



Studi Multi-Metode Penentuan Percepatan Gravitasi Berbasis Sensor

Cosmas Jerry Anggoro
Jerrycosmas016@gmail.com
SMA Taruna Nusantara, Kota Cimahi, Indonesia

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi 12.0)
Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
08 Agustus 2026

Abstrak

Gravity measurement experiments in physics laboratories commonly employ a single method, limiting opportunities for students to develop modeling and data analysis skills. This study aimed to develop a multi-method physics laboratory activity assisted by digital sensors for determining the acceleration due to gravity. Three experimental approaches were implemented: an audio-based magnetic pendulum, video analysis of free-fall motion, and a pressure sensor-based hydrostatic method. The acceleration due to gravity was determined using linear regression analysis for each method. The results yielded gravitational acceleration values of 9.59 m/s^2 , 9.82 m/s^2 , and 9.86 m/s^2 , with relative errors of 2.08%, 0.22%, and 0.61%, respectively, compared with the theoretical value. The results show good agreement among the three experimental approaches, with the second method producing the smallest relative error. The developed laboratory activity provides a framework for comparing different physical models and measurement approaches for determining the acceleration due to gravity through graph-based data analysis. This multi-method approach demonstrates the feasibility of integrating audio, video, and pressure-based measurements into a physics laboratory activity for experimental determination of gravitational acceleration.

Keywords: Gravitational Acceleration · Multi-Method Experiment · Digital Sensors · Physics Laboratory · Modeling Skills

PENDAHULUAN

Percepatan gravitasi bumi (g) merupakan percepatan yang dialami suatu benda akibat pengaruh medan gravitasi bumi (Tipler, Paul. A., 1998). Sejak eksperimen klasik yang dilakukan oleh Galileo Galilei dan pengembangan hukum gravitasi universal oleh Isaac Newton, pengukuran nilai percepatan gravitasi (g) terus dikembangkan dengan berbagai metode yang semakin akurat dan mudah diakses. Eksperimen pengukuran g tidak hanya bertujuan memperoleh nilai numerik, tetapi juga melatih keterampilan proses sains, pemodelan, dan analisis data.

Eksperimen sangat berperan penting dalam laboratorium fisika karena memungkinkan suatu konsep atau model fisika dikaji melalui pengamatan dan pengukuran secara langsung. Eksperimen fisika membantu mengembangkan pemahaman konsep yang akurat serta menghindarkan siswa dari miskonsepsi umum (Lewandowski, 2017). Kegiatan eksperimen berpotensi digunakan untuk menghubungkan konsep teoritis dengan fenomena fisis yang dapat diamati serta memperkenalkan proses analisis data dan pemodelan. Berbagai metode pengukuran percepatan gravitasi, seperti gerak jatuh bebas, pendulum, maupun pendekatan berbasis tekanan fluida, memberikan alternatif untuk mengkaji besaran fisika yang sama melalui prinsip dan model yang berbeda. Oleh karena itu, penggunaan beberapa metode dalam satu aktivitas laboratorium dapat menjadi pendekatan yang relevan untuk membandingkan model fisika, metode pengukuran, serta hasil analisis data dalam menentukan percepatan gravitasi.

How to Cite: Anggoro, C.J. (2026). Studi Multi-Metode Penentuan Percepatan Gravitasi Berbasis Sensor. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 5 (1), 135-144. <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi>

Eksperimen laboratorium dirancang untuk mendorong pembelajaran melalui keterlibatan aktif siswa. Keterlibatan dalam proses pembelajaran bukan berarti aktif secara fisik saja, tetapi aktif dalam berpikir untuk memecahkan persoalan dalam eksperimen fisika. Siswa membangun pengetahuan dengan mengumpulkan dan menganalisis data serta menarik kesimpulan dari penyelidikan mereka. Siswa juga mengembangkan model yang merepresentasikan hasil pengamatan, sehingga menghubungkan konsep teoretis dengan bukti eksperimental. Selain itu, siswa belajar merancang eksperimen untuk menguji hipotesis dengan mempertimbangkan faktor penting seperti pemilihan peralatan, pengaturan eksperimen, kualitas data, dan keselamatan.

