

Designing A Doppler Effect Experiment Using Smartphone Sound Sensor

Asep Akmal Fadia Nurhalim^{(1,a)*}, Rahma Alliya Aqquilla⁽¹⁾, Najmi Hiyah Fathinah⁽¹⁾, Ika Mustika Sari⁽¹⁾, Rizki Zakwandi⁽¹⁾, dan Alfiansah Sandion Prakoso⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia, 40154
Email : ^(a)*akmalfadia9@upi.edu

Diterima (10 Februari 2025), Direvisi (03 Maret 2025)

Abstract. *This study explores the design of a Doppler effect experiment using a sound sensor on a smartphone. The main objective is to demonstrate that the change in sound frequency due to the relative motion between the source and the observer can be observed and measured using an easily accessible experimental setup. The experiment was conducted using a smartphone equipped with a sound sensor application to record frequency shifts from a moving sound source. The setup consists of a sound emitter with a constant frequency and either a moving observer or a moving source, making it easy to implement in educational settings. The results indicate that this experiment can effectively detect frequency changes. Data analysis shows an error rate ranging from 3.69% to 3.92%, proving that this method is sufficiently accurate for studying the Doppler effect. These findings highlight that integrating mobile technology into scientific experiments can be a valuable tool for educators, particularly in explaining wave phenomena such as the Doppler effect.*

Keywords: *Doppler Effect, Physics Experiments, Educational Technology*

Abstrak. Penelitian ini membahas perancangan eksperimen efek doppler menggunakan sensor suara pada *smartphone*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah membuktikan bahwa perubahan frekuensi suara akibat pergerakan relatif antara sumber dan pengamat dapat diamati dan diukur dengan perangkat eksperimen yang mudah didapat. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan *smartphone* yang dilengkapi aplikasi sensor suara untuk merekam pergeseran frekuensi dari sumber suara yang bergerak. Rangkaian percobaan terdiri dari pemancar suara dengan frekuensi konstan serta pengamat atau sumber yang bergerak, sehingga dapat dengan mudah diterapkan dalam pembelajaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa eksperimen ini dapat secara efektif mendeteksi perubahan frekuensi. Analisis data menunjukkan tingkat kesalahan berkisar antara 3,69% hingga 3,92%, yang membuktikan bahwa metode ini cukup akurat untuk digunakan dalam melakukan eksperimen fenomena efek doppler. Temuan ini menjelaskan bahwa integrasi teknologi mobile dalam eksperimen ilmiah dapat digunakan oleh pendidik, salahsatunya untuk menjelaskan fenomena efek doppler.

Kata kunci: Efek doppler, Eksperimen Fisika, Teknologi Pendidikan

PENDAHULUAN

Fisika adalah disiplin ilmu yang berfokus pada pemahaman berbagai fenomena alam, mulai dari peristiwa sederhana hingga yang paling kompleks. Dengan berbagai pendekatan, para ilmuwan

berhasil menemukan berbagai konsep fisika dalam bentuk matematis. Hal ini menjadi dasar bahwa pembelajaran fisika dapat dilakukan dengan beberapa metode, salah satunya adalah praktikum. Praktikum yang dilakukan membuat peserta didik dapat terlibat secara langsung dalam menemukan

sendiri bagaimana suatu konsep fisika dapat diterapkan. Praktikum sangat berperan penting dalam pembuktian konsep, penguasaan konsep, serta mampu untuk melatih kemampuan psikomotorik peserta didik [1]. Salah satu tantangan yang membuat peserta didik tidak dapat melakukan praktikum dikarenakan keterbatasan alat dan bahan dalam melakukan praktikum [2]. Hal ini mengakibatkan siswa kurang memahami materi yang diajarkan oleh guru dan berbasis praktikum, sehingga dibutuhkan solusi untuk dapat mengatasi permasalahan tersebut [2].

