

## PENENTUAN VISKOSITAS FLUIDA DAN KECEPATAN TERMINAL BOLA UJI DENGAN PENDEKATAN TEORI DAN EKSPERIMEN

Neni Indah Astuti

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: [neniastuti16030224035@mhs.unesa.ac.id](mailto:neniastuti16030224035@mhs.unesa.ac.id)

### Abstrak

Penelitian skripsi ini bertujuan untuk menentukan nilai viskositas dinamik  $\eta$  fluida uji dan kecepatan terminal  $v_T$  bola uji dengan menerapkan metode bola jatuh. Instrumen ukur yang digunakan dalam penelitian adalah perangkat keras dan lunak yang meliputi sistem sensor *transmitter-receiver* (LED infra merah dan dioda-foto sebanyak 2 pasang) dan mikrokontroler. Bola uji yang digunakan berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm dan tabung silinder berdiameter penampang 3,6 cm dan 5,6 cm sedangkan fluida viskos yang diuji adalah minyak pelumas jenis SAE 30 dan SAE 40. Temuan penelitian ini adalah: (1) viskositas minyak pelumas SAE 30,  $\eta \approx 0,19$  Pa.s berbeda 5% dari nilai referensi sebesar 0,20 Pa.s (<https://physics.info/viscosity>) dan viskositas minyak pelumas SAE 40,  $\eta \approx 0,30$  Pa.s berbeda 6% dari nilai referensi sebesar 0,32 Pa.s menurut laman tersebut; dan (2) kecepatan terminal bola uji  $v_T$  ditemukan lebih besar untuk percobaan dengan diameter bola uji yang lebih besar dengan penyimpangan hasil ukur  $v_T$  dalam kisaran 5-8%. Penyimpangan hasil ukur  $\eta$  dan  $v_T$  sebesar itu masih bisa diterima dengan pertimbangan ketelitian instrumen ukur, teknik pengukuran dan *experimental set-up*. Kesulitan utama percobaan uji viskositas dengan metode bola jatuh adalah akurasi penentuan panjang fase pengamatan dan akurasi pencatatan selang waktu terukur  $t$ . Nilai viskositas fluida uji tidak ditentukan oleh kecepatan terminal bola uji karena viskositas adalah besaran karakteristik fluida yang nilainya bergantung pada struktur ikatan molekul dan tidak bergantung pada jenis dan metode percobaan, serta ragam instrumen dan teknik pengukuran. Sebaliknya, kecepatan terminal bola uji merupakan besaran kinematik yang dipengaruhi oleh jenis dan metode percobaan, serta ragam instrumen dan teknik pengukuran.

**Kata Kunci:** percobaan uji viskositas, viskositas dinamik, kecepatan terminal

### Abstract

This study aims to determine viscosity  $\eta$  of a fluid and a terminal velocity  $v_T$  using a series of falling ball experiments. Experimental instruments include hardware and software involving transmitter-receiver system (2 pairs of infrared LED dan photo-diode) and microcontroller. Falling balls used have dimensions of 1.1 cm, 1.5 cm and 1.9 cm in diameter and cylindrical tubes of 3.6 cm and 5.6 cm in diameter whereas tested fluids are two types of lubricant oils, namely SAE 30 and SAE 40. The results are as follows: (1) the viscosity of SAE 30,  $\eta \approx 0,19$  Pa.s differing from reference for oil of the same type of 0,20 Pa.s given by <https://physics.info/viscosity> by 5% and the viscosity of SAE 40,  $\eta \approx 0,30$  Pa.s differing from reference for oil of the same type of 0,32 Pa.s referred to the same site by 6%; and (2) terminal velocity  $v_T$  for falling balls increases with increasing sizes of the balls with deviations from predicted terminal velocity for  $v_T$  measurements are found to be in the range 5-8%. Such deviations are acceptable in the limitation of uncertainties in instruments used, measurement techniques and experimental set-ups. The primary difficulties in doing this study mainly refer to accuracy in determination of the length of observations during each run and experimental time duration record  $t$ . From all runs, we conclude that the viscosity of a fluid does not correspond to the terminal velocity of a test ball because it is an intrinsic quantity for a particular fluid. Rather, the viscosity of a fluid depends on molecular structures of the fluid, but is independent of experimental methods, types of instruments, and measurement techniques. On the other hand, terminal speed of a falling ball is a kinematic quantity being dependent on the experimental methods, types of instruments, and measurement techniques.

**Keywords:** viscosity experiment, dynamic viscosity, terminal velocity

### PENDAHULUAN

Uji viskositas fluida melalui serangkaian percobaan di laboratorium dengan bantuan seperangkat instrumen ukur dan teknik pengukuran yang bisa diandalkan telah banyak dilakukan dalam berbagai bidang kajian, misalnya bidang fisika material fluida biologi, protein dan DNA (Tang, 2016), fisika medis (Kang, 2018), fisika industri pelumas kendaraan bermotor (Wibowo, 2018), dan fisika industri minyak goreng (Muhammad dan Yudhana, 2019).