Berbagai metode telah digunakan untuk menentukan percepatan gravitasi (g), termasuk metode pendulum, analisis video gerak jatuh bebas, dan pengukuran berbasis sensor. Penelitian sebelumnya telah memanfaatkan analisis video untuk menentukan (g) menggunakan pendulum seperti yang dilaporkan oleh Permata et al. (2026), sementara nilai percepatan gravitasi dapat ditentukan dengan menggunakan berbagai metode klasik seperti bandul sederhana, gerak jatuh bebas, maupun metode osilasi (Muller., dkk. 2011; michael. 1993; Takai., dkk. 2010). Perkembangan teknologi digital membuka peluang baru untuk melakukan pengukuran g menggunakan perangkat yang mudah di akses seperti smartphone, mikrofon komputer, dan kamera digital. Namun, penelitian yang mengintegrasikan pendekatan dengan prinsip fisis dan teknik akuisisi data yang berbeda, khususnya pengukuran berbasis osilasi, gerak translasi, dan tekanan hidrostatik menggunakan audio, video, dan sensor tekanan dalam satu kerangka eksperimen, masih terbatas. Perbedaan prinsip pengukuran tersebut memungkinkan adanya perbedaan karakteristik data, model matematis, serta ketelitian hasil yang perlu dikaji secara langsung

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan kegiatan eksperimen berbasis multi-metode dalam menentukan percepatan gravitasi bumi menggunakan perangkat eksperimen sederhana berbantuan sensor digital dan analisis komputer. Tiga pendekatan eksperimen yang digunakan meliputi pendekatan eksperimen, yaitu pendulum magnetik berbasis analisis audio, analisis video gerak jatuh bebas, dan metode hidrostatik berbasis sensor tekanan. Ketiga metode menggunakan prinsip fisis yang berbeda untuk menentukan besaran fisika yang sama, yaitu percepatan gravitasi. Data dari masing-masing metode dianalisis menggunakan regresi linear untuk memperoleh nilai (g), kemudian dibandingkan berdasarkan hasil pengukuran dan relative error terhadap nilai teoritis. Dengan demikian, novelty penelitian ini terletak pada integrasi dan perbandingan langsung tiga pendekatan dengan prinsip fisis dan teknik akuisisi data yang berbeda dalam satu kerangka eksperimen, sehingga memungkinkan evaluasi konsistensi dan ketelitian berbagai metode dalam menentukan percepatan gravitasi.

METODE

Penelitian ini merupakan studi kasus eksperimen fisika berbasis komputer sebagai dasar analisis pengukuran nilai gravitasi. Metode eksperimen kuantitatif dengan pendekatan multi-metode digunakan untuk menentukan nilai percepatan gravitasi bumi (g). Pengukuran dilakukan melalui tiga pendekatan eksperimen sederhana berbantuan sensor dan perangkat digital, yaitu :

1. Bandul magnetik + telephone pickup (analisis audio)
2. Gerak jatuh bebas berbasis analisis video/audio
3. Hubungan tekanan fluida dan ketinggian air berbasis sensor

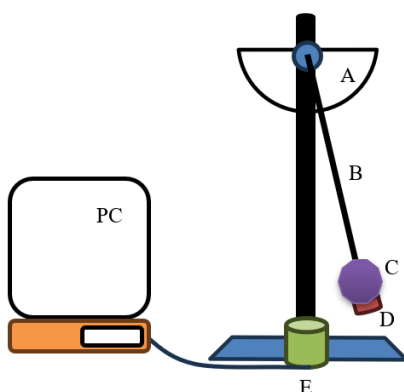
Ketiga metode dilakukan pada kondisi laboratorium Fisika SMA Taruna Nusantara Kampus Cimahi dianalisis menggunakan pendekatan grafik linear untuk menentukan nilai g dari kemiringan (*slope*).

Metode Bandul Magnetik Berbasis Audio

Metode pertama, menentukan percepatan gravitasi menggunakan bandul magnetik berbasis audio. Bandul dengan magnet pada ujung yang diayunkan dengan sudut kecil ($\approx 5^\circ$) memiliki periode T ayunan disajikan dalam persamaan 1.

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} l \quad (1)$$

Periode osilasi bandul sederhana diukur menggunakan rangkaian percobaan yang ditunjukkan pada gambar 1. Bandul (C) terdiri atas sebuah bola dengan magnetik NdFeB (D) di ujung bawah, tali lentur tak bermassa (B), penyangga kaku, dan busur (A). Perekaman sinyal ayunan menggunakan software *Sound Scope* (sensor) (E) diletakkan tepat di dasar di bawah titik setimbang bandul. Magnet melewati *sound scope*, terjadi induksi sinyal listrik yang direkam sebagai sinyal audio. Analisis data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Sound Scope*. Periode ayunan T diperoleh dari selang waktu antara puncak – puncak sinyal audio yang memiliki karakteristik sama dan dihasilkan oleh gerakan magnet melewati *Sound Scope*. Meskipun magnet melewati sensor dua kali dalam satu periode, kedua lintasan tersebut menghasilkan sinyal induksi dengan arah yang berlawanan. Nilai g dapat ditentukan berdasarkan nilai kemiringan gradien menggunakan persamaan 1 tersebut.



