

Gerak Vertikal Benda Berukuran Berbeda yang Jatuh Tanpa Kecepatan Awal dan Bergesekan dengan Udara

Nani Yuningsih¹, Sardjito²

¹Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : nani.yuningsih@polban.ac.id

²Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail : sardjito@polban.ac.id

ABSTRAK

Satu konsep mekanika yang populer dipelajari baik secara teoritis maupun eksperimen adalah gerak benda jatuh vertikal karena pengaruh gravitasi bumi dengan kondisi tanpa kecepatan awal. Tujuan penelitian adalah mengaplikasikan konsep gerak jatuh bebas untuk menentukan nilai percepatan gravitasi melalui percobaan di laboratorium, serta melakukan analisis untuk mengetahui penyebab penyimpangan hasil percobaan terhadap nilai yang sesungguhnya. Analisis teoritis dilakukan dengan memperhitungkan keberadaan gaya gesek udara terhadap benda yang bergerak jatuh vertikal. Metoda penelitian yang digunakan adalah analisis deskriptif data primer di Laboratorium Fisika Terapan Politeknik Negeri Bandung. Pengambilan data percobaan dilakukan dengan menggunakan perangkat gerak jatuh bebas yang bersifat otomatis. Data percobaan yang diamati adalah ketinggian atau jarak tempuh sebagai peubah bebas dan waktu tempuh sebagai peubah terikat. Dari hasil analisis matematis diperoleh hubungan matematis antara ketinggian jatuhnya benda dengan waktu tempuh yang sekaligus memberikan koreksi terhadap perumusan Gerak Jatuh Bebas yang sering digunakan namun mengabaikan gesekan udara. Hasil penentuan nilai percepatan gravitasi yang diperoleh lebih kecil dari nilai sesungguhnya, yaitu sebesar $9,5 \text{ m/s}^2$ untuk bola besar dan $8,9 \text{ m/s}^2$ untuk bola kecil. Penyimpangan hasil percepatan gravitasi bumi melalui percobaan gerak jatuh bebas disebabkan karena adanya remanensi magnet yang menahan bola tidak segera jatuh saat saklar pengukur waktu dioperasikan.

Kata Kunci

Gerak jatuh, percepatan gravitasi bumi, gesekan udara

1. PENDAHULUAN

Gerak jatuh bebas adalah gerak benda karena adanya gaya gravitasi bumi yang dianggap konstan, sehingga benda bergerak lurus berubah beraturan dengan lintasan vertikal. Kondisi yang harus dipenuhi untuk gerak semacam ini adalah jarak tempuh tidak terlalu besar, gaya-gaya selain gaya gravitasi bumi diabaikan, serta kecepatan awal nol. Jika h adalah jarak tempuh, g adalah percepatan gravitasi bumi, v adalah besar kecepatan benda setelah menempuh jarak h , dan t adalah waktu tempuh, maka untuk gerak jatuh bebas, berlaku: [1], [2]

$$h = \frac{1}{2}gt^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2)$$

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi menghasilkan berbagai perangkat elektronik yang membantu dalam pengembangan perangkat percobaan gerak jatuh bebas antara lain dengan menggunakan mikrokontroler dan diperoleh harga percepatan gravitasi rata-rata, g sebesar $10,2 \text{ m/s}^2$ [3]. Untuk

memudahkan pemahaman Materi gerak jatuh bebas, perangkat detektor atau sensor, perangkat display atau LCD, dan perangkat actuator, serta perangkat lunak pemrosesan data telah dibuat dengan akurasi pengukuran besaran secara manual dan dengan menggunakan alat peraga ini sebesar 96,6% [4].

