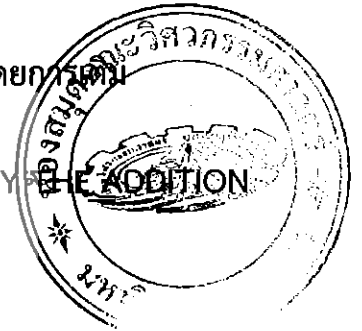




การอนุรักษ์พลังงานของการไหลภายในท่ออุตสาหกรรมโดยการเติม
สารละลายพอลิเมอร์
CONSERVATION OF ENERGY IN INDUSTRIAL PIPE FLOW BY THE ADDITION
OF POLYMER SOLUTION



นายทองยศ	เชียงใหม่	รหัส 52360980
นายภูวเดช	เกตุอินทร์	รหัส 52361192
นายมณฑล	จันทร์หมด	รหัส 52361215

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 2/๓.ค. 2556
เลขทะเบียน..... 16430957
เลขเรียกหนังสือ..... ฟร.
มหาวิทยาลัยอเนศวร ๗ ๒๑๖ 1

๒๕๕๕

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอเนศวร
ปีการศึกษา 2555



ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงการ : การอนุรักษ์พลังงานของการไหลภายในท่ออุตสาหกรรมโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

ผู้ดำเนินโครงการ : นายทองยศ เชียงไตร รหัส 52360980
 นายภูวเดช เกตุอินทร์ รหัส 52361192
 นายมณฑล จันทร์หมุด รหัส 52361215

ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุมัติให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
 การศึกษาข้อมูลตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการการสอบโครงการ

(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

ประธานกรรมการ

(ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)

กรรมการ

(ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

กรรมการ

ชื่อหัวข้อโครงการ : การอนุรักษ์พลังงานของการไหลภายในท่ออุตสาหกรรมโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

ผู้ดำเนินโครงการ : นายทองยศ เชียงไตร รหัส 52360980
 นายภูวเดช เกตุอินทร์ รหัส 52361192
 นายมณฑล จันทร์หมุด รหัส 52361215

ที่ปรึกษาโครงการ : ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

สาขาวิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล
 ปีการศึกษา : 2555

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก การลดการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรหรือระบบเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถจะใช้พลังงานที่มีอยู่ได้คุ้มค่าขึ้น จากการศึกษาพบว่า สารละลายพอลิเมอร์บางชนิดมีคุณสมบัติสามารถลดการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำได้ คณะผู้จัดทำโครงการจึงมีแนวคิดที่จะศึกษา และทดลองเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการป้อนน้ำ โดยการออกแบบจำลองระบบการป้อนน้ำ โดยจะทำการสังเกตลักษณะของแรงเสียดทานภายในท่อเรียบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว และการเพิ่มของอัตราการไหลที่เป็นผลมาจากการเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน รวมทั้งให้มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค และวิธีการที่แตกต่างกันออกไป

จากผลการทดลองพบว่า น้ำที่ผสมสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ 10, 30, 50, 100 จะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นเป็น 11.75% 12.48% 16.05% และ 19.08% ตามลำดับ ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ จากการศึกษา และทดลองสามารถสรุปได้ว่า ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่เหมาะสม คือ ประมาณ 100 ppm ซึ่งจากการทดลองจะทำให้สามารถลดแรงเสียดทานสูงสุด เนื่องมาจากการสูญเสียจากการไหลภายในท่อในส่วนของการสูญเสียหลักจากการไหลภายในท่อได้ 55.71%

Project Title : Conservation of energy in industrial pipe flow by the addition of polymer solution.

Name : Mr. Thongyod Cheangtai Code 52360980
 Mr. Phuwadet Ketain Code 52361192
 Mr. Monton Junmud Code 52361215

Project advisor : Dr. Ananchai U – kaew

Major : Mechanical Engineering

Department : Mechanical Engineering

Academic year : 2012

Abstract

The current energy issue is a major problem in the world. Reduce the loss that occurred with the machine or system is a major cause that can use existing energy more cost-effective. The study found that the polymer solution's some features to reduce the friction between the pipe wall and water. The project team has the idea to study and try to guide the development of water pumps is to observe the nature of friction within the pipe, the diameter of flat 3/4 inches. And increasing the flow rate is the result of the additive polymer's concentration in the turbulent flow, and to have added Polymer solution, enough with the techniques and how to vary.

The results showed that water mixed solvent enough polymer concentration of the solution polymerization's were 10, 30, 50, 100 ppm. Flow rates increased at 11.75% 12.48% 16.05% and 19.08% respectively. The effect of the concentration of polymers. From the study and were able to conclude that the concentration of polymer solution, enough to fit polymers is about 100 ppm. Which from the experiment will reduce the maximum friction due to a loss in the loss of two main parts of the flow inside the pipe was 55.71%.

กิตติกรรมประกาศ

(Acknowledgement)

จากการที่รายวิชาโครงการทางวิศวกรรมเครื่องกล บรรจุในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยนเรศวร จึงได้จัดทำโครงการเรื่อง “การอนุรักษ์พลังงานของการไหลภายในท่ออุตสาหกรรมโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์” ในระหว่างการปฏิบัติงานนั้นทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าได้รับความรู้ และประสบการณ์ในด้านต่างๆมาก และปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือ และความอนุเคราะห์จาก

- ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูล การทำปริญญาานิพนธ์ และคำแนะนำตลอดการทำปริญญาานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ ด้วยดี
- กรรมการ และคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ตลอดจนคำแนะนำ
- คุณสตีลา ยิ้มประเสริฐ และ คุณอรุณทัย สมโน ซึ่งเป็นนิสิตปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ และทฤษฎีกลศาสตร์ของไหล
- สมาชิกกลุ่ม และเพื่อนๆทุกคน

และบุคคลท่านอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน และเป็นกำลังใจในการทำโครงการทางวิศวกรรมจนสำเร็จ

คณะผู้จัดทำโครงการ

นาย ทองยศ เชียงไตร
นาย ภูวเดช เกตุอินทร์
นาย มณฑล จันทร์หมุด

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อ.....	ข
Abstract.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.4 ขอบเขตการทำโครงการ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.6 แผนการดำเนินงาน.....	4
1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ.....	5
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี.....	6
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหล.....	6
2.2 การคำนวณค่าการลดแรงเสียดทาน.....	9
2.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ.....	12
2.4 คุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์.....	13
2.5 ชนิดของพอลิเมอร์.....	13
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....	16
3.1 การศึกษาและออกแบบระบบจำลองการป้อนน้ำ.....	16
3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล.....	17
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงการนี้.....	18
3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	21
4.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด.....	21
4.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm ระบบเปิด.....	24
4.3 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน.....	27
บทที่ 5 สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ.....	30

5.1 สรุปผล.....	30
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	31
เอกสารอ้างอิง.....	32
ภาคผนวก ก ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	33
ผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	35
ภาคผนวก ค ตัวอย่างตารางการบันทึกผลการทดลอง.....	51
ภาคผนวก ง กราฟแสดงผลการทดลองเพิ่มเติม.....	67
ง.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด.....	68
ง.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน.....	70
ภาคผนวก จ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด และเครื่องมือวัด.....	73
ภาคผนวก ฉ ตัวอย่างการคำนวณ การตวงสารพอลิเมอร์.....	76
ประวัติผู้จัดทำโครงการ.....	78



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน.....	4
ตารางที่ 1.2 รายละเอียดงบประมาณ	5
ตารางที่ 2.1 ความซรุขระสัมพันธ์ ϵ ของท่อใหม่.....	10
ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	18
ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง.....	34
ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของน้ำในระบบเปิด.....	38
ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 10 ppm ของระบบเปิด.....	38
ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 50 ppm ของระบบเปิด.....	39
ตารางที่ ข.4 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 100 ppm ของระบบเปิด	40
ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบเปิด.....	41
ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบเปิด.....	41
ตารางที่ ข.7 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบเปิด.....	42
ตารางที่ ข.8 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบเปิด	43
ตารางที่ ข.9 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบเปิด	44
ตารางที่ ข.10 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบเปิด	44
ตารางที่ ข.11 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของน้ำในระบบ หมุนเวียน	45
ตารางที่ ข.12 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบหมุนเวียน.....	46
ตารางที่ ข.13 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบหมุนเวียน.....	47

ตารางที่ ข.14 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบหมุนเวียน.....47

ตารางที่ ข.15 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบหมุนเวียน.....48

ตารางที่ ข.16 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบหมุนเวียน.....49

ตารางที่ ข.17 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบหมุนเวียน.....50

ตารางที่ ค.1 ตารางตัวอย่างผลการทดลองของน้ำ ในระบบเปิด.....52

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 10 ppm ของระบบเปิด52

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 50 ppm ของระบบเปิด53

ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 100 ppm ของระบบเปิด.....54

ตารางที่ ค.5 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบเปิด55

ตารางที่ ค.6 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบเปิด55

ตารางที่ ค.7 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบเปิด56

ตารางที่ ค.8 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบเปิด.....57

ตารางที่ ค.9 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบเปิด.....58

ตารางที่ ค.10 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบเปิด58

ตารางที่ ค.11 ตารางตัวอย่างผลการทดลองของน้ำ ในระบบเปิด.....59

ตารางที่ ค.12 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบหมุนเวียน.....60

ตารางที่ ค.13 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบหมุนเวียน.....61

ตารางที่ ค.14 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบหมุนเวียน.....61

ตารางที่ ค.15 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบหมุนเวียน.....62

ตารางที่ ค.16 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบหมุนเวียน.....63

ตารางที่ ค.17 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบหมุนเวียน.....64

ตารางที่ ค.18 ตารางแสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f ทางทฤษฎีของ Colebrook และ White ที่ $\frac{\epsilon}{D} = 0.000075$ 65

ตารางที่ ค.19 ตารางแสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f ทางทฤษฎีของ Virk asymptote ที่ $\frac{\epsilon}{D} = 0.000075$ 66

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของน้ำ.....	8
รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของเหลวต่างๆ	8
รูปที่ 2.3 Moody Diagram.....	11
รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลและช่วงของการลดแรงเสียดทาน	12
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Poly Acrylamide (PAM).....	14
รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Polyethylene glycol (PEG).....	14
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Guargum	15
รูปที่ 3.1 การจำลองระบบการปั้มน้ำ.....	16
รูปที่ 3.2 ปั้มน้ำ.....	18
รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งดิจิตอล.....	19
รูปที่ 3.4 เครื่องชั่ง.....	19
รูปที่ 3.5 นาฬิกาจับเวลา.....	20
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	21
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	22
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	22
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	24
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	25
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด	25
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน.....	27
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน.....	27
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน.....	28

รูปที่ ง.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด.....68

รูปที่ ง.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด.....68

รูปที่ ง.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด.....69

รูปที่ ง.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน.....70

รูปที่ ง.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน.....71

รูปที่ ง.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน.....71



สารบัญสัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พื้นที่หน้าตัดภายในท่อ PVC	m^2
D	เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ PVC	m
$DR(\%)$	เปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานจากสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน	
ε	ค่าความขรุขระของผนังท่อ	
f	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของท่อ	
f_p	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีใช้สารพอลิเมอร์	
f_w	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีไม่ใช้สารพอลิเมอร์	
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
h_f	ค่าการสูญเสียหลัก	m
L	ความยาวท่อ	m
\dot{m}	อัตราการไหลโดยมวลทั้งหมด	kg/s
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ	kg/m^3
P_1	ความดันตกรวมจากจุดที่ 1	N/m^2
P_2	ความดันตกรวมจากจุดที่ 2	N/m^2
Q	อัตราการไหลของน้ำทั้งหมด	m^3/s
Q_p	อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์	m^3/s
Q_w	อัตราการไหลของน้ำ	m^3/s
$Q(\%)$	เปอร์เซ็นต์แรงเสียดทานจากอัตราการไหล	
Re	ค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ที่ได้จากการคำนวณ	
μ	ความหนืดของน้ำ	$N.s/m^2$
v	ความเร็ว	m/s
\dot{w}	อัตราการไหลเชิงน้ำหนัก	N/s
γ	น้ำหนักจำเพาะ	kN/m^3
z_1	ความต่างระดับของจุดที่ 1	m
z_2	ความต่างระดับของจุดที่ 2	m

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของโครงการ

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ประเทศไทยก็เป็นประเทศที่ต้องการพลังงานปริมาณมากเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนในการพัฒนาประเทศ แต่แหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถใช้เป็นพลังงานในประเทศไทยนั้นมีอยู่อย่างจำกัด และปริมาณน้อย การใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดถือว่ามีความจำเป็นอย่างมาก การลดการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้น กับเครื่องจักรหรือระบบเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถจะใช้พลังงานที่มีอยู่ได้คุ้มค่าขึ้น

โดยทั่วไปการไหลภายในท่ออุตสาหกรรม ในการใช้เครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบน้ำจะทำงานเต็มกำลังจนบางครั้งอาจเกินความต้องการใช้จริง อันเป็นการสูญเสียเปล่าของพลังงานที่ได้จ่ายออกไปจากแหล่งจ่าย จึงจำเป็นต้องปรับการใช้พลังงานในการสูบน้ำให้เหมาะสมต่อการใช้ ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การเลือกใช้มอเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง การใช้ระบบควบคุมความเร็วของมอเตอร์ หรือแม้แต่การเปิดปิดวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหล เป็นต้น อย่างไรก็ตามการสูญเสียพลังงานอย่างหนึ่ง ที่เกิดขึ้นระหว่างการสูบน้ำผ่านท่ออย่างหลีกเลี่ยงมิได้ ก็คือ การสูญเสียหลักหรือที่เรียกทั่วไปในระบบปั๊มว่า ค่าหัวสูญเสีย การลดการสูญเสียจากแรงเสียดทานนี้ จะสามารถกระทำได้โดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์บางชนิดที่มีคุณสมบัติในการลดแรงเสียดทานและละลายน้ำได้เป็นอย่างดีลงไป อันเป็นไปตามปรากฏการณ์ไหลที่เรียกว่า ปรากฏการณ์ลดแรงเสียดทาน (Drag Reduction) ปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานสำหรับการไหลในท่อนี้ ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชื่อ Tom ในปี 1949 ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "Tom's effect" และยังได้สร้างความสนใจต่อนักวิจัยอย่างมากทั้งในแง่ของการประยุกต์ใช้งาน และในแง่ขององค์ความรู้ด้านพลวัตของพอลิเมอร์ โมเลกุลในของไหล ตัวอย่างของการนำไปประยุกต์ใช้ในทางวิศวกรรมจริงก็คือ การใช้สารพอลิเมอร์ในการลดแรงเสียดทานระหว่างหัวเจาะกับบ่อน้ำมัน รวมทั้งใช้พอลิเมอร์ลดแรงเสียดทานในท่อสำหรับขนส่งน้ำมันจากแท่นขุดเจาะ Trans-Alaska ซึ่งมีความยาวประมาณ 800 ไมล์ ทำให้สามารถลดการติดตั้งสถานีสูบจาก 12 สถานี เหลือเพียง 6 สถานี การเกิดปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนเท่านั้น และการลดแรงเสียดทาน จะขึ้นอยู่กับชนิดลักษณะทางกายภาพของพอลิเมอร์ อัตราส่วนของพอลิเมอร์ในน้ำ และข้อกำหนดการไหลในท่อระบาย ซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ที่ใช้ในการลดแรงเสียดทานในท่อได้ดี จะต้องมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดี และมีลักษณะเป็นเส้นตรงยาว มีกิ่งก้านที่สั้น นอกจากนี้พอลิเมอร์จำพวกนี้จะมีน้ำหนักของโมเลกุล (M_w) ที่สูงถึง 10^6 ซึ่งอาจเป็นพอลิเมอร์ที่มีตามธรรมชาติหรือถูกสังเคราะห์ขึ้นก็ได้ ตัวอย่างเช่น Poly (ethylene oxide) หรือ PEO, Polyacrylamide หรือ PAC และพอลิเมอร์ที่มีตามธรรมชาติหรือถูกสังเคราะห์จำพวก กัวกัม (Guar gum) เป็นต้น เนื่องจากความแตกต่างทางกายภาพของพอลิเมอร์ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้ลดแรงเสียดทานต่างกันไป แต่ส่วนใหญ่จะใช้ต่ำกว่าร้อยละในล้านส่วน (ต่ำกว่า 100 ppm) เทียบตามน้ำหนัก ซึ่งถือว่าเป็นสารละลายที่เจือจางอย่างมาก นอกจากนั้นการลดแรงเสียดทานจะเกิดขึ้นได้ดีในท่อขนาดเล็กมากกว่าท่อที่มีขนาดใหญ่ และให้การลดแรงเสียดทานในท่อเรียบมากกว่าท่อที่มีความขรุขระมาก ซึ่งในการทดลองนี้จะศึกษาความเป็นไปได้ในการนำปรากฏการณ์การลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์นี้มาประยุกต์ใช้ในการสูบน้ำ ผ่านท่อขนาด 3/4 นิ้ว โดยจะทำการสังเกตลักษณะของการลดแรงเสียดทานภายในท่อและการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล ที่เป็น

ผลมาจากการเติมสารพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆในช่วงการไหล ที่เป็นผลมาจากการไหลแบบปั่นป่วน เล็กน้อย (low turbulent region) ที่ระหว่าง $12800 < Re < 17800$ พร้อมทั้งสร้างสมการทำนายค่าการลดแรงเสียดทานในช่วงการไหลที่ใกล้เคียง เพื่อนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการอนุรักษ์พลังงานในการสูบน้ำต่อไป

ในระบบการปั้มน้ำมีการสูญเสียเกิดขึ้นแบ่งเป็นการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง การสูญเสียหลักเกิดจากการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำเป็นส่วนมาก ส่วนการสูญเสียรองเกิดมา จากอุปกรณ์ต่างๆของระบบ การที่สามารถลดการสูญเสียเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุดจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าสารละลายพอลิเมอร์บางชนิด มีคุณสมบัติสามารถลดการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำได้ และยังสามารถทำให้ตะกอนต่างๆจับตัวได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการตกตะกอน หรือการบำบัดน้ำเสีย โดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์ในปริมาณในอัตราส่วนที่น้อยมาก

จากปัญหาข้างต้นทางคณะจัดทำโครงการ จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและทดลองเพื่อเป็น แนวทางในพัฒนาระบบการปั้มน้ำ โดยการออกแบบจำลองระบบการปั้มน้ำ โดยจะทำการสังเกตลักษณะของแรงเสียดทาน ภายในท่อเรียบ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3/4 นิ้ว และการเพิ่มของอัตราการไหลที่เป็นผลมาจากการเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาผลของการเติมพอลิเมอร์ที่มีต่อการลดแรงเสียดทานภายในท่ออุตสาหกรรม

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.3.1 สามารถนำพอลิเมอร์มาใช้ในการลดแรงเสียดทานภายในท่ออุตสาหกรรมได้

1.3.2 สามารถลดการใช้พลังงานที่ใช้ในการสูบน้ำภายในท่ออุตสาหกรรมได้

1.4 ขอบเขตการทำโครงการ

1.4.1 ใช้ท่อเรียบ PVC ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 20 mm

1.4.2 การทดลองเป็นการไหลที่อยู่ในช่วงของ turbulent

1.4.3 ชนิดของพอลิเมอร์ Poly Aluminum Chloride (PAC) และ Poly Acrylamide (PAM)

1.4.4 อัตราส่วนของพอลิเมอร์และน้ำ ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วง 0, 30, 10, 50, 100 ppm โดยน้ำหนัก

1.4.5 เป็นการไหลในระบบหมุนเวียน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.5.1 ศึกษารายละเอียดของระบบการปั้มน้ำและสารละลายพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้ในระบบการปั้มน้ำ
- 1.5.2 วิเคราะห์ และออกแบบจำลองการทำงานของระบบการปั้มน้ำ
- 1.5.3 ทำการทดลองโดยใช้สารละลายพอลิเมอร์แต่ละชนิดเติมลงในระบบการปั้มน้ำ
- 1.5.4 สูบน้ำเปล่าผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20mm วัดอัตราการไหล และคำนวณหาค่า Re จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า f ที่มี Re แตกต่างกันไป
- 1.5.5 สูบน้ำเปล่าที่ผสมกับพอลิเมอร์ (PAC, PAM) ที่มีความเข้มข้น แตกต่างกันไป 10 30 50 100 ppm ผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm วัดอัตราการไหล และคำนวณหาค่า Re จากนั้นนำมาคำนวณหาค่า f ที่มี Re แตกต่างกันไป
- 1.5.6 นำค่า f ที่คำนวณได้ตอนปล่อยน้ำเปล่าผ่านท่อมาเปรียบเทียบกับค่า f ของน้ำที่มีการผสมพอลิเมอร์ก่อนนำมาปล่อยให้ไหลในท่อ
- 1.5.7 วิเคราะห์ผลการทดลอง และสรุปผลการทดลอง
- 1.5.8 จัดทำรายงาน



