

## บทที่ 2

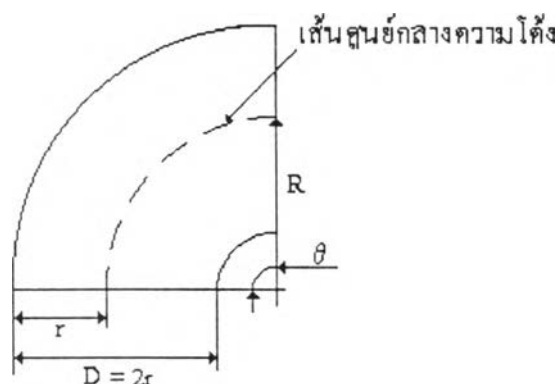
### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### งานวิจัยของ H.Ito

ในปี ค.ศ. 1960 H.Ito ทำการทดลองเพื่อศึกษาหาค่าความดันลด (Pressure loss) ที่เกิดขึ้นในท่อโค้งผิวเรียบ ในช่วงการไหลของน้ำแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ที่ช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ (Re) ตั้งแต่  $2 \times 10^4$  ถึง  $4 \times 10^5$  ในการทดลองได้พิจารณาผลกระทบของ รัศมีความโค้ง (R) , เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์(Re) , มุมความโค้ง ( $\theta$ ) , รวมไปถึงผลจากความโค้งที่มีต่อความดันลดในท่อตรงด้านทางออก (Downstream tangent) ท่อโค้งที่ H.Ito ใช้ในการทดลองทำขึ้นจากทองเหลืองหล่อผิวภายในเรียบ ลักษณะของท่อที่ H.Ito ใช้ในการศึกษาแสดงในตารางที่ 2.1 และรูปที่ 2.1 แสดงมิติของความโค้งที่ Ito พิจารณา

ตารางที่ 2.1 ลักษณะท่อโค้งที่วิจัย โดย H.Ito

Pipe bend no.	Deflection angle $\theta$ (deg-min)	ID,2r (mm)	Radius of curvature R (mm)	Relative radius R/r
1	44-53	34.90	64.20	3.68
2	45-13	34.96	113.00	6.46
3	44-6	34.97	255.40	14.60
4	89-48	35.01	35.20	2.01
5	89-3	34.90	63.80	3.66
6	89-30	34.65	114.20	6.59
7	178-24	34.67	63.90	3.68
8	179-36	34.78	113.20	6.52
9(screw elbow)	45-0	42.24	50.40	2.39
10(screw elbow)	90-0	45.36	28.40	1.25



รูปที่ 2.1 แสดงมิติของความโค้งที่ Ito พิจารณา

ในงานวิจัยของ H.Ito ได้ทำการวัดหาค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในส่วนท่อโค้ง ( $\Delta h_w$ ) และความดันตกที่เกิดจากความโค้งของท่อในท่อตรงด้านทางออก ( $\Delta h_d$ ) และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ( $K_t$ ) โดยกำหนดให้ค่าความดันตกรวม ( $\Delta h_t$ ) คือผลรวมของค่าความดันตกในส่วนท่อโค้งกับความดันตกที่เกิดจากความโค้งที่มีต่อท่อตรงด้านทางออก (Downstream tangent,  $\Delta h_d$ )

$$\Delta h_t = \Delta h_w + \Delta h_d \quad (2.1)$$

H.Ito ได้พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานเนื่องจากความโค้งโดยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานซึ่งเกิดขึ้นในส่วนท่อโค้งและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมซึ่งได้จากสมการดังนี้

$$K_t = \frac{2g\Delta h_t}{v^2} \quad (2.2)$$

และ

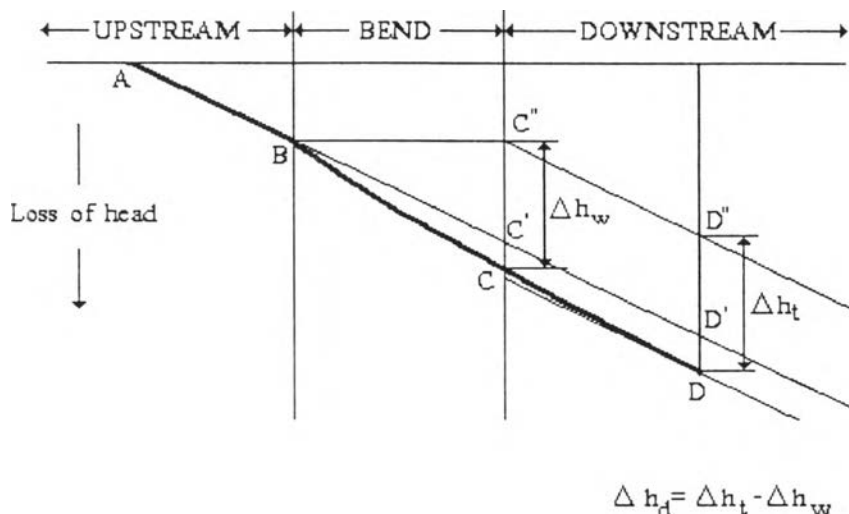
$$K = \frac{2g\Delta h_w}{v^2} \quad (2.3)$$

