

PENENTUAN KOEFISIEN VISKOSITAS AIR MENGGUNAKAN METODE GETARAN PEGAS DENGAN KOREKSI KEDALAMAN PENETRASI DAN KOREKSI EFEK DINDING

Raden Oktova^{a)}, Nirva Diana

Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Ahmad Dahlan

Kampus III, Jl. Prof. Soepomo, Yogyakarta 55164

^{a)}E-mail : r.oktova@uad.ac.id

INTISARI

Telah dilakukan penelitian untuk menentukan koefisien viskoitas air pada suhu kamar dengan mengamati getaran teredam sebuah bola di dalam air. Analisis matematis dilakukan dengan menggunakan hukum Landau-Lifshitz, yang merupakan generalisasi hukum Stokes, sehingga muncul koreksi kedalaman penetrasi. Pengamatan posisi bola dilakukan dengan program Tracker, dan untuk membantu perhitungan dilakukan analisis regresi linier dengan program REGLIN berbasis Compaq Visual Fortran 6.5 pada sistem operasi Windows XP. Dari gradien garis hasil regresi, periode getaran, massa dan diameter bola diperoleh rata-rata koefisien viskositas air sebesar $(2,7 \pm 0,7) \times 10^{-2}$ poise jika tidak dilakukan koreksi efek dinding, lebih besar dari nilai acuan $(1,08 \pm 0,07) \times 10^{-2}$ poise. Dengan koreksi efek dinding diperoleh nilai rata-rata $(1,16 \pm 0,08) \times 10^{-2}$ poise, sesuai nilai acuan.

Kata kunci: viskositas air, hukum Landau-Lifshitz, getaran pegas teredam, regresi linier, efek dinding, kedalaman penetrasi.

I. PENDAHULUAN

Banyak metode yang telah digunakan dalam menentukan koefisien viskositas fluida, di antaranya adalah metode bola jatuh dengan mengandaikan berlakunya hukum Stokes, dan metode aliran fluida dalam tabung kapiler dengan mengandaikan berlakunya hukum Newton tentang gesekan fluida (lihat tinjauan pustaka dalam Nelkom dan Parker, 1995).

Pada eksperimen nyata gerak jatuh bola dalam fluida di dalam suatu tabung dengan ukuran berhingga, untuk analisis yang teliti diperlukan koreksi efek dinding (*wall effect*) terhadap nilai koefisien viskositas yang diperoleh. Hal ini mengingat pantulan fluida pada dinding yang berjarak berhingga akan mempengaruhi gerak bola, berbeda dengan keadaan ideal di mana bola meluncur dalam fluida di dalam ruang tanpa batas seperti yang diandaikan dalam hukum Stokes (Chen dan Wang, 2004).

Walaupun gerak bola jatuh memenuhi hukum Stokes, hasil perhitungan teoretis yang lebih umum oleh Landau dan Lifshitz (1987:83-90, selanjutnya akan disebut hukum Landau-Lifshitz) membuktikan bahwa hukum Stokes tidak berlaku pada gerak periodik, misalnya sebuah bola yang bergetar. Koreksi atau generalisasi analisis getaran bola dalam hukum Landau-Lifshitz memunculkan konsep baru berupa koreksi kedalaman penetrasi (*penetration depth*). Belakangan, percobaan yang dilakukan dengan bola yang bergetar (Gupta, dkk., 1986, Shamim, dkk., 2010) tidak didasarkan pada hukum Stokes melainkan hukum Landau-Lifshitz.

Sementara itu perkembangan teknologi informasi telah menghadirkan beberapa perangkat lunak untuk membantu pengamatan posisi benda bergerak melalui analisis video, misalnya aplikasi analisis video dan alat pemodelan Tracker yang sengaja dirancang dalam kerangka aplikasi Java oleh Open Source Physics Project untuk digunakan dalam pendidikan fisika (Brown, 2013).

Dalam makalah ini disajikan hasil penelitian penentuan koefisien viskoitas air pada suhu kamar dengan getaran pegas teredam, di mana pengamatan posisi beban dipermudah dengan program Tracker, dan untuk membantu perhitungan dilakukan analisis regresi linier dengan bantuan komputer pribadi. Program Tracker dimanfaatkan dalam penelitian ini untuk mengamati

posisi bola yang bergetar karena dapat meningkatkan ketelitian hasil yang diperoleh dan dapat diunduh secara gratis dari internet. Perhitungan dalam percobaan ini didasarkan pada hukum Landau-Lifshitz, dengan koreksi kedalaman penetrasi dan koreksi efek dinding. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai perangkat percobaan di laboratorium yang dapat digunakan mahasiswa fisika atau pendidikan fisika.

