

EKSPERIMEN GERAK JATUH BEBAS BERBASIS SMARTPHONE MENGUNAKAN APLIKASI PHYPHOX

Infianto Boimau, Anggi Y. Boimau, Williams Liu

Program Studi Pendidikan Fisika, STKIP Soe, TTS, 85511, Indonesia

E-mail: infantoboimau@gmail.com

Abstrak

Telah dilakukan eksperimen gerak jatuh bebas berbasis smartphone dengan memanfaatkan aplikasi *phyphox*. Eksperimen ini menggunakan fitur *acoustic stopwatch* untuk mengukur waktu yang diperlukan benda dalam gerak jatuh bebas. Setup eksperimen terdiri dari smartphone, neraca, mistar, statif, *hanging magnet*, buzzer, dan benda berupa bola besi dengan massa yang bervariasi. Variabel yang diukur dalam eksperimen ini adalah waktu, ketinggian, dan massa benda. Prinsip pengukuran waktu menggunakan *acoustic stopwatch* yaitu ketika benda jatuh maka buzzer akan berbunyi dan memberikan input ke *stopwatch* untuk memulai pengukuran dan ketika benda sampai dipermukaan bidang maka bola akan menumbuk landasan statif dari besi sehingga membangkitkan bunyi dan menjadi input bagi *stopwatch* untuk menghentikan pengukuran. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu tempuh, kuadrat kelajuan benda sebanding dengan ketinggian, dan massa benda tidak berpengaruh terhadap kelajuan ketika benda yang mengalami gerak jatuh bebas. Sedangkan percepatan gravitasi bumi yang diperoleh dalam eksperimen ini adalah sebesar $9.805 \pm 0.043 \text{ m/s}^2$ dengan persentase kesalahan relatif sebesar 0.05% jika dibandingkan dengan nilai teoritik sebesar 9.8 m/s^2 .

Kata kunci: gerak jatuh bebas, *phyphox*, smartphone; *acoustic stopwatch*

Abstract

[Smartphone-Based Free Falls Experiment Using Phyphox Application] Smartphone-based free fall experiment has been carried out using the *phyphox* application. This experiment uses the *acoustic stopwatch* feature to measure the time it takes an object in free fall. The experimental setup consists of a smartphone, balance, ruler, stand, *hanging magnet*, buzzer, and objects in the form of iron balls with varying masses. The variables measured in this experiment are time, altitude, and object mass. The principle of measuring time using an *acoustic stopwatch* in the *phyphox* application is when the object falls, the buzzer will sound and provide input to the *stopwatch* to start the measurement and when the object reaches the surface of the field, the ball will hit a certain material that generates sound and becomes input for the *stopwatch* to stop the measurement. The experimental results show that the object's height is proportional to the square of the travel time, the square of the object's speed is proportional to the height, and the object's mass has no effect on the speed of the object. While the acceleration due to gravity obtained in this experiment is $9.805 \pm 0.043 \text{ m/s}^2$ with a relative error percentage of 0.05% when compared to the theoretical value of 9.8 m/s^2 .

Keywords: free falls; *phyphox*; smartphone; *acoustic stopwatch*

PENDAHULUAN

Gerak jatuh bebas merupakan salah satu materi dasar dalam kinematika gerak. Pemahaman terkait konsep-konsep gerak jatuh bebas dapat dipelajari melalui percobaan fisika dengan menentukan hubungan antara variabel. Variabel-variabel fisis dalam konsep gerak jatuh bebas, antara lain: waktu tempuh, ketinggian benda, kelajuan, dan percepatan benda. Pada kasus gerak jatuh bebas, percepatan yang dialami benda merupakan nilai percepatan gravitasi bumi. Metode gerak jatuh bebas dapat pula digunakan untuk mengukur percepatan gravitasi bumi. Alat ukur yang paling umum digunakan untuk melakukan percobaan dalam menyelidiki konsep-konsep gerak jatuh bebas, yaitu *stopwatch* untuk mengukur waktu dan mistar untuk mengukur ketinggian benda. Permasalahan yang dihadapi dalam percobaan gerak jatuh bebas yaitu ketelitian *stopwatch* yang digunakan masih rendah dan sistem pengukuran yang masih manual sehingga menghasilkan pengukuran dengan akurasi dan presisi yang rendah [1][2][3]. Banyak studi telah dilakukan untuk mengembangkan pengukuran yang lebih akurat dan presisi dengan memanfaatkan berbagai device dengan ketelitian pengukuran tinggi serta mampu melakukan pengukuran secara otomatis.

