

Gaya Gesekan Udara Terhadap Benda yang Bergerak Vertikal Tanpa Kecepatan Awal

Nani Yuningsih¹, Sardjito², Yunita Citra Dewi³

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

³Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012

E-mail : yunita.citra@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, baik itu yang disebut gerak jatuh bebas, maupun gerak jatuh melawan gesekan udara. Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan konsep gerak vertikal benda yang bergesekan dengan udara untuk menentukan formulasi yang tepat bagi gaya gesekan fluida. Analisis teoritis dilakukan dengan memperhitungkan keberadaan gaya gesek udara terhadap benda yang bergerak jatuh vertikal. Analisis data dilakukan dengan pencocokan solusi matematis terhadap data eksperimen. Pengambilan data percobaan dilakukan dengan menggunakan perangkat gerak jatuh bebas yang bersifat otomatis. Data percobaan yang diamati adalah ketinggian atau jarak tempuh serta waktu tempuhnya. Model yang diteliti tentang gaya gesekan udara ini, yaitu gaya gesekan udara yang besarnya berbanding lurus terhadap kecepatan dan yang besarnya berbanding lurus terhadap kuadrat kecepatan. Dari hasil penelitian diperoleh untuk benda berukuran kecil dengan orde centimeter, dengan kecepatan awal nol, model yang sesuai adalah gaya gesekan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan.

Kata kunci :

gerak vertikal, gesekan udara, gaya gesekan fluida

1. PENDAHULUAN

Gerak jatuh bebas adalah gerak benda vertikal karena pengaruh tarikan gravitasi bumi tanpa kecepatan awal. Pada benda yang bergerak jatuh bebas, hanya bekerja gaya gravitasi bumi atau dikatakan hanya bekerja gaya beratnya saja, sementara gaya-gaya yang lain diabaikan. Sejalan dengan semakin meningkatnya ketelitian pengukuran, 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 karena sangat 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 hubungan parameter secara empirik yang bergantung pada ukuran benda dan kecepatan jatuh. Gaya gesekan udara ada yang dimodelkan dengan bergantung pada

kecepatan secara linear, namun ada juga model gaya gesekan yang bergantung pada kecepatan secara kuadrat[3].

Gesekan oleh fluida (*drag*) merupakan fenomena yang kompleks, yang tidak selalu dapat dijelaskan dengan persamaan yang sederhana. Tidak seperti gesekan antar zat padat, gaya gesek oleh fluida pada zat padat sebanding dengan beberapa fungsi kecepatan benda terhadap fluida. Fungsi ini cukup kompleks dan juga tergantung pada bentuk dan ukuran zat padat, kecepataannya, dan jenis fluida penghasil gaya gesek. Beberapa pendekatan menyebutkan bahwa gaya gesek sebanding dengan kecepatan namun ada pula yang menyatakan sebanding dengan kecepatan kuadrat, di mana perbedaan antara kecepatan rendah dan tinggi dapat dinyatakan dengan diukur menggunakan bilangan Reynolds[4]. Masalah yang muncul adalah bahwa bilangan Reynolds hanyalah signifikan untuk aliran fluida dalam pipa, sementara untuk benda padat yang bergerak dalam fluida, perhitungan bilangan Reynolds menjadi bias.

George Gabriel Stokes memperoleh pernyataan yang dikenal sebagai hukum Stokes untuk gaya gesekan fluida terhadap benda yang berbentuk bola yang bergerak dalam fluida kental. Sementara itu, ada pula yang menyatakan bahwa besarnya gaya gesekan fluida sebanding dengan kuadrat kecepatan (v^2) [1]

Crowe menyebutkan bahwa gesekan fluida, khususnya hambatan aerodinamis yang merupakan parameter penting di bidang transportasi didefinisikan sebagai [5][6]

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_f C_d A_p |v_p - v_f| (v_p - v_f) \quad (1)$$

dengan ρ_f adalah kerapatan fluida, C_d adalah koefisien *drag* partikel, A_p adalah luas permukaan partikel, sedang v_p dan v_f adalah kecepatan partikel dan kecepatan fluida. Untuk benda yang bergerak dengan kecepatan relatif v , terhadap fluida, persamaan di atas, dapat ditulis sebagai:

$$f = -\frac{1}{2} \rho A C v^2 \quad (2)$$

Dari rumusan gaya gesekan ini jika diterapkan pada benda berbentuk bola,

muncul masalah dengan besaran A , yakni apakah A adalah luas permukaan seluruh bola, setengah bola, atau bahkan hanya proyeksinya saja.

