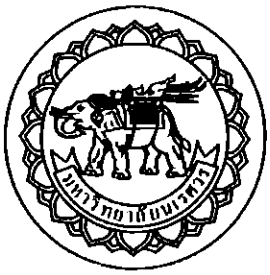


การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการปั๊มน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

Water Pumping Enhancement By Means Of Polymer Addition

นาย หิรัญ มาคำ

นาย ชาญวิทย์ ภูจอม

นายภูมิต กิตติชัยยะ

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2553

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ 24 มิ.ย. 2554
เลขทะเบียน 1551080
เลขเรียกหนังสือ ว.ร. ท566 ก 2553
มหาวิทยาลัยนเรศวร

ใบรับรองโครงงาน

หัวข้อโครงงาน : **การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการปั๊มน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์**

ผู้ดำเนินโครงงาน : 1. นาย หิรัญ มาคำ รหัสนิสิต 50362856

2. นาย ชาญวิทย์ ภูจอม รหัสนิสิต 50364041

3. นาย ภูษิต กิตติชัยยะ รหัสนิสิต 50364157

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2553

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้โครงงานนี้เป็นส่**วนหนึ่งของการศึกษา**
ข้อมูลตามหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะกรรมการการสอบโครงงาน

.....**ประธานกรรมการ**

(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

.....**กรรมการ**

(รศ.ดร.มัทนี สงวนเสริมศรี)

.....**กรรมการ**

(ผศ.ดร.ปิยะนันท์ เจริญสวรรค์)

หัวข้อโครงงาน : การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการปั๊มน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

ผู้ดำเนินโครงงาน : นาย หิรัญ มาคำ รหัสนิสิต 50362856

นาย ชาญวิทย์ ภูจอม รหัสนิสิต 50364041

นาย ภูษิต กิตติชัยยะ รหัสนิสิต 50364157

อาจารย์ที่ปรึกษา : ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว

ภาควิชา : วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา : 2553

.....

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก การลดการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้น กับเครื่องจักรหรือระบบเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถจะใช้พลังงานที่มีอยู่ได้คุ้มค่าขึ้น จากการศึกษาพบว่าสารละลายพอลิเมอร์บางชนิดมีคุณสมบัติสามารถลดการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำได้ คณะผู้จัดทำโครงงานจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและทดลองเพื่อเป็นแนวทางในพัฒนาระบบการปั๊มน้ำและการตกตะกอนหรือการบำบัดน้ำโดยการออกแบบจำลองระบบการปั๊มน้ำและการกรองผ่านท่อระบายน้ำโดยจะทำการสังเกตลักษณะของแรงเสียดทานภายในท่อเรียบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง3/4นิ้วและการเพิ่มของอัตราการไหลที่เป็นผลมาจากการเติมสารพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆในช่วงการไหลแบบปั่นป่วนรวมทั้งให้มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคและวิธีการที่แตกต่างกันออกไป

ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ จากการศึกษาและทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide ที่เหมาะสมคือประมาณ 100ppm ซึ่งถ้าหากมากเกินกว่านี้ความสามารถในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อและการเพิ่มอัตราการไหลจะลดลง ซึ่งจากการทดลองจะทำให้สามารถลดใช้พลังงานสูงสุดเนื่องมาจากการสูญเสียในส่วนของการสูญเสียหลักจากการไหลภายในท่อได้ 9.22%

Project Title : Water pumping enhancement by means of polymer addition

Name : Mr. Hiran MaCome Code 50362856

Mr. Chanwit Poojom Code 50364041

Mr. Poosit Kittchaiya Code 50364157

Project advisor : Dr. Ananchai U-kaew

Department : Mechanical Engineering

Academic year : 2010

.....

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 and sedimentation or by design, water treatment systems to water pumping and filtering through a drainage pipe 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 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 100ppm. That if more rather than the ability to reduce friction as the flow inside the pipe and increase the flow rate will decrease. Which from the experiment will reduce the maximum power due to a loss in the loss of two main parts of the flow inside the pipe was 9.22%.

กิตติกรรมประกาศ

(Acknowledgement)

จากการที่รายวิชาโครงงานทางวิศวกรรมเครื่องกลบรรจุในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต มหาวิทยาลัยนเรศวร จึงได้จัดทำโครงงานเรื่อง "การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการปั๊มน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์" ในระหว่างการปฏิบัติงานนั้นทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าได้รับความรู้และประสบการณ์ในด้านต่างๆมากและปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือและความอนุเคราะห์จาก

- ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานที่ให้ความช่วยเหลือเกี่ยวกับข้อมูล การทำโครงงาน และคำแนะนำตลอดการทำโครงงานให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี
- กรรมการและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้ตลอดจนคำแนะนำ

และบุคคลท่านอื่นๆที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบคุณบิดา มารดา ที่คอยช่วยเหลือสนับสนุนและเป็นกำลังใจในการทำโครงงานทางวิศวกรรมจนสำเร็จ

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
ใบรับรองโครงงาน	ก
บทคัดย่อ	ข
Abstract	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ซ
สารบัญรูปภาพ	ฌ
ลำดับสัญลักษณ์	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน	2
1.5 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.7 งบประมาณ	5

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 การไหลในท่อ 6

2.2 สารละลายพอลิเมอร์ 12

2.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ 16

2.4 ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 17

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 การศึกษาและออกแบบระบบจำลองการปั๊มน้ำ 18

3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล 20

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้ 21

3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล 23

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 50 ppm 24

4.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 100 ppm 25

4.3 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 200 ppm 27

4.4 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 300 ppm 28

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปโครงงานและข้อเสนอแนะ	35
5.1 สรุปผล	35
5.2 ข้อเสนอแนะ	36
บรรณานุกรม	37
ภาคผนวก	38
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	39
ภาคผนวก ข ตัวอย่างข้อมูลการทดลอง	41
ภาคผนวก ค แบบการนำเสนอโครงงานนิสิต	59
ประวัติผู้ทำโครงงาน	66

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน 3

ตาราง 2.1 ความขรุขระสัมบูรณ์ e ของท่อใหม่ 8

ตาราง 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 20

ตาราง ข.1ตัวอย่างผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของPAM 41

ตาราง ข.2 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.125 kg/s 41

ตาราง ข.3 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.19 kg/s 42

ตาราง ข.4 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.252 kg/s 42

ตาราง ข.5 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.3 kg/s 43

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$ 43

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูป 2.1 Moody Diagram 8

รูป 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของน้ำ 10

รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของของเหลวต่าง ๆ 10

รูป2.4 แผนภูมิแสดงเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลและช่วงของการลดแรง 11
เสียดทาน

รูป 2.5 Poly Acrylamide 12

รูป 2.6 Poly Aluminum Chloride 13

รูป 2.7 Polyethylene glycol 14

รูป 2.8 Guargum 15

รูป 3.1 การจำลองระบบการปั๊มน้ำ 17

รูป 3.2 ปั๊มน้ำ 21

รูป 3.3 ปั๊มปล่อยสารเคมี 21

กราฟ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติม 24
สารละลายพอลิเมอร์ 50 ppm

กราฟ 4.2 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 50 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ 25

กราฟ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติม 25
สารละลายพอลิเมอร์ 100 ppm

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้า

กราฟ 4.4 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 100 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ 26

กราฟ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติม สารละลายพอลิเมอร์ 200 ppm 27

กราฟ 4.6 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 200 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ 27

กราฟ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติม สารละลายพอลิเมอร์ 300 ppm 28

กราฟ 4.8 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 300 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ 28

ลำดับสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
h_f	การสูญเสียแรงดัน	m
f	สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน	-
L	ความยาวท่อ	m
D	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ	m
V	ความเร็วของการไหลเฉลี่ยผ่านท่อ	m/s
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
P_1	ความดันที่จุดที่ 1	N/m^2
P_2	ความดันที่จุดที่ 2	N/m^2
γ	น้ำหนักจำเพาะ	N/m^3
Z_1	ความสูงระดับน้ำในมานอมิเตอร์ที่จุดที่ 1	m
Z_2	ความสูงระดับน้ำในมานอมิเตอร์ที่จุดที่ 2	m
Re	Reynolds Number	-
e	สัมประสิทธิ์ความขรุขระ	m
ρ	ความหนาแน่นของน้ำ	kg/m^3
μ	ความหนืดของน้ำ	Ns/m^2
%DR	เปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลในท่อ	%
f_w	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกรณีที่ไม่เติมสารละลายพอลิเมอร์	-
f_p	ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานกรณีที่เติมสารละลายพอลิเมอร์	-
$\%Q$	เปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล	%
Q_w	อัตราการไหลของน้ำธรรมดา	N-m/s
W_p	อัตราการไหลของน้ำที่เติมสารละลายพอลิเมอร์	N-m/s
H_{pump}	ความสูงจากปั๊มถึงระดับการไหล	*m*

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปัญหาพลังงานเป็นเป็นปัญหาที่สำคัญของโลก ประเทศไทยก็เป็นประเทศที่ต้องการพลังงานปริมาณมากเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนในการพัฒนาประเทศ แต่แหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถใช้เป็นพลังงานในประเทศไทยนั้นมีอยู่อย่างจำกัดและปริมาณน้อย การใช้พลังงานให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดถือว่ามีความจำเป็นอย่างมาก การลดการสูญเสียต่างๆที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรหรือระบบเป็นสาเหตุสำคัญที่สามารถจะใช้พลังงานที่มีอยู่ได้คุ้มค่าขึ้น

ในระบบการปั๊มน้ำมีการสูญเสียเกิดขึ้นแบ่งเป็นการสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง การสูญเสียหลักเกิดจากการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำเป็นส่วนมาก ส่วนการสูญเสียรองเกิดมาจากอุปกรณ์ต่างๆของระบบ การที่สามารถลดการสูญเสียเหล่านี้ให้เหลือน้อยที่สุดจะทำประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น จากการศึกษาพบว่าสารละลายพอลิเมอร์บางชนิดมีคุณสมบัติสามารถการเสียดทานระหว่างผนังท่อและน้ำได้ และยังสามารถทำให้ตะกอนต่างๆจับตัวได้ง่ายขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อกระบวนการตกตะกอนหรือการบำบัดน้ำเสีย โดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์ในปริมาณในอัตราส่วนที่น้อยมาก

จากปัญหาข้างต้นทางคณะผู้จัดทำโครงงานจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาและทดลองเพื่อเป็นแนวทางในพัฒนาระบบการปั๊มน้ำและการตกตะกอนหรือการบำบัดน้ำโดยการออกแบบจำลองระบบการปั๊มน้ำและการกรองผ่านท่อระบายน้ำโดยจะทำการสังเกตลักษณะของแรงเสียดทานภายในท่อเรียบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง3/4นิ้วและการเพิ่มของอัตราการไหลที่เป็นผลมาจากการเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่ความเข้มข้นต่างๆ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของการใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีผลต่อแรงเสียดทานภายในท่อและอัตราการไหล

1.3 ขอบเขต

1.3.1 เป็นการไหลภายในท่อ PVC 3/4นิ้ว

1.3.2ใช้น้ำประปาในการทดลองอุณหภูมิน้ำประมาณ 20-30 °C

1.3.3 เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่มีRe ประมาณ 9000-30000

1.3.4 เป็นการไหลในระบบเปิด

1.4 ขั้นตอนดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษารายละเอียดของระบบการปั๊มน้ำและสารละลายพอลิเมอร์ที่ต้องการใช้ในระบบการปั๊มน้ำ

1.4.2 วิเคราะห์และออกแบบจำลองการทำงานของระบบการปั๊มน้ำ

1.4.3 ทำการทดลองโดยใช้ละลายสารพอลิเมอร์แต่ละชนิดเติมลงในระบบการปั๊มน้ำ

1.4.4 ศึกษาผลกระทบจากการใช้ละลายสารพอลิเมอร์ที่มีผลกระทบต่ออัตราการไหลภายในท่อ

1.4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

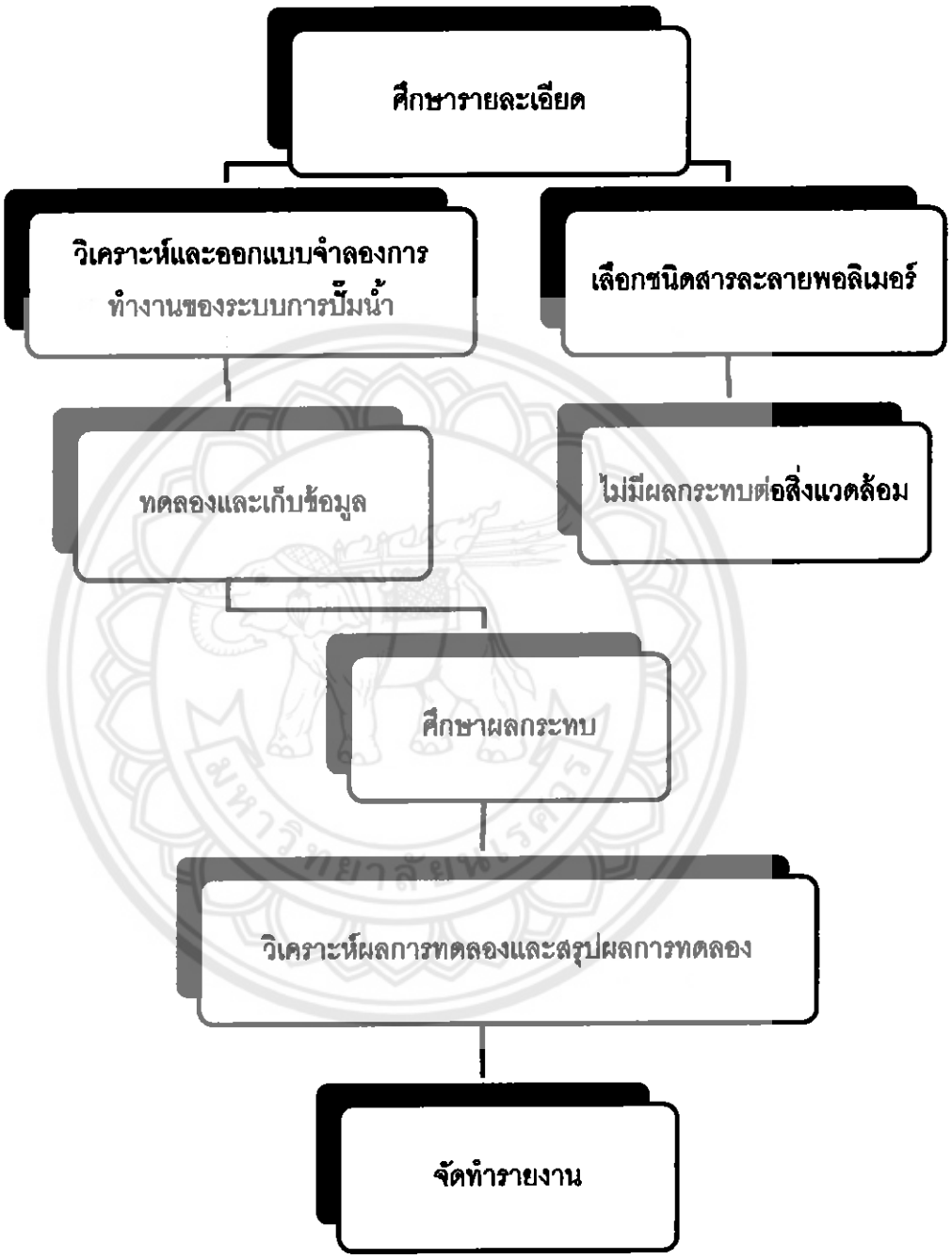
1.4.6 จัดทำรายงาน

1.5 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

ตาราง 1.1 ระยะเวลาและแผนการปฏิบัติงาน

กิจกรรม	2553							2554			
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1.ศึกษาข้อมูล											
2.เสนอโครงงาน											
3.วิเคราะห์และออกแบบ											
4.ดำเนินการสร้างแบบจำลอง											
5.ทำการทดลองเก็บข้อมูล											
5.วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง											
6.จัดทำรายงาน											

แผนการดำเนินงาน



1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 สามารถลดการสูญเสียความดันในท่อน้ำได้

1.6.2 ได้เรียนคุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์

1.7 งบประมาณ

1.7.1 ค่าถ่ายเอกสารและค่าเข้าเล่ม 1000 บาท

1.7.2 ค่าวัสดุ 2000 บาท

รวมทั้งหมดประมาณ 3000 บาท

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

ในโครงงานนี้เป็นการทดลองเกี่ยวกับการลดการสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อในกรณีการไหลแบบปั่นป่วนโดยการใช้สารละลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆเติมหรือฉีดเข้าไปในท่อ โดยใช้ทฤษฎีการไหลในท่อแบบปั่นป่วนและคุณสมบัติของสารละลายพอลิเมอร์

2.1 การไหลในท่อ

การไหลของน้ำในท่อจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเสมอ เนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวและเนื่องจากแรงหนืดของของเหลวเอง การสูญเสียแรงดัน (Head Loss) จะสามารถเขียนเป็นสมการซึ่งเรียกว่า สมการของ Darcy-Weisbach ได้ดังนี้

$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \qquad (2.1)$$

เมื่อ

f = สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor)

L = ความยาวท่อ

D = เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

v = ความเร็วของการไหลเฉลี่ยผ่านท่อ

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s^2

หรือคิดจากสมการพลังงานจะได้;

$$h_f = \frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} + (z_1 - z_2) \tag{2.2}$$