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi menghasilkan berbagai perangkat elektronik yang membantu dalam mengembangkan alat ukur dengan akurasi tinggi dan otomatis dalam pengukuran menggunakan sensor dan mikrokontroler/ arduino [4][5][6]. Selain itu, penggunaan aplikasi-aplikasi yang berbasis komputer seperti audacity dan tracker mampu membantu dalam meningkatkan akurasi dan analisis data yang lebih kompleks [3][7][8]. Namun, saat ini juga telah berkembang pengukuran-pengukuran besaran fisis berbasis smartphone dengan akurasi tinggi [9]. Aplikasi-aplikasi berbasis smartphone/android telah dikembangkan pula untuk memanfaatkan internal sensor yang ditanamkan pada smartphone seperti sensor percepatan, sensor bunyi, sensor magnetik, sensor cahaya, gyroskop, dan berbagai sensor lain [10][11][12]. Dengan berbagai aplikasi tersebut smartphone dapat digunakan sebagai device yang mampu menyediakan berbagai alat ukur untuk melakukan kegiatan percobaan dengan berbagai keuntungan antara lain: biaya murah, akurasi tinggi, dapat dilakukan di luar kelas/ di mana saja, dan membuka peluang untuk melakukan berbagai inovasi bagi pengguna yang melakukan eksperimen[13][14].

Salah satu aplikasi berbasis android yang dikembangkan untuk memanfaatkan sensor-sensor internal dalam smartphone untuk melakukan berbagai percobaan fisika yaitu phyphox. Aplikasi phyphox memiliki beberapa kelebihan dalam melakukan percobaan yaitu sensor dalam smartphone dapat digunakan melakukan pengukuran terhadap berbagai besaran fisika dan data hasil pengukuran dapat disajikan dalam grafik secara real time [15]. Dua permasalahan utama dalam implementasi smartphone sebagai device pengukuran besaran fisika yang dapat diatasi menggunakan aplikasi phyphox, yaitu: (1) smartphone itu sendiri tidak dapat diakses karena merupakan bagian dari setup eksperimen sehingga phyphox menyediakan akses data jarak jauh (*remote access*) dan (2) data hasil akuisisi tidak dapat dipahami sampai dianalisis di komputer sehingga phyphox menyediakan data analisis dalam bentuk grafik secara real time [16]. Berbagai eksperimen fisika yang telah dilakukan dengan memanfaatkan aplikasi phyphox, antara lain: eksperimen mekanika, bunyi, optik, tekanan, dan magnetik [15]. Selain itu, phyphox sangat ideal untuk pembelajaran berorientasi proyek. Khususnya dalam kombinasi dengan modul sensor berbasis mikrokontroler/arduino dan phyphox juga menawarkan cara unik untuk digabungkan dengan disiplin STEM [17].

Eksperimen untuk menyelidiki gerak jatuh bebas maupun menentukan percepatan gravitasi bumi dengan menggunakan aplikasi phyphox telah dilakukan dengan memanfaatkan *acoustic stopwatch* dalam mengukur waktu. Studi yang dilakukan oleh Bara, *et al* (2021) memanfaatkan *acoustic stopwatch* untuk mengukur waktu dan menghitung percepatan gravitasi bumi [18]. Selain itu, studi yang sama dilakukan Kittiravechote & Sujarittham (2020) untuk menyelidiki konsep-konsep gerak jatuh bebas dan mengukur percepatan gravitasi bumi [19]. Kedua studi ini menunjukkan hasil pengukuran dengan akurasi yang tinggi terhadap nilai percepatan gravitasi bumi yang diperoleh. Namun demikian, eksperimen fisika yang dilakukan dalam studi ini menggunakan koreksi terhadap perhitungan waktu yang akan dicacah oleh *acoustic stopwatch* dengan mempertimbangkan waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi untuk merambat sampai ke stopwatch. Hal ini akan berpengaruh besar ketika ketinggian benda dan smartphone semakin tinggi maka koreksi terhadap waktu diperlukan untuk menghasilkan pengukuran yang lebih akurat dalam menentukan percepatan gravitasi bumi.

GERAK JATUH BEBAS

Gerak jatuh bebas adalah gerak jatuh benda pada arah vertikal dari ketinggian tertentu tanpa kecepatan awal. Peristiwa gerak jatuh bebas dipengaruhi oleh gaya gravitasi bumi sehingga benda bergerak dipercepat dengan nilai sebesar percepatan gravitasi bumi (g) [1]. Gerak jatuh bebas merupakan contoh gerak vertikal dengan percepatan konstan [19]. Dalam gerak jatuh bebas, gesekan dan gaya Archimedes terhadap udara diabaikan sehingga dapat dikatakan bahwa gerak jatuh bebas terjadi dalam ruang hampa [8][20]. Apabila sebuah benda jatuh bebas dari ketinggian h , secara matematis dirumuskan hubungan ketinggian, waktu tempuh, kelajuan benda, dan percepatan gravitasi adalah [3][21][22]:

$$v = gt \quad (1)$$

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

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

dimana v adalah kelajuan benda (m/s), t adalah waktu tempuh (s), g adalah percepatan gravitasi bumi (m/s^2), dan h adalah ketinggian benda (m).