1.6 แผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 ตารางแสดงขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงาน	2555										2556		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	ก.พ.			
1. รวบรวมข้อมูล													
2. ทดลองสูบน้ำเปล่า													
3. ทดลองสูบน้ำเปล่าผสมพอลิเมอร์ (PAC)													
4. ทดลองสูบน้ำเปล่าผสมพอลิเมอร์ (PAW)													
5. ออกแบบการทดลองระบบหมุนเวียน													
6. จัดทำอุปกรณ์สำหรับการทดลอง													
7. สร้างเครื่องทดลอง													
8. ทำการทดลอง													
9. สรุปผลการทดลอง													

1.7 รายละเอียดงบประมาณตลอดโครงการ

ตารางที่ 1.2 รายละเอียดงบประมาณ

ลำดับที่	รายการ	ราคา	
1	ค่าถ่ายเอกสาร และค่าเช่าเล่ม	1500	บาท
2	พอลิเมอร์ชนิด PAM และ PAC	600	บาท
3	ค่าขึ้นส่วนหอ	900	บาท
	รวม	3000	บาท



บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

โครงการนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการการลดแรงเสียดทานภายในท่ออุตสาหกรรม ในกรณีการไหลแบบปั่นป่วน โดยใช้สารละลายพอลิเมอร์เติมเข้าไปในท่อ เพื่อลดแรงตึงผิวภายในท่อ และมีอัตราการไหลเพิ่มขึ้น โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะเป็นทฤษฎีพื้นฐานของของไหล

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของการไหล

เมื่อของไหลเกิดการเคลื่อนที่แล้วคุณสมบัติอื่นๆก็จะมีผลต่อการเคลื่อนที่ของของไหลด้วย จึงต้องมีการคำนวณวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการไหลของของไหล ถึงแม้ว่าการคำนวณวิเคราะห์จะไม่ถูกต้องแม่นยำถึง 100% เพราะบางอย่างจะต้องมีการตั้งสมมุติฐานขึ้นมาเพื่อให้สามารถคำนวณได้ และก็เพื่อเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นมาได้ เนื่องจากการไหลของของไหลเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น ระบบน้ำประปา จะต้องมีการออกแบบท่อระบบส่งน้ำ จึงต้องอาศัยหลักการ และทฤษฎีของการไหลมาใช้ในการออกแบบ เป็นต้น

2.2.1 รูปแบบของการไหล

การไหลของของไหลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

2.2.1.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar flow)

คือการไหลที่ไม่่ว่าจะอนุภาคเล็กหรือใหญ่จะเคลื่อนที่ตามกันไปเป็นแผ่นเป็นระเบียบ มีตำแหน่งที่แน่นอน ไม่มีการกีดขวางทางกัน การไหลแบบนี้จะเกิดขึ้นเมื่อของไหล ไหลด้วยความเร็วต่ำ และมีความหนืดสูง

2.2.1.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)

คือการไหลที่อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่มีลักษณะหมุนวน และมีตำแหน่งไม่แน่นอน จะเกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลด้วยความเร็วสูงกว่าแบบราบเรียบมาก และเป็นของไหลที่มีความหนืดต่ำ

2.2.2 อัตราการไหล (Flow rate)

คือ ปริมาณของของไหลที่ไหลผ่านหน้าตัดใดๆต่อหน่วยเวลา อัตราการไหลแบ่งออกเป็น 3 อย่าง คือ

2.2.2.1 อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volume flow rate, Q)

คือ อัตราการไหลของของไหลโดยปริมาตรเทียบกับเวลา

$$Q = Av \quad (2.1)$$

2.2.2.2 อัตราการไหลเชิงน้ำหนัก (Weight flow rate, \dot{w})
คือ การไหลของของไหลโดยน้ำหนักเทียบกับเวลา

$$\dot{w} = \gamma Av \quad (2.2)$$

2.2.2.3 อัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate, \dot{m})
คือ การไหลของของไหลโดยมวลเทียบกับเวลา

$$\dot{m} = \rho Av \quad (2.3)$$

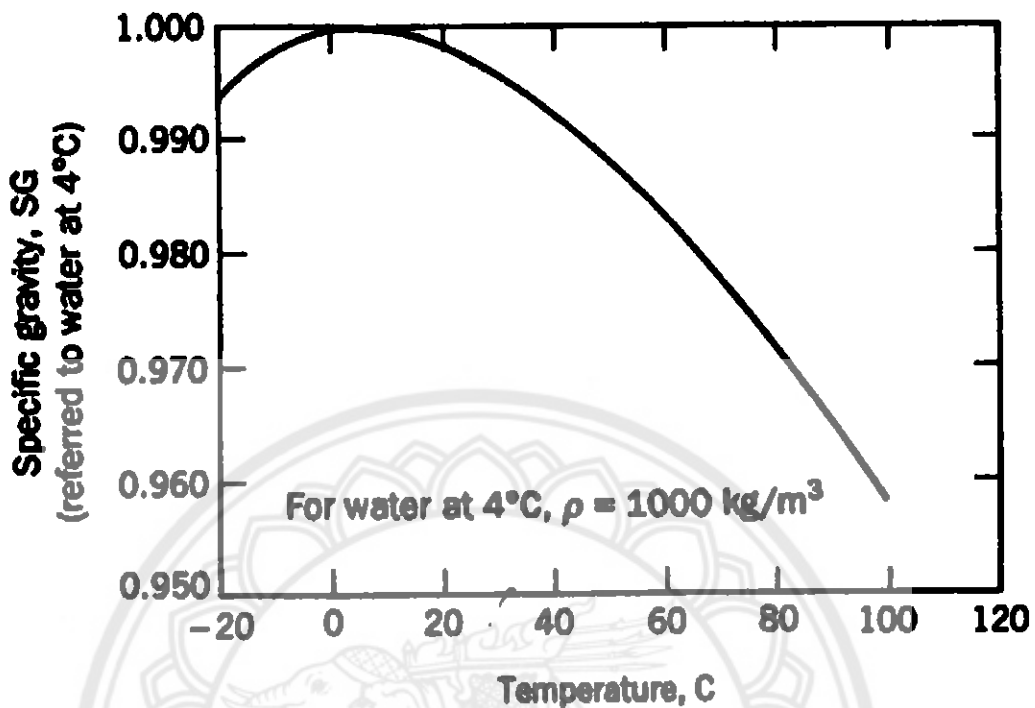
2.2.3 เรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Reynold - number)

คือ อัตราส่วนของแรงเฉื่อยที่กระทำบนก้อนของของไหลกลายเป็นแรงหนืด แรงเฉื่อยถูกพัฒนามาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ($F = ma$) แรงหนืดเป็นผลมาจากผลคูณของความเค้นเฉือนกับพื้นที่หน้าตัด การไหลที่มีค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์สูง เพราะว่าไหลด้วยความเร็วสูง และมีความหนืดต่ำจะมีแนวโน้มที่จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ส่วนการไหลด้วยความเร็วต่ำ นั้นจะมีค่าความหนืดสูง ค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์จะต่ำ มีแนวโน้มที่จะเป็นการไหลแบบราบเรียบค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ จะขึ้นอยู่กับตัวแปร 4 ตัวของของไหล คือ ความหนาแน่น (ρ) ความหนืด (μ) เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) และความเร็วเฉลี่ยในการไหล (v) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.4)$$

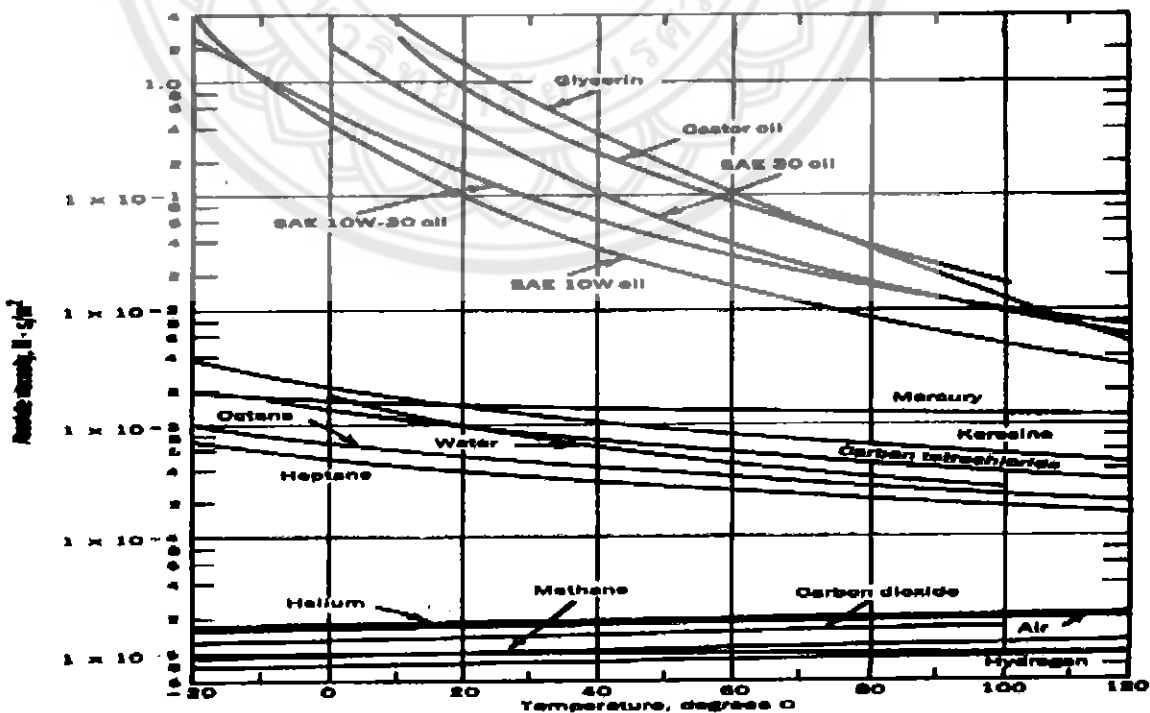
เมื่อ	ρ	คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)
	v	คือ ความเร็วเฉลี่ยในการไหล (m / s)
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	μ	คือ ความหนืดของน้ำ (Ns / m^2)

ค่าความหนืดของน้ำ (μ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ที่แสดง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่จำเพาะกับอุณหภูมิของน้ำ

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของเหลวต่างๆ



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของเหลวต่างๆ

2.2 การคำนวณค่าการลดแรงเสียดทาน

การไหลของน้ำในท่อจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลว และเนื่องจากแรงหนืดของของเหลวเอง เมื่อพิจารณาตามลักษณะการไหลแล้ว การระบายน้ำในท่อส่วนใหญ่มี อัตราการไหลตกอยู่ในช่วงการไหลแบบปั่นป่วน ($Re > 4000$) และค่าการสูญเสียหลัก (h_f) จะแสดงได้ตาม สมการ Darcy-Weisbach [3]

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (2.5)$$

เมื่อ	h_f	คือ การสูญเสียหลัก (m)
	f	คือ สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของท่อ
	D	คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	L	คือ ความยาวท่อ (m)
	v	คือ ความเร็วเฉลี่ยของน้ำในท่อ (m/s)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s^2)

หรือคิดจากสมการพลังงานจะได้ ;

$$h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} + (z_1 - z_2) \quad (2.6)$$

เมื่อ $(P_1 - P_2)$ คือ ความดันตกคร่อมจากจุดที่ 1 ไป 2 (N/m^2)
 $(z_1 - z_2)$ คือ ความต่างระดับของจุดที่ 1 และ 2 (m)
 γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (N/m^3)

ในการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f หาได้จากสมการ ความสัมพันธ์ของ Colebrook และ White [3]

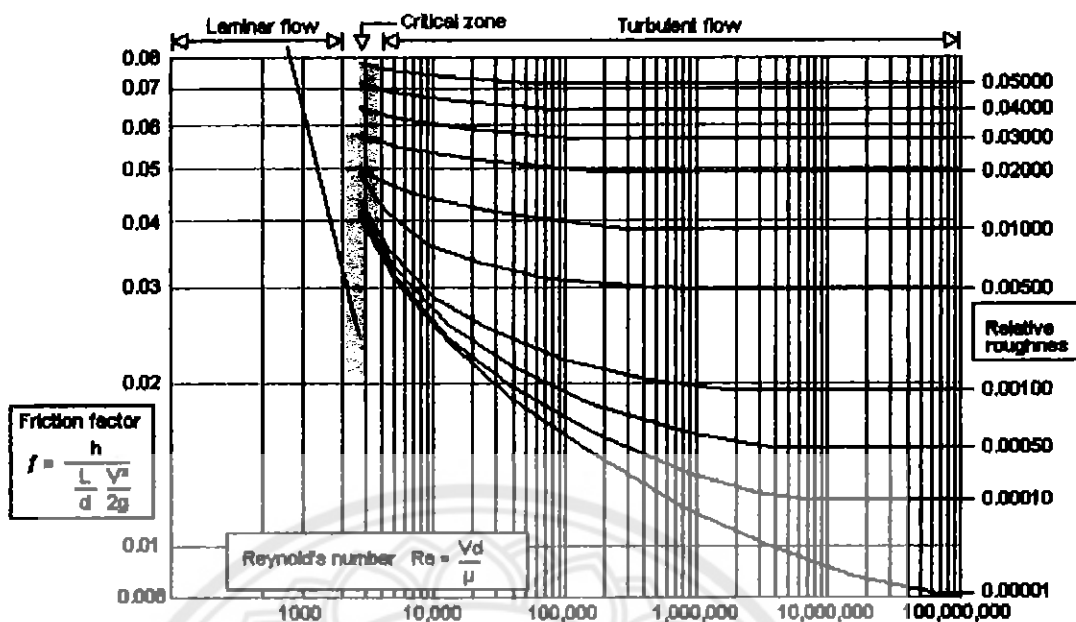
$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (2.7)$$

เมื่อ ϵ/D คือ Relative Roughness
 โดยค่า ϵ เป็นค่าที่ได้มาจาก ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความขรุขระสัมบูรณ์ ϵ ของท่อใหม่

Surface	Roughness - ϵ	
	millimeters	feet
Copper, Lead, Brass, Aluminum (new)	0.001-0.002	$3.33 - 6.7 \cdot 10^{-6}$
PVC and Plastic Pipes	0.0015 - 0.007	$0.5 - 2.33 \cdot 10^{-5}$
Epoxy, Vinyl Ester and Isophthalic pipe	0.005	$1.7 \cdot 10^{-5}$
Stainless steel	0.015	$5 \cdot 10^{-5}$
Steel commercial pipe	0.045 - 0.09	$1.5 - 3 \cdot 10^{-4}$
Stretched steel	0.015	$5 \cdot 10^{-5}$
Weld steel	0.045	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Galvanized steel	0.15	$5 \cdot 10^{-4}$
Rusted steel (corrosion)	0.15-4	$5 - 133 \cdot 10^{-4}$
New cast iron	0.25 - 0.8	$8 - 27 \cdot 10^{-4}$
Worn cast iron	0.8 -1.5	$2.7 - 5 \cdot 10^{-3}$
Rusty cast iron	1.5-2.5	$5 - 8.3 \cdot 10^{-3}$
Sheet or asphalted cast iron	0.01-0.015	$3.33 - 5 \cdot 10^{-5}$
Smoothed cement	0.3	$1 \cdot 10^{-3}$
Ordinary concrete	0.3-1	$1 - 3.33 \cdot 10^{-3}$
Coarse concrete	0.3-5	$1 - 16.7 \cdot 10^{-3}$
Well planed wood	0.18-0.9	$6 - 30 \cdot 10^{-4}$
Ordinary wood	5	$16.7 \cdot 10^{-3}$

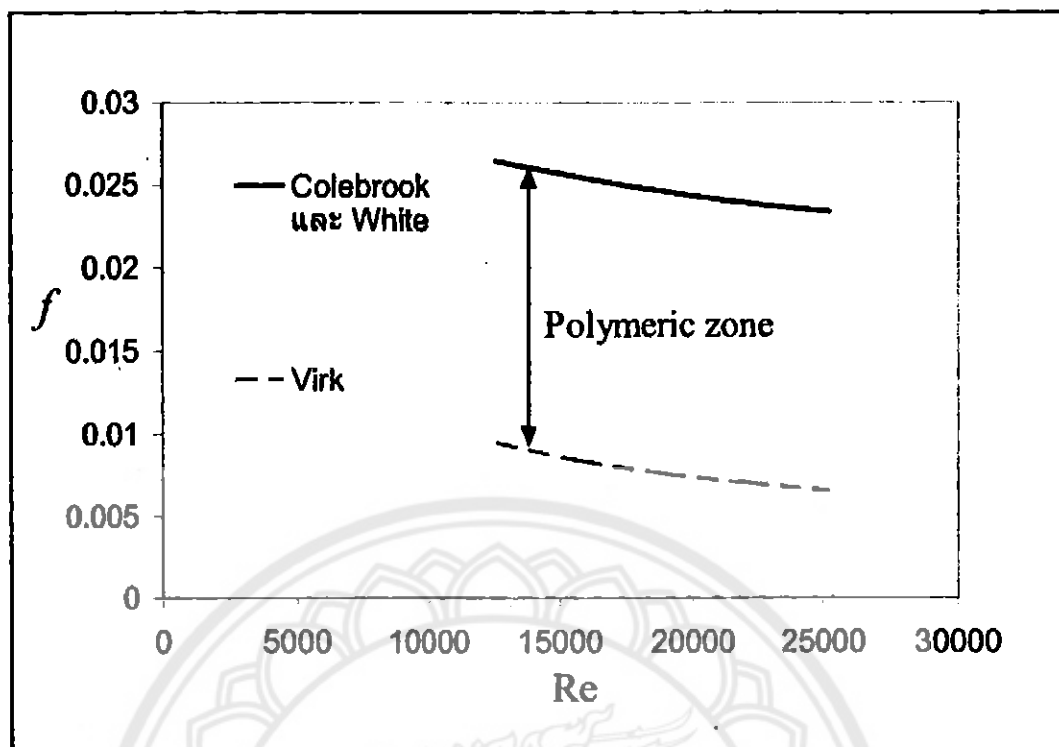
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor), Reynolds Number และ Relative Roughness หรือ $f = f(\text{Re}, \epsilon / D)$ สามารถหาจากแผนภูมิของ Moody Diagram โดยตรงก็ได้ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Moody Diagram

เมื่อมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์บางจำพวก ที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ยาวเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 100 ในล้านส่วนโดยน้ำหนัก) ลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูกลดลง ได้อย่างมาก การลดแรงเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนนี้ จะมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอยู่ จะพบว่าการลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นสัมพันธ์แรงเสียดทาน (f) สองเส้นคือ เส้นสัมพันธ์แรงเสียดทานของการไหลแบบนิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl Von Karman ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของ Colebrook และ White ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นขีดบน (upper limit) และเส้นการลดสัมพันธ์แรงเสียดทานสูงสุดของ Virk เรียกว่า Virk asymptote ซึ่งเป็นขีดล่าง (lower limit) แสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{2}{\sqrt{f}} = 19 \log \left(\frac{1}{2} Re \sqrt{f} \right) - 32.4 \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.4 แผนภูมิแสดงเส้นสัมพันธ์แรงเสียดทานของการไหลและช่วงของการลดแรงเสียดทาน

2.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ (Drag Reduction: DR) เมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์เข้าไปในท่อระบายน้ำ สามารถคำนวณได้สองแบบคือ การคำนวณจากค่าการลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน f หรือการคำนวณจากค่าการเพิ่มของอัตราการไหล Q โดยใช้สมการ;

$$DR(\%) = \left(\frac{f_w - f_p}{f_w} \right) \times 100 \quad (2.9)$$

โดยที่ f_w และ f_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีที่ไม่ใช้และใช้สารเติมพอลิเมอร์ในระบบการไหลในท่อน้ำตามลำดับ

$$Q(\%) = \left(\frac{Q_p - Q_w}{Q_w} \right) \times 100 \quad (2.10)$$

โดยที่ Q_p คือ อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ และ Q_w คือ อัตราการไหลของน้ำ

