

Pengembangan Perangkat Eksperimen Gerak Harmonik Sederhana untuk Pengamatan Trends dan Pemahaman Konseptual

Lanang Maulana Aminullah¹

^{1,2}Pendidikan Fisika, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia
Email: ¹lanang.maulana.aminullah@fkip.untan.ac.id

Received: 28 Februari 2026

Revised: 7 Juni 2026

Accepted: 21 Juli 2026

Abstract

Apparatus capable of recording time-dependent data in experiments is essential for physics learning. In this study, we developed an experimental apparatus for Simple Harmonic Motion (SHM) on a spring to record time-dependent displacement. The development was carried out by integrating an HC-SR04 ultrasonic sensor into the basic design of the SHM experiment. The study shows that, from a visual observation perspective, instead of exhibiting simple harmonic motion represented by the waveform $y=A\cos(\omega t)$, the oscillator displayed damped harmonic motion characterized by a gradually shifting phase, following the waveform equation $y=A\cos(\omega t+\phi(t))$. Focusing on the technical validation of the apparatus, both visual representation and deviation analysis indicated that the developed experimental apparatus showed good agreement with the theoretical trend, with a Mean Absolute Error (MAE) of 0.9329. The apparatus demonstrated the capability to record meaningful qualitative trend data of simple harmonic motion to support analytical learning processes.

Keywords: Simple Harmonic Motion, Experimental Apparatus, Ultrasonic Sensor

Abstrak

Perangkat yang dapat merekam data bergantung waktu dalam eksperimen merupakan hal esensial bagi pembelajaran fisika. Dalam studi ini, kami telah mengembangkan sebuah perangkat eksperimen Gerak Harmonik Sederhana (GHS) pada pegas untuk merekam perpindahan yang bergantung pada waktu. Pengembangan dilakukan dengan menambahkan sensor ultrasonik HC-SR04 pada desain dasar eksperimen GHS. Dalam studi ini ditunjukkan bahwa, pada aspek pengamatan visual, alih-alih menampilkan gerak harmonik sebagaimana direpresentasikan oleh gelombang $y=A\cos(\omega t)$, osilator justru menunjukkan gerak harmonik teredam yang ditandai dengan pergeseran fase yang berubah secara bertahap, mengikuti persamaan gelombang $y=A\cos(\omega t+\phi(t))$. Dengan berfokus pada validasi teknis perangkat, aspek representasi visual dan analisis deviasi menunjukkan bahwa perangkat eksperimen yang dikembangkan ini menunjukkan kesesuaian yang baik dengan trend teoretis, dengan Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,9329. Perangkat eksperimen ini menunjukkan kemampuan untuk merekam trend data kualitatif gerak harmonik sederhana yang bermakna guna mendukung proses pembelajaran analitis.

Kata-kata kunci: Gerak Harmonik Sederhana, Perangkat Eksperimen, Sensor Ultrasonik

PENDAHULUAN

Penerapan pembelajaran fisika berbasis penelitian dapat secara efektif meningkatkan keterampilan ilmiah dan hasil belajar siswa melalui pengerjaan masalah bermakna yang

relevan serta partisipasi dalam praktik ilmiah yang menyerupai pekerjaan nyata para ilmuwan (Schneider et al., 2022; Estuhono et al., 2019; Rodriguez et al., 2020; Decaro et al., 2023; Thacker, 2023; Alvarez et al., 2025). Model pembelajaran berbasis penelitian memberikan kesempatan kepada siswa untuk mencari informasi, merumuskan hipotesis, mengumpulkan data, menganalisis data, dan menarik kesimpulan dari data yang telah diperoleh (Estuhono et al., 2019; Rodriguez et al., 2020; Mahardika et al., 2023; Cai et al., 2021). Kesempatan tersebut dapat dilaksanakan melalui kegiatan praktikum berbasis inkuiri. Melalui kegiatan penelitian sederhana dalam bentuk eksperimen pendidikan, diharapkan keterampilan 4C siswa (komunikasi, kolaborasi, berpikir kritis dan pemecahan masalah, kreativitas dan inovasi) dapat meningkat (Estuhono et al., 2019; Pranata et al., 2024; Saputra et al., 2023; Walsh et al., 2022; Wulandari et al., 2024).