II. KAJIAN PUSTAKA

a. Kajian Hasil Penelitian Terdahulu

Koefisien viskositas fluida dipengaruhi oleh suhu. Apabila suhu naik maka koefisien viskositas fluida makin kecil. Hal ini disebabkan waktu interaksi antarmolekul fluida menjadi berkurang dan gaya gesekan (*shear force*) menjadi berkurang pula (Seeton, 2006). Misalnya, penentuan koefisien viskositas air dengan metode Ostwald dengan tabung kapiler memberikan nilai koefisien viskositas sebesar $1,1 \times 10^{-2}$ poise pada suhu $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $0,8 \times 10^{-2}$ poise pada suhu $30 \text{ }^\circ\text{C}$, dan $0,6 \times 10^{-2}$ poise pada suhu $50 \text{ }^\circ\text{C}$ (Nelkom dan Parker, 1995: 180-181).

Salah satu perkembangan teknologi informasi yang dapat membantu dalam pengamatan posisi sebuah benda yang bergerak adalah pengembangan perangkat lunak analisis video, yang dalam pembelajaran fisika telah cukup lama dikenal (Beichner, 1996, Laws dan Pfister, 1998). Pada tahun 2011 misalnya, telah muncul beberapa program komputer, baik yang komersial maupun yang gratis, misalnya Tracker, Logger Pro, Coach 6, VideoPoint, Window Motion Visualizer DV dari Alberti. Di antara berbagai program tersebut, Tracker adalah satu-satunya program gratis dan bersifat sebagai *open source*, serta dapat diunduh di <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker> atau <http://www.compadre.org/OSP/> (lihat tinjauan terbaru oleh Brown, 2013). Format video yang digunakan program-program tersebut terasa familier dengan mahasiswa, mengandung data ruang sekaligus data waktu, dan merupakan jembatan penghubung antara pengamatan langsung gejala fisika dan penyajian abstraknya. Tidak mengherankan bahwa analisis video banyak digunakan dalam berbagai bidang fisika, termasuk mekanika, elektromagnetika, optika, spektroskopi, bahkan termodinamika (Brown dan Cox, 2009). Program Tracker yang dikembangkan oleh Open Source Physics Project (Christian, dkk., 2011, Brown 2007, Brown 2009) mengandung kombinasi antara pemodelan fisika berbasis komputer (Jackson, dkk., 2008, Christian dan Esquembre, 2007) dan analisis video, dengan suatu keistimewaan bahwa simulasi model digambarkan secara langsung dalam video dengan menggunakan basis waktu dan sistem koordinat yang sama.

Salah satu percobaan mutakhir untuk menentukan koefisien viskositas air dengan memanfaatkan teknologi informasi dilakukan oleh Shamim, dkk. (2010) dengan metode ayunan bola yang diamati dengan *webcam*, dan diperoleh koefisien viskositas air suling sebesar $(1,08 \pm 0,07) \text{ mPa}\cdot\text{s}$ atau $(1,08 \pm 0,07) \times 10^{-2}$ poise pada suhu $20 \text{ }^\circ\text{C}$, sesuai dengan nilai standard yang diketahui sebelumnya (Tørklep, 1993).

b. Gaya Viskos vs. Gaya Turbulen

Jika sebuah bola bergerak relatif terhadap suatu fluida dalam ruang yang sangat besar, secara umum gaya gesekan dapat dibagi menjadi dua: aliran laminar (*streamline*) dengan gaya gesekan viskos (*viscous drag*) yang untuk bola berkelajuan konstan memenuhi hukum Stokes (Falkovich, 2011:39), dan aliran turbulen yang memunculkan gaya gesekan turbulen atau gaya inersial. Gabungan gaya gesekan viskos dan gaya gesekan turbulen memberikan gaya gesekan total

$$F_{\text{tot}} = 6\pi\eta Rv + \frac{1}{2}C_d A\rho v^2, \quad (1)$$

dengan suku pertama adalah gaya gesekan viskos dan suku kedua gaya gesekan turbulen, sedangkan η , R , v , C_d , A , ρ berturut-turut adalah koefisien viskositas, jari-jari bola, kecepatan bola, koefisien gesekan turbulen (*drag coefficient*), luas penampang bola, dan massa jenis fluida (nama lengkap untuk η adalah koefisien viskositas **dinamik**, untuk membedakan dari besaran η/ρ yang dikenal sebagai koefisien viskositas **kinematik**). Perbandingan gaya gesekan turbulen terhadap gaya viskos adalah

