การลดแรงเสียดทานของท่ออุตสาหกรรมโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

Drag Reduction in Industry Pipe by Mean Of Polymer Addition

อรฤทัย สมโน* และอนันต์ชัย อยู่แก้ว

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000
ติดต่อ: E-mail: karunapron@gmail.com*, ananchaiu@nu.ac.th โทร 0-5596-4230 โทรสาร 0-5596-4000

บทคัดย่อ

การสูญเสียพลังงานจากการสูบน้ำผ่านท่ออุตสาหกรรมนั้น การสูญเสียหลักเกิดจากแรงเสียดทานระหว่างผนังกับท่อ จากการศึกษาพบว่าการเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติการละลายน้ำได้ดีเพียงเล็กน้อยสามารถช่วยลดการสูญเสียดังกล่าวได้ จากการทดลองการไหลเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของสารละลายพอลิเมอร์ที่มีต่อการลดแรงเสียดทานนี้ได้ใช้ท่อพีวีซีขนาด 10 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) และสารละลายพอลิเมอร์ชนิดโพลีอะคลาลาไมด์ (Polyacrylamide, PAM) โดยวัดความดันตกคร่อมภายในท่อที่มีความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ 0 10 50 และ 100 wppm (เทียบกับน้ำหนัก) ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อยช่วงระหว่าง 15000<Re<30000 จากนั้นจึงคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อ พบว่าการเติมสารละลายพอลิเมอร์สามารถลดการสูญเสียหลักของแรงเสียดทานจากการสูบน้ำผ่านท่อ ในระบบเปิดได้ถึง 50% เทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารละลายพอลิเมอร์ และในระบบหมุนเวียนลดการสูญเสียหลักของแรงเสียดทานจากการสูบน้ำผ่านท่อได้ถึง 56% เทียบกับกรณีที่ไม่เติมสารละลายพอลิเมอร์

คำหลัก: การไหลผ่านท่ออุตสาหกรรม, การลดแรงเสียดทาน, การเติมสารละลายพอลิเมอร์

Abstract

The loss of energy from the pump through the pipe line industry is caused by friction between the pipe wall. The past study name found that the addition of the small amount of polymer additive, which is very soluble, can help reducing the pumping loss. In the experiment, the study of influence of polymer solution of drag reduction in conducted at the pipe sizes of 10 mm (3/4 inch) with dosing Polyacrylamide (PAM). Differential pressure measurement was employed for the concentration 0 10 50 and 100 ppm (part per million) by weight in low turbulent flow region, 15000 <Re <30000. Then, the results were calculated and presented in terms of friction coefficients. The study showed that polymer additives can reduce the friction loss of the pump through pipe in an open system by up to 50% compared to the case without added polymer in solution. Also in a recirculating system and polymer addition can reduce the loss of friction through the pipe line by up to 56% compared with a case that is no polymer solution added.

Keywords: Pipe Flow, Drag Reduction, Polymer Additives

1. บทนำ

โดยทั่วไปการไหลภายในท่ออุตสาหกรรม การใช้เครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบน้ำจะทำงานเต็มกำลังจนบางครั้งอาจเกินความต้องการใช้จริง อันเป็นการสูญเปล่าของพลังงานที่ได้จ่ายออกไปจากแหล่งจ่ายจึงจำเป็นต้องปรับการใช้พลังงานในการสูบน้ำให้เหมาะสมต่อการใช้ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเลือกใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง การใช้ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ หรือแม้แต่การเปิดปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหล เป็นต้น [10] อย่างไรก็ตามการสูญเสียพลังงานอย่างหนึ่ง ที่จะเกิดขึ้นระหว่างการสูบน้ำผ่านท่ออย่างหลีกเลี่ยงมิได้ ก็คือ การสูญเสียหลักหรือที่เรียกทั่วไปในระบบปั๊มว่า ค่าหัวสูญเสีย

การลดการสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้จะสามารถกระทำได้โดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์บางชนิดที่มีคุณสมบัติในการลดแรงเสียดทานและละลายน้ำได้เป็นอย่างดีลงไป อันเป็นไปตามปรากฏการณ์ไหลที่เรียกว่า ปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทาน (Drag Reduction)ปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานสำหรับการไหลในท่อนี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Tom ในปี 1959 ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Tom’s effect” และยังได้สร้างความสนใจต่อนักวิจัยอย่างมากทั้งในแง่ของการประยุกต์ใช้งานและในแง่ขององค์ความรู้ด้านพลวัตของพอลิเมอร์โมเลกุลในของไหล [1][2][9] ตัวอย่างของการนำไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมจริงก็คือการใช้สารพอลิเมอร์ในการลดแรงเสียดทานระหว่างหัวเจาะกับบ่อน้ำมัน รวมทั้งใช้พอลิเมอร์ลดแรงเสียดทานในท่อสำหรับขนส่งน้ำมันจากแท่นขุดเจาะ Trans-Alaska ซึ่งมีความยาวประมาณ 800 ไมล์ ทำให้สามารถลดการติดตั้งสถานีสูบจาก 12 สถานี เหลือเพียง 6 สถานี [5]

การเกิดปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเท่านั้น [7][8] และการลดแรงเสียดทานจะขึ้นอยู่กับชนิด ลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ในน้ำและข้อกำหนดการไหลในท่อระบาย ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ในการลดแรงเสียดทานในท่อได้ดีจะต้องมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี และมีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว มีกิ่งก้านที่สั้น นอกจากนั้นพอลิเมอร์จำพวกนี้จะมีน้ำหนักของโมเลกุล (M_w) ที่สูงถึง 10^6 ซึ่งอาจเป็นพอลิเมอร์ที่มีตามธรรมชาติหรือถูกสังเคราะห์ขึ้นก็ได้ ตัวอย่างเช่น Poly (ethylene oxide) หรือ PEO, Polyacrylamide หรือ PAC และพอลิ เมอร์ธรรมชาติจำพวกกัวกัม (Guar gum) เป็นต้น [4] เนื่องจากความแตกต่างทางกายภาพของพอลิเมอร์ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้ลดแรงเสียดทานต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่จะใช้ต่ำกว่า ร้อยในล้านส่วน (ต่ำกว่า 100 ppm) เทียบตามน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นสารละลายที่เจือจางอย่างมาก นอกจากนั้นการลดแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นได้ดีในท่อขนาดเล็กมากกว่าท่อขนาดใหญ่ และให้การลดแรงเสียดทานในท่อเรียบมากกว่าท่อที่มีความขรุขระมาก [4][6][8]

ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์นี้มาประยุกต์ใช้ในการสูบน้ำ โดยการออกแบบจำลองระบบสังเกตลักษณะของแรงเสียดทานและการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลภายในท่อเรียบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว ที่เป็นผลมาจากการเติมสารพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วงการไหล ที่เป็นผลมาจากการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย(low turbulent region) ที่ระหว่าง15000 < Re < 30000

2. ทฤษฎีและการคำนวณค่าการลดแรงเสียดทาน

เมื่อพิจารณาตามลักษณะการไหลแล้ว การระบายน้ำในท่อส่วนใหญ่มีอัตราการไหลตกอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน (Re > 4000) [3] และค่าการสูญเสียหลัก (h_f) จะแสดงได้ตามสมการ Darcy-Weisbach

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad (1)$$

โดยที่ f คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน, L คือความยาวของท่อ (m), D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ (m), V คือความเร็วเฉลี่ยของน้ำภายในท่อ (m/s), g

คือค่าสัมประสิทธิ์แรงโน้มถ่วง (m/s^2) หรือคิดจากสมการพลังงานจะได้

$$h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) \qquad (2)$$

โดยที่ (P_1-P_2) คือความดันตกคร่อมจากจุดที่ 1 ไป 2 (N/m^2) และ (z_1-z_2) คือความต่างระดับของจุดที่ 1 และ 2 (m) ส่วน γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (N/m^3)