Misalkan sebuah perangkat dikembangkan untuk menyelidiki gerak jatuh bebas dan mengukur percepatan gravitasi bumi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Benda dijatuhkan dari ketinggian h dan waktu tempuh diukur menggunakan stopwatch yang diletakan pada bagian B sejauh H . Anggap stopwatch bekerja menggunakan sistem bunyi (*acoustic*) yang maka untuk memulai dan menghentikan pengukuran waktu akan dikendalikan oleh bunyi yang dibangkitkan sistem. Bunyi yang dihasilkan untuk memulai pengukuran terletak pada bagian A sistem sedangkan bunyi yang dibangkitkan untuk menghentikan pengukuran dihasilkan pada permukaan bidang (akibat tumbukan). Jika demikian, maka waktu yang terukur oleh stopwatch memiliki koreksi yang secara matematis dituliskan menjadi:

$$t = t' - \frac{H}{340} \quad (4)$$

dimana t adalah waktu terkoreksi dalam pengukuran (s), t' waktu yang terukur pada stopwatch (s), dan H adalah ketinggian/ posisi stopwatch. Untuk menentukan percepatan gravitasi bumi menggunakan sistem ini maka substitusikan Pers. (4) ke Pers. (2) sehingga diperoleh:

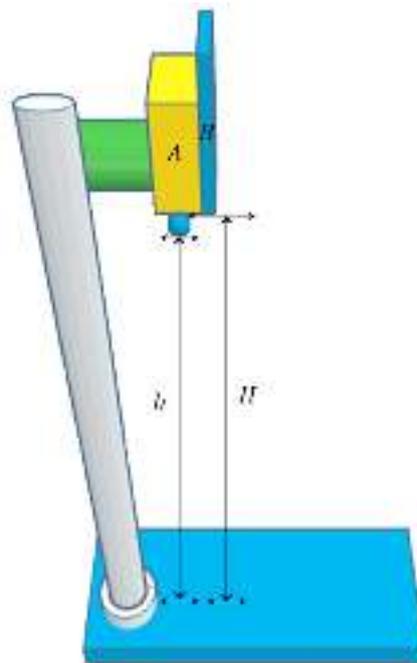
$$g = \frac{2h}{\left(t' - \frac{H}{340}\right)^2} \quad (5)$$

Sedangkan ralat dan kesalahan penentuan percepatan gravitasi bumi ditentukan oleh persamaan:

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial h}\right)^2 (\Delta h)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial t'}\right)^2 (\Delta t')^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial H}\right)^2 (\Delta H)^2} \quad (6)$$

$$\% \text{ error} = \left| \frac{g_{\text{eksperimen}} - g_{\text{teori}}}{g_{\text{teori}}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

dengan nilai percepatan gravitasi bumi secara teoritis adalah 9.8 m/s^2 [4].



Gambar 1. Perangkat yang dikembangkan untuk menyelidiki gerak jatuh bebas

METODE

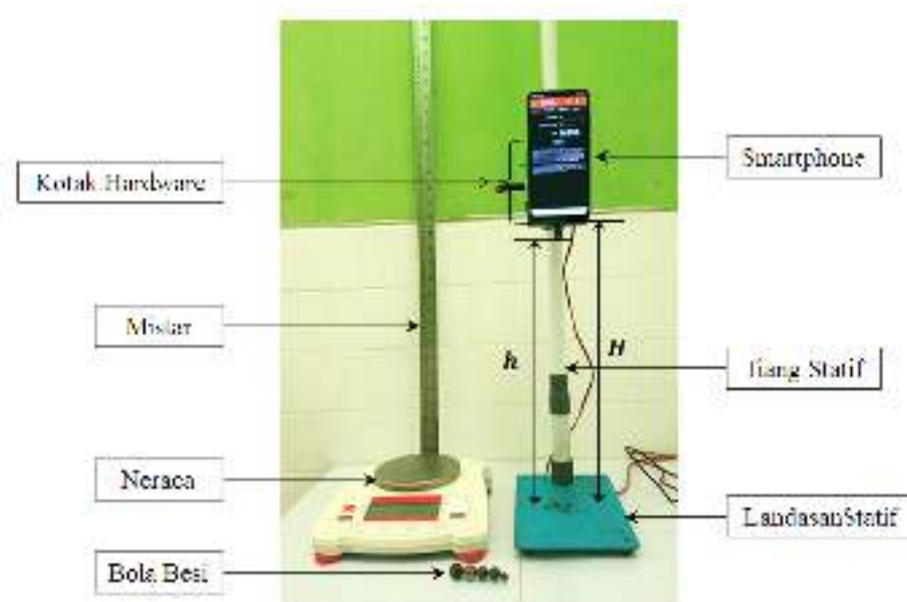
Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam percobaan ini, antara lain: neraca, mistar, smartphone, statif, dan bola besi berbagai ukuran. Neraca digunakan untuk mengukur massa benda dengan ketelitian 0.01 gr. Mistar digunakan untuk mengukur ketinggian benda dengan ketelitian 1 mm. Smartphone digunakan sebagai alat untuk mengukur waktu (*stopwatch*) dengan memanfaatkan aplikasi phyphox. Stopwatch tersebut bekerja dengan memanfaatkan bunyi (*acoustic stopwatch*) sebagai *trigger* untuk memulai dan menghentikan pengukuran. Stopwatch yang digunakan dalam percobaan ini memiliki ketelitian sebesar 0.001 s. Statif sebagai sistem mekanik yang berfungsi untuk melakukan variasi dalam pengukuran dengan

merubah-ubah ketinggian benda. Sedangkan bola besi yang digunakan dalam percobaan ini memiliki massa masing-masing sebesar 1.98 gr, 6.98 gr, 8.21 gr, 8.25 gr, 11.74 gr, dan 13.86 gr.