$$\frac{F_{\text{turb}}}{F_{\text{vis}}} = \frac{C_d}{24} \text{Re}, \quad (2)$$

dengan Re adalah bilangan Reynolds, yaitu suatu besaran tak berdimensi yang dapat didefinisikan sebagai

$$\text{Re} = \frac{2\rho Rv}{\eta} \quad (3.a)$$

atau

$$\text{Re} = \frac{\rho d v}{\eta}, \quad (3.b)$$

dan d adalah diameter bola. Aliran fluida melalui pipa akan laminar jika $\text{Re} \leq 2000$. Untuk $\text{Re} \geq 3000$ aliran akan turbulen. Nilai Re antara 2000 dan 3000 adalah wilayah transisi dimana aliran stabil dan dapat berulang tak menentu antara laminar dan turbulen (Marion, 1979:38).

Selanjutnya, dalam pasal-pasal berikut makalah ini diandaikan aliran bersifat laminar, dan gesekan fluida hanya berasal dari gaya gesekan viskos saja atau dengan kata lain gaya gesekan turbulen dapat diabaikan.

c. Analisis Getaran Selaras Teredam

Landau dan Lifshitz (1987:83-90) memperoleh sebuah persamaan untuk gaya gesekan viskos pada sebuah bola yang bergetar dalam fluida

$$F = - \left[6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\delta} \right) v + 3\pi R^2 \left(1 + \frac{2R}{9\delta} \right) \left(\frac{2\eta\rho}{\omega} \right)^{1/2} \frac{dv}{dt} \right], \quad (4)$$

dengan v , dv/dt , R dan ω adalah kecepatan, percepatan, jari-jari dan frekuensi sudut getaran bola, η dan ρ berturut-turut adalah koefisien viskositas dan massa jenis fluida, dan δ disebut kedalaman penetrasi yang didefinisikan dengan

$$\delta = \left(\frac{2\eta}{\rho\omega} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

Untuk gerak lurus beraturan (GLB), kecepatan konstan, frekuensi sudut menjadi sama dengan nol, dan kedalaman penetrasi menjadi tak berhingga, sehingga pers. (4) tereduksi menjadi hukum Stokes

$$F = -6\pi\eta R v. \quad (6)$$

Jadi hukum Landau-Lifshitz, pers. (4) merupakan bentuk umum dari hukum Stokes. Pada kasus khusus getaran teredam di mana rata-rata waktu disipasi tenaga dari suku $\frac{dv}{dt}$ dalam pers. (4) diabaikan dibandingkan suku v , maka berlaku

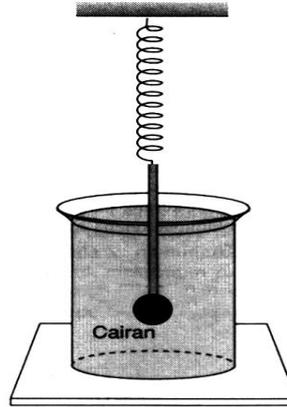
$$F = -6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\delta} \right) v, \quad (7)$$

yang dapat ditulis

$$F = -b v, \quad (8.a)$$

yang mirip dengan hukum Stokes, kecuali bahwa konstanta kesebandingan $b = 6\pi\eta R$ dalam hukum Stokes sekarang dikalikan dengan faktor $(1 + R/\delta)$ atau $(1 + d/2\delta)$ yang bernilai lebih besar dari satu, menjadi

$$b = 6\pi\eta R \left(1 + \frac{R}{\delta} \right). \quad (8.b)$$



Gambar 1. Rangkaian alat percobaan pegas teredam.