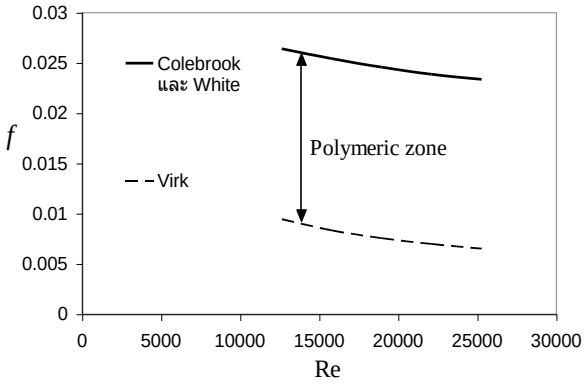
ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Colebrook และ White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right] \qquad (3)$$

หรือสามารถกาจากแผนภูมิของ Moody ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า $f = f(\mathrm{Re}, \varepsilon/D)$ โดยตรงก็ได้ [3]

เมื่อมีการฉีดหรือเติมสารละลายพอลิเมอร์บางจำพวกที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ยาวเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 100 ในล้านส่วนโดยน้ำหนัก) ลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูดลดลงได้อย่างมาก [1][2] การลดแรงเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนนี้ จะมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอยู่ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามแผนภูมิแสดงในรูปที่ 1 จะพบว่าการลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) สองเส้นคือ เส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลแบบนิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl Von Karman ซึ่งหาค่าได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Colebrook และ White ดังแสดงในสมการที่ 3 ซึ่งเป็นลิมิตบน (upper limit) และเส้นการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดของ Virk [8] เรียกว่า Virk asymptote [6] ซึ่งเป็นค่าลิมิตล่าง (lower limit) แสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ได้

$$\frac{2}{\sqrt{f}} = 19.0\log\left(\frac{1}{2}\mathrm{Re}\sqrt{f}\right) - 32.4 \qquad (4)$$



รูปที่ 1 แผนภูมิเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลและช่วงของการลดแรงเสียดทาน หรือ Polymeric zone

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทาภายในท่อ (DR) เมื่อมีการเติมหรือฉีดสารพอลิเมอร์เข้าไปในท่อระบายน้ำ สามารถคำนวณได้สองแบบคือ การคำนวณจากค่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) หรือการคำนวณจากค่าการเพิ่มของอัตราการไหล (Q) โดยใช้สมการ

$$DR(\%) = 100 \times \left(\frac{f_w - f_p}{f_w}\right) \qquad (5)$$

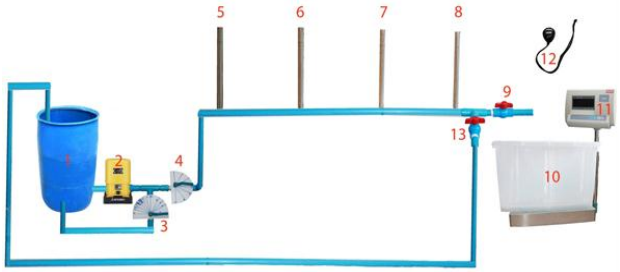
โดยที่ f_w และ f_p คือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีที่ไม่ใช้และใช้สารพอลิเมอร์ในระบบสูบน้ำตามลำดับ

3. ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 ระบบทดลองการไหล

แบบจำลองระบบจากรูปที่ 2 จะทำการผสมสารละลายพอลิเมอร์ลงไปในถังพักน้ำ แล้วใช้เครื่องสูบน้ำชนิดปั๊มหอยโข่ง Mitsubishi/ WR–155Q 3150 watt สูบน้ำที่เก็บในถังพักน้ำ และน้ำไหลท่อพีวีซีขนาด 10 มิลลิเมตร (3/4 นิ้ว) ทำการเปิดวาล์วตำแหน่งที่ 9 และปิดวาล์วตำแหน่งที่ 13 เพื่อที่จะเป็นระบบเปิด แล้วน้ำจะไหลผ่านสู่ถังน้ำตำแหน่งที่ 10 ทำการชั่งน้ำหนัก และจับเวลา เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อวัดอัตราการไหลเสร็จแล้ว จากนั้นทำการปิดวาล์วตำแหน่งที่ 9 และเปิดวาล์วตำแหน่งที่ 13 เพื่อทำ

ให้เป็นระบบหมุนเวียน หลังจากนั้นทำการวัดความดันที่ผ่านมานอมิเตอร์ ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชุด ดังรูป ณ ตำแหน่งที่ 5,6,7 และ 8 ซึ่งแต่ละชุดห่างกันประมาณ 0.86 เมตร



รูปที่ 2 แผนภาพระบบการไหลโดยการสูบน้ำและส่วนประกอบการทดลองต่างๆ

1. ถังน้ำขนาด 200 ลิตร, 2. เครื่องสูบน้ำชนิดปั๊มหอยโข่ง, 3. วาล์วบายพาร์ท, 4. วาล์วควบคุมอัตราการไหล, 5. ตำแหน่งวัดความดันจุดที่ 1, 6. ตำแหน่งวัดความดันจุดที่ 2, 7. ตำแหน่งวัดความดันจุดที่ 3, 8. ตำแหน่งวัดความดันจุดที่ 4, 9. วาล์วแบ่งมวลไปชั่งน้ำหนัก, 10. ถังพักน้ำชั่งน้ำหนักขนาด 100 ลิตร, 11. เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล, 12. นาฬิกาจับเวลา, 13. วาล์วควบคุมระบบเปิด-ปิด

3.2 การเตรียมสารทดลอง

สารละลายพอลิเมอร์เติมชนิด Polyacrylamide (PAM) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ให้เป็นสารทำงานเพื่อลดแรงเสียดทานภายในท่อนั้นจะถูกเตรียมในลักษณะของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงก่อน โดยการชั่งตวงพอลิเมอร์ตามอัตราส่วนความเข้มข้น 10 50 และ 100 ppm (โดยน้ำหนัก) แล้วนำไปละลายในน้ำอุ่นพร้อมกับการคนสารละลาย ทิ้งให้สารละลายเย็นลงสักพัก แล้วจึงนำไปผสมกับน้ำในถัง ในอัตราส่วนที่ได้ทำการคำนวณไว้ สำหรับการวัดคุณสมบัติความหนืดของสารละลายพอลิเมอร์เจือจาง

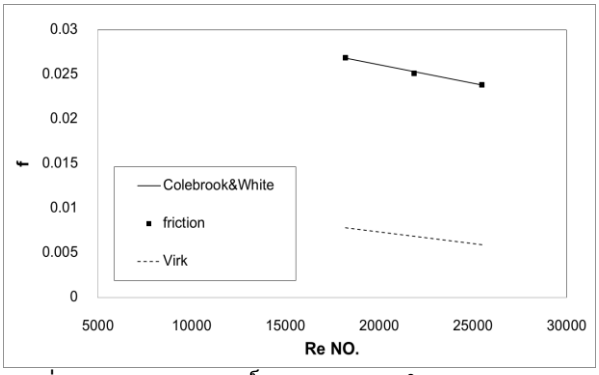
3.3 การคำนวณผลการทดลอง

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย 15000 < Re < 3000 ของแต่ละกรณีจะถูกคำนวณโดยใช้สมการที่ 1 และ 2 ซึ่งต้องกำหนดค่า $(z_1 - z_2) = 0$ เพราะท่อถูกวางในแนวราบ จากนั้นค่าที่ได้จะถูกนำไปพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับเส้นแนวโน้มของ Colebrook และ White (สมการที่ 3) และค่าลิมิตของ Virk (สมการที่ 4) ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานจะใช้สมการที่ 5 คำนวณและทำการพลอตกราฟเพื่อแสดงผล

