

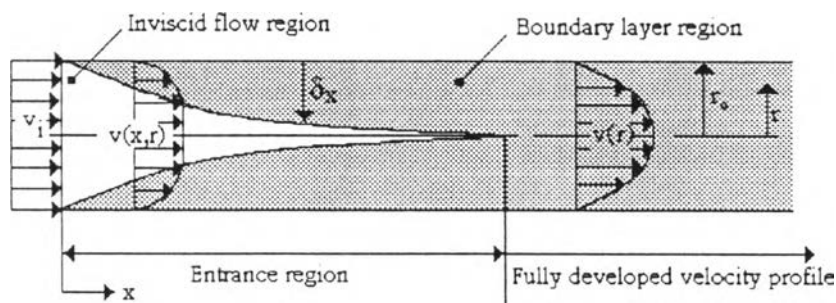
### บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### การไหลภายในท่อ (Flow inside duct)

ในงานทางวิศวกรรม เช่น การออกแบบระบบปรับอากาศ อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน การออกแบบระบบท่อน้ำร้อนน้ำเย็นภายในอาคาร จำเป็นต้องพิจารณาถึงการไหลภายในท่อเป็นสำคัญ การไหลของของไหลยังขึ้นกับสภาวะทางการไหลและสภาวะทางความร้อนอีกด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงสภาวะเงื่อนไขต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### สภาวะทางการไหลของของไหล

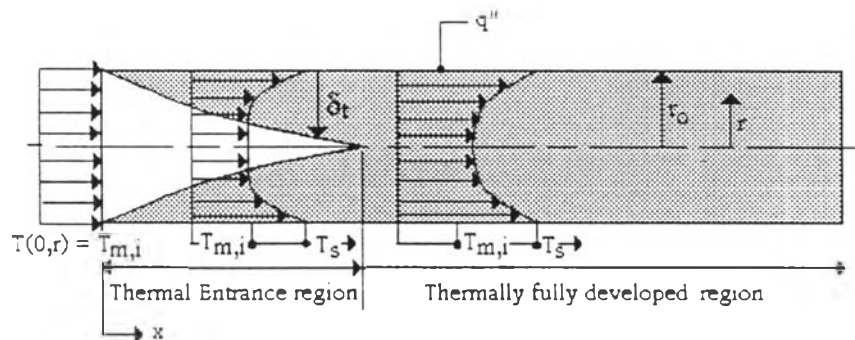


รูปที่ 3.1 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขต

จากรูปที่ 3.1 พิจารณาการไหลของของไหลในท่อหน้าตัดกลมมีรัศมี  $r_0$  และความเร็วของของไหลเข้าสู่ท่อด้วยความเร็วสม่ำเสมอตลอดแนวรัศมี (Uniform velocity) ทันทีที่ของไหลสัมผัสกับผิวท่อผลจากความหนืดของของไหลจะทำให้เกิดชั้นขอบเขต (Boundary layer) ขึ้น และความหนาของชั้นขอบเขต ( $\delta_x$ ) จะเพิ่มขึ้นตามแกนการไหล ( $x$ ) จนกระทั่งเข้าสู่แนวศูนย์กลางท่อในช่วงนี้เรียกว่าช่วงทางเข้า (Entrance region) ซึ่งเป็นช่วงที่รูปแบบของความเร็ว (Velocity profile) มีการเปลี่ยนรูปตลอดแนวแกนการไหล กล่าวคือความเร็วของของไหลขึ้นกับระยะตามแกนการไหลและรัศมีท่อ ;  $v(x,r)$  และภายหลังจากช่วงนี้เป็นช่วงที่ชั้นขอบเขตเข้าสู่แนวศูนย์กลางท่อแล้วซึ่งเป็นช่วง

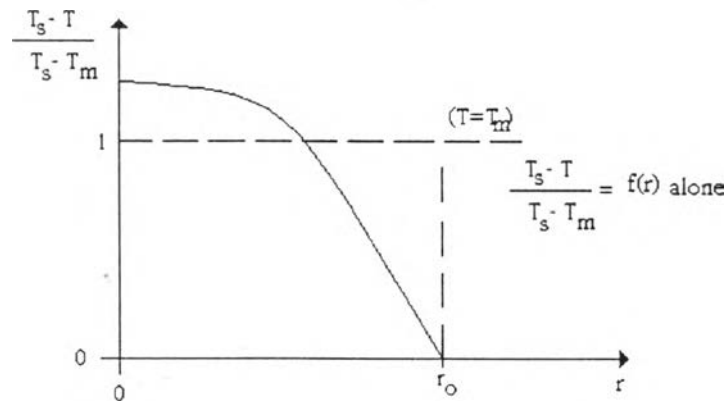
ที่รูปแบบของความเร็วงรูปเรียกว่า ช่วงรูปแบบของความเร็วงรูป (Fully developed velocity profile) กล่าวคือความเร็วของของไหลไม่ขึ้นกับระยะตามแกนการไหลแต่ขึ้นกับรัศมี ;  $v(r)$  ซึ่งทำให้ค่าความลาดเอียงของความเร็ว (Velocity gradient) เมื่อเทียบกับระยะตามแกนการไหล มีค่าเป็นศูนย์ ( $\frac{\partial v}{\partial x} = 0$ )

