

Koefisien Gesek Pipa Kasar Dengan Biopolimer Guar Gum

Yanuar¹ dan Joko Sukamto²

¹Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia

²Fakultas Teknik dan Sains Universitas Nasional

Email: Yanuar@eng.ui.ac.id, Email: jokosukamto@yahoo.com

Abstrak

Aliran laminar dan turbulen dari larutan polimer guar gum (getah latex) untuk permukaan pipa mulus dan kasar telah diteliti. Eksperimen ini menggunakan pipa PVC berdiameter 25,4 mm, pipa tersebut dikasarkan menggunakan pasir dengan nilai kekasaran (k) 0,34, 0,8 dan 1,59 mm. Setiap pipa tersebut diuji dengan konsentrasi polimer guar gum 250, 500 dan 1000 ppm. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik aliran dipengaruhi oleh penambahan konsentrasi polimer dan tingkat kekasaran permukaan. Pada aliran transisi dan turbulen tanpa additive kenaikan koefisien gesek terjadi akibat dari kondisi kekasaran dinding. Penambahan additive ke dalam air terlihat efektif pada permukaan kasar. Penambahan 1000 ppm additive polimer guar gum pada bilangan Reynolds 2×10^4 dapat menurunkan gesekan pada pipa kasar ($k/D = 0,03$) sebesar 24 %, sedangkan dengan penambahan 250 ppm additive guar gum penurunan gesekannya 5 %.

Kata kunci : Aliran turbulen, polimer guar gum, kekasaran, koefisien gesek, ppm dan bilangan Reynolds.

Abstract

Laminar flow and turbulent of dilute polymer guar gum (latex) solutions in smooth and in rough pipes was studied. This experiment use in 25.4 mm of diameter pipe (PVC), which roughened by (k) 0,34, 0,8 and 1,59 mm roughness value of sand grain and 250, 500 and 1000 ppm for additive concentration. The results show that flow properties are influenced by polymer addition and surface roughness. In the transition and turbulent flow regime without additive, the increasing of friction coefficient appeared to be effected by wall condition alone. Addition of polymer to water is effective for rough pipe. For example with addition of 1000 ppm of polymer reduced drag in $k/D = 0,03$ rough pipe by 24 percent at Reynolds number 2×10^4 , whereas in 250 ppm addition tested drag was reduced only 5 percent

Keywords: Turbulent flow, dilute polymer guar gum, roughness, friction coefficient, ppm and Reynolds number.

1. Pendahuluan

Aliran turbulen dengan modifikasi polimer telah mendapat banyak perhatian pada dekade yang lalu untuk kepentingan teknis maupun industri [1]. Studi yang dilakukan akhir-akhir ini menunjukkan bahwa aliran-aliran ini sangatlah rumit. Untuk memanfaatkan larutan polimer yang unik secara efektif penelitian dasar perlu dilakukan untuk menggambarkan mekanisme dari penurunan gesekan pada aliran turbulen, juga untuk melengkapi data hasil eksperimen yang diharapkan data tersebut dapat digunakan untuk aplikasi

yang lain. Berbagai pengujian menunjukkan bahwa *poly(ethylene oxide)* yang berbobot molekul besar adalah polimer paling efektif untuk mereduksi drag. Pereduksian gesekan sampai 40% pernah dicatat pada pipa aliran dengan konsentrasi polimer rendah. Sifat densitas dan viskositas larutan ini tidak dapat dibedakan dengan air. Pada konsentrasi 25 ppm, Fabula [1966] mendapatkan 75% reduksi drag dalam pipa berdiameter dalam 1,02 inchi pada bilangan Reynolds 10^5 . Meskipun banyak penelitian telah dilakukan dengan larutan sangat encer *poly* kiranya menarik untuk dicatat bahwa eksperimen oleh E. D. Swanson dari Naval

Undersea Center yang menunjukkan reduksi drag untuk larutan *Polyox WSR-301* dalam jangkauan ribuan ppm. Reduksi drag terbukti dengan jelas pada konsentrasi larutan sampai 7800 ppm. Masih banyak material lain yang dipakai untuk menghasilkan sifat reduksi drag pada pelarutnya.

Tabel 1.
Literatur Pasangan Polimer-Pelarut [2]

Polimer	Pelarut
Flax meal	Air laut
Hydroxyethylcellulose (H)	Air murni
Polyisobutylene	Cyclohexane
Poly(methyl methacrylate)	Toluene
Polyisobutylene	Minyak mentah
Polyisobutylene	Kerosene
Proprietary	Fluida hidrolis
Cetyrylmethylammonium bromide – 1-naphthol	Air murni

Data tersebut menunjukkan bahwa banyak pasangan polimer-pelarut dapat mengurangi koefisien gesek aliran dalam pipa dibandingkan hanya dengan memakai pelarut murni. Studi tentang kemampuan reduksi drag polimer-polimer ini telah menuntun ke arah kesimpulan bahwa beberapa substansi makromolekular yang memiliki bobot molekul besar 50.000 atau lebih dan biasanya strukturnya linear akan menghasilkan karakteristik gesekan lebih rendah untuk pelarutnya [3],[4].