Kegiatan laboratorium fisika membantu siswa membangun keterkaitan antara teori sehingga memberikan kejelasan pemahaman terhadap konsep yang dipelajari serta memahami perbedaan antara teori dan penerapannya (Malicoban et al., 2022; Thacker, 2023; Cai et al., 2021; Kharki et al., 2021). Perangkat eksperimen laboratorium dengan pendekatan pembelajaran yang tepat mampu membantu siswa memahami konsep fisika dan hubungan antar besaran fisika (Malicoban et al., 2022; Lehesvuori et al., 2023; Thacker, 2023; Cai et al., 2021; Kharki et al., 2021; Desniarsyah et al., 2019; Rodriguez et al., 2020; Decaro et al., 2023). Sebagian besar desain eksperimen gerak harmonik sederhana yang tersedia belum mengintegrasikan fitur data yang bergantung pada waktu. Desain eksperimen gerak harmonik sederhana yang ada cenderung lebih berfokus pada analisis osilasi secara keseluruhan melalui penyelidikan periode dan frekuensi osilasi. Lebih lanjut, desain eksperimen yang tersedia masih kekurangan fitur yang memadai untuk investigasi gerak harmonik sederhana secara mendalam. Oleh karena itu, keberadaan perangkat eksperimen yang mampu merekam data bergantung waktu dapat memberikan peluang analisis yang lebih luas. Perangkat tersebut juga diharapkan mampu menyediakan data waktu-nyata untuk analisis segmental osilasi dalam interval waktu tertentu. Kedalaman analisis yang dapat dilakukan terhadap data akan memberikan pemahaman yang lebih rinci mengenai karakteristik osilasi.

Pengembangan perangkat eksperimen merupakan upaya inovasi yang bertujuan menghasilkan sistem dengan fitur yang sebelumnya belum dapat dicapai pada versi terdahulu. Dalam pendidikan fisika, upaya pengembangan diarahkan pada pembuatan perangkat fungsional yang diharapkan membantu peserta didik memahami prinsip-prinsip fisika melalui keterlibatan langsung dalam eksperimen (Bresnahan et al., 2023; Cano-Lozano et al., 2024; Çoban & Erol, 2022; Buachoom et al., 2019). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan perangkat eksperimen yang tidak hanya memfasilitasi peningkatan keterampilan ilmiah melalui aktivitas penelitian sederhana, tetapi juga memiliki kemampuan menghasilkan data yang bermakna dan mudah diinterpretasikan untuk mendukung pengalaman belajar yang analitis.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan perangkat eksperimen gerak harmonik sederhana pada pegas untuk merekam data perpindahan osilator yang bergantung pada waktu. Pengembangan dilakukan dengan menambahkan sensor ultrasonik HC-SR04 pada desain dasar eksperimen gerak harmonik sederhana (Çoban & Erol, 2022; Buachoom et al., 2019; Cano-Lozano et al., 2024). Perangkat yang dikembangkan difokuskan pada desain dan validasi teknis perangkat agar mampu menyediakan data bergantung waktu sekaligus meningkatkan potensi analisis gerak harmonik secara komprehensif.

METODE PENELITIAN

Desain Peralatan Eksperimen

Perangkat eksperimen dikembangkan untuk mendukung proses pembelajaran yang analitis. Penelitian pengembangan ini dilakukan dengan menambahkan sensor ultrasonik HC-SR04 pada desain eksperimen gerak harmonik sederhana pada pegas. Sensor tersebut digunakan untuk mengukur perpindahan objek yang berosilasi (osilator) terhadap permukaan lantai. Posisi objek (<

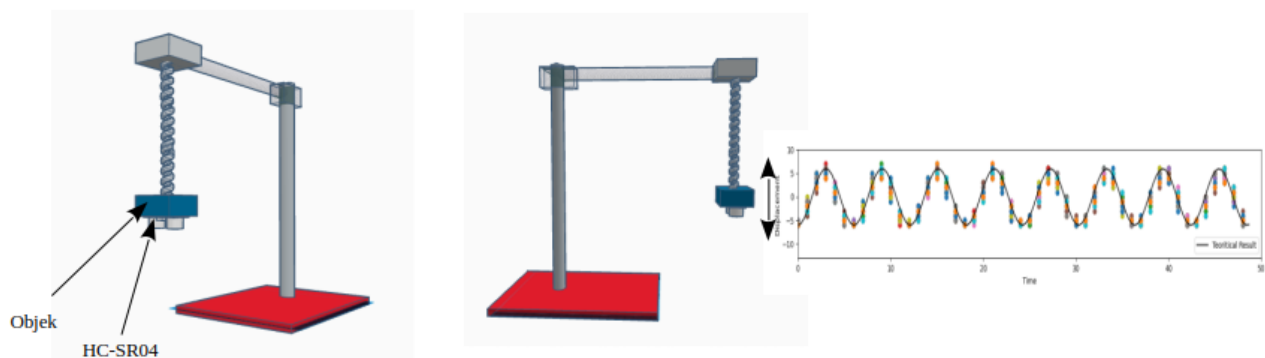
ultrasonik saat merambat dari sensor (bagian pemancar signal) yang ditempatkan pada objek menuju lantai dan dipantulkan kembali ke sensor (bagian penerima signal). Dalam selang waktu (t dalam ms), kecepatan gelombang bunyi di udara (v) mendekati nilai sebesar 340 m/s. Lebih lanjut, posisi objek h terhadap referensi (lantai) dihitung menggunakan Persamaan (1):

$$h = \frac{t \times v}{2} \quad (1)$$

Dengan menentukan posisi awal osilator sebelum berosilasi (h_0) sebagai posisi keadaan setimbang, maka perpindahan osilator (y) terhadap titik setimbang diberikan oleh Persamaan (2).