Alat percobaan ditunjukkan secara diagramatis dalam Gambar 1. Pada sebuah pegas digantungkan sebuah beban berbentuk bola yang tercelup di dalam cairan berupa air pada suhu kamar. Beban disimpangkan ke bawah dan dilepaskan tanpa kecepatan awal, sehingga terjadi getaran teredam pada arah vertikal, yang untuk selanjutnya disebut sumbu Y. Persamaan gerak bola yang bergetar dapat dicari dengan hukum Newton II tentang gerak, dan diperoleh persamaan diferensial

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{b}{m} \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (9)$$

dengan

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \quad (10)$$

adalah frekuensi sudut getaran bebas sederhana (tanpa redaman), m massa bola (dengan massa pegas diabaikan) dan k konstanta pegas. Dengan syarat awal

$$y(0) = A_0, \quad \frac{dy}{dt}(0) = 0, \quad (11)$$

penyelesaian pers. (9) dapat ditulis sebagai

$$y(t) = A_0 e^{-\frac{bt}{2m}} \cos(\omega t + \varphi), \quad (12)$$

dengan A_0 simpangan awal dan φ sudut fase awal. Pers. (12) merupakan persamaan getaran selaras teredam dengan amplitudo menurun secara eksponensial, dan dari amplitudo sebagai fungsi waktu

$$A = A_0 e^{-\frac{bt}{2m}}, \quad (13)$$

untuk saat-saat simpangan maksimum atau $t = nT$ diperoleh

$$\ln A_n = \ln A_0 - \frac{bT}{2m} n, \quad (14)$$

yang dapat dibawa menjadi persamaan linier berbentuk

$$Y = a_0 + a_1 X, \quad (15)$$

dengan $Y = \ln A_n$ dan $X = n$. Koefisien-koefisien regresi linier dapat dihitung dari

$$a_0 = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i^2 - \sum X_i \sum (X_i Y_i)}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}, \quad (16.a)$$

$$a_1 = \frac{N \sum (X_i Y_i) - \sum X_i \sum Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}, \quad (16.b)$$

dengan N adalah cacah titik data pasangan (X_i, Y_i) dari hasil percobaan (Bevington dan Robinson, 2003), dan ralatnya dihitung dari

$$s_{a_0} = s_{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}}, \quad (17.a)$$

$$s_{a_1} = s_{\bar{y}} \sqrt{\frac{N}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}}, \quad (17.b)$$

dengan

$$s_{\bar{y}} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N - 2}}. \quad (17.c)$$

Dari pers. (8), (14) dan (15) terlihat bahwa

$$a_1 = -\frac{3\pi\eta d T}{2m} \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right), \quad (18)$$

sehingga koefisien viskositas air dan ralatnya dapat dihitung dari

$$\eta = -\frac{2ma_1}{3\pi d T \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right)}, \quad (19)$$

$$s_\eta = \left\{ \left(\frac{\partial \eta}{\partial m} s_m \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial a_1} s_{a_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial T} s_T \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \delta} s_\delta \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial d} s_d \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (20)$$

dengan s_m , s_{a_1} , s_T , s_δ , s_d berturut-turut adalah ralat untuk massa beban m , koefisien linier a_1 , periode getaran T , kedalaman penetrasi δ dan diameter bola d , atau

$$s_\eta = \left\{ \left(\frac{-2a_1}{3\pi d T \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right)} s_m \right)^2 + \left(\frac{-2m}{3\pi d T \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right)} s_{a_1} \right)^2 + \left(\frac{2ma_1}{3\pi d T^2 \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right)} s_T \right)^2 + \left(\frac{-2ma_1}{3\pi d T \left(1 + \frac{d}{2\delta}\right)^2} s_\delta \right)^2 + \left(\frac{-2ma_1}{3\pi d \left(1 + \frac{d^2}{2\delta}\right)^2} s_d \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (21)$$

d. Koreksi Efek Dinding

Terdapat beberapa perumusan efek dinding, dan dalam penelitian ini digunakan koreksi empiris efek dinding yang banyak digunakan sebelum ini, yang berbentuk

$$\eta_{terkoreksi} = \eta \left(1 - 2,104 \left(\frac{d}{D} \right) + 2,09 \left(\frac{d}{D} \right)^2 - 0,95 \left(\frac{d}{D} \right)^3 \right), \quad (22)$$

dengan D diameter tabung (Dinsdale dan Moore, 1962). Ralat koefisien viskositas terkoreksi adalah

$$s_{\eta_{\text{terkoreksi}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_{\text{terkoreksi}}}{\partial \eta}(s_{\eta})\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{\text{terkoreksi}}}{\partial p}(s_p)\right)^2}, \quad (23)$$

atau

$$s_{\eta_{\text{terkoreksi}}} = \sqrt{(1 - 2,104p + 2,09p^2 - 0,95p^3)^2 (s_{\eta})^2 + (\eta (-2,104 + 4,18p - 2,85p^2))^2 (s_p)^2}, \quad (24)$$

dengan

$$p = \frac{d}{D}, \quad (25.a)$$

dan ralatnya

$$s_p = \bar{p} \sqrt{\left(\frac{s_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{s_D}{D}\right)^2}. \quad (25.b)$$

Dalam pers. (22), (23) dan (24), η adalah koefisien viskositas belum terkoreksi yang dihasilkan dari pers. (19).

