

การหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิวโทเนียนเมื่อไหลผ่านท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อโดยวิธีการทดลอง

Friction Factor and Loss Coefficients in ducts of Non-Newtonian Fluid by Experiment

ธีระพงษ์ คำประเสริฐ¹, และ จำลอง ปรามแก้ว²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

E-mail: oh_rukbang@hotmail.com โทรศัพท์ 0-2329-8350 โทรสาร 0-2329-8352

บทคัดย่อ

การสูญเสียพลังงานการไหลในระบบท่อ ทั้งในท่อตรงและอุปกรณ์ เช่น วาล์ว ข้อต่อ ต่างๆ เป็นเรื่องที่มีความสำคัญ การประเมินค่าความสูญเสียดังกล่าวจะต้องแม่นยำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบระบบส่งของเหลว บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอน-นิวโทเนียน เมื่อไหลผ่านท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อโดยวิธีการทดลอง การศึกษาจะใช้น้ำแป้งข้าวเหนียวที่มีความเข้มข้น 10%, 20%, 30% และ 40% เป็นสารทดสอบ เพื่อหาค่าตัวประกอบความเสียดทานการไหลในท่อตรงขนาด 19.05 และ 25.4 มม. และหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียในบอลวาล์ว เกตวาล์ว และข้อต่อตรง ขนาด 19.05 และ 25.4 มม. จากผลการทดลองพบว่าเมื่อน้ำแป้งที่มีความเข้มข้นต่างๆไหลผ่านท่อตรงขนาด 19.05 และ 25.4 มม. ค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลงเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่เรย์โนลด์นัมเบอร์เท่ากับ 3000 ค่าตัวประกอบความเสียดทานของน้ำแป้งข้าวเหนียวที่มีความเข้มข้น 10% เมื่อไหลผ่านท่อตรงขนาด 19.05 และ 25.4 มม. มีค่าเท่ากับ 0.064378 และ 0.055902 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นเท่ากัน ท่อขนาดเล็กจะมีค่าตัวประกอบความเสียดทานมากกว่าท่อขนาดใหญ่ สำหรับการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของอุปกรณ์ประกอบท่อทั้ง 3 แบบ คือบอลวาล์ว เกตวาล์ว และข้อต่อตรง พบว่าอุปกรณ์ประกอบท่อขนาด 19.05 มม. มีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย มากกว่าอุปกรณ์ประกอบท่อขนาด 25.4 มม. และค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะมีค่าลดลงเมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนความเข้มข้นไม่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

คำหลัก: นอน-นิวโทเนียน, ตัวประกอบความเสียดทาน, สัมประสิทธิ์การสูญเสีย, เรย์โนลด์นัมเบอร์

Abstract

This article presents the method to find the friction factor and loss coefficient of Non - Newtonian fluid in straight pipe and pipe fittings by experiment. In this article, Rice starch concentration at 10%, 20%, 30% and 40% is used as the test substance. The straight pipe diameter 19.05 mm and 25.4 mm is used find friction factor and ball valve, gate valve and connector all diameter size 19.05 mm and 25.4 mm are used find loss coefficient. The results showed that; when Non-Newtonian fluid flow through a straight pipe 19.5 mm and 25.4 mm, the friction factor is decreased when increase Reynolds number. If considering the Reynolds number at 3000 and Non-Newtonian fluid concentration 10%, the friction factor of the straight pipe 19.5 mm and 25.4 mm are 0.064378 and 0.055902, respectively. Showed that the friction factor of Small pipe is larger than the big pipe. The loss coefficient of Ball valve, Gate valve and connector size 19.5 mm is larger than size

25.4 mm and a loss coefficient is decreased at Reynolds number is increased. The concentration does not affect the friction factor and the loss coefficient.