Di era digital saat ini, teknologi informasi dan komunikasi berkembang pesat dan terus beradaptasi. Perkembangan teknologi ini mendorong pendidik untuk memanfaatkannya ketika proses pembelajaran [3]. Salah satu teknologi yang digunakan saat ini oleh masyarakat terutama siswa adalah *smartphone* atau ponsel pintar [4]. Saat ini tingkat penggunaan *smartphone* di kalangan pelajar sangat tinggi, hingga mencapai 90%. Ada beberapa faktor yang mendorong tingginya penggunaan *smartphone* dikalangan peserta didik yang diantaranya faktor pribadi, psikologis, hingga faktor sosial [5]. Dari penelitian sebelumnya, penggunaan teknologi dalam pembelajaran dapat meningkatkan motivasi belajar siswa [6]. Tingginya penggunaan *smartphone* ini menjadi peluang yang baik dalam mengembangkan praktikum berbasis android dalam proses pembelajaran.

Smartphone saat ini memiliki sensor yang canggih dan berbagai fitur lainnya dengan harga yang ekonomis dan efektif, hal ini dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran serta eksperimen di laboratorium [7]. Penggunaan *smartphone* sebagai alat ukur dalam eksperimen dapat meningkatkan pengalaman belajar siswa, hal ini dikarenakan siswa tidak perlu menggunakan suatu alat secara bergantian

akibat kurang memadainya fasilitas laboratorium [8].

Salah satu aplikasi yang dapat digunakan untuk memanfaatkan berbagai sensor pada *smartphone* adalah *Phyphox*, aplikasi ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam pengukuran secara eksperimen [9]. Untuk melakukan sinkronisasi antara *smartphone* dengan laptop, dapat menggunakan *remote access* yang menjadi fitur kendali jarak jauh yang terdapat pada *Phyphox* untuk memudahkan pengguna dalam proses pengambilan dan analisis data hasil eksperimen [9]. Penggunaan dan kelayakan aplikasi *Phyphox* dalam melakukan beberapa eksperimen untuk materi fisika telah teruji berdasarkan beberapa indikator [10], hal ini menunjukkan bahwa penggunaan aplikasi *Phyphox* yang memanfaatkan sensor yang terdapat pada *smartphone* dapat mengurangi tingkat kesalahan dalam pengukuran. Fokus penelitian ini memanfaatkan sensor suara, sensor ini dapat digunakan dalam berbagai eksperimen fisika, salah satunya fenomena efek doppler.

Pengembangan konsep efek doppler untuk pembelajaran sangat diperlukan, hal ini dikarenakan keterbatasan fasilitas eksperimen di sekolah. Fenomena efek doppler dipengaruhi oleh bagaimana kecepatan sumber yang bergerak relatif terhadap pendengar, cepat rambat bunyi diudara, kecepatan pendengar relatif terhadap sumber, serta frekuensi sumber bunyi [11]. Penjelasan terkait fenomena ini dapat dilakukan melalui eksperimen, salahsatu eksperimen yang telah dikembangkannya sebelumnya menunjukkan bahwa fenomena efek doppler secara sederhana dapat dilakukan dan menunjukkan hasil uji yang sesuai dengan nilai standar deviasi dan *error* di bawah 5% [12].

Warner memberikan pernyataan bahwa untuk mendukung pembelajaran, siswa perlu menggunakan pendekatan eksperimen yang digunakan sebagai alat dalam memecahkan

masalah [13]. Pengembangan eksperimen efek doppler menggunakan *smartphone* ini dilakukan agar dapat menguji apakah aplikasi *Phphox* dapat digunakan dalam mengukur frekuensi yang teramati oleh pendengar dengan alat eksperimen yang sederhana.