Dalam skala laboratorium, penentuan viskositas banyak dilakukan dengan metode bola uji jatuh dalam fluida viskos (Brizard *et al.*, 2005; Feng *et al.*, 2006; Houari, 2011) dengan variasi alat ukur dan teknik pengukuran. Perkembangan teori dan formulasi empiris kecepatan terminal bola uji jatuh serta friksi yang dialami selama gerak dalam fluida viskos yang langsung berhubungan dengan viskositas dibahas komprehensif oleh Dey *et al.* (2019). Pada prinsipnya, hasil-hasil

percobaan metode bola uji jatuh dalam fluida viskos dianalisis dalam konteks analogi dengan aliran fluida viskos melewati halangan fisis berupa bola pejal homogen (Liao, 2002; Ballereau *et al.*, 2016).

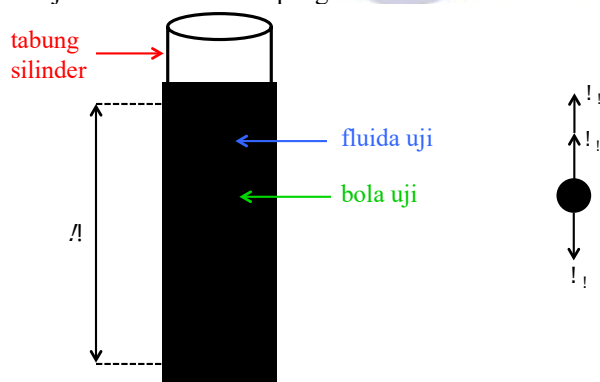
Instrumen penting dalam penentuan uji viskositas fluida adalah sensor untuk mendapatkan hasil-hasil pengukuran dengan tingkat akurasi yang relatif tinggi. Penelitian ini menerapkan metode bola uji jatuh dengan menggunakan sensor deteksi infra merah 2-30 cm mikrokontroler yang terdiri dari LED infra merah sebagai *transmitter* dan dioda-foto sebagai *receiver*. Penggunaan sensor deteksi infra merah 2-30 cm dalam penelitian ini karena tiga alasan berikut. Pertama, metode bola uji jatuh memberi peluang untuk melakukan analisis teoritik melalui bahasan gerak objek fisis dalam fluida viskos. Kedua, sensor tersebut lebih sensitif dalam mendeteksi lintasan gerak objek fisis yang memotong berkas sinar infra merah. Ketiga, sensor tersebut dan bahan percobaan (variasi minyak pelumas dan bola uji) mudah diperoleh di pasaran dengan harga yang murah.

Viskositas fluida merupakan ukuran kekentalan fluida yang memberikan gambaran seberapa besar friksi yang dialami oleh bola uji saat bergerak dalam fluida viskos. Menurut Ballereau *et al.* (2016), aliran fluida viskos dapat dipandang sebagai aliran laminar maupun turbulen bergantung dari seberapa besar kecilnya bilangan Reynolds yang didefinisikan sama seperti dalam Prastowo *et al.* (2009) dan dituliskan sebagai

$$Re = \frac{U_c L_c}{\nu} \quad (1)$$

Untuk aliran fluida dengan nilai  $Re < 10^3$  maka alirannya adalah laminar (G.U.N.T. Gerätebau GmbH, 1997).

Percobaan uji viskositas fluida memenuhi relasi  $d < 0,6D$  (Ballereau *et al.*, 2016), di mana  $d$  adalah diameter bola dan  $D$  adalah diameter penampang tabung silinder agar pengaruh dinding tabung tidak memicu turbulensi (Ambari *et al.*, 1985; Ballereau *et al.*, 2016). Gambar 1 berikut mendiskripsikan diagram gaya yang bekerja pada bola uji saat melewati fase pengamatan.



**Gambar 1.** Gerak bola uji dalam fase *uniform motion*.

Fase krusial dalam metode bola uji jatuh adalah fase saat bola uji bergerak dengan kecepatan tetap yang dikenal sebagai kecepatan terminal  $v_T$  selama selang waktu  $t$  dan menempuh jarak sejauh  $l = v_T \times t$ . Selama fase ini (Gambar 1), persamaan gerak yang berlaku untuk bola uji dalam notasi vektor adalah

$$\mathbf{F}_G + \mathbf{F}_S + \mathbf{F}_B = 0 \quad (2)$$

Dengan substitusi  $\mathbf{F}_G = m_b g \hat{z}$  sebagai gaya gravitasi bola uji,  $\mathbf{F}_S = -6 \pi \eta r v_T \hat{z}$  sebagai *Stokes force* saat berada pada fase *uniform motion*,  $\mathbf{F}_B = -\rho_f g V_b \hat{z}$  pada persamaan (2) maka diperoleh rumusan viskositas dinamik fluida uji sebagai berikut

$$\eta = \frac{g}{18v_T} (\rho_b - \rho_f) d^2 \quad (3)$$

di mana  $\rho_b$  dan  $d$  berturut-turut menyatakan densitas dan diameter bola uji yang digunakan dalam percobaan uji viskositas (Ballereau *et al.*, 2016; Brizard *et al.*, 2005; Ali *et al.*, 2019).