Setup Percobaan

Setup percobaan gerak jatuh bebas yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 2. Setup percobaan yang dikembangkan harus *men-trigger* stopwatch untuk membangkitkan bunyi sehingga pengukuran waktu dapat dimulai maupun dihentikan. Selain itu, setup percobaan ini didesain untuk menjatuhkan benda secara otomatis dan pada saat yang sama bunyi juga dibangkitkan sehingga pengukuran dapat dimulai. Untuk merealisasikan hal tersebut maka didesain sistem perangkat keras seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem ini bekerja dengan prinsip ketika *pushbutton* ditekan maka *buzzer* akan berbunyi dan arus yang mengalir pada kumparan akan hilang sehingga benda jatuh dan pengukuran waktu akan dimulai. Sedangkan untuk menghentikan pengukuran waktu dilakukan dengan benda yang jatuh akan menunbuk permukaan statif yang terbuat dari besi sehingga membangkitkan bunyi yang *men-trigger* stopwatch untuk menghentikan pengukuran.



Gambar 2. Setup percobaan gerak jatuh bebas menggunakan aplikasi phyphox

Pengumpulan Data

Variabel-variabel yang diukur dalam percobaan ini, antara lain: ketinggian benda, ketinggian smartphone, waktu tempuh bola, dan massa benda. Pengumpulan data dilakukan dengan melakukan variasi terhadap ketinggian benda lalu mengukur waktu tempuh, sedangkan massa benda dibuat tetap. Selain itu, pengukuran waktu juga dilakukan dengan melakukan variasi pada massa benda dengan ketinggian benda adalah tetap.

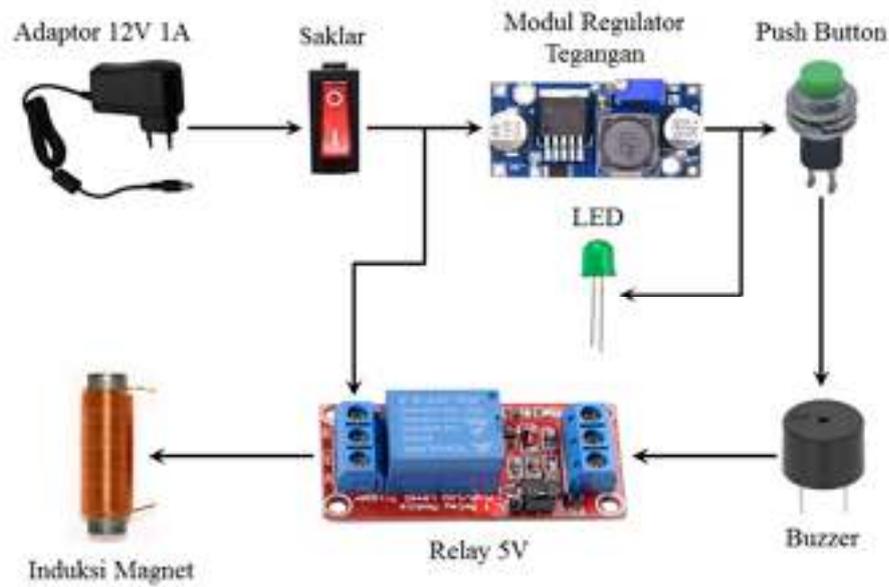
Analisis Data

Variabel-variabel yang dihitung dalam penelitian ini, antara lain: laju benda dan nilai percepatan gravitasi bumi. Perhitungan laju benda dan percepatan gravitasi bumi dianalisis menggunakan teori ralat. Analisis data juga dilakukan menggunakan teknik regresi untuk mencari hubungan antara ketinggian benda dan waktu tempuh, kelajuan benda dan waktu tempuh, serta kelajuan benda dan ketinggian. Selain itu, melalui tabulasi data akan dianalisis pengaruh massa benda terhadap waktu tempuh dalam gerak jatuh bebas.

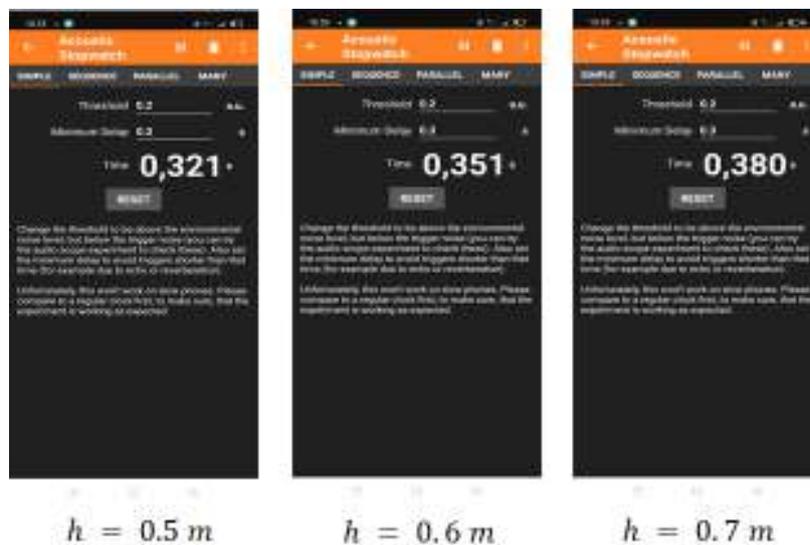
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyelidikan gerak jatuh bebas dalam percobaan ini memanfaatkan *acoustic stopwatch* pada smartphone sebagai alat untuk mengukur waktu tempuh benda secara otomatis. Hasil akuisisi data menggunakan aplikasi phyphox dalam percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk menentukan