BAHAN DAN METODE

Pada penelitian ini kami menggunakan pendekatan eksperimen untuk mendapatkan data terkait efek doppler dengan menggunakan sensor suara pada *smartphone* yang didukung oleh aplikasi *Phyphox*. Metode ini terdiri dari beberapa tahapan utama yang diantaranya sebagai berikut:

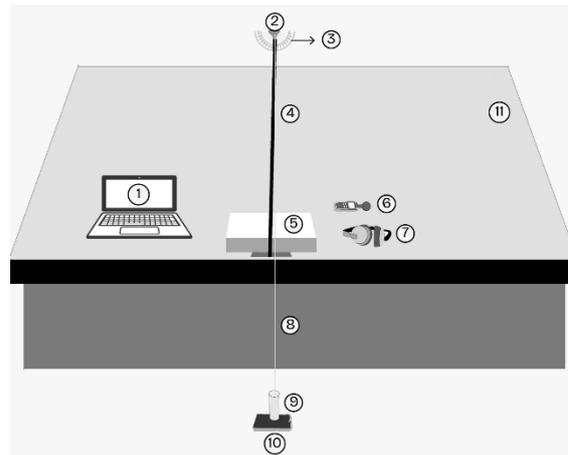
1) Desain Eksperimen

Eksperimen ini didesain dengan menggunakan statif dimana sumber bunyi diikatkan dengan menggunakan tali sehingga dapat disimpangkan dengan sudut tertentu, kemudian sensor suara disimpan di bagian bawah untuk mendeteksi perubahan frekuensi suara di titik tersebut. Adapun set alat eksperimen ini sesuai dengan **Gambar 1**.



Gambar 1. Set Alat Eksperimen

Dalam melakukan eksperimen ini, terdapat beberapa komponen penyusun yang didesain untuk melakukan pengambilan data, diantaranya terdapat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Komponen Penyusun Eksperimen

Adapun keterangan untuk setiap komponen diantaranya:

- 1) Laptop
- 2) Klem statif
- 3) Busur derajat
- 4) Statif
- 5) Pemberat statif
- 6) *Sound meter*
- 7) Alat pelindung telinga (*Earplug*)
- 8) Tali
- 9) DIY sumber bunyi
- 10) *Smartphone*
- 11) Meja eksperimen

Pada eksperimen ini ketika sumber bunyi bergerak, sensor suara akan mendeteksi adanya perubahan frekuensi sumber, hal ini dikarenakan sumber bunyi bergerak dengan kecepatan tertentu yang membuat adanya perubahan frekuensi suara yang didengar oleh pendengar, hal ini merupakan salah satu fenomena efek doppler dimana “Ketika sumber suara bergerak menuju pengamat, nada yang didengar pengamat lebih tinggi daripada saat sumber tersebut diam; dan ketika sumber bergerak menjauh dari pengamat, nadanya lebih rendah” (Giancoli, 2014). Secara matematis, perubahan frekuensi suara yang didengar oleh pendengar mengikuti persamaan berikut:

$$f_p = \frac{v \pm v_p}{v \pm v_s} f_s \tag{1}$$

Pada **Persamaan 1** menunjukkan bahwa frekuensi yang didengar oleh pendengar (f_p) bergantung pada kecepatan sumber suara (v_s), kemudian kecepatan pendengar (v_p), dan kecepatan rambat suara di medium (v). Dikarenakan pada eksperimen ini pendengar tidak bergerak, maka persamaan (1) dapat menjadi :

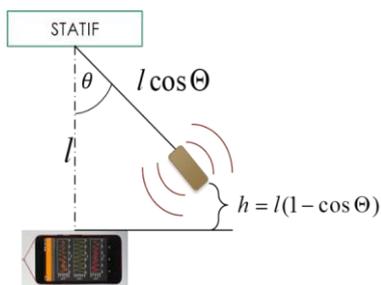
$$f_p = \frac{v}{v \pm v_s} f_s \quad (2)$$

Sumber bunyi yang digunakan, merupakan sebuah alat DIY yang memiliki bunyi dengan frekuensi yang tetap dengan intensitas yang tinggi. Pada eksperimen ini kami menggunakan sumber bunyi dengan frekuensi 2520 Hz. Adapun alat sumber bunyi yang dibuat seperti pada **Gambar 3**.



