

Penggunaan Hukum Hagen-Poiseuille dalam Penentuan Koefisien Viskositas Zat Cair dengan Prinsip Kontrol Berat Berbantuan *Software* Logger Pro

Lia Adini, dan Okimustava

Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta
Kampus III, Jl. Prof. Dr. Soepomo, SH, Yogyakarta 55164 Indonesia
Surat-e: liaadini95@gmail.com

Pengukuran koefisien viskositas zat cair menggunakan hukum Hagen-Poiseuille dengan metode *Microcomputer Based Laboratory* telah dilakukan. Viskositas merupakan ukuran penolakan fluida terhadap perubahan bentuk di bawah tekanan shear. Hukum Hagen-Poiseuille digunakan dalam penelitian ini karena zat cair yang digunakan merupakan zat cair Newtonian. Tangki viskometer kapiler yang dikaitkan ke sensor gaya diisi zat cair untuk kemudian dialirkan keluar melalui pipa kapiler dengan panjang $(9,8 \pm 0,09) \times 10^{-2}$ m dan diameter dalam $(2,1620 \pm 0,0096) \times 10^{-3}$ m. Data penurunan massa zat cair direkam menggunakan sensor gaya buatan Vernier Technology dan analisis *fitting* data menggunakan *software* Logger Pro. Nilai karakteristik waktu diperoleh dari hasil *fitting data* digunakan untuk perhitungan koefisien viskositas zat cair menggunakan hukum Hagen-Poiseuille. Dari percobaan ini diperoleh nilai koefisien viskositas air sebesar $(1,063 \pm 0,113)$ mPa.s yang sesuai dengan nilai acuan teori yaitu 1,002 mPa.s, oli SAE 10W-30 sebesar $(79,01 \pm 8,90)$ Pa.s sesuai dengan nilai acuan teori 76,8 Pa.s, dan gliserin sebesar $(593,4 \pm 56,7)$ mPa.s sesuai dengan nilai acuan teori 612 mPa.s.

Measurement of liquid viscosity coefficient using Hagen-Poiseuille law with Microcomputer Based Laboratory method has been done. Viscosity is the fluid declination measure of form changes under shear pressure. Hagen-Poiseuille law is used in this study because the liquid used is a Newtonian liquid. Capillary viscometer tanks attached to force sensors are filled with liquid to be streamed out through capillary tubes of length $(9.8 \pm 0.09) \times 10^{-2}$ m and inner diameter $(2.1620 \pm 0.0096) \times 10^{-3}$ m. Data on the mass degradation of liquids was recorded using a Vernier Technology force sensor while the data fitting analysis using Logger Pro software. The time characteristic values which obtained from the data fittings are used in the calculation of the liquid viscosity coefficient using Hagen-Poiseuille law. From this experiment, the obtained water viscosity coefficient value is (1.063 ± 0.113) mPa.s corresponds to the reference value of the theory is 1.002 mPa.s, the SAE oil 10W-30 is (79.01 ± 8.90) Pa.s corresponds to the reference value of the theory 76.8 Pa.s, and glycerin is (593.4 ± 56.7) mPa.s corresponds to the reference value of the theory 612 mPa.s.

Kata kunci: viskositas, hukum Hagen-Poiseuille, Logger Pro, oli SAE 10W-30, gliserin

I. Pendahuluan

Fluida merupakan zat yang dapat mengalir seperti zat cair dan gas. Fluida mekanik adalah studi tentang gaya dan gerakan yang terjadi di dalam fluida. Perlakuan terhadap aliran fluida memerlukan pemahaman tentang karakteristik fisis yang mempengaruhi gerakan fluida

tersebut. Dua karakteristik fluida yang paling penting yaitu densitas dan viskositas [1-3].

Viskositas merupakan ukuran penolakan fluida terhadap perubahan bentuk di bawah tekanan shear [1]. Penentuan kekentalan dilakukan dengan mengukur laju aliran zat cair yang melalui pipa kapiler. Kekentalan relatif yaitu perbandingan antara kekentalan zat cair dengan kekentalan zat cair lainnya ditentukan dalam penelitian ini. Zat pembanding yang biasa digunakan adalah air.

Selain itu viskometer juga digunakan dalam dunia industri sebagai alat untuk mengukur kekentalan suatu zat yang akan diuji baik berupa cairan maupun gas [1].