Perumusan-perumusan lain mempunyai bentuk yang mirip dengan pers. (22), misalnya Chen dan Wang (2004) merumuskan koreksi efek dinding yang lebih sederhana, dengan faktor koreksi $(1 + R/D)$ atau $\{1 + d/(2D)\}$.

III. METODE PENELITIAN

a. Alat yang Digunakan

Rangkaian alat percobaan ditunjukkan secara diagramatis dalam Gambar 1. Pada sebuah pegas digantungkan sebuah beban berbentuk bola yang tercelup di dalam air yang ditampung dengan bejana bervolume 2000 ml pada suhu kamar. Beban disimpangkan sejauh 3 cm dan dilepaskan sehingga terjadi getaran teredam. Beban yang digunakan berupa enam buah beban berbentuk bola dan penimbangan dilakukan dengan sebuah neraca lengan. Adapun diameter beban diukur dengan sebuah jangka sorong. Suhu air diukur dengan termometer air raksa. Sebuah kamera digital (*handycam*) digunakan untuk merekam gerak beban selama getaran, selanjutnya *file* video yang dihasilkan dianalisis dengan program *tracker*.

b. Pengambilan Data Video

Foto susunan alat yang digunakan dalam pengambilan video ditunjukkan pada Gambar 2.

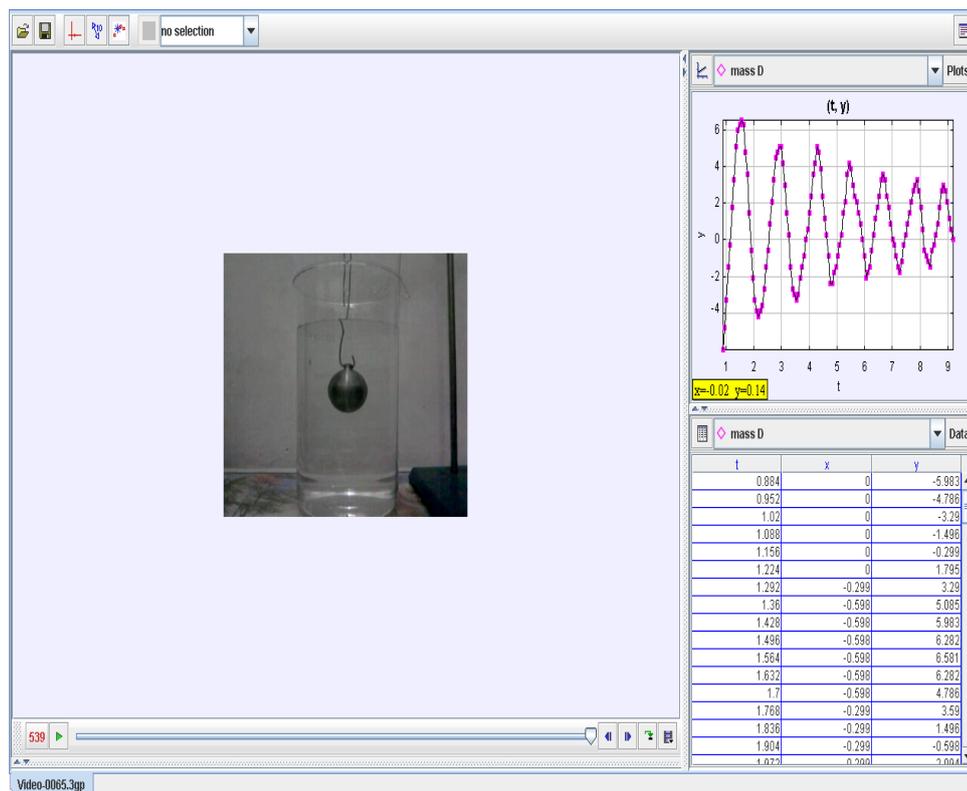


Gambar 2. Foto susunan alat percobaan dalam pengambilan data video sesungguhnya.