Gambar 3. DIY sumber bunyi

Ketika sumber bunyi disimpangkan dengan sudut tertentu, maka sumber bunyi akan berayun yang mengakibatkan kecepatan gerak sumber bunyi yang berbeda-beda. Hal ini dapat kita tinjau dengan tinjauan energi. Pemodelan lebih lanjut terkait sistem pada eksperimen ini dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Model eksperimen efek doppler

Variabel θ akan mempengaruhi kecepatan dari sumber bunyi, setelah sumber bunyi disimpangkan dengan sudut tertentu, sumber bunyi dilepaskan sehingga energi kinetik sistem awal bernilai nol sedangkan energi potensial sistemnya maksimum. Ketika di titik tertentu, sistem ini akan memiliki nilai energi kinetik maksimum, sedangkan energi potensial sistem akan bernilai nol. Hubungan antara kecepatan dengan θ dapat kita rumuskan dari persamaan hukum kekekalan energi, dimana:

$$\begin{aligned} EM_{initial} &= EM_{final} \\ T_{initial} + V_{initial} &= T_{final} + V_{final} \\ \frac{1}{2}mv_i^2 + mgh_i &= \frac{1}{2}mv_f^2 + mgh_f \\ 0 + mgh_i &= \frac{1}{2}mv_f^2 + 0 \\ \frac{1}{2}v_f^2 &= gh_i \\ v_f &= \sqrt{2gh_i} = \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)} \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan 3 menyatakan hubungan antara kecepatan akhir suatu benda yang bergerak dengan ketinggian awal tertentu (h_i) dan kemiringan sudut (θ). Dengan menganalisis hubungan antara kecepatan, sudut, dan efek doppler dalam sistem, kita dapat merancang eksperimen yang tepat untuk mempelajari fenomena ini. Ketika kita substitusikan **Persamaan 3** ke **Persamaan 2**. Maka didapat bahwa

$$f_p = \frac{v}{v \pm \sqrt{2gl(1 - \cos \theta)}} \quad (4)$$

Persamaan 4 memberikan hubungan antara frekuensi pendengar dengan sudut simpangan yang akan digunakan dalam eksperimen ini. Dengan menggunakan aplikasi *Phyphox* kita dapat mengukur frekuensi yang teramati untuk setiap detiknya.

Dalam pembelajaran fisika pemahaman efek doppler melalui eksperimen langsung dapat membantu peserta didik dalam

menghubungkan teori dengan fenomena yang terjadi. Dengan menggunakan aplikasi berbasis *smartphone* seperti *Phyphox*, siswa dapat melakukan analisis perubahan frekuensi secara *real-time* dan menginterpretasikan hasilnya.

2) Pengambilan Data (Data Collection)

Dalam pengambilan data menggunakan aplikasi yang mengintegrasikan penggunaan sensor suara *smartphone*, hal ini bertujuan untuk mendapatkan nilai frekuensi yang teramati oleh pendengar dari objek sumber bunyi. Salah satu aplikasi yang dapat digunakan adalah *Phyphox*, adapun data yang teramati dapat terlihat pada **Gambar 5** berikut:

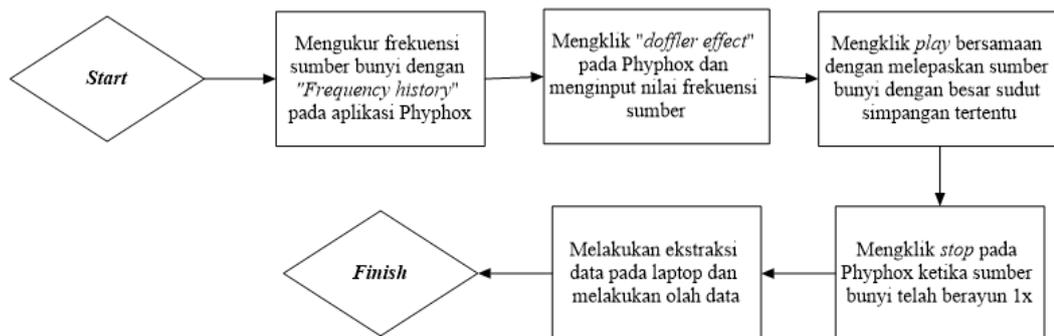


Gambar 5. Hasil perekaman data yang di dapat oleh aplikasi *Phyphox*

Skema pengambilan data pada eksperimen ini dimulai dengan melakukan set alat seperti pada **Gambar 4**. Kemudian pada aplikasi *Phyphox* klik bagian “*Doppler Effect*” untuk menggunakan sensor suara pada *smartphone*. Kemudian aktifkan *remote acces* untuk menghubungkan *smartphone* dengan laptop agar data yang terambil oleh *Phyphox* dapat diekspor dan dilakukan analisis data dengan menggunakan software di laptop, kemudian sumber bunyi mulai disimpangkan sebesar $40^\circ - 60^\circ$. Sudut simpangan menjadi variabel yang divariasikan, variasi ini bertujuan untuk mengamati bagaimana efek simpangan dengan sudut berbeda mempengaruhi frekuensi pendengar. Pengambilan data dilakukan dengan mengklik tombol *play* pada aplikasi *Phyphox* di laptop, kemudian sumber bunyi dilepaskan sehingga pada sistem tidak terdapat gaya dorong dan hanya dipengaruhi oleh percepatan gravitasi.

3) Ekstraksi Data (Data Extraction)

Perekaman data dilakukan ketika sumber bunyi dilepaskan dan berayun, tombol *stop* diklik ketika sumber bunyi telah menempuh satu ayunan penuh, dan data diekspor ke laptop untuk dianalisis. Ekstraksi data ke *microsoft excel* dapat dilakukan dengan cara mengklik tombol titik tiga yang berada di pojok kanan atas layar. **Gambar 6** menggambarkan skema pengambilan data secara keseluruhan.



Gambar 6. Pengambilan data eksperimen dengan menggunakan *Phyphox*

Tahap terakhir dari penelitian ini adalah membandingkan nilai frekuensi yang teramati sensor dengan hasil perhitungan. Secara matematis, perhitungan nilai *error* dapat menggunakan **Persamaan 5**. Nilai persentase kesalahan pengukuran pada **Persamaan 5** digunakan untuk mengetahui akurasi alat eksperimen.

$$\text{Percentage prediction error} = \frac{\text{Predicted value} - \text{measured value}}{\text{Measured Value}} \times 100\% \quad (5)$$

Persamaan ini menunjukkan cara standar untuk mengukur seberapa besar penyimpangan dari yang diharapkan. Persamaan ini penting dalam bidang fisika, karena ketepatan pengukuran sangat mempengaruhi hasil eksperimen.

sangat berguna dalam bidang ilmu pengetahuan dan Teknik [14].

HASIL DAN DISKUSI

Hasil eksperimen dilakukan dengan panjang tali 1,44 m dengan variasi sudut tertentu, setelah melakukan pengambilan data menggunakan *Phyphox*, data hasil eksperimen dilakukan pengolahan data dengan menggunakan software *microsoft excel*, kemudian melakukan ekstraksi data dengan mencari nilai frekuensi maksimum yang didapat dari hasil eksperimen, nilai frekuensi maksimum ini menunjukkan keadaan ketika sumber bunyi berada pada titik terdekat dengan detektor suara (*Handphone*). Data yang telah didapatkan kemudian dibandingkan dengan menggunakan **Persamaan 5**. Tabel hasil pengolahan data ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengolahan data eksperimen

θ	Frekuensi Maksimum (Hz)		Persentase Kesalahan (%)
	Teramati Handphone	Berdasarkan Teori	
40	2115,16	2035,39	3,92
45	2115,92	2037,24	3,86
50	2118,45	2039,05	3,89
55	2117,46	2040,83	3,75
60	2117,97	2042,58	3,69