จากรูปที่ 2.2 เมื่อ A B C D แสดงถึงผลการเปลี่ยนแปลงความดันตกเนื่องจากท่อโค้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดย B C เป็นความดันตกที่เกิดขึ้นที่ส่วนโค้งของท่อและ C D เป็นความดันตกที่เกิด

ขึ้นในท่อตรงด้านทางออก (ประกอบด้วยความดันตกที่เกิดจากความเสียดทานภายในท่อตรงและความดันตกเป็นผลมาจากความโค้ง) , A B C' D' คือ ผลจากการเปลี่ยนแปลงความดันตกของท่อโดยพิจารณาท่อทั้งหมดเป็นท่อตรง (ท่อตรงด้านทางเข้าและด้านทางออกส่วนโค้ง , ท่อโค้ง ) และ A B C'' D'' คือ ผลการเปลี่ยนแปลงความดันในกรณีที่ไม่พิจารณาความดันตกทั้งหมดอันเกิดจากท่อโค้ง

ผลจากการวิจัยของ H.Ito พบว่า

1. รัศมีความโค้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมของท่อโค้ง กล่าวคือเมื่อเพิ่มอัตราส่วนรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาที่เรย์โนลด์ส์นัมเบอร์และ มุมความโค้งเดียวกัน



รูปที่ 2.2 ความดันตกในท่อโค้ง

2. ท่อโค้งที่มีรัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อมากกว่า 10.4 การเกิดความดันตกเนื่องจากความโค้งในท่อตรงด้านทางออกมีค่าน้อยมาก สามารถกล่าวได้ว่าความดันตกรวมอันเกิดจากท่อโค้งเกิดขึ้นเฉพาะที่ส่วนโค้งเท่านั้น และ H.Ito ได้กล่าวไว้ว่า “ ค่าความดันตกรวมสามารถวัดได้โดยคร่อมระหว่าง ด้านทางเข้ากับด้านทางออกของส่วนโค้ง ในกรณีที่รัศมีความโค้งต่อรัศมีท่อ มีค่า

มากกว่าคือมากกว่า 10.4” กล่าวคือ เมื่อรัศมีความโค้งต่อรัศมีที่มากกว่า 10.4 สามารถตัดผลของความดันลดจากความโค้งที่เกิดขึ้นในท่อตรงด้านทางออกได้

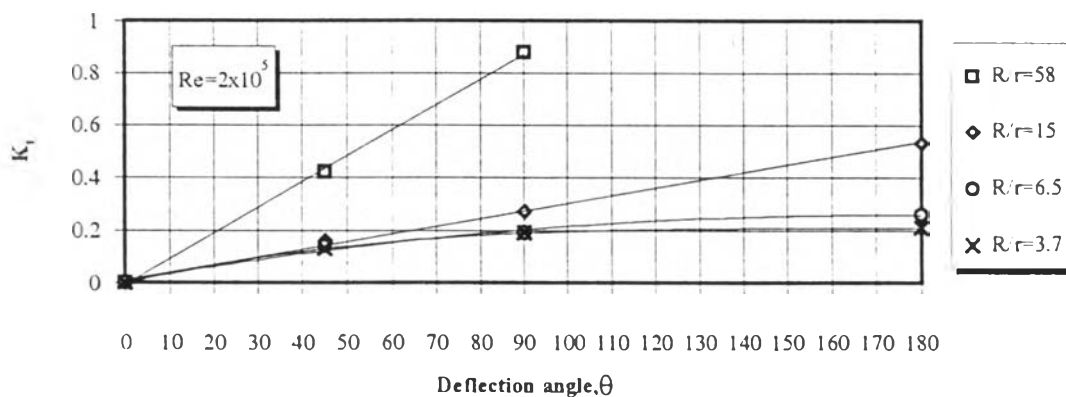
3. ที่รัศมีความโค้งต่อรัศมีที่มากกว่า (มากกว่า 10.4) มุมความโค้งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวม ดังแสดงในรูปที่ 2.3

4. H.Ito ได้เสนอสมการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมจากผลการทดลองดังนี้

สำหรับ  $Re\left(\frac{r}{R}\right)^2 < 91$

$$K_t = 0.00873\alpha f_c \theta \frac{R}{r} \quad (2.4)$$

โดย 
$$f_c = \frac{0.00725 + 0.076 \left[ Re\left(\frac{r}{R}\right)^2 \right]^{-0.25}}{(R/r)^{0.5}}$$



รูปที่ 2.3 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานรวมกับมุมความโค้ง

สำหรับ  $Re\left(\frac{r}{R}\right)^2 > 91$

$$K_t = 0.00241\alpha\theta Re^{-0.17}\left(\frac{R}{r}\right)^{0.84} \quad (2.5)$$

โดย  $\theta = 45^\circ$   $\alpha = 1 + 14.2\left(\frac{R}{r}\right)^{-1.47}$

$\theta = 90^\circ$

$$\alpha = 0.95 + 17.2\left(\frac{R}{r}\right)^{-1.96} \quad \frac{R}{r} < 19.7$$

$\alpha = 1$

$$\frac{R}{r} > 19.7$$

$\theta = 180^\circ$

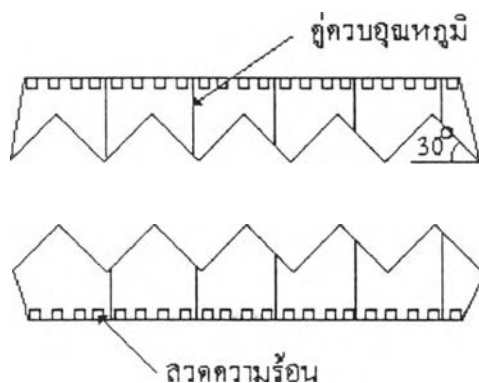
$$\alpha = 1 + 116\left(\frac{R}{r}\right)^{-4.52}$$

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายรวมที่ได้จากสมการทางเอมไพริคัลดังกล่าวนี้ เกิดจากการพิจารณาผลรวมของความดันลดทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในท่อโค้งและค่าความดันลดที่เกิดจากความโค้งที่เกิดขึ้นในท่อตรงด้านทางออก ซึ่งในอุปกรณ์ทดลอง H.Ito พิจารณาค่าความดันลดที่เกิดจากความโค้งที่เกิดขึ้นในท่อตรงด้านทางออกที่มีความยาวประมาณ 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ ทำให้จากหนังสือ Fundamental of pipe flow ได้วิจารณ์สมการค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายรวมของ H.Ito ว่า “สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายรวมที่เสนอโดย H.Ito นั้นจะถูกต้องและสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อท่อโค้งจะต้องต่อเข้ากับท่อตรงด้านทางออกเป็นระยะ 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลาง” ดังนั้นในกรณีที่ระบบท่อที่มีความยาวของท่อตรงด้านทางออกจากท่อโค้ง สั้นกว่า 50 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางถ้าคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายรวมโดยสมการของ H.Ito ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียหายรวมที่ได้จะมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

#### งานวิจัยของ J.E.O'Brien

ในปี ค.ศ.1982 J.E.O'Brien ทำการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและสัมประสิทธิ์ความเสียหายสำหรับการไหลในช่วงรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิคงรูปแล้ว (Fully developed region) ภายในท่อลูกฟูกหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด  $12.7 \times 50.8 \text{ mm}^2$  ความยาว (L) 203.2 mm สร้างจากแผ่นทองแดง โดยผิวท่อลูกฟูกทำมุม  $30^\circ$  กับแนวระดับ ลักษณะของท่อลูกฟูกและส่วนให้ความร้อนในงานวิจัยของ J.E.O'Brien แสดงในรูปที่ 2.4 ได้ทำการทดลอง

ในช่วงการไหลของน้ำแบบราบเรียบ (Laminar flow) จนถึงช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ในช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 1500 ถึง 25000 และแฟรน์เติลนัมเบอร์ ตั้งแต่ 4 ถึง 8 โดยมีสภาพการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่



รูปที่ 2.4 ลักษณะของท่อลูกฟูกและส่วนให้ความร้อนในงานวิจัยของ J.E.O'Brien

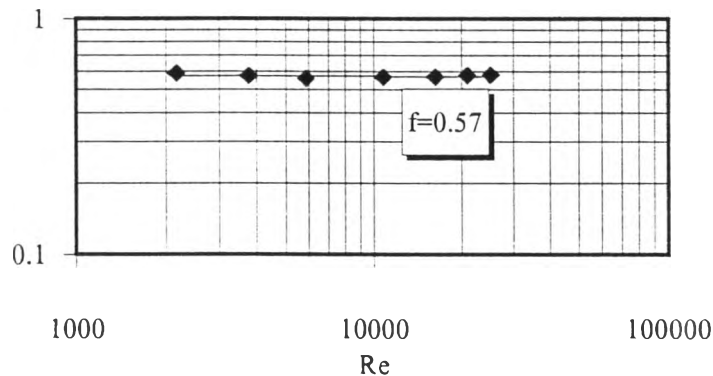
J.E.O'Brien ทำการวิเคราะห์หาช่วงที่การไหลในท่อเริ่มมีรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิคงรูป (Fully developed region) ด้วยเหตุผลว่าในช่วงรูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิคงรูปค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวท่อและอุณหภูมิเฉลี่ยของของไหลที่หน้าตัดใดๆจะคงที่ นั่นหมายความว่าช่วงดังกล่าวเป็นช่วงที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน ( $h$ ) คงที่ตลอดระยะตามแกนการไหล

การควบคุมค่าแฟรน์เติลนัมเบอร์ทำได้โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ปากทางเข้า และทางออก ท่อทดสอบ

จากผลการศึกษาวิจัย J.E.O'Brien เสนอสมการของการพาความร้อนในรูปตัวแปรไร้มิติ ในช่วงการไหลรูปแบบความเร็วและอุณหภูมิคงรูปแล้ว สำหรับช่วงเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 1500 ถึง 25000 และ แฟรน์เติลนัมเบอร์ ตั้งแต่ 4 ถึง 8 แสดงในสมการที่ 2.6

$$Nu = 0.409 Re^{0.614} Pr^{0.34} \quad (2.6)$$

และพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานคงที่เท่ากับ 0.57 สำหรับช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ ตั้งแต่ 1500 ถึง 25000 โดยไม่ขึ้นกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากรูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทานกับเรย์โนลด์นัมเบอร์ จากงานวิจัยของ J.E.O'Brien

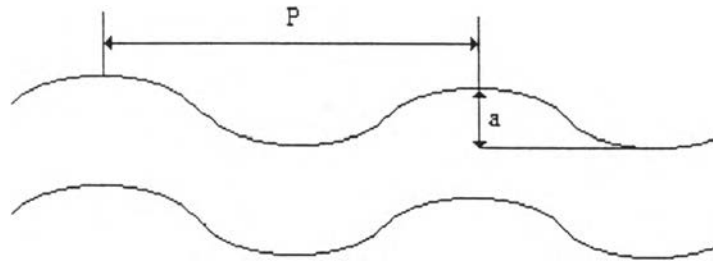


รูปที่ 2.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ และค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จากงานวิจัยของ J.E.O'Brien

### งานวิจัยของ กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์

ในปี พ.ศ. 2520 กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์ ได้ทำการศึกษาวิจัยการถ่ายเทความร้อนในท่อลูกฟูก หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยทำการวิจัยในช่วงการไหลของอากาศเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow) จนถึงการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ในช่วงเรย์โนลด์นัมเบอร์ตั้งแต่ 1500 ถึง 18000 โดยทำการศึกษาที่รูปแบบของความเร็วและอุณหภูมิกำลังเปลี่ยนรูปพร้อมๆกัน กล่าวคือเป็นการพิจารณาผลกระทบที่ปากทางเข้า (Entrance effect) และมีสภาพการให้ความร้อนเป็นแบบค่าความร้อนต่อหน่วยพื้นที่คงที่ (Constant heat flux)

ท่อลูกฟูกที่ใช้ทดสอบทำด้วยทองแดง หน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด  $60 \times 330$  ตารางมิลลิเมตร ยาว 200 มิลลิเมตร ผิวท่อมีลักษณะโค้งเป็นรูปไซน์เคิร์ฟ (Sine curve) โดยมีระยะพิท (P) เท่ากับ 20 มิลลิเมตร และแอมปริจูด (a) เท่ากับ 3 มิลลิเมตร ลักษณะของท่อที่ใช้ทดสอบแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะท่อลูกฟูกที่ใช้วิจัย โดย กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์

จากการทดลองพบว่าค่าตัวเลขที่นัมเบอร์เฉลี่ย มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ในรูปสมการยกกำลัง และพบว่าค่าตัวเลขที่นัมเบอร์ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนในท่อลูกฟูกที่ใช้ในการวิจัย มีค่าสูงกว่าตัวเลขที่นัมเบอร์ในท่อผิวเรียบ เมื่อพิจารณาที่ ความยาว , หน้าตัด และ ค่าเรย์โนลด์์นัมเบอร์ ที่เท่ากัน ซึ่ง กฤตย์ ศรีนภาสวัสดิ์ ได้เสนอสมการที่ได้จากการทดลอง ดังนี้

$$Nu = 0.197 Re^{0.6771} \quad (2.8)$$