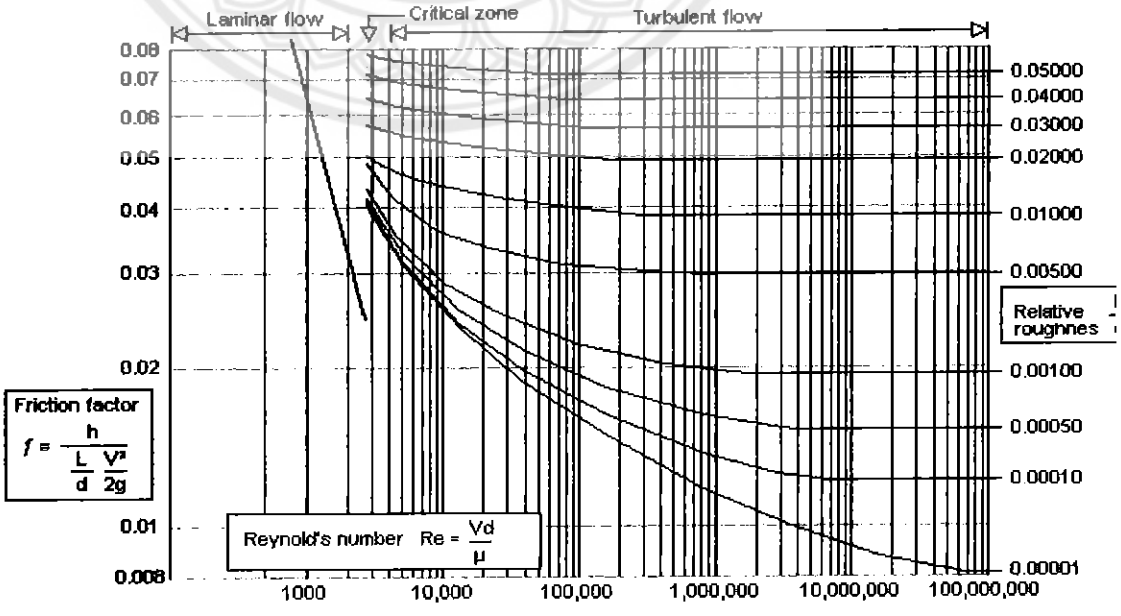
โดยที่ $(P_1 - P_2)$ คือความดันตกจากจุดที่ 1 ไป 2 (N/m^2) และ $(z_1 - z_2)$ คือ ความต่างระดับของจุดที่ 1 และ 2 (m) ส่วน γ คือ น้ำหนักจำเพาะ (N/m^3)

ในการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ค่า f อาจจะประมาณได้ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right] \tag{2.3}$$

เมื่อ e/D = Relative Roughness

ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor), Reynolds Number และ Relative Roughness สามารถนำมาเขียนเป็นแผนภูมิเรียกว่า Moody Diagram ดังรูป 2.1 และในการใช้แผนภูมินี้ให้หาค่า e จากตารางที่ 3.1



รูป 2.1 Moody Diagram

ตารางที่ 2.1 ความขรุขระสัมบูรณ์ e ของท่อใหม่

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

ค่า Reynolds Number นี้สามารถหาได้จาก

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{2.4}$$

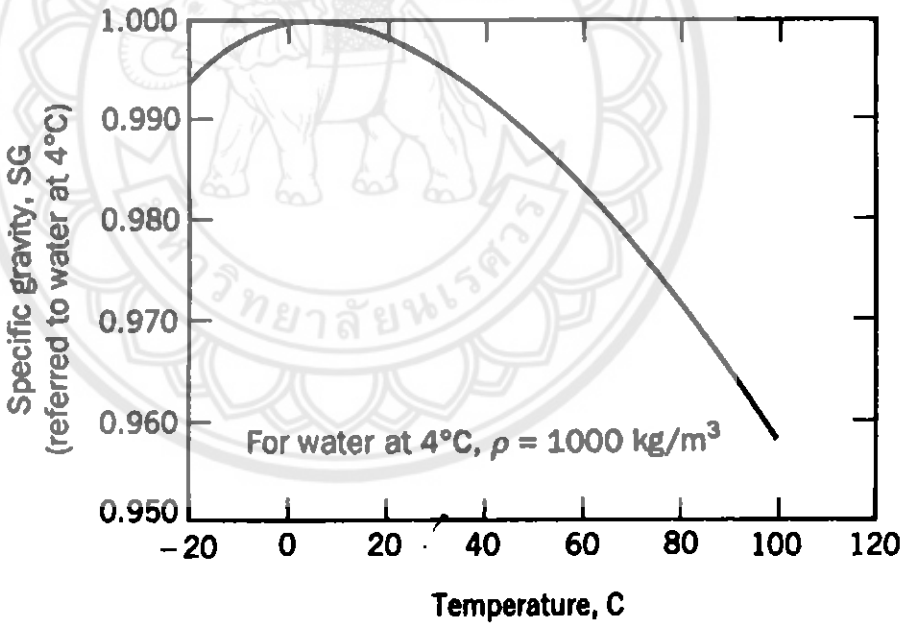
เมื่อ

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ (Water Density) ตามภาพที่ 1.4

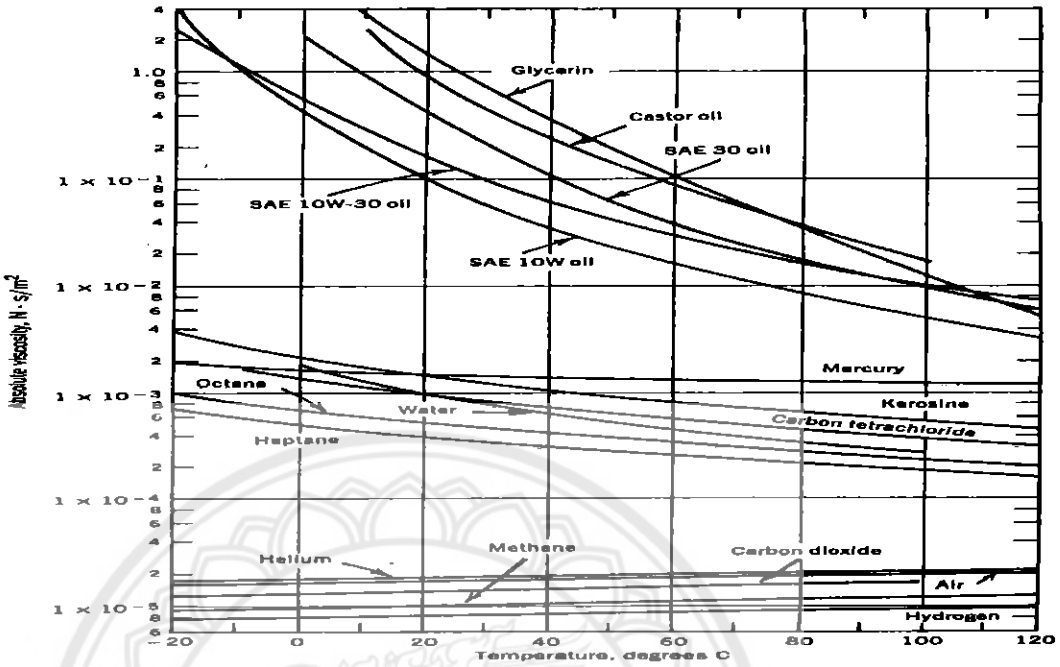
= 997 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ 25°C

μ = ความหนืดของน้ำ (Absolute Dynamic Viscosity)

= 8.94x10^{-4} Ns/m^2 ที่อุณหภูมิ 25°C ตามภาพที่ 1.5



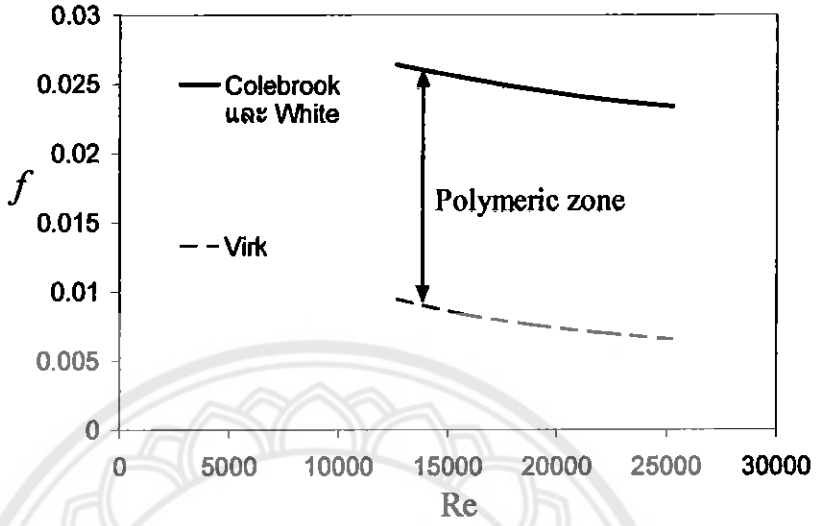
รูป 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับอุณหภูมิของน้ำ



รูป 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิของของเหลวต่าง ๆ

เมื่อมีการฉีดหรือเติมสารละลายพอลิเมอร์บางจำพวกที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่ยาวเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 100 ในล้านส่วนโดยน้ำหนัก) ลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูกลดลงได้อย่างมาก การลดแรงเสียดทานในการไหลแบบปั่นป่วนนี้จะมีลักษณะเฉพาะที่น่าสนใจอยู่ จะพบว่าการลดแรงเสียดทานโดยการเติมสารพอลิเมอร์ในการไหลแบบปั่นป่วนในท่อแนวราบนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re และจะตกอยู่ในช่วงที่เรียกว่า polymeric zone ซึ่งอยู่ระหว่างเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (f) สองเส้นคือ เส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของของไหล นิวโทเนียน ตามกฎของ Prandtl-Von Karman ซึ่งหาค่าได้จากสมการความสัมพันธ์ของ Colebrook and White ดังแสดงในสมการที่ 2.3 ซึ่งเป็นลิมิตบน (upper limit) และเส้นการลดสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสูงสุดของ Virk เรียกว่า Virk asymptote ซึ่งเป็นลิมิตล่าง (lower limit) แสดงเป็นสมการความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{2}{\sqrt{f}} = 19.0 \log\left(\frac{1}{2}\mathrm{Re}\sqrt{f}\right) - 32.4 \qquad (2.5)$$



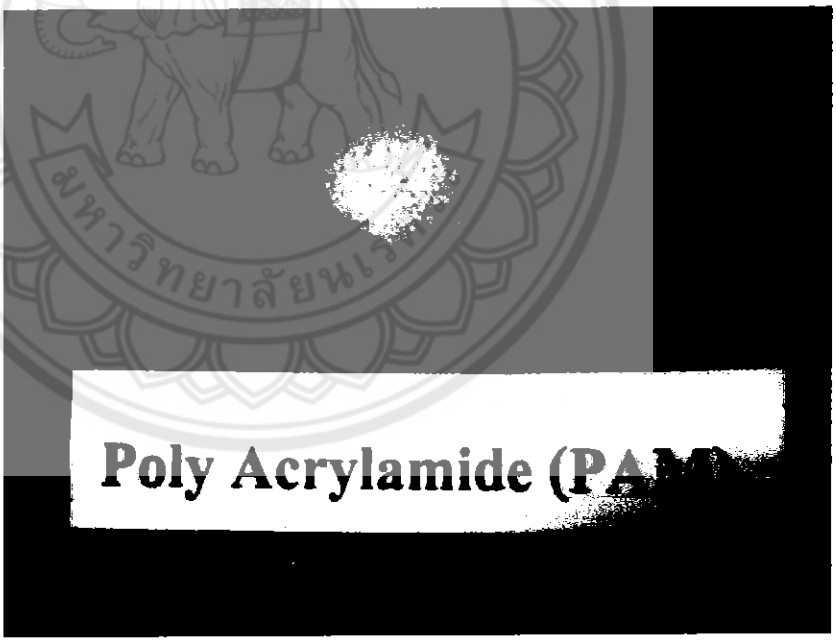
รูป2.4 แผนภูมิแสดงเส้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการไหลและช่วงของการลดแรงเสียดทาน

2.2 สารละลายพอลิเมอร์

เมื่อมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์บางจำพวกที่มีลักษณะเป็นลูกโซ่เพียงเล็กน้อยลงในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนของน้ำ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นที่ผนังท่อจะถูกลดลงได้อย่างมาก ซึ่งเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของสารพอลิเมอร์ที่มีลักษณะเป็นสายโซ่กิ่งก้านและมีประจุเป็นบวกซึ่งสามารถจับตัวกับอนุภาคที่มีประจุเป็นลบที่ปะปนมากันน้ำทำให้โมเลกุลเรียงตัวกันเป็นระเบียบมากขึ้นและแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลง ทำให้ความต้านทานการไหลลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสูบน้ำเพิ่มมากขึ้นหรือมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนไปกับแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผนังท่อ (Reduction of drag) น้อยมากและนำพลังงานที่เหลือมาใช้ในการสูบน้ำได้ระยะทางที่ไกลขึ้น (Reuse of energy) สำหรับการศึกษาและทดลองของโครงงานนี้ได้เลือกสารพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM), Poly Aluminum Chloride (PAC), Poly Ethylene Glycol (PEG) และ Guargum เป็นสารพอลิเมอร์ในการทดลอง

2.2.1 Poly Acrylamide (PAM)

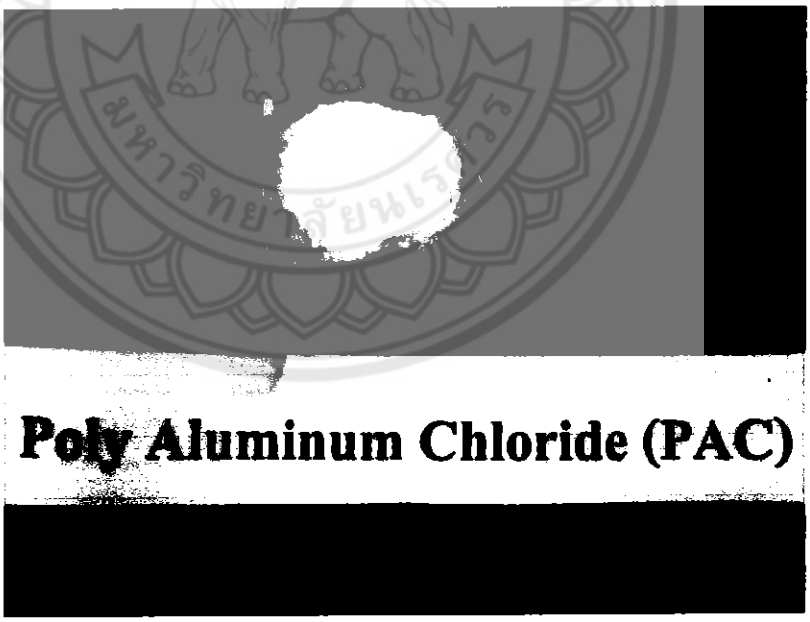
Poly Acrylamide (IUPAC poly(2-propenamide) คือ พอลิเมอร์ (-$CH_2CHCONH_2$-) ที่จัดอยู่ในรูปของหน่วย Acrylamide ที่สามารถ cross-linked (พันธะที่เชื่อมโยงพอลิเมอร์ของโซ่อื่นๆ) ได้ทันทีทันใด Acrylamide มีการนำไปใช้ในปฏิบัติการในห้องทดลองได้ดี (เช่น การนำไปทำสวมใส่เป็นถุงมือ เสื้อกาวน์ เป็นต้น และมีการใช้ในระบบการทำงานที่ปลอดภัย) ควรหลีกเลี่ยงให้ห่างไกลจากแสงแดดซึ่งอาจทำให้ PAM ไม่อยู่ในรูปของโพลิเมอร์และเกิดสารที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ประสาท แต่โดยปกติ PAM จะอยู่ในรูปของโพลิเมอร์ซึ่งไม่เป็นพิษ การใช้งาน PAM ส่วนใหญ่คือใช้เพื่อช่วยในการตกตะกอน หรือจับเป็นก้อนของแข็งในของเหลว กระบวนการนี้ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสีย และกระบวนการทำกระดาษ