Untuk mencapai fase *uniform* tersebut, gerak bola uji sebelumnya mengalami fase *non-uniform* terlebih dahulu. Pada fase ini, gaya hambat gerak bola uji selalu berlawanan terhadap gerak bola uji yang disebut *drag force*. Bentuk matematis *linear drag force* dalam notasi skalar adalah  $F_D = -bv$  dengan  $b$  adalah koefisien friksi. Persamaan gerak bola uji dalam arah vertikal adalah

$$ma = mg - bv \quad (4)$$

Persamaan (4) bisa dituliskan dalam bentuk diferensial berikut,

$$dv = \left( g - \frac{b}{m} v \right) dt \quad (5)$$

Persamaan (5) diintegrasikan untuk mendapatkan bentuk eksplisit kecepatan gerak objek fisis sebagai berikut,

$$v = \frac{mg}{b} \left( 1 - e^{-\frac{b}{m}t} \right) \quad (6)$$

saat  $t = 0$  objek fisis masih diam ( $v = 0$ ) kemudian objek fisis tersebut bergerak dipercepat dari  $t = 0$  sampai  $t \approx \infty$  sebelum mencapai fase *uniform motion* dengan kecepatan terminal  $v_T$  adalah

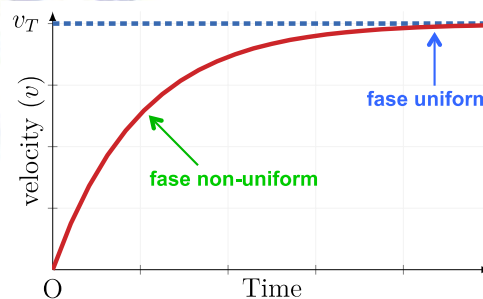
$$v_T = \frac{mg}{b} \quad (7)$$

Dalam praktek percobaan uji bola jatuh, koefisien friksi  $b$  dapat didekati dengan

$$b = 6 \pi \eta r \quad (8)$$

di mana  $\eta$  adalah besaran intrinsik fluida yaitu viskositas dinamik dan  $r$  adalah jari-jari bola uji jatuh.

Persamaan (6) di atas secara eksplisit menceritakan kebergantungan kecepatan gerak bola uji terhadap waktu yang dapat diilustrasikan secara sederhana oleh Gambar 2 di bawah ini.



**Gambar 2.** Diagram sederhana kecepatan gerak bola uji terhadap waktu untuk kasus *linear drag force* (sumber dari <https://www.concepts-of-physics.com/mechanics/stokes-law-and-terminal-velocity.php>).

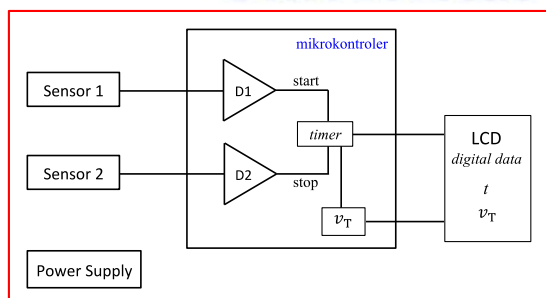
Dengan memperhatikan sistematika pendahuluan, maka penelitian ini bertujuan menentukan dan menganalisis viskositas dinamik  $\eta$  fluida uji dan kecepatan terminal  $v_T$  bola uji dengan pendekatan teori dan eksperimen. Metode yang digunakan adalah metode bola

jatuh. Nilai viskositas dinamik fluida yang diperoleh dari percobaan dibandingkan dengan referensi dari laman <https://physics.info/viscosity>. Nilai kecepatan terminal bola uji yang diperoleh dari percobaan dibandingkan dengan estimasi nilai kecepatan terminal berbasis persamaan (7).

## METODE

Penelitian ini menerapkan teori fisika yang membahas gerak objek fisis dalam fluida viskos dan analoginya, yaitu aliran fluida viskos melalui rintangan yang sering dikenal sebagai persamaan Navier-Stokes (Ballereau *et al.*, 2016). Instrumen utama penelitian meliputi perangkat keras (mekanik dan elektrik) dan perangkat lunak (bahasa pemrograman). Perancangan perangkat keras penelitian dilakukan dengan membuat penyangga tabung silinder berdiameter 3,6 cm dan 5,6 cm sebagai tempat uji viskositas fluida yang terbuat dari besi dan aluminium. Sensor yang digunakan dalam percobaan merupakan sistem *transmitter-receiver* (LED infra merah dan dioda-foto sebanyak 2 pasang) dengan Arduino nano. Bahan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm serta fluida uji berupa minyak pelumas jenis SAE 30 dan SAE 40.

Sebanyak 4 seri percobaan dalam penelitian ini dilakukan dengan pertukaran variabel sebagai berikut. Seri 1 adalah tabung silinder berdiameter 3,6 cm dan minyak pelumas SAE 30 berfungsi sebagai variabel kontrol, di mana bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm berfungsi sebagai variabel manipulasi. Seri 2 adalah tabung silinder berdiameter penampang 3,6 cm dan minyak pelumas jenis SAE 40 berfungsi sebagai variabel kontrol, di mana bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm berfungsi sebagai variabel manipulasi. Seri 3 adalah tabung silinder berdiameter penampang 5,6 cm dan minyak pelumas SAE 30 berfungsi sebagai variabel kontrol, di mana bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm berfungsi sebagai variabel manipulasi. Seri 4 adalah tabung silinder berdiameter penampang 5,6 cm dan minyak pelumas jenis SAE 40 berfungsi sebagai variabel kontrol, di mana bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm berfungsi sebagai variabel manipulasi. Dalam hal ini, untuk semua seri percobaan variabel respons adalah kecepatan terminal  $v_T$  dan viskositas dinamik  $\eta$ .