$$y = h - h_0 \quad (2)$$

Massa osilator yang digunakan sebesar 242 gram dan konstanta pegas sebesar 84,7 N/m. Osilator dibuat berosilasi dengan memberikan gaya ke bawah sehingga membentuk simpangan sebesar ~6 cm. Data dalam penelitian ini berjumlah 100 data osilasi, dengan setiap osilasi terdiri dari 49 data simpangan sebagai fungsi waktu. Desain peralatan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1: Desain Perangkat Eksperimen

Untuk mengevaluasi sejauh mana perangkat yang dikembangkan telah terdefinisi dengan baik, serangkaian prosedur karakterisasi kinerja dilakukan. Analisis yang dilakukan meliputi visualisasi, analisis deviasi, dan analisis residual.

Visualisasi

Data visual disajikan dalam bentuk grafik simpangan terhadap waktu untuk menggambarkan *trend* keseluruhan dan karakteristik perilaku osilasi. Selain itu, pengamatan kualitatif dilakukan untuk membandingkan *trend* data eksperimen dengan prediksi teoretis berdasarkan persamaan (3).

$$y = A \cos \left(\sqrt{\frac{k}{m}} t + \phi \right) \quad (3)$$

Analisis Deviasi

Analisis deviasi dilakukan untuk menilai secara numerik tingkat kesesuaian antara hasil eksperimen dan prediksi teoretis. Analisis ini melibatkan perhitungan; (a) *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Squared Error* (RMSE) untuk menilai deviasi data eksperimen terhadap model teoretis; (b) Analisis koefisien determinasi (R^2) untuk menilai proporsi variansi data eksperimen yang dapat dijelaskan oleh model teoretis; (c) Analisis koefisien korelasi Pearson (R) untuk menentukan kekuatan korelasi antara data eksperimen dan prediksi teoretis.