percepatan gravitasi bumi dalam percobaan ini dilakukan pengumpulan data dengan melakukan variasi terhadap ketinggian benda, sedangkan massa benda yang digunakan adalah tetap. Dalam studi ini, pengukuran dilakukan dari ketinggian 0.1 m sampai 1 m dan massa benda yang digunakan adalah 8.25 gr. Hasil pengumpulan dan analisis data untuk menentukan percepatan gravitasi bumi disajikan dalam Tabel 1. Nilai percepatan gravitasi bumi dihitung menggunakan Pers. (5) sedangkan nilai ketidakpastian menggunakan Pers. (6). Dalam eksperimen ini nilai percepatan gravitasi bumi ditentukan dengan menambahkan koreksi berupa waktu yang diperlukan oleh bunyi untuk merambat dari landasan statif sampai smartphone seperti yang ditunjukkan pada Pers. (4).



Gambar 3. Desain perangkat keras percobaan gerak jatuh bebas yang dikembangkan



Gambar 4. Hasil akuisisi data menggunakan aplikasi phyphox

Hasil analisis data menunjukkan rerata nilai percepatan gravitasi yang diperoleh dalam percobaan ini adalah $9.805 \pm 0.043 \text{ m/s}^2$. Hasil analisis yang diperoleh menunjukkan presisi pengukuran nilai percepatan gravitasi bumi dalam percobaan ini sebesar 0.44%. Sedangkan persentase kesalahan relatif hasil pengukuran nilai percepatan gravitasi bumi adalah sebesar 0.05%. Hasil ini menunjukkan akurasi pengukuran yang tinggi jika dibandingkan dengan nilai teoritik sebesar 9.8 m/s^2 . Hasil yang diperoleh

dalam studi ini sejalan dengan hasil pengukuran yang dilakukan oleh Kittiravechote & Sujarittam (2020) dengan menggunakan *acoustic stopwatch* berbasis aplikasi phyphox pada kasus gerak jatuh bebas diperoleh nilai percepatan gravitasi bumi sebesar 9.760 m/s^2 dengan persentase kesalahan sebesar 0.23% [19]. Selain itu, studi yang dilakukan oleh Bara, *et al* (2021) dengan memanfaatkan *acoustic stopwatch* berbasis aplikasi phyphox diperoleh hasil pengukuran percepatan gravitasi bumi pada kasus gerak jatuh bebas sebesar 10 m/s^2 [18].

Tabel 1. Hasil percobaan menggunakan *acoustic stopwatch* pada aplikasi phyphox

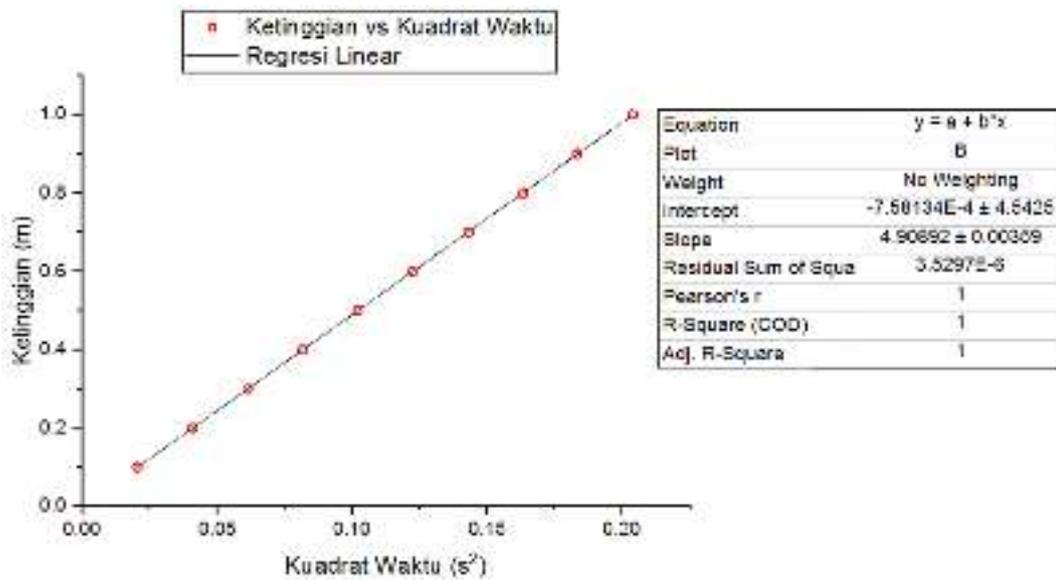
Ketinggian Benda (m)	Ketinggian Smartphone (m)	Rerata Waktu (s)	g (m/s ²)
0.1	0.120	0.143	9.801 ± 0.074
0.2	0.220	0.203	9.788 ± 0.063
0.3	0.320	0.249	9.782 ± 0.065
0.4	0.413	0.287	9.795 ± 0.054
0.5	0.520	0.321	9.798 ± 0.040
0.6	0.620	0.352	9.814 ± 0.029
0.7	0.720	0.380	9.815 ± 0.040
0.8	0.820	0.406	9.804 ± 0.025
0.9	0.920	0.431	9.817 ± 0.015
1.0	0.102	0.454	9.815 ± 0.022
Rerata			9.805 ± 0.043