Beban dikaitkan pada ujung pegas yang telah digantung pada statif, dan diukur panjang pegas setelah diberi beban, kemudian pegas disimpangkan sejauh 3 cm, selanjutnya dilepaskan sehingga bergetar. Pengambilan video dimulai dengan melepaskan beban yang telah ditarik sampai beban berhenti bergetar. Langkah-langkah tersebut diulangi dengan bola yang berbeda.

c. AnalisisTracker

Secara garis besar prosedur analisis data video dengan program Tracker adalah sebagai berikut. Mula-mula Tracker dihidupkan, dan diaktifkan menu *window, right view*, kemudian video getaran teredam dipanggil melalui *file* dan *import*, sehingga muncul tampilan video getaran teredam. Video dijalankan dengan melakukan *tracking* gerakan benda dengan menggunakan pilihan *track, new* dan *point mass* untuk mendapatkan data angka simpangan horizontal beban (x), simpangan vertikal beban (y) pada berbagai nilai waktu (t) yang dipilih untuk *tracking*, dan grafik hubungan simpangan vertikal beban terhadap waktu.



Gambar 3. Tampilan hasil *tracking* beban.

Contoh tampilan data dan grafik pada Tracker ditunjukkan pada Gambar 3. Dari data hubungan simpangan vertikal terhadap waktu yang diperoleh dibuat grafik dengan menggunakan Microsoft Excel, kemudian dari posisi puncak-puncak kurva getaran selaras teredam diperoleh nilai-nilai amplitude getaran A_n pada cacah getaran ke- n .

d. Analisis Regresi Linier dan Perhitungan Koefisien Viskositas

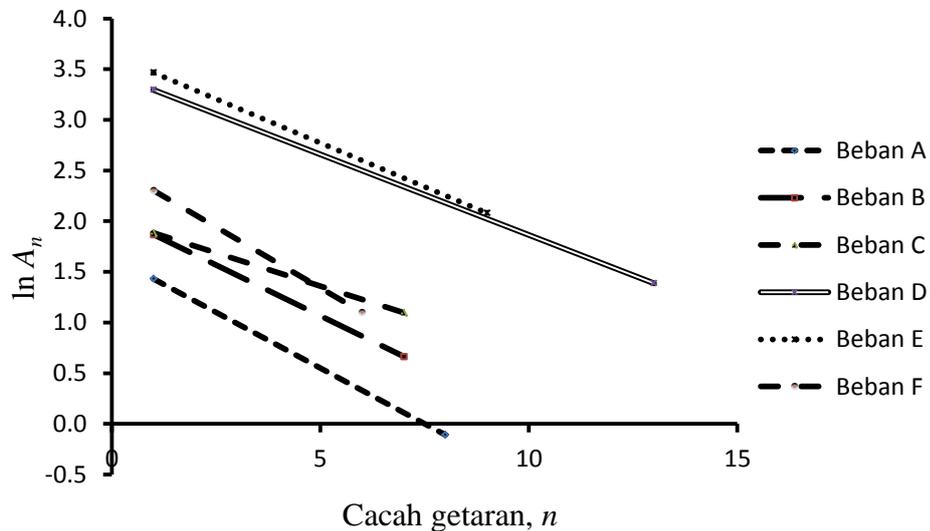
Analisis analisis regresi linier $\ln A_n$ terhadap cacah getaran n dilakukan dengan program REGLIN yang dibuat berbasis Compaq Visual Fortran 6.5 yang dijalankan dengan sistem operasi Windows XP (Martini dan Oktova, 2009) sehingga dihasilkan nilai parameter a_0 dan a_1 serta ralatnya, kemudian dihitung koefisien viskositas (η) dari nilai a_1 , massa beban dan periode getaran dengan menggunakan pers. (19) dan (21). Terakhir dilakukan koreksi efek dinding dengan menggunakan pers. (22) sampai dengan (25).

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penimbangan massa keenam beban dengan sebuah neraca lengan menghasilkan nilai berturut-turut 43,86 gram, 67,16 gram, 105,62 gram, 136,14 gram, 185,52 gram, 200,95 gram.