### สภาวะทางความร้อน



รูปที่ 3.2 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงชั้นขอบเขตความร้อน

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาการถ่ายเทความร้อนของของไหลที่ไหลภายในท่อหน้าตัดกลมมีรัศมี  $r_0$  ในกรณีที่ท่อมีการให้ความร้อนจากสิ่งแวดล้อม โดยสภาพการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux ;  $q'' = \text{ค่าคงที่}$ ) เมื่อของไหลมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform temperature ;  $T_{m,i}$ ) ไหลเข้าสู่ท่อ ทันทีที่ของไหลสัมผัสกับผิวท่อที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจะทำให้เกิดชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) ขึ้นเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวท่อกับของไหลและความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน ( $\delta_t$ ) จะเพิ่มขึ้นตามแกนการไหล ( $x$ ) จนกระทั่งความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนเข้าสู่แนวศูนย์กลางท่อ ในช่วงตั้งแต่ของไหลเข้าสู่ท่อและเริ่มมีการถ่ายเทความร้อนจนถึงระยะที่ความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนเข้าสู่แนวศูนย์กลางท่อ เรียกช่วงนี้ว่าช่วงปากทางเข้าของความร้อน (Thermal entrance region) ซึ่งเป็นช่วงที่รูปแบบของอุณหภูมิ (Temperature profile) กำลังเปลี่ยนรูป และภายหลังจากช่วงนี้เป็นช่วงที่ชั้นขอบเขตความร้อนเข้าสู่แนวศูนย์กลางท่อแล้วซึ่งเป็นช่วงที่รูปแบบของอุณหภูมิกงรูปเรียกว่าช่วงรูปแบบของอุณหภูมิกงรูปแล้ว (Thermally fully developed region)



รูปที่ 3.3 ตัวแปรไร้มิติของผลต่างของอุณหภูมิ ในช่วงรูปแบบของอุณหภูมิกงรูปแล้ว

เมื่อพิจารณาการไหลในช่วงรูปแบบของความเร็วกงรูปแล้วความเร็วของของไหลจะไม่ขึ้นกับระยะตามแกนการไหล แต่ในช่วงรูปแบบของอุณหภูมิกงรูปอุณหภูมิของของไหลจะยังคงเปลี่ยนแปลงตามระยะทางตามแกนการไหล ซึ่งเป็นการยากที่จะอธิบายถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของรูปแบบของอุณหภูมิจากตรง เพื่อความสะดวกในการอธิบายถึงพฤติกรรมดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาถึงตัวแปรไร้มิติของผลต่างของอุณหภูมิ ( Dimensionless temperature difference ;  $\frac{T_s - T(x, r)}{T_s - T_m}$  ) จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าค่าตัวแปรไร้มิติของผลต่างของอุณหภูมิกงรูปแล้วตัวแปรไร้มิตินี้ขึ้นกับระยะตามแนวรัศมีไม่ขึ้นกับระยะตามแกนการไหล กล่าวคือ

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left[ \frac{T_s - T(x, r)}{T_s - T_m} \right] = 0 \quad (3.1)$$

และในช่วงที่รูปแบบของอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปตัวแปรไร้มิติของผลต่างของอุณหภูมิจจะขึ้นกับระยะตามแนวรัศมี ( r ) และระยะตามแกนการไหล ( x )

### สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (friction coefficient)

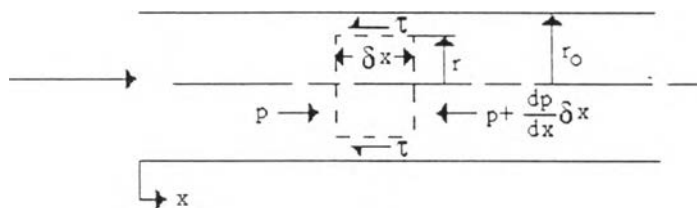
ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเป็นตัวแปรไร้มิติ ( Dimensionless variable ) ที่มีความสัมพันธ์กับความดันตก ( Pressure drop ) เป็นผลจากความเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อทำ