Sejalan dengan makin meningkatnya ketelitian pengukuran, maka tuntutan kebenaran konsep fisika secara paripurna pun menjadi semakin tinggi dan harus dipenuhi. Gaya-gaya yang semula diabaikan kini untuk gerak vertikal dalam alam nyata harus diperhitungkan. Sangatlah jarang percobaan Gerak Jatuh Bebas yang menggunakan seperangkat piranti ukur dilakukan dalam ruang hampa udara. Dengan demikian, gaya oleh udara terhadap benda percobaan pun harus diperhitungkan. Gaya yang dimaksud adalah gaya gesekan udara dan gaya apung ke atas oleh udara. Gaya apung ke atas atau biasa disebut Gaya Archimedes berbanding lurus dengan volume benda. Karenanya untuk benda-benda berukuran kecil, gaya Archimedes ini masih dapat diabaikan [1][2].

Tinjauan benda yang bergerak jatuh vertikal karena tarikan gravitasi bumi dan mengalami gesekan udara tidaklah sederhana. Hal ini berkaitan dengan adanya perbedaan relasi parameter secara empirik yang bergantung pada besar benda dan kecepatan. Gaya gesekan udara ada yang dimodelkan bergantung pada kecepatan secara linear, namun ada juga model gaya gesekan yang bergantung pada kecepatan secara kuadrat [5]. Jika gesekan udara harus diperhitungkan, untuk benda yang bergerak jatuh vertikal tanpa kecepatan awal, bekerja gaya gravitasi dan gesekan udara, di mana besarnya gaya gesekan sebanding dengan kuadrat kecepatan (v), tetapi arahnya berlawanan dengan kecepatan [6], [7].

Udara termasuk zat alir atau fluida, karenanya gesekan udara, atau hambatan udara, harus ditinjau menggunakan konsep fluida yang umumnya bersifat empirik. Tidak seperti model standar gesekan permukaan padat, besar gaya gesekan fluida tersebut tergantung pada kecepatan relatif antara benda dengan fluida. Ketergantungan kecepatan mungkin sangat rumit, dan hanya kasus khusus yang dapat diturunkan secara analitik [8]. Pada kecepatan sangat rendah untuk partikel kecil, resistansi udara sebanding dengan kecepatan dan dapat dinyatakan dalam bentuk

$$f = -bv \quad (3)$$

di mana tanda negatif menunjukkan bahwa gaya gesekan selalu berlawanan arah dengan kecepatan. Untuk kecepatan yang lebih tinggi dan ukuran benda yang lebih besar, gaya gesekan oleh udara sebanding dengan kuadrat dari kecepatan relatif benda dengan udara [9].

$$f = -\frac{1}{2}\rho ACv^2 \quad (4)$$

dimana ρ adalah kerapatan udara, A adalah luas penampang, dan C adalah koefisien drag numerik. Tanda negatif menunjukkan bahwa arah gaya gesekan berlawanan dengan arah kecepatan. Untuk benda berbentuk bola, nilai empirik koefisien drag, C , adalah 0.47 [5].

Jika gesekan udara harus diperhitungkan, untuk benda yang bergerak jatuh vertikal tanpa kecepatan awal, bekerja gaya gravitasi dan gesekan udara, di mana besarnya gaya gesekan sebanding dengan kuadrat kecepatan (v^2), tetapi arahnya berlawanan dengan kecepatan [6], sehingga total gaya vertikal yang bekerja pada benda adalah:

$$F = mg - kv^2 \quad (5)$$

dengan k adalah koefisien gesekan kental, memiliki besarnya

$$k = \frac{1}{2}\rho AC \quad (6)$$

dengan ρ adalah kerapatan udara $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$, A adalah luas penampang benda (dalam hal ini, benda berbentuk bola), dan C adalah koefisien drag untuk benda berbentuk bola senilai empiris 0,47 [6]. Dengan $F = ma = m(dv/dt)$, dan $v = dh/dt$, di mana h adalah jarak vertikal atau tinggi objek jatuh, persamaan (5), dapat ditulis menjadi persamaan diferensial:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{k}{m}v^2 = g \quad (7)$$

Penelitian ini bertujuan untuk menjelaskan peristiwa gerak benda yang jatuh vertikal karena tarikan gravitasi bumi, namun dengan memperhitungkan keberadaan gesekan udara, bagi benda dengan ukuran berbeda.