รูป 2.6 Poly Acrylamide

2.2.2 Poly Aluminum Chloride (PAC)

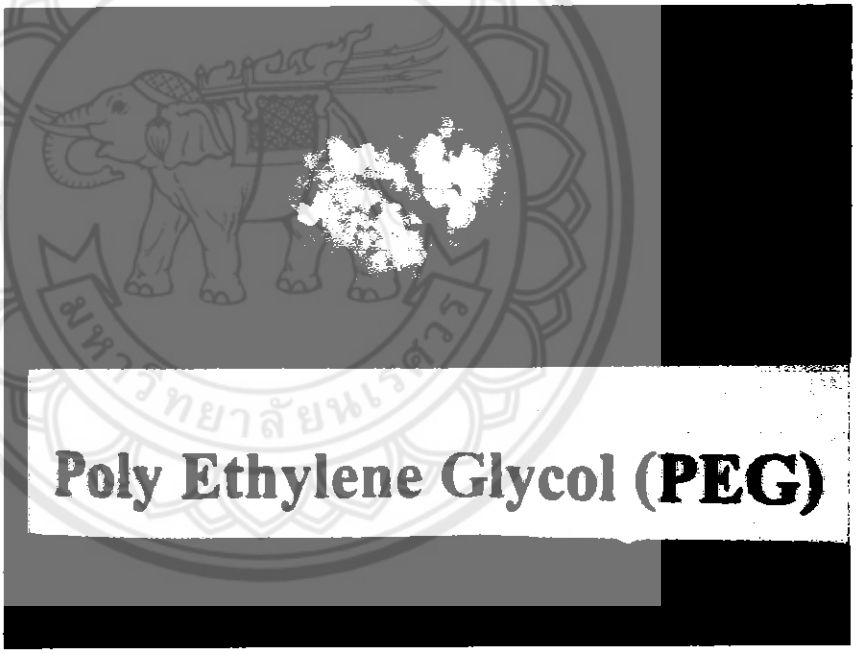
Poly Aluminum Chloride หรือเกลืออะลูมิเนียมซึ่งมีสูตรทางเคมี คือ $[Al(OH)_nCl_{6-n}]_m$ หรือ $Al_n(OH)_mCl_{(3m-n)}$ เมื่อ 0<m>3n เป็นสารประเภทพอนินทรีย์เกิดจากการรวมตัวของโมเลกุลใหญ่ สารอะลูมิเนียมคลอไรด์ดังกล่าวมีความเป็นเบสแรงและมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก(+)มีคุณสมบัติในการจับตัวสูง คุณสมบัติคล้ายสารส้มคือสามารถทำให้เกิดการตกตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำได้และมีความเสถียรภาพมาก ลักษณะทั่วไปของ PAC อาจอยู่ในรูปของสารละลายใสหรือขุ่นเล็กน้อย หรืออยู่ในรูปของผงละเอียดสีเหลืองนวล ส่วนคุณสมบัติในการลด Friction นั้นต้องศึกษาในระดับอนุภาคคือเมื่อเราปล่อยสาร PAC ลงไปผสมกับน้ำแล้ว PAC จะทำให้โมเลกุลของน้ำเรียงตัวเป็นระเบียบมากขึ้นน้ำจะไหลได้เร็วขึ้นและแรงยึดระหว่างโมเลกุลลดลงทำให้ความต้านทานการไหล(f)ลดลงด้วย



รูป 2.5 Poly Aluminum Chloride

2.2.3 Poly Ethylene Glycol (PEG)

Polyethylene Glycol (PEG) เป็นสารที่ใช้ในอุตสาหกรรมยา หรือรู้จักกันในชื่อ Poly ethylene Oxide (PEO) หรือ Polyoxyethylene (POE) Polyethylene Glycol เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่าง ethylene oxide กับน้ำ คุณสมบัติของมันคือทำให้น้ำมีความหนืดมากขึ้น เช่นในอุตสาหกรรมยาสีฟัน หรือการทำลูกกระสุนสำหรับกีฬาเพนท์บอล แต่ในปัจจุบันอาจถูกแทนที่ด้วยส่วนผสมที่ถูกกว่าเมื่อ PAG ผสมน้ำจะมีความยืดหยุ่นซึ่งทำให้แรงดันผ่านเนื้อเยื่อเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นประโยชน์ในการทดลองทางชีวะเคมี



รูป 2.7 Polyethylene glycol

2.2.4 Guargum

กัวกัมเป็นโพลีแซคคาไรด์ ชนิดหนึ่งอยู่ในประเภทเฮทเทอโรโพลีแซคคาไรด์มีลักษณะเป็นผงละเอียดสีเหลืองนวล มีสมบัติเป็นสารที่ไม่ทำให้เกิดเจล แต่สามารถกระจายตัว และอุ้มน้ำได้ดีในน้ำเย็น จึงใช้ทำหน้าที่หลักเป็นสารเพิ่มความหนืด เพิ่มความคงตัว และอุ้มน้ำ เมื่อนำมาใช้ร่วมกับพอลิเมอร์แซนแทนกัมจะทำให้สารละลายมีความหนืดเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายกัวกัมขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ pH เวลา ความเข้มข้น การกวน และขนาดของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนืดของสารละลายจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากกัวกัม เป็นสารที่ไม่มีขั้ว และทนต่อ pH ได้ช่วงกว้างคือ pH 4-10 ทำให้สามารถเติมอีเลคโทรไลท์ได้เป็นจำนวนมาก แต่ถ้ามีความเข้มข้นของอีเลคโทรไลท์สูงกว่าร้อยละ 5 จะมีผลต่อการอุ้มน้ำ และการเกิดเจล กัวกัมมีความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูงสุดที่ pH 7.5-9.0

รูป 2.8 Guargum

2.3 การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อ

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

$$DR\,(\%) = 100\times\left(\frac{f_w - f_p}{f_w}\right) \tag{2.6}$$

โดยที่ f_w และ f_p คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานในกรณีที่ไม่ใช้และใช้สารเติมพอลิเมอร์ในระบบสูบน้ำตามลำดับ

$$Q(\%) = 100\times\left(\frac{Q_w - Q_p}{Q_w}\right) \tag{2.7}$$

โดยที่ Q_p คือ อัตราการไหลของสารละลายพอลิเมอร์ และ Q_w คือ อัตราการไหลของน้ำ

2.4 ทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลงานวิจัยของคณะวิจัยระบบขนส่งและกรองน้ำเสียทางไกลในท่อแบบ 3R นั้นใช้น้ำประปาผสมกับดินขาวเพื่อใช้เป็นตัวอย่างในการทดลองในอัตราความเข้มข้น 1000 mg/l เนื่องจากดินขาวเป็นสารที่ใช้เป็นตัวอย่างในการตกตะกอนและสามารถเห็นผลได้อย่างชัดเจน โดยการออกแบบระบบบำบัดเป็นสองขั้นตอนด้วยกัน คือ การตกตะกอนและการกรอง ซึ่งมีถังเฉพาะสำหรับแต่ละขั้น ในส่วนของการทำงานของถังตกตะกอนนั้นใช้แผ่นกั้นเพื่อชะลอให้น้ำอยู่ในระบบนานขึ้นและให้น้ำมีความปั่นป่วนเล็กน้อย ไม่หยุดนิ่งเพื่อให้เกิดตะกอนได้ดี ส่วนการทำงานของถังกรองนั้น สารกรองที่ใช้ในถังกรองประกอบด้วยทรายและกรวดอย่างละสองขนาด ซึ่งการทำงานของถังกรองนี้จัดเป็นการกรองช้า เป็นการไหลจากบนลงล่างปล่อยให้น้ำไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านสารกรองซึ่งเรียงกันตามขนาดจากละเอียดมากจนไปถึงสารกรองที่มีขนาดใหญ่กว่า ดินขาวที่ผสมอยู่ในน้ำจะไม่สามารถผ่านชั้นแรกไปได้ และเพื่อป้องกันไม่ให้สารกรองไหลลงมาน้ำจึงจำเป็นต้องใช้สารกรองขนาดใหญ่กั้นสารกรองที่มีขนาดเล็กเอาไว้ แล้วเติมสารละลายพอลิเมอร์ในปริมาณที่ต่างกันลงไปในน้ำตัวอย่าง พบว่าPoly Aluminum Chloride (PAC) ที่ 100 mg/l จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ดีที่สุดและหากใช้สารละลายพอลิเมอร์ Poly Aluminum Chloride (PAC) ในปริมาณที่น้อยหรือมากกว่านี้พบว่าแนวโน้มการตกตะกอนลดลงเนื่องจาก Poly Aluminum Chloride (PAC) มากเกินไป ตัวพอลิเมอร์เองจะทำให้ขุ่นหรือหากไม่มากพอก็ทำให้ไม่สามารถตกตะกอนได้เต็มที่นัก

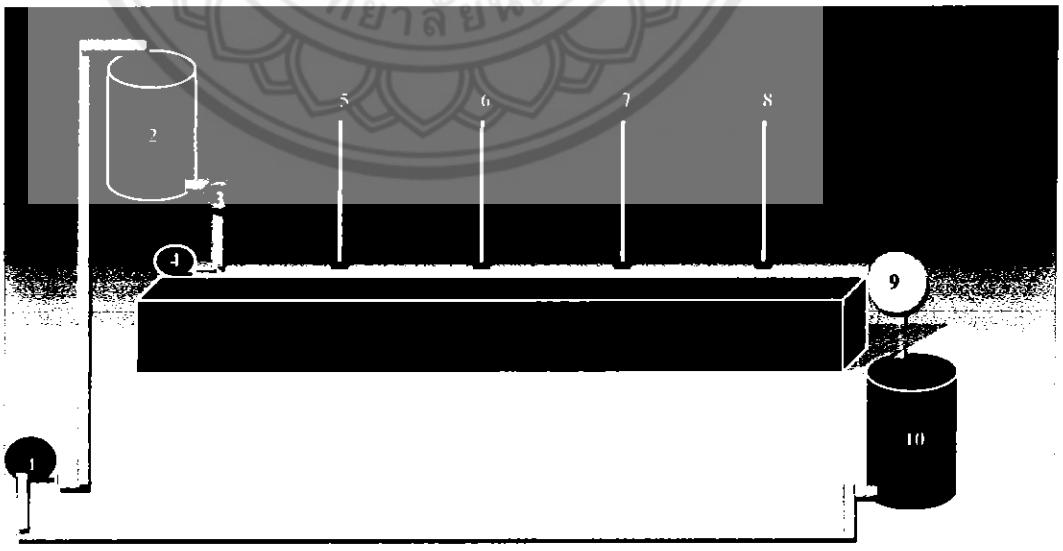
บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

ในการทดลองโครงงานนี้เป็นการทดลองการใช้สารละลายพอลิเมอร์ลดแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวท่อซึ่งมีวิธีการดำเนินโดยเริ่มที่การศึกษาและออกแบบระบบจำลองการปั๊มน้ำ วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล และส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูล

3.1 การศึกษาและออกแบบระบบจำลองการปั๊มน้ำ

3.1.1 การออกแบบระบบการปั๊มน้ำสามารถจำลองระบบได้ดังรูป



รูป 3.1 การจำลองระบบการปั๊มน้ำ

1. เครื่องสูบน้ำชนิดปั๊มหอยโข่ง

2. ถังพักน้ำ

3. วาล์ว

4. อุปกรณ์เติมพอลิเมอร์

5. อุปกรณ์วัดความดันจุดที่ 1

6. อุปกรณ์วัดความดันจุดที่ 2

7. อุปกรณ์วัดความดันจุดที่ 3

8. อุปกรณ์วัดความดันจุดที่ 4

9. เครื่องมือวัดอัตราการไหล

10. ถังบำบัดสารละลายพอลิเมอร์

แบบจำลองระบบการปั๊มน้ำจากรูป 3.1 ใช้เครื่องสูบน้ำชนิดปั๊มหอยโข่ง Mitsubishi / WR-155Q3 150 watt สูบน้ำเก็บในถังพักน้ำ และน้ำไหลในท่อ ท่อ PVC ¾นิ้ว โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์เติมพอลิเมอร์โดยเลือกปั๊ม Roytrouic / P+063-738NI 28 watt ปล่อยสารเคมีก่อนผ่านมานอมิเตอร์เพื่อวัดความดันซึ่งมีทั้งหมด4จุด ดังรูป ซึ่งแต่ละจุดห่างกัน 1 เมตร แล้วน้ำไหลผ่านเครื่องมือวัดอัตราการไหลผ่านสู่ถังบำบัดสารละลายพอลิเมอร์

3.1.2 วัสดุที่เลือกใช้จำลองระบบการปั๊มน้ำ

1. ถัง 150 และ 200 ลิตร
2. ท่ออะครีลิค 1/16 และ3/4 นิ้ว
3. ท่อ PVC 3/4 และ 1 นิ้ว
4. ข้อต่อท่อ PVC 3/4 นิ้ว

5. ตัวล็อคท่อ
6. เหล็กฉาก
7. แถบ Scale
8. ไม้อัด
15. กาวน้ำ
16 . เทปพันเกลียว

3.2 วิธีการทดลองและเก็บข้อมูล

การทดลองของโครงงานนี้ทำการทดลองที่อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร มีวิธีทำการทดลองและการเก็บข้อมูลของโครงงานนี้ดังต่อไปนี้

3.2.1 วิธีการทดลอง

3.2.1.1 ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองระบบการไหลดังรูป 3.1

3.2.1.2 รอให้ระบบทำงาน 10 นาที แล้วบันทึกค่าความดันจากมานอมิเตอร์ทั้ง4จุด

3.2.1.3 วัดอัตราการไหลของน้ำ

3.2.1.4 นำสารละลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide (PAM) 50 ppm เติมเข้าท่อโดยใช้ปั๊มเติมสารละลายพอลิเมอร์ที่มีอัตรา 6.84 L/hr จากนั้นรอ10นาทีแล้วบันทึกค่าความดันและอัตราการไหล

3.2.1.5 ทำซ้ำข้อ 3.2.1.4 โดยใช้ Poly Aluminum Chloride (PAC) 100, 200, และ300 ppm

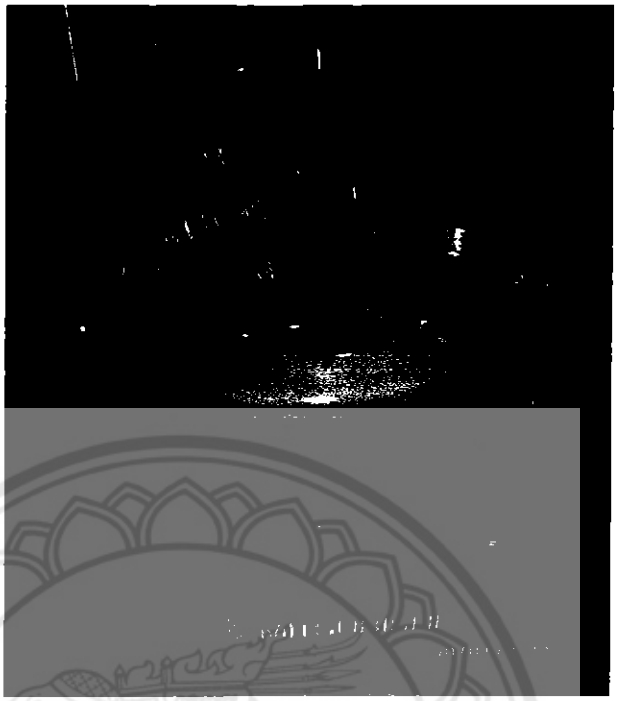
3.2.1.6 ทำซ้ำข้อ3.2.1.4 -3.2.1.5 โดยใช้ Poly Acrylamide (PAM), Poly Ethylene Glycol (PEG) และ Guargum เป็นสารละลายพอลิเมอร์

3.2.1.7 ทำซ้ำข้อ 3.2.1.2– 3.2.1.6 โดยใช้อัตราการไหลของน้ำที่ต่างกันอีก3ค่า

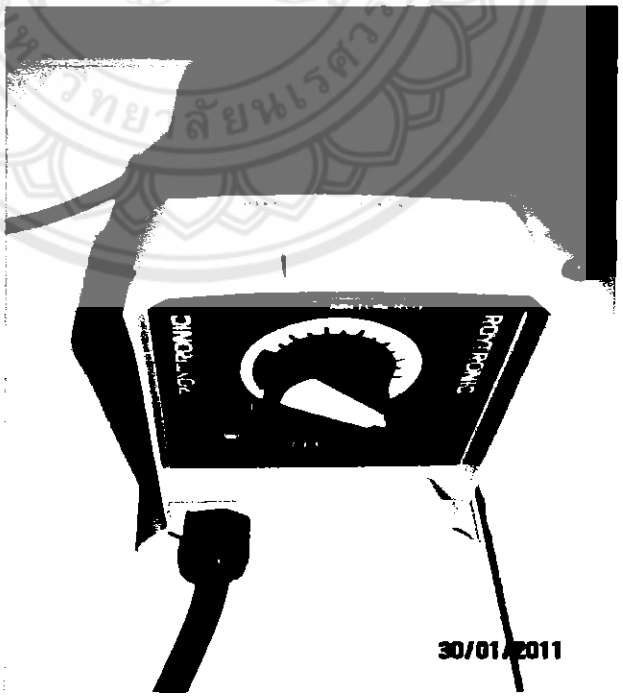
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำโครงงานนี้

ตาราง 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ/อุปกรณ์	ยี่ห้อ/รุ่น	คุณสมบัติ
ปั๊มน้ำ	Mitsubishi / WR-155Q3	Power;220 V , 50Hz , 150 Watt, ระยะส่ง 12 เมตร
ปั๊มปล่อยสารเคมี	Roytrouic / P+063-738NI	Power; 220-240 V , 5o/ 60Hz 28Watt ,0.5A Flow; 2.o6 GPM 50PSI, 7.6 l/h @ 3.5 Bar
เครื่องชั่งดิจิตอล	UWE/ JW -250	น้ำหนัก;250g Div ;0.005g AC Adaptor ; 9V/ 500mA
เครื่องชั่ง	HASON/ A12E	AC 220 V 50Hz
นาฬิกาจับเวลา	CASIO / HS-70W	หน่วยความจำ12X100 กันน้ำลึก50เมตร จับเวลาละเอียดถึง1/1000วินาที