**Gambar 3.** Diagram blok percobaan uji viskositas fluida.

Data penelitian diperoleh dari serangkaian percobaan uji viskositas (4 seri) dengan memanfaatkan

*experimental set-up* dengan prinsip kerja seperti pada Gambar 3. Ketika arus foton infra merah dari LED infra merah terhalang oleh lintasan gerak bola uji tepat pada *start line* (sensor 1) saat fase *uniform motion*, maka dihasilkan nilai tegangan tertentu yang berfungsi sebagai titik awal pengaktifan *timer* pada mikrokontroler. Apabila bola uji melewati posisi dioda-foto kedua tepat pada *finish line* (sensor 2) saat fase *uniform motion*, maka *timer* akan dinonaktifkan. Selang waktu terukur antara *timer* bersifat aktif dan nonaktif tersebut merupakan data nilai  $t$  saat bola uji berada pada fase *uniform motion*.

Data penelitian yang telah terkumpul awalnya dibuat tabulasi untuk setiap seri percobaan. Kemudian dibuat kompilasi keempat seri percobaan dengan mengambil nilai rata-rata pada masing-masing seri percobaan. Sesudah proses tabulasi selesai, dilakukan pembahasan secara menyeluruh mengenai nilai viskositas dinamik  $\eta$  fluida hasil percobaan dibandingkan dengan nilai referensi yang diberikan di laman <https://physics.info/viscosity>. Selanjutnya, pembahasan nilai kecepatan terminal  $v_T$  dari percobaan dibandingkan dengan teori pada persamaan (7).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data penelitian yang telah dikumpulkan, berikut ini adalah hasil-hasil percobaan dalam penelitian ini dan pembahasan terkait.

### Hasil-hasil Percobaan Seri 1-4

Tabel 1 memberikan hasil-hasil percobaan Seri 1 estimasi viskositas dinamik  $\eta$  minyak pelumas SAE 30 dengan diameter tabung 3,6 cm. Data selang waktu diperoleh dari pengamatan percobaan yang direkam instrumen dan ditampilkan pada LCD. Data kecepatan terminal diperoleh dari prinsip gerak lurus beraturan (GLB). Data estimasi  $\eta$  diperoleh dari pemberlakuan persamaan (3).

**Tabel 1.** Data percobaan Seri 1 uji viskositas.

No	Diameter tabung (cm)	Minyak pelumas	Selang waktu $t$ (s)			Kecepatan terminal $v_T$ (m/s)			Viskositas dinamik $\eta$ (Pa.s)		
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	3,6	SAE 30	0,100	0,054	0,034	2,500	4,600	7,452	0,189	0,186	0,184
2	3,6	SAE 30	0,101	0,055	0,034	2,475	4,554	7,378	0,191	0,188	0,186
3	3,6	SAE 30	0,100	0,054	0,034	2,500	4,600	7,452	0,189	0,186	0,184
4	3,6	SAE 30	0,102	0,055	0,034	2,451	4,510	7,306	0,192	0,190	0,188
5	3,6	SAE 30	0,102	0,055	0,034	2,451	4,510	7,306	0,192	0,190	0,188
Rata-rata			0,101	0,055	0,034	2,475	4,555	7,379	0,191	0,188	0,186

Tabel 2 memberikan hasil-hasil percobaan Seri 2 estimasi viskositas dinamik  $\eta$  minyak pelumas SAE 40 dengan diameter tabung 3,6 cm. Data selang waktu diperoleh dari pengamatan percobaan yang direkam instrumen dan ditampilkan pada LCD. Data kecepatan terminal diperoleh dari prinsip GLB. Data estimasi viskositas  $\eta$  diperoleh dari pemberlakuan persamaan (3).

**Tabel 2.** Data percobaan Seri 2 uji viskositas.



Penentuan Viskositas Fluida Dan Kecepatan Terminal Bola Uji Dengan Pendekatan Teori Dan Eksperimen

No	Diameter tabung (cm)	Minyak pelumas	Selang waktu $t$ (s)			Kecepatan terminal $v_T$ (m/s)			Viskositas dinamik $\eta$ (Pa.s)		
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	3,6	SAE 40	0,165	0,090	0,055	1,515	2,778	4,545	0,310	0,307	0,301
2	3,6	SAE 40	0,164	0,090	0,054	1,524	2,778	4,630	0,309	0,307	0,295
3	3,6	SAE 40	0,165	0,088	0,055	1,515	2,841	4,545	0,310	0,300	0,301
4	3,6	SAE 40	0,166	0,088	0,053	1,506	2,841	4,717	0,312	0,300	0,290
5	3,6	SAE 40	0,165	0,088	0,054	1,515	2,841	4,630	0,310	0,300	0,295
Rata-rata			0,165	0,089	0,054	1,515	2,816	4,613	0,310	0,303	0,297

Tabel 3 memberikan hasil-hasil percobaan Seri 3 estimasi viskositas dinamik  $\eta$  minyak pelumas SAE 30 dengan diameter tabung 5,6 cm. Data selang waktu diperoleh dari pengamatan percobaan yang direkam instrumen dan ditampilkan pada LCD. Data kecepatan terminal diperoleh dari prinsip GLB sedangkan data estimasi  $\eta$  diperoleh dari pemberlakuan persamaan (3).