Keywords: Non-Newtonian, Friction Factor, Loss Coefficients, Reynolds number

1. บทนำ

การขนถ่ายของเหลวในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมปิโตรเคมี และ อุตสาหกรรมการก่อสร้าง มักจะเป็นการขนถ่ายของเหลวที่มีคุณสมบัติเป็นนอน-นิวโทเนียน ซึ่งเป็นของไหลที่ค่าความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนไม่มีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง ซึ่งทำให้ยากต่อการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลชนิดนี้ ซึ่งที่ผ่านมาได้มีผู้ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของของไหลนอน-นิวโทเนียนผ่านระบบท่อ เช่น Kamal El-Nahhas et al. [1] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของของไหลนอน-นิวโทเนียนที่เป็นเคโอลินไนท์หรือโคลนขาวที่ความเข้มข้นต่างกัน โดยทดสอบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนเทียบกับอัตราการเฉือนโดยพบว่าที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนจะลดลงและที่อัตราการเฉือนเพิ่มขึ้นความเค้นเฉือนจะมากขึ้นด้วย Adelson Belizario Leal et al. [2] ได้ศึกษาการหาค่าเฮดที่สูญเสียจากค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและค่าความดันที่สูญเสียไปในวาล์วข้อต่อ ข้อต่อต่างๆ โดยใช้วิธีการจำลอง พร้อมทั้งทดลอง โดยใช้ของไหลนอนนิวโทเนียนชนิด carboxymethylcellulose (CMC) และ xanthan ผลการศึกษาพบว่าเมื่อไหลผ่านโกลบวาล์วค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 10.40 โดยมีค่าเบี่ยงเบน 0.10 เมื่อไหลผ่านข้อต่อ 90° ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 โดยมีค่าเบี่ยงเบน 0.05 เป็นต้น Turian et al. [3] ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอนนิวโทเนียน 2 ชนิดคือ laterite และ gypsum ที่อัตราส่วนผสมแตกต่างกัน โดยทดลองให้ของไหลนอนนิวโทเนียนทั้งสองชนิด ไหลผ่านเกตวาล์วที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 5 ซม. พบว่า เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์มีค่าเพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะลดลง และจะมีค่าคงที่เมื่อการไหลเป็นแบบปั่นป่วน โดยวาล์วที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียมากกว่า และบริษัท Crane (1976) [4] ได้ทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของของไหลนอน-นิวโทเนียนแบบสองเฟสที่ไหลแบบปั่นป่วนในท่อ Commercial Steel Pipe ตั้งแต่ขนาด 1.27 – 60.96

ซม. โดยค่าตัวประกอบความเสียดทานจะลดลงตามขนาดท่อโดยที่เพิ่มขึ้น ที่ขนาดท่อ 1.27 ซม.ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.027 และที่ท่อขนาด 60.96 ซม.ได้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน 0.012 รวมทั้งได้เสนอผลการศึกษาในข้อต่อ ข้อต่อต่างๆด้วย

บทความนี้เป็นการนำเสนอวิธีการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เมื่อน้ำแบ่งไหลผ่านท่อและอุปกรณ์ประกอบท่อ โดยใช้ น้ำแบ่งเข้าเหนียวที่ความเข้มข้น 10%, 20%, 30% และ 40% เป็นสารทดสอบ