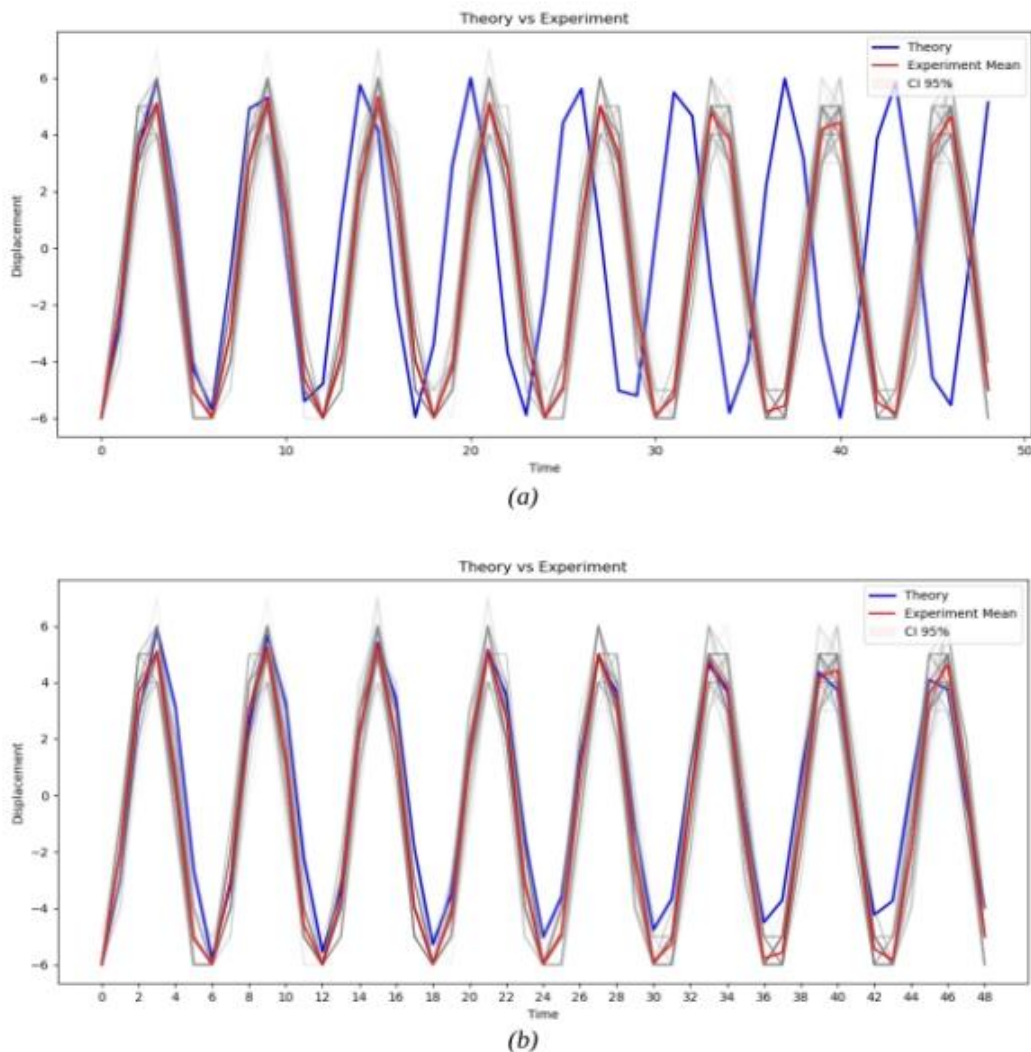
Analisis Residual

terhadap model teoretis. Analisis dilakukan dengan menghitung kurtosis data residual guna mengkarakterisasi perilaku distribusi pada setiap titik waktu. Untuk mendukung rekomendasi berbasis kurtosis dan mengkaji karakteristik residual secara lebih rinci, disajikan *heatmap* intensitas residual untuk pada masing-masing titik waktu yang bersesuaian. Selain itu, grafik *Quantile–Quantile* (Q–Q plot) dari rata-rata residual terhadap nilai teoretis ditampilkan untuk memberikan gambaran umum mengenai distribusi data residual.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Visualisasi

Representasi teoretis gerak harmonik sederhana pada sistem pegas, dengan massa (m), konstanta pegas (k), amplitudo (A), dan konstanta fase (ϕ), dapat dinyatakan sebagai fungsi kosinus sebagaimana diberikan pada Persamaan (3). Kami melaporkan perbandingan grafik sinusoidal perpindahan terhadap waktu yang diperoleh dari data eksperimen dan data teoretis dengan konstanta fase ditetapkan nol ($\phi=0$), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2(a). Hasil menunjukkan bahwa pada osilasi awal, data eksperimen memperlihatkan kecocokan yang baik dengan model teoretis. Namun, osilasi menunjukkan pergeseran fase secara bertahap sebagai fungsi waktu, yang pada akhirnya mencapai perbedaan fase sebesar π terhadap model teoretis.



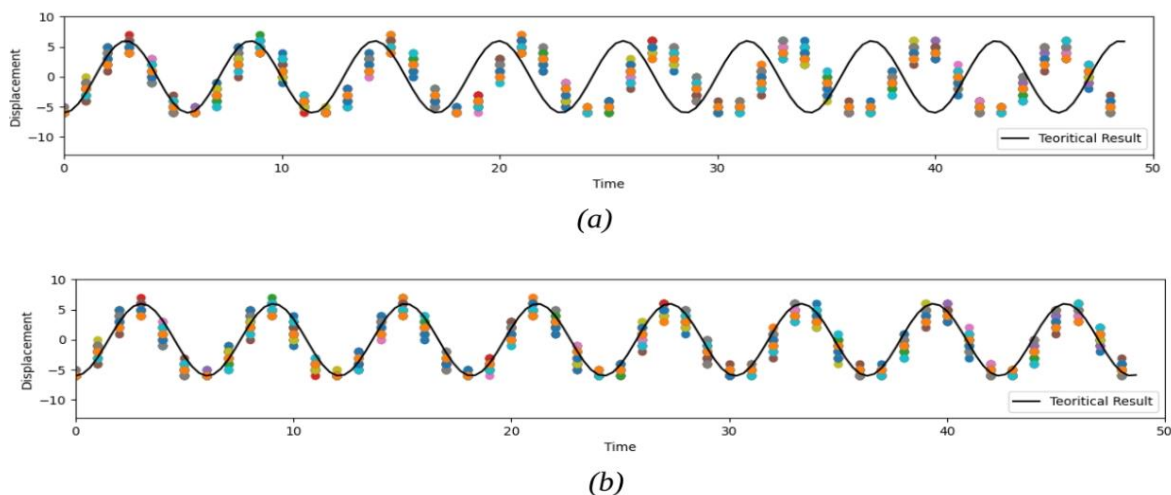
Gambar 2: Grafik Simpangan vs. Waktu; (a) Grafik dengan referensi teoritik mengikuti persamaan (3); (b) Grafik dengan referensi teoritik mengikuti persamaan (4)