Model gerak benda yang jatuh vertikal dan bergesekan dengan udara berbentuk persamaan diferensial. Karena terdapat dua rumus yang berbeda untuk gaya gesekan, maka pada saat mensubstitusikan gaya, akan dihasilkan persamaan diferensial yang berbeda. Solusi dari persamaan diferensial tersebut memiliki bentuk yang juga tidak sederhana, dan solusi inilah yang akan diuji dengan menggunakan data empirik yang diperoleh dari laboratorium.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian bagi kedua rumus gaya gesekan udara, yaitu yang sebanding dengan kecepatan dan yang sebanding dengan kuadrat kecepatan, melalui percobaan Gerak Jatuh Bebas. Selanjutnya dari hasil pengujian tersebut ditentukan bentuk optimal rumus gaya gesekan.

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, baik yang linear maupun yang kuadratik terhadap kecepatan. Perhitungan kalkulus digunakan untuk menentukan solusi dari persamaan gaya tersebut. 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. 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. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan komputasi.

Pada penelitian ini digunakan dua ukuran bola dengan dimensi yang berbeda. Dimensi bola kecil $m = 0,032$ kg, $r = 0,010$ m, dan dimensi bola besar $m = 0,110$ kg, $r = 0,015$ m, $g = 9,80$ m/s². Pengambilan data dilakukan dengan mengubah ketinggian sebanyak 7 kali mulai ketinggian 10 cm dengan interval perbedaan ketinggian 5 cm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

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 kompleks dan hanya kasus khusus yang dapat diturunkan secara analitik [7]. Pada partikel kecil, gaya hambat udara sebanding dengan kecepatan (v) dan dapat dinyatakan dalam bentuk

$$F_g = -Sv \quad (3)$$

dimana tanda negatif menunjukkan bahwa gaya gesekan selalu berlawanan arah dengan kecepatan, dan S merupakan konstanta yang bergantung pada ukuran benda dan jenis fluida. Yang mendukung persamaan (3) antara lain bentuk Hukum Stokes untuk benda berbentuk bola yang bergerak dalam fluida kental :

$$F_g = 6\pi r\eta v \quad (4)$$

dengan r menyatakan jejari bola, dan η adalah viskositas fluida. Dengan demikian, konstanta S besarnya adalah $S = 6\pi r\eta$.

Untuk benda berbentuk bola, bermassa m , yang bergerak vertikal dalam fluida, berlaku persamaan gaya :

$$ma = mg - Sv \quad (5)$$

dengan a menyatakan percepatan ($a = dv/dt$, dan t adalah waktu), dan g adalah percepatan gravitasi bumi.

Persamaan gaya tersebut dapat ditulis dalam bentuk persamaan diferensial antara kecepatan terhadap waktu seperti tampak pada Persamaan 6.

$$m \left(\frac{dv}{dt} \right) + v = mg \quad (6)$$

Jika bola dilepaskan tanpa kecepatan awal, maka dengan memasukkan syarat batas, kecepatan awal sama dengan nol, diperoleh solusinya berbentuk :

$$v = (mg/S) \left[1 - e^{-\left(\frac{S}{m}\right)t} \right] \quad (7)$$

Jika ingin dihitung jarak tempuh bola (h), dengan definisi $h = \int v dt$ diperoleh jarak tempuh sebagai fungsi waktu sebagai :

$$h = \left(\frac{mg}{S} \right) \left\{ t + \left(\frac{m}{S} \right) \left[1 - e^{-\left(\frac{S}{m}\right)t} \right] \right\} \quad (8)$$