Gambar 1. Set eksperimen pendulum magnetik

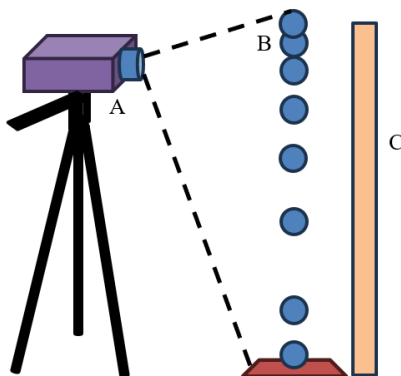
Metode Gerak Jatuh Bebas Berbasis Video

Metode kedua, menentukan percepatan gravitasi dilakukan dengan mengamati benda yang mengalami gerak jatuh bebas menggunakan bantuan analisis video. Pendekatan yang digunakan adalah pelacakan posisi benda pada setiap frame video sehingga diperoleh hubungan antara posisi terhadap kuadrat waktu. Percobaan dilakukan dengan mensetting shutter speed untuk mengevaluasi kualitas data yang dihasilkan. Persamaan ketinggian benda yang berada di bawah pengaruh percepatan gravitasi pada waktu t dinyatakan oleh persamaan 2 berikut :

$$y = y_0 - \frac{1}{2} g t^2 \quad (2)$$

Proses pengambilan video rekaman dilakukan seperti pada gambar 2. Sebuah kamera digital (A) dipasang pada tripod dengan posisi lensa menghadap tegak lurus ke arah lintasan jatuh benda (B). Kamera diatur sedemikian rupa sehingga seluruh lintasan jatuh benda berada dalam bidang pandang kamera. Di belakang lintasan jatuh benda diletakkan mistar atau skala vertikal (C) yang berfungsi sebagai acuan panjang atau kalibrasi. Skala pada mistar digunakan untuk mengubah jarak pada video

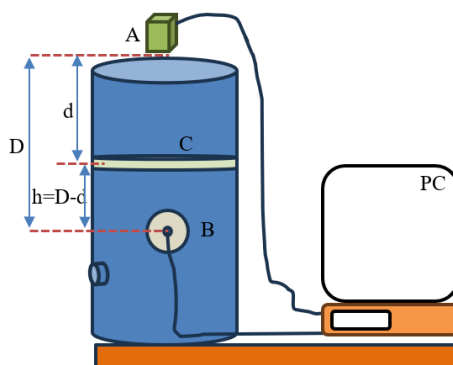
dari satuan piksel menjadi satuan panjang sebenarnya (meter). Hasil rekaman video kemudian diolah dengan perangkat lunak analisis video untuk memperoleh posisi bola terhadap waktu. Posisi bola diukur dari titik acuan di bawah yang ditandai dengan alas berwarna merah, yang merupakan titik ketika bola menyentuh tanah.



Gambar 2. Set eksperimen gerak jatuh bebas

Metode Tekanan Fluida dan Posisi Permukaan Air

Berbeda dengan dua eksperimen sebelumnya, awalnya sebuah pipa transparan diisi air mencapai ketinggian awal (D). di bagian atas pipa ditempatkan sensor gerak (A) yang diarahkan tegak lurus ke permukaan disk (C). Sensor berfungsi mengukur jarak antara sensor dengan permukaan air secara real time. Pada dinding pipa dipasang sensor tekanan (B) yang dihubungkan dengan selang menuju interface dan komputer. Sensor mengukur tekanan fluida di dalam pipa secara real time selama ketinggian air berubah. Seluruh data pengukuran dari kedua sensor dikirim secara simultan ke PC menggunakan perangkat lunak loggerPro. Data berupa hubungan tekanan terhadap waktu dan posisi terhadap waktu, yang kemudian diolah mejadi grafik hubungan tekanan fluida terhadap ketinggian air untuk menentukan percepatan gravitasi g.



Gambar 3. Set eksperimen metode tekanan fluida

Tekanan yang terbaca sensor tekanan merupakan tekanan absolut :

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{fluida} \quad (3)$$

Tekanan fluida bergantung pada tinggi kolom air :

$$P_{fluida} = \rho g(D - d) \quad (4)$$

Dengan D tinggi awal air (konstan) dan d jarak sensor gerak ke permukaan air. Substitusi persamaan 4 ke 3 maka diperoleh persamaan berikut :