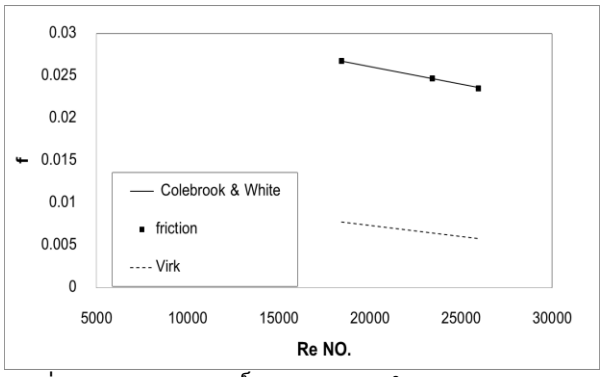
4. ผลการทดลอง

4.1 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลแบบนิวโทเนียน

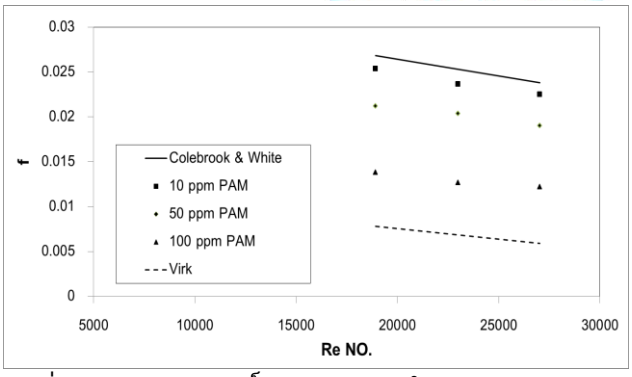
ผลการทดลองในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีของ Colebrook และ White ในระบบเปิดและในระบบหมุนเวียน ซึ่งนำมาอ้างอิงความถูกต้องของกระบวนการวัดและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 1\%$ เท่านั้น



รูปที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระบบเปิดช่วง 15000 < Re < 3000 ของการไหลแบบนิวโทเนียน (ไม่เติมสารละลายพอลิเมอร์) เปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการสหพันธ์ของ Colebrook และ White [8]



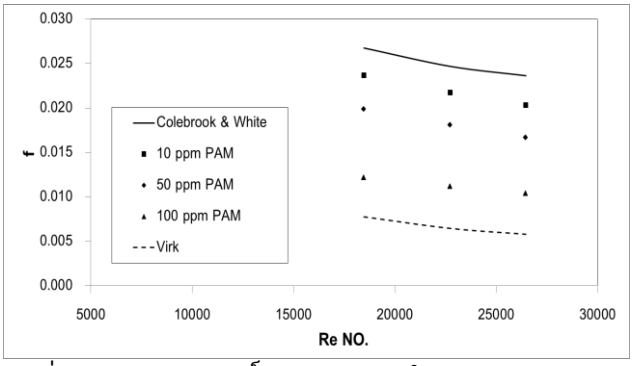
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในระบบหมุนเวียนช่วง 15000 < Re < 30000 ของการไหลแบบนิวโทเนียน (ไม่เติมสารละลายพอลิเมอร์) เปรียบเทียบกับค่าที่



รูปที่ 5 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วง 15000 < Re < 30000 ของการไหลแบบลดแรงเสียดทานในระบบเปิดที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ชนิด PolyAcrylamide (PAM) เป็น 10 50 และ 100 ppm ตามลำดับ