ให้เกิดความต้านทานการไหลอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือน (Shear stress) ระหว่างพื้นผิวกับของไหล ทำให้มีผลต่อการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งนิยามของค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานแสดงอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$f \equiv \frac{-(dp/dx)D}{\rho v^2/2}$$

ดังนั้น

$$\Delta p = \int_{x_1}^{x_2} dp = f \frac{\rho v^2}{2D} \int_{x_1}^{x_2} dx = f \frac{\rho v^2}{2D} (x_2 - x_1) \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.4 ปริมาตรควบคุมของการไหล

จากสมดุลของแรง (Force balance) ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.4 จะได้ความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและความลาดเอียงของความดันเทียบกับระยะในแนวแกนการไหล ( $dp/dx$ ) ดังนี้

$$\tau = \frac{r}{2} \left( -\frac{dp}{dx} \right)$$

ดังนั้น

$$\tau_s = \frac{r_0}{2} \left( -\frac{dp}{dx} \right)$$

ซึ่งจะได้

$$f = \frac{4\tau_s}{\rho v^2/2}$$

$$f = \frac{-4\mu}{\rho v^2} \frac{\partial v}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $f$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน  
 $\tau$  = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวท่อ  
 $\tau_0$  = ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อ  
 $\rho$  = ความหนาแน่น, kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu$  = ความหนืด, Pa s  
 $v$  = ความเร็ว, m/s

จากสมการที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าความลาดเอียงของความเร็วเมื่อเทียบกับระยะตามแนวรัศมี (Velocity gradient ;  $\frac{\partial v}{\partial r}$ ) มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน กล่าวคือถ้าความลาดเอียงของความเร็วเมื่อเทียบกับระยะตามแนวรัศมีเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมีค่าสูงขึ้น นั่นแสดงให้เห็นว่ารูปแบบของความเร็วมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน

### สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convective heat transfer coefficient)

จากรูปที่ 3.2 พิจารณาของไหลที่ไหลผ่านท่อรัศมี  $r_0$  และมีการถ่ายเทความร้อนจากผิวท่อสู่ของไหลที่ไหลอยู่ภายใน จะเห็นว่ารูปร่างของอุณหภูมิของของไหลมีความสัมพันธ์กับรัศมี ( $r$ ) และระยะทางในแนวแกนการไหล ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่ารูปแบบของอุณหภูมิเป็นฟังก์ชันของ  $x$  และ  $r$  ดังนั้นค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat flux,  $q''$ ) บริเวณผิวท่อซึ่งไม่มีการเคลื่อนที่ของของไหล สามารถหาได้โดยสมการการนำความร้อนดังนี้

$$q''(x) = -k \frac{\partial T(r, x)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (3.4)$$

- เมื่อ  $q''$  = ค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ (Heat flux, W/m<sup>2</sup>)  
 $k$  = สัมประสิทธิ์การนำความร้อนของของไหล, W/m K

การหาค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ในสมการที่ 3.4 เป็นไปได้ยาก เนื่องจากในทางปฏิบัติ การหาค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิของไหลที่ผนัง ;  $\frac{\partial T(r, x)}{\partial r} \Big|_{r=r_0}$  มีความยุ่งยากมากดังนั้นจึงพิจารณาความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่โดยสมการการพาความร้อน ซึ่งเป็นที่นิยมกว่า คือ

$$q''(x) = h(x) [T_s(x) - T_m(x)] \quad (3.5)$$

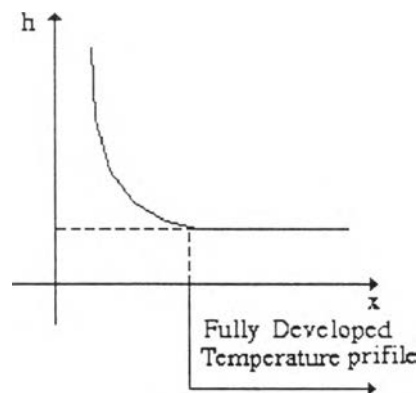
เมื่อ  $h(x)$  = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ,  $W/m^2 K$

$T_s(x)$  = อุณหภูมิของผนังท่อที่ระยะ  $x$  ใดๆ ,  $K$

$T_m(x)$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ระยะ  $x$  ใดๆ ,  $K$

จากความเท่ากันของสมการที่ (3.4) และ (3.5) เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนได้ดังนี้

$$h(x) = - \frac{k}{[T_s(x) - T_m(x)]} \frac{\partial T(r, x)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.5 สัมประสิทธิ์การพาความร้อนในช่วงปากทางเข้า

จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ของของไหลเมื่อเทียบกับระยะตามแนวรัศมี จะขึ้นกับความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน กล่าวคือค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิจะมีค่ามากและจะลดลงจนถึงตำแหน่งที่เป็นช่วงของรูปแบบของอุณหภูมิก