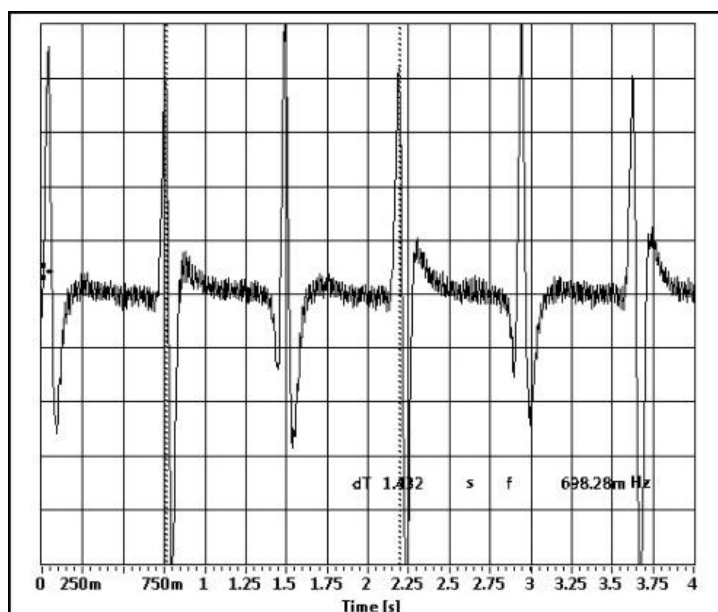
$$P_{abs} = -(\rho g)d + (P_{atm} + \rho gD) \quad (5)$$

Persamaan ini berbentuk garis lurus mengikuti $y = mx + c$ dengan gradien : $m = -\rho g$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bandul Magnetik Berbasis Audio

Hasil rekaman sinyal waktu (*time signal*) menggunakan *Sound Scope* ketika bandul magnetik melewati sensor ditunjukkan oleh gambar 4. Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa gerak bandul bersifat periodik ditunjukkan dengan pola puncak yang berulang dengan waktu yang relatif sama. Periode ayunan dapat diperoleh dari selang waktu antara dua puncak berturut – turut, yaitu 1,432 s. Nilai ini merupakan periode ayunan bandul (T) untuk panjang tali yang sedang diuji (pada kasus sebelumnya $l = 0,55\text{m}$). Puncak sinyal muncul tepat saat magnet melewati posisi keseimbangan, sehingga kesalahan reaksi manusia dapat diminimalisir. Gelombang kecil di antara puncak berasal dari getaran meja, gesekan udara atau gangguan listrik, namun tidak mempengaruhi penentuan periode karena puncak utama sangat jelas.



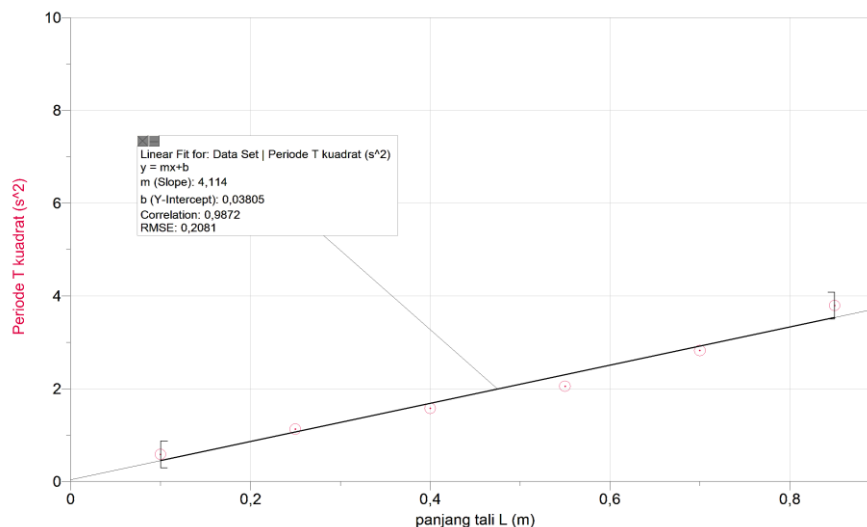
Gambar 4. Grafik pengukuran nilai periode ayunan untuk panjang tali 0,55 m

Selanjutnya, nilai periode (T) dan kuadrat periode (T^2) untuk berbagai variasi panjang tali (l) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Periode (T) untuk berbagai variasi panjang tali (L)

No.	Panjang tali L (m)	Periode T (s)	T^2 (s^2)
1.	0,1	0,766	0,586
2.	0,25	1,062	1,127
3.	0,4	1,255	1,575
4.	0,55	1,432	2,050
5.	0,7	1,68	2,822
6.	0,85	1,948	3,794

Grafik hubungan antara panjang tali dan kuadrat periode ditunjukkan pada gambar 5 berikut.