Guar gum adalah *polysaccharide* kompleks yang diturunkan dari *Cyamopsis tetragonolagus*, yaitu sebuah tanaman karet (getah karet) yang sering dijadikan makanan tambahan dan bahan pengental. Dalam teknologi perminyakan, getah alami ini dipakai sebagai bahan pengikat pasir dalam pengeboran yang membuktikan bahwa guar memiliki gesekan lebih rendah dari pada air [2]. Guar menjadi material populer karena harganya yang murah di samping karakteristik molekulnya yang cenderung dapat menghambat degradasi karena gaya geser yang tinggi. Pada aliran dalam pipa karakteristik aliran pada permukaan kasar dapat dijelaskan dalam hubungannya dengan profil kecepatan aliran. Selama bilangan Reynolds

meningkat ketebalan lapisan cairan kental (*viscous shear stress*) berkurang dan bagian-bagian yang kasar menonjol keluar lapisan. Pada saat hal ini terjadi penurunan tekanan dengan membentuk hisapan atau tarikan yang disebabkan oleh kekasaran elemen dan aliran yang disebut sebagai "Tingkat kekasaran penuh", atau mencapai turbulen sempurna. Pada prakteknya permukaan-permukaan secara hidrodinamik tidak ada yang halus. Kebutuhan akan tingkat kehalusan permukaan menjadi lebih ditekankan pada peningkatan bilangan Reynolds sebagai hasilnya tingkat kehalusan permukaan jarang terpenuhi oleh desainer sistem berskala besar. Ketertarikan terhadap penggunaan modifikasi polimer pada sistim berskala besar telah menyingkap kekurangan pengetahuan tentang karakteristik aliran pada permukaan kasar. Perubahan bentuk struktur alur permukaan dinding kearah memanjang bentuk *V riblets* yang tepat telah diclaim oleh beberapa peneliti dapat menghasilkan pengurangan hambatan sekitar 7% [5]. Dan kekasaran khusus pada rumah siput dan kekasaran pada bola golf untuk aliran luar dapat mengurangi hambatan gesek. Kekasaran didalam pipa pada aliran lambat atau laminar tidak mempengaruhi nilai koefisien gesek. Sedangkan pada aliran turbulen diameter kecil mempunyai nilai koefisien gesek lebih tinggi pada bilangan Re dan rasio kekasaran yang sama [6]. Bewersdorff & Berman (1987) menyatakan pada pipa komersial mempunyai kekasaran yang tidak merata pengurangan hambatan sangat dipengaruhi oleh sistem larutan polimer, parameter lain dari polimer, konsentrasi polimer dan perbedaan distribusi berat molekul yang sulit untuk dijelaskan mekanisme terjadi pengurangan hambatan tersebut [7].

Tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang data eksperimen koefisien gesek untuk aliran larutan biopolimer getah latex (*guar gum*) dalam variasi kekasaran pipa. Data-data ini secara umum dapat digunakan untuk memprediksi koefisien gesek pada pipa komersial yang kasar karena proses pabrikan, korosi dan sudah berumur. Pipa

komersial misalnya pipa beton, pipa besi tuang, pipa plastik fleksibel, dll. banyak dipakai dalam industri yang bentuk kekasaran pipa ini tidak diketahui dengan pasti.

1.1. Studi Sebelumnya

Pertanyaan seperti apakah larutan polimer efektif dalam pipa kasar adalah penting untuk aplikasi teknik reduksi drag supaya dapat mengurangi pemakaian energi pompa?

Hoyt dan Fabula [2] menunjukkan pada tahun 1964 bahwa aditif efektif untuk permukaan kasar dan banyak pekerja yang telah memakai pipa komersial dengan kekasaran nominal dalam eksperimennya. Sebuah studi sekarang tersedia dalam pipa aliran fluida mengandung coating polimer pereduksi drag yang mana kekasaran tertentu telah ditempatkan di dinding pipa. Lindgren dan Hoot 1968 [8] melakukan eksperimen dengan pipa persegi empat yang dua sisi dalamnya dibuat licin (halus) dan dua sisi dalam lainnya dibuat kasar. Permukaan sisi dalam yang kasar dibuat dengan melapisinya dengan butir silikon karbida yang berukuran $k = 0,6 - 0,7$ mm dengan parameter kekasaran $R/k = 58$. *Poly(ethyleneoxide)* disiapkan dalam konsentrasi rendah mulai 15 ppm untuk mengurangi gesekan dalam pipa besar dan 60 ppm untuk faktor gesekan yang lebih rendah dengan aliran air. Hasil Koefisien gesek terlihat konstan pada $f = 0,06$ dengan bilangan Reynolds sekitar 30.000.