Hubungan antar variabel pada kasus gerak jatuh bebas dapat diselidiki dalam percobaan ini dengan menganalisis data hasil pengukuran menggunakan analisis regresi. Hubungan antara ketinggian benda dan waktu tempuh dapat diselidiki dengan analisis regresi linear seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil analisis memperlihatkan bahwa ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu tempuh yang diformulasikan dalam bentuk persamaan $y = 4.90892x - 0.000758$, dimana y menyatakan ketinggian benda dan x menyatakan kuadrat waktu tempuh benda. Hasil yang diperoleh tersebut sesuai dengan kajian teoritik seperti yang dijelaskan pada Pers. (2) bahwa ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu. Selain itu, hasil percobaan ini didukung dengan studi yang dilakukan oleh Yuningsih & Sardjito (2020) dalam menyelidiki gerak jatuh bebas yang dipengaruhi oleh gesekan udara yang memperlihatkan bahwa ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu [20]. Hasil studi lain yang dilakukan oleh Kause & Boimau (2019) dalam mengembangkan alat peraga gerak jatuh bebas juga memperlihatkan hasil percobaan yang menunjukkan bahwa ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu [4]. Nilai slope yang diperoleh dalam analisis regresi menunjukkan suku $(\frac{1}{2})g$ seperti dijelaskan dalam Pers. (2) sehingga dengan demikian dapat pula ditentukan nilai percepatan gravitasi sebesar 9.818 m/s^2 .

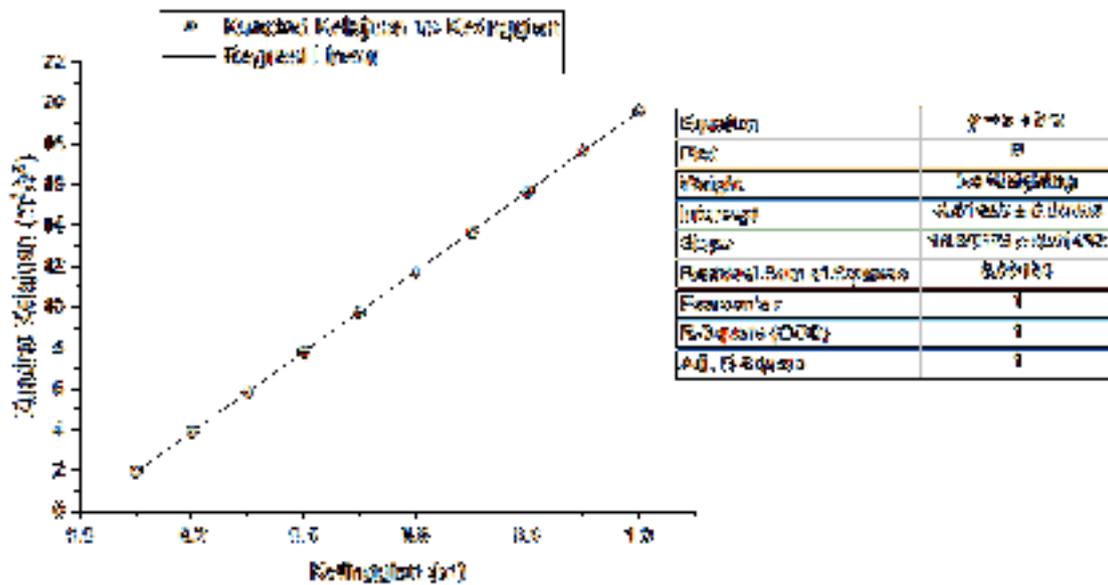
Pengaruh ketinggian terhadap kelajuan benda dapat pula diselidiki dalam percobaan ini dengan menggunakan analisis regresi. Hasil analisis regresi linear untuk menentukan pengaruh ketinggian terhadap kelajuan benda ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil analisis memperlihatkan bahwa kuadrat kelajuan benda sebanding dengan ketinggian yang diformulasikan dalam persamaan $y = 19.63573x - 0.01489$ dimana y menyatakan kuadrat kelajuan dan x menyatakan ketinggian. Hasil tersebut sesuai dengan kajian teoritik seperti dijelaskan dalam Pers. (3). Hasil ini juga didukung dengan studi yang dilakukan oleh Boimau & Mellu (2019) untuk menentukan pengaruh ketinggian terhadap kelajuan benda dalam kasus gerak jatuh bebas diperoleh bahwa kelajuan benda sebanding dengan akar kuadrat ketinggian [23]. Nilai slope yang diperoleh dalam analisis regresi menyatakan suku $2g$ seperti dijelaskan dalam Pers. (3) sehingga dengan demikian dapat pula ditentukan nilai percepatan gravitasi yaitu sebesar 9.818 m/s^2 .