Penelitian [4] uji viskositas fluida menggunakan transduser ultrasonik sebagai fungsi temperatur dan akuisisinya pada komputer menggunakan universal serial bus yang bertujuan untuk mengetahui nilai viskositas terhadap perubahan temperatur pada oli motor SAE 20W-50 dan SAE 10W-40. Nilai viskositas didapatkan dari perubahan waktu tempuh gelombang pada transduser ultrasonik MA40E7R/S. Data diolah menggunakan bahasa pemrograman Delphi 7 yang mengubah sinyal output transduser menjadi hasil viskositas oli motor SAE 20W-50 dan SAE 10W-40. Rata-rata hasil pengukuran oli motor SAE 20W-50 pada temperatur 30°C, 35 °C, 40°C, 45°C, dan 50°C berturut-turut adalah 3,306 mPa.s, 3,771 mPa.s, 3,733 mPa.s, 3,848 mPa.s, dan 3,309 mPa.s. Dari penelitian ini diketahui jika temperatur semakin tinggi maka viskositas menurun [4].

Nilai koefisien viskositas air sebesar 1,002 mPa.s[5], nilai koefisien viscositas oli SAE 10W-30 sebesar 76,8 mPa.s[6], nilai koefisien gliserin sebesar 612 mPa.s[7]. Nilai koefisien tersebut digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengukur nilai viskositas air, oli SAE 10W-30, dan gliserin menggunakan viskometer kapiler berbantuan *software* Logger *Pro* dengan hukum Hagen-Poiseuille.

II. Kajian Pustaka

Viskositas adalah kunci dalam konsep fluida mekanik dan mengkarakterisasikan hambatan fluida akibat gaya gesekan internal. Kecepatan rata-rata v_p untuk aliran laminar dari cairan viskos pada pipa dengan panjang L dan radius r diberikan oleh persamaan hubungan Hagen-Poiseuille

$$v_r = \frac{r^2 \Delta p}{8 \rho \nu L} \quad (1)$$

dengan Δp adalah perbedaan tekanan di ujung pipa. adalah, ν merupakan viskositas kinematik, dan ρ adalah densitas fluida [8].

Umumnya pada buku fisika hubungan ini dikenal sebagai hukum Poiseuille, meskipun eksperimen pengukuran air pertama kali dilakukan oleh seorang ilmuwan teknik hidrolis Jerman bernama Gothilf Hagen sebelum dipatenkan melalui eksperimen aliran darah oleh seorang fisikawan Perancis bernama Jean Poiseuille [9].

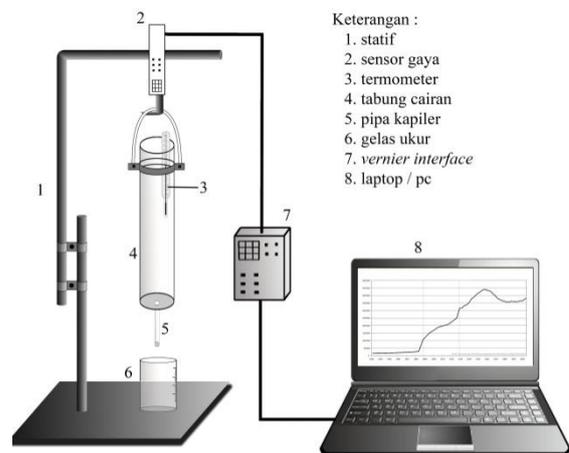
Untuk aliran laminar sebuah cairan yang tak dapat dikompres melewati sebuah pipa dengan jari-jari r , tegangannya menurun sebesar ΔP_c diakibatkan oleh pengurangan kekentalan melewati pipi dengan L_c diberikan oleh hukum Hagen-Poiseuille.

$$\Delta P_c = \frac{8\eta L_c}{r^2} u \quad (2)$$

dengan η merupakan viskositas dinamis suatu cairan dan u adalah kecepatan aliran rata-rata. Agar aliran laminar menjadi valid, bilangan Reynold dapat dihitung dengan persamaan [10]:

$$Re = \frac{2r\rho u}{\eta} \quad (3)$$

Hambatan aliran cairan Newtonian bisa ditentukan dengan apparatus sederhana terdiri dari tangki dengan luas penampang S , sehingga cairan akan keluar dari tangki melewati pipa kapiler yang terhubung tegak lurus akibat gaya gravitasi dengan kedalaman h di bawah permukaan cairan. Cairan memasuki pipa kapiler pada tekanan tinggi akibat pengaruh gaya berat cairan di atasnya, sementara tekanan ujung pipa yang lain hanya di bawah tekanan atmosfer. Ketika salah satu ujung pipa berada pada kedalaman h di bawah permukaan tabung cairan vertikal yang terbuka dengan massa jenis cairan ρ dan luas penampang A , perbedaan tekanan di ujung salah satu pipa terbuka pada tekanan atmosfer adalah sebesar ρgh [11].