Spangler [9] menemukan bahwa nilai kekasaran yang eksterm menyebabkan pengurangan efektifitas reduksi drag polyacrylamide pada bilangan Reynolds tinggi. Spangler menunjukkan bahwa hilangnya efektifitas bukan karena degradasi polimer, tetapi karena gesekan direduksi dalam pipa licin baik pada bagian pangkal maupun ujung daerah yang dikasarkan. Virk's 1971 [10],[11] telah memberi kontribusi yang besar terhadap pemahaman kita tentang fenomena reduksi drag karena polimer pereduksi drag menjadi efektif dalam pipa kasar sampai kekasaran muncul pada sub lapisan yang berarti bahwa model aksi polimer sebenarnya

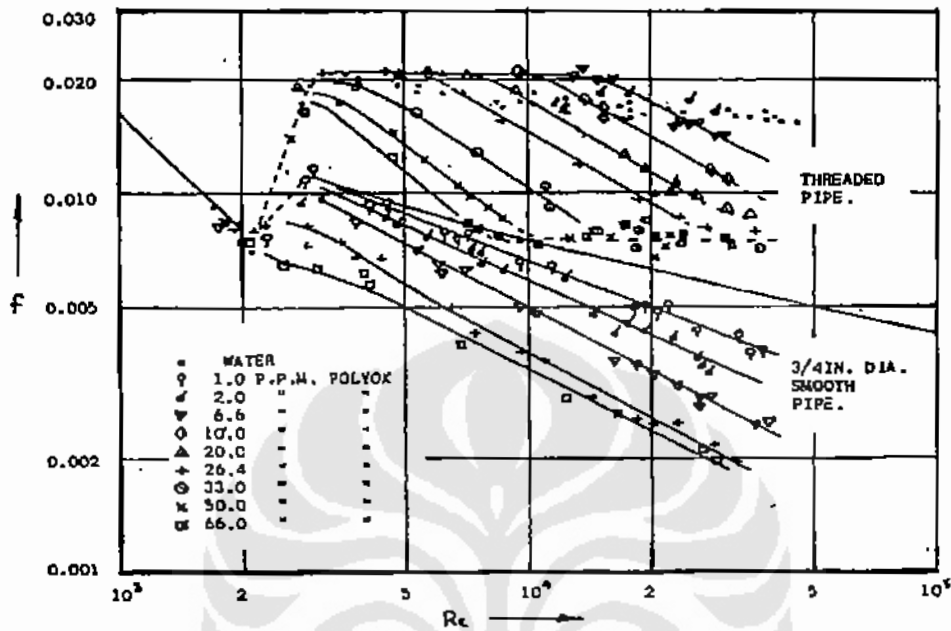
dalam daerah "buffer" atau daerah "elastic" terletak antara $5 < y^+ < 50$. Nikuradse (1933) melakukan percobaan dengan menempelkan butiran pasir yang seukuran kepermukaan bagian dalam pipa mulus sehingga bisa mendapatkan rentang rasio kekasaran relatif k/D dengan mendapatkan variasi koefisien gesek pipa kasar. Elling Sletfjerding (2003) membuktikan pengukuran efek kekasaran yang dilakukan pendahulunya Nikuradse dengan pengukuran menggunakan power spectrum yang hasilnya dapat dikatakan sama [12]. Gambar 1 data dari hasil penelitian oleh White A. [4] dengan menggunakan pipa yang dikasarkan menyerupai bentuk ulir dengan fluida air ditambahkan variasi larutan *polyox WSR 301* sampai pada konsentrasi 66 ppm menghasilkan penurunan koefisien gesek dimulai pada aliran turbulen sempurna dengan kenaikan sedikit Re segera menghasilkan penurunan nilai koefisien gesek. Hasil pengujian pada pipa halus juga dapat dilihat adanya penurunan koefisien gesek. Perry et al (1969) [13] Menyimpulkan bahwa konfigurasi elemen kekasaran seragam dan tidak seragam sangat menentukan nilai koefisien gesek yang sesungguhnya.

Gambar 2 data dari hasil penelitian dengan menggunakan larutan *guar gum* pada konsentrasi 240 ppm dan 480 ppm dimana kekasaran pipa dibuat dengan bentuk ulir. Hasil dari efek aditif *guar gum* pada kekasaran model ulir ini tidak terlihat adanya pengurangan koefisien gesek. Sebaliknya *drag reduction (DR)* atau pengurangan koefisien gesek terjadi hanya pada pipa mulus.

Gambar 3. Hasil pengujian menggunakan pipa kapilar yang menunjukkan hubungan viskositas sesaat terhadap gradient kecepatan dimana viskositas sesaat pada larutan *guar gum* 250, 500 dan 1000 ppm terlihat menurun terhadap kenaikan *shear strain* atau gradient kecepatan. Larutan *polymer guar gum* terlihat ada penurunan nilai kekentalan sesaat pada pertambahan gradien kecepatan. Nilai gradien kecepatan di atas 1200 1/s terlihat sejajar dengan nilai viskositas air murni. Perubahan kekentalan terhadap