2. METODOLOGI

Metoda penelitian yang digunakan adalah analisis teoritis dan pengujian eksperimen. Analisis teoritis dilakukan secara matematis terhadap model gerak benda yang diturunkan dari persamaan gaya, dengan memasukkan gaya gravitasi dan gaya gesekan oleh udara. Perhitungan kalkulus digunakan untuk menentukan solusi dari persamaan gaya. Solusi yang diperoleh dibandingkan dengan hasil uji eksperimen. Sedang pengujian eksperimen dilakukan secara deskriptif terhadap data primer yang diperoleh melalui percobaan Gerak Jatuh Bebas di Laboratorium Fisika Terapan, Politeknik Negeri Bandung, dengan mengukur ketinggian benda jatuh serta waktu tempuhnya secara otomatis. Secara teknis, gerak benda jatuh bebas dilakukan dengan perangkat seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Perangkat alat eksperimen modul Gerak Jatuh Bebas

Bola besi dengan massa dan diameter tertentu ditahan oleh kumparan magnet yang memiliki medan magnet karena dialiri arus listrik dari Pencacah digital. Pada penelitian ini digunakan dua buah bola dengan ukuran berbeda. Bola 1 memiliki diameter 30 mm, dengan massa 110 g dan bola 2 memiliki diameter 20 mm dengan massa 32 g. Pencacah digital dapat

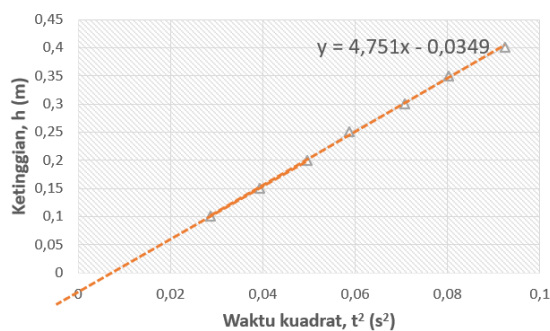
memutuskan aliran arus secara otomatis dan dalam waktu yang bersamaan mulai mengoperasikan pengukuran waktu. Secara teoritis, begitu arus terputus, medan magnet terhenti, maka bola pun bergerak jatuh. Pada jarak tertentu tepat dibawah posisi bola mula-mula dipasang sensor cahaya (*light barrier*), yang dihubungkan dengan pencacah digital dan secara otomatis akan menghentikan pengukuran waktu jika bola menyentuh sensor. Kelebihan alat pencacah digital ini ialah lebih presisi dalam pengukuran waktu dibandingkan dengan pengukur waktu manual, namun memiliki kelemahan karena besar arus yang digunakan akan berpengaruh pada besar magnet yang menahan bola logam. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan komputasi melalui program aplikasi Excel serta metoda regresi linear.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Gerak Jatuh Bebas

Dari percobaan Gerak Jatuh Bebas diperoleh sekumpulan pasangan data (t,h) dan (h,v) dibuat grafik antara h terhadap t^2 , dan dengan model regresi linear, nilai percepatan gravitasi g dapat ditentukan dari gradien grafik tersebut [10].

Apabila persamaan (1) diubah menjadi persamaan linier, dengan t^2 sebagai absis (x) dan h sebagai ordinat (y), maka diperoleh bahwa gradien (B) = $\frac{1}{2} g$, sehingga $g = 2B$. Grafik h terhadap t^2 untuk bola dari data penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