Gambar 5. Grafik hubungan antara panjang tali (L) terhadap kuadrat periode (T^2)

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa periode ayunan meningkat seiring bertambahnya panjang tali. Data pada tabel 1 memperlihatkan nilai periode (T) yang kemudian dikuadratkan untuk memperoleh hubungan linear antara panjang tali (L) dan kuadrat periode (T^2). Hubungan ini sejalan dengan persamaan 1 di atas sehingga diperoleh hubungan linear $T^2 \approx L$. Berdasarkan grafik 5 terlihat bahwa data eksperimen konsisten dengan model teoritis gerak harmonik sederhana bandul. Kumpulan titik garis memiliki kecenderungan linear yang sangat jelas. Hasil regresi linear antara T^2 terhadap L mengikuti persamaan berikut :

$$T^2 = 4,114 L + 0,038 \quad (6)$$

Nilai koefisien korelasi yang diperoleh $r = 0,9872$. Untuk regresi linear sederhana, nilai koefisien determinasi dapat diperoleh dari kuadrat koefisien korelasi, sehingga diperoleh $R^2 = 0,9746$. Dengan demikian, sekitar 97,46 % variasi nilai T^2 dapat dijelaskan oleh perubahan panjang tali L, sedangkan siswanya dipengaruhi oleh faktor lain dan ketidakpastian eksperimen. Nilai RMSE sebesar $0,2801 \text{ s}^2$ menunjukkan besarnya galat prediksi model regresi terhadap data eksperimen. Dari hasil regresi linear diperoleh nilai gradien sebesar 4,114. Berdasarkan persamaan teoritis, gradien sama dengan $4\pi^2/g$, sehingga diperoleh nilai percepatan gravitasi sebesar $g = 9,596 \text{ m/s}^2$, dengan selisih sekitar 2% terhadap nilai teoritis $9,8 \text{ m/s}^2$. Perbedaan yang masih muncul kemungkinan disebabkan oleh ketidakpastian pengukuran panjang efektif tali, gesekan udara, serta asumsi sudut simpangan kecil yang mungkin tidak selalu terpenuhi secara sempurna selama eksperimen berlangsung.

Gerak Jatuh Bebas Berbasis Video

Eksperimen gerak jatuh bebas dilakukan menggunakan shutter speed yaitu $1/60 \text{ s}$ untuk melihat kualitas rekaman terhadap ketelitian pelacakan posisi benda pada setiap frame video. Data perubahan posisi bola terhadap kuadrat waktu selama proses jatuh bebas ditunjukkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perubahan posisi (Y) bola terhadap waktu (t)

No.	Waktu t (s)	Waktu Kuadrat t^2 (s^2)	Posisi Bola Y (m)
1.	0	0,0000	2,362
2.	0,040	0,0016	2,36
3.	0,080	0,0064	2,33
4.	0,125	0,0156	1,96
5.	0,167	0,0279	1,85

No.	Waktu t (s)	Waktu Kuadrat t ² (s ²)	Posisi Bola Y (m)
6.	0,209	0,0437	1,7
7.	0,250	0,0625	1,69
8.	0,292	0,0853	1,52
9.	0,334	0,1116	1,52
10.	0,375	0,1406	1,33
11.	0,417	0,1739	1,22
12.	0,459	0,2107	1,13
13.	0,464	0,2150	1,13
14.	0,462	0,2138	1,13

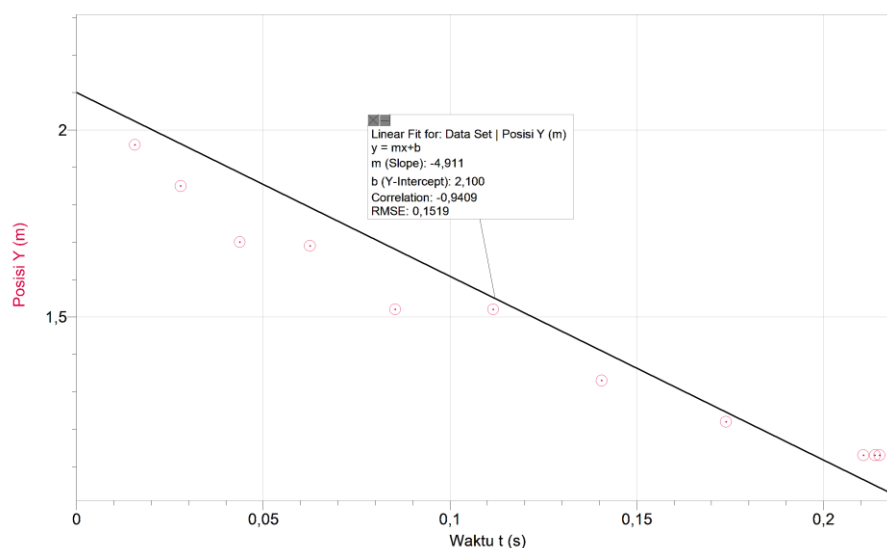
Berdasarkan tabel 2 terlihat bahwa posisi semakin kecil seiring bertambahnya waktu, yang menandakan bola bergerak turun akibat pengaruh percepatan gravitasi. Secara kualitatif, hasil ini telah sesuai dengan karakteristik gerak jatuh bebas, yaitu posisi benda berkurang secara kontinu terhadap waktu. Namun demikian, data yang diperoleh masih menunjukkan beberapa fluktuasi. Pada beberapa titik, perubahan posisi tidak mengikuti pola yang konsisten terhadap pertambahan waktu. Ketidakteraturan ini mengindikasikan adanya ketidakpastian pengukuran posisi pada setiap frame. Salah satu penyebab utama adalah motion blur, yaitu efek kabur pada objek yang bergerak cepat ketika direkam dengan shutter speed yang relatif lambat. Akibatnya, batas posisi bola pada citra video menjadi kurang tajam sehingga proses penentuan koordinat posisi tidak dapat dilakukan secara presisi.