Lebih lanjut, untuk merepresentasikan hasil eksperimen, model teoretis direvisi dengan mengganti konstanta fase menjadi fungsi yang bergantung pada waktu, sebagaimana diberikan pada Persamaan (4).

$$y = A \cos \left(\sqrt{\frac{k}{m}} t + \phi(t) \right) \quad (4)$$

Hasil menunjukkan adanya kecocokan yang baik antara data eksperimen dan model teoretis yang telah dimodifikasi, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2(b). Hasil ini menunjukkan bahwa osilasi memang mengalami pergeseran fase secara bertahap, bukan disebabkan oleh keterbatasan instrumen.

Selanjutnya peningkatan visualisasi dilakukan untuk memberikan representasi kualitatif perbandingan antara data osilasi yang diperoleh dari perangkat dan model teoretis. Oleh karena itu, dataset teoretis ditingkatkan dengan memperkecil kenaikan langkah waktu (sumbu x) sehingga menghasilkan data tiga kali lebih banyak. Proses ini menghasilkan grafik osilasi teoretis yang lebih halus, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3(a) dan 3(b) untuk model yang dinyatakan oleh Persamaan (3) dan (4) secara berurutan. Hasil ini mendukung validitas teknis perangkat eksperimen yang dikembangkan ini dalam konteks eksperimen kualitatif, khususnya untuk pengamatan *trend* gerak osilasi.

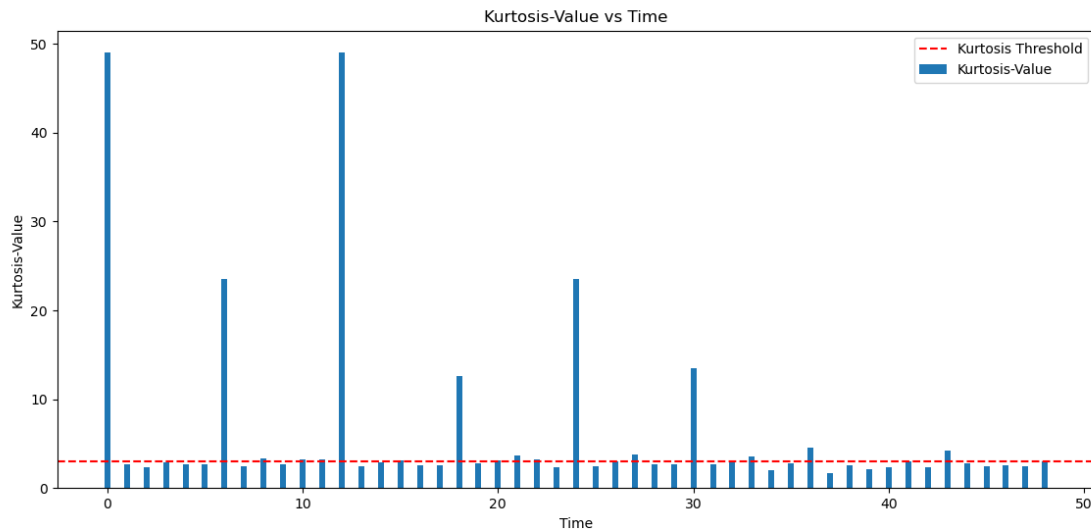


Gambar 3: Grafik Simpangan vs. Waktu dengan data teoritik yang diperhalus; (a) Grafik dengan referensi teoritik mengikuti persamaan (3); (b) Grafik dengan referensi teoritik mengikuti persamaan (4)

Analisis Deviasi

Analisis deviasi yang dilakukan dalam penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi secara kuantitatif tingkat kesesuaian *trend* antara data eksperimen dan model teoretis. Serangkaian analisis deviasi dilakukan dengan membandingkan data eksperimen terhadap model teoretis yang didefinisikan pada Persamaan (4). Hasil analisis menunjukkan bahwa *Mean Absolute Error* (MAE) sebesar 0,9234, yang menunjukkan adanya deviasi rata-rata sebesar 0,9234 satuan antara data eksperimen dan model teoretis. Mengingat perpindahan teoretis berada pada rentang -6 cm hingga 6 cm, nilai ini setara dengan deviasi sebesar 7,7%, yang dikategorikan sebagai tingkat kesalahan rendah. Analisis *Root Mean Squared Error* (RMSE) menghasilkan nilai 1,1727, yang setara dengan deviasi sebesar 9,8%, menunjukkan tingkat akurasi keseluruhan yang baik dengan adanya outlier ringan. Analisis koefisien determinasi (R^2) menghasilkan nilai sebesar 0,9001, yang menunjukkan bahwa 90,01% variansi dalam model teoretis dapat dijelaskan oleh data eksperimen. Hasil ini mencerminkan tingkat kecocokan yang sangat kuat, yang menunjukkan bahwa pengukuran eksperimen mengikuti perilaku teoretis yang diharapkan dan mampu menangkap hampir seluruh pola yang relevan. Analisis koefisien korelasi Pearson (R) menghasilkan nilai sebesar 0,9755, yang menunjukkan korelasi linear positif yang sangat kuat antara data eksperimen dan data teoretis. Hasil ini