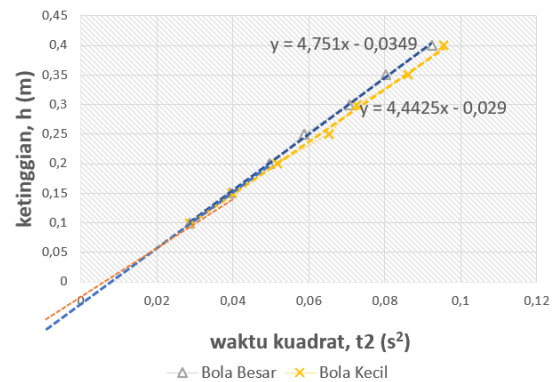


Gambar 2. Grafik h terhadap t^2 dari percobaan Gerak Jatuh Bebas

Dari Gambar 2 dapat dilihat besar harga gradien sebesar 4,75 sehingga diperoleh nilai percepatan gravitasi sebesar $g = 2B = 2 \times 4,75 = 9,5 \text{ m/s}^2$. Kesalahan relatif nilai g dari percobaan gerak jatuh bebas ini bila dibandingkan dengan nilai yang sesungguhnya $9,8 \text{ m/s}^2$ [1], [2] adalah 3,0 %. Dengan demikian percobaan gerak jatuh bebas ini dapat digunakan untuk menentukan nilai g dengan

keakuratan yang cukup baik. Penyimpangan yang terjadi, menunjukkan bahwa nilai percepatan gravitasi g yang diperoleh melalui percobaan ini, selalu lebih kecil dari nilai yang sesungguhnya. Bila melihat persamaan (1), dimana secara sederhana percepatan gravitasi dapat dinyatakan sebagai $g = 2h/t^2$, dengan pengukuran h yang cukup teliti, maka nilai g yang terlalu kecil dapat diakibatkan karena pengukuran t yang terlalu besar. Hal ini sesuai dengan hasil analisis terhadap grafik yang diperoleh, yang menunjukkan bahwa waktu yang terukur tidaklah menyatakan waktu tempuh yang sesungguhnya.

Secara teoritis, dengan melihat persamaan (1) dan (2), maka tidak akan ada perbedaan nilai percepatan gravitasi yang diperoleh, jika percobaan dilakukan dengan mengubah-ubah ukuran benda. Jika benda uji yang diamati gerakanya berbentuk bola, maka massa dan diameter bola tidak akan mempengaruhi hasil percobaan. Pada penelitian ini dilakukan juga percobaan dengan menggunakan dua bola. Bila melihat persamaan (1) bola logam yang berbeda ukurannya sebagai obyek percobaan. Yang pertama, bola kecil, berdiameter 2,00 cm dan bermassa 32,0 gram, sedang yang kedua, bola besar, berdiameter 3,00 cm dan bermassa 110 gram. Keduanya terbuat dari bahan yang sama.



Gambar 3. Grafik h terhadap t^2 untuk dua bola jatuh tanpa kecepatan awal

Dengan analisis sejenis seperti yang telah diuraikan sebelumnya, di dapat nilai percepatan gravitasi g, dari masing-masing garis grafik, serta nilai gradiennya. Penentuan besar percepatan gravitasi dengan menggunakan bola besar sebesar $9,5 \text{ m/s}^2$ dan bola kecil sebesar $8,88 \text{ m/s}^2$. Dari kedua garis grafik terlihat bahwa pengukuran menggunakan bola besar menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang lebih baik daripada bola kecil. Selain itu, terlihat pula bahwa hampir tak terdapat perbedaan waktu tempuh jatuhnya bola kecil dan bola besar pada jarak jatuh yang kecil,

namun dengan bertambahnya jarak jatuh, perbedaan antara kedua bola makin tampak. Kedua fakta di atas tak dapat dijelaskan hanya dengan konsep gerak jatuh bebas, namun perlu diuraikan dengan konsep keberadaan gesekan udara. Fakta lain menunjukkan bahwa untuk semua bola, jika garis grafik diperpanjang hingga memotong sumbu, ternyata pada ketinggian nol ($h = 0$), ternyata diperlukan waktu ($t \neq 0$) untuk benda memulai bergerak. Padahal seharusnya, jika h sama dengan nol, t juga harus sama dengan nol. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada saat saklar pengukur waktu dioperasikan, benda masih belum bergerak jatuh, karena masih ada yang menahannya; dan ini adalah karena adanya remanensi magnet penahan, sehingga waktu yang ditunjukkan oleh alat ukur tidaklah menyatakan waktu tempuh bola jatuh yang sesungguhnya.