2.4 คุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์

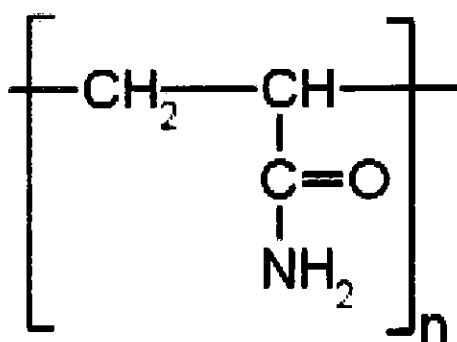
สารละลายพอลิเมอร์บางจำพวกจะมีลักษณะเป็นลูกโซ่ยาว เมื่อมีการฉีดหรือเติมสารละลายพอลิเมอร์เพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 100 ในล้านส่วนโดยน้ำหนัก) ลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูกลดลงอย่างมาก การลดแรงเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอยู่ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามแผนภูมิแสดงใน รูปที่ 2.4 จะพบว่าการลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นสัมพันธ์แรงเสียดทาน (f) สองเส้นคือ เส้นสัมพันธ์แรงเสียดทานของของไหล นิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl-Von Karman ซึ่งหาค่าได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Colebrook and White เป็นลิมิตบน (upper limit) และเส้นการลดสัมพันธ์แรงเสียดทานสูงสุดของ Virk เรียกว่า Virk asymptote ซึ่งเป็นลิมิตล่าง (lower limit)

2.5 ชนิดของพอลิเมอร์

2.5.1 Poly Acrylamide (PAM)

Poly acrylamide (IUPAC poly (2-propenamide)) คือ พอลิเมอร์ (-CH₂CHCONH₂) ที่จัดอยู่ในรูปของหน่วย acrylamide ที่สามารถ cross-linked (พันธะที่เชื่อมโยงพอลิเมอร์ของโซ่อื่นๆ) ได้ทันทีทันใด Acrylamide มีการนำไปใช้ในปฏิบัติการในห้องทดลองได้ดี (เช่น การนำไปทำสวาม ใสเป็นถุงมือเสื้อกาวน์ เป็นต้น) และมีการใช้ในระบบการทำงานที่ปลอดภัย) ควรหลีกเลี่ยงให้ห่างไกลจากแสงแดดซึ่งอาจทำให้ PAM ไม่อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ และเกิดสารที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ประสาท แต่โดยปกติ PAM จะอยู่ในรูปของพอลิเมอร์ซึ่งไม่เป็นพิษ การใช้งาน PAM ส่วนใหญ่คือใช้เพื่อช่วยในการตกตะกอน หรือจับเป็นก้อนของแข็งในของเหลว กระบวนการนี้ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย และกระบวนการทำกระดาษ โดยมีลักษณะจำเพาะของสารละลายดังนี้

- 2.5.1.1 ลักษณะทางกายภาพเป็นของแข็งเกล็ดสีขาว มีขนาดน้ำหนักโมเลกุล (Mw) ประมาณ $10 - 25 \times 10^6$
- 2.5.1.2 มีค่า PH ประมาณ 6.8
- 2.5.1.3 ครึ่งชีวิต (half life) เมื่ออยู่ในน้ำ เท่ากับ 10 ชั่วโมง
- 2.5.1.4 เริ่มเป็นอันตรายเมื่อเข้าสู่ร่างกาย ที่ความเข้มข้นมากกว่า หรือเท่ากับ 400 wppm
- 2.5.1.5 เริ่มเป็นอันตรายกับสัตว์น้ำที่ความเข้มข้นของสารละลายโดยเฉลี่ยต่ำสุดที่ 130 wppm ที่ระยะเวลาประมาณ 7 วัน
- 2.5.1.6 มีความเข้มข้นต่ำกว่า 0.1 % ของน้ำหนักน้ำ ถือว่าไม่เป็นอันตราย สามารถทิ้งถังขยะได้ แต่หากความเข้มข้นเท่ากับหรือสูงกว่า 0.1 % ของน้ำหนักน้ำ ให้ใส่ถุงที่จะส่งกำจัด



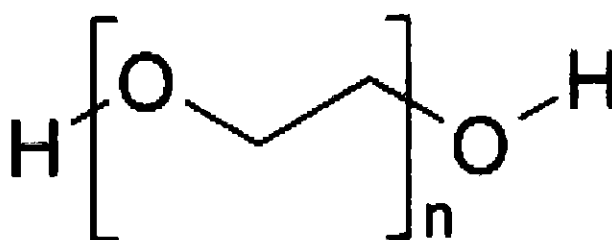
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของ Poly Acrylamide (PAM)

2.5.2 Poly Aluminum Chloride (PAC)

Poly Aluminum Chloride (PAC) หรือ เกลืออะลูมิเนียม เป็นสารประเภทพอลิอนินทรีย์ มีสูตรทางเคมี คือ $[Al(OH)_n Cl_{6-n}]_m$ หรือ $Al_n(OH)_m Cl_{(3m-n)}$ เมื่อ $0 < m < 3n$ เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลใหญ่ สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ ดังกล่าวมีความเป็นเบสแรง และมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก (+) มีคุณสมบัติในการจับตัวสูง คุณสมบัติคล้ายสารส้มคือสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำได้ และมีความเสถียรภาพมาก ลักษณะทั่วไปของ PAC อาจอยู่ในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อย หรืออยู่ในรูปของผงละเอียดสีเหลืองนวล ส่วนคุณสมบัติในการลด Friction นั้นต้องศึกษาในระดับอนุภาคคือเมื่อเราปล่อยสาร PAC ลงไปผสมกับน้ำแล้ว PAC จะทำให้โมเลกุลของน้ำเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นน้ำจะไหลได้เร็วขึ้น และแรงยึดระหว่างโมเลกุลลดลง ทำให้ความต้านทานการไหล (f) ลดลงด้วย

2.5.3 Poly Ethylene Glycol (PEG)

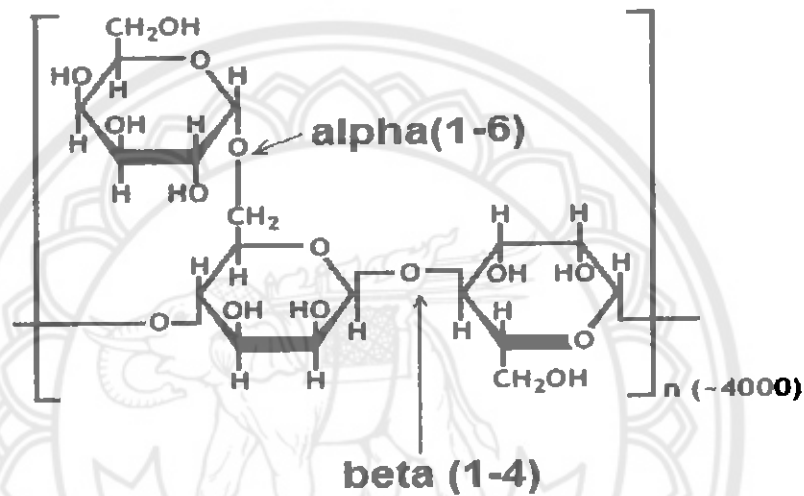
Poly Ethylene Glycol (PEG) เป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมยา หรือรู้จักกันในชื่อ Poly Ethylene Oxide (PEO) หรือ Poly Oxyethylene (POE) Poly Ethylene Glycol เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ethylene oxide กับน้ำคุณสมบัติของมันคือทำให้น้ำมีความหนืดมากขึ้น เช่นในอุตสาหกรรมยาสีฟัน หรือการทำลูกกระสุนสำหรับกีฬาพ่นบอล แต่ในปัจจุบันอาจถูกแทนที่ด้วยส่วนผสมที่ถูกกว่าเมื่อ PAG ผสมน้ำจะมีความยืดหยุ่นซึ่งทำให้แรงดันผ่านเนื้อเยื่อเพิ่ม มากขึ้นซึ่งเป็นประโยชน์ในการทดลองทางชีวเคมี



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของ Polyethylene glycol (PEG)

2.5.4 Guar gum

กัวกัมเป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งอยู่ในประเภทเฮเทอโรโพลีแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองนวล มีสมบัติเป็นสารที่ไม่ทำให้เกิดเจล แต่สามารถกระจายตัว และอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และอุ้มน้ำ เมื่อนำมาใช้ร่วมกับพอลิเมอร์แซนแทนกัม จะทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวกัมจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น การกวน และขนาดของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกัวกัม เป็นสารที่ไม่มีขั้ว และทนต่อ pH ได้ช่วงกว้างคือ pH 4-10 ทำให้สามารถเติมอิเล็กโทรไลต์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์สูงกว่าร้อยละ 5 จะมีผลต่อการอุ้มน้ำ และการเกิดเจล กัวกัมจะมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของ Guar gum

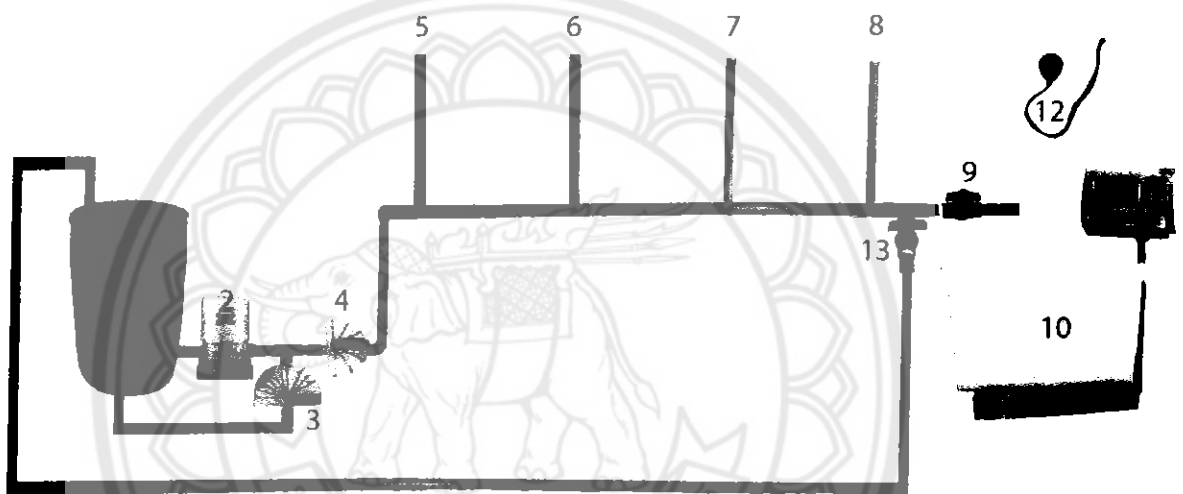
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการทดลองโครงงานนี้ เป็นการทดลองการใช้สารละลายพอลิเมอร์ลดแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวท่อ ซึ่งมีวิธีการดำเนินโดยเริ่มที่การศึกษา และออกแบบระบบจำลองการป้อนน้ำ วิธีการทดลอง และเก็บข้อมูล และส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาและออกแบบระบบจำลองการป้อนน้ำ

3.1.1 การออกแบบระบบการป้อนน้ำ สามารถจำลองระบบได้ดังรูป



รูปที่ 3.1 การจำลองระบบการป้อนน้ำ

- 3.1.1.1 ถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร
- 3.1.1.2 เครื่องสูบน้ำชนิดปั๊มหอยโข่ง
- 3.1.1.3 วาล์วบายพาส
- 3.1.1.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหล
- 3.1.1.5 อุปกรณ์วัดความดันชุดที่ 1
- 3.1.1.6 อุปกรณ์วัดความดันชุดที่ 2
- 3.1.1.7 อุปกรณ์วัดความดันชุดที่ 3
- 3.1.1.8 อุปกรณ์วัดความดันชุดที่ 4
- 3.1.1.9 วาล์วแบ่งมวลไปซึ่งน้ำหนัก
- 3.1.1.10 ถังพักน้ำซึ่งน้ำหนักขนาด 100 ลิตร
- 3.1.1.11 เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิตอล
- 3.1.1.12 นาฬิกาจับเวลา
- 3.1.1.13 วาล์วควบคุมระบบเปิด - ปิด

แบบจำลองระบบการปั้มน้ำจากรูป 3.1 จะทำการผสมสารพอลิเมอร์ลงไปในถังพักน้ำ แล้วใช้เครื่องสูบน้ำชนิดปั้มหอยโข่ง Mitsubishi / WR – 155 Q3 150 watt สูบน้ำที่เก็บในถังพักน้ำ และน้ำไหลในท่อ PVC 3/4 นิ้ว ทำการเปิดวาล์วตำแหน่งที่ 10 และเปิดวาล์วตำแหน่งที่ 13 เพื่อที่จะเป็นระบบเปิด แล้วน้ำจะไหลผ่านสู่ถังน้ำ ตำแหน่งที่ 10 ทำการชั่งน้ำหนัก และจับเวลา เพื่อวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อวัดอัตราการไหลเสร็จแล้ว จากนั้นทำการปิดวาล์วตำแหน่งที่ 10 และเปิดวาล์วตำแหน่งที่ 13 เพื่อทำให้เป็นระบบปิด หลังจากนั้นทำการวัดความดันที่ผ่านมานอมิเตอร์ ซึ่งมีทั้งหมด 4 ชุด ดังรูป ณ ตำแหน่งที่ 5, 6, 7 และ 8 ซึ่งแต่ละชุดห่างกันประมาณ 0.86 เมตร

3.1.2 วัสดุที่เลือกใช้จำลองระบบการปั้มน้ำ

- 3.1.2.1 ถัง 100 และ 200 ลิตร
- 3.1.2.2 ท่ออะครีลิก 3/4 นิ้ว
- 3.1.2.3 ท่อ PVC 3/4 นิ้ว
- 3.1.2.4 ข้อต่อท่อ PVC 3/4 นิ้ว
- 3.1.2.5 ตัวล๊อคท่อ
- 3.1.2.6 เหล็กฉาก
- 3.1.2.7 แถบ Scale
- 3.1.2.8 ไม้อัด
- 3.1.2.9 กาวน้ำ
- 3.1.2.10 เทปพันกาว

3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองของโครงการนี้ทำการทดลองที่ห้องหน่วยวิจัยอุณหพลศาสตร์ – ของไหล Thermo – Fluid Research Unit อาคารวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร มีวิธีการทดลอง และการเก็บข้อมูลของโครงการนี้ ดังต่อไปนี้

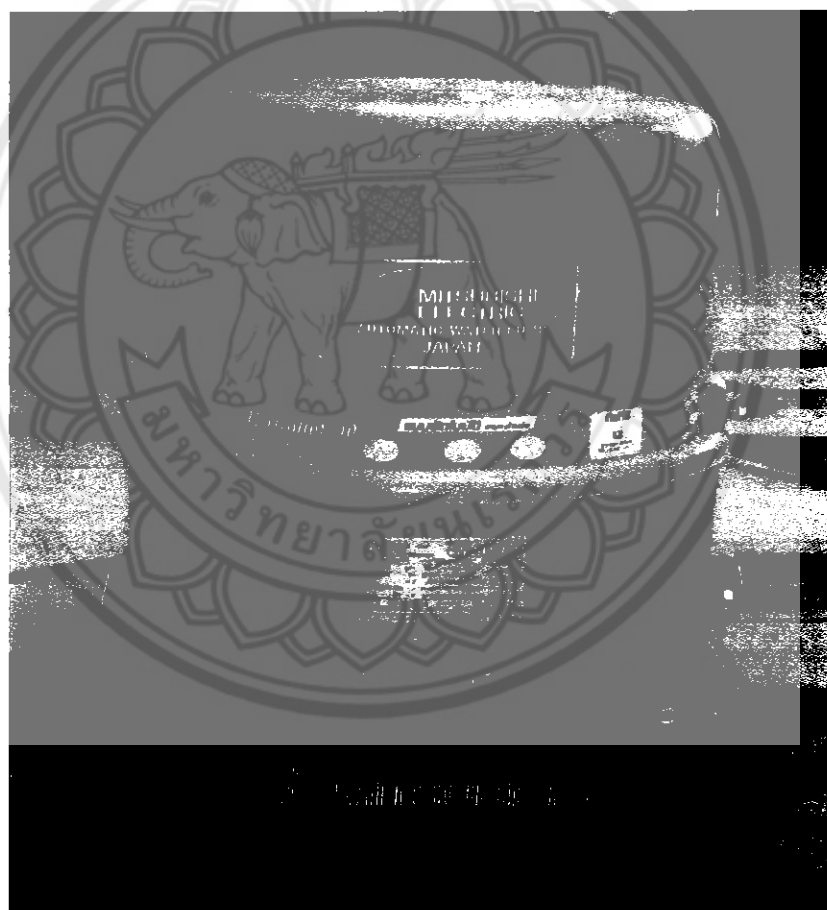
วิธีการทดลอง

- 3.2.1 ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองระบบการไหลดังรูป 3.1
- 3.2.2 นำสารละลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) 10 ppm ผสมกับน้ำในถังพักน้ำขนาด 200 ลิตร จากนั้นรอ 10 นาที เพื่อให้ น้ำกับพอลิเมอร์เข้ากัน
- 3.2.3 เปิดระบบให้ทำงาน แล้ววัดอัตราการไหลของน้ำ
- 3.2.4 รอให้ระบบทำงาน 10 นาที แล้วบันทึกค่าความดันจากมานอมิเตอร์ทั้ง 4 ชุด
- 3.2.5 ทำซ้ำข้อ 3.2.2 - 3.2.4 โดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่ต่างกันอีก 3 ค่า
- 3.2.6 ทำซ้ำข้อ 3.2.2 - 3.2.5 โดยใช้ Poly Acrylamide (PAM) 10, 30, 50 และ 100 ppm
- 3.2.7 นำค่าที่ได้จากการทดลอง มาคำนวณหาค่า ความสูญเสียหลัก (h_f) สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานภายในท่อ (f) อัตราการไหล (Q) และเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทาน เนื่องจากการไหลภายในท่อ (%DR)

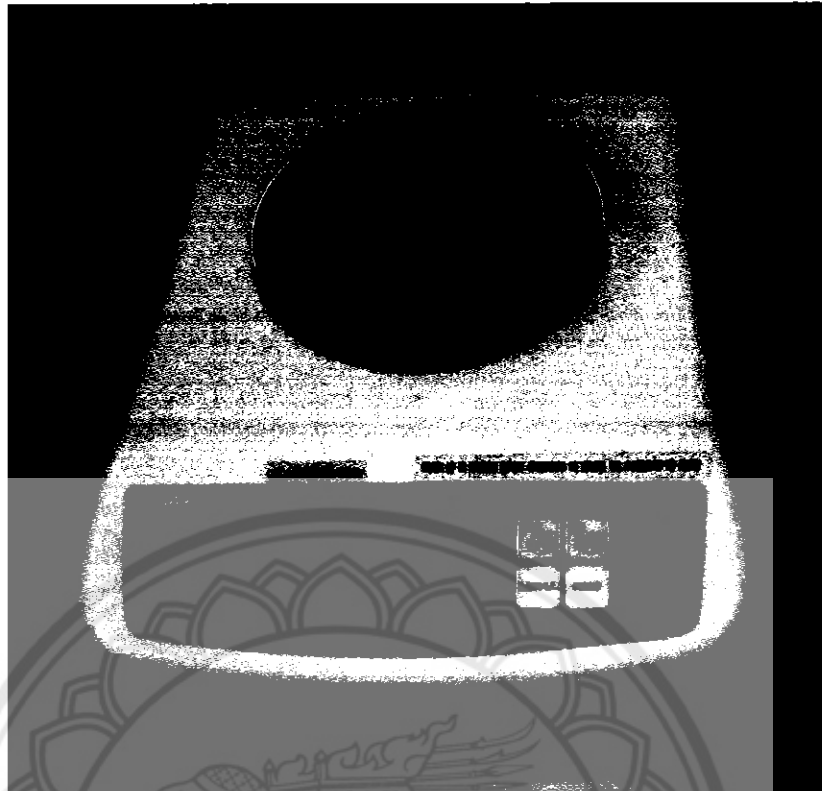
3.3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้