Berdasarkan data pada Tabel 2 kemudian dibuat grafik hubungan posisi terhadap kuadrat waktu yang ditunjukkan pada Gambar 5. Grafik tersebut memperlihatkan kecenderungan penurunan posisi terhadap kuadrat waktu, tetapi kurva yang terbentuk belum menunjukkan bentuk parabola yang ideal sebagaimana karakteristik gerak jatuh bebas. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas data yang diperoleh masih belum cukup baik untuk analisis kuantitatif yang akurat.

Hasil pengukuran menunjukkan adanya perubahan posisi terhadap waktu selama gerak benda berlangsung. Berdasarkan grafik 5, hubungan antara posisi Y terhadap waktu t² menunjukkan kecenderungan linier dengan kemiringan negatif. Hasil regresi linear ditunjukkan persamaan berikut:

$$Y = - 4,911 t^2 + 2,100 \quad (7)$$

Nilai gradien sebesar $- 4,911$ m/s menunjukkan bahwa posisi benda berkurang terhadap waktu dengan laju rata – rata sebesar $4,911$ m/s. Nilai intersep sebesar $2,100$ m menunjukkan posisi benda pada saat $t = 0$ berdasarkan model regresi. Koefisien korelasi diperoleh sebesar $r = - 0,9409$, yang menunjukkan adanya hubungan linear negatif yang kuat antara posisi dan waktu.

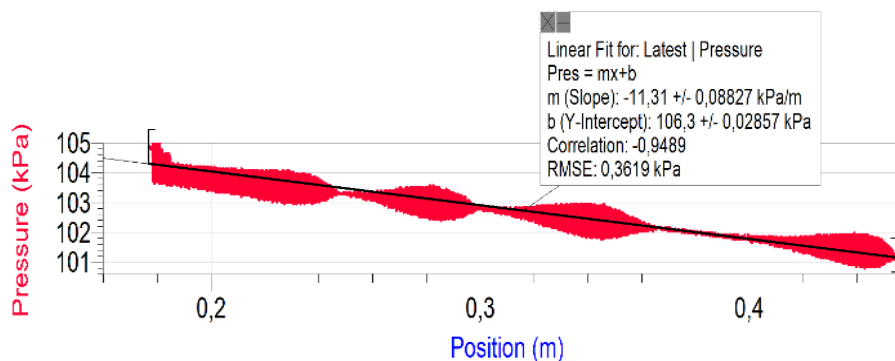


Gambar 6. Grafik hubungan posisi (Y) terhadap kuadrat waktu (t^2)

Koefisien korelasi yang diperoleh sebesar $r = -0,9409$, yang menunjukkan adanya hubungan linear negatif yang kuat antara posisi dan waktu. Nilai koefisien determinasi yang diperoleh dari $R^2 = r^2$ adalah sekitar 0,8853 atau 88,53%. Dengan c Kuadrat Waktu (t^2) tar 88,53% variasi posisi dapat dijelaskan oleh perubahan waktu dalam model linear, sedangkan sisanya berkaitan dengan faktor lain dan ketidakpastian pengukuran. Nilai RMSE sebesar 0,1519 mm menunjukkan besarnya penyimpangan rata-rata prediksi model regresi terhadap data eksperimen. Secara keseluruhan, data menunjukkan kecenderungan gerak dengan posisi yang semakin berkurang terhadap waktu, meskipun terdapat penyimpangan titik eksperimen terhadap garis regresi. Grafik menunjukkan hubungan posisi bola (Y) terhadap kuadrat waktu (t^2) pada gerak jatuh bebas. Semakin besar waktu, posisi semakin kecil (benda bergerak turun) sejalan dengan persamaan 2. Berdasarkan persamaan 2 di atas, nilai percepatan gravitasi $g = -2m = -2(-4.911) = 9,822 \text{ m/s}^2$, dengan selisih 0,2 % terhadap nilai teoritis $9,8 \text{ m/s}^2$.