รูป 3.2 ปั๊มน้ำ



รูป 3.3 ปั๊มปล่อยสารเคมี

3.4 วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

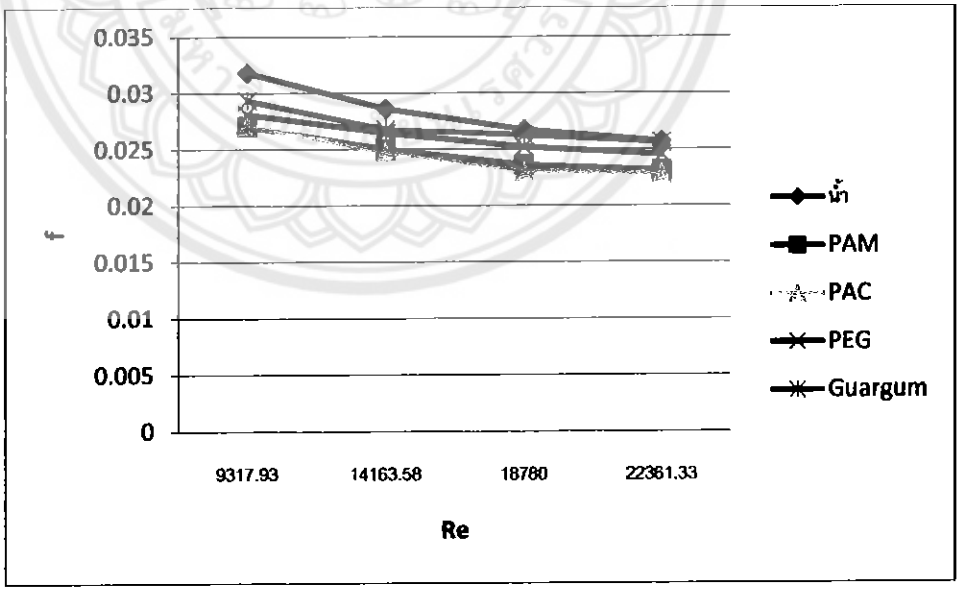
นำผลการทดลองที่ ppm เดียวกันมาวิเคราะห์ความสามารถลดการสูญเสียความดันที่มีอัตราการไหลเดียวกัน จากนั้นเปรียบเทียบวิเคราะห์ความสามารถลดการสูญเสียความดันที่มีอัตราการไหลแตกต่างกัน

บทที่ 4

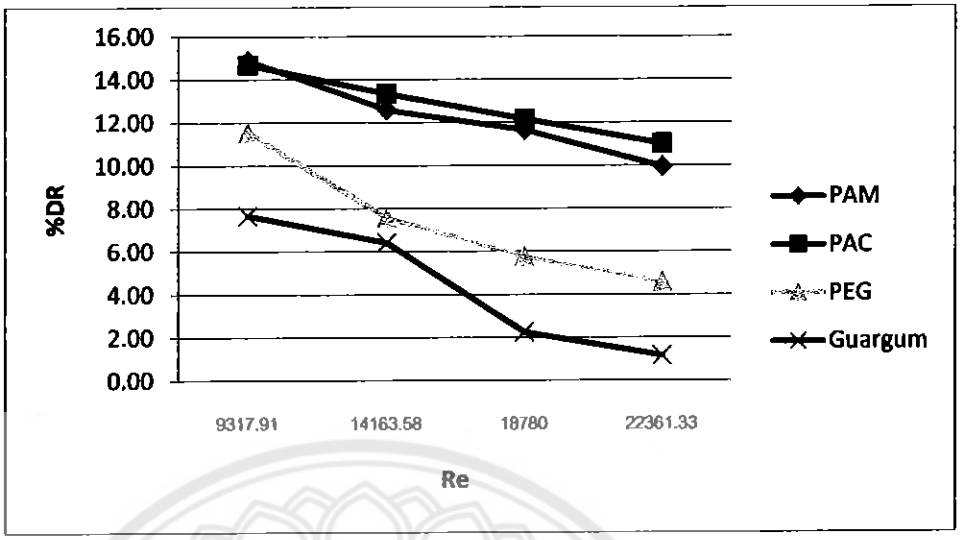
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการศึกษาผลของการฉีดสารละลายพอลิเมอร์ที่มีต่อความดันตกภายในท่อจะวิเคราะห์โดยใช้ผลการทดลองวันที่ 6 ,7 และ 8 มกราคม 2554 ณ ห้องทดลองของไหล อาคารวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ 50, 100, 200 และ300 ppm

4.1 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 50 ppm



กราฟ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ 50 ppm

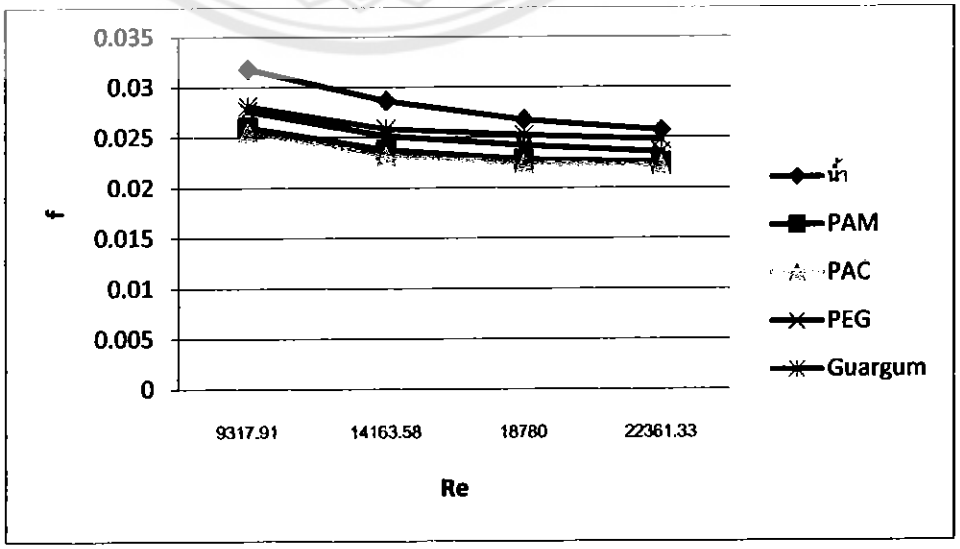


กราฟ 4.2 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 50 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ

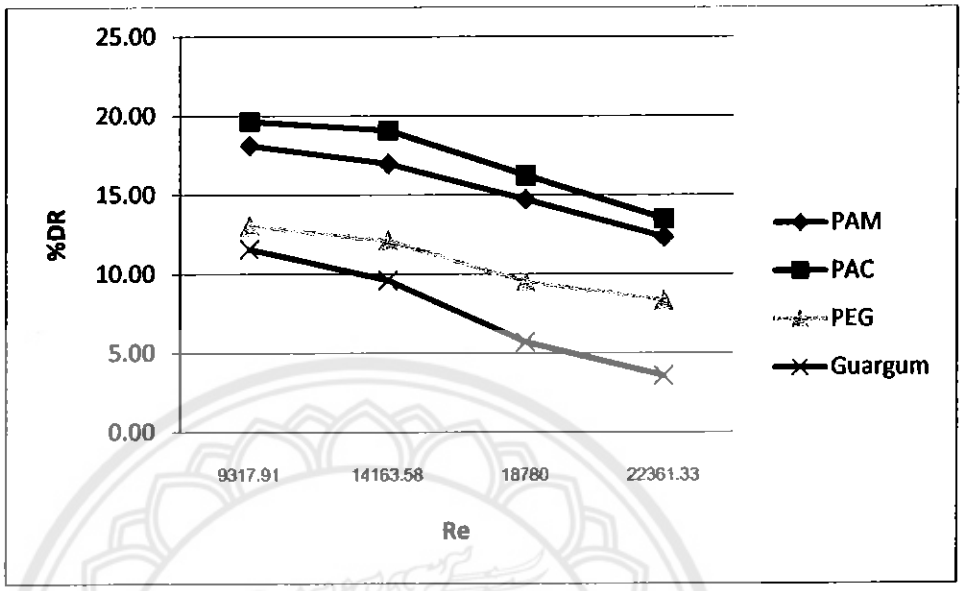
จากกราฟ 4.1และกราฟ 4.2 เมื่อมีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 50 ppm ลงในท่อน้ำจะช่วยให้สามารถลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อให้ลดลงได้เนื่องจากสารละลายพอลิเมอร์เหล่านั้นมีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่ยาวมีกิ่งก้านและยังช่วยจับกับอณุภาคทำให้มีการเรียงตัวกันในทิศทางการไหลและยังช่วยในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลในท่อ

15516080
ม.ร.
845617
2553

4.2 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 100 ppm



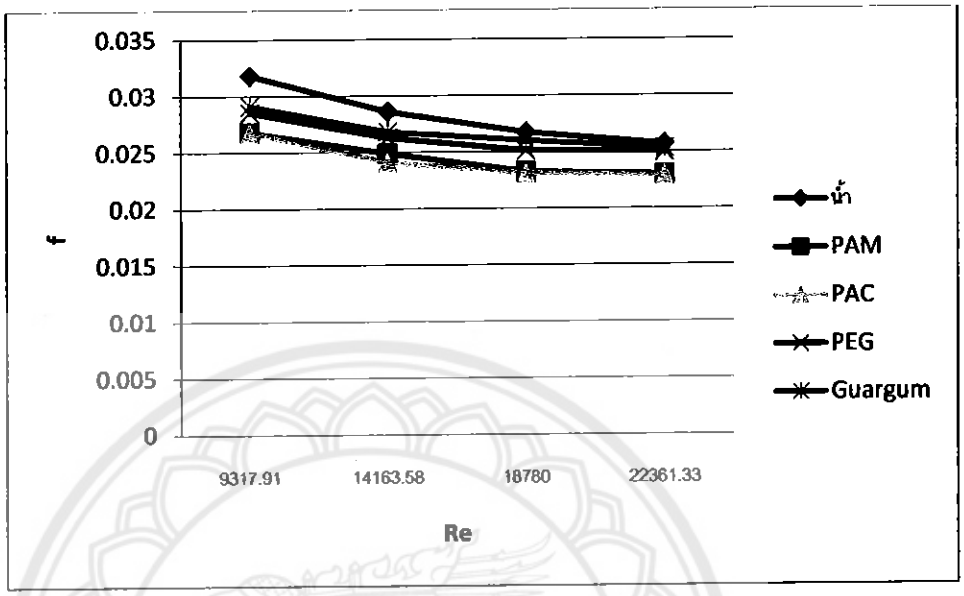
กราฟ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ 100 ppm



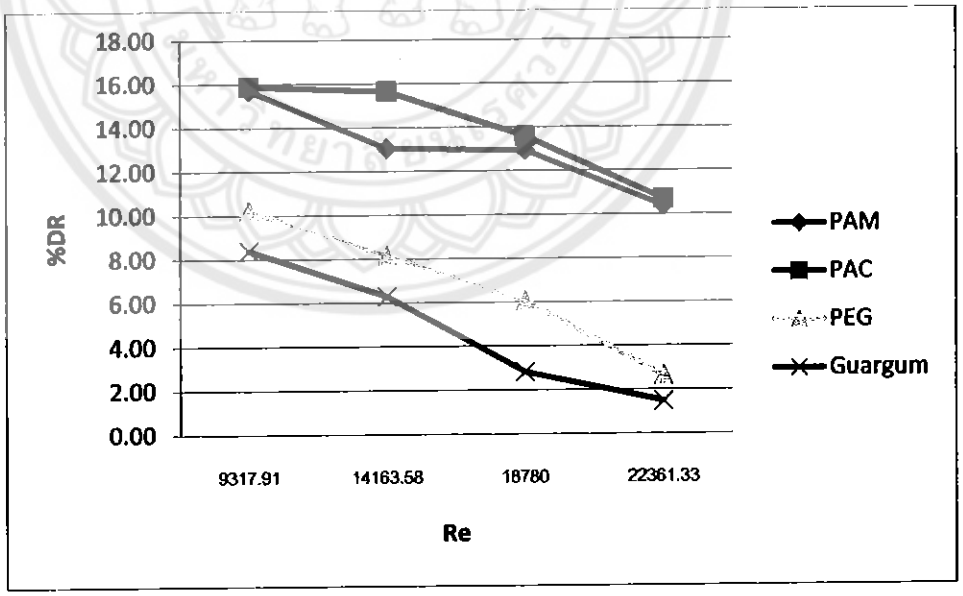
กราฟ 4.4 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 100 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ

จากกราฟ 4.3 และกราฟ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นที่ 100 ppm ในท่อน้ำที่มีอัตราการไหลแตกต่างกันแล้วจะสามารถลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อได้อย่างมาก เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์อยู่ในอัตราการไหลที่เหมาะสมและสารละลายพอลิเหล่านี้ มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีเป็นสายโซ่ยาวมีกิ่งก้านและยังช่วยจับกับอณุภาคทำให้มีการเรียงตัวกันในทิศทางการไหลและยังช่วยในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลในท่อ ลดลง

4.3 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 200 ppm



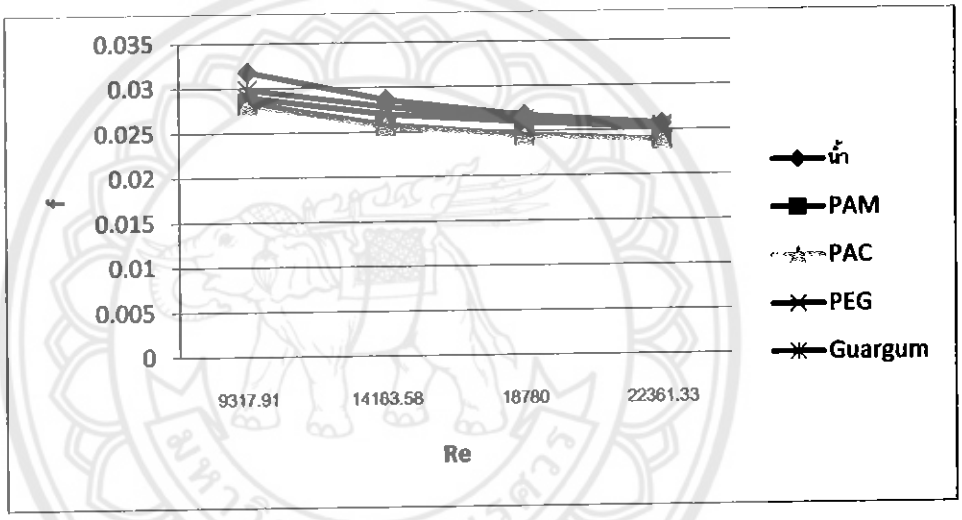
กราฟ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ 200 ppm



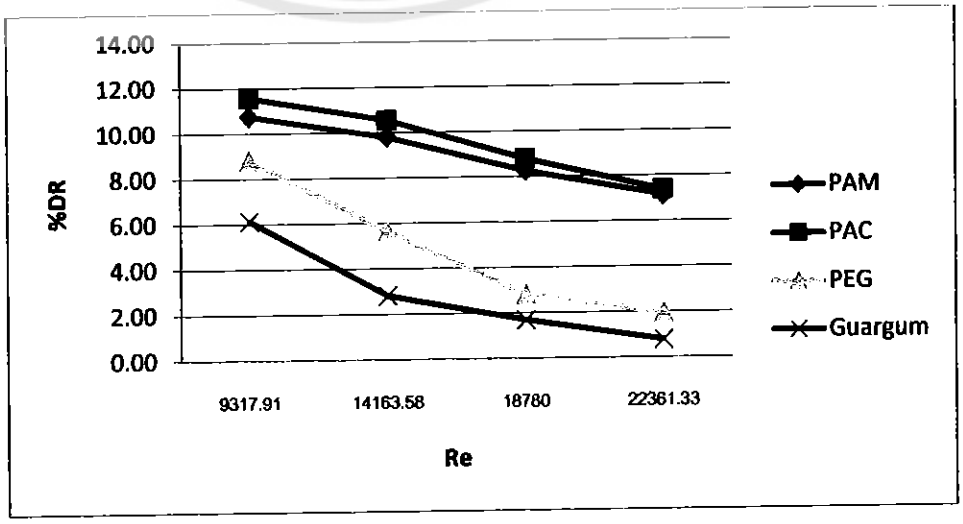
กราฟ 4.6 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 200 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ

จากกราฟ 4.5 และกราฟ 4.6 ที่สารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นที่ 200ppm เมื่อเติมในท่อน้ำจะพบว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อจะยังคงลดลงแต่ว่าลดในปริมาณที่น้อยเนื่องจากอัตราส่วนความเข้มข้นเกินจุดพอดีที่จะสามารถลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อให้ได้มากที่สุด

4.4 ผลการทดลองของน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้น 300 ppm



กราฟ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง f กับ Reของน้ำธรรมดาและน้ำที่มีการเติมสารละลายพอลิเมอร์ 300 ppm



กราฟ 4.8 แสดง%DRของสารละลายพอลิเมอร์ 300 ppm เมื่อเทียบกับน้ำ

จากกราฟ 4.7 และกราฟ 4.8 เมื่อเติมสารละลายพอลิเมอร์ความเข้มข้นที่ 300 ppm ลงในท่อน้ำจะพบว่าแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อมีน้อยลงซึ่งก็จะทำให้อัตราการไหลน้อยลงไปด้วยเนื่องจากเกินจุดเหมาะสมของอัตราความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์เหล่านี้

บทที่ 5

สรุปโครงงานและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการศึกษาและการทดลองโครงการนี้ต้องการทราบถึงผลกระทบของการใช้สารสะลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide, Poly Aluminum Chloride, Poly Ethylene Glycol และGuargum ที่ความเข้มข้นต่างๆ เติมลงในท่อซึ่งมีผลกระทบมีต่อแรงเสียดทานเนื่องมาจากการไหลภาพในท่อเป็นผลที่ใช้ในการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลองนี้

ผลของระดับความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ จากการศึกษาและทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ที่เหมาะสมคือประมาณ 100 ppm ซึ่งถ้าหากมากเกินกว่านี้ความสามารถในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อและการเพิ่มอัตราการไหลจะลดลงแต่ถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นน้อยกว่า 100 ppm จะทำให้ความสามารถในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อและการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลก็จะมีค่าน้อยลงเช่นกัน

จากการทดลองพบว่าหากเติมสารละลายพอลิเมอร์ Poly Aluminum Chloride มีความสามารถลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อได้ดีที่สุดและ Poly Acrylamide สามารถลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อรองลงมาส่วน Poly Ethylene Glycol และGuargum นั้นก็สามารถลดได้แต่ลดได้ในปริมาณที่น้อย ซึ่งจากการทดลองจะทำสามารถลดใช้พลังงานสูงสุดที่เนื่องมาจากการสูญเสียในส่วนของการสูญเสียหลักจากการไหลภายในท่อได้ 9.22%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ทำการทดลองกับระบบปั๊บหมุนเวียน

5.2.2 ทำการทดลองกับระบบปั๊มที่มีการใช้งานจริง

5.2.3 ถ้าสามารถลดความผิดพลาดจากเครื่องมือวัดผลโดยใช้เครื่องมือที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง

5.2.4 ถ้าสามารถใช้เครื่องละลายสารที่มีประสิทธิภาพสูงได้ในการละลายพอลิเมอร์จะทำให้สามารถลดแรงเสียดเนื่องจากการไหลในท่อได้มากขึ้น

มหาวิทยาลัยนเรศวร

เอกสารอ้างอิง/บรรณานุกรม

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

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

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

[4] Sellin, R.H., et. al. (1982). The effect of drag reducing additives on fluid flows and their industrial applications. Part 1: Basic aspects, *Journal of Hydraulics Research*; Vol.20, 29-68.