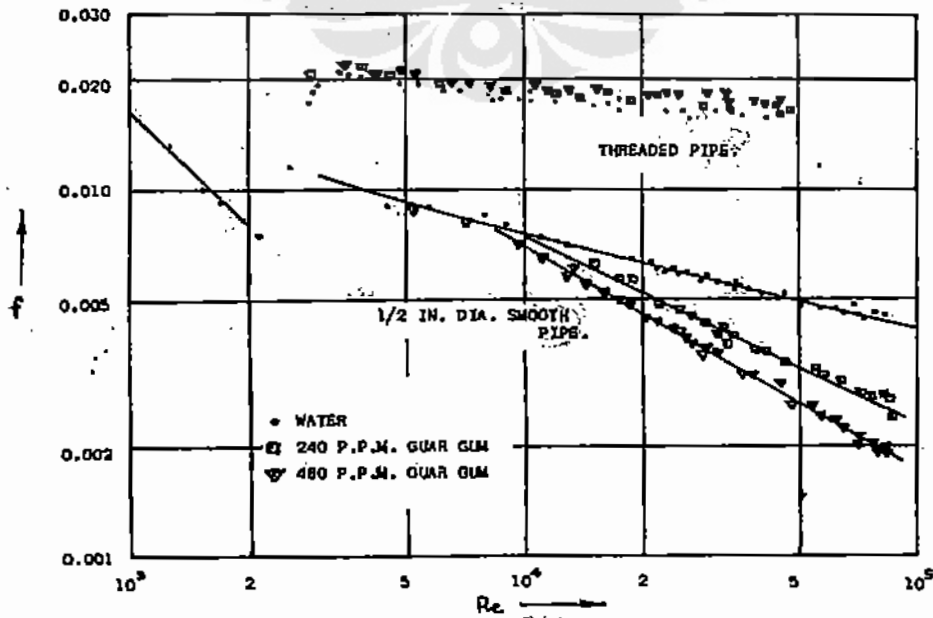
perubahan gradien kecepatan disebut tipe fluida *non-Newtonian*. Jenis fluida *non-Newtonian* ini tergolong fluida *shear thinning*. Untuk fluida air murni tidak terjadi perubahan nilai viskositas walaupun gradien kecepatan bertambah viskositas

tetap konstan, disini dapat kita katakan air murni tersebut tergolong fluida *Newtonian*. Nilai derajat sifat *Non-Newtonian* larutan guar gum (*degree of Non-Newtonian behavior*) $n = 0,5 - 0,7$.



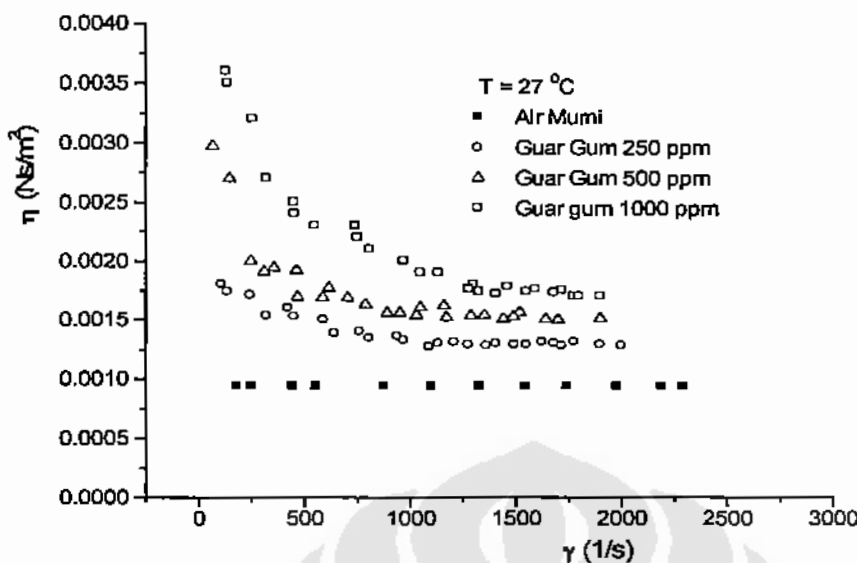
Gambar 1.

Data Koefisien Gesek Pada Pipa Kasar dan Halus dengan Polimer *Polyox 1 - 66 ppm* [4]



Gambar 2.

Data Koefisien Gesek Pipa Kasar dan Halus Dengan Polimer *Guar Gum 240 & 480 ppm* [4]



Gambar 3. Apparent viscosity η dengan Shear rate γ [18]

1.2. Landasan Teori

Hubungan koefisien gesek dengan bilangan Re di plot pada diagram Moody, persamaan koefisien gesek untuk aliran laminar di plot sebagai garis lurus dari Hagen-Poiseuille dan Blasius untuk aliran turbulen serta rasio kekasaran pipa.

Hubungan perubahan nilai viskositas pada fluida *non-Newtonian* adalah akibat shear strain, bilangan Reynolds akan digantikan dengan *Generalized Reynolds Number Re'*. Dimana viskositas sesaat berhubungan dengan nilai mutlak tegangan geser dinding τ_w .

Persamaan Model Power Law [14]:

$$(\tau_w) = K \left(-\frac{du}{dy} \right)^n \tag{1}$$

Re' adalah generatif bilangan Reynolds didapat dari persamaan [15]:

$$Re' = \frac{8n^n \rho d^n U^{2-n}}{2^n (3n+1)^n K} \tag{2}$$

Tingkat kekasaran permukaan pada pengujian ditentukan oleh nilai koefisien gesek pada bagian kasar. Hubungan

koefisien gesek dengan parameter tingkat kekasaran R/k dapat diketahui sebagai berikut :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10} \left(\frac{R}{k_s} \right) + B \tag{3}$$

