.3.2 กรณีการไหลเป็นแบบราบเรียบ Laminar flow ที่สภาวะ Thermal fully developed กรณี Constant heat flux ตามรูปแบบท่อดังนี้

กรณีท่อกลม $Nu_D = 4.36$

กรณีท่อสามเหลี่ยมด้านเท่า $Nu_D = 3.11$

กรณีท่อสี่เหลี่ยมสูง เท่ากับ h และกว้างเท่ากับ b

h/b เท่ากับ infinity $Nu_D = 8.235$

h/b เท่ากับ 0.125 $Nu_D = 6.490$

h/b เท่ากับ 0.250 $Nu_D = 5.330$

h/b เท่ากับ 0.500 $Nu_D = 4.120$

h/b เท่ากับ 1.000 $Nu_D = 3.610$

3.3.3 กรณีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน Turbulent flow ที่ Fully Developed Turbulent ในท่อกลมเรียบ โดยหา Nu_D หาได้จากสมการของ *Dittus-Boelter*

$$St = \frac{Nu}{Re.Pr} = \frac{f}{8} \tag{3.16}$$

$$St = 0.023Re^{-0.20} \tag{3.17}$$

ดังนั้น $$Nu_D = 0.023Re^{-0.20}Pr^n \tag{3.18}$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการให้ความร้อนแก่ของไหลภายในท่อ $(T_s > T_f)$

$n = 0.3$ สำหรับการดึงความร้อนออกจากของไหลภายในท่อ $(T_s < T_f)$

Pr คือ *Prandtl Number*

โดยมีช่วงของเงื่อนไขดังนี้ $\left| \begin{array}{l} 0.7 \le Pr \le 160 \\ Re_D \ge 10{,}000 \\ L/D \ge 10 \end{array} \right|$

[ที่มา : Sadik Kakac and Yaman Yener “Convection heat transfer” 2nd edition. P.292]

3.3.4 การสูญเสียความดันภายในท่อ

การไหลภายในท่อของของไหล สามารถเป็นไปได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในกรณีการไหลในท่อที่มีของไหลไหลเต็มท่อ ค่าความดันลดหรือพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

3.3.4.1 กรณีการไหลภายในท่อกลมที่มีลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ ค่าตัวประกอบเสียดทานสามารถหาได้จาก

$$f = \frac{64}{Re_D} \tag{3.19}$$

3.3.4.2 กรณีการไหลเป็นแบบปั่นป่วน Turbulent flow การวิเคราะห์จะยุ่งยากมากกว่าโดยอาจพิจารณาความสัมพันธ์ได้จากไดอะแกรม Moody โดยพิจารณาจากค่าตัวเลขเรย์โนลด์และสัมประสิทธิ์ความขรุขระภายในช่องท่อ หรืออาจใช้สมการในการวิเคราะห์ ซึ่งค่าดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \tag{3.20}$$

เมื่อ ΔP คือ ค่าความดันลด, Pa

f คือ ค่าตัวประกอบเสียดทาน

L คือ ความยาวของท่อ, m

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ, m/s

3.4 กำลังของเครื่องกำเนิดความร้อน (Power of Heater)

การคำนวณหากำลังของเครื่องทำความร้อนจำเป็นต้องทราบถึงปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบก่อนแล้วจึงจะสามารถหากำลังของเครื่องทำความร้อนได้ โดยกำลังของเครื่องทำความร้อนสามารถหาได้จากอัตราการไหลเชิงมวลคูณกับค่าความจุความร้อนจำเพาะและผลต่างของอุณหภูมิก็จะได้สมการดังนี้

$$Q_{air} = \dot{m} C_p (T_i - T_o) \tag{3.21}$$

$$\dot{m} = \rho A V \tag{3.22}$$

โดย Q_{air} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, $Watt$

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล , kg/s

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

A คือ พื้นที่หน้าตัดท่อที่ของไหลไหลผ่าน, m^2

C_p คือ ความร้อนจำเพาะของอากาศ, $kJ/kg.^oC$

T_i คือ อุณหภูมิของไหลด้านเข้า. ^oC

T_o คือ อุณหภูมิของไหลด้านออก, ^oC

3.5 ตัวประกอบเสียดทาน (Friction factor)

เมื่อของไหลที่ไหลภายในด้วยความเร็วท่อจะมีการสูญเสียเกิดขึ้นเนื่องจากการไหลของของไหลภายในท่อ,การเปลี่ยนแปลงของขนาดพื้นที่หน้าตัดท่ออย่างกะทันหันและการเปลี่ยนทิศทางการไหล เป็นต้น ดังนั้นการหาความดันตกคร่อมรวมที่เกิดขึ้นภายในท่อจะสามารถหาได้จากสมการของแฟนนิ่ง (Fanning)

คือ

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \tag{3.23}$$

เมื่อ ΔP คือ ความดันตกคร่อม , Pa

f คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

L คือ ความยาวของท่อ, $m.$

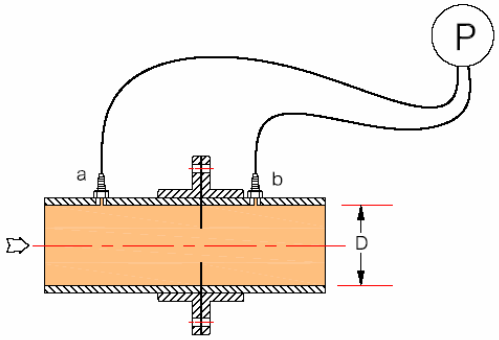
D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ, $m.$

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

3.6 เครื่องมือวัดอัตราการไหล

เครื่องมือวัดอัตราการไหลแบบออริฟิคเป็นเครื่องมือสำหรับของไหลที่ไหลภายในท่อแบบหนึ่งซึ่งออกแบบให้เป็นแผ่นมีลักษณะเจาะรูกลมตรงกลางและเจาะบากคมพร้อมติดตั้งมาโนมิเตอร์แบบวัดผลต่างความดัน โดยพิจารณาจุดวัดที่ a อยู่ด้านหน้าแผ่น ออริฟิคเป็นระยะ D และจุดที่ b อยู่ด้านหลังแผ่นออริฟิคเป็นระยะ $0.5D$



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์วัดอัตราการไหลแบบออริฟิค