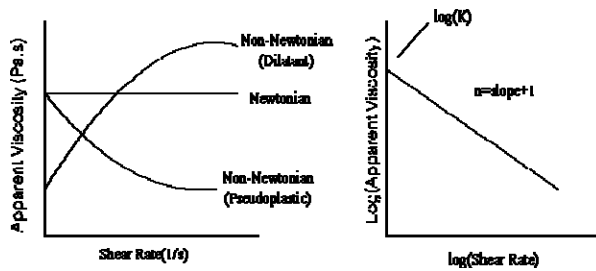
2. คุณสมบัติของของไหลนอนนิวโทเนียน

คุณสมบัติเฉพาะของของไหลแต่ละชนิด ซึ่งจะพิจารณาจากค่าดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow Behavior Index, n) เป็นค่าที่ไม่มีหน่วยและค่าดัชนีความเข้มข้น (Fluid Consistency Index, k) มีหน่วยคือ $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ค่าทั้งสองนี้จะได้จากการวัดค่าความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity, μ_{app}) ด้วยเครื่อง Brookfield Viscometer มีหน่วยเป็น $\text{Pa}\cdot\text{s}$ และค่าอัตราการเฉือน (γ) มีหน่วยเป็น s^{-1} ซึ่งเราสามารถหาค่า k และ n ได้จากความสัมพันธ์ของ Herschel-Bulkley Model ดังสมการ

$$\mu_{app} = k\gamma^{n-1} \quad (1)$$

$$\log \mu_{app} = \log k + (n-1) \log \gamma \quad (2)$$

จากสมการ ถ้าพล็อตกราฟ ระหว่าง $\log \mu_{app}$ และ $\log \gamma$ ค่าความชันคือ $n-1$ และจุดตัดแกน Y คือ $\log k$ ดังแสดงในรูปที่ 1 จากกราฟพบว่าถ้าค่า $n=1$ ของไหลนั้นจะเป็นของไหลนิวโทเนียน เพราะจะทำให้ค่า μ_{app} มีค่าคงที่ ส่วนของไหลซูโดพลาสติกจะมีค่า n น้อยกว่า 1 และของไหลไดลาแทนต์จะมีค่า n มากกว่า 1 สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1



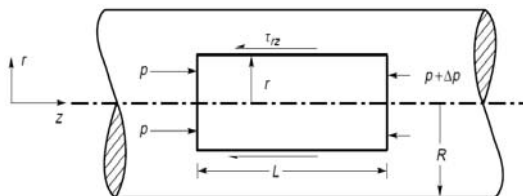
รูปที่ 1 ลักษณะของเส้นกราฟ Log-Log

ตารางที่ 1 ตัวอย่างลักษณะพฤติกรรมการไหลและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ลักษณะพฤติกรรมการไหล	K	n	t ₀
นิวโตเนียน	>0	=1	0
ซูโดพลาสติก	>0	0<n<1	0
ไดลาแทนต์	>0	1<n<infinity	0
บิงแฮม, พลาสติก	>0	1	>0

3. การไหลแบบราบเรียบในท่อกลมของของไหลนอนนิวโตเนียน

เมื่อของไหลนอนนิวโตเนียนไหลในท่อตรงที่มีรัศมี R จะมีแรงมากระทำในเอลิเมนต์ของของไหลดังรูปที่ 2 สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 3.



รูปที่ 2 การไหลในท่อแนวราบ

$$p(\pi r^2) - (p + \Delta p)\pi r^2 = \tau_{rz}(2\pi rL) \quad (3)$$

$$\text{โดยที่ } \tau_{rz} = \left(-\frac{\Delta p}{L}\right) \frac{r}{2} \quad (4)$$

ของไหลนอนนิวโตเนียนแบบซูโดพลาสติกและแบบไดลาแทนต์ จะมีความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนดังสมการ

$$\tau_{rz} = k \left(-\frac{dV_z}{dr} \right)^n \quad (5)$$

เมื่อ V_z คือความเร็วตามแกนรัศมี r ซึ่งถ้านำสมการที่ (4) มาแทนค่าในสมการ (5) พร้อมทั้งอินทิเกรตโดยเทียบกับ r เพื่อหาสมการการกระจายความเร็วได้เป็น

$$V_z = \left(\frac{n}{n+1} \right) \left(\frac{-\Delta p}{kL} \cdot \frac{R}{2} \right)^{1/n} R \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{(n+1)/n} \right] \quad (6)$$

และหากนำ V_z ทั้งหมดทุกเส้นในการไหลมาเฉลี่ยจะได้เป็นค่าความเร็วเฉลี่ยออกมา V (Average Velocity) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 7

$$V = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R 2\pi V_z dr \quad (7)$$