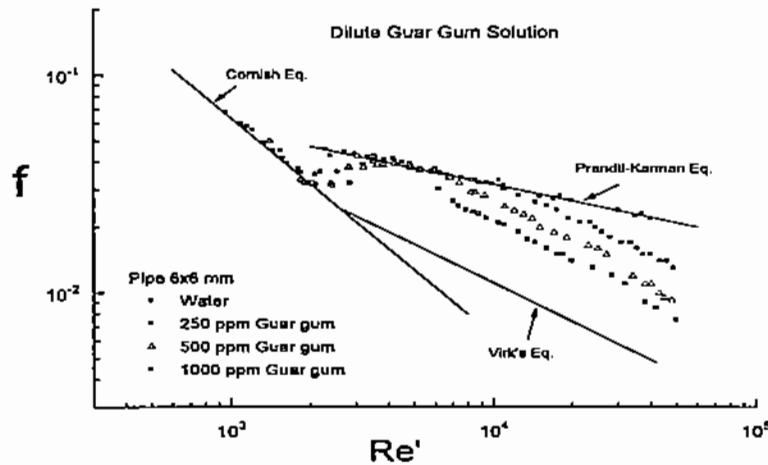
Dalam perhitungan nilai konstanta B didapat dari harga koefisien gesek f data air atau larutan *guar gum* pada permukaan masing-masing kekasaran.

Rasio pengurangan hambatan (*Drag Reduction*) dihitung dengan persamaan:

$$DR = \left| \frac{f(air) - f(gg)}{f(air)} \right| \times 100(\%) \tag{4}$$

dimana f(gg) adalah koefisien gesek larutan guar gum dan f(air) adalah koefisien gesek untuk air murni.

Gambar 4. menunjukkan data hasil penelitian terdahulu dengan variasi larutan guar gum untuk pipa halus segi empat sama sisi 6x6 mm [16],[17], dimana terjadi pengurangan hambatan gesek pada penambahan bilangan Re'. Koefisien gesek mengecil pada pertambahan nilai Re' menghasilkan *drag reduction* yang dapat menghemat energi aliran dalam pipa.



Gambar 4.

Koefisien Gesek F dengan Generatif Re' pada Variasi Konsentrasi Larutan *Guar Gum* [19]

2. Eksperimental Set – Up

Gambar 5 menunjukkan eksperimental set up, dimana alat uji terdiri dari pipa PVC dengan diameter dalam (D) 25.4 mm atau $R=D/2=12.7$ mm. Jarak diantara *pressure tap* adalah 900 mm. Panjang "entry length" cukup untuk menjaga aliran berkembang-penuh (*fully developed*) adalah 1400 mm. Fluida mengalir dari bak/tangki hisap dengan pompa diaphragma didistribusikan ke pipa uji. Debit aliran fluida diatur dengan pengaturan *gate valve* untuk mengatur nilai Re' . Laju aliran diukur dengan mengumpulkan debit yang keluar dari pipa dalam periode waktu tertentu.

pressure tap dengan alat manometer. Dari nilai ΔP dapat menghitung koefisien gesek dengan pertolongan persamaan dari Darcy Wiesbach pada nilai Re tertentu.

Pipa uji dibelah menjadi 2 bagian masing-masing menjadi $\frac{1}{2}$ lingkaran penampang pipa. Lem digunakan untuk melekatkan pasir pada permukaan dalam pipa. Setelah pelekatan pasir menempel homogen dan kuat, pipa disatukan kembali menjadi pipa uji penampang bulat dengan permukaan kasar.

Tabel 1.

Penampang Pipa Kasar k/D dan Konsentrasi *Guar Gum* (getah latex) [20]

Penampang pipa	k (mm)	D (mm) (R=D/2)	k/D	ppm guar gum
 seragam	0.34	25.4	0.01	250
	0.8		0.03	500
	1.59		0.06	1000
 Tak seragam (50% Kasar)	0.34	25.4	0.01	250
	0.8		0.03	500
	1.59		0.06	1000

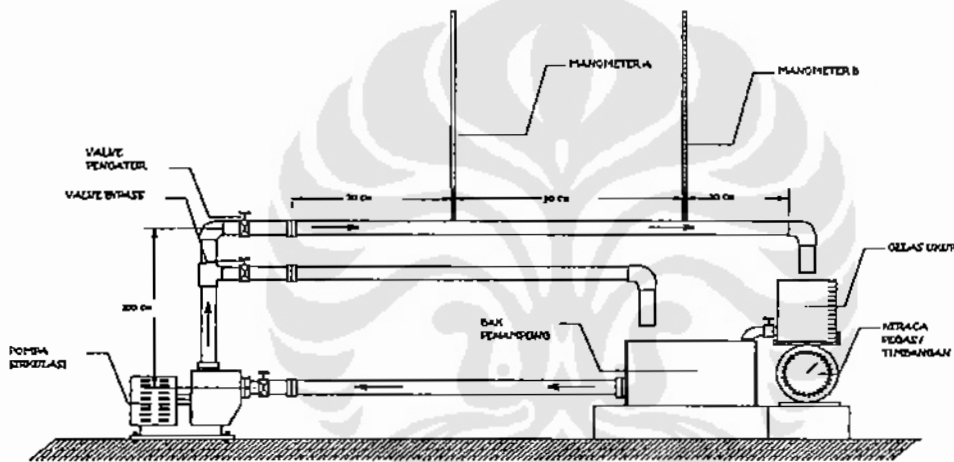
3. Hasil dan diskusi

Gambar 6 menunjukkan variasi kekasaran pipa untuk fluida air murni dimana dalam region laminar efek dari kekasaran tidak terlihat adanya kenaikan koefisien gesek. Kenaikan kecepatan atau pertambahan bilangan Re masuk dalam aliran transisi, dimana aliran transisi lebih cepat tercapai untuk nilai rasio kekasaran pipa yang tinggi. Pada region ini kenaikan bilangan Re diikuti kenaikan koefisien gesek. Koefisien gesek terlihat naik pada daerah transisi, lalu menurun pada pertambahan bilangan Re dan terlihat konstan setelah nilai $Re > 4000$. Penomona nilai koefisien gesek tidak berubah atau konstan terhadap kenaikan bilangan Re dapat dikatakan aliran mencapai turbulen sempurna (*Fully Turbulent Flow*) untuk