Tekanan Fluida dan Posisi Permukaan Air

Hasil pengukuran ketinggian permukaan air dan tekanan fluida menunjukkan bahwa semakin besar jarak antara permukaan air dan sensor tekanan, maka tekanan fluida yang terukur semakin kecil. Hal ini sesuai dengan teori tekanan hidrostatik yang menyatakan bahwa tekanan fluida berbanding lurus dengan kedalaman. Grafik hubungan antara tekanan fluida terhadap posisi ditunjukkan oleh gambar berikut



Gambar 7. Grafik hubungan tekanan (P) terhadap posisi (X)

Hasil eksperimen menunjukkan adanya hubungan antara perubahan posisi sensor dan tekanan hidrostatik fluida. Pada grafik terlihat bahwa ketika permukaan air bergerak menjauhi sensor, maka pada saat yang sama tekanan yang terbaca oleh sensor mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa

semakin kecil kedalaman fluida yang menekan sensor, maka tekanan hidrostatik yang terukur juga semakin kecil. Fenomena ini sesuai dengan konsep dasar tekanan hidrostatik yang menyatakan bahwa tekanan dalam fluida bergantung pada kedalaman. Hasil pengukuran menunjukkan adanya perubahan tekanan terhadap posisi sensor selama pengambilan data berlangsung. Berdasarkan grafik, hubungan antara tekanan P terhadap posisi sensor menunjukkan kecenderungan linear dengan kemiringan negatif. Hasil regresi linear ditunjukkan oleh persamaan berikut:

$$P = -11,31 x + 106,3 \quad (8)$$

Nilai gradien sebesar $-11,31$ kPa/m menunjukkan bahwa tekanan berkurang terhadap bertambahnya posisi sensor dengan laju rata-rata sebesar $11,31$ kPa untuk setiap kenaikan posisi 1 m. Nilai intersep sebesar $106,3$ kPa menunjukkan nilai tekanan ketika posisi sensor berada pada $x = 0$ berdasarkan model regresi. Koefisien korelasi yang diperoleh sebesar $r = -0,9489$, yang menunjukkan adanya hubungan linear negatif yang sangat kuat antara tekanan dan posisi sensor. Nilai koefisien determinasi yang diperoleh dari r^2 adalah:

$$R^2 = (-0,9489)^2 \approx 0,9004 \text{ atau sekitar } 90,04\%.$$

Dengan demikian, sekitar $90,04\%$ variasi tekanan dapat dijelaskan oleh perubahan posisi sensor dalam model linear, sedangkan sisanya sebesar $9,96\%$ berkaitan dengan faktor lain dan ketidakpastian pengukuran.

Nilai RMSE sebesar $0,3619$ kPa menunjukkan besarnya penyimpangan rata-rata nilai tekanan hasil prediksi model regresi terhadap data eksperimen. Nilai RMSE yang relatif kecil menunjukkan bahwa data eksperimen memiliki kesesuaian yang cukup baik dengan garis regresi, meskipun masih terdapat penyimpangan beberapa titik data terhadap garis linear. Nilai percepatan gravitasi hasil eksperimen sangat mendekati nilai teoritis $9,8 \text{ m/s}^2$ dengan persentase kesalahan sekitar $0,6\%$. Secara keseluruhan, hasil percobaan berhasil memverifikasi bahwa tekanan fluida berbanding lurus dengan kedalaman dan mengikuti hubungan linear sesuai teori hidrostatik. Eksperimen ini dapat digunakan sebagai kegiatan praktikum fisika yang efektif karena prosedurnya sederhana, waktu pengambilan data relatif singkat, dan mampu menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang mendekati nilai teoritis, dengan catatan bahwa perakitan alat dan kondisi fluida harus dikontrol dengan baik untuk meminimalkan kesalahan pengukuran.