Tabel 3. Data percobaan Seri 3 uji viskositas.

No	Diameter tabung (cm)	Minyak pelumas	Selang waktu $t$ (s)			Kecepatan terminal $v_T$ (m/s)			Viskositas dinamik $\eta$ (Pa.s)		
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	5,6	SAE 30	0,102	0,055	0,034	2,451	4,534	7,346	0,192	0,189	0,187
2	5,6	SAE 30	0,101	0,055	0,034	2,475	4,579	7,418	0,191	0,187	0,185
3	5,6	SAE 30	0,102	0,055	0,034	2,451	4,534	7,346	0,192	0,189	0,187
4	5,6	SAE 30	0,102	0,055	0,034	2,451	4,534	7,346	0,192	0,189	0,187
5	5,6	SAE 30	0,103	0,056	0,034	2,427	4,490	7,274	0,194	0,191	0,189
Rata-rata			0,102	0,055	0,034	2,451	4,534	7,346	0,192	0,189	0,187

Tabel 4 memberikan hasil-hasil percobaan Seri 4 estimasi viskositas dinamik  $\eta$  minyak pelumas SAE 40 dengan diameter tabung 5,6 cm. Data selang waktu diperoleh dari pengamatan percobaan yang direkam instrumen dan ditampilkan pada LCD. Data kecepatan terminal diperoleh dari prinsip GLB. Data estimasi  $\eta$  diperoleh dari pemberlakuan persamaan (3).

Tabel 4. Data percobaan Seri 4 uji viskositas.

No	Diameter tabung (cm)	Minyak pelumas	Selang waktu $t$ (s)			Kecepatan terminal $v_T$ (m/s)			Viskositas dinamik $\eta$ (Pa.s)		
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	3,6	SAE 40	0,165	0,090	0,055	1,515	2,778	4,545	0,310	0,307	0,301
2	3,6	SAE 40	0,164	0,090	0,054	1,524	2,778	4,630	0,309	0,307	0,295
3	3,6	SAE 40	0,165	0,088	0,055	1,515	2,841	4,545	0,310	0,300	0,301
4	3,6	SAE 40	0,166	0,088	0,053	1,506	2,841	4,717	0,312	0,300	0,290
5	3,6	SAE 40	0,165	0,088	0,054	1,515	2,841	4,630	0,310	0,300	0,295
Rata-rata			0,165	0,089	0,054	1,515	2,816	4,613	0,310	0,303	0,297

Semua seri percobaan dilaksanakan dengan *set-up* yang sama. Fokus perhatian pada saat pelaksanaan seri percobaan adalah selang waktu terukur bola uji dari saat melalui posisi sensor 1 (40 cm dari permukaan fluida uji) menuju posisi sensor 2 (25 cm dari posisi sensor 1). Selang waktu terukur tersebut diberi simbol  $t$  pada Tabel 1 sampai Tabel 4 yang ditampilkan sebagai data digital melalui LCD

pada kotak mikrokontroler. Untuk seluruh seri percobaan,  $t$  terukur lebih singkat untuk percobaan dengan diameter bola uji yang lebih besar. Dengan fase pengamatan percobaan yang didefinisikan sebagai jarak sensor 1 menuju sensor 2 (25 cm), maka kecepatan terminal semakin besar untuk bola uji yang lebih besar.

**Pembahasan Hasil-hasil Percobaan Seri 1-4**

Agar relasi antara variasi ukuran bola uji dan kecepatan terminal serta viskositas dinamik fluida uji terlihat jelas, maka dibuat kompilasi Tabel 1-4 pada Tabel 5 di bawah ini.

Tabel 5. Data kompilasi percobaan Seri 1-4.

No	Diameter tabung (cm)	Minyak pelumas	Kecepatan terminal $v_T$ (m/s)			Viskositas dinamik $\eta$ (Pa.s)		
			$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$
1	3,6	SAE 30	2,475	4,555	7,379	0,191	0,188	0,186
2	3,6	SAE 40	1,515	2,816	4,613	0,310	0,303	0,297
3	5,6	SAE 30	2,451	4,534	7,346	0,192	0,189	0,187
4	5,6	SAE 40	1,515	2,768	4,497	0,311	0,309	0,304

Berdasarkan Tabel 5, apabila data hasil hitung  $\eta$  untuk percobaan Seri 1 dan Seri 3 (seri percobaan di mana jenis minyak pelumas adalah tetap SAE 30) dibandingkan satu terhadap yang lain maka diperoleh nilai viskositas dinamik yang konsisten sampai dengan 2 desimal, yaitu 0,19 Pa.s. Hasil yang wajar mengingat besaran viskositas merupakan karakteristik fluida (Houari, 2011; Ali *et al.*, 2019) yang tidak dipengaruhi oleh faktor eksternal wadah percobaan dengan ukuran diameter tabung yang berbeda. Hasil percobaan  $\eta \approx 0,19$  Pa.s untuk kedua seri ini sesuai dengan viskositas dinamik SAE 30 sebesar 0,20 Pa.s menurut <https://physics.info/viscosity> dengan perbedaan relatif sekitar 5%.