Pengaruh massa benda terhadap gerak jatuh bebas dianalisis dengan membandingkan waktu yang diperlukan benda ketika jatuh dari ketinggian tertentu yang sama. Pengukuran dalam percobaan ini menggunakan massa benda yang berbeda-beda dan dijatuhkan dari ketinggian 0.5 m. Hasil akuisisi data disajikan dalam bentuk tabulasi data seperti pada Tabel 2. Hasil pengukuran memperlihatkan bahwa massa benda tidak berpengaruh terhadap kelajuan selama benda jatuh bebas. Hal ini dapat dilihat dari waktu yang diperlukan oleh benda yang massanya berbeda-beda ketika dijatuhkan dari ketinggian yang sama membutuhkan rerata waktu yang sama. Hasil eksperimen yang sama juga diperoleh Firdaus, *et al* (2019) bahwa ketika dua massa benda yang cukup jauh berbeda dijatuhkan tanpa kecepatan awal maka

waktu rata-rata yang diperoleh tidak jauh berbeda. Hal tersebut memperlihatkan massa tidak mempengaruhi kelajuan benda yang jatuh dengan asumsi hanya ada gaya gravitasi yang bekerja di atasnya [7].



Gambar 5. Grafik analisis ketinggian benda terhadap kuadrat waktu



Gambar 6. Grafik analisis kuadrat kelajuan terhadap ketinggian benda

Tabel 2. Tabulasi data pengaruh massa benda terhadap waktu tempuh

Massa Benda (gr)	Rerata Waktu (s)	Kelajuan (m/s)
1.98	0.319	3.126
6.98	0.319	3.126
8.21	0.319	3.126
8.25	0.321	3.146
11.74	0.320	3.136
13.86	0.320	3.136

SIMPULAN

Eksperimen fisika berbasis smartphone dengan memanfaatkan *acoustic stopwatch* pada aplikasi phyphox untuk menyelidiki konsep-konsep dalam gerak jatuh bebas dan menentukan nilai percepatan gravitasi bumi telah dilakukan. Pengukuran waktu tempuh dalam eksperimen ini menambahkan koreksi berupa waktu yang dibutuhkan gelombang bunyi untuk merambat dari landasan statif sampai ke smartphone. Hasil eksperimen yang diperoleh menunjukkan bahwa (1) ketinggian benda sebanding dengan kuadrat waktu tempuh, (2) kuadrat kelajuan sebanding dengan ketinggian benda, dan (3) massa benda tidak berpengaruh terhadap kelajuan ketika benda mengalami gerak jatuh bebas. Sedangkan percepatan gravitasi bumi yang diperoleh dalam eksperimen ini adalah sebesar $9.805 \pm 0.043 \text{ m/s}^2$ dengan persentase kesalahan relatif sebesar 0.05% jika dibandingkan dengan nilai teoritik sebesar 9.8 m/s^2 .

DAFTAR PUSTAKA

1. Y. Dasriyani, Hufri, and Yohandri, "Pembuatan Set Eksperimen Gerak Jatuh Bebas Berbasis Mikrokontroler Dengan Tampilan Pc," *Pillar Phys.*, vol. 5, no. 1, pp. 89–96, 2015.
2. Z. Azhar, "Pembuatan Alat Praktikum Digital Pada Konsep Gerak Jatuh Bebas Sebagai Media Pembelajaran Fisika," *Jurnal Ikatan Alumni Fisika Universitas Negeri Medan.*, vol. 4, no. 1, 2018.
3. S. Toda, M. Y. Mala Tati, Y. C. Bhoga, and R. B. Astro, "Penentuan Percepatan Gravitasi Menggunakan Konsep Gerak Jatuh Bebas," *Opt. J. Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 1, pp. 30–37, 2020, doi: 10.37478/optika.v4i1.367.
4. M. C. Kause, "Rancang Bangun Alat Peraga Fisika Berbasis Arduino (Studi Kasus Gerak Jatuh Bebas)," *Cyclotron*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.30651/cl.v2i1.2511.
5. O. A. Atani, L. A. S. Lapono, and A. C. Louk, "Rancang Bangun Alat Peraga Praktikum Gerak Jatuh Bebas," *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 4, no. 1, pp. 33–39, 2019, doi: 10.35508/fisa.v4i1.1435.
6. J. Pendidikan, S. Humairoh, M. Yakob, N. A. Lubis, and R. A. Putra, "Perancangan Alat Praktikum Berbasis Arduino Untuk Menentukan Waktu Dan Kecepatan Secara Otomatis Pada Gerak Jatuh Bebas Berdasarkan penelitian Zul Azhar (2018) dengan judul " Pembuatan Alat Angket yang diperoleh dari siswa pada penggunaan alat praktikum," no. 4, pp. 23–32, 2021.
7. T. Firdaus, E. Erwin, and R. Rosmiati, "Eksperimen Mandiri Siswa dalam Penentuan Percepatan Gravitasi Bumi pada Materi Gerak Jatuh Bebas," *Titian Ilmu J. Ilm. Multi Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 31–36, 2019, doi: 10.30599/jti.v11i1.385.
8. A. Ristiawan, "Analisis Gerak Jatuh Bebas Dengan Metode Video Based Laboratory (Vbl) Menggunakan Software Tracker," *J. Teach. Learn. Phys.*, vol. 3, no. 2, pp. 26–30, 2018, doi: 10.15575/jotalp.v3i2.6556.
9. J. Kuhn and P. Vogt, "Smartphones as Experimental Tools: Different Methods to Determine the Gravitational Acceleration in Classroom Physics by Using Everyday Devices," *Eur. J. Phys. Educ.*, vol. 4, no. 1, pp. 16–27, 2013, [Online]. Available: <http://ejpe.erciyes.edu.tr/index.php/EJPE/article/view/84%5Cnhttp://ejpe.erciyes.edu.tr/index.php/EJPE/article/download/84/pdf>.
10. A. Y. Nuryantini and R. A. Yudhiantara, "The Use of Mobile Application as a Media in Physics Learning," *J. Penelit. dan Pembelajaran IPA*, vol. 5, no. 1, p. 72, 2019, doi: 10.30870/jppi.v5i1.3732.
11. A. Y. Nuryantini, R. Zakwandi, and M. A. Ariayuda, "Home-Made Simple Experiment to Measure Sound Intensity using Smartphones," *J. Ilm. Pendidik. Fis. Al-Biruni*, vol. 10, no. 1, pp. 159–166, 2021, doi: 10.24042/jipfalbiruni.v10i1.8180.
12. L. Sukariasih, Erniwati, L. Sahara, L. Hariroh, and S. Fayanto, "Studies the use of smartphone sensor for physics learning," *Int. J. Sci. Technol. Res.*, vol. 8, no. 10, pp. 862–870, 2019.

13. I. Slipukhina, I. Chernetkiy, N. Kurylenko, S. Mienailov, and S. Podlasov, "Applied aspects of instrumental digital didactics: M-learning with the use of smartphone sensors," *CEUR Workshop Proc.*, vol. 2740, pp. 173–187, 2020.
14. A. Malik* and M. Ubaidillah, "The Use of Smartphone Applications in Laboratory Activities in Developing Scientific Communication Skills of Students," *J. Pendidik. Sains Indones.*, vol. 9, no. 1, pp. 76–84, 2021, doi: 10.24815/jpsi.v9i1.18628.
15. R. Carroll and J. Lincoln, "Phyphox app in the physics classroom," *Phys. Teach.*, vol. 58, no. 8, pp. 606–607, 2020, doi: 10.1119/10.0002393.
16. S. S, H. S, H. H, and S. C, "Advanced tools for smartphone- based experiments : phyphox," *Phys. Educ.*, 2018.
17. H. Heinke and C. Stampfer, "Phyphox – teaching physics with smartphone experiments," pp. 1–6, 2019.
18. F. M. Bara, M. I. Mako, A. Eku, and M. A. Pau, "Phyphox Pada Gerak Jatuh Bebas," vol. 2, no. 2, pp. 11–17, 2021.
19. A. Kittiravechote and T. Sujarittham, "Measuring the acceleration of gravity using a smartphone, A4-papers, and a pencil," *Int. J. Adv. Sci. Technol.*, vol. 29, no. 7 Special Issue, pp. 884–889, 2020.
20. N. Yuningsih and Sardjito, "Gerak Vertikal Benda Berukuran Berbeda yang Jatuh Tanpa Kecepatan Awal dan Bergesekan dengan Udara," *Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, pp. 710–714, 2020.
21. N. Maulani, D. Setiawan, Supriyadi, and Sulhadi, "Pengembangan Alat Praktikum Digital Gerak Jatuh Bebas Sebagai Media Pembelajaran Fisika," *WaPFI (Wahana Pendidik. Fis.*, vol. 6, no. 1, pp. 76–81, 2021.
22. H. Rosdianto, "Penentuan Percepatan Gravitasi Pada Percobaan Gerak Jatuh Bebas Dengan Memanfaatkan Rangkaian Relai," *SPEKTRA J. Fis. dan Apl.*, vol. 2, no. 2, p. 107, 2017, doi: 10.21009/spektra.022.03.
23. I. Boimau and R. N. K. Melli, "Development of Microcontroller-Based Free Fall Motion Learning Materials to Increase Students' Conceptual Understanding," *JIPF (Jurnal Ilmu Pendidik. Fis.*, vol. 4, no. 1, p. 45, 2019, doi: 10.26737/jipf.v4i1.888.