4.2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลแบบลดแรงเสียดทาน

เมื่อมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ในระบบเปิดและในระบบหมุนเวียนชนิด PolyAcrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10 ppm มีการเพิ่มอัตราการไหล (การเพิ่มของ Re No.) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จะลดลง (drag reduction) ในระดับหนึ่ง ซึ่งในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย จะพบว่า แนวโน้มการลดลงจะค่อนข้างขนานกับเส้นทางทฤษฎีของ Colebrook และ White และเมื่อมีการเพิ่มค่าความเข้มข้นเป็น 50 และ 100 ppm แล้ว จะเห็นได้ว่า ลักษณะของการลดแรงเสียดทานค่อนข้างที่จะขนานกับเส้นทฤษฎี แต่อยู่ในระดับที่ต่ำลงตามความเข้มข้นของสาละลายพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากผลทางพลวัตของพอลิเมอร์ (polymer dynamics) ที่กระทำต่อโครงสร้างของการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent struction) เพิ่มขึ้น จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ตามลำดับ ส่วนค่าการลดแรงเสียดทาน (drag reduction) จะทำการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

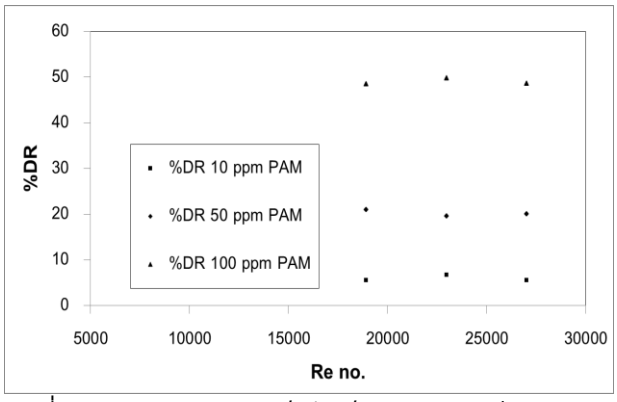


รูปที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในช่วง 15000 < Re < 30000 ของการไหลแบบลดแรงเสียดทานในระบบหมุนเวียนที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ ชนิด PolyAcrylamide (PAM) เป็น 10 50 และ 100 ppm ตามลำดับ

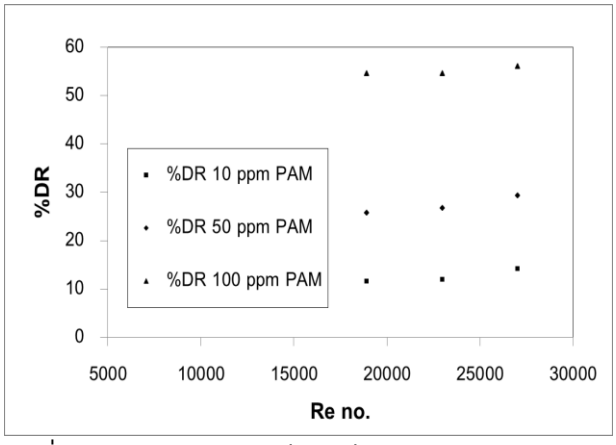
4.3 เปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทาน

การคำนวณค่าการลดแรงเสียดทานที่ได้โดยใช้สมการที่ 5 ผลการคำนวณดังแสดงในแผนภาพด้านล่าง จะเห็นได้ว่า ค่าการลดแรงเสียดทานจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเข้มข้นของสารเติมพอลิเมอร์ อันสอดคล้องกับการทดลองของ Virk ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนแบบเล็กน้อยนี้ ถ้าเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด PolyAcrylamide (PAM) 10 ppm จะได้ค่า %DR ของระบบเปิดตกอยู่ในช่วง 5.50 ถึง 6.65 เปอร์เซ็นต์ และในระบบปิดตกอยู่ในช่วง 11.54 ถึง 14.15 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้เนื่องจากพอ

ลิเมอร์จะมีความสามารถในการกักเก็บพลังงานให้อยู่ในตัวของไหลได้น้อย พลังงานส่วนมากจึงถูกแผ่กระจายออกไปทางผนังท่อตามกระบวนการไหลแบบปั่นป่วน