Untuk pendekatan yang menyatakan bahwa gaya gesekan oleh udara sebanding dengan kuadrat dari kecepatan relatif benda terhadap udara

$$f = -\frac{1}{2}\rho ACv^2 \quad (9)$$

Maka persamaan gayanya berbentuk

$$F = mg - kv^2 \quad (10)$$

dengan koefisien gesekan k , besarnya [8]

$$k = \frac{1}{2}\rho AC \quad (11)$$

dimana ρ adalah kerapatan udara ($\rho = 1.25 \frac{kg}{m^3}$), A adalah luas penampang benda (dalam hal ini, benda berbentuk bola), dan C adalah koefisien drag untuk benda berbentuk bola bernilai empiris 0,47. Untuk benda yang

bergerak jatuh vertikal tanpa kecepatan awal, di dapat persamaan diferensial:

$$\frac{dv}{dt} + \frac{k}{m}v^2 = g \quad (12)$$

Solusi persamaan ini dinyatakan dalam bentuk hubungan antara jarak tempuh (h) terhadap waktu tempuh (t):

$$h = \frac{m}{k} \ln \left[\cosh \left(t \sqrt{\frac{gk}{m}} \right) \right] \quad (13)$$

Dalam penentuan tetapan k , harus diteliti juga mengenai besaran A , yakni apakah A adalah luas permukaan seluruh bola, setengah bola, atau bahkan hanya proyeksinya (*cross sectional area*) saja.

Selanjutnya hasil perumusan persamaan (8) dan persamaan (13) untuk berbagai nilai waktu tempuh (t) dan jarak tempuh (h) dibandingkan dengan data eksperimen (termasuk untuk tiga variasi nilai luas A untuk perumusan (13)).

Pada perumusan (8), dengan data viskositas udara $2,0 \times 10^{-5} \text{Ns/m}^2$, dimensi bola kecil $m = 0,032 \text{kg}$, $r = 0,010 \text{m}$, dan dimensi bola besar $m = 0,110 \text{kg}$, $r = 0,015 \text{m}$, $g = 9,80 \text{m/s}^2$, maka suku St/m menjadi sangat besar, terutama untuk nilai t yang kecil, sehingga persamaan (8) akan mendekati :

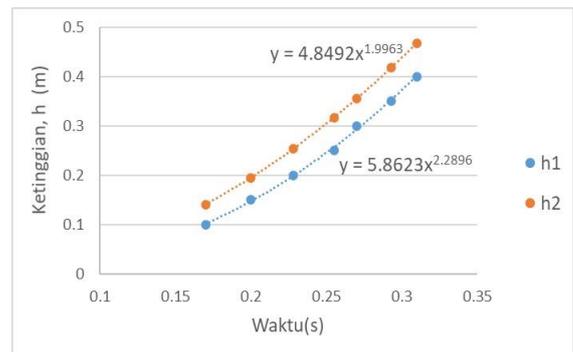
$$h = (mg/S)t \quad (14)$$

Dari persamaan (14) dapat dilihat hubungan antara h terhadap t menjadi linear. Ini menunjukkan bahwa gerak benda menjadi lurus beraturan. Hal ini menyalahi konsep dasar tentang gerak vertikal. Selain itu, jika nilai t terukur untuk nilai yang cukup kecil, disubstitusikan pada persamaan (8) maka diperoleh nilai h yang sangat besar, yang jauh berbeda dari nilai h terukur. Dengan mengambil salah satu harga t , misal untuk $t = 0,170 \text{s}$, dengan persamaan (8) diperoleh $h = 141,41 \text{m}$, sedangkan menurut hasil eksperimen diperoleh harga h adalah $0,10 \text{m}$. Dengan demikian, persamaan (8) yang berdasar pada gaya gesek yang linear terhadap kecepatan tidak tepat untuk merepresentasikan model gerak ini.

Pada aplikasi penentuan jarak tempuh h melalui persamaan (13), dihitung menggunakan tiga nilai A , yaitu $4\pi r^2$, $2\pi r^2$,

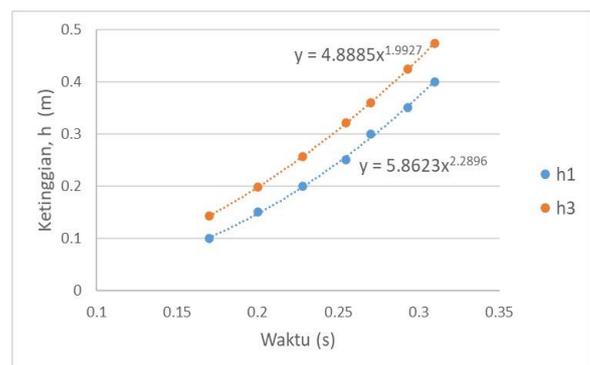
dan πr^2 . Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 2, 3 dan 4. Gambar 2, 3, dan 4 merupakan representasi data untuk gerak bola baja yang jatuh tanpa kecepatan awal, dengan ukuran bola kecil ($r = 0,010 \text{m}$).