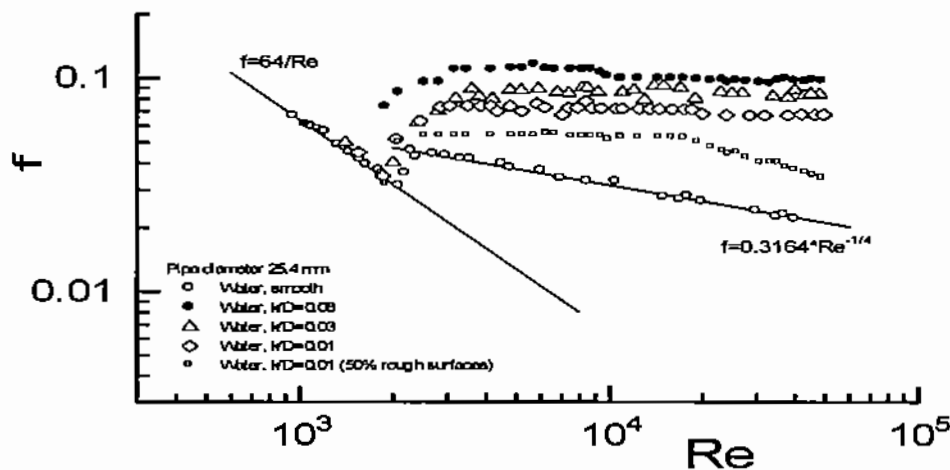
Temperatur fluida dijaga konstan 27 °C. *Pressure drop* diukur diantara 2 buah

pipa kasar. Koefisien gesek pada aliran turbulen terlihat meningkat sebanding dengan kekasaran pipa. Pada fluida *Newtonian* (air murni) koefisien gesek turbulen tidak tergantung pada bilangan Reynolds tetapi tergantung kepada tingkat kekasaran. Rasio kekasaran yang besar mendapatkan koefisien gesek yang besar juga dan sebaliknya. Kenaikan rasio k/D diikuti dengan kenaikan nilai koefisien gesek. Pada pipa yang kekasarannya tidak merata atau tidak seragam (50% kasar) untuk $k/D=0,01$ nilai koefisien gesek mengecil setelah $Re>17.000$ mungkin disebabkan peredaman turbulen oleh dinding karena adanya batas permukaan kasar dan halus yang dapat meredam

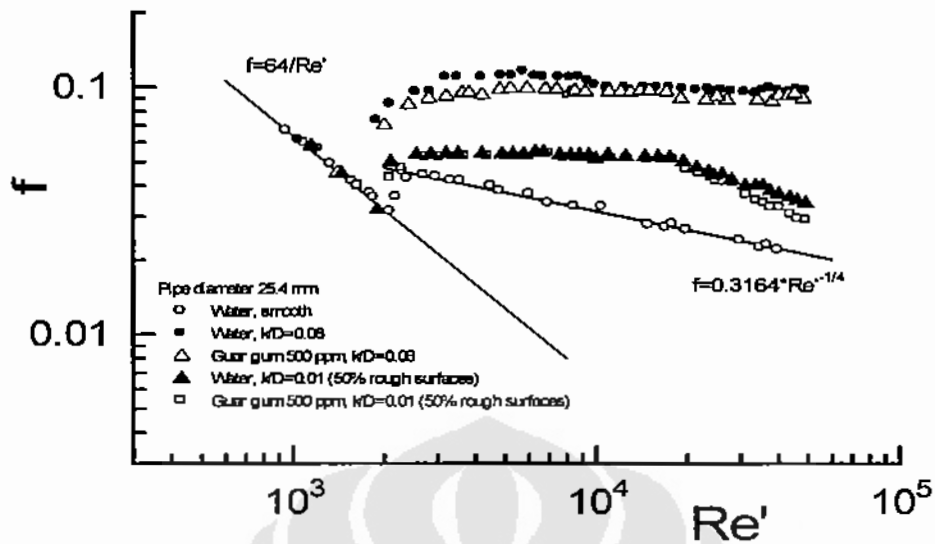
turbulensi [13]. Data peneliti ini dapat dikatakan sama dengan penelitian terdahulu oleh Nikurase pada diagram Moody bahwa efek kekasaran pada aliran laminar tidak berpengaruh terhadap nilai koefisien gesek. Pada aliran laminar penurunan koefisien gesek hanya dipengaruhi nilai Re . Koefisien gesek akan konstan setelah mencapai aliran turbulen sempurna. Pada Gambar/grafik juga terlihat percepatan aliran transisi untuk pipa kasar hal ini diakibatkan turbulensi cepat terjadi dibandingkan pipa halus, semakin kasar permukaan pipa maka transisi semakin cepat tercapai.