รูปแล้ว ซึ่งช่วงนี้ค่าความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนจะคงที่ทำให้ค่าความลาดเอียงของอุณหภูมิคงที่ด้วย ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมการที่ 3.6 ในช่วงปากทางเข้าค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน จะมีค่ามากและจะลดลงจนกระทั่งคงที่ซึ่งก็คือตำแหน่งที่เป็นช่วงของรูปแบบของอุณหภูมิคงรูปแล้ว ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.5

### องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

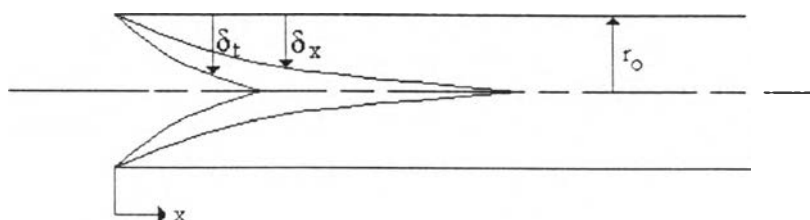
ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีความสำคัญในการหาค่าความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนของของไหล องค์ประกอบที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีดังต่อไปนี้

1. พฤติกรรมของการไหล การพาความร้อนเกิดจากการนำความร้อนและการถ่ายเทมวลขึ้นพร้อมๆกัน กล่าวคือ ในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงกว่าของไหล จะเกิดการนำความร้อนจากผิวของแข็งไปสู่อนุภาคของของไหลที่ใกล้ผิวของแข็งนั้นซึ่งทำให้อุณหภูมิของอนุภาคของไหลเหล่านั้นมีค่าสูงขึ้นและเนื่องจากอนุภาคของของไหลเหล่านั้นมีการเคลื่อนที่จึงทำให้ความร้อนที่อนุภาคของของไหลได้รับจึงถูกพาไปโดยอนุภาคของของไหล และในขณะที่เดียวกันอนุภาคของของไหลที่มีอุณหภูมิสูงกว่าก็ถ่ายเทความร้อนที่ได้รับไปยังอนุภาคของของไหลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า จึงกล่าวได้ว่าพฤติกรรมของการไหลของของไหลจึงมีผลต่อการพาความร้อนของของไหลซึ่งแบ่งได้ เป็น 3 รูปแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ , การไหลแบบทรานสิชัน และ การไหลแบบปั่นป่วน

Osborne Reynolds ได้พิจารณาชนิดของของไหลและความเร็วที่แตกต่างกัน พบว่าของไหลเหล่านั้นมีพฤติกรรมการไหลที่คล้ายกันเมื่อมีค่าตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variable) ค่าหนึ่งที่เท่ากัน ตัวแปรดังกล่าวนี้เรียกว่า เรย์โนลด์นัมเบอร์

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.7)$$

2. คุณสมบัติของของไหล คุณสมบัติของของไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนประกอบด้วย สัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ความหนืดจากรูปที่ 3.1 และ 3.2 พบว่าลักษณะของชั้นขอบเขตความเร็วและชั้นขอบเขตความร้อนมีลักษณะรูปร่างที่คล้ายกัน แต่สิ่งที่แตกต่างกันคือคุณสมบัติที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนของของไหลแต่ละชนิด



รูปที่ 3.6 การเกิดชั้นขอบเขตความเร็วและความร้อนของอากาศ ( $Pr \approx 0.71$ )  
ในบริเวณปากทางเข้า (Entrance region)

ค่าเพร้นเดิลนัมเบอร์เป็นตัวแปรไร้มิติที่รวมคุณสมบัติของของไหลที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนซึ่งเป็นตัวกำหนดความหนาของชั้นขอบเขตความเร็วและชั้นขอบเขตความร้อน ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปสมการดังนี้

$$Pr^n = \frac{\delta_x}{\delta_t} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $n$  = ค่าคงที่ และเป็นจำนวนบวก

จากสมการที่ 3.8 แสดงว่าเมื่อเพร้นเดิลนัมเบอร์มากกว่า 1 รูปแบบของความเร็วจะคงรูปก่อนรูปแบบของอุณหภูมิ เช่น ในกรณีของน้ำ ในทางกลับกันถ้าเพร้นเดิลนัมเบอร์น้อยกว่า 1 รูปแบบของอุณหภูมิจะคงรูปก่อนรูปแบบของความเร็ว เช่น ในกรณีของอากาศ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.6