3.2 Gesekan Udara

Model gerak benda yang jatuh vertikal dan bergesekan dengan udara berbentuk persamaan diferensial seperti ditunjukkan pada persamaan (7). Solusi dari persamaan diferensial tersebut memiliki bentuk yang juga tidak sederhana, dan solusi ini yang diuji dengan menggunakan data empirik yang diperoleh dari laboratorium.

Solusi persamaan (7) dinyatakan dalam bentuk hubungan antara ketinggian jatuh (h) terhadap waktu tempuh (t) memenuhi :

$$h = \frac{m}{k} \ln \left[\cosh \left(t \sqrt{\frac{gk}{m}} \right) \right] \quad (8)$$

Atau sebaliknya

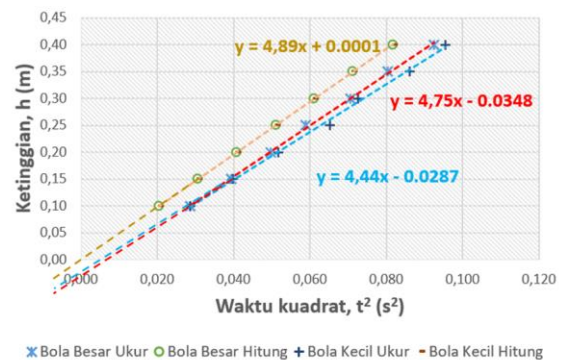
$$t = \sqrt{\frac{m}{gk}} \operatorname{acosh} \left[e^{\frac{hk}{m}} \right] \quad (9)$$

Dari solusi hubungan antara jarak dan waktu tempuh dengan koreksi gesekan udara, diperoleh data seperti pada Tabel 1 dan diperoleh grafik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Tabel 1. Data jarak dan waktu tempuh dengan koreksi gesekan udara

Ketinggian, h (m)	Perhitungan (dengan gesekan udara)		Pengukuran	
	t^2 BB (s^2)	t^2 BK (s^2)	t^2 BB (s^2)	t^2 BK (s^2)
0.10	0.020	0.020	0.029	0.029
0.15	0.031	0.031	0.039	0.040
0.20	0.041	0.041	0.050	0.052
0.25	0.051	0.051	0.059	0.065
0.30	0.061	0.061	0.071	0.073
0.35	0.071	0.071	0.080	0.086
0.40	0.082	0.082	0.092	0.096

BB = Bola Besar
BK = Bola Kecil



Gambar 4. Hubungan antara ketinggian (h) dengan kuadrat waktu (t^2) untuk dua bola hasil pengukuran dan hasil perhitungan dengan melibatkan gesekan

Beberapa fakta telah diperoleh dari tabel dan gambar 4 yang berhubungan dengan kondisi gerak kedua bola, baik yang diperoleh dari pengukuran, maupun yang diperoleh dari perhitungan yang melibatkan gesekan udara. Dari Table 1. terlihat perbedaan antara waktu tempuh hasil pengukuran dengan hasil perhitungan, dimana hasil pengukuran selalu lebih besar dari hasil perhitungan. Untuk jarak tempuh yang sama, waktu tempuh hasil pengukuran untuk bola besar lebih kecil daripada waktu tempuh hasil pengukuran bola kecil. Namun demikian waktu tempuh hasil perhitungan menggunakan persamaan (8) untuk bola kecil maupun bola besar bernilai sama, atau hampir sama. Dengan demikian pengaruh gesekan udara terhadap perbedaan ukuran bola tidak terlalu signifikan.

