

บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทบทวนผลงานวิจัยที่ผ่านมา

การไหลในระบบท่อย่อมเกิดแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวท่อ ซึ่งแรงเสียดทานดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับชนิดของท่อและความขรุขระของท่อ ในปัจจุบันยังไม่มีวิธีทางวิทยาศาสตร์ที่จะวัดความขรุขระของท่อที่มีขายตามท้องตลาด แต่มีนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรหลายคนได้ทำการทดลองเพื่ออธิบายคุณลักษณะของความขรุขระที่ทำเทียม (artificial roughness) ขึ้นมา โดยการวัดและอธิบายองค์ประกอบทางเลขาคณิตของความขรุขระที่มีผลต่อความเสียดทานของท่อ และได้พิสูจน์ให้เห็นว่าความเสียดทานของท่อไม่เพียงขึ้นอยู่กับ ขนาด และรูปร่างของความขรุขระเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับกระจ่าย และระยะห่างของความขรุขระ อีกด้วย

วิศวกรชาวเยอรมัน ชื่อ J.Nikuradse (1933) ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับความเสียดทานของท่อ โดยการเคลือบผนังด้านในของท่อด้วยทรายขนาดต่าง ๆ กันในการทดลองแต่ละครั้ง ทั้งนี้ในแต่ละครั้งได้ใช้ทรายขนาดเดียวกับที่ผ่านการล่อนด้วยตระแกรง ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเม็ดทรายอาจแทนด้วย ϵ ซึ่งเรียกว่าความขรุขระสมบูรณ์ (absolute roughness) และ D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ โดยทั่วไป แฟกเตอร์ความเสียดทานจะขึ้นอยู่กับ Reynolds number และ ϵ/D ซึ่ง ϵ/D นี้เรียกว่า ความขรุขระสัมพัทธ์ (relative roughness) ในการทดลองของ Nikuradse ได้พิสัยของความขรุขระสัมพัทธ์อยู่ระหว่าง 0.000985 ถึง 0.0333

Von Karman ใช้ข้อมูลจากการทดลองของ Nikuradse มาวิเคราะห์สร้างสมการของแฟกเตอร์ความเสียดทาน ของการไหลในท่อเรียบ (Smooth pipe) เป็นแบบปั่นป่วนโดยที่ความหนาของชั้นขอบเขต (δ) มากกว่า 5 เท่าของความขรุขระสมบูรณ์ ($\delta > 5\epsilon$) ได้ดังนี้

$$1/\sqrt{f} = 2 \log \text{Re} \sqrt{f} - 0.8 \quad (2.1)$$

สมการที่ (2.1) สามารถใช้ได้กับท่อทุกประเภทราบใดที่ $\delta > 5\epsilon$ ซึ่งเรียกสภาพการไหลแบบนี้ว่าการไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow) และพบว่าสมการนี้จะสมเหตุสมผลสำหรับ

ท่อเรียบและมีค่า Reynolds number (Re) น้อยกว่า 4000 ตัวอย่างของท่อเรียบคือท่อทองเหลือง และท่อแก้ว เป็นต้น

Blasius (1913) ได้แสดงให้เห็นว่าในกรณีของท่อเรียบที่มีค่า Re อยู่ระหว่าง 3000 ถึง 100000 ค่าโดยประมาณของแฟกเตอร์ความเสียดทานสามารถคำนวณได้จาก

$$f = 0.316/Re^{1/4} \quad (2.2)$$

เมื่อ Reynolds number (Re) มีค่าสูงๆ ความหนาของชั้นขอบเขตจะลดลงถ้าหาก $\delta < 0.3\epsilon$ จะพบว่าท่อจะมีสภาพเหมือนท่อขรุขระทั้งหมด นั่นคือแฟกเตอร์ความเสียดทานจะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของ Reynolds number ในกรณีดังกล่าวนี้ Von Karman พบว่าสามารถคำนวณแฟกเตอร์ความเสียดทานได้จาก

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{D}{\epsilon} \right) + 1.14 \quad (2.3)$$

ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานที่ได้จากสมการที่ (2.3) จะตรงกับค่าที่ได้จากแผนภาพของ Moody ในช่วงที่เส้นกราฟอยู่ในแนวระนาบ ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