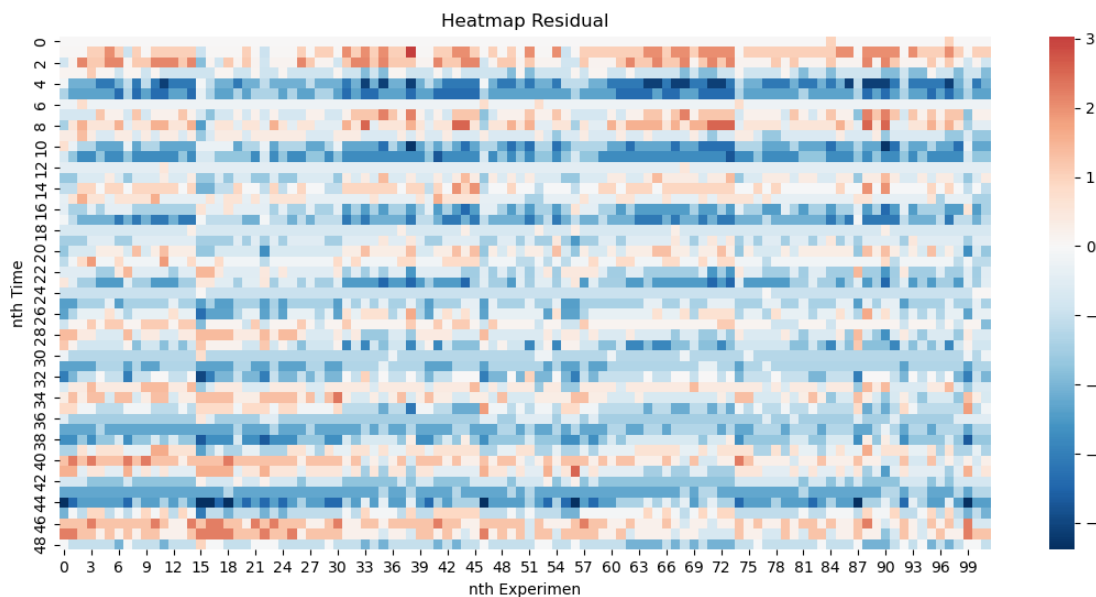
menunjukkan bahwa data eksperimen mengikuti arah, *trend*, dan proporsionalitas model teoretis dengan sangat baik.



Gambar 4: Kurtosis vs. Waktu

Analisis Residual

Analisis residual dilakukan untuk mengevaluasi presisi perangkat dalam merekam data eksperimen dibandingkan dengan nilai teoretis. Kurtosis diukur pada setiap titik waktu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Dalam penelitian ini, kurtosis digunakan untuk mengkarakterisasi bentuk distribusi residual pada setiap titik waktu. Semakin tinggi nilai kurtosis data residual menunjukkan bahwa sebagian besar residual terkonsentrasi rapat di sekitar nol, yang mengindikasikan kesesuaian lokal yang kuat antara data eksperimen dan data teoretis pada titik waktu tersebut. Sebaliknya, nilai kurtosis yang lebih rendah menunjukkan variabilitas data residual yang lebih besar. Penelitian ini menunjukkan bahwa hanya 6 dari 49 titik waktu (sekitar 8,1%) yang memiliki nilai kurtosis yang lebih tinggi dari ambang batas referensi (ambang batas referensi nilai kurtosis sebesar 3).