Gambar 2 menunjukkan perbandingan antara hasil perhitungan jarak tempuh (h_2 , warna merah) menggunakan persamaan (13) dengan $A = 4\pi r^2$, terhadap jarak tempuh hasil pengukuran (h_1 , warna biru) pada waktu-waktu (t) yang sama.



Gambar 2. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola kecil, dengan $A = 4\pi r^2$

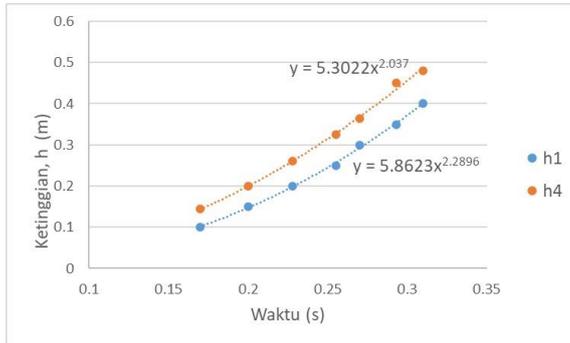
Gambar 3 menunjukkan perbandingan antara hasil perhitungan jarak tempuh (h_3) menggunakan persamaan (13) dengan $A = 2\pi r^2$, terhadap jarak tempuh hasil pengukuran (h_1) pada waktu-waktu (t) yang sama.



Gambar 3. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola kecil, dengan $A = 2\pi r^2$

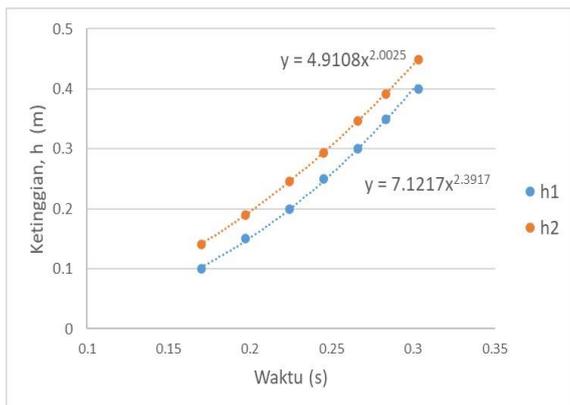
Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara hasil perhitungan jarak tempuh (h_4) menggunakan persamaan (13) dengan $A =$

πr^2 , terhadap jarak tempuh hasil pengukuran (h_1) pada waktu-waktu (t) yang sama

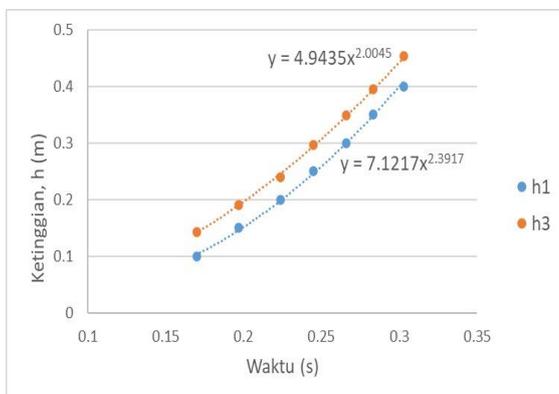


Gambar 4. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola kecil, dengan $A = \pi r^2$.

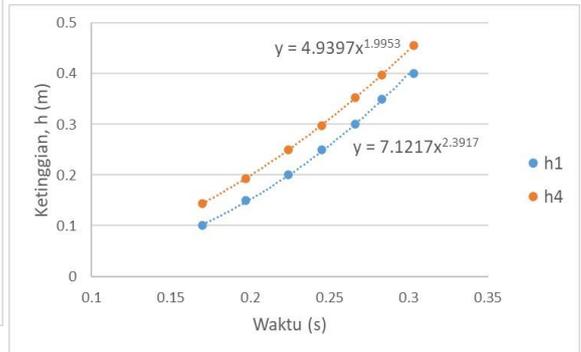
Gambar 5, 6, dan 7 adalah representasi data sejenis namun menggunakan bola berukuran lebih besar ($r = 0,015 m$).