โดยที่ Q คืออัตราการไหลเชิงปริมาตร และเมื่อนำสมการที่ (6) แทนค่าลงไปในสมการ (7) พร้อมทั้งทำการอินทิเกรตจะได้สมการหาค่าความเร็วดังสมการที่ 8

$$V = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \left(\frac{-\Delta p \cdot R}{2kL} \right)^{1/n} R \quad (8)$$

และหากนำสมการที่ (8) มาเขียนใหม่โดยใช้เทอมของตัวประกอบความเสียดทาน ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยสมการที่ 9

$$f = \frac{\tau_w}{0.5\rho V^2} \quad (9)$$

$$\text{โดยที่ } \tau_w = \left(-\frac{\Delta p}{L} \right) \left(\frac{D}{4} \right) \quad (10)$$

และค่าตัวประกอบความเสียดทานมีความสัมพันธ์แบบเดียวกันกับของไหลนิวโตเนียน จะได้ว่า $f = (16/\text{Re})$ เขียนสมการความสัมพันธ์ของความเค้นเฉือนที่ของท่อในรูปตัวประกอบความเสียดทานในรูปของ Pressure Gradient ได้

$$\frac{-\Delta p}{L} = \frac{2f\rho V^2}{D} \quad (11)$$

แทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ (8) และเขียนในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ จะได้ว่า

$$V = \left(\frac{n}{3n+1} \right) \left(\frac{D}{4k} \frac{2f\rho V^2}{D} \right)^{1/n} \left(\frac{D}{2} \right)$$

และจาก $f = \frac{16}{\text{Re}_{PL}}$ แทนสมการ ลงไป จะได้เป็น

$$\text{Re}_{PL} = \frac{\rho V^{2-n} D^n}{8^{n-1} k \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n} \quad (12)$$

สมการนี้พิสูจน์โดย Metzner and Reed (1955)
ต่อมาในภายหลังจึงเขียนเป็น Re_{MR} ซึ่ง
 $\text{Re}_{PL} = \text{Re}_{MR}$

4. การไหลแบบปั่นป่วนในท่อกลมของของไหลนอนนิวโทเนียน

Dodge และ Metzner (1959) ได้ศึกษาการไหลของของไหล Power-law ในท่อเรียบโดยใช้ของไหลหลายชนิดจากการทดลองเขียนเป็นสมการได้

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = A(n) \log(\text{Re}_{MR} f^{(2-n)/2}) + C(n) \quad (13)$$

โดยที่ $A(n)$ และ $C(n)$ เป็นฟังก์ชันไม่ทราบค่าของ n ซึ่งผลการทดลองในช่วงที่ค่าของ $2900 \leq \text{Re}_{MR} \leq 36,000$ และ $0.36 \leq n \leq 1$ สำหรับของผสมพอลิเมอร์และอนุภาคแขวนลอยต่างๆ จะได้ค่าเป็น

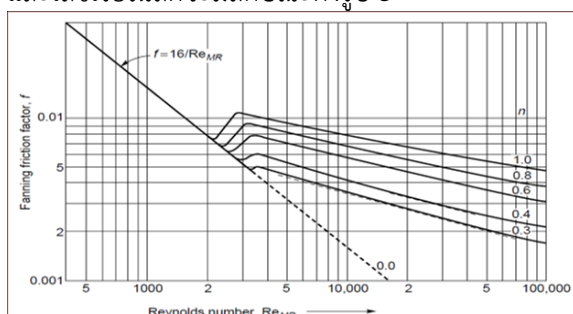
$$A(n) = 4n^{-0.75}$$

$$C(n) = -0.4n^{-1.2}$$

ซึ่งเมื่อแทนค่าในสมการ (13) จะได้เป็น

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = \frac{4}{n^{0.75}} \log(\text{Re}_{MR} f^{(2-n)/2}) - \frac{0.4}{n^{1.2}} \quad (14)$$