Relatif dibandingkan dengan referensi, akurasi hasil hitung  $\eta$  berkurang untuk ukuran diameter bola uji yang lebih besar (melihat data  $\eta$  untuk Seri 1 dan Seri 3 secara horisontal). Hasil pengamatan ini wajar mengingat ukuran diameter bola uji yang lebih besar akan memberikan efek friksi dinding tabung yang lebih besar (Ambari *et al.*, 1985; Ballereau *et al.*, 2016). Pengaruh turbulensi berskala mikro (tidak terlihat dalam pengamatan langsung percobaan) di sekitar lintasan gerak bola adalah mereduksi level akurasi  $\eta$  yang diperoleh. Friksi tambahan akibat efek dinding tabung secara teoritik memperbesar nilai  $b$  pada persamaan (8) dan memperkecil kecepatan terminal  $v_T$  pada persamaan (7). Sebagai akibatnya, menurut persamaan (3) hasil hitung  $\eta$  menjadi lebih kecil nilai referensi. Meskipun aspek rasio  $d < 0,6D$  (Ballereau *et al.*, 2016) telah diterapkan untuk semua percobaan dengan variasi diameter bola uji, namun studi teoritik yang lebih teliti (Ambari *et al.*, 1985; Brizard *et al.*, 2005) memberikan konfirmasi bahwa diameter bola masih relatif besar dibandingkan dengan diameter tabung. Hal ini memicu efek turbulensi skala mikro dari dinding tabung yang tidak bisa diabaikan, namun tidak terhitung dalam *set-up* penelitian ini.

Berikutnya, apabila data hasil hitung  $\eta$  untuk percobaan Seri 2 dan Seri 4 (seri percobaan di mana jenis minyak pelumas adalah tetap SAE 40) dibandingkan satu terhadap yang lain maka diperoleh nilai viskositas dinamik yang konsisten sampai dengan 2 desimal, yaitu 0,30 Pa.s.

Hasil yang wajar mengingat besaran viskositas merupakan karakteristik fluida (Houari, 2011; Ali *et al.*, 2019) yang tidak dipengaruhi faktor eksternal wadah percobaan dengan ukuran diameter tabung yang berbeda. Hasil  $\eta \approx 0,30$  Pa.s untuk kedua seri ini sesuai dengan viskositas dinamik SAE 40 sebesar 0,32 Pa.s menurut <https://physics.info/viscosity> dengan perbedaan relatif sekitar 6%.

Relatif dibandingkan dengan referensi, akurasi hasil hitung  $\eta$  berkurang untuk ukuran diameter bola uji yang lebih besar (melihat data  $\eta$  untuk Seri 2 dan Seri 4 secara horisontal). Hasil pengamatan ini wajar mengingat ukuran diameter bola uji yang lebih besar akan memberikan efek dinding tabung yang lebih besar. Pengaruh turbulensi berskala mikro (tidak terlihat dalam pengamatan langsung) di sekitar lintasan gerak bola uji adalah mereduksi level akurasi  $\eta$  yang diperoleh. Hal ini merupakan situasi fisis yang sama seperti pada Seri 1 dan Seri 3, di mana faktor friksi tambahan dari efek dinding tabung (Ambari *et al.*, 1985; Brizard *et al.*, 2005) tidak terkuantifikasi dalam *set-up* penelitian ini namun memberi pengaruh yang cukup signifikan terhadap hasil percobaan.

Konsistensi hasil-hasil percobaan untuk seluruh seri bisa langsung dilihat dari sekurangnya 2 hal, yaitu: (1) penyimpangan hasil hitung  $\eta$  dari nilai referensi relatif konstan antara 5-6% untuk seluruh variasi parameter dalam seri percobaan, baik dengan perubahan ukuran diameter bola uji maupun ukuran diameter tabung; dan (2) akurasi hasil percobaan tereduksi untuk ukuran diameter bola uji yang semakin besar atau aspek rasio  $d/D$  yang membesar menuju ke harga ambang 0,6 (Ballereau *et al.*, 2016) akibat efek dinding tabung yang membesar (Ambari *et al.*, 1985; Brizard *et al.*, 2005). Penyimpangan 5-6% sebetulnya relatif cukup besar, namun masih bisa diterima untuk percobaan uji viskositas minyak pelumas dalam batas-batas ketelitian instrumen dan *experimental set-up* (Feng *et al.*, 2006). Kesulitan utama percobaan uji viskositas dinamik dengan metode bola jatuh adalah akurasi penentuan posisi sensor 1, penentuan panjang fase pengamatan, dan pencatatan selang waktu terukur  $t$ .

Berbeda dengan data viskositas dinamik  $\eta$  fluida uji SAE 30 dan SAE 40, data kecepatan terminal  $v_T$  bola uji untuk seluruh seri percobaan pada Tabel 5 lebih mudah dianalisis. Hal pertama yang jelas terlihat (melihat data  $v_T$  pada tabel tersebut secara horisontal) adalah untuk seluruh seri percobaan nilai  $v_T$  membesar untuk ukuran bola uji yang lebih besar. Hal ini wajar mengingat ukuran bola uji yang lebih besar berarti volume dan juga massa bola uji menjadi lebih besar. Menurut persamaan (7), kecepatan terminal sebanding dengan massa bola uji untuk percobaan dengan 'koefisien friksi'  $b$  yang tetap (dihitung menurut persamaan (8) dengan jenis minyak pelumas tertentu). Baik pasangan Seri 1 dan Seri 3 maupun pasangan Seri 2 dan Seri 4 memberikan pola data  $v_T$  yang membesar untuk ukuran bola yang lebih besar, sesuai dengan tinjauan teoritik (Kundu and Cohen, 2002; Dey *et al.*, 2019).