Gambar 5. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola besar, dengan $A = 4\pi r^2$.



Gambar 6. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola besar, dengan $A = 2\pi r^2$.



Gambar 7. Jarak tempuh (h) terhadap waktu (t), untuk gerak jatuh bola besar, dengan $A = \pi r^2$.

Dari perbandingan antara hasil perhitungan model persamaan (13) dengan hasil eksperimen yang divisualisasikan melalui Gambar 2 sampai dengan Gambar 7, terlihat bahwa hasil perhitungan mempunyai kecenderungan perubahan yang sama dengan hasil eksperimen. Hal ini tampak dalam bentuk sejajarnya kurva merah (perhitungan) dengan kurva biru (eksperimen). Substitusi ketiga bentuk nilai A tidak menunjukkan perbedaan yang berarti, terlihat dari kemiripan bentuk kurva h_2, h_3, h_4 terhadap t , serta posisinya terhadap kurva h_1 terhadap t . Selain itu, terdapat selisih nilai h untuk setiap t , antara nilai hitungan dengan nilai terukur, yang secara umum besarnya konstan. Hal ini disebabkan adanya *delay* waktu jatuh saat bola dilepaskan. Seharusnya bola mulai bergerak turun pada saat $t = 0$, tetapi kenyataannya perlu tengat waktu tertentu untuk mulai bergerak jatuh, karena bola masih tertahan oleh gaya magnet. Sebelum bergerak, bola ditahan oleh elektromagnet. Pada saat arus pemasok magnet dimatikan (*off*), waktu mulai diukur. Adanya remanensi magnet berakibat gaya magnet penahan bola tidak otomatis hilang pada saat arus dimatikan, dan inilah yang menyebabkan terjadinya *delay*.

Dari uraian di atas diperoleh bahwa model gaya gesekan udara yang sebanding dengan kuadrat kecepatan lebih tepat diaplikasikan pada gerak jatuh benda dengan dimensi berorde centimeter, daripada model gaya gesekan udara yang berbanding linear terhadap kecepatan.

4. SIMPULAN

Pada benda yang bergerak vertikal di udara karena pengaruh gaya gravitasi bekerja pula gaya gesekan udara. Terdapat dua model gaya gesekan udara, yakni gaya gesek yang besarnya berbanding lurus terhadap kecepatan dan gaya gesek yang besarnya berbanding lurus terhadap kuadrat kecepatan. Untuk benda berukuran berorde centimeter, yang jatuh dengan kecepatan awalnya nol, model yang sesuai adalah gaya gesekan yang berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan. Selain itu faktor yang juga menentukan besar gaya gesekan udara adalah luas permukaan benda, namun masih harus diteliti lebih lanjut kebergantungan pada luas ini, apakah luas permukaan seluruh atau sebagian permukaan benda, ataukah luas penampang benda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Politeknik Negeri Bandung melalui Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung yang telah mendanai penelitian Mandiri tahun 2022. Ucapan terimakasih juga untuk rekan-rekan pengajar Fisika Terapan Polban yang telah turut berkontribusi dalam penelitian ini

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] "hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hphys.html." .
- [4] G. Bagheri and C. Bonadonna, "On the drag of freely falling non-spherical particles," *Powder Technol.*, vol. 301, pp. 526–544, 2016.
- [5] F. Dioguardi, D. Mele, and P. Dellino, "A new one-equation model of fluid drag for irregularly shaped particles valid over a wide range of Reynolds number," *J. Geophys. Res. Solid Earth*, vol. 123, no. 1, pp. 144–

- 156, 2018.
- [6] C. T. Crowe and E. E. Michaelides, "Basic concepts and definitions," *Multiph. flow Handb.*, pp. 24–25, 2006.
- [7] P. Mohazzabi, "When does air resistance become significant in free fall?," *Phys. Teach.*, vol. 49, no. 2, pp. 89–90, 2011.
- [8] 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.