ซึ่งความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลด์จะมีลักษณะดังรูป 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทานและเลขเรย์โนลด์ของ Dodge and Metzner (1959)

5. การสูญเสียพลังงานในระบบท่อ

การสูญเสียพลังงานหรือที่เรียกกันว่าการสูญเสียเฮด (Head Loss) มีอยู่ 2 แบบ คือการสูญเสียหลัก (Major Loss) และการสูญเสียรอง (Minor Loss)

$$\sum h_L = \sum h_{Major} + \sum h_{Minor}$$

และเมื่อของไหลอยู่ในสภาวะคงตัว อุณหภูมิคงที่และของไหลอัดตัวไม่ได้ การหาผลรวมของการสูญเสียสามารถหาได้จากจุด 2 จุดในระบบท่อและสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\sum h_L = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

ในการทดลองออกแบบให้ท่อที่จุด 1 และ 2 มีความสูงเท่ากัน ความเร็วในท่อมักจะเท่ากัน ดังนั้นสมการข้างต้นจะเปลี่ยนเป็น

$$h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (15)$$

5.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss)

การสูญเสียหลักเป็นพลังงานที่สูญเสียไปกับความเสียดทานในท่อตรง ซึ่งสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$h_{Major} = \frac{2 f L V^2}{g D} \quad (16)$$

5.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss)

การสูญเสียพลังงานอันเนื่องมาจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้อต่อ ข้องอ และวาล์ว เป็นต้น ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการ

$$h_{Minor} = K \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

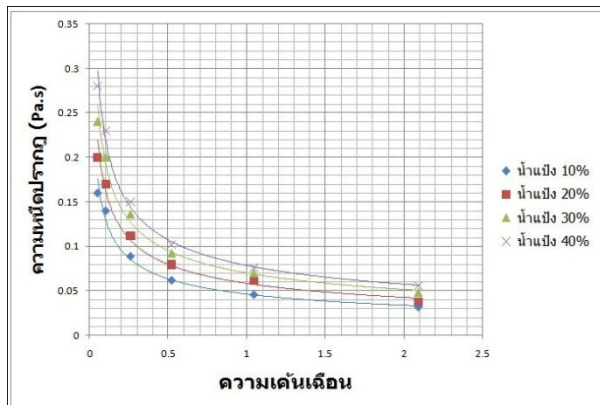
6. การทดลองและผลการทดลอง

6.1 การทดลองหาค่าพฤติกรรมทางรีโอโลยีของน้ำแป้ง

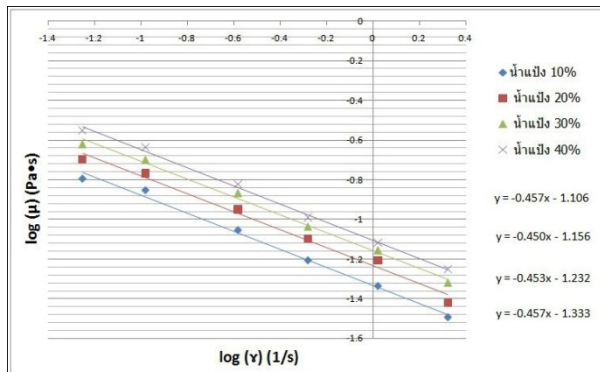
นำน้ำแป้งที่ความเข้มข้น 10%, 20%, 30% และ 40% ไปทดสอบด้วยเครื่อง Brookfield Digital Viscometer ดัชนีพฤติกรรมการไหล (Flow Behavior Index, n) และค่าดัชนีความเข้มข้น (Fluid Consistency Index, k)



รูปที่ 6 เครื่อง Brookfield Digital Viscometer รุ่น RVT



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ของความหนืดปรากฏกับอัตราความเค้นเฉือนของน้ำแป้งที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