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_glycol

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Polyacrylamide

ภาคผนวก

ผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลัก และอัตราการไหล

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลัก

ตัวอย่างการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลักที่ อัตราการไหล 0.125 L/s

$$h_{f,water} = f\frac{LV^2}{D2g}$$

$$h_{f,water} = \frac{(0.0318)(3)(0.43856^2)}{(0.01905)(2)(9.81)} \text{ m}$$

$$= 0.049092 \text{ m}$$

ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลักและอัตราการไหล

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดการสูญเสียพลังงานหลัก

$$\%h_{f@100ppm,0.125 \text{ L/s}} = \left(\frac{h_{f,water} - h_{PAM}}{h_{f,water}}\right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.049092 - 0.040199}{0.049092}\right) \times 100\%$$

$$= 18.11\ \%$$

ดังนั้น เมื่อฉีดสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ลงในท่อน้ำที่มีอัตราการไหล 0.125 *L/s* จะทำให้สามารถลดการสูญเสียพลังงานหลักได้ 18.11%

การคำนวณเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหล

$$\%Q_{@100ppm} = \left(\frac{Q_{PAM} - Q_{water}}{Q_{water}}\right) \times 100\%$$

$$= \left(\frac{0.1518 - 0.125}{0.125}\right) \times 100\%$$

$$= 21.472\ \%$$

ดังนั้น เมื่อเติมสารละลายพอลิเมอร์ PAM 100 ppm ลงในท่อน้ำที่มีการไหล 0.125 L/s จะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้น 21.472 %

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างตารางการบันทึกผลการทดลอง

อัตราการไหล

ตาราง ข.1ตัวอย่างผลการทดลองการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของPAM

อัตราการไหล ขของน้ำ (L/s)	อัตราการไหล(L/s)			
	50ppm	100ppm	200ppm	300ppm
0.125	0.143815	0.151811	0.147786	0.141078
0.190	0.207414	0.215455	0.21143	0.204725
0.252	0.268053	0.276103	0.272079	0.266715
0.300	0.314707	0.322751	0.318734	0.313364

การสูญเสียความดัน

ตาราง ข.2 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.125 kg/s

	h1(cm)	h2(cm)	h3(cm)	h4(cm)
น้ำ	5.0	2.3	1.6	0.0
PAM50ppm	5.1	2.3	1.6	0.9
PAM100ppm	5.3	2.4	1.7	1.3
PAM200ppm	5.2	2.4	1.7	1.1
PAM300ppm	5.1	2.3	1.6	0.7

ตาราง ข.3 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.19 kg/s

	h1(cm)	h2(cm)	h3(cm)	h4(cm)
น้ำ	12.2	9.2	5.0	2.0
PAM50ppm	12.4	9.4	6.5	3.5
PAM100ppm	12.5	9.5	7.0	4.0
PAM200ppm	12.4	9.4	6.5	3.5
PAM300ppm	12.3	9.3	6.1	3.1

ตาราง ข.4 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.252 kg/s

	h1(cm)	h2(cm)	h3(cm)	h4(cm)
น้ำ	22.4	17.2	10.6	5.6
PAM50ppm	23.0	17.7	13.2	8.2
PAM100ppm	23.5	18.1	14.2	9.2
PAM200ppm	23.2	17.8	13.6	8.6
PAM300ppm	22.8	17.5	12.4	7.4

ตาราง ข.5 แสดงความดันของสารละลายพอลิเมอร์PAM ที่น้ำมีอัตราการไหล 0.3 kg/s

	h1(cm)	h2(cm)	h3(cm)	h4(cm)
น้ำ	31.0	24.5	15.0	8.1
PAM50ppm	32.0	25.5	18.3	11.4
PAM100ppm	33.2	26.7	20.0	13.2
PAM200ppm	32.5	26.0	18.9	12.0
PAM300ppm	31.5	25.0	17.1	10.3

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$

f	Re	f	Re	f	Re
0.01409	20257021	0.01429	3911903	0.01449	2106983
0.0141	16839885	0.0143	3755532	0.0145	2058027
0.01411	14402805	0.01431	3610766	0.01451	2011162
0.01412	12577046	0.01432	3476362	0.01452	1966256
0.01413	11158237	0.01433	3351245	0.01453	1923190
0.01414	10023970	0.01434	3234487	0.01454	1881854
0.01415	9096457	0.01435	3125278	0.01455	1842145
0.01416	8323896	0.01436	3022909	0.01456	1803969
0.01417	7670455	0.01437	2926759	0.01457	1767240
0.01418	7110562	0.01438	2836278	0.01458	1731878
0.01419	6625473	0.01439	2750979	0.01459	1697807
0.0142	6201139	0.0144	2670431	0.0146	1664958
0.01421	5826823	0.01441	2594248	0.01461	1633268
0.01422	5494175	0.01442	2522085	0.01462	1602676
0.01423	5196608	0.01443	2453633	0.01463	1573126
0.01424	4928852	0.01444	2388613	0.01464	1544566
0.01425	4686644	0.01445	2326774	0.01465	1516948
0.01426	4466494	0.01446	2267889	0.01466	1490225
0.01427	4265524	0.01447	2211750	0.01467	1464355
0.01428	4081332	0.01448	2158172	0.01468	1439299

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.01469	1415018	0.01509	825222.7	0.01549	563682.5
0.0147	1391477	0.0151	816232.8	0.0155	559013.9
0.01471	1368644	0.01511	807413.4	0.01551	554410.4
0.01472	1346486	0.01512	798759.6	0.01552	549870.6
0.01473	1324975	0.01513	790267	0.01553	545393.4
0.01474	1304083	0.01514	781931.1	0.01554	540977.3
0.01475	1283783	0.01515	773747.7	0.01555	536621.3
0.01476	1264051	0.01516	765712.7	0.01556	532324.1
0.01477	1244864	0.01517	757822.1	0.01557	528084.6
0.01478	1226199	0.01518	750072.2	0.01558	523901.6
0.01479	1208035	0.01519	742459.2	0.01559	519774
0.0148	1190354	0.0152	734979.7	0.0156	515700.9
0.01481	1173135	0.01521	727630.1	0.01561	511681
0.01482	1156361	0.01522	720407.2	0.01562	507713.5
0.01483	1140016	0.01523	713307.8	0.01563	503797.3
0.01484	1124083	0.01524	706328.8	0.01564	499931.4
0.01485	1108546	0.01525	699467.2	0.01565	496115
0.01486	1093392	0.01526	692720.1	0.01566	492347.1
0.01487	1078606	0.01527	686084.8	0.01567	488626.7
0.01488	1064176	0.01528	679558.4	0.01568	484953.1
0.01489	1050088	0.01529	673138.4	0.01569	481325.4
0.0149	1036332	0.0153	666822.2	0.0157	477742.7
0.01491	1022894	0.01531	660607.5	0.01571	474204.3
0.01492	1009765	0.01532	654491.7	0.01572	470709.3
0.01493	996934.3	0.01533	648472.6	0.01573	467256.9
0.01494	984391.6	0.01534	642548	0.01574	463846.5
0.01495	972127.5	0.01535	636715.7	0.01575	460477.2
0.01496	960132.9	0.01536	630973.6	0.01576	457148.4
0.01497	948399.1	0.01537	625319.6	0.01577	453859.3
0.01498	936917.8	0.01538	619751.8	0.01578	450609.3
0.01499	925681	0.01539	614268.3	0.01579	447397.6
0.015	914681.1	0.0154	608867.1	0.0158	444223.7
0.01501	903910.7	0.01541	603546.6	0.01581	441086.9
0.01502	893362.8	0.01542	598304.8	0.01582	437986.5
0.01503	883030.7	0.01543	593140.2	0.01583	434922
0.01504	872907.8	0.01544	588051.1	0.01584	431892.7
0.01505	862987.9	0.01545	583035.8	0.01585	428898.1
0.01506	853265.1	0.01546	578092.8	0.01586	425937.6
0.01507	843733.6	0.01547	573220.6	0.01587	423010.5
0.01508	834387.9	0.01548	568417.6	0.01588	420116.5

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.01589	417254.9	0.01629	324397	0.01669	260738.8
0.0159	414425.1	0.0163	322514.7	0.0167	259406.6
0.01591	411626.8	0.01631	320649.9	0.01671	258085.1
0.01592	408859.4	0.01632	318802.3	0.01672	256774.1
0.01593	406122.4	0.01633	316971.6	0.01673	255473.5
0.01594	403415.2	0.01634	315157.8	0.01674	254183.2
0.01595	400737.6	0.01635	313360.4	0.01675	252903.1
0.01596	398088.9	0.01636	311579.4	0.01676	251633
0.01597	395468.7	0.01637	309814.4	0.01677	250372.8
0.01598	392876.6	0.01638	308065.4	0.01678	249122.5
0.01599	390312.2	0.01639	306332	0.01679	247881.9
0.016	387775	0.0164	304614.2	0.0168	246650.9
0.01601	385264.6	0.01641	302911.6	0.01681	245429.5
0.01602	382780.6	0.01642	301224.1	0.01682	244217.4
0.01603	380322.5	0.01643	299551.5	0.01683	243014.6
0.01604	377890.1	0.01644	297893.7	0.01684	241821.1
0.01605	375483	0.01645	296250.4	0.01685	240636.6
0.01606	373100.6	0.01646	294621.4	0.01686	239461.2
0.01607	370742.7	0.01647	293006.6	0.01687	238294.6
0.01608	368409	0.01648	291405.8	0.01688	237136.9
0.01609	366099	0.01649	289818.8	0.01689	235987.9
0.0161	363812.4	0.0165	288245.5	0.0169	234847.5
0.01611	361548.9	0.01651	286685.7	0.01691	233715.6
0.01612	359308.1	0.01652	285139.2	0.01692	232592.2
0.01613	357089.7	0.01653	283605.8	0.01693	231477.1
0.01614	354893.4	0.01654	282085.5	0.01694	230370.3
0.01615	352718.8	0.01655	280577.9	0.01695	229271.7
0.01616	350565.8	0.01656	279083.1	0.01696	228181.2
0.01617	348433.8	0.01657	277600.8	0.01697	227098.7
0.01618	346322.7	0.01658	276130.9	0.01698	226024.1
0.01619	344232.2	0.01659	274673.2	0.01699	224957.4
0.0162	342162	0.0166	273227.6	0.017	223898.4
0.01621	340111.7	0.01661	271794	0.01701	222847.1
0.01622	338081.1	0.01662	270372.2	0.01702	221803.5
0.01623	336070	0.01663	268962	0.01703	220767.3
0.01624	334078.1	0.01664	267563.4	0.01704	219738.6
0.01625	332105.1	0.01665	266176.2	0.01705	218717.3
0.01626	330150.7	0.01666	264800.3	0.01706	217703.3
0.01627	328214.7	0.01667	263435.5	0.01707	216696.5
0.01628	326296.9	0.01668	262081.7	0.01708	215696.9

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.01709	214704.4	0.01749	180093.8	0.01789	153289.6
0.0171	213718.8	0.0175	179340	0.0179	152698
0.01711	212740.2	0.01751	178591.1	0.01791	152109.9
0.01712	211768.5	0.01752	177846.9	0.01792	151525.2
0.01713	210803.6	0.01753	177107.3	0.01793	150943.8
0.01714	209845.5	0.01754	176372.4	0.01794	150365.7
0.01715	208894	0.01755	175642.1	0.01795	149791
0.01716	207949.1	0.01756	174916.4	0.01796	149219.5
0.01717	207010.8	0.01757	174195.2	0.01797	148651.2
0.01718	206079	0.01758	173478.5	0.01798	148086.2
0.01719	205153.5	0.01759	172766.2	0.01799	147524.4
0.0172	204234.5	0.0176	172058.4	0.018	146965.7
0.01721	203321.7	0.01761	171354.9	0.01801	146410.2
0.01722	202415.2	0.01762	170655.7	0.01802	145857.8
0.01723	201514.8	0.01763	169960.8	0.01803	145308.5
0.01724	200620.6	0.01764	169270.2	0.01804	144762.3
0.01725	199732.4	0.01765	168583.8	0.01805	144219.2
0.01726	198850.2	0.01766	167901.6	0.01806	143679
0.01727	197973.9	0.01767	167223.6	0.01807	143141.9
0.01728	197103.6	0.01768	166549.6	0.01808	142607.8
0.01729	196239.1	0.01769	165879.8	0.01809	142076.6
0.0173	195380.3	0.0177	165214	0.0181	141548.3
0.01731	194527.3	0.01771	164552.2	0.01811	141023
0.01732	193679.9	0.01772	163894.4	0.01812	140500.6
0.01733	192838.2	0.01773	163240.5	0.01813	139981
0.01734	192002	0.01774	162590.6	0.01814	139464.2
0.01735	191171.4	0.01775	161944.5	0.01815	138950.3
0.01736	190346.2	0.01776	161302.3	0.01816	138439.3
0.01737	189526.4	0.01777	160663.8	0.01817	137930.9
0.01738	188712	0.01778	160029.2	0.01818	137425.4
0.01739	187902.9	0.01779	159398.4	0.01819	136922.6
0.0174	187099.1	0.0178	158771.2	0.0182	136422.5
0.01741	186300.4	0.01781	158147.8	0.01821	135925.1
0.01742	185507	0.01782	157528	0.01822	135430.4
0.01743	184718.7	0.01783	156911.8	0.01823	134938.4
0.01744	183935.4	0.01784	156299.3	0.01824	134449
0.01745	183157.2	0.01785	155690.3	0.01825	133962.2
0.01746	182384	0.01786	155084.9	0.01826	133478.1
0.01747	181615.7	0.01787	154483	0.01827	132996.5
0.01748	180852.3	0.01788	153884.5	0.01828	132517.5

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.01829	132041	0.01869	114875.7	0.01909	100791
0.0183	131567	0.0187	114489.4	0.0191	100471.7
0.01831	131095.6	0.01871	114105.1	0.01911	100154
0.01832	130626.7	0.01872	113722.7	0.01912	99837.67
0.01833	130160.2	0.01873	113342.1	0.01913	99522.82
0.01834	129696.2	0.01874	112963.4	0.01914	99209.4
0.01835	129234.6	0.01875	112586.5	0.01915	98897.41
0.01836	128775.5	0.01876	112211.5	0.01916	98586.85
0.01837	128318.7	0.01877	111838.3	0.01917	98277.69
0.01838	127864.4	0.01878	111466.9	0.01918	97969.94
0.01839	127412.4	0.01879	111097.3	0.01919	97663.58
0.0184	126962.7	0.0188	110729.5	0.0192	97358.61
0.01841	126515.4	0.01881	110363.5	0.01921	97055.02
0.01842	126070.4	0.01882	109999.2	0.01922	96752.79
0.01843	125627.8	0.01883	109636.7	0.01923	96451.93
0.01844	125187.4	0.01884	109276	0.01924	96152.42
0.01845	124749.2	0.01885	108916.9	0.01925	95854.26
0.01846	124313.4	0.01886	108559.6	0.01926	95557.43
0.01847	123879.7	0.01887	108204	0.01927	95261.92
0.01848	123448.3	0.01888	107850.1	0.01928	94967.74
0.01849	123019.1	0.01889	107497.8	0.01929	94674.88
0.0185	122592.1	0.0189	107147.3	0.0193	94383.31
0.01851	122167.3	0.01891	106798.4	0.01931	94093.04
0.01852	121744.6	0.01892	106451.1	0.01932	93804.07
0.01853	121324	0.01893	106105.5	0.01933	93516.37
0.01854	120905.6	0.01894	105761.6	0.01934	93229.95
0.01855	120489.4	0.01895	105419.2	0.01935	92944.79
0.01856	120075.2	0.01896	105078.5	0.01936	92660.89
0.01857	119663.1	0.01897	104739.4	0.01937	92378.24
0.01858	119253.1	0.01898	104401.8	0.01938	92096.83
0.01859	118845.1	0.01899	104065.9	0.01939	91816.67
0.0186	118439.2	0.019	103731.5	0.0194	91537.73
0.01861	118035.3	0.01901	103398.6	0.01941	91260.01
0.01862	117633.4	0.01902	103067.3	0.01942	90983.5
0.01863	117233.6	0.01903	102737.6	0.01943	90708.21
0.01864	116835.7	0.01904	102409.4	0.01944	90434.11
0.01865	116439.8	0.01905	102082.7	0.01945	90161.21
0.01866	116045.8	0.01906	101757.5	0.01946	89889.49
0.01867	115653.8	0.01907	101433.8	0.01947	89618.95
0.01868	115263.8	0.01908	101111.7	0.01948	89349.59