Sekarang apabila analisis data  $v_T$  pada Tabel 5 dilakukan secara vertikal, maka berdasarkan pasangan Seri 1 dan Seri 2 (pasangan seri percobaan dengan viskositas dinamik yang berbeda dan ukuran diameter bola uji tetap),

nilai  $v_T$  mengecil untuk perubahan fluida uji dari SAE 30 dengan  $\eta \approx 0,20$  Pa.s menjadi SAE 40 dengan  $\eta \approx 0,32$  Pa.s. Hal ini wajar karena menurut persamaan (8) nilai koefisien friksi  $b$  membesar untuk viskositas yang lebih besar (Tang, 2016) dan menurut persamaan (7) kecepatan terminal  $v_T$  berbanding terbalik terhadap  $b$  (Brizard *et al.*, 2005). Kesimpulan yang sama diperoleh bila Seri 3 dan Seri 4 dianalisis.

Semua hasil ukur  $v_T$  pada seluruh seri percobaan dibandingkan dengan nilai prediksi kecepatan terminal  $v_T$  berbasis persamaan (7). Konsistensi hasil ukur  $v_T$  untuk seluruh seri percobaan bisa langsung dilihat sekurangnya dari 3 hal, yaitu: (1) hasil ukur  $v_T$  untuk bola uji 1 adalah 2,46 cm/s (dalam SAE 30) dan 1,52 cm/s (dalam SAE 40) sampai dengan 2 desimal yang berarti menyimpang sebesar 7 % (dalam SAE 30) dan sebesar 8% (dalam SAE 40); (2) hasil ukur  $v_T$  untuk bola uji 2 adalah 4,54 cm/s (dalam SAE 30) dan 2,79 cm/s (dalam SAE 40) sampai dengan 2 desimal yang berarti menyimpang sebesar 6 % (dalam SAE 30) dan sebesar 7% (dalam SAE 40); dan (3) hasil ukur  $v_T$  untuk bola uji 3 adalah 7,36 cm/s (dalam SAE 30) dan 4,56 cm/s (dalam SAE 40) sampai dengan 2 desimal yang berarti menyimpang sebesar 5 % (dalam SAE 30) dan sebesar 6% (dalam SAE 40).

Penyimpangan hasil ukur  $v_T$  dalam kisaran 5-8% (untuk semua variasi ukuran diameter bola uji) sebetulnya relatif cukup besar, namun masih bisa diterima (Feng *et al.*, 2006) untuk percobaan uji viskositas minyak pelumas (SAE 30 dan SAE 40) dalam batas-batas ketelitian instrumen dan *laboratory set-up*. Kesulitan utama pengukuran kecepatan terminal  $v_T$  dalam percobaan uji viskositas dengan metode bola uji jatuh adalah akurasi penentuan panjang fase pengamatan dan pencatatan selang waktu terukur  $t$ .

Secara prinsip, kesulitan teknis penentuan  $v_T$  secara akurat berimbas pada kesulitan penentuan  $\eta$  secara akurat (Ambari *et al.*, 1985; Brizard *et al.*, 2005; Ballereau *et al.*, 2016). Namun hal ini tidak berarti bahwa nilai viskositas dinamik fluida uji (minyak pelumas SAE 30 dan SAE 40) ditentukan oleh kecepatan terminal bola uji. Viskositas dinamik fluida adalah besaran karakteristik fluida sehingga nilainya bergantung pada struktur molekul yang berikatan dalam sistem fisis minyak pelumas uji. Oleh karena itu, penelitian terdahulu (Akpek *et al.*, 2014; Boda *et al.*, 2015) mengisyaratkan kebergantungan viskositas (baik dinamik maupun kinematik) terhadap temperatur namun bahasan kedua studi tersebut tidak relevan dengan penelitian ini. Besaran viskositas tidak bergantung pada jenis percobaan, ragam instrumen ukur dan teknik pengukuran. Sedangkan kecepatan terminal merupakan besaran kinematik yang dipengaruhi oleh jenis percobaan, ragam instrumen ukur dan teknik pengukuran.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini menerapkan metode bola uji jatuh dengan menggunakan sensor deteksi halangan infra merah 2-30 cm berbasis mikrokontroler yang terdiri dari LED infra merah sebagai *transmitter* dan dioda-foto sebagai *receiver*. Bola uji berdiameter 1,1 cm, 1,5 cm dan 1,9 cm;



tabung silinder berdiameter penampang 3,6 cm dan 5,6 cm; sedangkan fluida uji adalah minyak pelumas SAE 30 dan SAE 40.