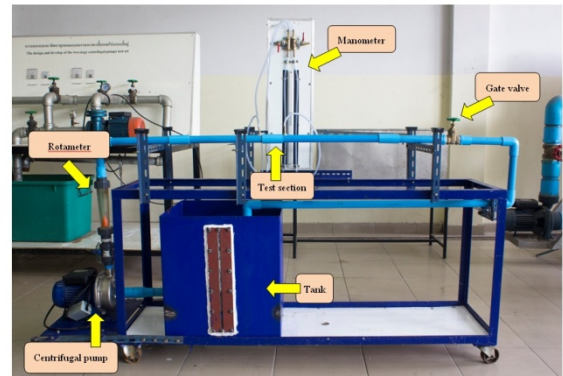


รูปที่ 8 ความสัมพันธ์แบบลอการิทึมของความหนืดปรากฏกับอัตราความเค้นเฉือนของน้ำแป้งที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน

จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 8 พบว่า ที่น้ำแป้ง 10% $n = 0.543$ และ $k = 0.04645$ ที่น้ำแป้ง 20% $n = 0.547$ และ $k = 0.05861$ ที่น้ำแป้ง 30% $n = 0.55$ และ $k = 0.06982$ ที่น้ำแป้ง 40% $n = 0.543$ และ $k = 0.07834$

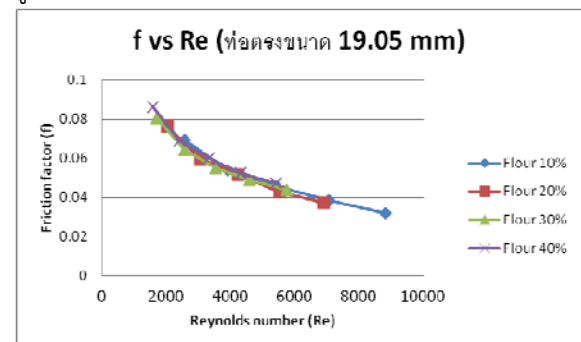
6.2 การทดลองหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

ประกอบของชุดทดลองดังรูปที่ 9 โดยวัดอัตราการไหลได้จากโรตารีมิเตอร์และเครื่องวัดการไหลแบบอุลตราโซนิกและวัดค่าความดันตกคร่อมจากมานอมิเตอร์

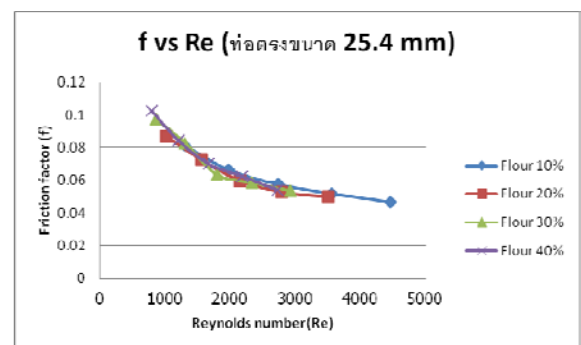


รูปที่ 9 ชุดทดลองการหาค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

จากผลการทดลองเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวประกอบความเสียดทานเทียบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้งต่างกัน สำหรับการไหลในท่อขนาด 19.05 และ 25.4 มม. ได้ดังแสดงในรูปที่ 11-12 ตามลำดับ

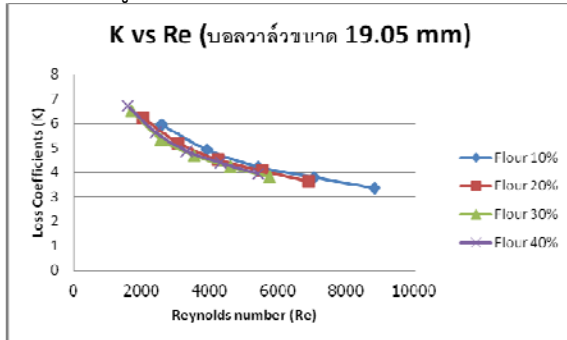


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเสียดทานและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของท่อตรงขนาด 19.05 มม.