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.01949	89081.39	0.01989	79236.69	0.02029	70879.2
0.0195	88814.35	0.0199	79010.98	0.0203	70686.69
0.01951	88548.46	0.01991	78786.19	0.02031	70494.93
0.01952	88283.72	0.01992	78562.31	0.02032	70303.91
0.01953	88020.11	0.01993	78339.35	0.02033	70113.62
0.01954	87757.64	0.01994	78117.28	0.02034	69924.07
0.01955	87496.29	0.01995	77896.12	0.02035	69735.25
0.01956	87236.06	0.01996	77675.85	0.02036	69547.15
0.01957	86976.95	0.01997	77456.48	0.02037	69359.77
0.01958	86718.94	0.01998	77237.99	0.02038	69173.11
0.01959	86462.03	0.01999	77020.37	0.02039	68987.17
0.0196	86206.22	0.02	76803.64	0.0204	68801.94
0.01961	85951.49	0.02001	76587.78	0.02041	68617.41
0.01962	85697.85	0.02002	76372.78	0.02042	68433.58
0.01963	85445.27	0.02003	76158.64	0.02043	68250.46
0.01964	85193.77	0.02004	75945.36	0.02044	68068.03
0.01965	84943.33	0.02005	75732.94	0.02045	67886.3
0.01966	84693.95	0.02006	75521.36	0.02046	67705.25
0.01967	84445.62	0.02007	75310.63	0.02047	67524.89
0.01968	84198.34	0.02008	75100.74	0.02048	67345.22
0.01969	83952.09	0.02009	74891.68	0.02049	67166.22
0.0197	83706.88	0.0201	74683.45	0.0205	66987.89
0.01971	83462.69	0.02011	74476.04	0.02051	66810.24
0.01972	83219.53	0.02012	74269.46	0.02052	66633.26
0.01973	82977.38	0.02013	74063.7	0.02053	66456.95
0.01974	82736.25	0.02014	73858.75	0.02054	66281.29
0.01975	82496.11	0.02015	73654.61	0.02055	66106.3
0.01976	82256.98	0.02016	73451.27	0.02056	65931.96
0.01977	82018.84	0.02017	73248.73	0.02057	65758.27
0.01978	81781.69	0.02018	73046.99	0.02058	65585.23
0.01979	81545.52	0.02019	72846.04	0.02059	65412.84
0.0198	81310.33	0.0202	72645.88	0.0206	65241.09
0.01981	81076.11	0.02021	72446.5	0.02061	65069.98
0.01982	80842.85	0.02022	72247.9	0.02062	64899.51
0.01983	80610.56	0.02023	72050.08	0.02063	64729.67
0.01984	80379.22	0.02024	71853.02	0.02064	64560.46
0.01985	80148.84	0.02025	71656.74	0.02065	64391.88
0.01986	79919.4	0.02026	71461.22	0.02066	64223.92
0.01987	79690.9	0.02027	71266.46	0.02067	64056.58
0.01988	79463.33	0.02028	71072.45	0.02068	63889.86

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02069	63723.75	0.02109	57551.34	0.02149	52191.17
0.0207	63558.26	0.0211	57408.06	0.0215	52066.34
0.02071	63393.38	0.02111	57265.29	0.02151	51941.93
0.02072	63229.1	0.02112	57123.01	0.02152	51817.94
0.02073	63065.42	0.02113	56981.24	0.02153	51694.37
0.02074	62902.35	0.02114	56839.97	0.02154	51571.21
0.02075	62739.87	0.02115	56699.18	0.02155	51448.47
0.02076	62577.99	0.02116	56558.89	0.02156	51326.13
0.02077	62416.7	0.02117	56419.09	0.02157	51204.21
0.02078	62255.99	0.02118	56279.78	0.02158	51082.69
0.02079	62095.88	0.02119	56140.95	0.02159	50961.58
0.0208	61936.34	0.0212	56002.61	0.0216	50840.87
0.02081	61777.39	0.02121	55864.74	0.02161	50720.56
0.02082	61619.01	0.02122	55727.36	0.02162	50600.65
0.02083	61461.21	0.02123	55590.45	0.02163	50481.14
0.02084	61303.98	0.02124	55454.01	0.02164	50362.03
0.02085	61147.31	0.02125	55318.05	0.02165	50243.32
0.02086	60991.22	0.02126	55182.56	0.02166	50124.99
0.02087	60835.69	0.02127	55047.53	0.02167	50007.06
0.02088	60680.72	0.02128	54912.97	0.02168	49889.52
0.02089	60526.3	0.02129	54778.88	0.02169	49772.37
0.0209	60372.45	0.0213	54645.24	0.0217	49655.6
0.02091	60219.14	0.02131	54512.07	0.02171	49539.22
0.02092	60066.39	0.02132	54379.35	0.02172	49423.22
0.02093	59914.19	0.02133	54247.09	0.02173	49307.6
0.02094	59762.53	0.02134	54115.28	0.02174	49192.37
0.02095	59611.41	0.02135	53983.92	0.02175	49077.51
0.02096	59460.83	0.02136	53853.01	0.02176	48963.02
0.02097	59310.79	0.02137	53722.55	0.02177	48848.92
0.02098	59161.29	0.02138	53592.53	0.02178	48735.18
0.02099	59012.31	0.02139	53462.96	0.02179	48621.82
0.021	58863.87	0.0214	53333.83	0.0218	48508.83
0.02101	58715.96	0.02141	53205.13	0.02181	48396.21
0.02102	58568.57	0.02142	53076.88	0.02182	48283.95
0.02103	58421.7	0.02143	52949.06	0.02183	48172.06
0.02104	58275.35	0.02144	52821.67	0.02184	48060.54
0.02105	58129.52	0.02145	52694.71	0.02185	47949.37
0.02106	57984.21	0.02146	52568.19	0.02186	47838.57
0.02107	57839.41	0.02147	52442.09	0.02187	47728.13
0.02108	57695.12	0.02148	52316.42	0.02188	47618.04

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02189	47508.31	0.02229	43394.9	0.02269	39763.77
0.0219	47398.94	0.0223	43298.57	0.0227	39678.53
0.02191	47289.92	0.02231	43202.54	0.02271	39593.54
0.02192	47181.25	0.02232	43106.8	0.02272	39508.81
0.02193	47072.93	0.02233	43011.37	0.02273	39424.33
0.02194	46964.96	0.02234	42916.23	0.02274	39340.1
0.02195	46857.34	0.02235	42821.38	0.02275	39256.13
0.02196	46750.06	0.02236	42726.83	0.02276	39172.4
0.02197	46643.13	0.02237	42632.57	0.02277	39088.93
0.02198	46536.54	0.02238	42538.6	0.02278	39005.7
0.02199	46430.29	0.02239	42444.92	0.02279	38922.72
0.022	46324.38	0.0224	42351.53	0.0228	38839.99
0.02201	46218.82	0.02241	42258.43	0.02281	38757.5
0.02202	46113.58	0.02242	42165.61	0.02282	38675.26
0.02203	46008.69	0.02243	42073.08	0.02283	38593.26
0.02204	45904.13	0.02244	41980.84	0.02284	38511.5
0.02205	45799.9	0.02245	41888.87	0.02285	38429.99
0.02206	45696.01	0.02246	41797.19	0.02286	38348.72
0.02207	45592.44	0.02247	41705.79	0.02287	38267.68
0.02208	45489.2	0.02248	41614.67	0.02288	38186.89
0.02209	45386.3	0.02249	41523.82	0.02289	38106.33
0.0221	45283.71	0.0225	41433.26	0.0229	38026.01
0.02211	45181.46	0.02251	41342.97	0.02291	37945.93
0.02212	45079.52	0.02252	41252.95	0.02292	37866.08
0.02213	44977.91	0.02253	41163.21	0.02293	37786.47
0.02214	44876.62	0.02254	41073.74	0.02294	37707.09
0.02215	44775.65	0.02255	40984.55	0.02295	37627.95
0.02216	44675	0.02256	40895.62	0.02296	37549.03
0.02217	44574.66	0.02257	40806.97	0.02297	37470.35
0.02218	44474.64	0.02258	40718.58	0.02298	37391.9
0.02219	44374.94	0.02259	40630.47	0.02299	37313.68
0.0222	44275.55	0.0226	40542.61	0.023	37235.68
0.02221	44176.47	0.02261	40455.03	0.02301	37157.91
0.02222	44077.7	0.02262	40367.71	0.02302	37080.37
0.02223	43979.23	0.02263	40280.65	0.02303	37003.06
0.02224	43881.08	0.02264	40193.85	0.02304	36925.97
0.02225	43783.24	0.02265	40107.32	0.02305	36849.1
0.02226	43685.7	0.02266	40021.04	0.02306	36772.46
0.02227	43588.46	0.02267	39935.03	0.02307	36696.04
0.02228	43491.53	0.02268	39849.27	0.02308	36619.84

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02309	36543.86	0.02349	33676.7	0.02389	31113.82
0.0231	36468.11	0.0235	33609.1	0.0239	31053.28
0.02311	36392.57	0.02351	33541.7	0.02391	30992.91
0.02312	36317.25	0.02352	33474.48	0.02392	30932.7
0.02313	36242.14	0.02353	33407.44	0.02393	30872.65
0.02314	36167.26	0.02354	33340.6	0.02394	30812.76
0.02315	36092.59	0.02355	33273.94	0.02395	30753.04
0.02316	36018.13	0.02356	33207.47	0.02396	30693.48
0.02317	35943.89	0.02357	33141.18	0.02397	30634.07
0.02318	35869.86	0.02358	33075.08	0.02398	30574.83
0.02319	35796.05	0.02359	33009.16	0.02399	30515.75
0.0232	35722.45	0.0236	32943.42	0.024	30456.83
0.02321	35649.05	0.02361	32877.87	0.02401	30398.06
0.02322	35575.87	0.02362	32812.49	0.02402	30339.45
0.02323	35502.9	0.02363	32747.3	0.02403	30281
0.02324	35430.14	0.02364	32682.29	0.02404	30222.71
0.02325	35357.58	0.02365	32617.46	0.02405	30164.57
0.02326	35285.23	0.02366	32552.81	0.02406	30106.59
0.02327	35213.09	0.02367	32488.34	0.02407	30048.76
0.02328	35141.16	0.02368	32424.04	0.02408	29991.09
0.02329	35069.43	0.02369	32359.92	0.02409	29933.57
0.0233	34997.9	0.0237	32295.98	0.0241	29876.21
0.02331	34926.58	0.02371	32232.21	0.02411	29819
0.02332	34855.45	0.02372	32168.62	0.02412	29761.94
0.02333	34784.54	0.02373	32105.21	0.02413	29705.03
0.02334	34713.82	0.02374	32041.97	0.02414	29648.27
0.02335	34643.3	0.02375	31978.9	0.02415	29591.67
0.02336	34572.98	0.02376	31916	0.02416	29535.21
0.02337	34502.86	0.02377	31853.28	0.02417	29478.91
0.02338	34432.94	0.02378	31790.73	0.02418	29422.75
0.02339	34363.22	0.02379	31728.35	0.02419	29366.75
0.0234	34293.7	0.0238	31666.14	0.0242	29310.89
0.02341	34224.37	0.02381	31604.1	0.02421	29255.18
0.02342	34155.23	0.02382	31542.23	0.02422	29199.62
0.02343	34086.29	0.02383	31480.52	0.02423	29144.2
0.02344	34017.55	0.02384	31418.99	0.02424	29088.93
0.02345	33948.99	0.02385	31357.62	0.02425	29033.81
0.02346	33880.63	0.02386	31296.42	0.02426	28978.83
0.02347	33812.46	0.02387	31235.39	0.02427	28923.99
0.02348	33744.49	0.02388	31174.52	0.02428	28869.3

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02429	28814.76	0.02469	26745.52	0.02509	24877.35
0.0243	28760.36	0.0247	26696.47	0.0251	24833
0.02431	28706.1	0.02471	26647.55	0.02511	24788.76
0.02432	28651.98	0.02472	26598.76	0.02512	24744.64
0.02433	28598	0.02473	26550.08	0.02513	24700.62
0.02434	28544.17	0.02474	26501.54	0.02514	24656.71
0.02435	28490.48	0.02475	26453.11	0.02515	24612.91
0.02436	28436.93	0.02476	26404.81	0.02516	24569.21
0.02437	28383.51	0.02477	26356.63	0.02517	24525.63
0.02438	28330.24	0.02478	26308.58	0.02518	24482.15
0.02439	28277.11	0.02479	26260.64	0.02519	24438.78
0.0244	28224.11	0.0248	26212.83	0.0252	24395.51
0.02441	28171.25	0.02481	26165.14	0.02521	24352.36
0.02442	28118.54	0.02482	26117.57	0.02522	24309.3
0.02443	28065.95	0.02483	26070.12	0.02523	24266.36
0.02444	28013.51	0.02484	26022.79	0.02524	24223.52
0.02445	27961.2	0.02485	25975.57	0.02525	24180.78
0.02446	27909.03	0.02486	25928.48	0.02526	24138.15
0.02447	27856.99	0.02487	25881.51	0.02527	24095.63
0.02448	27805.09	0.02488	25834.65	0.02528	24053.2
0.02449	27753.32	0.02489	25787.92	0.02529	24010.89
0.0245	27701.68	0.0249	25741.3	0.0253	23968.67
0.02451	27650.18	0.02491	25694.79	0.02531	23926.56
0.02452	27598.81	0.02492	25648.41	0.02532	23884.55
0.02453	27547.58	0.02493	25602.14	0.02533	23842.64
0.02454	27496.48	0.02494	25555.98	0.02534	23800.84
0.02455	27445.51	0.02495	25509.94	0.02535	23759.14
0.02456	27394.67	0.02496	25464.02	0.02536	23717.54
0.02457	27343.96	0.02497	25418.21	0.02537	23676.04
0.02458	27293.38	0.02498	25372.52	0.02538	23634.64
0.02459	27242.93	0.02499	25326.94	0.02539	23593.34
0.0246	27192.61	0.025	25281.48	0.0254	23552.14
0.02461	27142.43	0.02501	25236.12	0.02541	23511.04
0.02462	27092.37	0.02502	25190.88	0.02542	23470.05
0.02463	27042.43	0.02503	25145.76	0.02543	23429.15
0.02464	26992.63	0.02504	25100.74	0.02544	23388.35
0.02465	26942.95	0.02505	25055.84	0.02545	23347.65
0.02466	26893.4	0.02506	25011.05	0.02546	23307.04
0.02467	26843.98	0.02507	24966.37	0.02547	23266.54
0.02468	26794.69	0.02508	24921.81	0.02548	23226.13

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02549	23185.82	0.02589	21650.07	0.02629	20252.16
0.0255	23145.61	0.0259	21613.51	0.0263	20218.84
0.02551	23105.5	0.02591	21577.04	0.02631	20185.59
0.02552	23065.48	0.02592	21540.65	0.02632	20152.43
0.02553	23025.56	0.02593	21504.35	0.02633	20119.33
0.02554	22985.73	0.02594	21468.13	0.02634	20086.32
0.02555	22946	0.02595	21432	0.02635	20053.38
0.02556	22906.36	0.02596	21395.95	0.02636	20020.51
0.02557	22866.82	0.02597	21359.98	0.02637	19987.72
0.02558	22827.38	0.02598	21324.1	0.02638	19955
0.02559	22788.03	0.02599	21288.31	0.02639	19922.36
0.0256	22748.77	0.026	21252.6	0.0264	19889.79
0.02561	22709.61	0.02601	21216.97	0.02641	19857.3
0.02562	22670.54	0.02602	21181.42	0.02642	19824.88
0.02563	22631.56	0.02603	21145.96	0.02643	19792.53
0.02564	22592.68	0.02604	21110.58	0.02644	19760.26
0.02565	22553.89	0.02605	21075.28	0.02645	19728.06
0.02566	22515.2	0.02606	21040.06	0.02646	19695.93
0.02567	22476.59	0.02607	21004.93	0.02647	19663.87
0.02568	22438.08	0.02608	20969.87	0.02648	19631.89
0.02569	22399.66	0.02609	20934.9	0.02649	19599.98
0.0257	22361.33	0.0261	20900.01	0.0265	19568.14
0.02571	22323.09	0.02611	20865.2	0.02651	19536.38
0.02572	22284.94	0.02612	20830.47	0.02652	19504.68
0.02573	22246.88	0.02613	20795.82	0.02653	19473.06
0.02574	22208.92	0.02614	20761.25	0.02654	19441.51
0.02575	22171.04	0.02615	20726.76	0.02655	19410.03
0.02576	22133.25	0.02616	20692.35	0.02656	19378.62
0.02577	22095.56	0.02617	20658.02	0.02657	19347.28
0.02578	22057.95	0.02618	20623.77	0.02658	19316.01
0.02579	22020.43	0.02619	20589.59	0.02659	19284.81
0.0258	21983	0.0262	20555.5	0.0266	19253.68
0.02581	21945.66	0.02621	20521.49	0.02661	19222.62
0.02582	21908.4	0.02622	20487.55	0.02662	19191.63
0.02583	21871.23	0.02623	20453.69	0.02663	19160.71
0.02584	21834.16	0.02624	20419.91	0.02664	19129.86
0.02585	21797.16	0.02625	20386.2	0.02665	19099.08
0.02586	21760.26	0.02626	20352.58	0.02666	19068.37
0.02587	21723.44	0.02627	20319.03	0.02667	19037.72
0.02588	21686.71	0.02628	20285.55	0.02668	19007.15