ตารางที่ 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น	คุณสมบัติ
ปั้มน้ำ	Mitsubishi / WR-155Q3	Power, 220V, 150Hz, 150 Watt, ระยะส่ง 12 เมตร
เครื่องชั่งดิจิตอล	UWE / JW-250	น้ำหนัก;250g Div ;0.005g AC Adaptor; 9V/ 500mA
เครื่องชั่ง	HASON / A12E	AC 220V 50Hz
นาฬิกาจับเวลา	CASIO / HS-70W	หน่วยความจำ 2X100 ก้านน้ำลึก 50 เมตร จับเวลาละเอียดถึง 1/1000 วินาที



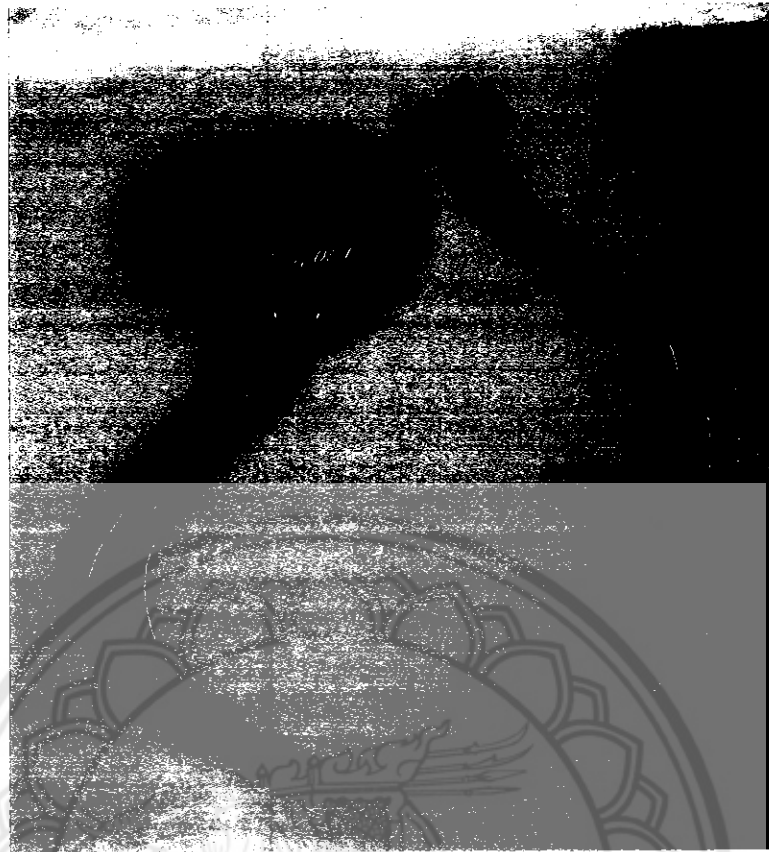
รูปที่ 3.2 ปั้มน้ำ



รูปที่ 3.3 เครื่องชั่งดิจิตอล



รูปที่ 3.4 เครื่องชั่ง



รูปที่ 3.5 นาฬิกาจับเวลา

3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

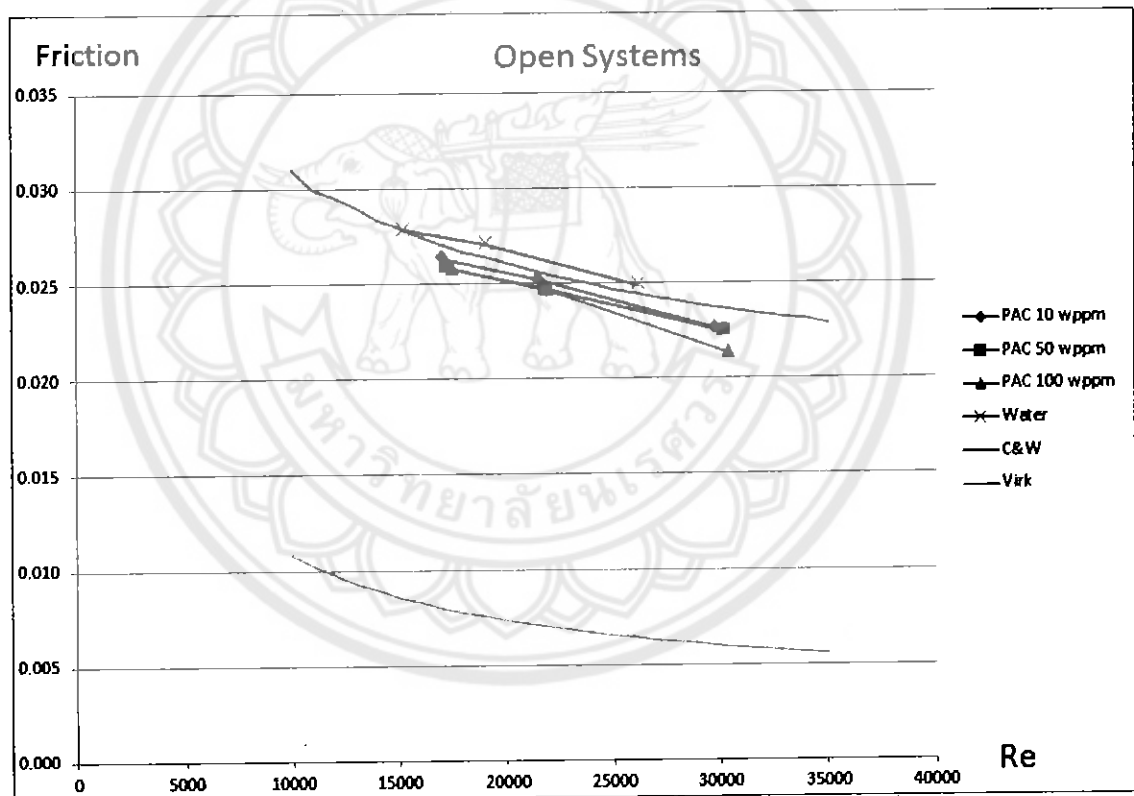
นำผลการทดลองที่ Re เดียวกัน และความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่แตกต่างกัน มาวิเคราะห์ความสามารถในการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จากนั้นเปรียบเทียบวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์ความสามารถในการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) และเปอร์เซ็นต์อัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (%Q)

บทที่ 4

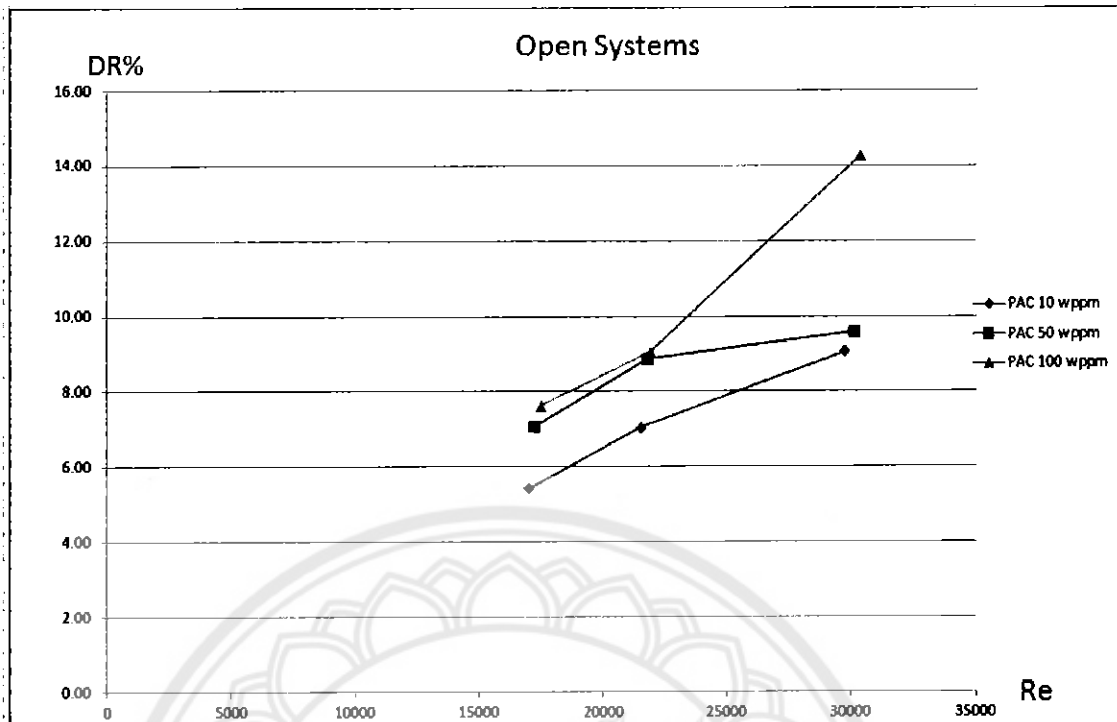
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาผลของการเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่มีต่อความดันตกคร่อมภายในท่อ จะวิเคราะห์โดยใช้ผลการทดลอง เดือน มิถุนายน 2555 – มกราคม 2556 ณ ห้องหน่วยวิจัยอุณหพลศาสตร์ – ของไหล Thermo – Fluid Research Unit อาคารวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งทำการทดลองที่ความเข้มข้นของ สารละลายพอลิเมอร์ 10, 30, 50 และ 100 ppm

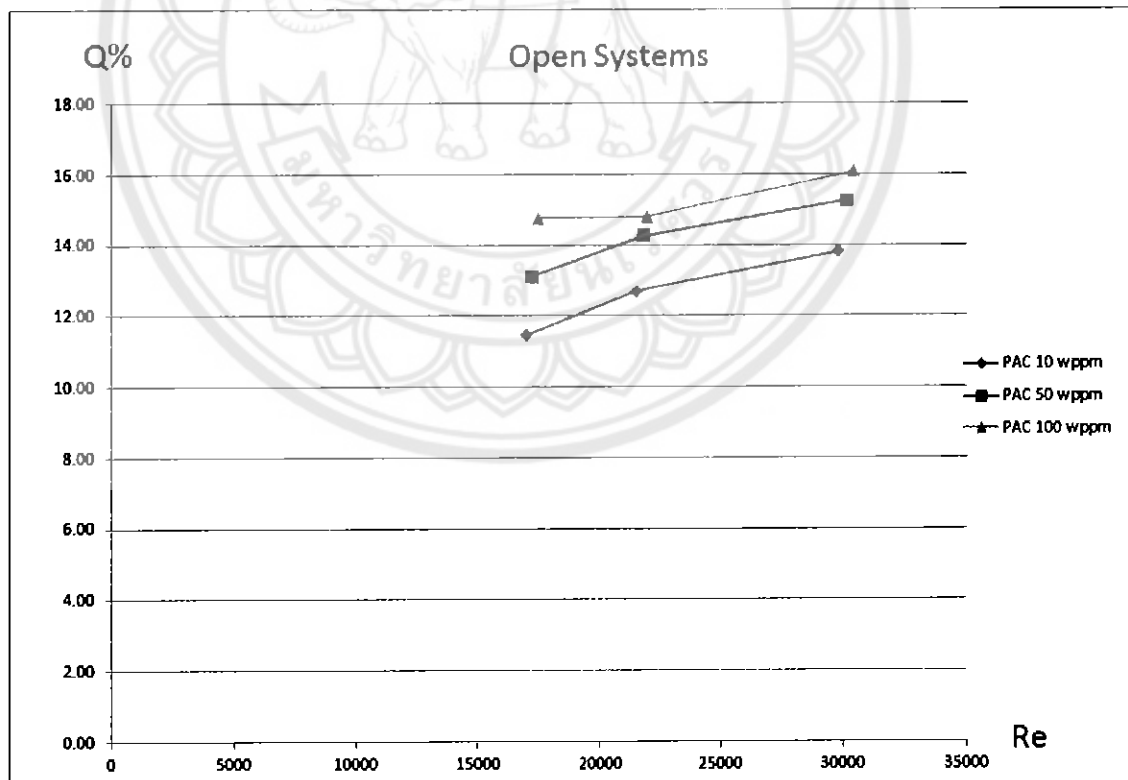
4.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด



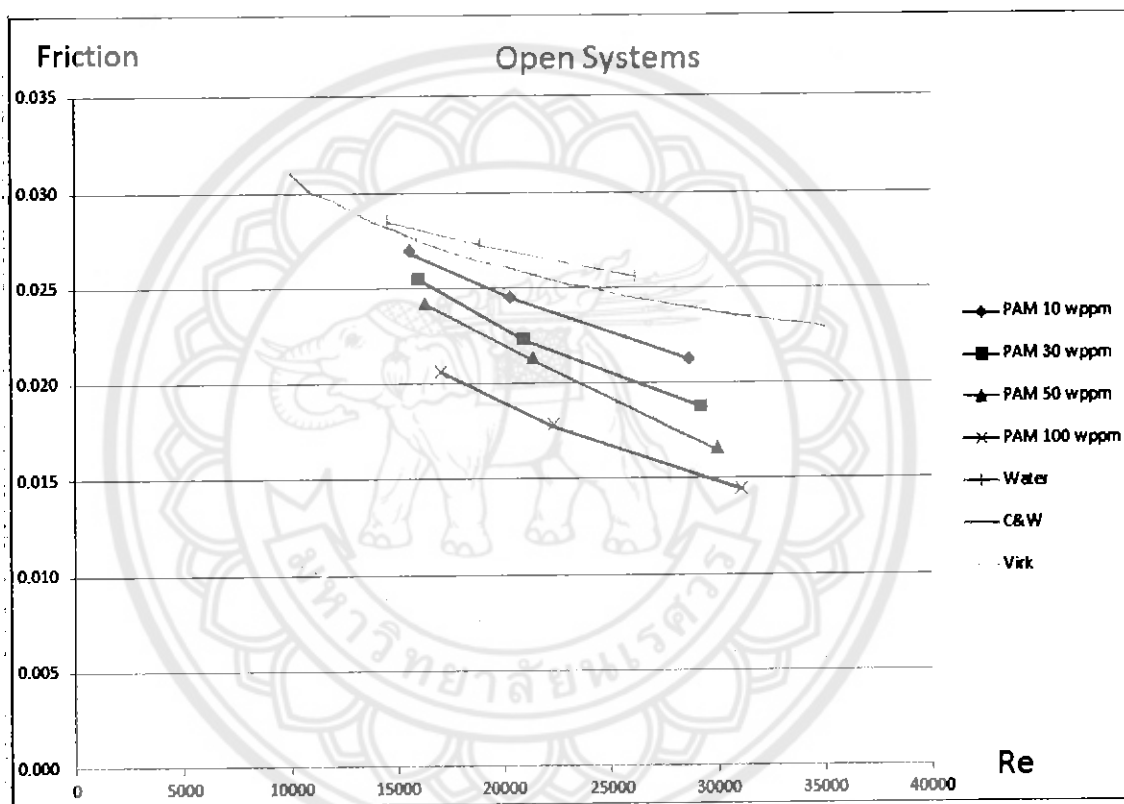
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Aluminum Chloride (PAC) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด

จากกราฟที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการไหลของน้ำในระบบเปิด ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับ ค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) ของการไหลในท่อของน้ำเปล่า และน้ำที่ผสมด้วย Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm และจาก Moody diagram $f = f(Re, \epsilon / D)$ ซึ่ง f หาได้จากสมการที่ 2.5 และค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) หาได้จาก Moody diagram ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน จะมีค่าลดลงเมื่อค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) นั้นเพิ่มสูงขึ้น และจากการทดลองจะได้แสดงในกราฟที่ 4.1 เมื่อมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์บางจำพวก ที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ยาวเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 100 ในล้านส่วนโดยน้ำหนัก) ลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูกลดลงได้อย่างมาก การลดแรงเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนนี้ จะมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอยู่ จะพบว่า การลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบนั้นขึ้นอยู่กับค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) สองเส้นคือ เส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลแบบนิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl Von Karman ซึ่งหาค่าได้จากความสัมพันธ์ของ Colebrook และ White ดังแสดงในสมการที่ 2.7 ซึ่งเป็นขีดบน (upper limit) และเส้นการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดของ Virk เรียกว่า Virk asymptote ซึ่งเป็นขีดล่าง ซึ่งการไหลของน้ำเปล่าพบว่า มีค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) อยู่ระหว่าง 15000-26000 และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุด 0.0249 สูงสุด 0.0279 มีลักษณะเส้นกราฟขนานกับเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลแบบนิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl Von Karman ซึ่งเป็นขีดบน และเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ Polymer Aluminum Chloride (PAC) ลงไปพบว่าสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และการลดแรงเสียดทานที่ต่ำที่สุดอยู่ที่การเติมสารพอลิเมอร์ Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ค่าหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ 0.0214 และลักษณะของกราฟจะลดต่ำลง และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone

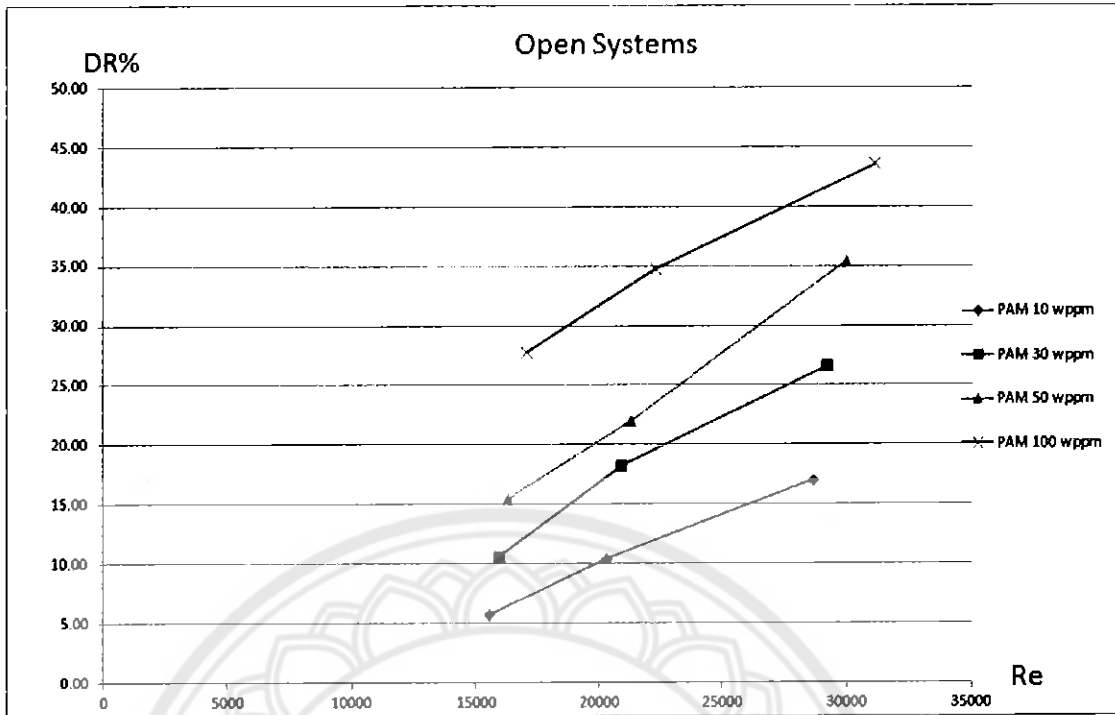
จากสมการอนุรักษ์พลังงานเบอร์นูลลี พลังงานของอัตราการไหลในท่อท่อขาเข้าเท่ากับพลังงานของอัตราการไหลในท่อท่อออก ซึ่งพลังงานที่วามนี้ประกอบไปด้วย พลังงานที่เอาชนะความสูญเสียระหว่างจุดสองจุดสามารถคำนวณหาได้จากความดันตกคร่อมขาเข้า และออก (Flow energy) พลังงานศักย์จากระดับความสูงที่แตกต่างกัน พลังงานจลน์เนื่องจากความเร็วของการไหล และจากการทดลองการไหลของน้ำในท่อจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่งจะมีการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างการไหลอยู่สองอย่าง คือการสูญเสียจากแรงเสียดทานระหว่างการไหลของของไหลกับผนังท่อ คือการสูญเสียหลัก และการสูญเสียเนื่องจากไหลผ่าน ข้อต่อ ข้องอ หรือวาล์วต่างๆ ซึ่งในการทดลองนี้เราจะไม่พิจารณา และการเติมสารละลาย Polymer Aluminum Chloride (PAC) ลงไปในน้ำ ซึ่งพิจารณาที่เรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) เดียวกันพบว่า Flow energy ที่ใช้ในการไหลมีค่าที่น้อยลง เนื่องจากสามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลงได้ดังที่แสดงใน กราฟที่ 4.2 ซึ่งเป็นกราฟที่แสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) ของน้ำเทียบกับน้ำที่ผสม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) เท่ากับ 14.24% เนื่องจากระบบการไหลมีแรงเสียดทานที่ลดลงทำให้ใช้เวลาในการไหลที่ปริมาตรเท่ากันน้อยลง ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังกราฟที่ 4.3 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ที่เติมสาร Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ซึ่งจะมีเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเติมสารเพิ่มขึ้นด้วย และมีเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ที่สูงสุดที่ความเข้มข้น 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เท่ากับ 16%