Gambar 1. Desain Perangkat Viskometer Kapiler

Oleh karena itu, tegangan yang turun melewati pipa kapiler merupakan tegangan hidrostatik yang meluruh sebagaimana cairan mengalir.

$$\Delta P_c(t) = \rho gh(t) = \frac{m(t)g}{S} \quad (4)$$

dengan g adalah percepatan gravitasi dan $m(t)$ adalah massa cairan pada tangki pada waktu t . untuk aliran yang kira-kira tetap, u dapat dinyatakan dalam bentuk laju pengurangan massa.

$$u = -\frac{1}{\pi^2 \rho} \frac{dm}{dt} \quad (5)$$

dengan tanda negatif berarti massa cairan mengalami penurunan. Dalam hal ini, persamaan (6) menghasilkan:

$$m(t) = -\frac{8\eta L_c S}{\pi^4 \rho g} \frac{dm}{dt} \quad (6)$$

yang mana setelah pemisahan variabel, dapat langsung diintegrasikan untuk memberikan peluruhan eksponensial massa cairan di dalam tangki.

$$m(t) = m_0 \exp(-t/\tau) \quad (7)$$

dengan m_0 adalah massa rujukan pada saat $t=0$ dan

$$\tau = \frac{8L_c S}{\pi r^4 \rho g} \eta \quad (8)$$

merupakan karakteristik waktu, tidak terpengaruh oleh m_0 dan ditentukan oleh viskositas kinematik.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (9)$$

Jika dicocokkan persamaan (7) terhadap pengukuran eksperimental massa cairan di dalam tangki terhadap waktu, dapat diperoleh τ dan viskositas dapat dihitung dari persamaan (8) yakni:

$$\pi = K\rho\tau \quad (10)$$

dengan

$$K = \pi^4 g / 8L_c S \quad (11)$$

merupakan konstanta apparatus.

Plot $m(t)$ memperlihatkan adanya sistematis residual yang menimbulkan keraguan validitas bentuk eksponensial pada persamaan (7), dan karenanya menjadi dasar adanya asumsi-asumsi. Khususnya, data menunjukkan pengurangan $m(t)$ memiliki langkah-langkah yang lebih sedikit daripada yang ditunjukkan dari persamaan (7). Alasannya yakni bahwa persamaan (2) menunjukkan kesamaan viskositas dan gaya-gaya pergerakan tegangan, padahal cairan yang meninggalkan pipa bergerak pada kecepatan tetap. Pada penelitian ini koreksi efek energi kinetik turut dipertimbangkan dalam pengurangan cairan pada pipa kapiler yang terhubung secara vertikal pada tangki cairan.

Anggap bahwa cairan yang kental keluar melalui pipa kapiler yang disusun tegak lurus dan dihubungkan dengan bagian bawah tangki air berbentuk silinder dengan luas bidang konstan.



Gambar 2. Tangki yang Terhubung dengan Pipa Kapiler

Untuk aliran yang tak begitu tetap, distribusi tekanan pada sistem dipengaruhi oleh persamaan Bernoulli-Poiseuille.

$$\Delta P_c = \rho g(h + L_c) + \frac{1}{2} \rho u_t^2 - \xi \rho u_c^2 \quad (12)$$

dengan u_t dan u_c berturut-turut merupakan kecepatan rata-rata cairan di dalam tangki dan pipa kapiler, $\rho g(h+L_c)$ adalah tekanan hidrostatis, h adalah tinggi tabung, L_c adalah panjang pipa kapiler, dan ΔP_c adalah penurunan tekanan akibat pengurangan kekentalan diberikan oleh persamaan (4) dan ξ adalah suatu parameter yang tergantung pada kondisi aliran menurut aturan empiris