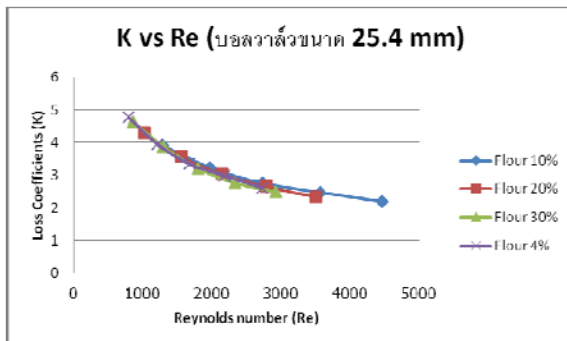


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ของค่าตัวประกอบความเสียดทานและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของท่อตรงขนาด 25.4 มม.

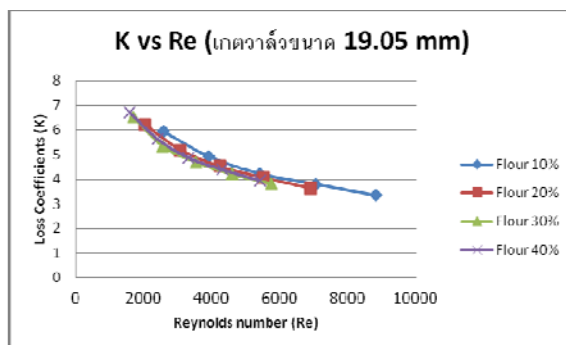
จากผลการทดลองเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียเทียบกับค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ที่ความเข้มข้นของน้ำแป้งต่างกันเมื่อไหลผ่านบอลลวาล์วเกตวาล์ว และข้อต่อตรงขนาด 19.05 และ 25.4 มม. ดังแสดงในรูปที่ 13-18



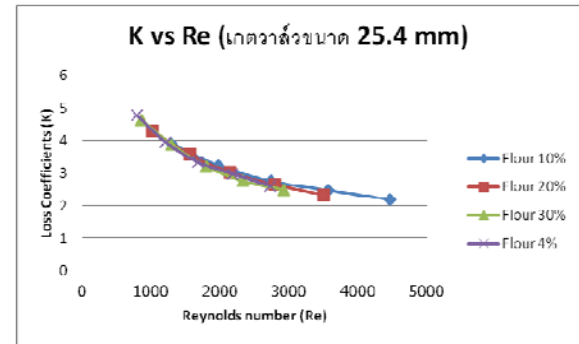
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของบอลลวาล์วขนาด 19.05 มม.



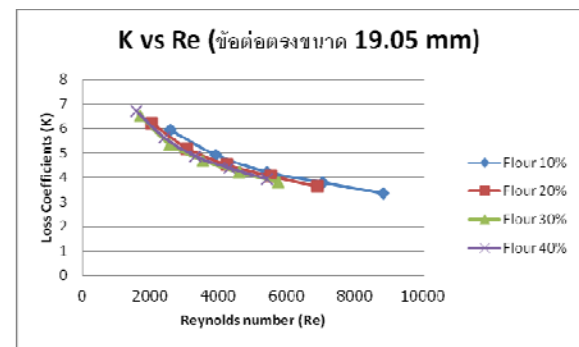
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของบอลลวาล์วขนาด 25.4 มม.



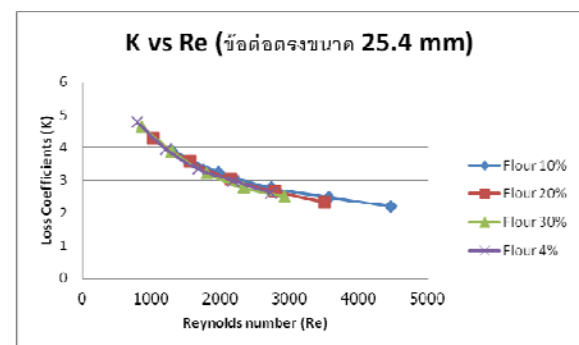
รูปที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเกตวาล์วขนาด 19.05 มม.