จากการทดลองการเติม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ในการไหลในท่อเพื่อลดแรงเสียดทานในท่อ และสามารถทำให้ได้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นได้ในเปอร์เซ็นต์ที่ไม่สูง ถ้าจะให้ได้ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นต้องมีการเพิ่มความเข้มข้นของ Polymer Aluminum Chloride (PAC) ลงไปในน้ำอาจจะต้องเติมจนเกินขีดของความปลอดภัยของสภาพแวดล้อม จึงได้ทำการเปลี่ยนสารในการทดลองเพื่อให้ได้เปอร์เซ็นต์การลดลงของแรงเสียดทานที่สูงขึ้น

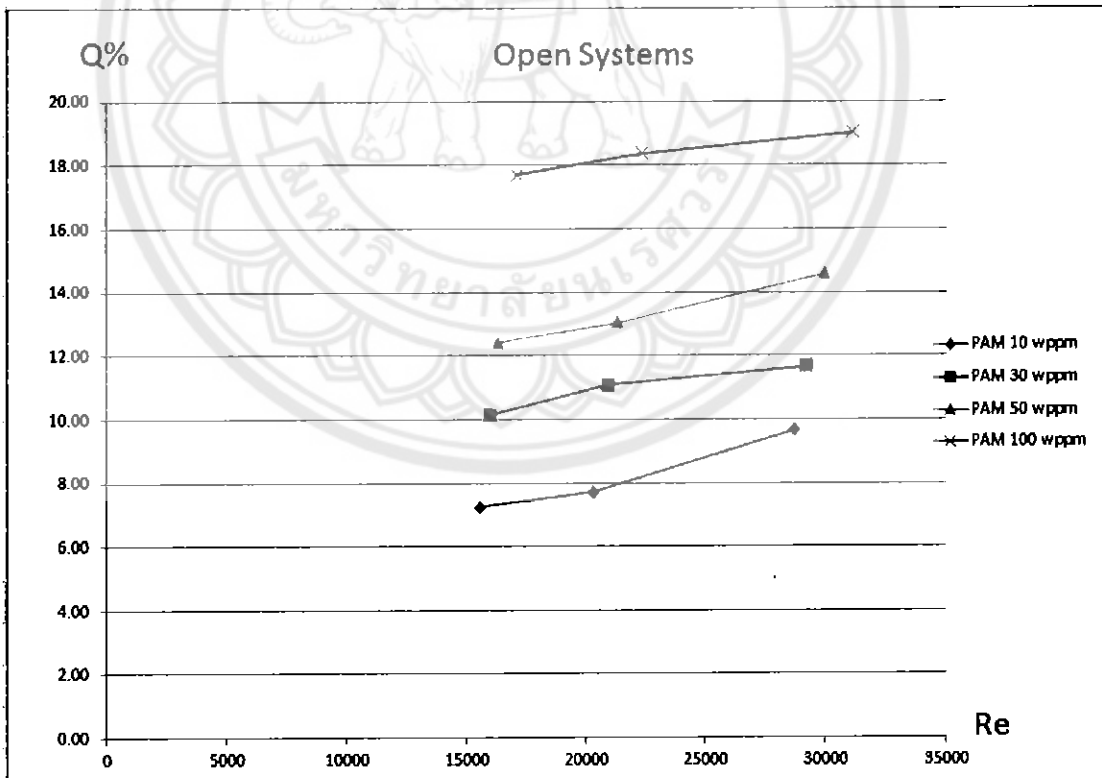
4.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm ระบบเปิด



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด

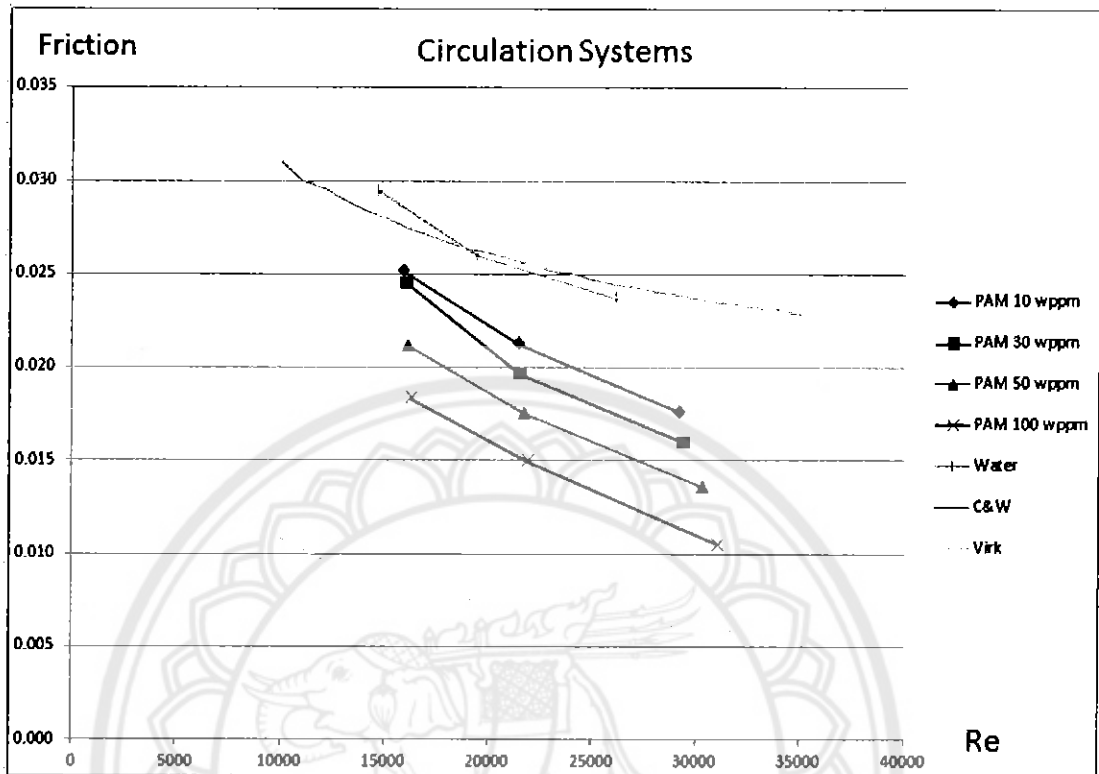


รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบเปิด

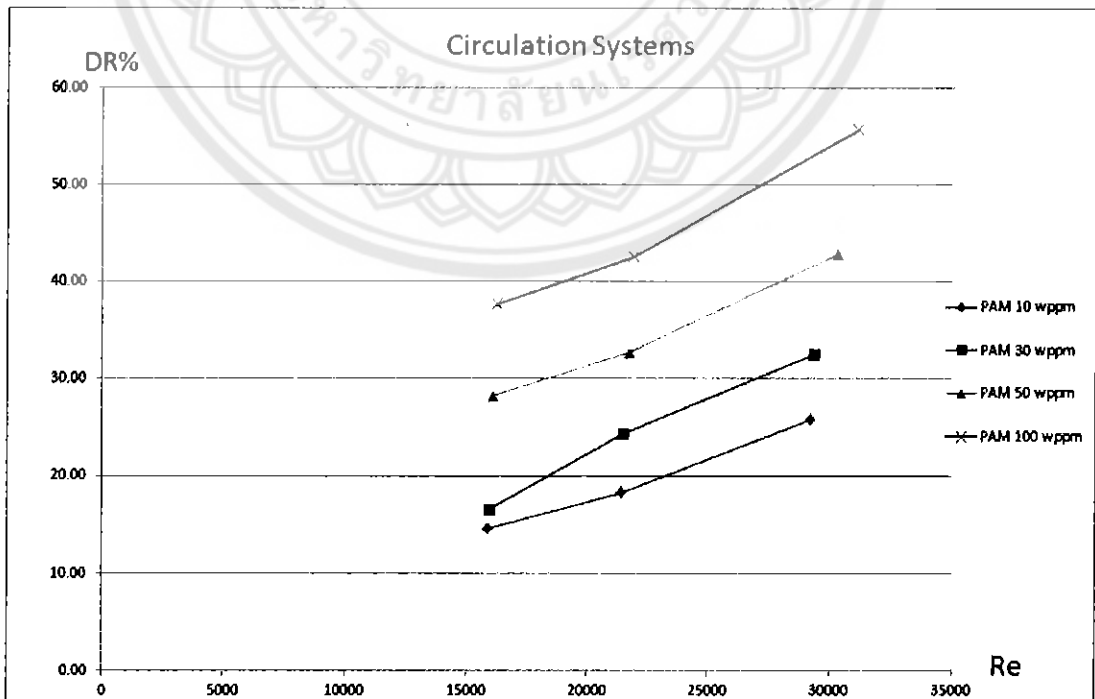
จากกราฟที่ 4.4 เป็นการทดลองการไหลในท่อในระบบเปิด ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) ของการไหลในท่อของน้ำเปล่า และน้ำที่ผสมด้วย Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm และจากการทดลองพบว่า การไหลในท่อของน้ำ ซึ่งการไหลของน้ำเปล่าพบว่า มีค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) อยู่ระหว่าง 15000-26000 และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุด 0.0249 สูงสุด 0.0279 ซึ่งเป็นไปตามเส้นกราฟของการไหลแบบนิวโทเนียนฟูอิด ซึ่งสูงกว่าเส้นกราฟของอ้างอิงเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองอาจมีการคลาดเคลื่อน และเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ลงไป พบว่าการเติมสารพอลิเมอร์ลงไปเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำที่สุดที่ลดได้ อยู่ที่การเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ 0.0144 และจากกราฟที่ 4.5 เป็นกราฟที่แสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) ของน้ำเทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) เท่ากับ 60% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเติมความเข้มข้นที่สูงขึ้น

เนื่องจากระบบการไหลมีแรงเสียดทานที่ลดลงทำให้มีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังกราฟที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เท่ากับ 20% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเติมสารเพิ่มขึ้นด้วย

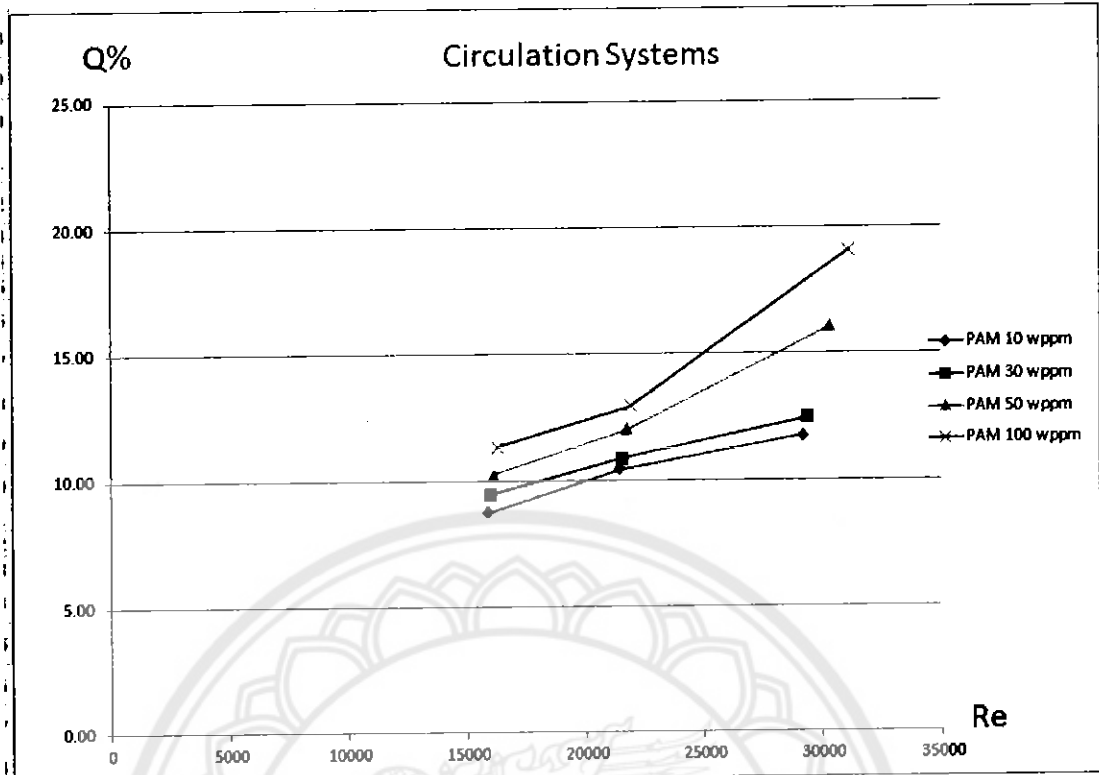
4.3 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ระบบหมุนเวียน

จากกราฟที่ 4.7 เป็นการทดลองการไหลในท่อในระบบหมุนเวียน ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) ของการไหลในท่อน้ำเปล่า และน้ำที่ผสมด้วย Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 50, 100 ppm และจากการทดลองพบว่าการไหลในท่อบรรณเวียนของน้ำ ซึ่งการไหลของน้ำเปล่าพบว่า มีค่า Re อยู่ระหว่าง 14000-26000 และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุด 0.0237 สูงสุด 0.0294 และเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ PAM ลงไปพบว่าการเติมสารพอลิเมอร์ลงไปสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้เหมือนในระบบเปิด และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำที่สุด อยู่ที่การเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 100 ppm คำนวณค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ 0.0104 และจากกราฟที่ 4.8 เป็นกราฟที่แสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) ของน้ำเทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) เท่ากับ 55.75% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) จะเพิ่มขึ้นตามการเติมความเข้มข้นที่สูงขึ้น

เนื่องจากระบบการไหลมีแรงเสียดทานที่ลดลงทำให้มีความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังกราฟที่ 4.9 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เทียบกับน้ำที่ผสม PAM ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เท่ากับ 19.08% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเติมสารเพิ่มขึ้นด้วย

จากการทดลองการไหลในระบบหมุนเวียนพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) และค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เมื่อเทียบกับระบบเปิดมีแนวโน้มต่างๆที่คล้ายกัน และสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าการไหลในระบบแบบหมุนเวียน และระบบเปิด Poly Acrylamide (PAM) สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ ควรเลือกการเติมพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ppm ลงมาจะเหมาะสมกว่า เพราะน้ำยังคงสถานะความหนืด และไหลได้ตามปกติ และยังสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ได้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูง และยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้อีกด้วย



บทที่ 5

สรุปโครงการ และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาผลของการเติมพอลิเมอร์ลงในน้ำเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานของการไหลภายในท่อ ซึ่งการทดลองนี้มีการใช้พอลิเมอร์ในการทดลองคือ Polymer Aluminum Chloride (PAC) กับ Poly Acrylamide (PAM)

ซึ่งจากการทดลองเติม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 10, 50, 100 ppm ลงในน้ำจากนั้นทำการทดลองพบว่า Polymer Aluminum Chloride (PAC) มีความสามารถในการลดแรงเสียดทานในการไหลได้ และที่การเติม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้น 100 ppm สามารถลดแรงเสียดทาน (%DR) ลงได้ 14% และสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้เล็กน้อย จากการเติม Polymer Aluminum Chloride (PAC) ลงไปในน้ำนี้สามารถลดแรงเสียดทานได้จริง แต่มีเปอร์เซ็นต์ที่ยังไม่ได้สูงมากจึงมีการเปลี่ยนสารในการทดลอง จากการเปลี่ยนพอลิเมอร์มาใช้ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm ลงในน้ำจากนั้นทำการทดลองพบว่า Poly Acrylamide (PAM) มีความสามารถลดแรงเสียดทานของการไหลในท่อ (%DR) ได้สูงถึง 43.59% และสามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ได้ถึง 29% ที่ความเข้มข้น 100 ppm และจากการทดลองเติมพอลิเมอร์สองชนิด Poly Acrylamide (PAM) มีความสามารถลดแรงเสียดทานได้ดีกว่า Polymer Aluminum Chloride (PAC) ที่ความเข้มข้นของสารปริมาณเท่ากัน และทั้งนี้จากการที่ Poly Acrylamide (PAM) เป็นสารที่ลดแรงเสียดทานได้ดีกว่า Polymer Aluminum Chloride (PAC) จึงได้มีการทดลองต่อในระบบการไหลแบบหมุนเวียน ผลจากการทดลองปรากฏว่า การเติมพอลิเมอร์ในการไหลแบบระบบหมุนเวียนก็สามารถลดแรงเสียดทานได้เหมือนกับระบบเปิด และจากการทดลองเติม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100 ppm สามารถลดแรงเสียดทาน (%DR) ได้สูงถึง 55% และเพิ่มอัตราการ (%Q) ไหลได้ 19%

จากการทดลองเติมพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด Polymer Aluminum Chloride (PAC) และ Poly Acrylamide (PAM) พบว่า Poly Acrylamide (PAM) มีความสามารถในการลดแรงเสียดทานได้จริง และลดได้ดีกว่าการเติม Polymer Aluminum Chloride (PAC) และใช้ในการไหลระบบหมุนเวียนได้ดีกว่าระบบเปิด เนื่องจากสามารถลดแรงเสียดทานได้ดีกว่าการเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจากทฤษฎีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) และเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) จะต้องมีค่าที่เท่ากัน หรือใกล้เคียงกันแต่จากการทดลองนั้นได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ที่น้อยกว่ามาก อาจเป็นเพราะน้ำที่ผสมพอลิเมอร์มีการอุ้มน้ำ และติดค้างตามข้อต่อต่างๆ และการเติมพอลิเมอร์ในปริมาณที่น้อยกว่า 100 ppm ลงมาเพื่อให้น้ำยังคงสภาพเป็นนิวโทเนียนฟลูอิด ทำให้การไหลมีความหนืดสม่ำเสมอ และยังคงที่เป็นปริมาณในการเติมที่ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด การลดแรงเสียดทานภายในท่อนั้นทำให้ใช้พลังงานจากปั๊ม Flow energy น้อยลง ทำให้สามารถส่งน้ำไปได้ไกลขึ้นโดยใช้ปั๊มตัวเดิม หรือในอีกหนึ่งกรณี คือใช้เวลาในการสูบน้ำที่ลดลงในระยะทางเท่าเดิมเนื่องจากความเร็วของการไหลเพิ่มขึ้น หรือสามารถสูบน้ำได้ในปริมาณที่มากขึ้นกว่าเดิมในการใช้เวลาเท่ากันเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ลงไปเทียบกับการไม่เติมสารพอลิเมอร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 5.2.1 ควรใช้เครื่องมือที่มีความถูกต้อง แม่นยำสูง จะสามารถลดความผิดพลาดจากเครื่องมือวัดผล เพราะจะทำให้ได้ข้อมูลจากการวัดถูกต้อง และแม่นยำมากขึ้น
- 5.2.2 ควรใช้เครื่องละลายสารที่มีประสิทธิภาพสูงได้ในการละลายพอลิเมอร์ เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการลดแรงเสียดเนื่องจากการไหลในท่อได้มากขึ้น
- 5.2.3 ทำการทดลองโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์ลงไปในการไหลของท่อขนาดต่างๆ แล้วนำมาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น
- 5.2.4 ทำการทดลองโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์ลงไปในการไหลของท่อที่ต่างชนิดกัน แล้วนำมาเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้น ว่าท่อแต่ละชนิดส่งผลกระทบต่ออย่างไรบ้าง
- 5.2.5 ทำการทดลองโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์หลายๆชนิด แล้วนำมาเปรียบเทียบค่า และเลือกชนิดที่ดีที่สุด เพราะว่าอาจจะมีพอลิเมอร์ชนิดที่ดีกว่า Poly Acrylamide (PAM)