เนื่องจากเพร้นเดิลนัมเบอร์ประกอบด้วยคุณสมบัติของของไหลคั้งนั้นเมื่อของไหลมีอุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงจะทำให้เพร้นเดิลนัมเบอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่อย่างไรก็ตามที่อุณหภูมิและความดันต่างๆการเปลี่ยนค่าเพร้นเดิลนัมเบอร์จะมีผลอย่างมากเมื่อของไหลมีสถานะเป็นของเหลว ในกรณีนี้ของไหลมีสถานะเป็นก๊าซค่าเพร้นเดิลนัมเบอร์จะค่อนข้างคงที่

Ludwig Prandtl พิจารณาของไหลที่มีคุณสมบัติเหล่านี้ที่แตกต่างกัน พบว่าของไหลทั้งหมดที่พิจารณาจะมีคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนที่ความคล้ายกันเมื่อค่าเพร้นเดิลนัมเบอร์ เท่ากัน ค่าเพร้นเดิลนัมเบอร์สามารถหาได้จาก



$$\text{Pr} = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.9)$$

3. ลักษณะของการไหล เช่น การไหลภายในท่อ , การไหลบนพื้นผิวราบเรียบ , การไหลภายในท่อโค้ง เป็นต้น มีผลต่อการพาความร้อนของของไหลทั้งสิ้นเนื่องจากลักษณะการไหลที่แตกต่างกันทำให้ชั้นขอบเขตความร้อนมีความแตกต่างกัน

Nusselt พิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน และลักษณะการไหลของการไหลของของไหลภายในท่อที่แตกต่างกัน พบว่าผลการถ่ายเทความร้อนของของไหลมีความคล้ายกันเมื่อมีตัวแปรไร้มิติค่าหนึ่งเท่ากัน ตัวแปรไร้มิติดังกล่าวเรียกว่า นัสเซลท์นัมเบอร์ (Nu)

$$\text{Nu} = \frac{hD}{k} \quad (3.10)$$

4. รูปแบบที่พื้นผิว การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อมีการเพิ่มชั้นฉนวนที่อยู่บนผิวของแข็งหรืออยู่ระหว่างของไหลและพื้นผิวของแข็ง และการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความปั่นป่วนของของไหลภายในท่อซึ่งเกิดจากการเพิ่มความหยาบที่ผิวของแข็ง เช่น พื้นผิวโค้ง , พื้นผิวหยาบ เป็นต้น

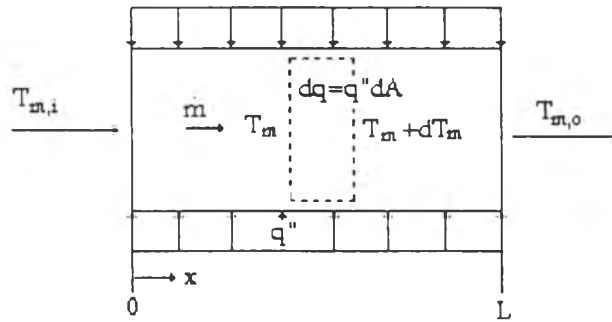
#### สมดุลของพลังงาน (Energy balance)

จากสมดุลของพลังงานในปริมาตรควบคุม ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7 สามารถกล่าวได้ว่า พลังงานจากพื้นผิวที่ให้แก่ของไหลย่อมเท่ากับพลังงานที่ถ่ายเทโดยของไหลซึ่งพลังงานที่ถ่ายเทโดยของไหลนี้เรียกว่าการพาความร้อน ถ้าพิจารณาอัตราการไหลคงที่ และการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux) จะได้อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดเป็น

$$q = q'' A_s \quad (3.11)$$

เมื่อ  $q$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดตลอดช่วงทางเข้าและทางออกของท่อ , W

$q''$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่,  $W/m^2$   
 $A_s$  = พื้นที่ผิวท่อ,  $m^2$



รูปที่ 3.7 ปริมาตรควบคุมของท่อที่มีการให้ความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่

$$\text{พื้นที่ผิวท่อ } (A_s) = 2\pi r_o L \quad (3.12)$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวท่อ,  $m$

สำหรับการไหลภายในท่อสามารถหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ทั้งหมดได้จากสมการ

$$q'' = \frac{mc_p(T_{m,o} - T_{m,i})}{A_s} \quad (3.13)$$

เมื่อ  $m$  = อัตราการไหลของของไหล,  $kg/s$

$c_p$  = ความจุความร้อนจำเพาะของของไหล,  $J/kg \cdot K$

$T_{m,o}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางออก,  $K$

$T_{m,i}$  = อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางเข้า,  $K$

จากสมการที่ 3.13 ทำให้สามารถกล่าวได้ว่าถ้าทราบอุณหภูมิที่เข้าและออกจากท่อและอัตราการไหลของของไหลจะทำให้สามารถทราบค่าพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทจากผนังท่อไปยังของไหลได้เนื่องจากพลังงานความร้อนที่ถ่ายเทจากผนังไปยังของไหลย่อมเท่ากับพลังงาน

ความร้อนที่ถ่ายเทโดยของไหล และยังนำไปใช้ในการหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ตำแหน่ง  $x$  ต่างๆได้ โดยการพิจารณาปริมาตรควบคุมเล็กๆ จากรูปที่ 3.7 ดังนี้

$$dq = q'' dA \quad (3.14)$$

นำสมการที่ 3.13 แทนลงในสมการที่ 3.14 จะได้

$$2\pi r_o q'' = mc_p \frac{dT_m(x)}{dx} \quad (3.15)$$

จากรูปที่ 3.7 ได้เงื่อนไขขอบเขตคือ

$$T_m(0) = T_{m,i} \quad (3.16)$$

เพื่อหาสมการที่ใช้ในการหาค่า  $T_m(x)$  ได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ 3.15 ตลอดความยาว  $x=0$  ถึง  $x$  ซึ่งจะได้

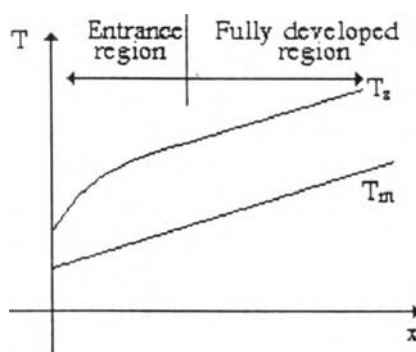
$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{2\pi r_o q'' x}{mc_p} \quad (3.17)$$

จากรูปแบบของสมการที่ 3.17 เป็นสมการเส้นตรงซึ่งขึ้นกับระยะทางตามแนวการไหล ( $x$ ) เพียงค่าเดียว และค่าความชันของสมการ (Slope,  $M$ ) หาได้จาก

$$M = \frac{2\pi r_o q''}{mc_p} \quad (3.18)$$

จากสมการที่ 3.6 เมื่อการถ่ายเทความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่จะได้

$$h(x) = \frac{q''}{T_s(x) - T_m(x)} \quad (3.19)$$



รูปที่ 3.8 การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่ผิวท่อและอุณหภูมิของของไหล  
การให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่ผิวคงที่

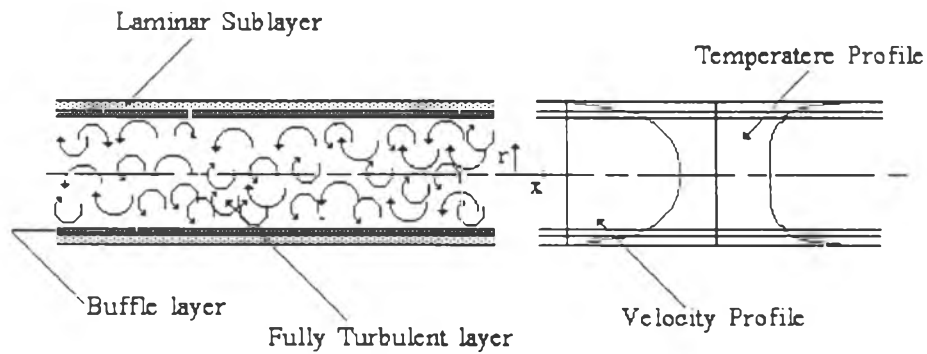
ในการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่จะทำให้อุณหภูมิของของไหลที่หน้าตัดใดๆ ( $T_{m,x}$ ) เพิ่มขึ้นในลักษณะของเส้นตรงตลอดแนวแกนการไหล โดยพิจารณาจากสมการที่ 3.17 และในช่วงการไหลเป็นแบบรูปแบบของอุณหภูมิจริงรูปแล้ว (Fully developed temperature profile) ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h(x)$ ) จะมีค่าคงที่ตลอดแนวแกนการไหล ซึ่งทำให้จากสมการที่ 3.19 พบว่า ในช่วงรูปแบบของอุณหภูมิจริงรูปแล้วค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวท่อและอุณหภูมิของของไหลที่หน้าตัดใดๆคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

### การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

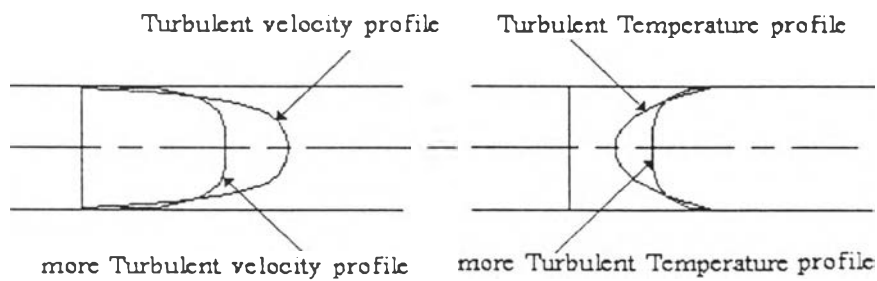
เมื่อเพิ่มพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนให้แก่ของไหล เช่น เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ของของไหลมีค่าสูงขึ้น , ความหยาบที่ผิวท่อมากขึ้น , ความโค้งงอของท่อมากขึ้น จากรูปที่ 3.9 ในการไหลแบบปั่นป่วนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชั้นตามพฤติกรรมของของไหล คือ

1. ชั้นราบเรียบ (Laminar sublayer) เป็นช่วงที่ไหลเรียบไม่เกิดความปั่นป่วน ซึ่งอยู่ชิดกับผนังท่อ
2. ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer layer) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างชั้นราบเรียบและชั้นปั่นป่วนสมบูรณ์

3. ชั้นปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully Turbulent layer) เป็นส่วนที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนไหวย่างปั่นป่วน



(ก) แสดงพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วน



(ข) แสดงถึงอิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนที่มี

ต่อรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ

รูปที่ 3.9 แสดงพฤติกรรมของการไหล รูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ ในการไหลแบบปั่นป่วน

(ก) แสดงพฤติกรรมของการไหล (ข) แสดงถึงอิทธิพลการไหลแบบปั่นป่วนที่มี

ต่อรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.9 ในการไหลภายในท่อเมื่อของไหลมีพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนเพิ่มขึ้นทำให้ชั้นปั่นป่วนสมบูรณ์ (Fully turbulent layer) เพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันทำให้ชั้นราบเรียบ (Laminar sublayer) ลดลง ซึ่งมีผลทำให้ความลาดเอียงของความเร็ว (Velocity gradient) และ

อุณหภูมิ (Temperature gradient) เมื่อเทียบกับรัศมีท่อมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความดันลดมีค่าสูงขึ้น

### ความสัมพันธ์ของทฤษฎีกับท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่น

ท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นเป็นท่อชนิดพิเศษที่มีหน้าตัดกลมและมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อยืดท่อจนสุดจะมีลักษณะคล้ายท่อกลม ในทุกๆขนาดท่อเมื่อยืดจนสุดจะได้ระยะพิท (P) สูงสุดมีขนาดเท่ากันคือ 25.4 มิลลิเมตร ดังนั้นพื้นที่ผิวของท่อทั้งหมดที่ระยะพิทใดๆจะหาได้จาก

$$A_s = 2\pi r_o L \frac{0.0254}{P} \quad (3.20)$$

เมื่อ  $A_s$  = พื้นที่ผิวท่อ,  $m^2$

$P$  = ระยะพิทของผิวท่อ,  $m$

$L$  = ความยาวท่อ,  $m$

และพื้นที่ผิวท่อที่ระยะ  $x$  ใดๆ

$$A_s(x) = \frac{0.0508\pi r_o}{P} x \quad (3.21)$$

จากสมการที่ 3.17 สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{A_s q''}{mc_p} \quad (3.22)$$

ดังนั้นแทนสมการที่ 3.21 ในสมการที่ 3.22 จะได้ สมการที่ใช้ในการคำนวณหาอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ระยะ  $x$  ใดๆ สำหรับท่ออะลูมิเนียมยืดหยุ่นดังนี้

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{0.0508\pi r_o q''}{mc_p P} x \quad (3.23)$$

### ความเสียดทานในระบบจ่ายลม

เมื่ออากาศไหลผ่านระบบท่อจะส่งผลให้เกิดความเสียดทานระหว่างของไหลและผนังท่อ ซึ่งความเสียดทานก็คือความต้านทานการไหลอันเนื่องมาจากความเค้นเฉือน (Shear stress) ระหว่างพื้นผิวกับของไหล ในท่อที่วางตัวในแนวตรงความดันลดอันเกิดจากความเสียดทานสามารถหาได้จากสมการของ Darcy , Colebrook และ Altshul ดังนี้

$$\Delta p = f \frac{L \rho v^2}{D} \quad (3.24)$$

เมื่อ  $\Delta p$  = ความแตกต่างความดัน , Pa  
 $f$  = ตัวประกอบความเสียดทาน  
 $L$  = ความยาวท่อ, m  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ, m  
 $\rho$  = ความหนาแน่น , kg/m<sup>3</sup>  
 $v$  = ความเร็วของของไหล , m/s

สำหรับความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อที่วางตัวในแนวโค้งนอกจากเกิดจากความเสียดทานแล้วยังเกิดจากการเปลี่ยนทิศทางการไหลของของไหล ซึ่งเรียกปรากฏการณ์ว่าการสูญเสียพลวัต (Dynamic losses) ค่าความดันลดในท่อที่วางตัวในแนวโค้งหาได้จาก

$$\Delta p = K \frac{\rho v^2}{2} \quad (3.25)$$

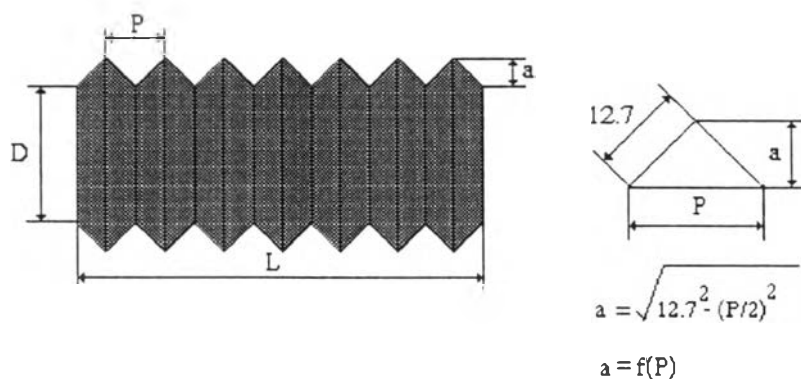
เมื่อ  $K$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานภายในท่อโค้ง

### การวิเคราะห์ทางมิติ (Dimensional analysis)

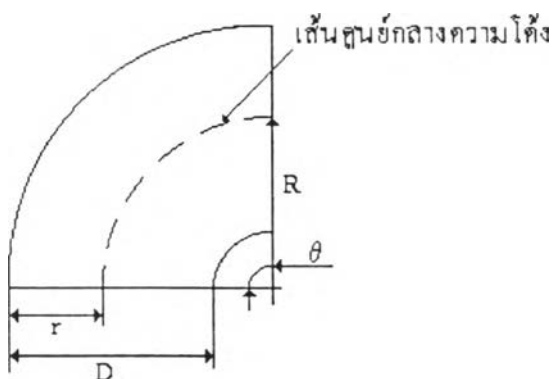
เป็นวิธีที่สามารถจัดตัวแปรอิสระที่มีผลโดยตรงในการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทาน โดยการรวมตัวแปรซึ่งมีผลโดยตรงที่มีอยู่มากเข้าเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless variable) และนำตัวแปรไร้มิติเหล่านี้ ไปตั้งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการทดลอง และยังช่วย

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อนำไปสรุปผลการทดลองให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงฟังก์ชัน เพื่อนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้สะดวกขึ้น

จากการพิจารณาถึงท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่นสามารถอธิบายถึงลักษณะและคุณสมบัติของท่อชนิดนี้ได้ว่าเป็นท่อที่มีหน้าตัดกลม ผิวท่อนัน อัตราส่วนพื้นที่ผิวและความขรุขระ (ความหยาบ) ของผิวท่อขึ้นกับความโค้งและความยืดหยุ่นของท่อ แสดงในรูปที่ 3.10 จากการวิเคราะห์ทางมิติซึ่งรวมตัวแปรอิสระที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความเสียดทานให้อยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติสามารถจัดรูปฟังก์ชันได้ดังต่อไปนี้



(ก) ลักษณะของท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่น



ถ้า L คือ ความยาวของเส้นศูนย์กลางความโค้ง,  $L = f(R, \theta)$

(ข) มิติของความโค้งที่พิจารณา

รูปที่ 3.10 แสดงท่ออะลูมิเนียมยัดหยุ่นพร้อมมิติที่สำคัญของท่อ



1. สมการความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวใน  
แนวตรง

$$Nu = f(Re, Pr, a/D, L/D) \quad (3.26)$$

2. สมการความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวใน  
แนวโค้ง ที่มีมุมความโค้ง  $\theta$  ใดๆ

$$Nu = f(Re, Pr, a/D, \theta, R/D) \quad (3.27)$$

3. สมการความสัมพันธ์ของความเสียดทานในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวในแนว  
ตรง

$$f = f(Re, a/D, L/D) \quad (3.28)$$

4. สมการความสัมพันธ์ของความเสียดทานในท่ออะลูมิเนียมยัดหุ้มที่วางตัวในแนวโค้ง ที่  
มุมความโค้ง  $\theta$  ใดๆ

$$K = f(Re, a/D, \theta, R/D) \quad (3.29)$$