รูปที่ 6 แผนภาพค่าเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานของสารละลายพอลิเมอร์ (DR) ในระบบเปิดที่ความเข้มข้นต่างๆ (10 50 และ 100 ppm) และเส้นแนวโน้มในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย 13000 < Re < 30000



รูปที่ 7 แผนภาพค่าเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานของสารละลายพอลิเมอร์ (DR) ในระบบหมุนเวียนที่ความเข้มข้นต่างๆ (10 50 และ 100 ppm) และเส้นแนวโน้มในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อย 13000 < Re < 30000

ในกรณีที่มีการเติมสารลดแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นเป็น 50 และ 100 ppm ค่า DR จะเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 16.49 ถึง 17.97 เปอร์เซ็นต์ และ 32.72 และ 36.19 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เนื่องมาจากความสามารถในการกักเก็บพลังงานไว้ของไหลได้เพิ่มขึ้นจากพลวัตของพอลิเมอร์ในของไหล แต่จะไม่สามารถลดลงได้มากกว่าค่าลิมิตของ Virk เนื่องจากการอิ่มตัวของสารละลายพอลิเมอร์ในของไหล

5. บทสรุป

จากการทดลองเมื่อเติม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm พบว่าในระบบเปิดมีความสามารถลดแรงเสียดทานของการไหลในท่อ (%DR) ได้สูงถึง 49.83% และในระบบหมุนเวียนลดแรงเสียดทานได้ถึง 56.05%

โดยผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานภายในท่อในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเล็กน้อยนั้น สามารถเกิดขึ้นได้จริงและใช้ในการไหลระบบหมุนเวียนได้ดีกว่าระบบเปิด เนื่องจากสามารถลดแรงเสียดทานได้ดีกว่า โดยประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่ใส่ลงไปในระบบที่ใช้ภายในช่วงที่เรียกว่า Polymeric Zone

อย่างไรก็ดีการนำไปใช้ในระบบอุตสาหกรรมจริงควรมีการศึกษาถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการนำพอลิเมอร์แต่ละชนิดไปใช้ และควรบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำ ถึงแม้ว่าจะมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อยในการลดแรงเสียดทาน

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Lumley, J.L. (1969). “Drag reduction by additives”, *Annu. Rev. Fluid Mech*, Vol.1, pp. 367-384.

[2] Lumley, J.L. (1973). “Drag reduction in turbulent flow by polymer additives”, *J.Polymer Sci: Molecular rev.*, Vol.7, pp. 263-290.

[3] Munson, R.B., et. al. (2006). *Fundamentals of fluid mechanics*, John Weiley and Sons, New York.

[4] Sellin, R.H., et. al. (1982). “The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications Part 1: Basic

aspects", *Journal of Hydraulics Research*, Vol.20, pp. 29-68.

[5] Sellin, R.H., et. al. (1982). "The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications Part 2: Present applications and future proposal", *Journal of Hydraulics Research*, Vol.20, pp. 235-292.

[6] Toonder, J.M.J, et. al. (1997). "Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments", *J Fluid Mech*, Vol.337, pp. 193-231.

[7] U-Kaew, A. (2007). *Tuebulence Manipulation in Pipe Flow by Means of Swirl, Polymer Additives and Suspensions of Nanoparticles in Water*, PhD thesis, Lehigh University, Pennsylvania, USA.

[8] Virk, P.S. (1975). "Drag reduction fundamental", *AIChe.J.*, Vol.21, pp. 625-656.

[9] White, M.C., Mungal, M.G. (2008). "Mechanics and Prediction of Turbulent Drag Reduction with Polymer Additives", *Annu. Rev. Fluid Mech*, Vol.40, pp. 235-256.

[10] ศูนย์แลกเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้ (MEC) ฝ่ายพลังงานอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม, 2547. วิธีการลดการใช้พลังงานภายในโรงงาน. สถาบันสิ่งแวดล้อมไทย.