เอกสารอ้างอิง

- [1] จีระ ภูระหงษ์, วรากร พระอาจค์ และสิทธิพร ทากัมมา. (2553). การเพิ่มสมรรถนะการระบายน้ำโดยใช้พอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [2] ทศพล ลากเดโช, วิรัช เพิ่มผลนิรันดร์ และปฐมพงษ์ เลิศศิริรุ่งเรือง. (2548). การวิเคราะห์อายุการใช้งานของท่อในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่สภาวะต่างๆ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [3] อนันต์ชัย อยู่แก้ว. (2555). การลดแรงเสียดทานในการไหลผ่านท่อ: หลักการพื้นฐานและแนวทางประยุกต์ใช้ในประเทศไทย. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, 23 (1), 55-61
- [4] หิรัญ มาคำ, ชาญวิทย์ ภูจอม และภูษิต กิตติชัยยะ. (2553). การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการป้อนน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยนเรศวร.
- [5] สัตยา ยิ้มประเสริฐ และอนันต์ชัย อยู่แก้ว. (2554). การเพิ่มสมรรถนะการระบายน้ำสำหรับท่อที่รองรับน้ำหนักเกินพิกัดระหว่างการเกิดอุทกภัยโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์. วันที่ค้นข้อมูล 17 สิงหาคม 2555, จาก คณะกรรมการด้านการชลประทานและการระบายน้ำแห่งประเทศไทย เว็บไซต์: http://www.rid.go.th/thaicid//_7_news/index.php?number=78&action=1



ภาคผนวก ก

ตารางบันทึกผลการทดลอง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

ตารางที่ ก.1 ตารางบันทึกผลการทดลอง

ชนิดของโหล	การทดสอบ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
	ครั้งที่ 1	30°						
	ครั้งที่ 2	30°						
	ครั้งที่ 3	30°						
	ค่าเฉลี่ย	30°						
	ครั้งที่ 1	60° / BP30°						
	ครั้งที่ 2	60° / BP30°						
	ครั้งที่ 3	60° / BP30°						
	ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°						
	ครั้งที่ 1	90°						
	ครั้งที่ 2	90°						
	ครั้งที่ 3	90°						
	ค่าเฉลี่ย	90°						



ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหล

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลัก

ตัวอย่าง การคำนวณการสูญเสียพลังงานหลักของน้ำที่ระบบหมุนเวียน

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	111.5	97.5	83.0	81.0	60.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	98.9	84.8	68.2	64.7	61.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	109.4	96.0	79.9	78.1	60.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	106.60	92.77	77.03	74.60	60.33	25.00

$$\dot{m}_{water} = \frac{25}{60.33} = 0.4144 \text{ kg/s}$$

$$Q = Av$$

$$\dot{m} = \rho Av = \rho Q$$

$$\therefore Q_{water} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.4144}{998} = 0.000415 \text{ m}^3/\text{s} = 0.415 \text{ L/s}$$

$$v_{water} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4Q}{\pi D^2} = \frac{4(0.000415)}{\pi(0.020)^2} = 1.321 \text{ m/s}$$

$$Re_{water} = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{998(1.321)(0.020)}{0.00101} = 26106$$

$$h_{f,water} = \frac{(P_2 - P_4)}{\gamma} + (z_1 - z_2) = \frac{\rho g(h_2 - h_4)}{\rho g} + 0 = h_2 - h_4 = 0.9277 - 0.746 = 0.1817 \text{ m}$$

$$f_{water} = \frac{2h_f Dg}{Lv^2} = \frac{2(0.1817)(0.020)(9.81)}{(2 \times 0.86)(1.321)^2} = 0.02375$$

ตารางที่ ข.1 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของน้ำในระบบเปิด

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	30°	0.243	0.000243	0.774	15302	0.0278
ครั้งที่ 2	30°	0.240	0.000241	0.767	15155	0.0279
ครั้งที่ 3	30°	0.240	0.000241	0.767	15155	0.0279
ค่าเฉลี่ย	30°	0.241	0.000242	0.769	15204	0.0279

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.309	0.000309	0.985	19458	0.0264
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.301	0.000302	0.961	18989	0.0277
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.298	0.000298	0.949	18763	0.0273
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.302	0.000303	0.965	19070	0.0271

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	90°	0.417	0.000418	1.329	26268	0.0251
ครั้งที่ 2	90°	0.403	0.000404	1.286	25421	0.0262
ครั้งที่ 3	90°	0.424	0.000425	1.352	26713	0.0236
ค่าเฉลี่ย	90°	0.415	0.000415	1.322	26134	0.0249

ตารางที่ ข.2 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 10 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.269	0.000269	0.858	16947	0.0264	5.07	10.75
ครั้งที่ 2	30°	0.269	0.000269	0.858	16947	0.0257	7.82	11.83
ครั้งที่ 3	30°	0.269	0.000269	0.858	16947	0.0270	3.38	11.83
ค่าเฉลี่ย	30°	0.269	0.000269	0.858	16947	0.0264	5.42	11.47

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60°/BP30°	0.342	0.000343	1.092	21590	0.0254	3.55	10.96
ครั้งที่ 2	60°/BP30°	0.338	0.000339	1.078	21298	0.0257	7.03	12.16
ครั้งที่ 3	60°/BP30°	0.342	0.000343	1.092	21590	0.0245	10.49	15.07
ค่าเฉลี่ย	60°/BP30°	0.341	0.000342	1.088	21493	0.0252	7.05	12.71

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.472	0.000473	1.505	29738	0.0229	8.70	13.21
ครั้งที่ 2	90°	0.481	0.000482	1.534	30309	0.0219	16.33	19.23
ครั้งที่ 3	90°	0.463	0.000464	1.477	29187	0.0232	1.60	9.26
ค่าเฉลี่ย	90°	0.472	0.000473	1.505	29745	0.0227	9.06	13.82

ตารางที่ ข.3 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 50 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.269	0.000269	0.858	16947	0.0270	2.84	10.75
ครั้งที่ 2	30°	0.272	0.000272	0.867	17131	0.0258	7.62	13.04
ครั้งที่ 3	30°	0.278	0.000278	0.886	17512	0.0250	10.55	15.56
ค่าเฉลี่ย	30°	0.273	0.000273	0.870	17197	0.0259	7.07	13.11

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60°/BP30°	0.347	0.000348	1.108	21890	0.0247	6.17	12.50
ครั้งที่ 2	60°/BP30°	0.347	0.000348	1.108	21890	0.0245	11.31	15.28
ครั้งที่ 3	60°/BP30°	0.342	0.000343	1.092	21590	0.0248	9.09	15.07
ค่าเฉลี่ย	60°/BP30°	0.346	0.000346	1.103	21790	0.0247	8.88	14.26

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.481	0.000482	1.534	30309	0.0223	10.95	15.38
ครั้งที่ 2	90°	0.481	0.000482	1.534	30309	0.0223	14.85	19.23
ครั้งที่ 3	90°	0.472	0.000473	1.505	29738	0.0230	2.65	11.32
ค่าเฉลี่ย	90°	0.478	0.000479	1.524	30119	0.0225	9.60	15.25

ตารางที่ ข.4 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 100 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.275	0.000275	0.876	17320	0.0252	9.11	13.19
ครั้งที่ 2	30°	0.278	0.000278	0.886	17512	0.0261	6.39	15.56
ครั้งที่ 3	30°	0.278	0.000278	0.886	17512	0.0259	7.43	15.56
ค่าเฉลี่ย	30°	0.277	0.000277	0.883	17448	0.0258	7.62	14.76

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.347	0.000348	1.108	21890	0.0247	6.17	12.50
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.352	0.000353	1.123	22198	0.0240	13.11	16.90
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.342	0.000343	1.092	21590	0.0252	7.69	15.07
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.347	0.000348	1.108	21893	0.0247	9.04	14.80

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.500	0.000501	1.595	31522	0.0198	20.89	20.00
ครั้งที่ 2	90°	0.472	0.000473	1.505	29738	0.0228	13.08	16.98
ครั้งที่ 3	90°	0.472	0.000473	1.505	29738	0.0217	8.20	11.32
ค่าเฉลี่ย	90°	0.481	0.000482	1.535	30332	0.0214	14.24	16.06

ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25000	0.000251	0.798	15761	0.0265	6.70	8.00
ครั้งที่ 2	30°	0.24510	0.000246	0.782	15452	0.0269	5.90	6.86
ครั้งที่ 3	30°	0.24510	0.000246	0.782	15452	0.0272	4.59	6.86
ค่าเฉลี่ย	30°	0.24673	0.000247	0.787	15555	0.0269	5.74	7.24

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.32468	0.000325	1.036	20469	0.0234	11.82	6.49
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.32051	0.000321	1.022	20206	0.0251	9.86	7.69
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.32051	0.000321	1.022	20206	0.0249	9.44	8.97
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.32190	0.000323	1.027	20294	0.0244	10.36	7.71

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0206	19.77	9.09
ครั้งที่ 2	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0222	17.27	12.73
ครั้งที่ 3	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0208	14.00	7.27
ค่าเฉลี่ย	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0212	16.97	9.65

ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25000	0.000251	0.798	15761	0.0262	7.96	8.00
ครั้งที่ 2	30°	0.25510	0.000256	0.814	16083	0.0248	13.13	11.22
ครั้งที่ 3	30°	0.25510	0.000256	0.814	16083	0.0255	10.72	11.22
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25340	0.000254	0.808	15975	0.0255	10.63	10.14

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.34247	0.000343	1.092	21590	0.0199	25.07	12.33
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.32895	0.000330	1.049	20738	0.0215	22.61	10.53
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.32468	0.000325	1.036	20469	0.0257	6.33	10.39
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.33203	0.000333	1.059	20932	0.0223	18.23	11.09

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0182	29.18	11.11
ครั้งที่ 2	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0185	31.14	14.81
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0196	19.25	9.26
ค่าเฉลี่ย	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0188	26.64	11.68

ตารางที่ ข.7 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0236	16.96	11.34
ครั้งที่ 2	30°	0.26042	0.000261	0.831	16418	0.0248	13.17	13.54
ครั้งที่ 3	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0240	16.08	12.37
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25863	0.000259	0.825	16305	0.0241	15.38	12.41

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.33784	0.000339	1.078	21298	0.0206	22.26	10.81
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.33784	0.000339	1.078	21298	0.0214	23.10	13.51
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.33784	0.000339	1.078	21298	0.0218	20.63	14.86
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.33784	0.000339	1.078	21298	0.0213	21.98	13.04

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0183	28.77	11.11
ครั้งที่ 2	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0152	43.44	21.57
ครั้งที่ 3	90°	0.47170	0.000473	1.505	29738	0.0162	33.03	11.32
ค่าเฉลี่ย	90°	0.47495	0.000476	1.515	29943	0.0165	35.35	14.57

ตารางที่ ข.8 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.27174	0.000272	0.867	17131	0.0182	35.97	17.39
ครั้งที่ 2	30°	0.27174	0.000272	0.867	17131	0.0216	24.51	18.48
ครั้งที่ 3	30°	0.26882	0.000269	0.858	16947	0.0220	22.86	17.20
ค่าเฉลี่ย	30°	0.27077	0.000271	0.864	17070	0.0206	27.80	17.69

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60°/ BP30°	0.35211	0.000353	1.123	22198	0.0174	34.57	15.49
ครั้งที่ 2	60°/ BP30°	0.35714	0.000358	1.139	22516	0.0172	38.13	20.00
ครั้งที่ 3	60°/ BP30°	0.35211	0.000353	1.123	22198	0.0188	31.54	19.72
ค่าเฉลี่ย	60°/ BP30°	0.35379	0.000354	1.129	22304	0.0178	34.77	18.38

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.50000	0.000501	1.595	31522	0.0142	44.86	20.00
ครั้งที่ 2	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0146	45.87	21.57
ครั้งที่ 3	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0146	39.92	15.69
ค่าเฉลี่ย	90°	0.49346	0.000494	1.574	31110	0.0144	43.59	19.04

ตารางที่ ข.9 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0145	49.13	31.71
ครั้งที่ 2	30°	0.30864	0.000309	0.985	19458	0.0136	52.20	34.57
ครั้งที่ 3	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0157	45.09	32.93
ค่าเฉลี่ย	30°	0.30613	0.000307	0.977	19300	0.0146	48.83	33.06

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0136	48.74	20.59
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0134	51.74	23.53
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.37879	0.000380	1.208	23880	0.0127	53.93	28.79
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.37136	0.000372	1.185	23412	0.0132	51.52	24.25

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0101	60.52	11.11
ครั้งที่ 2	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0105	61.10	14.81
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0117	51.64	9.26
ค่าเฉลี่ย	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0108	57.87	11.68

ตารางที่ ข.10 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.29412	0.000295	0.938	18542	0.0174	38.97	27.06
ครั้งที่ 2	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0174	39.18	32.93
ครั้งที่ 3	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0171	40.03	32.93
ค่าเฉลี่ย	30°	0.30129	0.000302	0.961	18994	0.0173	39.38	30.96

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.35714	0.000358	1.139	22516	0.0151	43.03	17.14
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.35714	0.000358	1.139	22516	0.0160	42.55	20.00
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0148	46.26	25.00
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.36064	0.000361	1.150	22736	0.0153	43.96	20.67

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.50000	0.000501	1.595	31522	0.0122	52.54	20.00
ครั้งที่ 2	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0127	52.93	14.81
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0136	43.87	9.26
ค่าเฉลี่ย	90°	0.47531	0.000476	1.516	29965	0.0128	49.94	14.66

ตารางที่ ข.11 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของน้ำในระบบหมุนเวียน

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	30°	0.23148	0.000232	0.738	14593	0.0297
ครั้งที่ 2	30°	0.23148	0.000232	0.738	14593	0.0305
ครั้งที่ 3	30°	0.23148	0.000232	0.738	14593	0.0280
ค่าเฉลี่ย	30°	0.23148	0.000232	0.738	14593	0.0294

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.30864	0.000309	0.985	19458	0.0278
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.30120	0.000302	0.961	18989	0.0247
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.31250	0.000313	0.997	19701	0.0255
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.30745	0.000308	0.981	19383	0.0260

น้ำ	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction
ครั้งที่ 1	90°	0.41667	0.000418	1.329	26268	0.0213
ครั้งที่ 2	90°	0.40984	0.000411	1.307	25838	0.0268
ครั้งที่ 3	90°	0.41667	0.000418	1.329	26268	0.0231
ค่าเฉลี่ย	90°	0.41439	0.000415	1.322	26125	0.0237

ตารางที่ ข.12 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25253	0.000253	0.806	15920	0.0250	15.97	9.09
ครั้งที่ 2	30°	0.25253	0.000253	0.806	15920	0.0253	17.12	9.09
ครั้งที่ 3	30°	0.25000	0.000251	0.798	15761	0.0251	10.43	8.00
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25168	0.000252	0.803	15867	0.0251	14.61	8.73

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.34722	0.000348	1.108	21890	0.0223	19.65	12.50
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.32895	0.000330	1.049	20738	0.0213	13.64	9.21
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.34247	0.000343	1.092	21590	0.0201	21.24	9.59
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.33955	0.000340	1.083	21406	0.0213	18.26	10.44

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.47170	0.000473	1.505	29738	0.0161	24.34	13.21
ครั้งที่ 2	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0184	31.24	10.91
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0183	20.81	11.11
ค่าเฉลี่ย	90°	0.46307	0.000464	1.477	29194	0.0176	25.80	11.75

ตารางที่ ข.13 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25253	0.000253	0.806	15920	0.0232	21.89	9.09
ครั้งที่ 2	30°	0.25253	0.000253	0.806	15920	0.0260	14.82	9.09
ครั้งที่ 3	30°	0.25510	0.000256	0.814	16083	0.0245	12.75	10.20
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25338	0.000254	0.808	15974	0.0246	16.54	9.46

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.34247	0.000343	1.092	21590	0.0237	14.65	10.96
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.34247	0.000343	1.092	21590	0.0161	35.02	13.70
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.33784	0.000339	1.078	21298	0.0192	24.46	8.11
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.34092	0.000342	1.088	21493	0.0197	24.36	10.89

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0126	41.09	11.11
ครั้งที่ 2	90°	0.45455	0.000455	1.450	28656	0.0189	29.62	10.91
ครั้งที่ 3	90°	0.48077	0.000482	1.534	30309	0.0166	28.25	15.38
ค่าเฉลี่ย	90°	0.46609	0.000467	1.487	29384	0.0160	32.56	12.48

ตารางที่ ข.14 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25253	0.000253	0.806	15920	0.0204	31.36	9.09
ครั้งที่ 2	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0256	16.02	11.34
ครั้งที่ 3	30°	0.25510	0.000256	0.814	16083	0.0172	38.55	10.20
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25512	0.000256	0.814	16084	0.0211	28.21	10.21

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.35211	0.000353	1.123	22198	0.0188	32.28	14.08
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.35211	0.000353	1.123	22198	0.0195	20.97	16.90
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.32895	0.000330	1.049	20738	0.0137	46.34	5.26
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.34439	0.000345	1.099	21712	0.0175	32.66	12.02

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0134	36.95	17.65
ครั้งที่ 2	90°	0.48077	0.000482	1.534	30309	0.0136	49.39	17.31
ครั้งที่ 3	90°	0.47170	0.000473	1.505	29738	0.0137	40.72	13.21
ค่าเฉลี่ย	90°	0.48089	0.000482	1.534	30317	0.0136	42.78	16.05

ตารางที่ ข.15 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0206	30.69	11.34
ครั้งที่ 2	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0138	54.69	11.34
ครั้งที่ 3	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0206	26.56	11.34
ค่าเฉลี่ย	30°	0.25773	0.000258	0.822	16248	0.0183	37.68	11.34

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.35211	0.000353	1.123	22198	0.0181	34.89	14.08
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.34722	0.000348	1.108	21890	0.0130	47.32	15.28
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.34247	0.000343	1.092	21590	0.0136	46.74	9.59
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.34727	0.000348	1.108	21893	0.0149	42.58	12.95

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.50000	0.000501	1.595	31522	0.0108	49.49	20.00
ครั้งที่ 2	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0119	55.49	19.61
ครั้งที่ 3	90°	0.49020	0.000491	1.564	30904	0.0088	62.06	17.65
ค่าเฉลี่ย	90°	0.49346	0.000494	1.574	31110	0.0105	55.75	19.08

ตารางที่ ข.16 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบทวนเวียน

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0147	50.47	31.71
ครั้งที่ 2	30°	0.30864	0.000309	0.985	19458	0.0188	38.36	33.33
ครั้งที่ 3	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0200	28.59	31.71
ค่าเฉลี่ย	30°	0.30613	0.000307	0.977	19300	0.0179	39.30	32.25

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0096	65.36	19.12
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0116	53.01	22.06
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.37879	0.000380	1.208	23880	0.0125	50.95	21.21
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.37136	0.000372	1.185	23412	0.0113	56.67	20.79

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0079	62.69	11.11
ครั้งที่ 2	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0086	68.03	12.96
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0118	48.87	11.11
ค่าเฉลี่ย	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0094	60.16	11.72

ตารางที่ ข.17 ตารางแสดงผลการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	30°	0.29412	0.000295	0.938	18542	0.0137	53.76	27.06
ครั้งที่ 2	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0159	47.88	31.71
ครั้งที่ 3	30°	0.30488	0.000305	0.973	19221	0.0174	38.05	31.71
ค่าเฉลี่ย	30°	0.30129	0.000302	0.961	18994	0.0157	46.57	30.16

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	60° / BP30°	0.35714	0.000358	1.139	22516	0.0111	60.13	15.71
ครั้งที่ 2	60° / BP30°	0.35714	0.000358	1.139	22516	0.0104	58.03	18.57
ครั้งที่ 3	60° / BP30°	0.36765	0.000368	1.173	23178	0.0065	74.61	17.65
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	0.36064	0.000361	1.150	22736	0.0093	64.44	17.30

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	Mass flow rate [kg/s]	Flow rate [m ³ /s]	Velocity (m/s)	Re.No	Friction	DR%	Q%
ครั้งที่ 1	90°	0.50000	0.000501	1.595	31522	0.0082	61.70	20.00
ครั้งที่ 2	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0122	54.38	12.96
ครั้งที่ 3	90°	0.46296	0.000464	1.477	29187	0.0094	59.27	11.11
ค่าเฉลี่ย	90°	0.47531	0.000476	1.516	29965	0.0099	58.44	14.70