Karena kelajuan bola yang bergetar tidak konstan, bilangan Reynolds berdasarkan pers. (3) dapat diperkirakan dengan mengambil nilai kelajuan v berupa rata-rata kelajuan bola dalam satu periode, $\bar{v} = 4A/T$, dengan A adalah amplitudo dan T periode. Untuk amplitudo A diambil rata-rata dari awal pengamatan hingga akhir pengamatan, yaitu sekitar 3 cm dibagi 10 atau 0,3 cm, sedangkan periode T untuk keenam percobaan bervariasi dengan nilai terkecil 0,581 s, sehingga kelajuan rata-rata bernilai sekitar 2,065 cm/s. Perkiraan nilai kelajuan ini agak terlalu besar, mengingat pengertian kelajuan dalam definisi bilangan Reynolds adalah kelajuan fluida pada jarak tertentu dari bola, bukan kelajuan bola itu sendiri. Untuk koefisien viskositas air diambil nilai standard pada suhu kamar sekitar 10^{-2} poise, sedangkan untuk massa jenis air diambil 1 gram/cm^3 , dan diameter bola d mempunyai nilai terbesar 5,81 cm. Dengan demikian diperkirakan nilai bilangan Reynolds tidak akan melebihi 1200, yang menunjukkan bahwa aliran air dalam percobaan adalah laminar.

Gambar 4 adalah grafik hasil regresi linier hubungan $\ln A_n$ terhadap cacah getaran n untuk keenam beban, dan Tabel I adalah hasil perhitungan koefisien viskositas air untuk keenam beban tersebut.



Gambar 4. Grafik $\ln A_n$ terhadap cacah getaran n .

Tabel I. Nilai koefisien viskositas air tanpa dan dengan koreksi efek dinding.

Beban	d (cm)	m (gr)	Tanpa koreksi, η (10^{-2} poise)	Dengan koreksi, $\eta_{\text{terkoreksi}}$ (10^{-2} poise)
A	3,16	43,86	(2,7 \pm 0,3)	(1,62 \pm 0,18)
B	3,52	67,16	(2,5 \pm 0,9)	(1,56 \pm 0,51)
C	4,18	105,62	(1,6 \pm 0,3)	(0,95 \pm 0,15)
D	4,51	136,14	(2,0 \pm 0,3)	(0,97 \pm 0,15)
E	5,12	185,52	(3,2 \pm 1,1)	(1,41 \pm 0,49)
F	5,18	200,95	(3,4 \pm 1,2)	(1,48 \pm 0,52)

Jika dilihat Tabel I, nilai koefisien viskositas air (η) untuk keenam beban sebelum dikoreksi efek dinding secara konsisten lebih besar dari pada acuan $(1,08 \pm 0,07) \times 10^{-2}$ poise (Shamim, dkk., 2010), yaitu sekitar dua kali lebih besar, dan dalam batas-batas ralat perhitungan ternyata secara umum keenam nilai tersebut mendekati satu sama lain. Jika diambil rata-rata berbobot diperoleh nilai $(2,7 \pm 0,7) \times 10^{-2}$ poise. Setelah dikoreksi efek dinding, dihasilkan koefisien viskositas yang sesuai dengan nilai acuan, kecuali untuk beban A yang masih sedikit lebih besar dari nilai acuan, dengan rata-rata berbobot sebesar $\eta_{\text{terkoreksi}} = (1,16 \pm 0,08) \times 10^{-2}$ poise. Hal ini menunjukkan bahwa koreksi efek dinding secara signifikan mempengaruhi ketelitian.

Untuk melihat seberapa signifikan faktor koreksi kedalaman penetrasi, adalah menarik untuk membandingkan nilai koefisien viskositas yang diperoleh dalam penelitian ini (menggunakan hukum Landau-Lifshitz) dengan nilai koefisien viskositas yang akan diperoleh jika koreksi kedalaman penetrasi diabaikan (dengan kata lain, menggunakan hukum Stokes). Kedalaman penetrasi, δ dalam penelitian ini untuk beban A, B, C, D, E dan F berturut-turut $0,043 \pm 0,008$, $0,051 \pm 0,011$, $0,060 \pm 0,015$, $0,062 \pm 0,001$, $0,064 \pm 0,002$, dan $0,062 \pm 0,002$ cm, sehingga nilai rata-rata faktor koreksi kedalaman penetrasi $(1 + d/2\delta)$ untuk keenam beban berturut-turut bernilai 43,0, 35,5, 35,8, 37,4, 41,0, dan 42,8. Jika digunakan hukum Stokes untuk menganalisis getaran selaras teredam pegas, maka akan diperoleh nilai koefisien viskositas 35,5 hingga 43,0 kali lebih besar. Dengan demikian penggunaan hukum Landau-Lifshitz yang memunculkan faktor koreksi kedalaman penetrasi sangat penting untuk mendapatkan nilai koefisien viskositas yang teliti.