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02669	18976.64	0.02709	17810.14	0.02749	16741.02
0.0267	18946.2	0.0271	17782.27	0.0275	16715.44
0.02671	18915.83	0.02711	17754.46	0.02751	16689.93
0.02672	18885.53	0.02712	17726.71	0.02752	16664.47
0.02673	18855.29	0.02713	17699.02	0.02753	16639.06
0.02674	18825.12	0.02714	17671.39	0.02754	16613.7
0.02675	18795.02	0.02715	17643.83	0.02755	16588.4
0.02676	18764.98	0.02716	17616.32	0.02756	16563.15
0.02677	18735.02	0.02717	17588.87	0.02757	16537.96
0.02678	18705.11	0.02718	17561.48	0.02758	16512.82
0.02679	18675.28	0.02719	17534.15	0.02759	16487.73
0.0268	18645.51	0.0272	17506.88	0.0276	16462.7
0.02681	18615.8	0.02721	17479.66	0.02761	16437.72
0.02682	18586.17	0.02722	17452.51	0.02762	16412.79
0.02683	18556.59	0.02723	17425.42	0.02763	16387.91
0.02684	18527.09	0.02724	17398.38	0.02764	16363.09
0.02685	18497.65	0.02725	17371.4	0.02765	16338.32
0.02686	18468.27	0.02726	17344.48	0.02766	16313.6
0.02687	18438.96	0.02727	17317.62	0.02767	16288.93
0.02688	18409.71	0.02728	17290.82	0.02768	16264.31
0.02689	18380.53	0.02729	17264.07	0.02769	16239.75
0.0269	18351.41	0.0273	17237.38	0.0277	16215.24
0.02691	18322.36	0.02731	17210.75	0.02771	16190.78
0.02692	18293.36	0.02732	17184.18	0.02772	16166.37
0.02693	18264.44	0.02733	17157.66	0.02773	16142.01
0.02694	18235.58	0.02734	17131.2	0.02774	16117.7
0.02695	18206.78	0.02735	17104.8	0.02775	16093.44
0.02696	18178.04	0.02736	17078.45	0.02776	16069.24
0.02697	18149.37	0.02737	17052.16	0.02777	16045.08
0.02698	18120.76	0.02738	17025.92	0.02778	16020.98
0.02699	18092.21	0.02739	16999.75	0.02779	15996.93
0.027	18063.72	0.0274	16973.62	0.0278	15972.92
0.02701	18035.3	0.02741	16947.56	0.02781	15948.97
0.02702	18006.94	0.02742	16921.55	0.02782	15925.06
0.02703	17978.64	0.02743	16895.59	0.02783	15901.21
0.02704	17950.4	0.02744	16869.69	0.02784	15877.41
0.02705	17922.23	0.02745	16843.85	0.02785	15853.65
0.02706	17894.11	0.02746	16818.06	0.02786	15829.95
0.02707	17866.06	0.02747	16792.32	0.02787	15806.29
0.02708	17838.07	0.02748	16766.64	0.02788	15782.68

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02789	15759.13	0.02829	14855.58	0.02869	14022.58
0.0279	15735.62	0.0283	14833.93	0.0287	14002.6
0.02791	15712.16	0.02831	14812.32	0.02871	13982.66
0.02792	15688.75	0.02832	14790.75	0.02872	13962.75
0.02793	15665.38	0.02833	14769.23	0.02873	13942.89
0.02794	15642.07	0.02834	14747.75	0.02874	13923.07
0.02795	15618.8	0.02835	14726.31	0.02875	13903.28
0.02796	15595.58	0.02836	14704.92	0.02876	13883.53
0.02797	15572.41	0.02837	14683.57	0.02877	13863.83
0.02798	15549.29	0.02838	14662.27	0.02878	13844.16
0.02799	15526.22	0.02839	14641	0.02879	13824.53
0.028	15503.19	0.0284	14619.78	0.0288	13804.94
0.02801	15480.21	0.02841	14598.6	0.02881	13785.39
0.02802	15457.28	0.02842	14577.47	0.02882	13765.88
0.02803	15434.39	0.02843	14556.38	0.02883	13746.4
0.02804	15411.56	0.02844	14535.33	0.02884	13726.96
0.02805	15388.77	0.02845	14514.32	0.02885	13707.57
0.02806	15366.02	0.02846	14493.36	0.02886	13688.21
0.02807	15343.33	0.02847	14472.43	0.02887	13668.88
0.02808	15320.68	0.02848	14451.55	0.02888	13649.6
0.02809	15298.07	0.02849	14430.71	0.02889	13630.35
0.0281	15275.51	0.0285	14409.92	0.0289	13611.15
0.02811	15253	0.02851	14389.16	0.02891	13591.98
0.02812	15230.54	0.02852	14368.45	0.02892	13572.84
0.02813	15208.12	0.02853	14347.78	0.02893	13553.75
0.02814	15185.75	0.02854	14327.15	0.02894	13534.69
0.02815	15163.42	0.02855	14306.56	0.02895	13515.67
0.02816	15141.14	0.02856	14286.01	0.02896	13496.69
0.02817	15118.9	0.02857	14265.5	0.02897	13477.74
0.02818	15096.71	0.02858	14245.03	0.02898	13458.83
0.02819	15074.57	0.02859	14224.61	0.02899	13439.96
0.0282	15052.47	0.0286	14204.23	0.029	13421.12
0.02821	15030.41	0.02861	14183.88	0.02901	13402.33
0.02822	15008.4	0.02862	14163.58	0.02902	13383.56
0.02823	14986.44	0.02863	14143.32	0.02903	13364.84
0.02824	14964.52	0.02864	14123.09	0.02904	13346.15
0.02825	14942.64	0.02865	14102.91	0.02905	13327.5
0.02826	14920.81	0.02866	14082.77	0.02906	13308.88
0.02827	14899.02	0.02867	14062.67	0.02907	13290.3
0.02828	14877.28	0.02868	14042.6	0.02908	13271.76

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.02909	13253.25	0.02949	12541.51	0.02989	11881.98
0.0291	13234.78	0.0295	12524.41	0.0299	11866.11
0.02911	13216.34	0.02951	12507.33	0.02991	11850.28
0.02912	13197.94	0.02952	12490.3	0.02992	11834.48
0.02913	13179.58	0.02953	12473.29	0.02993	11818.7
0.02914	13161.25	0.02954	12456.32	0.02994	11802.96
0.02915	13142.96	0.02955	12439.37	0.02995	11787.25
0.02916	13124.7	0.02956	12422.46	0.02996	11771.56
0.02917	13106.48	0.02957	12405.59	0.02997	11755.9
0.02918	13088.29	0.02958	12388.74	0.02998	11740.28
0.02919	13070.14	0.02959	12371.93	0.02999	11724.68
0.0292	13052.02	0.0296	12355.15	0.03	11709.11
0.02921	13033.94	0.02961	12338.4	0.03001	11693.57
0.02922	13015.89	0.02962	12321.68	0.03002	11678.05
0.02923	12997.88	0.02963	12304.99	0.03003	11662.57
0.02924	12979.9	0.02964	12288.33	0.03004	11647.12
0.02925	12961.96	0.02965	12271.71	0.03005	11631.69
0.02926	12944.05	0.02966	12255.12	0.03006	11616.29
0.02927	12926.18	0.02967	12238.56	0.03007	11600.92
0.02928	12908.34	0.02968	12222.03	0.03008	11585.58
0.02929	12890.53	0.02969	12205.53	0.03009	11570.27
0.0293	12872.76	0.0297	12189.06	0.0301	11554.99
0.02931	12855.02	0.02971	12172.62	0.03011	11539.73
0.02932	12837.32	0.02972	12156.22	0.03012	11524.5
0.02933	12819.65	0.02973	12139.84	0.03013	11509.3
0.02934	12802.02	0.02974	12123.5	0.03014	11494.13
0.02935	12784.42	0.02975	12107.18	0.03015	11478.99
0.02936	12766.85	0.02976	12090.9	0.03016	11463.87
0.02937	12749.32	0.02977	12074.65	0.03017	11448.78
0.02938	12731.82	0.02978	12058.43	0.03018	11433.72
0.02939	12714.35	0.02979	12042.24	0.03019	11418.69
0.0294	12696.92	0.0298	12026.07	0.0302	11403.68
0.02941	12679.52	0.02981	12009.94	0.03021	11388.71
0.02942	12662.15	0.02982	11993.84	0.03022	11373.76
0.02943	12644.82	0.02983	11977.77	0.03023	11358.83
0.02944	12627.52	0.02984	11961.73	0.03024	11343.94
0.02945	12610.25	0.02985	11945.72	0.03025	11329.07
0.02946	12593.02	0.02986	11929.74	0.03026	11314.23
0.02947	12575.81	0.02987	11913.79	0.03027	11299.41
0.02948	12558.64	0.02988	11897.87	0.03028	11284.63

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.03029	11269.87	0.03069	10700.92	0.03109	10171.34
0.0303	11255.13	0.0307	10687.22	0.0311	10158.57
0.03031	11240.43	0.03071	10673.54	0.03111	10145.83
0.03032	11225.75	0.03072	10659.88	0.03112	10133.11
0.03033	11211.1	0.03073	10646.25	0.03113	10120.41
0.03034	11196.47	0.03074	10632.64	0.03114	10107.73
0.03035	11181.87	0.03075	10619.06	0.03115	10095.08
0.03036	11167.3	0.03076	10605.5	0.03116	10082.45
0.03037	11152.75	0.03077	10591.97	0.03117	10069.84
0.03038	11138.23	0.03078	10578.46	0.03118	10057.25
0.03039	11123.74	0.03079	10564.98	0.03119	10044.69
0.0304	11109.27	0.0308	10551.51	0.0312	10032.14
0.03041	11094.83	0.03081	10538.08	0.03121	10019.62
0.03042	11080.42	0.03082	10524.66	0.03122	10007.12
0.03043	11066.03	0.03083	10511.27	0.03123	9994.642
0.03044	11051.67	0.03084	10497.91	0.03124	9982.185
0.03045	11037.33	0.03085	10484.56	0.03125	9969.751
0.03046	11023.02	0.03086	10471.25	0.03126	9957.338
0.03047	11008.74	0.03087	10457.95	0.03127	9944.946
0.03048	10994.48	0.03088	10444.68	0.03128	9932.577
0.03049	10980.25	0.03089	10431.43	0.03129	9920.228
0.0305	10966.04	0.0309	10418.21	0.0313	9907.902
0.03051	10951.86	0.03091	10405.01	0.03131	9895.596
0.03052	10937.7	0.03092	10391.83	0.03132	9883.312
0.03053	10923.57	0.03093	10378.67	0.03133	9871.05
0.03054	10909.47	0.03094	10365.54	0.03134	9858.808
0.03055	10895.39	0.03095	10352.44	0.03135	9846.588
0.03056	10881.34	0.03096	10339.35	0.03136	9834.389
0.03057	10867.31	0.03097	10326.29	0.03137	9822.212
0.03058	10853.3	0.03098	10313.25	0.03138	9810.055
0.03059	10839.33	0.03099	10300.24	0.03139	9797.919
0.0306	10825.37	0.031	10287.24	0.0314	9785.805
0.03061	10811.45	0.03101	10274.27	0.03141	9773.711
0.03062	10797.54	0.03102	10261.33	0.03142	9761.638
0.03063	10783.67	0.03103	10248.4	0.03143	9749.587
0.03064	10769.81	0.03104	10235.5	0.03144	9737.556
0.03065	10755.99	0.03105	10222.63	0.03145	9725.545
0.03066	10742.18	0.03106	10209.77	0.03146	9713.556
0.03067	10728.4	0.03107	10196.94	0.03147	9701.587
0.03068	10714.65	0.03108	10184.13	0.03148	9689.639

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.03149	9677.711	0.03189	9216.988	0.03229	8786.427
0.0315	9665.804	0.0319	9205.868	0.0323	8776.027
0.03151	9653.917	0.03191	9194.766	0.03231	8765.645
0.03152	9642.051	0.03192	9183.682	0.03232	8755.28
0.03153	9630.206	0.03193	9172.618	0.03233	8744.932
0.03154	9618.38	0.03194	9161.572	0.03234	8734.601
0.03155	9606.575	0.03195	9150.545	0.03235	8724.288
0.03156	9594.791	0.03196	9139.536	0.03236	8713.991
0.03157	9583.026	0.03197	9128.546	0.03237	8703.712
0.03158	9571.282	0.03198	9117.574	0.03238	8693.449
0.03159	9559.558	0.03199	9106.621	0.03239	8683.204
0.0316	9547.854	0.032	9095.687	0.0324	8672.975
0.03161	9536.17	0.03201	9084.77	0.03241	8662.764
0.03162	9524.506	0.03202	9073.872	0.03242	8652.569
0.03163	9512.862	0.03203	9062.993	0.03243	8642.391
0.03164	9501.238	0.03204	9052.132	0.03244	8632.23
0.03165	9489.634	0.03205	9041.288	0.03245	8622.085
0.03166	9478.049	0.03206	9030.464	0.03246	8611.957
0.03167	9466.485	0.03207	9019.657	0.03247	8601.846
0.03168	9454.94	0.03208	9008.868	0.03248	8591.752
0.03169	9443.415	0.03209	8998.098	0.03249	8581.674
0.0317	9431.91	0.0321	8987.345	0.0325	8571.613
0.03171	9420.424	0.03211	8976.611	0.03251	8561.568
0.03172	9408.958	0.03212	8965.894	0.03252	8551.54
0.03173	9397.511	0.03213	8955.196	0.03253	8541.529
0.03174	9386.084	0.03214	8944.515	0.03254	8531.533
0.03175	9374.676	0.03215	8933.852	0.03255	8521.555
0.03176	9363.288	0.03216	8923.207	0.03256	8511.592
0.03177	9351.919	0.03217	8912.58	0.03257	8501.646
0.03178	9340.57	0.03218	8901.971	0.03258	8491.716
0.03179	9329.239	0.03219	8891.379	0.03259	8481.803
0.0318	9317.928	0.0322	8880.805	0.0326	8471.906
0.03181	9306.636	0.03221	8870.248	0.03261	8462.025
0.03182	9295.364	0.03222	8859.709	0.03262	8452.16
0.03183	9284.11	0.03223	8849.188	0.03263	8442.311
0.03184	9272.876	0.03224	8838.684	0.03264	8432.478
0.03185	9261.66	0.03225	8828.198	0.03265	8422.662
0.03186	9250.464	0.03226	8817.729	0.03266	8412.861
0.03187	9239.287	0.03227	8807.278	0.03267	8403.077
0.03188	9228.128	0.03228	8796.843	0.03268	8393.308

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.03269	8383.555	0.03309	8006.145	0.03349	7652.182
0.0327	8373.819	0.0331	7997.018	0.0335	7643.617
0.03271	8364.098	0.03311	7987.906	0.03351	7635.066
0.03272	8354.393	0.03312	7978.808	0.03352	7626.528
0.03273	8344.703	0.03313	7969.725	0.03353	7618.003
0.03274	8335.03	0.03314	7960.657	0.03354	7609.492
0.03275	8325.372	0.03315	7951.603	0.03355	7600.994
0.03276	8315.73	0.03316	7942.563	0.03356	7592.51
0.03277	8306.104	0.03317	7933.538	0.03357	7584.039
0.03278	8296.493	0.03318	7924.527	0.03358	7575.581
0.03279	8286.898	0.03319	7915.531	0.03359	7567.137
0.0328	8277.318	0.0332	7906.549	0.0336	7558.705
0.03281	8267.754	0.03321	7897.581	0.03361	7550.287
0.03282	8258.206	0.03322	7888.627	0.03362	7541.882
0.03283	8248.673	0.03323	7879.688	0.03363	7533.491
0.03284	8239.155	0.03324	7870.763	0.03364	7525.112
0.03285	8229.653	0.03325	7861.852	0.03365	7516.747
0.03286	8220.167	0.03326	7852.956	0.03366	7508.394
0.03287	8210.695	0.03327	7844.073	0.03367	7500.055
0.03288	8201.239	0.03328	7835.205	0.03368	7491.729
0.03289	8191.798	0.03329	7826.351	0.03369	7483.415
0.0329	8182.373	0.0333	7817.511	0.0337	7475.115
0.03291	8172.962	0.03331	7808.685	0.03371	7466.828
0.03292	8163.567	0.03332	7799.873	0.03372	7458.553
0.03293	8154.187	0.03333	7791.074	0.03373	7450.292
0.03294	8144.823	0.03334	7782.29	0.03374	7442.043
0.03295	8135.473	0.03335	7773.52	0.03375	7433.807
0.03296	8126.138	0.03336	7764.763	0.03376	7425.584
0.03297	8116.819	0.03337	7756.021	0.03377	7417.374
0.03298	8107.514	0.03338	7747.292	0.03378	7409.176
0.03299	8098.224	0.03339	7738.577	0.03379	7400.992
0.033	8088.95	0.0334	7729.876	0.0338	7392.82
0.03301	8079.69	0.03341	7721.189	0.03381	7384.66
0.03302	8070.445	0.03342	7712.515	0.03382	7376.514
0.03303	8061.215	0.03343	7703.855	0.03383	7368.38
0.03304	8052	0.03344	7695.209	0.03384	7360.258
0.03305	8042.8	0.03345	7686.576	0.03385	7352.15
0.03306	8033.614	0.03346	7677.957	0.03386	7344.053
0.03307	8024.443	0.03347	7669.352	0.03387	7335.97
0.03308	8015.287	0.03348	7660.76	0.03388	7327.899