ตารางที่ ค.1 ตารางตัวอย่างผลการทดลองของน้ำในระบบเปิด

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	12.3	6.8	1.9	0.0	108.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	12.2	6.7	1.8	0.0	109.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	12.3	6.7	1.7	0.0	109.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	12.27	6.73	1.80	0.00	108.67	25.00

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	19.3	11.0	3.1	0.0	82.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	19.2	11.0	3.4	0.0	84.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	18.7	10.6	2.9	0.0	85.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	19.07	10.87	3.13	0.00	83.67	25.00

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	38.4	23.1	5.6	3.2	60.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	37.7	22.8	6.4	3.3	62.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	37.6	22.5	5.4	3.1	59.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	37.90	22.80	5.80	3.20	60.33	25.00

ตารางที่ ค.2 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 10 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	16.8	8.5	3.6	0.0	93.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	17.8	8.3	3.6	0.0	93.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	17.7	8.7	3.7	0.0	93.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	17.43	8.50	3.63	0.00	93.00	25.00

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	28.7	13.3	6.6	0.0	73.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	28.2	13.1	5.8	0.0	74.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	27.6	12.8	5.9	0.0	73.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	28.17	13.07	6.10	0.00	73.33	25.00

น้ำ + PAC 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	39.2	22.7	8.1	0.0	53.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	39.4	22.6	8.1	0.0	52.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	39.2	22.2	7.8	0.0	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	39.27	22.50	8.00	0.00	53.00	25.00

ตารางที่ ค.3 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 50 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	20.6	8.7	4.2	0.0	93.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	21.0	8.5	4.3	0.0	92.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	21.2	8.6	4.3	0.0	90.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	20.93	8.60	4.27	0.00	91.67	25.00

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	27.9	13.3	6.9	0.0	72.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	28.1	13.2	5.8	0.0	72.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	27.8	13.0	6.0	0.0	73.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	27.93	13.17	6.23	0.00	72.33	25.00

น้ำ + PAC 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	40.4	23.0	8.5	0.0	52.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	40.4	23.0	8.2	0.0	52.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	40.2	22.8	8.1	0.0	53.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	40.33	22.93	8.27	0.00	52.33	25.00

ตารางที่ ค.4 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAC 100 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	18.7	8.5	4.0	0.0	91.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	19.6	9.0	3.8	0.0	90.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	19.4	8.9	3.8	0.0	90.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	19.23	8.80	3.87	0.00	90.33	25.00

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60°/BP30°	29.1	13.3	6.0	0.0	72.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60°/BP30°	28.6	13.3	6.0	0.0	71.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60°/BP30°	28.6	13.2	6.1	0.0	73.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60°/BP30°	28.77	13.27	6.03	0.00	72.00	25.00

น้ำ + PAC 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	38.6	22.1	8.0	0.0	50.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	38.4	22.6	7.6	0.0	53.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	37.5	21.5	7.6	0.0	53.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	38.17	22.07	7.73	0.00	52.00	25.00

ตารางที่ ค.5 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	16.5	7.4	2.5	0.0	100.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	16.6	7.2	2.6	0.0	102.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	16.2	7.3	2.5	0.0	102.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	16.43	7.30	2.53	0.00	101.33	25.00

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	23.0	11.0	2.4	0.0	77.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	23.2	11.5	2.7	0.0	78.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	22.8	11.4	2.8	0.0	78.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	23.00	11.30	2.63	0.00	77.67	25.00

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	27.5	19.0	3.3	0.0	55.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	27.8	20.5	2.5	0.0	55.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	28.2	19.2	3.5	0.0	55.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	27.83	19.57	3.10	0.00	55.00	25.00

ตารางที่ ค.6 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	15.0	7.3	1.7	0.0	100.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	14.7	7.2	2.2	0.0	98.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	14.3	7.4	2.2	0.0	98.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	14.67	7.30	2.03	0.00	98.67	25.00

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	21.2	10.4	3.2	0.0	73.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	20.7	10.4	2.6	0.0	76.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	19.5	12.1	3.3	0.0	77.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	20.47	10.97	3.03	0.00	75.33	25.00

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	32.4	17.4	3.3	0.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	32.7	17.7	3.5	0.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	32.6	18.7	3.1	0.0	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	32.57	17.93	3.30	0.00	54.00	25.00

ตารางที่ ค.7 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	12.0	7.0	0.0	0.0	97.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	12.3	7.5	0.0	0.0	96.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	12.6	7.1	0.0	0.0	97.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	12.30	7.20	0.00	0.00	96.67	25.00

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	19.0	10.5	2.2	0.0	74.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	19.4	10.9	3.0	0.0	74.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	19.8	11.1	3.3	0.0	74.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	19.40	10.83	2.83	0.00	74.00	25.00

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	32.2	17.5	6.4	0.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	32.8	16.3	6.7	0.0	51.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	32.6	16.1	6.6	0.0	53.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	32.53	16.63	6.57	0.00	52.67	25.00

ตารางที่ ค.8 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	9.2	6.0	2.6	0.0	92.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	11.2	7.1	3.1	0.0	92.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	11.3	7.1	3.0	0.0	93.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	10.57	6.73	2.90	0.00	92.33	25.00

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	17.0	9.6	3.0	0.0	71.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	17.4	9.8	3.1	0.0	70.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	17.8	10.4	2.7	0.0	71.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	17.40	9.93	2.93	0.00	70.67	25.00

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	27.5	15.8	4.4	0.0	50.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	27.4	15.6	4.6	0.0	51.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	27.3	15.6	4.5	0.0	51.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	27.40	15.67	4.50	0.00	50.67	25.00

ตารางที่ ค.9 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	13.5	6.0	0.0	0.0	82.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	13.0	5.8	1.5	0.0	81.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	14.0	6.5	0.0	0.0	82.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	13.50	6.10	0.50	0.00	81.67	25.00

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	16.6	8.2	0.0	0.0	68.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	17.1	8.1	0.0	0.0	68.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	16.6	8.1	0.0	0.0	66.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	16.77	8.13	0.00	0.00	67.33	25.00

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	18.5	9.7	0.0	0.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	18.6	10.0	0.0	0.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	18.5	11.2	0.0	0.0	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	18.53	10.30	0.00	0.00	54.00	25.00

ตารางที่ ค.10 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบเปิด

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	13.7	6.7	0.0	0.0	85.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	13.4	7.2	0.0	0.0	82.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	13.9	7.1	0.0	0.0	82.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	13.67	7.00	0.00	0.00	83.00	25.00

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60°/BP30°	17.5	8.6	0.0	0.0	70.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60°/BP30°	17.1	9.1	0.0	0.0	70.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60°/BP30°	17.4	8.9	0.0	0.0	68.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60°/BP30°	17.33	8.87	0.00	0.00	69.33	25.00

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	22.8	13.6	6.3	0.0	50.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	22.6	14.1	6.1	2.0	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	25.6	15.1	6.1	2.1	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	23.67	14.27	6.17	1.37	52.67	25.00

ตารางที่ ค.11 ตารางตัวอย่างผลการทดลองของน้ำ ในระบบเปิด

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	28.4	23.3	17.8	16.2	108.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	22.2	16.9	11.2	9.6	108.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	20.2	14.1	8.3	7.4	108.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	23.60	18.10	12.43	11.07	108.00	25.00

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60°/BP30°	44.6	36.1	25.6	24.3	81.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60°/BP30°	28.6	20.1	11.2	10.1	83.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60°/BP30°	52.5	43.7	35.0	32.6	80.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60°/BP30°	41.90	33.30	23.93	22.33	81.33	25.00

น้ำ	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	111.5	97.5	83.0	81.0	60.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	98.9	84.8	68.2	64.7	61.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	109.4	96.0	79.9	78.1	60.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	106.60	92.77	77.03	74.60	60.33	25.00

ตารางที่ ค.12 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 10 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	42.3	33.0	27.4	25.9	99.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	31.8	22.2	17.2	15.0	99.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	21.1	10.6	5.1	3.6	100.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	31.73	21.93	16.57	14.83	99.33	25.00

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	44.1	34.5	23.2	22.5	72.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	62.4	55.2	46.6	44.9	76.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	35.1	23.4	14.3	12.9	73.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	47.20	37.70	28.03	26.77	73.67	25.00

น้ำ + PAM 10 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	124.5	111.5	98.0	95.5	53.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	112.5	100.5	85.7	83.5	55.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	102.5	88.5	73.5	71.0	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	113.17	100.17	85.73	83.33	54.00	25.00

ตารางที่ ค.13 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 30 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	18.3	8.9	4.3	2.3	99.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	29.3	20.0	15.1	12.6	99.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	41.1	31.9	26.2	24.8	98.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	29.57	20.27	15.20	13.23	98.67	25.00

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	46.4	35.5	25.2	23.1	73.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	72.6	66.7	60.3	58.3	73.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	67.4	58.2	50.9	48.4	74.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	62.13	53.47	45.47	43.27	73.33	25.00

น้ำ + PAM 30 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	120.0	104.5	93.5	92.5	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	132.7	114.5	98.2	97.1	55.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	115.2	99.2	84.6	82.1	52.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	122.63	106.07	92.10	90.57	53.67	25.00

ตารางที่ ค.14 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 50 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	28.5	22.2	18.0	16.4	99.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	16.5	12.1	6.5	4.5	97.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	10.0	5.0	2.0	0.0	98.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	18.33	13.10	8.83	6.97	98.00	25.00

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	43.0	33.1	24.8	22.7	71.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	33.5	23.9	15.6	13.1	71.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	57.9	50.1	45.1	43.5	76.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	44.80	35.70	28.50	26.43	72.67	25.00

น้ำ + PAM 50 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	136.5	120.0	110.5	105.6	51.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	125.2	108.0	97.3	94.0	52.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	115.0	97.0	86.5	83.4	53.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	125.57	108.33	98.10	94.33	52.00	25.00

ตารางที่ ค.15 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	16.9	10.8	5.7	4.7	97.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	10.4	4.1	1.5	0.0	97.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	15.9	9.8	4.7	3.7	97.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	14.40	8.23	3.97	2.80	97.00	25.00

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	30.6	23.2	15.4	13.2	71.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	39.4	38.4	33.3	31.4	72.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	33.1	27.7	22.4	20.6	73.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	34.37	29.77	23.70	21.73	72.00	25.00

น้ำ + PAM 100 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	114.5	104.0	93.7	92.0	50.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	108.5	98.2	87.3	85.4	51.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	93.6	82.0	74.2	72.6	51.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	105.53	94.73	85.07	83.33	50.67	25.00

ตารางที่ ค.16 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 150 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	41.5	33.5	29.6	27.4	82.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	34.1	26.1	19.7	18.1	81.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	23.4	15.9	9.8	7.6	82.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	33.00	25.17	19.70	17.70	81.67	25.00

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	33.7	26.2	21.3	20.4	68.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	24.1	16.5	11.6	9.5	68.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	66.4	58.5	52.3	50.5	66.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	41.40	33.73	28.40	26.80	67.33	25.00

น้ำ + PAM 150 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	91.1	85.4	77.2	77.8	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	81.0	76.4	68.3	68.2	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	76.4	69.1	61.4	57.8	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	82.83	76.97	68.97	67.93	54.00	25.00

ตารางที่ ค.17 ตารางแสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์ PAM 200 ppm ของระบบหมุนเวียน

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	30°	34.0	28.6	23.9	23.3	85.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	30°	26.9	21.0	15.8	14.4	82.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	30°	18.2	11.4	6.2	4.2	82.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	30°	26.37	20.33	15.30	13.97	83.00	25.00

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	60° / BP30°	30.5	26.9	22.8	20.6	70.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	60° / BP30°	25.7	16.9	12.1	11.0	70.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	60° / BP30°	54.1	47.6	44.6	43.7	68.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	60° / BP30°	36.77	30.47	26.50	25.10	69.33	25.00

น้ำ + PAM 200 ppm	Degree valve [°]	ความสูง h1 [cm]	ความสูง h2 [cm]	ความสูง h3 [cm]	ความสูง h4 [cm]	เวลา [s]	Mass (kg)
ทดสอบครั้งที่ 1	90°	96.1	89.5	80.6	80.4	50.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 2	90°	92.5	85.2	73.8	73.5	54.0	25.0
ทดสอบครั้งที่ 3	90°	82.5	73.4	65.1	64.4	54.0	25.0
ค่าเฉลี่ย	90°	90.37	82.70	73.17	72.77	52.67	25.00

ตารางที่ ค.18 ตารางแสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f ทางทฤษฎีของ Colebrook และ White ที่

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.000075$$

Re	f
3500	0.0416
4000	0.04
5000	0.0375
6000	0.0356
7000	0.0341
8000	0.0329
9000	0.0319
10000	0.031
11000	0.03
12000	0.0296
13000	0.029
14000	0.0284
15000	0.028
16000	0.0275
17000	0.0271
18000	0.0267
19000	0.0264
20000	0.0261
21000	0.0258
22000	0.0255
23000	0.0252
24000	0.025
25000	0.0247
26000	0.0245
27000	0.0243
28000	0.0241
29000	0.0239
30000	0.0237
31000	0.0235
32000	0.0234
33000	0.0232
34000	0.0231
35000	0.0229

ตารางที่ ค.19 ตารางแสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน f ทางทฤษฎีของ Virk asymptote ที่

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.000075$$

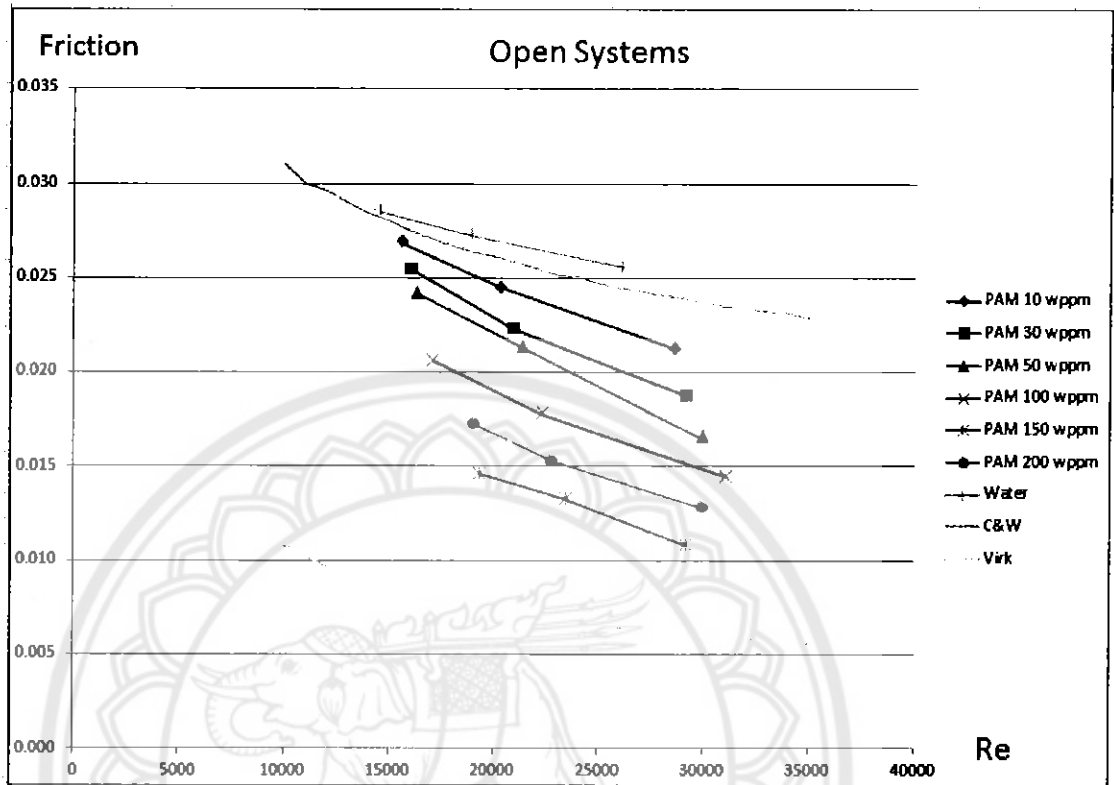
Re	f
3500	0.022026
4000	0.019933
5000	0.016984
6000	0.014990
7000	0.013540
8000	0.012432
9000	0.011554
10000	0.010837
11000	0.010240
12000	0.009732
13000	0.009296
14000	0.008914
15000	0.008578
16000	0.008280
17000	0.008012
18000	0.007770
19000	0.007550
20000	0.007349
21000	0.007165
22000	0.006996
23000	0.006838
24000	0.006693
25000	0.006557
26000	0.006429
27000	0.006310
28000	0.006198
29000	0.006093
30000	0.005994
31000	0.005899
32000	0.005810
33000	0.005726
34000	0.005645
35000	0.005568



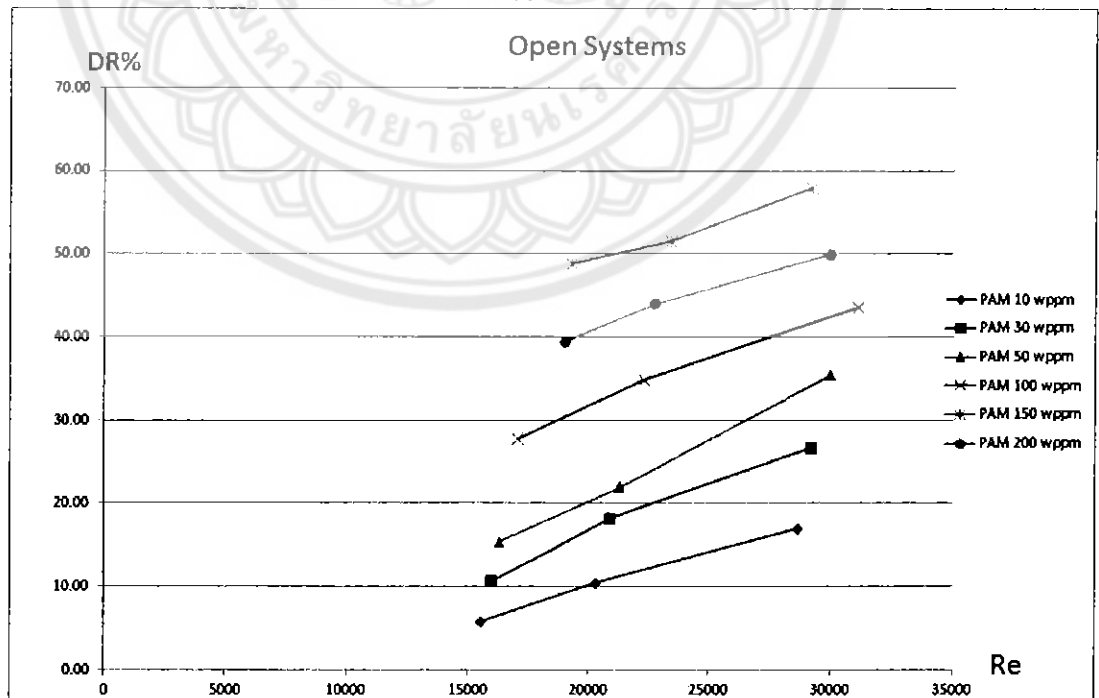
ภาคผนวก ง

กราฟแสดงผลการทดลองเพิ่มเติม

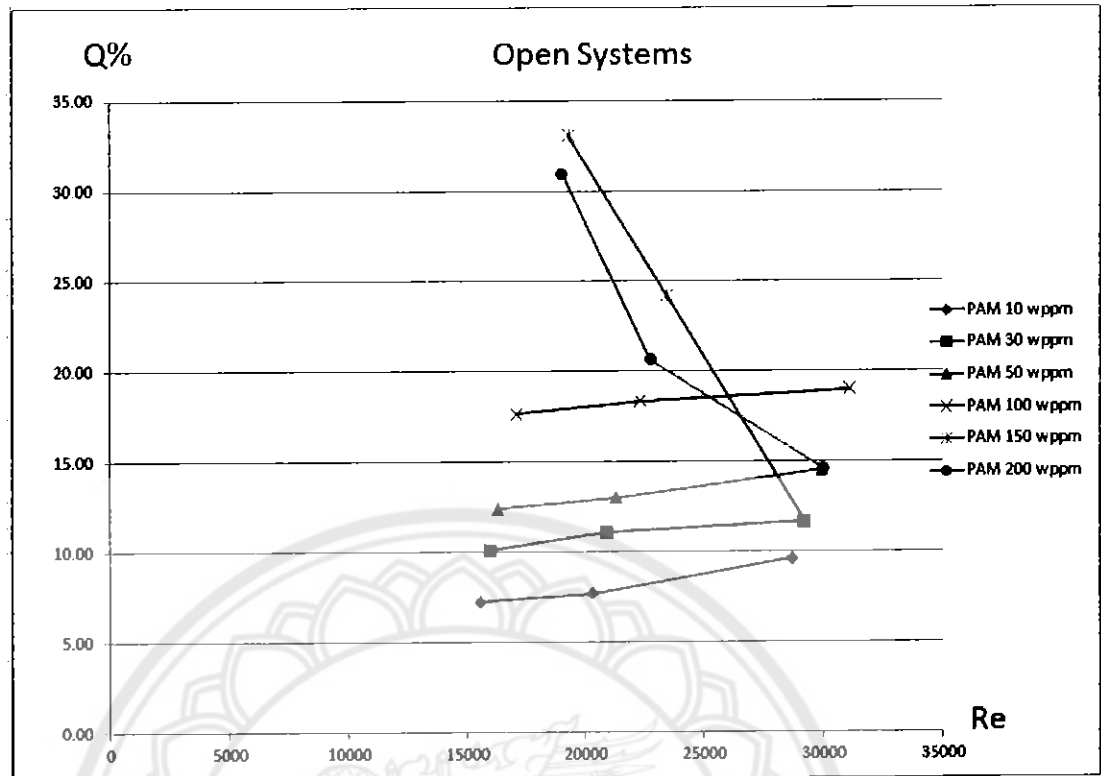
ง.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด



รูปที่ ง.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด



รูปที่ ง.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด



รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบเปิด

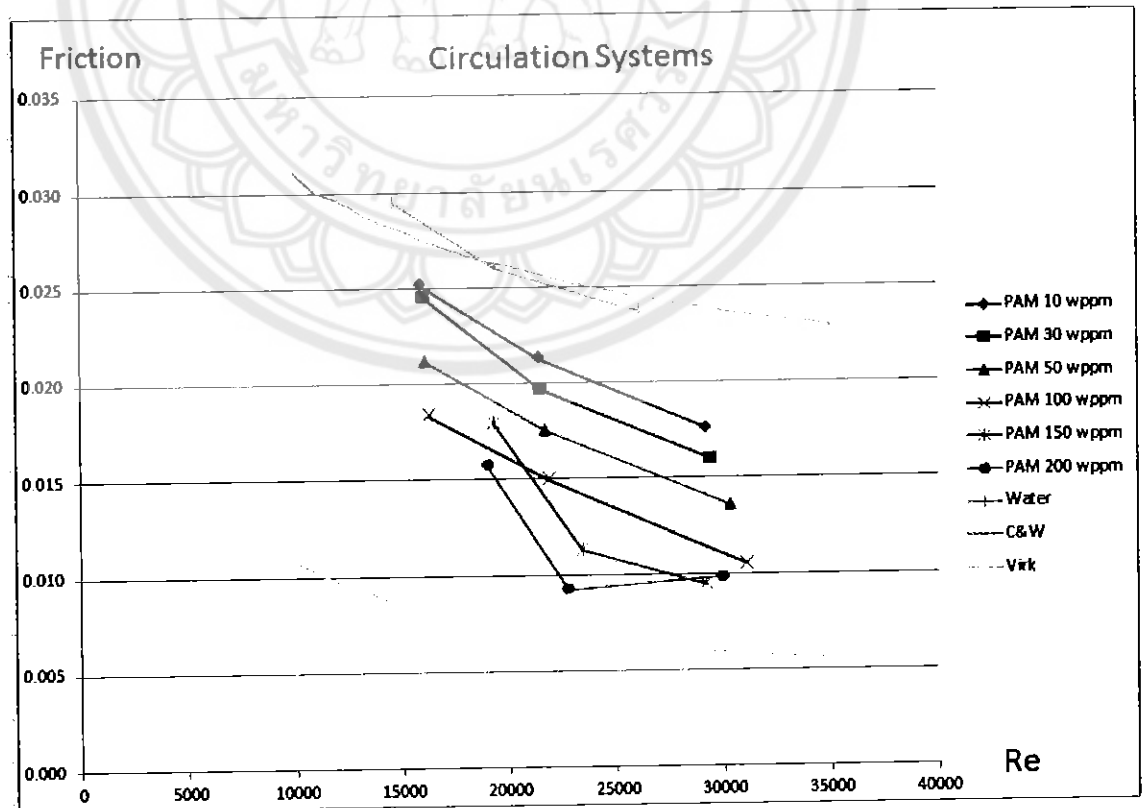
จากกราฟที่ 3.1 เป็นการทดลองการไหลในท่อในระบบเปิด ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) ของการไหลในท่อของน้ำเปล่า และน้ำที่ผสมด้วย Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm และจากการทดลองพบว่า การไหลในท่อของน้ำ ซึ่งการไหลของน้ำเปล่าพบว่า มีค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) อยู่ระหว่าง 15000-26000 และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ต่ำสุด 0.0249 สูงสุด 0.0279 ซึ่งเป็นไปตามเส้นกราฟของการไหลแบบนิวโทเนียนฟูอิด ซึ่งสูงกว่าเส้นกราฟของอ้างอิงเล็กน้อย เนื่องจากการทดลองอาจมีการคลาดเคลื่อน และเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ลงไปพบ การเติมสารพอลิเมอร์ลงไปเพื่อลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำที่สุดที่ลดได้ อยู่ที่การเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ค่าหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ 0.0144 และในส่วนของการเติม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm ค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) จะมีค่าที่แปรปรวนสูงต่ำสลับกันไม่สัมพันธ์กับความเข้มข้นที่สูงขึ้น จึงมีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ที่ 150 ppm ต่ำกว่า สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 200 ppm ลักษณะของน้ำที่ผสมในปริมาณความเข้มข้น 150, 200 ppm จะมีลักษณะที่หนืดและข้นไม่สม่ำเสมอ ซึ่งในการเติมสารในปริมาณดังกล่าวนี้การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานยังอยู่ในช่วงของ Polymeric Zone แต่เนื่องจากการไหลที่ไม่สม่ำเสมอทำให้กราฟเกิดการแกว่งของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ทำให้การเติมสารในปริมาณที่มากไม่เหมาะสำหรับการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และจากกราฟที่ 3.2 เป็นกราฟที่แสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) ของน้ำเทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) มีค่าสูงสุด คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR)

เท่ากับ 60% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นที่สูงขึ้น และจะมีความแปรปรวนไม่เสถียรเมื่อความเข้มข้นที่เติมลงในน้ำเกิน 100 ppm

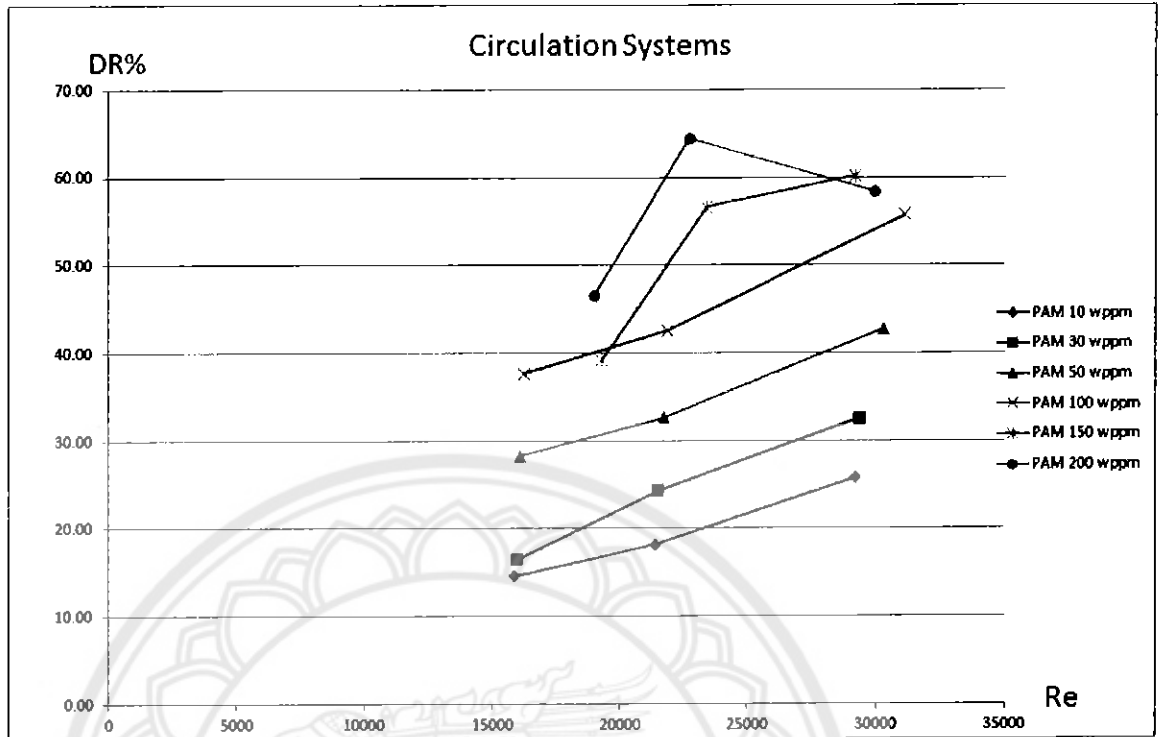
เนื่องจากระบบการไหลมีแรงเสียดทานที่ลดลงทำให้มีพลังงานจลน์ทางด้านขาออกเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังกราฟที่ ง.3 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) มีค่าสูงสุด และเสถียรที่สุดอยู่ที่ คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เท่ากับ 20% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเติมสารเพิ่มขึ้นด้วย และมีเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) จะมีค่าแปรปรวน เมื่อเติมสาร PAM เข้าไปที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm

จะเห็นได้ว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) และเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) เริ่มมีความไม่เสถียร แปรปรวนเนื่องจากเมื่อเติมสาร Poly Acrylamide (PAM) เข้าไปที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm น้ำจะกลายเป็น นอนนิวโทเนียนฟูอิด ความหนืดไม่คงที่ซึ่งทำให้การไหลไม่มีความต่อเนื่องและไม่สม่ำเสมอ จึงควรเลือกการเติมพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ppm ลงมาจะเหมาะสมกว่า เพราะน้ำยังคงสถานะความหนืดและไหลได้ตามปกติ และยังสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูง และยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้อีกด้วย

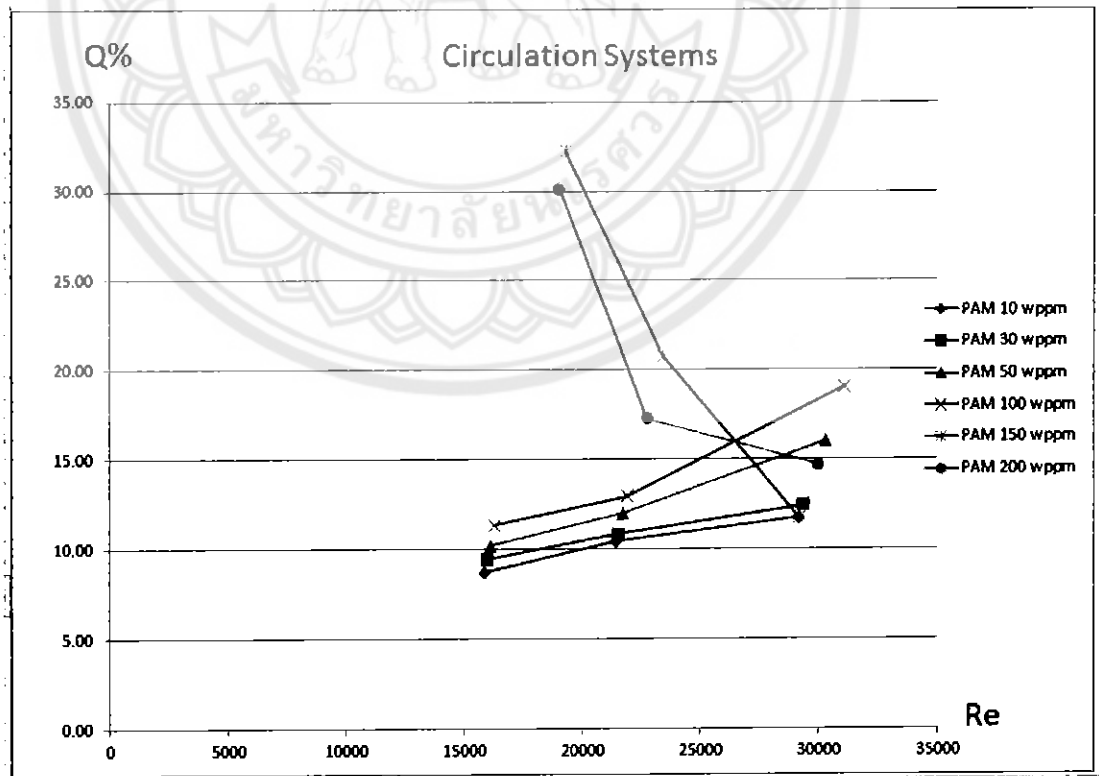
ง.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ ง.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %DR กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %Q กับ Re ของน้ำธรรมดา และน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ชนิด Poly Acrylamide (PAM) ความเข้มข้น 10, 50, 100, 150, 200 ppm ระบบหมุนเวียน

จากกราฟที่ ง.4 เป็นการทดลองการไหลในท่อในระบบหมุนเวียน ซึ่งกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) กับค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) ของการไหลในท่อของน้ำเปล่า และน้ำที่ผสมด้วย PAM ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 50, 100, 150, 200 ppm และจากการทดลองพบว่า การไหลในท่อในระบบหมุนเวียนของน้ำ ซึ่งการไหลของน้ำเปล่าพบว่า มีค่าเรย์โนลด์-นัมเบอร์ (Re) อยู่ระหว่าง 14000-26000 และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำสุด 0.0237 สูงสุด 0.0294 และเมื่อมีการเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ลงไปพบว่าการเติมสารพอลิเมอร์ลงไปสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ต่ำที่สุด อยู่ที่ยังการเติมสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 100 ppm ค่าของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานได้ 0.0104 และในส่วนของการเติมน้ำที่มีเติม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm Re จะมีค่าที่แปรปรวนสูงต่ำสลับกันไม่สัมพันธ์กับความเข้มข้นที่สูงขึ้น จึงมีผลทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 150 ppm ต่ำกว่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ 200 ppm ลักษณะของน้ำที่ผสมในปริมาณความเข้มข้น 150, 200 ppm จะมีลักษณะที่หนืด และข้นไม่สม่ำเสมอ และจากกราฟที่ ง.5 เป็นกราฟที่แสดงการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) ของน้ำเทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) มีค่าสูงสุดและเสถียรไม่แปรปรวน คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์การลดของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) เท่ากับ 55.75% ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดของค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเข้มข้นที่สูงขึ้น และจะมีความแปรปรวนไม่เสถียรเมื่อความเข้มข้นที่เติมลงในน้ำเกิน 100 ppm

เนื่องจากระบบการไหลมีแรงเสียดทานที่ลดลงทำให้มีพลังงานจลน์ทางด้านขาออกเพิ่มขึ้น ความเร็วในการไหลเพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากอัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงได้ดังกราฟที่ ง.6 เป็นกราฟแสดงเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เทียบกับน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้น 10, 30, 50, 100, 150, 200 ppm พบว่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) มีค่าสูงสุดและเสถียรที่สุดอยู่ที่ คือน้ำที่ผสม Poly Acrylamide (PAM) ที่ 100 ppm ได้เปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เท่ากับ 19.08% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของการเติมสารเพิ่มขึ้นด้วย และมีเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) จะมีค่าแปรปรวนเมื่อเติมสาร Poly Acrylamide (PAM) เข้าไปที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm

จากการทดลองการไหลในระบบหมุนเวียนพบว่าเปอร์เซ็นต์การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (%DR) และค่าเปอร์เซ็นต์ของการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลของน้ำ (%Q) เมื่อเทียบกับระบบเปิดมีแนวโน้มต่างๆที่คล้ายกัน และเมื่อมีการเติมสาร Poly Acrylamide (PAM) เข้าไปที่ความเข้มข้น 150, 200 ppm น้ำในระบบหมุนเวียนก็จะเกิดความไม่เสถียรเหมือนกัน และสามารถสรุปได้ว่าไม่ว่าการไหลในระบบแบบหมุนเวียน หรือระบบเปิด Poly Acrylamide (PAM) สามารถลดค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน และสามารถเพิ่มอัตราการไหลได้ ควรเลือกการเติมพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) ที่ความเข้มข้นต่ำกว่า 100 ppm ลงมาจะเหมาะสมกว่า เพราะน้ำยังคงสถานะความหนืด และไหลได้ตามปกติ และยังสามารถลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ได้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูง และยังสามารถช่วยเพิ่มอัตราการไหลได้อีกด้วย



ภาคผนวก จ
ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัด และเครื่องมือวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดและเครื่องมือวัด

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตลับเมตรขนาดความยาว 5 เมตร

สายวัด ขนาดความยาว 1 เมตร

เครื่องชั่งสารดิจิตอล

นาฬิกาจับเวลา

เครื่องชั่งน้ำหนักของน้ำ

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะโดยใช้ตลับเมตร (steel tape 0-5000 mm)

ค่าความคลาดเคลื่อนจากตลับเมตร (u_0) ± 0.35 mm

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการอ่าน จากตลับเมตร (u_c) ± 0.5 mm

ค่าความคลาดเคลื่อนรวมจากการใช้ตลับเมตร (u_d) ± 0.61 mm

ตัวแปรในการทดลองที่ใช้ตลับเมตรในการวัด

- ความยาวท่อ (L)
- เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D)

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะโดยใช้สายวัด (Tape measure 0-1000 mm)

ค่าความคลาดเคลื่อนจากสายวัด (u_0) ± 0.08 mm

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าจากสายวัด (u_c) ± 5 mm

ค่าความคลาดเคลื่อนรวมจากการใช้สายวัด (u_d) ± 5 mm

ตัวแปรในการทดลองที่ใช้สายวัดในการวัด

- ความสูงของระดับน้ำในमानอร์มิเตอร์ (h)

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการใช้เครื่องชั่งสารดิจิตอล

ค่าความคลาดเคลื่อนจากเครื่องชั่งดิจิตอล (u_0) ± 0.005 g

ค่าความคลาดเคลื่อนจากการตวงสาร (u_c) ± 0.05 g

ค่าความคลาดเคลื่อนรวมจากการใช้เครื่องชั่งสาร (u_d) ± 0.05 g

ตัวแปรในการทดลองที่ใช้เครื่องชั่งสารดิจิตอลในการใช้ชั่ง

- น้ำหนักของโพลิเมอร์ที่เติมลงในน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง

**เครื่องชั่งน้ำหนักน้ำไม่คิดค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการกำหนดน้ำหนักของน้ำให้คงที่ตลอดการทดลอง

***นาฬิกาจับเวลาไม่คำนวณค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการมีค่าน้อยมาก

จากค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดนี้ทำให้สามารถหาความเคลื่อนในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$\text{จาก } f = \frac{h_f 2gD}{LV^2}$$

$$u_f = \left(\frac{\partial f}{\partial h_f} \times u_{d@Tape} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial D} \times u_{d@Tape\ measure} \right) + \left(\frac{\partial f}{\partial L} \times u_{d@Tape\ measure} \right)$$

$$u_f = \pm \left[\frac{2gD}{LV^2} (0.61 \times 10^{-3}) + \frac{h_f 2g}{LV^2} (5 \times 10^{-3}) - \frac{h_f 2gD}{L^2 V^2} (0.61 \times 10^{-3}) \right]$$





ตัวอย่างการคำนวณ การตวงสารพอลิเมอร์

$$D = 58 \text{ cm}$$

$$h = 80 \text{ cm}$$

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h = \frac{\pi}{4} (0.58)^2 (0.80) = 0.211 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{water}} = \rho V = 1000 \times 0.211 = 211 \text{ kg}$$

$$10 \text{ ppm} \rightarrow 10 \times 0.211 = 2.11 \text{ g}$$

$$30 \text{ ppm} \rightarrow 30 \times 0.211 = 6.33 \text{ g}$$

$$50 \text{ ppm} \rightarrow 50 \times 0.211 = 10.55 \text{ g}$$

$$100 \text{ ppm} \rightarrow 100 \times 0.211 = 21.14 \text{ g}$$