ในช่วงที่ความหนาของชั้นขอบเขต มีค่าอยู่ระหว่างเงื่อนไขของสมการ (2.1) และ (2.3) กล่าวคือ $5\epsilon < \delta < 0.3\epsilon$ สำหรับท่อทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นท่อเรียบหรือท่อขรุขระก็ตาม Colebrook (1939) พบว่าสามารถจะคำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานโดยประมาณได้จาก

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (2.4)$$

2.2 แผนภาพของ Moody (Moody diagram)

การหาค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานโดยการคำนวณ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น อาจจะไม่สะดวกต่อการใช้งานเท่ากับการหาค่าจากแผนภาพ ซึ่งแผนภาพแสดงค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานที่ได้รับการนิยามไว้มากที่สุดคือแผนภาพที่เขียนโดย L.F. Moody (1944) เรียกว่าแผนภาพของ

Moody (Moody diagram) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นผลมาจากการนำสมการต่างๆ ในหัวข้อที่แล้วมาพล็อตกราฟในสเกลล็อก (log-log graph) แผนภาพของ Moody ประกอบไปด้วยตัวเลขแสดงค่าบนสามแกนคือ แกนนอนเป็นค่า Reynolds number แกนตั้งด้านขวาแสดงค่าความขรุขระสัมพัทธ์ และแกนตั้งด้านซ้ายแสดงค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน นอกจากนี้เพื่อความสะดวกในการที่จะไม่ต้องคำนวณค่า Reynolds number ในกรณีของอากาศและน้ำที่อุณหภูมิ 60°F จึงได้แสดงตัวเลขผลคูณของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D) กับความเร็ว (V) ไว้ที่แกนแนอนด้านบนแต่สำหรับอากาศและน้ำที่มีอุณหภูมิแตกต่างจากนี้ ก็จำเป็นต้องคำนวณค่า Reynolds number แล้วใช้แกนแนอนด้านล่างตามปกติ

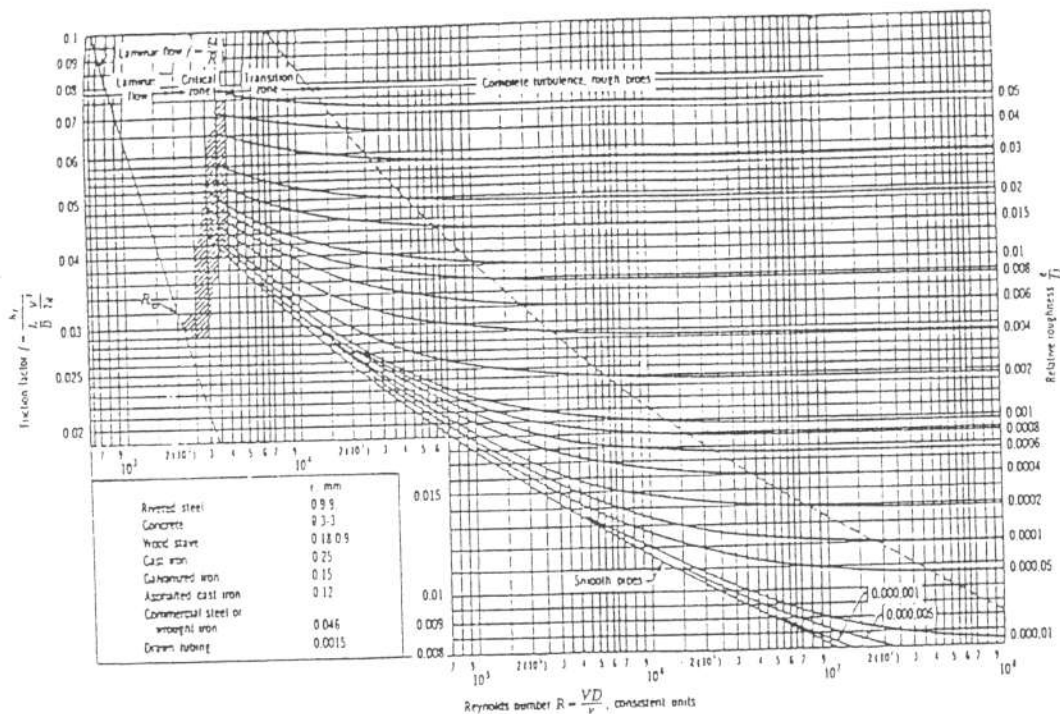
เส้นกราฟในแผนภาพของ Moody แบ่งออกเป็น 4 ช่วง คือช่วงแรกสำหรับการไหลแบบราบเรียบซึ่งมีค่า Reynolds number น้อยกว่า 2000 ช่วงที่สองสำหรับการไหลแบบวิกฤตซึ่งมีค่า Reynolds number อยู่ระหว่าง 2000 ถึง 4000 การไหลในช่วงนี้อาจจะเป็นแบบราบเรียบหรือแบบปั่นป่วนก็ได้ ทำให้ค่าต่างๆ ไม่แน่นอน ช่วงที่สามเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลงซึ่งค่า f จะแปรผันกับทั้ง Reynolds number และความขรุขระสัมพัทธ์ และช่วงสุดท้ายเป็นช่วงสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ (complete turbulence) ซึ่งค่า f ไม่ขึ้นอยู่กับ Reynolds number แต่จะแปรผันตามความขรุขระสัมพัทธ์อย่างเดียว