Gambar 5.
Eksperimental Set-Up

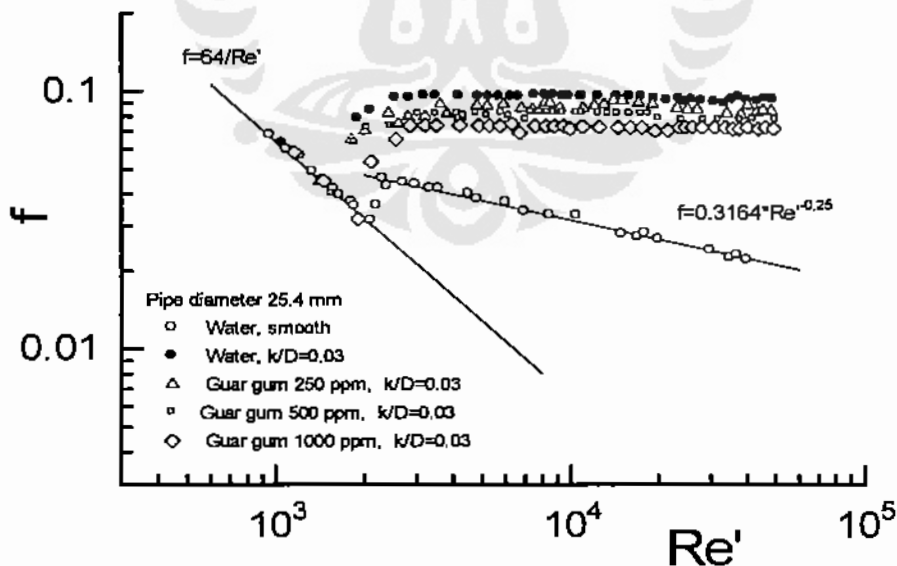


Gambar 6.
Koefisien Gesek pada Variasi Kekasaran Pipa untuk Air Murni dengan Diameter Pipa 25,4 mm



Gambar 7.

Koefisien Gesek pada Konsentrasi Biopolimer Guar Gum 500 ppm untuk Pipa 25.4 mm $k/D=0.01$ (50% bagian kasar) dan $k/D=0.06$ (kasar seragam)



Gambar 8.

Koefisien Gesek pada Variasi Konsentrasi Biopolimer Guar Gum untuk Pipa 25.4 mm $k/D=0.03$

Gambar 7 menunjukkan efek penambahan *biopolymer guar gum* pada kekasaran $k/D=0.06$ dengan $D=25,4$ mm. Efek pemberian guar gum pada kekasaran ini sangat sedikit pengaruhnya terhadap

penurunan koefisien gesek. Penurunan koefisien gesek sekitar 5% untuk $k/D=0,06$ pada 500 ppm guar gum. Nilai Re masuk aliran transisi tidak terlihat jelas dari efek guar gum tersebut. Pada $k/D=0.01$ yang

tidak seragam kekasarannya juga tidak terlihat adanya efek guar gum pada kekasaran tersebut, tapi efek kekasaran tidak merata menghasilkan koefisien gesek mengecil pada $Re > 17.000$.

Gambar 8 menunjukkan variasi konsentrasi larutan *biopolymer guar gum* untuk pipa 25.4 mm pada $k/D = 0.03$, dimana terlihat adanya pengaruh ppm terhadap koefisien gesek. Nilai koefisien gesek menurun dengan kenaikan konsentrasi *guar gum*. Efek kenaikan konsentrasi aditif *guar gum* menghasilkan penurunan koefisien gesek dimana pada konsentrasin 1000 ppm mendapatkan nilai koefisien terkecil untuk rasio kekasaran yang sama.

Data koefisien gesek terhadap nilai bilangan Re yang diplot pada gambar 8, bila dihitung dengan persamaan 3 akan didapatkan nilai konstanta B . Pada konsentrasi larutan guar gum 250, 500 dan 1000 ppm masing-masing mendapatkan nilai konstanta B adalah 0,665, 0,890 dan 1,086. Nilai konstanta B meningkat diartikan dengan peningkatan ketebalan kekentalan fluida pada lapisan dekat dinding (*sub-layer*).

Pengurangan hambatan (DR) dihitung dari persamaan 4 untuk konsentrasi larutan guar gum 250, 500 dan 1000 ppm masing-masing didapatkan 5 %, 16 % dan 24 %. Dari ketiga macam konsentrasi larutan semakin tinggi konsentrasi larutan *guar gum* semakin kecil nilai koefisien gesek pipa kasar untuk $k/D = 0,03$.

4. Kesimpulan

Koefisien gesek pipa kasar pada penambahan larutan biopolimer guar gum dapat disimpulkan :

1. Semakin tinggi nilai kekasaran pipa akan menghasilkan koefisien gesek yang besar.
2. Kenaikan konsentrasi polimer guar gum menghasilkan penurunan koefisien gesek.