รูปที่ 16 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของเกตวาล์วขนาด 25.4 มม.



รูปที่ 17 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของข้อต่อตรงขนาด 19.05 มม.



รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียและเรย์โนลด์นัมเบอร์ของข้อต่อตรงขนาด 25.4 มม.

7. สรุป

จากผลการทดลองหาค่าตัวประกอบความเสียดทานของน้ำแป้งข้าวที่ไหลผ่านท่อตรงขนาด 19.05 และ 25.4 มม. พบว่า เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นค่าตัวประกอบความเสียดทานจะมีค่าลดลง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างท่อทั้งสองขนาดจะเห็นว่า ท่อขนาดเล็กจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าท่อขนาดใหญ่ ส่วนการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสีย เมื่อไหลผ่านบอลลวาล์ว เกตวาล์วและข้อต่อตรงพบว่า เมื่อเรย์โนลด์นัมเบอร์เพิ่มขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียจะลดลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียของอุปกรณ์ท่อ



ดังกล่าวทั้ง 2 ขนาด จะเห็นว่าอุปกรณ์ท่อขนาดเล็กจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานมากกว่าอุปกรณ์ท่อขนาดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Turian et al. [3] โดยที่ความเข้มข้นของน้ำแป้งข้าวไม่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเสียดทานและสัมประสิทธิ์การสูญเสีย

8. เอกสารอ้างอิง

8.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Turian, Hsu , Sung and PLACKMANN (1998). Flow of Concentrated non-Newtonian Slurries, *International Journal Multiphase Flow*, Vol.24(2) pp 243-269
- [2] Kemblowski, Z., Kolodziejski, J. (1973). Flow Resistances of non-Newtonian Fluids in Transitional and Turbulent Flow, *International Journal Chemical Engineering*, Vol.13, PP.265-272.
- [3] Shaver, R. G., Merrill, E. W. (1959). Turbulent Flow of Pseudoplastic Polymer Solutions in Straight Cylindrical Tubes, *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 5, PP.181-190.
- [4] Dodge, D. W., Metzner, A. B. (1959). Turbulent Flow of non-Newtonian Systems, *A.I.Ch.E. Journal* Vol 5, pp.191-198.
- [5] Tomita, Y. (1959). A study on non-Newtonian Flow in Pipe Lines, *Bulletin of J.S.M.E*, Vol.2, pp. 10-21.

8.2 บทความจากเอกสารประกอบการประชุม (Proceedings)

- [1] Kamal El-Nahhas , Nageh Gad El-Hak, Magdy Abou Rayan and Imam El-Sawaf. (2005). Flow behaviour of non-Newtonian clay slurries, Paper presented in the *Ninth International Water Technology Conference*, IWTC9, Sharm El-Sheikh, Egypt
- [2] Adelson Belizário Leal, Luis Américo Calcada, Cláudia Mirim Scheid (2001). Non-Newtonian Fluid Flow in Ducts: Friction Factor and Loss Coefficient. Paper presented in the 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering

8.3 รายงาน

- [1] Coelho,G.L.V.,(1982). *Reologia Escoamento Turbulento de Suspensões de Minério de Ferro*, Thesis de M. Sc.,Campinas, Brasil.
- [2] Crane Co. (1976). *Flow of Fluids Through Valves, Fittings and Pipe*, Tech. Paper No. 410, 16th printing. Crane Co., 300 Park Avenue, NY.

8.4 หนังสือ

- [1] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., and Huebsch, B. B. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, New York
- [2] R.P.Chhabra and J.F. Richardson. (1999). *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*, Wildwood Avenue, Woburn, Great Britain