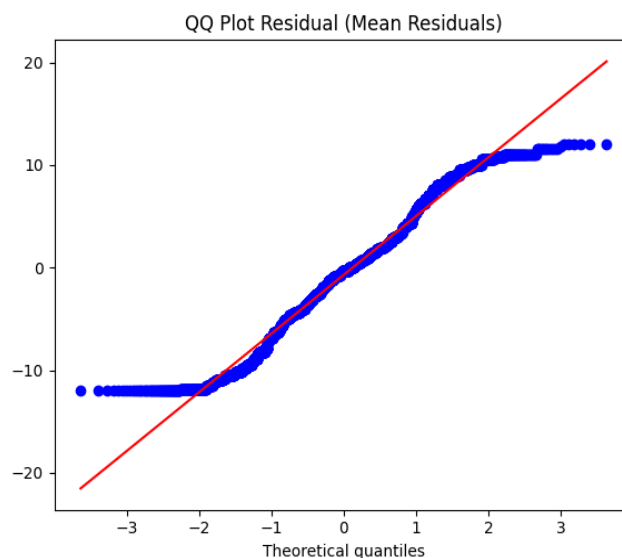


Gambar 5: Heatmap Residual

Untuk memberikan gambaran visual yang lebih komprehensif mengenai variasi pola data residual, disajikan *heatmap* data residual (Gambar 5). Heatmap menampilkan data residual

di mana kolom (sumbu-x) merepresentasikan nomor eksperimen, baris (sumbu-y) menunjukkan titik waktu data yang bersesuaian, dan warna merepresentasikan intensitas residual. Sepanjang sumbu vertikal, terlihat pola warna biru (*underestimation*) dan merah (*overestimation*) muncul secara bergantian. Hasil ini menunjukkan bahwa presisi terutama dipengaruhi oleh keadaan gerak objek ketika proses sensorik terjadi. Sementara itu, sepanjang sumbu horizontal, perubahan gradien intensitas terjadi pada sebagian besar titik waktu yang menunjukkan kurangnya presisi. Namun, pengamatan lebih rinci, ketidakpresisian tersebut tidak terlihat pada enam titik waktu tertentu, yaitu $t=0$, $t=6$, $t=12$, $t=18$, $t=24$, dan $t=30$. Hasil ini konsisten dengan analisis deviasi, di mana keenam titik waktu tersebut bersesuaian dengan nilai kurtosis yang jauh di atas ambang batas referensi. Selain itu, presisi perekaman data, yang sebelumnya diindikasikan dipengaruhi oleh keadaan gerak objek, lebih lanjut terkonfirmasi berkaitan dengan kecepatan sesaat objek dan posisinya terhadap titik acuan (lantai). Hal ini ditunjukkan oleh fakta bahwa enam titik waktu dengan nilai kurtosis tinggi berada di dekat amplitudo minimum, yang berkaitan dengan kecepatan minimum osilator serta jarak terpendek terhadap titik acuan, tanpa mengabaikan titik waktu $t=36$ dan $t=43$, yang nilai kurtosisnya sedikit berada di atas ambang batas.

Selanjutnya, Grafik Q–Q plot residual menunjukkan adanya penyimpangan sistematis dari garis referensi normal (Gambar 6). Titik-titik residual hanya mengikuti garis referensi pada kuantil tengah, namun memperlihatkan pola berbentuk S pada bagian ekor distribusi. Penyimpangan ini mengindikasikan bahwa distribusi residual tidak mengikuti distribusi normal secara ideal. Pada kuantil rendah dan tinggi, titik residual cenderung membentuk pola mendatar yang menunjukkan adanya pembatasan rentang nilai residual. Pola tersebut mengindikasikan bahwa kesalahan pengukuran tidak sepenuhnya bersifat acak, melainkan dipengaruhi oleh faktor sistematis. Kondisi ini memperkuat hasil analisis residual sebelumnya yang menunjukkan bahwa tingkat presisi perangkat masih terbatas. Penyimpangan distribusi residual kemungkinan besar berkaitan dengan keterbatasan respons sensor dalam merekam objek yang bergerak relatif terhadap sensor, terutama ketika osilator memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Dengan demikian, meskipun perangkat mampu merepresentasikan *trend* osilasi dengan baik, karakteristik distribusi residual menunjukkan bahwa presisi pengukuran masih dipengaruhi oleh kondisi gerak objek selama proses osilasi.



Gambar 6: Q-Q Plot Residual

SIMPULAN

Perangkat eksperimen gerak harmonik pada pegas yang dikembangkan dalam penelitian ini berhasil menghasilkan data simpangan sebagai fungsi waktu. Hasil menunjukkan bahwa, alih-