Meski fungsi antara h terhadap t^2 , tidak sepenuhnya linear, namun ekstrapolasi bagi grafik hasil perhitungan ternyata melalui titik nol, sementara untuk hasil pengukuran kedua-duanya tidak melalui titik nol. Artinya, secara teoritis, meskipun ada gesekan udara,

tetap ada koordinat ($h=0, t=0$), yaitu benda berada di posisi $h = 0$ pada saat awal, $t = 0$. Namun menurut pengukuran, benda masih berada di posisi $h = 0$, meskipun waktu sudah berjalan sejak benda dilepaskan dari penahannya.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa selain gesekan udara, ada faktor lain yang terlibat memperlambat waktu terukur, dan ini berkaitan dengan saat awal dari benda, dalam hal ini bola besi yang dilepaskan dari pemegangnya yang bersamaan dengan saklar pengukur waktu yang dimulai secara otomatis. Efeknya lebih nampak untuk bola yang berukuran lebih kecil, karena waktu tempuh bola kecil seluruhnya lebih besar daripada waktu tempuh bola besar. Hal ini diprediksikan disebabkan oleh remanensi magnetik seperti yang dibahas sebelumnya.

4. KESIMPULAN

Percobaan gerak jatuh bebas dapat digunakan untuk menentukan besar percepatan gravitasi bumi; sedang dari gerak jatuh yang melawan gesekan udara, penentuan percepatan gravitasi bumi memerlukan perhitungan yang lebih rumit. Pada percobaan Gerak Jatuh Bebas nilai percepatan gravitasi yang diperoleh lebih kecil dari pada nilai yang sesungguhnya. Semakin besar massa benda yang dijadikan obyek ukur, maka semakin baik pula hasil penentuan nilai percepatan gravitasinya.

Dalam batasan dimensi benda yang dijadikan obyek ukur dalam penelitian ini, secara teoritis dengan melibatkan adanya gesekan udara, tidak terdapat perbedaan yang signifikan terhadap parameter geraknya jika ukuran benda berbeda. Penyimpangan hasil lebih disebabkan oleh masalah teknis perangkat percobaan yakni faktor penahan benda jatuh sebelum benda bergerak, dalam hal ini adalah remanensi magnetik kumparan penahan benda jatuh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Bandung melalui Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (UPPM) Politeknik Negeri Bandung yang telah mendanai penelitian Mandiri tahun 2020 dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Nomor: B/249.114/PL1.R7/PG.00.03/2020.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker, *Fundamental of Physics Extended 10th Edition*. 2014.
- [2] D. C. Giancoli, *Physics: Principles with Applications*. 2004.
- [3] M. C. Kause, "Rancang Bangun Alat Peraga Fisika Berbasis Arduino (Studi Kasus Gerak Jatuh Bebas)," *CYCLOTRON*, 2019, doi: 10.30651/cl.v2i1.2511.
- [4] A. Wicaksono and I. Rifai, "Pembuatan Alat Peraga Pendidikan Fisika Sub Materi gerak Jatuh Bebas Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno," in *Seminar Nasional Teknologi Terapan*, 2013, pp. 440–447.
- [5] "hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hphys.html."
- [6] "www.engineeringtoolbox.com > drag-coefficient-d_627, 30 Juli 2020, 23.5."
- [7] M. Garg, Kalimullah, P. Arun, and F. M. S. Lima, "Accurate measurement of the position and velocity of a falling object," *Am. J. Phys.*, vol. 75, no. 3, pp. 254–258, 2007.
- [8] P. Mohazzabi, "When does air resistance become significant in free fall?," *Phys. Teach.*, vol. 49, no. 2, pp. 89–90, 2011.
- [9] V. Pagonis, D. Guerra, S. Chauduri, B. Hornbecker, and N. Smith, "Effects of air resistance," *Phys. Teach.*, vol. 35, no. 6, pp. 364–368, 1997.
- [10] N. Yuningsih, S. Sardjito, and Y. C. Dewi, "Comparison of Measurements of Earth's Gravity Acceleration Using Experiments of Free Fall Motion and Physical Pendulum," in *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif 2019*, 2019, pp. 385–392.