Dari data tabel 1, dapat disimpulkan bahwa, frekuensi maksimum yang teramati menggunakan handphone dan yang dihitung secara teori menunjukkan nilai yang cukup dekat untuk setiap sudut. Persentase kesalahan berkisar antara 3,69% hingga 3,92%, persentase ini menunjukkan bahwa pengukuran pada sudut yang lebih besar memberikan hasil yang sedikit lebih akurat dibandingkan dengan pengukuran pada sudut yang kecil.

Dari hasil eksperimen yang dilakukan, ditemukan bahwa persentase kesalahan yang terjadi disebabkan oleh beberapa faktor. Salah satu faktor utama adalah kondisi suara di dalam ruangan yang belum sepenuhnya

tenang (gangguan suara di sekitar tempat eksperimen), hal ini mengakibatkan adanya gangguan atau *noise* selama proses pengukuran. Faktor ini dapat memengaruhi akurasi data yang diperoleh sehingga dalam pengambilan data perlu menggunakan ruangan yang senyap dan tidak bergema, untuk mengurangi faktor *noise* penggunaan bahan peredam suara di sekitar tempat eksperimen dapat digunakan. Selain itu, kualitas sensor suara yang baik pada *handphone* dapat digunakan, hal ini berperan agar dapat menurunkan tingkat kesalahan. Sensitivitas dan kemampuan sensor dalam mendeteksi frekuensi suara dapat bervariasi tergantung pada jenis dan

spesifikasi perangkat yang digunakan. Oleh karena itu, untuk meningkatkan keakuratan hasil eksperimen perlu dilakukan pengurangan *noise* di lingkungan pengukuran serta mempertimbangkan penggunaan perangkat dengan sensor suara yang lebih baik..

Dalam menentukan sudut simpangan optimal antara sumber bunyi dan *smartphone*, disarankan untuk terlebih dahulu memeriksa kualitas sensor suara *smartphone* yang digunakan, hal ini dapat digunakan dengan melakukan pengambilan data yang berulang-ulang agar peneliti dapat menganalisis *smartphone* yang memiliki sensor suara yang lebih baik. Saran lebih lanjut untuk percobaan ini, sudut simpangan yang digunakan jangan terlalu kecil, hal ini agar *smartphone* dapat mendeteksi frekuensi yang lebih baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan efek doppler yang sebelumnya dilakukan dengan bantuan *Phyphox*, nilai frekuensi pendengar maksimum untuk setiap sudut mendapatkan nilai berkisar dari 2115,16 Hz hingga 2117,97 Hz. Dibandingkan dengan nilai teoritis, persentase kesalahan sekitar 3,69% - 3,91%, persentase ini menunjukkan bahwa percobaan tersebut cukup akurat dan fenomena efek doppler dapat teramati. Untuk mengoptimalkan hasil agar lebih akurat, pertimbangan yang perlu dilakukan meliputi pemilihan *smartphone* dengan sensor suara yang baik, suara di dalam ruangan eksperimen harus hening dan tidak terdistraksi dari luar, serta ruangan yang digunakan bukan ruangan yang bergema, hal ini ditujukan agar pengukuran yang dilakukan lebih akurat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima Kasih penulis ucapkan kepada laboratorium Fisika Dasar FPMIPA UPI yang telah memberi kesempatan untuk dapat