Temuan penelitian ini adalah: (1) viskositas minyak pelumas SAE 30,  $\eta \approx 0,19$  Pa.s berbeda 5% dari nilai referensi sebesar 0,20 Pa.s (<https://physics.info/viscosity>) dan viskositas minyak pelumas SAE 40,  $\eta \approx 0,30$  Pa.s berbeda 6% dari nilai referensi sebesar 0,32 Pa.s menurut laman yang sama; dan (2) kecepatan terminal bola uji  $v_T$  lebih besar untuk percobaan dengan diameter bola uji yang lebih besar dengan penyimpangan hasil ukur  $v_T$  dalam kisaran 5-8%. Penyimpangan hasil ukur  $\eta$  dan  $v_T$  sebesar itu masih bisa diterima dengan mempertimbangkan ketelitian instrumen ukur, teknik pengukuran dan *experimental set-up*.

Kesulitan utama percobaan uji viskositas fluida dengan metode bola jatuh adalah akurasi penentuan panjang fase pengamatan dan pencatatan selang waktu terukur  $t$ . Nilai viskositas fluida tidak ditentukan oleh kecepatan terminal karena viskositas adalah besaran karakteristik fluida yang nilainya bergantung pada struktur ikatan molekul dan tidak bergantung pada jenis dan metode percobaan, serta ragam instrumen ukur dan teknik pengukuran. Sebaliknya, kecepatan terminal bola uji merupakan besaran kinematik yang dipengaruhi jenis dan metode percobaan, serta ragam instrumen ukur dan teknik pengukuran.

#### Saran

Dengan mempertimbangkan semua faktor kesulitan teknis yang ditemui saat pelaksanaan percobaan uji viskositas fluida dengan metode bola uji jatuh, maka penulis menyarankan metode ini tidak lagi digunakan sebagai metode pengukuran viskositas fluida meskipun sensor yang digunakan menggunakan sensor dengan sensitivitas yang cukup tinggi. Variasi metode percobaan dan teknik pengukuran yang lebih baik banyak tersedia di laman yang bisa diakses dengan mudah. Mahasiswa fisika yang akan melaksanakan percobaan uji viskositas fluida juga disarankan untuk melakukan percobaan numerik dengan menggunakan program aplikasi yang relevan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Akpek, A., Youn, C., Maeda, A., Fujisawa, N. and Kagawa, T. 2014. Effect of thermal convection on viscosity measurement in vibrational viscometer. *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*. Vol.2, pp.12-17.
- Ali, S. H., Al-Zuky, A. A. D., Al-Saleh, A. H. and Mohamad, H. J. 2019. Measure liquid viscosity by tracking falling ball automatically depending on image processing algorithm. *Journal of Physics Conference Series*. Vol.1294, 022002.
- Ambari, A., Gauthier-Manuel, B. and Guyon, E. 1985. Direct measurement of tube wall effect on the Stokes force. *The Physics of Fluid*. Vol.28, No.25, pp.1559-1561.
- Ballereau, P., Truong, D. and Matias, A. 2016. Absolute falling ball viscometer, adapted to the low viscosities of liquids. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. Vol.7, No.305, pp.1-8.
- Boda, M. A., Bhasagi, P. N., Sawade, A. S. and Andodgi, R. A. 2015. Analysis of kinematic viscosity for liquids by varying temperature. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol.4, Issue 4, pp.1951-1954.
- Brizard, M., Megharfi, M., Verdier, C. and Mahé, E. 2005. Design of a high precision falling ball viscometer. *Review of Scientific Instruments*. Vol.76, No.2, 025109.
- Dey, S., Ali, Sk. Z. and Padhi, E. 2019. Terminal fall velocity: the legacy of Stokes from the perspective of fluvial hydraulics. *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 475(2228): 20190277.
- Feng, S., Graham, A., Reardon, P., Abbott, J. and Mondy, L. 2006. Improving falling ball tests for viscosity determination. *Journal of Fluid Engineering*. Vol.128, No.1, pp.157-163.
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH. 1997. Experiment instructions on falling ball viscometer: HM 134 viscosity coefficient apparatus. D-22881 Barsbüttel-Germany. pp.1-15.
- Houari, A. 2011. Determining the viscosity of liquids using an extended falling ball method. *Physics Education*. Vol.46, No.6, p.688.
- Kang, Y. J. 2018. Microfluidic-based technique for measuring RBC aggregation and blood viscosity in a continuous and simultaneous fashion. *Micromachines*. Vol.9, No.467, pp.1-18.
- Kundu, P. K. and Cohen, I. M. 2002. *Fluid Mechanics*. 2nd Edition. San Diego: Academic Press, US, 1-730. ISBN-13: 978-0121782511.
- Liao, S. L. 2002. An analytic approximation of the drag coefficient for the viscous flow past a sphere. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol.37, Issue 1, pp.1-18.
- Muhammad, K. and Yudhana, A. 2019. Alat uji viskositas biodiesel dari minyak goreng bekas berbasis teknologi *infrared*. *Transmisi*. Vol.21, No.3, pp.79-83.
- Prastowo, T., Griffiths, R. W., Hughes, G. O. and Hogg, A. M. 2009. Effects of topography on the cumulative mixing efficiency in exchange flows. *Journal of Geophysical Research*. Vol.114, C08008, doi: 10.1029/2008JC005152.

Tang, J. X. 2016. Measurements of fluid viscosity using a miniature ball drop device. *Review of Scientific Instruments*. Vol.87, No.5, 054301.

Wibowo, R. A. 2018. *Pembuatan alat uji viskometer sistem bola jatuh berbasis digital*. Skripsi. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung. Tidak dipublikasikan. pp.1-56.