$$\xi = 0,037\sqrt{\text{Re}} \quad (13)$$

Asumsikan luas penampang pipa kapiler S_c jauh lebih kecil daripada luas penampang pada tangki S_t , yakni $S_c \ll S_t$. Kemudian, persamaan kontinuitas untuk cairan yang tidak dapat dimampatkan $u_c S_c = u_t S_t$, menghasilkan $U_t \ll U_c$. Dengan mengabaikan suku u_t pada persamaan (12) dapat ditemukan,

$$\rho gh + \rho gL_c = \frac{8\eta L_c}{r^2} u_c + \xi \rho u_c^2 \quad (14)$$

dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) dapat kembali ditulis sebagai:

$$m + \rho L_c S = -\tau \frac{dm}{dt} + \alpha \left(\frac{dm}{dt} \right)^2 \quad (15)$$

dengan τ dapat ditentukan dari persamaan (8), dan α merupakan

$$\alpha = \frac{\xi S_t}{\pi^2 r^4 \rho g} \quad (16)$$

Setelah mengubah variabel-variabel,

$$M = m + \rho L_c S_t \quad (17)$$

Persamaan (15) memberikan persamaan kuadratik untuk (dM/dt) dengan penyelesaian

$$\frac{dM}{dt} = -\frac{\tau}{2\alpha} \left[\sqrt{1 + \frac{4\alpha M}{\tau^2}} - 1 \right] \quad (18)$$

Jika diasumsikan $4\alpha M/\tau^2 < 1$, dapat dijabarkan kuadrat akar pada persamaan (18) dengan mengabaikan kubik dan pangkat yang lebih tinggi untuk menentukan

$$\frac{dM}{dt} \approx -\frac{M}{\tau} \left(1 - \frac{\alpha}{\tau^2} M \right) \quad (19)$$

dengan kondisi awal $M|_{t=0} = m_0 + \rho L_c S_t$, dengan m_0 adalah rujukan massa cairan di dalam tabung. Persamaan (19) dapat langsung diintegrasikan untuk menghasilkan

$$m(t) = \frac{(m_0 + \rho L_c S_t) \exp(-t/\tau)}{1 - (m_0/\tau^2)(1 - \exp(-t/\tau))} - \rho L_c S_t \quad (20)$$

Dengan cara yang sama, untuk pipa kapiler yang terhubung secara horizontal pada tangki, dapat diperoleh

$$m(t) = \frac{m_0 \exp(-t/\tau)}{1 - m_0(\alpha/\tau^2)(1 - \exp(-t/\tau))} \quad (21)$$

Persamaan (16) menghubungkan suatu model dengan menggabungkan persamaan (8) terhadap hasil eksperimen. Keuntungan persamaan (17) dibandingkan persamaan (3) adalah ketetapan matematisnya dimodifikasi oleh koreksi energi kinetik yang direduksi oleh persamaan (3) sebesar $\alpha \rightarrow 0$ [10].

III. Metode Penelitian/Eksperimen

Viskometer kapiler yang terdiri atas tangki dan pipa kapiler dihubungkan dengan sensor gaya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 1. Tangki dengan luas penampang konstan sebesar $(16,320 \pm 0,081) \times 10^{-4} \text{ m}^2$ dan panjang 0,3 m, diisi dengan zat cair dan dikaitkan secara tegak lurus kepada sensor gaya yang dipasang pada statif. Sensor gaya dihubungkan ke interface dan disambungkan ke komputer. Sebuah pipa kapiler dengan panjang $(9,8 \pm 0,09) \times 10^{-2} \text{ m}$ dan diameter dalam $(2,1620 \pm 0,0096) \times 10^{-3} \text{ m}$ tersambung secara vertikal ke bagian bawah tangki sehingga cairan dapat mengalir dengan kecepatan tertentu. Data perubahan massa pada viskometer akibat penurunan massa cairan di dalam tangki direkam oleh sensor gaya. Selanjutnya dilakukan *fitting data* dengan memasukkan persamaan (21) ke dalam fungsi *define function* dengan terlebih dahulu menghitung variabel yang sudah diketahui nilainya. Adapun variabel bebas pada persamaan *fitting data* ini adalah α dan τ . Nilai τ yang diperoleh dari hasil *fitting data* digunakan untuk menghitung koefisien viskositas zat cair dengan menggunakan persamaan (8).

IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dari hasil pengambilan data diperoleh nilai berbagai variabel komponen perhitungan viskositas zat cair sebagai berikut.