3. Pada kekasaran pipa yang tidak seragam (50% kasar) akan menurunkan nilai koefisien gesek pada bilangan Re tertentu.
4. Homogenitas kekasaran, bentuk ketajaman kekasaran dan lokasi kekasaran dapat mempengaruhi koefisien gesek.
5. Dari gambar 1, 2 dan 3, jenis aditif polimer yang sesuai dengan geometris kekasaran permukaan pipa dapat mempengaruhi penurunan nilai koefisien gesek.

Daftar Notasi

- B = Konstanta fluida pada kekasaran pipa
 D = Diameter pipa, mm
 DR = Drag Reduction
 k = Tinggi kekasaran, mm
 K = Koefisien power-law
 n = Power-law exponent = degree of Non-Newtonian behavior.
 ΔP = Kerugian tekanan, N/m^2
 Ppm = Konsentrasi, berat bagian polimer per juta bagian pelarut.
 R = jari-jari pipa, mm
 Re = Bilangan Reynolds
 Re^+ = Generatif bilangan Reynolds
 y^+ = skala lebar pada teori dinding
 Q = debit $m^3/menit$
 f = Koefisien gesek
 ν = viskositas kinematik, m^2/s
 ρ = berat jenis, kg/m^3
 τ_w = shear stress, N/m^2
 η = apparent viscosity, $N s/m^2$
 Y = shear rate, $1/s$

Daftar Acuan

- [1]. Tom's, B. A., 1948, "Some Observations on the Flow of Linear Polymer Solution Through Straight Tubes at Large Reynolds Numbers", Proc. Int. Conger. Rheol. P. 135, 1948. Scheveningen, Holland.
- [2]. Hoyt, J. W., 1972., "The Effect of Additives on Fluid Friction", J. of

- Basic Engineering, Trans. ASME. Series D, Vol. 94., pp.258-285.
- [3]. White A, "Turbulent drag reduction with Polymer Additives," Journal Mechanical Engineering Science, Vol 8. No. 4, 1966.
- [4]. White A, "Some Observations on The Flow Characteristics of Certain Dilute Macromolecular Solutions". Journal Mechanical Engineering Science, Vol 8. No. 4, 1966. p.297-310.
- [5]. Choi, K.S., 1990., Marine Application on Riblets for Drag Reduction at High Reynolds Numbers., Proc. 2nd. Int. Symp. on Performance Enhancement for Maritime Applications. Univ. of Rhode Island., pp.237-244.
- [6]. Yanuar. "Koefisien Gesek pada Pipa Kasar" Proceeding Seminar Nasional ke 13, KPTU FT UGM. Juni 2007. p. 4 – 49.
- [7]. Bewersdorff H. W., and Berman, N. S., Effect of Roughness on Drag Reduction for Commercially Smooth Pipes. J Non-Newtonian Fluid Mech. 1987. Vol. 24. 365 – 370.
- [8]. Lindgren, E. R. and Hoot, T. G., "Effects of Dilute High Molecular Weight Polymers on Turbulent Flows of Water in Very Rough Pipes," Trans. ASME, J. Appl. Mech., 35E 2, June 1968, pp. 417-418.
- [9]. Spangler. J. G., "Studies of Viscous Drag Reduction with Polymers Including Turbulence Measurements and Roughness Effects". Wells, C. S. ed. Viscous Drag Reduction, Plenum Press, N.Y. 1969. p.131.
- [10]. Virk, P. S., 1970, "The Ultimate Asymptote and Mean Flow Structure in Toms Phenomenon", Transactions of the ASME June 1970 p.488.
- [11]. Virk, P. S., 1971, "Drag Reduction in Rough Pipes", Journal of Fluid Mechanics. Vol. 45. p. 225.
- [12]. Elling, S., and Gudmundsson, J. S., Friction Factor Directly from Roughness Measurements. J of Energy Resources Technology June 2003. Vol. 125. No.2 pp. 126 – 130.
- [13]. Perry, A. E., Schofield, W. H. & Joubert, P. N. 1969. Rough Wall Turbulent Boundary Layers. Journal Fluid Mech. 37., pp. 384 – 413.
- [14]. Oldroyd, J. C., Eirich, F. R., 1956, "In Rheology," Academic Press., New York, Vol.1., pp.663-664.
- [15]. Watanabe, K., H Udagawa. "Drag Reduction of Non-Newtonian Fluids in a circular pipe with a Highly Water Repellent Wall" AIChE Journal. Vol 47, No2 February 2001. pp 256.
- [16]. Yanuar and Watanabe K. "Drag reduction of guar gum in crude oil." The 13th International symposium on transport phenomena. Victoria Canada. Elsevier 2002. P.833 – 836.
- [17]. Yanuar and Watanabe K. "Toms effect of guar gum additive for crude oil in flow through square ducts." The 14th International symposium on transport phenomena. Bali Indonesia. Elsevier 2004. P.599 – 603.
- [18]. Yanuar. "Kurva Aliran Dengan Pipa Kapiler" Proceeding Seminar Nasional ke 13, KPTU FT UGM. Juni 2007. p. 4 – 55.
- [19]. Yanuar. "Pengurangan Hambatan Turbulen Dengan Aditif Polimer" Jurnal Teknologi, Edisi No.1. Tahun XXI, Maret 2007, P. 32 – 38.
- [20]. Joko Sukamto. "Efek Additive polimer Guar Gum Terhadap Pipa kasar". Tesis Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik UI. Genap 06/07. Depok.