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D} = 0.000223$(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.03389	7319.84	0.03429	7007.465	0.03469	6713.552
0.0339	7311.794	0.0343	6999.898	0.0347	6706.429
0.03391	7303.76	0.03431	6992.342	0.03471	6699.316
0.03392	7295.739	0.03432	6984.799	0.03472	6692.214
0.03393	7287.73	0.03433	6977.266	0.03473	6685.122
0.03394	7279.733	0.03434	6969.745	0.03474	6678.042
0.03395	7271.749	0.03435	6962.236	0.03475	6670.971
0.03396	7263.777	0.03436	6954.738	0.03476	6663.912
0.03397	7255.818	0.03437	6947.251	0.03477	6656.862
0.03398	7247.87	0.03438	6939.775	0.03478	6649.824
0.03399	7239.935	0.03439	6932.311	0.03479	6642.796
0.034	7232.013	0.0344	6924.859	0.0348	6635.778
0.03401	7224.102	0.03441	6917.417	0.03481	6628.771
0.03402	7216.204	0.03442	6909.987	0.03482	6621.774
0.03403	7208.317	0.03443	6902.568	0.03483	6614.787
0.03404	7200.443	0.03444	6895.16	0.03484	6607.811
0.03405	7192.581	0.03445	6887.764	0.03485	6600.846
0.03406	7184.731	0.03446	6880.378	0.03486	6593.89
0.03407	7176.893	0.03447	6873.004	0.03487	6586.946
0.03408	7169.068	0.03448	6865.641	0.03488	6580.011
0.03409	7161.254	0.03449	6858.289	0.03489	6573.087
0.0341	7153.452	0.0345	6850.948	0.0349	6566.173
0.03411	7145.662	0.03451	6843.618	0.03491	6559.269
0.03412	7137.884	0.03452	6836.3	0.03492	6552.375
0.03413	7130.118	0.03453	6828.992	0.03493	6545.492
0.03414	7122.364	0.03454	6821.695	0.03494	6538.619
0.03415	7114.622	0.03455	6814.41	0.03495	6531.756
0.03416	7106.892	0.03456	6807.135	0.03496	6524.903
0.03417	7099.173	0.03457	6799.871	0.03497	6518.061
0.03418	7091.466	0.03458	6792.618	0.03498	6511.228
0.03419	7083.771	0.03459	6785.376	0.03499	6504.406
0.0342	7076.088	0.0346	6778.145	0.035	6497.593
0.03421	7068.417	0.03461	6770.925	0.03501	6490.791
0.03422	7060.757	0.03462	6763.716	0.03502	6483.999
0.03423	7053.109	0.03463	6756.517	0.03503	6477.217
0.03424	7045.472	0.03464	6749.329	0.03504	6470.445
0.03425	7037.848	0.03465	6742.152	0.03505	6463.682
0.03426	7030.235	0.03466	6734.986	0.03506	6456.93
0.03427	7022.633	0.03467	6727.831	0.03507	6450.188
0.03428	7015.043	0.03468	6720.686	0.03508	6443.456

ตาราง ข.6 แสดงค่า Re เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานทางทฤษฎีที่ $\frac{e}{D}$ = 0.000223(ต่อ)

f	Re	f	Re	f	Re
0.03509	6436.733	0.03549	6175.761	0.03589	5929.496
0.0351	6430.021	0.0355	6169.43	0.0359	5923.519
0.03511	6423.318	0.03551	6163.107	0.03591	5917.55
0.03512	6416.626	0.03552	6156.794	0.03592	5911.59
0.03513	6409.943	0.03553	6150.491	0.03593	5905.638
0.03514	6403.27	0.03554	6144.196	0.03594	5899.694
0.03515	6396.606	0.03555	6137.91	0.03595	5893.759
0.03516	6389.953	0.03556	6131.634	0.03596	5887.833
0.03517	6383.309	0.03557	6125.366	0.03597	5881.915
0.03518	6376.675	0.03558	6119.108	0.03598	5876.005
0.03519	6370.051	0.03559	6112.858	0.03599	5870.104
0.0352	6363.436	0.0356	6106.618	0.036	5864.211
0.03521	6356.832	0.03561	6100.386	0.03601	5858.327
0.03522	6350.236	0.03562	6094.164	0.03602	5852.45
0.03523	6343.651	0.03563	6087.951	0.03603	5846.583
0.03524	6337.075	0.03564	6081.746	0.03604	5840.723
0.03525	6330.509	0.03565	6075.551	0.03605	5834.872
0.03526	6323.952	0.03566	6069.364	0.03606	5829.029
0.03527	6317.405	0.03567	6063.186	0.03607	5823.195
0.03528	6310.868	0.03568	6057.017	0.03608	5817.368
0.03529	6304.34	0.03569	6050.857	0.03609	5811.55
0.0353	6297.822	0.0357	6044.706	0.0361	5805.74
0.03531	6291.313	0.03571	6038.564	0.03611	5799.939
0.03532	6284.813	0.03572	6032.431	0.03612	5794.145
0.03533	6278.324	0.03573	6026.306	0.03613	5788.36
0.03534	6271.843	0.03574	6020.19	0.03614	5782.583
0.03535	6265.372	0.03575	6014.083	0.03615	5776.814
0.03536	6258.911	0.03576	6007.985	0.03616	5771.053
0.03537	6252.459	0.03577	6001.895	0.03617	5765.301
0.03538	6246.016	0.03578	5995.814	0.03618	5759.556
0.03539	6239.582	0.03579	5989.742	0.03619	5753.82
0.0354	6233.159	0.0358	5983.679	0.0362	5748.091
0.03541	6226.744	0.03581	5977.624	0.03621	5742.371
0.03542	6220.339	0.03582	5971.578	0.03622	5736.659
0.03543	6213.943	0.03583	5965.54	0.03623	5730.955
0.03544	6207.556	0.03584	5959.511	0.03624	5725.259
0.03545	6201.178	0.03585	5953.491	0.03625	5719.57
0.03546	6194.81	0.03586	5947.48	0.03626	5713.89
0.03547	6188.451	0.03587	5941.477	0.03627	5708.218
0.03548	6182.101	0.03588	5935.482	0.03628	5702.554

ประวัติผู้จัดทำโครงงาน

ชื่อ	นายหิรัญ มาคำ
วันเดือนปีเกิด	22 กันยายน 2531
ภูมิลำเนา	76 หมู่ 7 ต. ไผ่เขียว อ.สว่างอารมณ์ จ.อุทัยธานี 61150
ประวัติการศึกษา	จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนบ้านทุ่งมน
	จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนสว่างอารมณ์วิทยาคม
	ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อ	นายชาญวิทย์ ภูจอม
วันเดือนปีเกิด	3 พฤศจิกายน 2531
ภูมิลำเนา	71/57 หมู่ 5 ต.ท่าทอง อ.เมือง จ. พิษณุโลก 65000
ประวัติการศึกษา	จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนโรจนวิทย์
	จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิษณุโลกพิทยาคม
	ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ชื่อ	นายภูษิต กิตติชัยยะ
วันเดือนปีเกิด	2 ธันวาคม 2531
ภูมิลำเนา	194 หมู่ 8 ต. แจ้ซ้อน อ.เมือง จ.ลำปาง 52240
ประวัติการศึกษา	จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนแจ้ซ้อนวิทยา
	จบมัธยมศึกษาจากโรงเรียนเมืองปานวิทยา
	ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก ค

แบบการนำเสนอโครงงาน

แบบเสนอโครงงานนิสิต

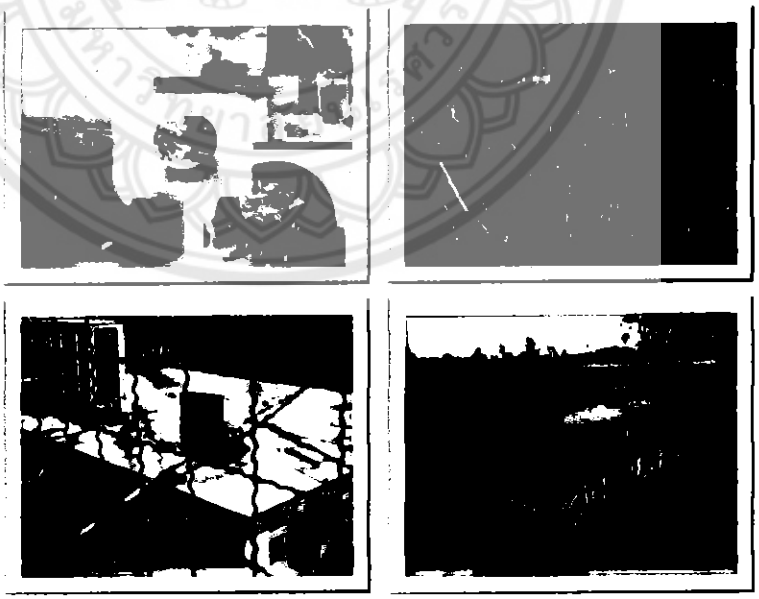
การเพิ่มประสิทธิภาพระบบการปั๊มน้ำโดยการเติมสารละลายพอลิเมอร์

(Water pumping enhancement by means of polymer addition)

นิสิตผู้ดำเนินโครงงาน	นาย กิรัญ	มหัน	รหัสนิสิต	50362856
	นาย ชาญวิทย์	กูออม	รหัสนิสิต	50364041
	นาย ภูษิต	กิตติชัยชะ	รหัสนิสิต	50364157

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน: อาจารย์อนันต์ชัย อยู่เย็น
อาจารย์ประจำภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ความสำคัญและที่มาของปัญหา



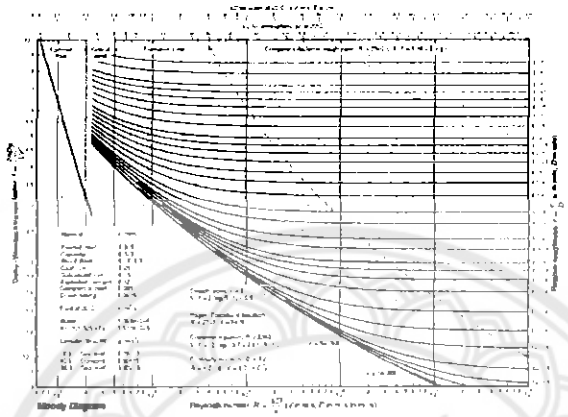
วัตถุประสงค์ของโครงงาน

- เพื่อทำการศึกษาผลกระทบของการใช้สารละลายพอลิเมอร์ที่มีต่อแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลในท่อและอัตราการไหล

ขอบเขต

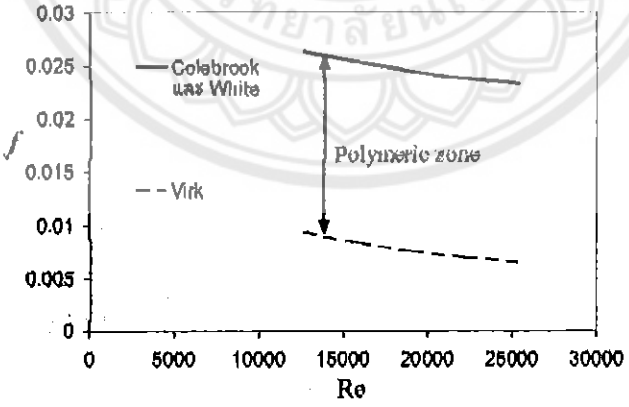
- ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการสูญเสียพลังงานหลักของการไหลในท่อ
- เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ที่มี Re ประมาณ 9000-30000
- ใช้น้ำประปาในการทดลองอุณหภูมิน้ำประมาณ 20-30 °C
- เป็นการไหลภายในท่อ PVC 3/4นิ้ว
- เป็นการไหลในระบบเปิด

การสูญเสียหลัก



$$h_f = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g}$$

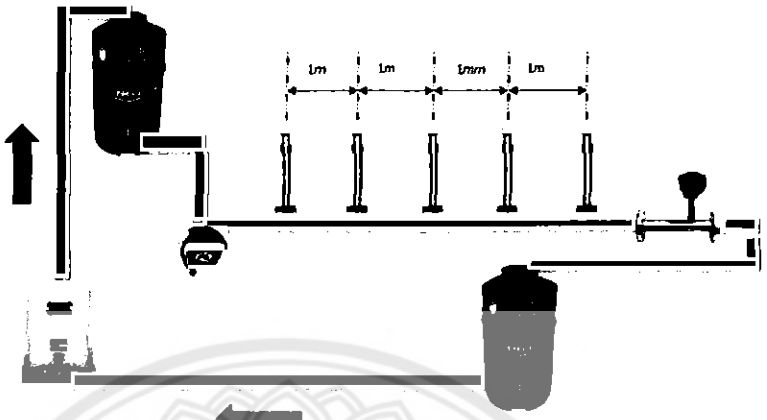
Polymeric zone



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

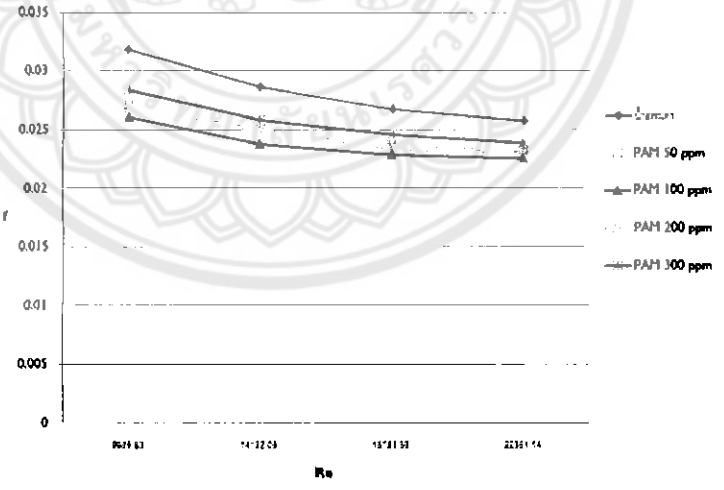
$$\frac{2}{\sqrt{f}} = 19.0\log\left(\frac{1}{2}Re\sqrt{f}\right) - 32.4$$

การออกแบบการทดลองและการทดลอง



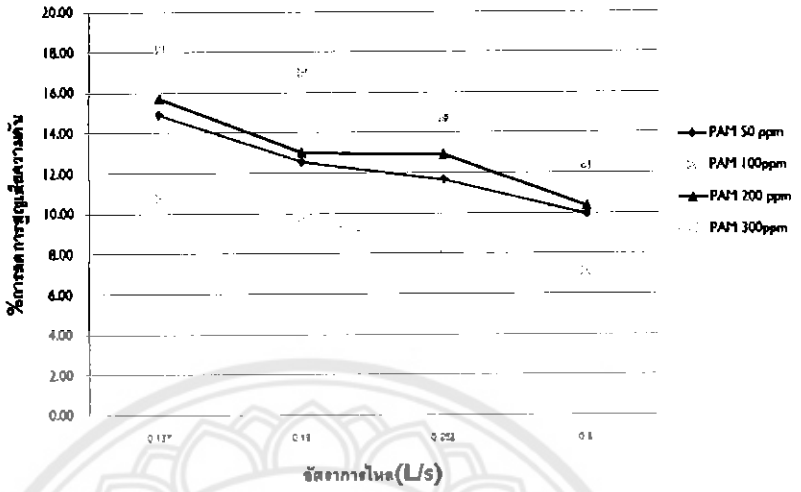
การจำลองระบบการปั๊มน้ำ

ผลการทดลอง



กราฟ แสดงแรงเฉือดทานเนื่องจากการไหลในท่อของการเติมสารละลายPAMที่ความเข้มข้นต่างๆ

ผลการทดลอง(ต่อ)



กราฟ %การลดการสูญเสียความดันที่อัตราการไหลต่างๆ

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาและทดลองสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของสารละลายพอลิเมอร์ Poly Acrylamide ที่เหมาะสมคือประมาณ 100ppm ซึ่งถ้าหากมากเกินกว่านี้ความสามารถในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อและการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะลดลงแต่ถ้าอัตราส่วนความเข้มข้นน้อยกว่า 100 ppm จะทำให้ความสามารถในการลดแรงเสียดทานเนื่องจากการไหลภายในท่อและการเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลก็จะมีค่าน้อยลงเช่นกัน

ข้อเสนอแนะ

- ทำการทดลองกับระบบปั๊มหมุนเวียน
- ทำการทดลองโดยการเติมสารละลายเอธิลเมอร์ด้วยวิธีและเทคนิคอื่นเช่นการผสมสารละลายเอธิลเมอร์ลงไปในถังเก็บน้ำ
- ถ้าสามารถลดความผิดพลาดจากเครื่องมือวัดผลโดยใช้เครื่องมือที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง

จบการนำเสนอ
ขอบพระคุณครับ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย