

บทที่ 3

ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในการวิจัย อันได้แก่การจำแนกลักษณะของการไหลแบบบังคับภายในท่อ การสูญเสียความดันภายในท่อ และพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน

3.1 การไหลของของไหลภายในท่อ

การไหลของของไหลสามารถแบ่งตามลักษณะการไหลได้เป็นสองรูปแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่ไปอย่างมีระเบียบด้วยความเร็วค่อนข้างต่ำโดยไม่เกิดการผสมกันของกระแสของไหล และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่ของไหลจะเคลื่อนที่อย่างปั่นป่วน ไม่มีระเบียบจึงทำให้เกิดการผสมกันของกระแสของไหล

3.1.1 การจำแนกลักษณะของการไหลภายในท่อกลม

การจำแนกการไหลภายในท่อของของไหลอาจใช้วิธีการสังเกตการไหลของของไหลที่ทางออกของท่อ โดยถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นสองลำจะเป็นการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าของไหลที่ไหลออกมาเป็นลำเดียวจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน วิธีการนี้เหมาะสำหรับของไหลที่สามารถสังเกตเห็นได้ เช่น น้ำ โลหะเหลว เป็นต้น หรือการพ่น Dye เพื่อสังเกตลักษณะการไหลของ Dye ก็เป็นวิธีการในการช่วยจำแนกการไหลได้เช่นกัน

นอกจากนี้ยังสามารถจำแนกการไหลได้จากค่า Reynolds number ซึ่งเป็นอัตราส่วนของแรงเฉื่อย (Inertia force) ต่อแรงความหนืด (Viscous force) โดยทั่วไปกรณีของไหลมีค่า Reynolds number น้อยกว่า 2,300 จะจัดเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) ส่วนกรณีของไหลมีค่า Reynolds number อยู่ในช่วง 2,300 ถึง 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition flow) และกรณีของไหลมีค่า Reynolds number มากกว่า 4,000 จะจัดเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งค่า Reynolds number (Re) มีนิยามดังนี้

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.1)$$

โดย	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

3.1.2 กรณีท่อไม่กลม

การหาสัมพัทธ์สำหรับการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วนในท่อที่มีหน้าตัดไม่กลม (Noncircular ducts) นั้นจะพิจารณาจากนิยามเทอมเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydraulic diameter, D_h) โดย D_h มีนิยามดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (3.2)$$

กรณีเป็นท่อสี่เหลี่ยมหรือช่องขนานรูปสี่เหลี่ยม

$$D_h = \frac{4bD}{2 \times (b + D)} \quad (3.3)$$

โดย A คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องขนาน, m^2

P คือ ความยาวของเส้นรอบรูปช่องขนาน, m

b คือ ความกว้างของช่องขนาน, m

D คือ ความสูงหรือระยะห่างของช่องขนาน, m

3.2 การสูญเสียภายในท่อ

การสูญเสียภายในท่อสามารถแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การสูญเสียหลัก (Major loss) และการสูญเสียรอง (Minor loss)

3.2.1 การสูญเสียหลัก

การสูญเสียหลักเกิดขึ้นจากความเสียดทานภายในท่ออันเนื่องมาจากขนาดของท่อ ความยาวของท่อ และความเร็วในการไหลภายในท่อของของไหล ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\Delta P = \frac{fL\rho V^2}{2D_h} \quad (3.4a)$$

โดย ΔP คือ ความดันตกคร่อมภายในท่อ, Pa

f คือ Friction Factor

L คือ ความยาวของท่อ, m

V คือ ความเร็วของไหลเฉลี่ย, m/s

ค่า f ที่คำนวณได้จากสมการต่างๆ อาจะนำมาใช้งานจริงได้ไม่สะดวกนัก จึงมักจะหา ค่า f จากแผนภูมิที่เรียกว่า Moody chart ซึ่ง Moody ได้พล็อตค่าข้อมูลที่ดีที่สุดลงในสมการ โดยใช้ Moody chart จะต้องทราบค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อ ดังแสดงในตาราง 3.1

ในทางปฏิบัติค่า f ของท่อผิวเรียบอาจจะคลาดเคลื่อน 5% ส่วนท่อผิวขรุขระก็อาจจะคลาดเคลื่อน 10% ดังนั้นการใช้ค่าความขรุขระสัมบูรณ์จึงต้องพิจารณาให้ดีเนื่องจากจะมีผลกระทบต่อค่าความดันตกคร่อมได้

ตารางที่ 3.1 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อใหม่

ประเภทของท่อ	ค่าความขรุขระสัมบูรณ์
ท่อที่รีดขึ้นรูป ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก ท่อที่เคลือบปิทมินัส ท่อซีเมนต์ที่หล่อด้วยการเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง	0.0015
ท่อเหล็กเหนียว	0.046
ท่อเหล็กหล่อที่ขึ้นรูปโดยการเชื่อม	0.046
ท่อเหล็กหล่อเคลือบยางมะตอย	0.12
ท่อหุบสังกะสี	0.15
ท่อเหล็กหล่อทั่วไป	0.25
ท่อไม้	0.18–0.9
ท่อคอนกรีต	0.3–3
ท่อเหล็กที่ใช้หมุดย้ำ	0.9–9

3.2.2 การสูญเสียรอง

การสูญเสียรองจะเกิดจากการไหลผ่านท่อที่เปลี่ยนแปลงขนาดกะทันหันหรือการไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆ เช่น ข้อต่อ ข้องอ เป็นต้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$h_m = \frac{KV^2}{2g} \quad (3.4b)$$

เมื่อ h_m คือ การสูญเสียรอง, m
 V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหลภายในท่อ, m/s
 g คือ อัตราเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s²
 K คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (Loss coefficient)

ซึ่งการสูญเสียจะมีค่าค่อนข้างน้อย ดังนั้นในการทดลองจะพิจารณาเฉพาะการสูญเสียหลักเท่านั้น

3.3 ประเภทของการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นเนื่องจากผลของความแตกต่างของอุณหภูมิ โดยจะเกิดการถ่ายเทจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกได้ 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

3.3.1 การนำความร้อน (Conduction)

การนำความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางเมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิหรือการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างตัวกลางที่ติดกันเมื่อมีความแตกต่างกันของอุณหภูมิ โดยการนำความร้อนจะเคลื่อนที่ได้ดีที่สุดในตัวกลางที่เป็นของแข็งซึ่งความร้อนจะเคลื่อนที่ผ่านโมเลกุลของเนื้อตัวกลางที่อยู่นิ่ง โดยอาจจะมีบ้างที่เกิดขึ้นในของเหลวและก๊าซแต่มักจะแยกออกจากการถ่ายเทความร้อนโดยการพาไม่ได้

หลักการคำนวณเกี่ยวกับการนำความร้อนถูกเสนอขึ้นโดย โจเซฟ ฟูริเยร์ (Joseph Fourier) ในปี ค.ศ. 1822 โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองและได้เสนอสมการที่ใช้สำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ ไว้ดังนี้

$$Q_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.5)$$

หรือ

$$q_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.6)$$

เมื่อ	Q_x	คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำผ่านพื้นที่หน้าตัด A , W
	q_x	คือ ค่าฟลักซ์ความร้อน, W/m^2
	k	คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ (Thermal Conductivity), $W/m \text{ } ^\circ C$
	A	คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของความร้อน, m^2
	$\frac{dT}{dx}$	คือ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิต่อระยะทาง

ตารางที่ 3.2 ค่าสภาพการนำความร้อน (ที่อุณหภูมิ 300 K)

วัสดุ	ค่าสภาพการนำความร้อน ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
เงิน	429
ทองแดงบริสุทธิ์	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

ค่าสภาพการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัสดุที่ได้จากการวัดและทดสอบ โดยทั่วไปค่าสภาพการนำความร้อนจะแปรผันตามอุณหภูมิซึ่งจากการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์จะพบว่าค่าสภาพการนำความร้อนของแก๊สจะแปรผันตามกำลังสองของอุณหภูมิ สมบูรณ์และค่าสภาพการนำความร้อนของของเหลวต่างๆ ยกเว้นน้ำจะแปรผันตามอุณหภูมิ สมบูรณ์ สำหรับการใช้งานจริงที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจะใช้ค่าสภาพการนำความร้อน คงที่ซึ่งหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย โดยค่า k ของสารทั่วไปดังแสดงในตาราง 3.2

3.3.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผิวของแข็งและของไหล โดยที่ของไหลจะเป็นตัวพาความร้อนมาให้หรือพาความร้อนจากผิวของแข็ง สำหรับกลไกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานี้จะเกิดจากผลรวมของการนำความร้อน การสะสมพลังงาน และการเคลื่อนที่ของของไหล การพาความร้อนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การพาความร้อนโดยธรรมชาติ และการพาความร้อนโดยบังคับ โดยการพาโดยบังคับ (Force convection) เป็นการเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหลโดยของไหลจะถูกบังคับให้เคลื่อนที่ไปสัมผัสกับผิวของแข็งโดยกลไกจากภายนอก เช่น พัดลม เครื่องสูบน้ำ เป็นต้น

สำหรับการพาความร้อนสมการที่ใช้สำหรับคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการพา จะพิจารณาตาม Newton's Law of Cooling คือ

$$Q_{conv.} = hA(T_s - T_f) \quad (3.7)$$

หรือ

$$q_{conv.} = h(T_s - T_f) \quad (3.8)$$

โดย $T_s > T_f$

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

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

h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \cdot ^\circ C$

T_s คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง, $^\circ C$

T_f คือ อุณหภูมิของของไหล, $^\circ C$

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนสามารถหาค่าได้จากการทดลอง ซึ่งได้มีการเก็บข้อมูลของของไหลบางชนิดและบางประเภทของการพาความร้อนไว้ดังแสดงในตาราง 3.3

ตารางที่ 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

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

3.3.3 การแผ่รังสีความร้อน (Radiation)

การแผ่รังสีความร้อน คือ การส่งออกของรังสีที่เชื่อว่าเป็นการเปลี่ยนการจัดเรียงอิเล็กตรอนขององค์ประกอบอะตอมหรือโมเลกุลโดยพลังงานของการแผ่รังสีนั้นจะถูกนำออกไปด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) หรือโฟตอน ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีจะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุดในสภาพสุญญากาศซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องการตัวกลางแต่ในขณะที่การถ่ายเทความร้อนโดยการนำความร้อนหรือการพาความร้อนนั้น จะต้องการตัวกลาง

ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีออกจากผิวตัวกลาง คำนวณจากกฎของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ (Stefan-Boltzmann) ดังนี้

$$q_{rad} = \sigma T_s^4 \quad (3.9)$$

เมื่อ	q_{rad}	คือ ฟลักซ์สูงสุดของการแผ่รังสีความร้อน, W/m^2
	σ	คือ ค่าคงที่ของสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ $= 5.67 \times 10^{-8}$, $\text{W/m}^2 \text{K}^4$
	T_s	คือ อุณหภูมิผิวแผ่รังสี, K

สมการ 3.9 ใช้กับกรณีของตัวแผ่รังสีในอุดมคติ (Ideal Radiator) หรือวัตถุดำ (Black Body) สำหรับกรณีของพื้นผิวจริง (Real Surface) ฟลักซ์แผ่รังสีความร้อนจะน้อยกว่ากรณีของวัตถุดำ ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพเปล่งรังสี (Emissivity) ของพื้นผิวนั้น ฟลักซ์แผ่รังสีบนพื้นผิวจริง คำนวณจาก

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3.10)$$

เมื่อ ε คือ สภาพแผ่รังสี

ซึ่งในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่พิจารณาถึงผลของการแผ่รังสีความร้อน

3.4 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อน

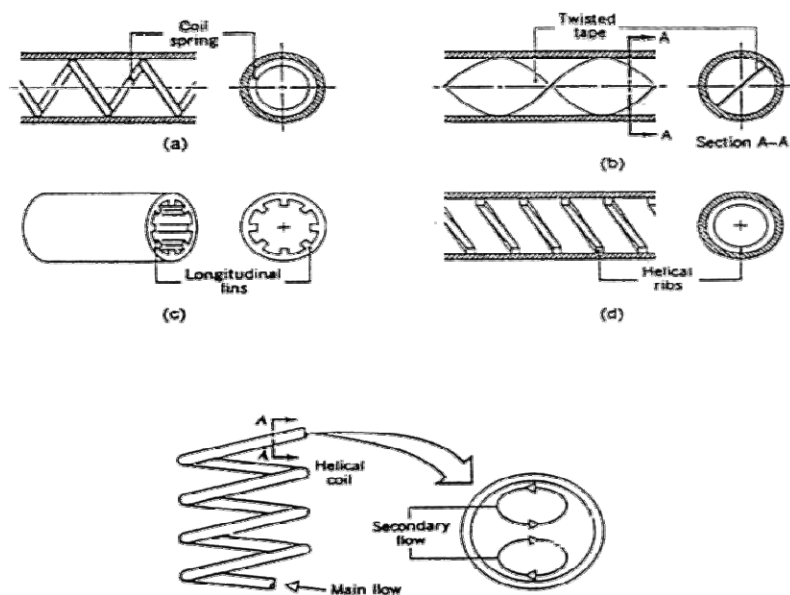
การทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นสามารถทำได้สองวิธี คือ

3.5.1 วิธีแบบ Active

วิธีนี้ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก เช่น การใช้อุปกรณ์ทางกล การทำให้เกิดการสั่นของพื้นผิว การทำให้เกิดการสั่นของของไหล การใช้สนามไฟฟ้าสถิต การฉีดพ่นหรือดูดของไหล

3.5.2 วิธีแบบ Passive

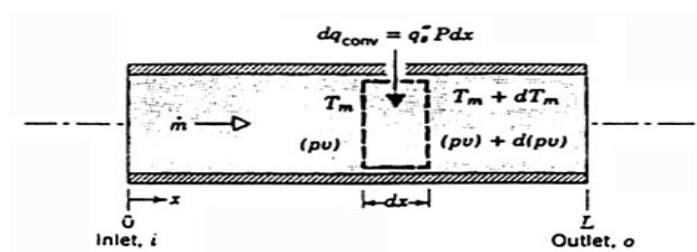
วิธีแบบนี้ไม่ต้องการแหล่งพลังงานภายนอก ได้แก่ การใช้พื้นที่ที่ได้รับการปรับสภาพ การใช้พื้นผิวหยาบ การเพิ่มพื้นที่ผิว การติดตั้งอุปกรณ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ การติดตั้งอุปกรณ์ที่ทำให้อากาศเกิดการหมุนวน การใช้ท่อเป็นขด เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การเพิ่มการถ่ายเทความร้อนแบบ Passive

3.5 การสมดุลพลังงาน

เมื่อพิจารณาการไหลในท่อดังรูป 3.2 ของไหลจะมีอัตราการไหลเชิงมวลคงที่ $\dot{m}$ และมีการพาความร้อนเกิดขึ้นภายใน โดยทั่วไปการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของไหลรวมทั้งการนำความร้อนในทิศทางแนวแกนจะไม่นำมาคิดดั่งนั้นถ้าไม่มีงานเพลาส่งกระทำโดยของไหลขณะไหลผ่านท่อแล้วก็จะมิตธิพลที่เกี่ยวข้องเพียงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและงานจากการไหลเท่านั้น



รูปที่ 3.2 การสมดุลพลังงานภายในท่อ

งานจากการไหลเป็นงานที่ใช้เคลื่อนของไหลผ่านปริมาตรควบคุมคิดต่อหน่วยมวลของไหลและจะอยู่ในรูปของผลคูณของความดัน (P) และปริมาตรจำเพาะ (V) โดยการประยุกต์การอนุรักษ์พลังงานต่อปริมาตรควบคุมดังรูป 3.2 จะได้

$$dq_{conv} + \dot{m}(C_v T_m + PV) - [\dot{m}(C_v T_m + PV)] + \dot{m} \frac{d(C_v T_m + PV)}{dx} dx = 0 \quad (3.10)$$

หรือ

$$dq_{conv} = \dot{m}(C_v T_m + PV) \quad (3.11)$$

ถ้าของไหลเป็นแก๊สสมบูรณ์ ($PV = RT_m$ และ $C_p = C_v + R$) จะได้

$$dq_{conv} = \dot{m} C_p dT_m \quad (3.12)$$

ค่าฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับผิวท่อที่จุดใดๆ หาได้จาก

$$q_s = h_x (T_s - T_m) \quad (3.13)$$

เมื่อ	q_s	คือ ฟลักซ์ความร้อนระหว่างของไหลกับท่อ, W/m^2
	h_x	คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ตำแหน่งใดๆ, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
	T_s	คือ อุณหภูมิที่ผิวของแข็ง, $^\circ C$
	T_m	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลทั่วพื้นที่ผิวหน้าท่อ, $^\circ C$

สมการที่ (3.10) อาจเปลี่ยนไปอยู่ในอย่างง่ายได้โดยใช้สมการอัตราการพาความร้อนต่อปริมาตรควบคุมคือ $dq_{conv} = q_s P dx$ ซึ่ง P คือเส้นรอบรูปโดยการแทนค่าจากสมการ (3.11) และ (3.12) จะได้ว่า

$$\frac{dT_m}{dx} = \frac{q_s}{\dot{m} C_p} = \frac{hP}{\dot{m} C_p} (T_s - T_m) \quad (3.14)$$

ค่าของ $T_m(x)$ จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความร้อนที่ผิวสำหรับกรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่

- กรณีฟลักซ์ความร้อนคงที่ ($q_s = \text{Constant}$)

กรณีนี้จะพบว่าง่ายที่จะหาค่า q_{conv} ทั้งหมดเพราะ q_s ไม่ขึ้นกับระยะ x ดังนั้น

$$\frac{q_{conv}}{PL} = q_s \quad (3.15)$$

จากสมการ (3.14) ทำการอินทิเกรตจาก $x = 0$ ถึง x ใดๆ และจากอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่ทางเข้า (T_i) ถึง T ใดๆ

3.6 การถ่ายเทความร้อนภายในท่อผิวเรียบ

ค่าของ h จะขึ้นอยู่กับรูปแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สภาพการไหลของของไหล (Re) สมบัติเชิงความร้อนของของไหล และยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงสถานะของของไหลด้วย

- กรณีไม่มีการเซาะร่อง

$$h = \frac{Nu_D k}{D} \quad (3.16)$$

เมื่อ h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
 k คือ ค่าการนำความร้อนของวัตถุ, $W/m \text{ } ^\circ C$
 Nu_D คือ Nusselt Number

สำหรับการไหลเป็นแบบ Turbulent flow ที่ fully developed turbulent ในท่อกลมเรียบ โดยหา Nu_D หาได้จากสมการของ Dittus-Boelter

$$\begin{aligned} St &= \frac{\overline{Nu}}{Re Pr} = \frac{f}{8} \\ f &= 0.184 Re^{-0.2} \\ St &= 0.023 Re^{-0.2} \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$\overline{Nu} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.17)$$

โดยที่ $n = 0.4$ สำหรับการทำให้ร้อน ($T_s > T_m$)

$n = 0.3$ สำหรับการทำให้เย็น ($T_s < T_m$)

Pr คือ Prandtl Number

$$\text{สมการนี้สำหรับช่วงของเงื่อนไขดังนี้} \left[\begin{array}{l} 0.7 \leq Pr \leq 160 \\ Re_D \geq 10000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right]$$

- กรณีเซาะร่อง

จากข้อมูลที่ได้ศึกษามาก่อนแล้วของ Adachi กับ Uehara และ Fusegi สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของช่องขนานที่มีการเซาะร่องกับช่องขนานผิวเรียบ พบว่าการเซาะร่องจะช่วยทำให้เกิดการไหลเป็นไปในเงื่อนไขแบบปั่นป่วนและดังนั้นเราสามารถหาค่า Nu ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p(T_0 - T_i) \quad (3.18)$$

$$\dot{Q} = h_i A_i (\overline{T_w} - T_b) \quad (3.19)$$

โดยที่

$$T_b = \frac{(T_i + T_0)}{2}$$

$$\overline{T_w} = \frac{\sum T_w}{n}$$

เมื่อ	T_0	คือ อุณหภูมิที่ทางออกของของไหล, °C
	T_i	คือ อุณหภูมิที่ทางเข้าของของไหล, °C
	A_i	คือ พื้นที่ถ่ายเทความร้อนของช่องขนาน, m ²
	$\overline{T_w}$	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยที่ผิวของช่องขนาน, °C
	T_b	คือ อุณหภูมิเฉลี่ยของทางเข้าและทางออก, °C
	n	คือ จำนวนจุดที่วัดอุณหภูมิ

$$Nu_m = \frac{h_i D_i}{k} \quad (3.20)$$

$$h_i = \dot{m}C_p \frac{(T_0 - T_i)}{A_i (\overline{T_w} - T_b)} \quad (3.21)$$