Tabel I. Nilai Variabel Komponen Viskositas

No	Variabel	Jenis Zat Cair		
		Air	Oli SAE 10W-30	Gliserin
1	Massa Jenis (Kg/m ³)	952,0±	873,07±	1273,2±
		95,2	87,31	127,32
2	Suhu (°C)	22	33	33
3	Karakteristik waktu τ (detik)	33,85±	2744,0±	14130±
		0,11	103,4	127,9

Sehingga diperoleh nilai koefisien viskositas air, oli SAE 10W-30, dan gliserin sebagaimana ditunjukkan oleh tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Nilai Koefisien Viskositas Zat Cair

Zat Cair	Nilai Viskositas (mPa.s)	Nilai Viskositas Acuan (mPa.s)	Ralat (%)
Air	1,063±0,113	1,002×10 ⁻³	6,08
Oli SAE 10W-30	79,01±8,90	76,8	2,89
Gliserin	589,7±56,7	612	3,11

Dari tabel 2 dapat dilihat bahwa nilai eksperimen sesuai dengan nilai acuan.

V. Kesimpulan

Dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa pengukuran viskositas zat cair newtonian menggunakan viskometer kapiler dengan koreksi energi kinetik pada hukum Hagen-Poiseuille menghasilkan nilai koefisien viskositas air sebesar $(1,063 \pm 0,113) \text{ mPa.s}$ yang sesuai dengan nilai acuan teori yaitu 1,002 mPa.s, oli SAE 10W-30 sebesar $(79,01 \pm 8,90) \text{ mPa.s}$ sesuai dengan nilai acuan teori 76,8 mPa.s, dan gliserin sebesar $(593,4 \pm 56,7) \text{ mPa.s}$ sesuai dengan nilai acuan teori 612 mPa.s.

Ucapan Terimakasih

Ucapan terima kasih merupakan bentuk apresiasi adanya kontribusi dari perorangan maupun lembaga yang tidak bisa masuk sebagai penulis. Misalnya pemberi dana penelitian yang terkait dengan publikasi ini.

Kepustakaan

- [1] Kwon K, Sammalah P, dan Sanjeev R. 1999. "Experiments On Viscosity of Aqueous Glycerol Solutions Using a Tank-Tube Viscometer". *Chemical Engineering Education Division of ASEE*. 1999
- [2] Nevers, N.D. 1991. *Fluids mechanics for Chemical Enjiner*, 2nd ed. McGrawhill, New York
- [3] McCabe, W.L., Smith, J.C., and Harriot, P. 1993. *Unit Operations of Chemical Enjiners*, 5th ed. . McGrawhill, New York
- [4] Hermawati Y.M, Sri W Suciayati, dan Warsito. 2013. "Uji Viskositas Fluida Menggunakan Transduser Ultrasonik sebagai Fungsi Temperatur dan Akuisisinya pada Komputer Menggunakan Universal Serial Bus (USB)". *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* Vol, 01, No. 01, Januari 2013
- [5] Kestin J, Sokolov M, dan Wakeham W.A. 1978. Viscosity of Liquid Water in The Range -8c to 150°C. *Journals of Physics. Chemistry*. Ref.Data, Vol. 7, No. 1978.
- [6] KEW Engineering Ltd. 2017. "Oil Viscosity Explained". http://www.kewengineering.co.uk/Auto_oils/oil_viscosity_explained.htm. diakses pada: 12 Mei 2017
- [7] Segur, J.B. dan Helen. E. Oberstar. 1949. "Viscosity of Glycerol and Its Aqueous Solutions". *The Miner Laboratories Industrial and Engineering Chemistry*. Vol. 43, No. 9.
- [8] Nauenberg, M. 2014. "A Paradox with the Hagen-Poiseuille Relation for Viscous Fluid Flow". *American Journals of Physics*, Vol. 82, No. 1, Januari 2014

- [9] Waxman, M.A. 2010. *Using Physics to Investigate Blood Flow in Arteries : A Case Study for Premed Students. American Journals of Physics.* Vol 78, 970-973
- [10] Digilov, R. M. dan M. Reiner, 2005, "Weight-Controlled Capillary Viscometer". *American Journals of Physics Teacher.* 73 (11), November 2005
- [11] Fairman S J, Joseph A. Johnson, dan Thomas A. Walkiewicz . 2003. "Fluid Flow with Logger Pro". *The Physics Teacher.* Vol 41. September 2003