melakukan pengambilan data di laboratorium tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. B. Langgan, D. A. Tulandi, and T. Mandang, "Efektivitas Laboratorium Virtual Sebagai Media Pembelajaran Pada Eksperimen Viskositas," *Jurnal Pendidikan Fisika Charm Sains*, vol. 2, no. 2, pp. 88–93, 2021.
- [2] M. M. K. Albis, B. Adilah, and S. Ni'mah, "Pengenalan PhET Simulations Sebagai Laboratorium Virtual Untuk Membantu Pemahaman Konsep Fisika Materi Keseimbangan Pada Peserta Didik Kelas 8 SMP 06 Diponegoro," *Jurnal Pendidikan, Sains, dan Teknologi*, vol. 02, no. 4, pp. 1054–1059, 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.minartis.com/index.php/jpst/>
- [3] R. Filiyani, K. Rizky Hidayatuloh, I. Khoeriyah, M. N. Hasanah, and I. R. Mahmudah, "Persepsi Mahasiswa Pendidikan Fisika Terhadap Virtual Laboratory Berbantuan PhET Pada Konsep Fisika," *Frekuensi*, vol. 1, no. 1, 2024.
- [4] A. I. Sari, N. Suryani, D. Rochsantiningasih, and S. Suharno, "Digital learning, Smartphone Usage, and Digital Culture in Indonesia Education," *Integration of Education*, vol. 24, no. 1, pp. 20–31, 2020, doi: 10.15507/1991-9468.098.024.202001.020-031.
- [5] N. Inayati Saiful, "Teknologi dan Perilaku Sosial Pelajar (Studi Tentang Dampak Penggunaan Smartphone di SMA Negeri 3 Makassar)," *Gema Kampus*, vol. XI, Apr. 2016.

- [6] M. Z. M. Sabron, R. Hashim, A. Abdullah, and N. Shamsudin, "Humanizing Technology: Smartphone Usage in the Learning Environment," Mar. 2020. doi: 10.21834/e-bpj.v5i13.1958.
- [7] S. Barro, C. Beguin, D. Brouzet, L. Charosky, L. Darmendrail, and A. Muller, "Smartphone Experiments in Physics Undergraduate Research," *Cornell University*, 2023.
- [8] T. K. Leong, L. K. Wee, F. J. García_Clemente, and F. Esquembre, "Promoting the Joy of Learning by Turning a Smartphone into Scientific Equipment," *J Phys Conf Ser*, vol. 1929, no. 1, p. 012039, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1929/1/012039.
- [9] Y. Widiastuti and F. D. E. Latief, "Analisis Eksperimen Penentuan Konstanta Pegas Menggunakan Metode Statis, Dinamis, Aplikasi PHYPHOX dalam Pembelajaran Fisika," in *PISA melalui Sains Masa Depan Untuk Generasi Berwawasan Lingkungan*, Proceeding Seminar Nasional IPA XII, 2022.
- [10] Harjono, "Pemanfaatan Sensor Android Sebagai Media Eksperimen Pada Materi Gerak Harmonis Sederhana," *Jurnal TEKNODIK*, vol. 25, no. 2, p. 131, 2021.
- [11] D. C. . Giancoli, *Physics: Principles with Applications*. Pearson Prentice Hall, 2014.
- [12] A. Malik, W. L. Mugiri, R. Zakwandi, S. Safitri, and T. Juliani, "Simple Experiment of Doppler Effect Using Smartphone Microfon Sensor," *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, vol. 10, no. 1, p. 1, May 2020, doi: 10.26740/jpfa.v10n1.p1-10.
- [13] C. K. Warner, C. V Bell, and A. L. Odom, "Defining Technology for Learning: Cognitive and Physical Tools of Inquiry," *Middle Grades Review*, vol. 4, Apr. 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/324413950>
- [14] A. M. Ph. D. Helmenstine, "How to Calculate Percent Error.," [thoughtco.com/how-to-calculate-percent-error-609584](https://www.thoughtco.com/how-to-calculate-percent-error-609584). Accessed: Nov. 18, 2024. [Online]. Available: [thoughtco.com/how-to-calculate-percent-error-609584](https://www.thoughtco.com/how-to-calculate-percent-error-609584)
- [15] R. Carroll and J. Lincoln, "Phyphox app in the physics classroom," *Phys Teach*, vol. 58, no. 8, pp. 606–607, Nov. 2020, doi: 10.1119/10.0002393