Berdasarkan ketiga metode menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang mendekati nilai teoritis. Perbandingan tingkat akurasi dan konsistensi hasil pengukuran, nilai percepatan gravitasi yang diperoleh dari setiap metode beserta persentase error relatifnya disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3. Perbandingan hasil pengukuran dan karakteristik metode penentuan percepatan gravitasi

No.	Parameter	Bandul Magnetik Berbasis Audio	Gerak Jatuh Bebas Berbasis Video	Tekanan Fluida
1.	Nilai g (m/s^2)	9,59	9,82	9,86
2.	Error relatif (%)	2,08	0,22	0,61
3.	Jenis Sensor	Sound Scope	Kamera digital	Sensor tekanan
4.	Model fisika	Gerak Harmonik sederhana	Gerak Jatuh Bebas	Tekanan Hidrostatik
5.	Persamaan dasar	$T^2 = \frac{4\pi^2}{g} l$	$y = y_0 - \frac{1}{2} g t^2$	$P_{\text{fluida}} = \rho gh$
6.	Variabel yang dianalisis	T^2 vs L	Y vs t^2	P vs h

Berdasarkan tabel 3, ketiga metode yang digunakan mampu menghasilkan nilai percepatan gravitasi yang mendekati nilai teoritis, meskipun didasarkan pada fenomena yang berbeda. Metode bandul magnetik memanfaatkan hubungan antara periode ayunan dan panjang tali dalam sistem gerak harmonik sederhana, sedangkan metode gerak jatuh bebas memanfaatkan hubungan posisi terhadap kuadrat waktu. Adapun metode tekanan fluida menggunakan hubungan linear antara tekanan hidrostatik dan kedalaman fluida. Perbedaan model fisika tersebut menunjukkan percepatan gravitasi merupakan besaran fundamental yang dapat ditentukan melalui berbagai pendekatan. Meskipun variabel yang diamati berbeda, seluruh persamaan mengikuti persamaan linear yang memungkinkan nilai percepatan gravitasi diperoleh dari nilai gradiennya.

Berdasarkan data tabel terlihat bahwa kesalahan relatif terkecil, yaitu 0,22%, diikuti metode tekanan fluida sebesar 0,61%, dan metode bandul magnetik sebesar 2,08%. Hasil ini menunjukkan bahwa ketiga metode memiliki tingkat validitas yang baik untuk digunakan dalam penentuan percepatan gravitasi di laboratorium pendidikan. Perbedaan tingkat akurasi kemungkinan disebabkan oleh sumber ketidakpastian yang berbeda pada setiap metode, seperti pengukuran panjang efektif tali pada bandul, proses pelacakan posisi pada analisis video, serta kalibrasi sensor tekanan pada metode hidrostatik. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat pemahaman konsep percepatan gravitasi, tetapi membantu mengembangkan kemampuan analisis data dan evaluasi ketidakpastian pengukuran.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa pendekatan eksperimen multi-metode (bandul magnetik berbasis audio, gerak jatuh bebas berbasis analisis video, dan metode tekanan fluida terhadap ketinggian air) mampu menentukan nilai percepatan gravitasi bumi secara konsisten menggunakan peralatan sederhana berbantuan sensor digital. Nilai percepatan gravitasi yang diperoleh dari ketiga metode berada sangat dekat dengan nilai teoritis ($\approx 9,8 \text{ m/s}^2$) dengan tingkat kesalahan kecil, sehingga memvalidasi kesesuaian model teoritis dengan data eksperimen. Selain menghasilkan data yang akurat, pendekatan ini juga efektif untuk pembelajaran karena melatih keterampilan pemodelan, analisis grafik, serta pemahaman konsep fisika berbasis bukti eksperimen. Dengan demikian, eksperimen multi-metode berbasis sensor digital layak digunakan sebagai alternatif praktikum fisika yang sederhana, cepat, dan edukatif untuk pengukuran percepatan gravitasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Hu D, Zwicky B M, Wilcox B R and Lewandowski H J.2017. Qualitative investigation of students views about experimental physics *Pys.Rev.Educ. Res* 13 020134
- Tipler, P. A. (1998). Fisika untuk sains dan teknik. Jakarta: Erlangga.
- Patrik Vogt, Jochen Kuhn, and Sebastian Muller, Experiments Using Cell Phones in Physics Classroom Education: The Computer-Aided g Determination, *The Physics Teacher*, vol. 49, 2011, pp. 383-384.
- Jansen Michael P., Using a Camcorder to Analyze Motion, *The Physics Teacher*, vol.31, 1993, pp. 197
- J. Sinacore and H. Takai, Measuring g Using a Magnetic Pendulum and Telephone Pickup, *The Physics teacher*, vol.48, 2010 pp. 448-449.
- M. Stemm and R. H. Katz, Going nuts: Measuring free-fall acceleration by analyzing the sound of falling metal pieces, *The Physics Teacher*, vol. 54, 2016, pp. 181-183.
- M. P. Richard, Pressure Beneath The Surface Of a Fluid: Measuring The Correct Depth, *The Physics Teacher*, vol. 51, 2013, pp. 2888-289.