Selanjutnya jika digunakan sebagai alat praktikum fisika, percobaan dapat dirancang untuk dua orang mahasiswa secara berpasangan, misalnya pada saat pengambilan video, seorang praktikan bertugas melepaskan beban dan seorang praktikan lagi bertugas sebagai pengatur kamera, sedangkan proses analisis video dengan Tracker dapat dilakukan oleh satu orang secara bergantian.

KESIMPULAN DAN SARAN

Jika tidak dilakukan koreksi efek dinding, diperoleh rata-rata koefisien viskositas air $(2,7 \pm 0,7) \times 10^{-2}$ poise, mendekati nilai acuan $(1,08 \pm 0,07) \times 10^{-2}$ poise. Dengan koreksi efek dinding, diperoleh rata-rata koefisien viskositas air yang lebih teliti sebesar $(1,16 \pm 0,08) \times 10^{-2}$ poise, sesuai nilai acuan.

Alat ini layak diujicobakan untuk praktikum fisika dasar pada mahasiswa S1 fisika dan pendidikan fisika, dan dapat digunakan secara berpasangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Beichner, R., 1996, "The Impact of Video Motion Analysis on Kinematic Graph Interpretation Skills," *Am. J. Phys.*, **64**, 1272–1277.
- Bevington, P.R. dan Robinson, D.K., 2003, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences," New York: McGraw-Hill.
- Brown, D., 2013, "Sharing Video Experiments with Tracker Digital Libraries", *Proceedings AAPT Winter Seminar 2013*, New Orleans, USA.
- Brown, D., 2009, "Video Modeling with Tracker," *Proceedings AAPT 2009 Summer Meeting*, Ann Arbor, MI, USA.
- Brown, D., 2007, "Combining Computational Physics with Video Analysis in Tracker", *Proceedings AAPT 2007 Summer Meeting*, Greensboro, NC, USA.
- Brown, D. dan Cox, A., 2009, "Innovative Uses of Video Analysis," *Phys. Teach.*, **47**, 145–150.

- Chen, S. T. dan Wang, S. C., 2004, "Experimental Determination among Available Theories Describing the Drag Force Exerting on Steel Spheres and Cu and Al Cylinders Moving in a Viscous Fluid," *Phys. Scr.*, **70**, 349–353.
- Christian, W., Brown, D., Esquembre, F., 2011, "OSP Tools and the ComPADRE OSP Collection", *APS Forum on Education Summer 2011 Newsletter*, <http://www.aps.org/units/fed/newsletters/summer2011/osp.cfm>.
- Christian, W. dan Esquembre, F., 2007, "Modeling Physics with Easy Java Simulations," *Phys. Teach.*, **45**, 475–480.
- Dinsdale, A. dan Moore, F., 1962, "Viscosity and Its Measurement," London: Chapman & Hall.
- Falkovich, G., 2011, "Fluid Mechanics: A Short Course for Physicists," Cambridge: Cambridge University Press.
- Gupta, V.K., Shanker, G., Sharma, N.K., 1986, "Experiment on Fluid Drag and Viscosity with an Oscillating Sphere," *Am. J. Phys.*, **54**(7), 619-622.
- Jackson, J., Dukerich, L., Hestenes, D., 2008, "Modeling Instruction: An Effective Model for Science Education," *Sci. Educ.*, **17**(1), 10–17.
- Landau, L.D., dan Lifshitz, E.M., 1987, "Fluid Mechanics," 2nd Ed., Oxford: Pergamon.
- Laws, P. dan Pfister, H., 1998, "Using Digital Video Analysis in Introductory Mechanics Projects", *Phys. Teach.*, **36**, 282–287.
- Marion, J.B., 1979, "General Physics with Bioscience Essays," John Wiley.
- Martini, D. dan Oktova, R., 2009, "Penentuan Modulus Young Kawat Besi dengan Percobaan Regangan", *Berkala Fisika Indonesia*, **2** (1), 1-14.
- Nelkom, M dan P., Parker, 1995, "Advanced Level Physics" 3rd Edition, London: Heinemann Educational Books.
- Seeton, C.J., 2006, "Viscosity–Temperature Correlation for Liquids," *Tribology Letters*, **22**(1), 67-78.
- Shamim, S., Zia, W., Anwar, M.S., 2010, "Investigating Viscous Damping Using a Webcam," *Am. J. Phys.*, **78**(4), 433-436.
- Tørklep, K., 1993, "Viscosity of Water at 20°C," *Int. J. Thermophysics*, **14** (4), 989-991.