จากแผนภาพของ Moody จะเห็นว่าไม่มีเส้นแบ่งช่วงการไหลอย่างชัดเจนระหว่างแบบเปลี่ยนแปลงกับแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ อย่างไรก็ตาม R.J.S. Pigott ได้แบ่งช่วงการไหลดังกล่าวด้วยเส้นประดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งเส้นประดังกล่าวนี้ได้มาจากสมการ $Re = 3500 (\epsilon/D)$

ในการใช้แผนภาพของ Moody จำเป็นจะต้องคำนวณหาความขรุขระสัมพัทธ์ ซึ่งค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อแต่ละชนิดสามารถหาได้จากตารางที่ 2.1 ทั้งนี้เนื่องจาก (ϵ/D) ไม่มีมิติ ดังนั้นทั้งความขรุขระสัมบูรณ์และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อจะต้องอยู่ในหน่วยเดียวกัน

ข้อพึงสังเกตคือค่าของ ϵ ดังกล่าวข้างต้นนั้นได้มาจากท่อชนิดต่างๆ ที่อยู่ในสภาพใหม่เอี่ยมและสะอาด เมื่อท่อเก่าลงจะมีค่า ϵ สูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ท่อมีขนาดเล็ก เพราะจะมีสนิมและตะกอนเกาะอยู่ที่ผนังด้านในของท่อทำให้ขนาดพื้นที่หน้าตัดลดลง ดังนั้นถ้าหากเป็นท่อเก่าจำเป็นต้องมีการปรับค่า ϵ เพื่อให้ได้ค่า f ที่เหมาะสม

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ซึ่งค่า f จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ v^2 ไม่ขึ้นอยู่กับค่า Reynolds number



ภาพที่ 2.1 แผนภาพของ Moody

ตารางที่ 2.1 ค่าความขรุขระสัมบูรณ์ของท่อใหม่ ชนิดต่างๆ

ชนิดของท่อ	ฟุต/ฟุต	มม./มม.
1. ท่อทองเหลือง ท่อดีบุก หลอดแก้วที่ได้จากการรีด ท่อซีเมนต์ที่หล่อโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและท่อที่เคลือบภายในด้วย bituminous	0.000005	0.0015
2. ท่อเหล็กกล้าหรือเหล็กเหนียวตามท้องตลาด	0.00015	0.046
3. ท่อเหล็กกล้าที่สร้างโดยการเชื่อม	0.00015	0.046
4. ท่อเหล็กหล่อที่เคลือบหรือฉาบด้วยยางมะตอย	0.004	0.12
5. ท่อเหล็กอาบสังกะสี	0.0005	0.15
6. ท่อเหล็กหล่อโดยเจดีย์	0.00085	0.25
7. ท่อไม้	0.0006-0.003	0.18-0.9
8. ท่อคอนกรีต	0.001-0.01	1.3-3
9. ท่อเหล็กกล้าที่ย้าหมุด	0.003-0.03	0.9-9