alih menampilkan gerak harmonik sederhana sebagaimana dinyatakan oleh persamaan $y = A\cos(\omega t)$, grafik gelombang justru memperlihatkan gerak harmonik dengan pergeseran fase yang berubah secara bertahap, sesuai dengan bentuk gelombang $y = A\cos(\omega t + \phi(t))$. Secara umum, perangkat ini menunjukkan kemampuan untuk merekam data kualitatif yang bermakna dan mudah direpresentasikan guna mendukung proses pembelajaran. trend data yang dihasilkan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan prediksi teoretis, baik secara visual maupun melalui penilaian numerik terhadap deviasi dari model teoretis. Namun demikian, analisis tingkat presisi data terhadap model teoretis berdasarkan residual menunjukkan tingkat presisi yang rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa kondisi tersebut disebabkan oleh keterbatasan kemampuan sensor dalam menangkap data secara akurat dari objek yang bergerak relatif terhadap sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- Alvarez, G., Greca, I., & Arriasecq, I. (2025). Problem-Based Learning as a Strategy for Teaching Physics in Technical–Professional Higher Education: A Case Study in Chile. *Education Sciences*. <https://doi.org/10.3390/educsci15080941>
- Bresnahan, P., Briggs, E., Davis, B., Rodriguez, A., Edwards, L., Peach, C., Renner, N., Helling, H., & Merrifield, M. (2023). A Low-Cost, DIY Ultrasonic Water Level Sensor for Education, Citizen Science, and Research. *Oceanography*. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2023.101>
- Buachoom, A., Thedsakhulwong, A., & Wuttiptom, S. (2019). An Arduino board with ultrasonic sensor investigation of simple harmonic motion. *Journal of Physics: Conference Series*, 1380. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012098>
- Cai, B., Mainhood, L., Groome, R., Lavery, C., & McLean, A. (2021). Student behavior in undergraduate physics laboratories: Designing experiments. *Physical Review Physics Education Research*. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.17.020109>
- Cano-Lozano, P., García, A., Mora-Merchan, J., García, S., Gallardo, A., & Guerrero, J. (2024). Ultrasonic Distance Measurement Equipment for Practical Laboratory Sessions. *2024 XVI Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAAE)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/taee59541.2024.10605009>
- Çoban, A., & Erol, M. (2022). STEM Education of Kinematics and Dynamics Using Arduino. *The Physics Teacher*. <https://doi.org/10.1119/10.0009994>
- Decaro, M., Isaacs, R., Bego, C., & Chastain, R. (2023). Bringing exploratory learning online: problem-solving before instruction improves remote undergraduate physics learning. *Frontiers in Education*. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1215975>
- Desniarsyah, F, B. H. Iswanto, and V. Serevina, "Developing practicum device using magnetic sensor for circular motion at Senior High School," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, May 2019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1185/1/012043>
- Estuhono, Festiyed, and A. Benti, "Preliminary research of developing a research-based

- Lehesvuori, S., Lehtinen, A., Hämäläinen, R., Maunuksela, J., & Koskinen, P. (2023). Student-centredness in physics laboratory teaching sessions. *Learning, Culture and Social Interaction*. <https://doi.org/10.1016/j.lcsi.2023.100773>
- Mahardika, K., Badarsila, A., Ernasari, E., Royani, M., Nurhidayat, R., & Handono, S. (2023). Peran Metode Ilmiah Dalam Mengembangkan Pendidikan Fisika. *Perspektif : Jurnal Pendidikan dan Ilmu Bahasa*. <https://doi.org/10.59059/perspektif.v1i4.723>
- Malicoban.E.V and E. J. Castro, "Development of a Physics Laboratory Activity Kit for the Do-It-Yourself (DIY) Physics Equipment and Laboratory Activity," *Int. J. STEM Educ. Sustain.*, vol. 2, no. 2, pp. 172–179, Jul. 2022, <https://doi.org/10.53889/ijses.v2i2.7>
- Pranata, O., Sundari, P., & Sulaiman, D. (2024). Exploring Project-Based Learning: Physics E-Posters in Pre-Service Science Education. *KONSTAN - JURNAL FISIKA DAN PENDIDIKAN FISIKA*. <https://doi.org/10.20414/konstan.v8i02.387>
- Rodriguez, L., Van Der Veen, J., Anjewierden, A., Van Den Berg, E., & De Jong, T. (2020). Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools. *Physics Education*, 55. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/abb346>
- Saputra, H., Firmansyah, J., & Ihsan, A. (2023). Inquiry Project Laboratory: The Collaborative Problem Solving and Critical Thinking on Laboratory. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i9.5038>
- Schneider, B *et al.*, "Improving Science Achievement—Is It Possible? Evaluating the Efficacy of a High School Chemistry and Physics Project-Based Learning Intervention," *Educ. Res.*, vol. 51, no. 2, pp. 109–121, Mar. 2022, <https://doi.org/10.3102/0013189X211067742>
- Thacker, B. (2023). Inquiry-based experimental physics: Twenty years of an evidence-based, laboratory-based physics course for algebra-based physics students. *Physical Review Physics Education Research*. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.19.020116>
- Walsh, C., Lewandowski, H., & Holmes, N. (2022). Skills-focused lab instruction improves critical thinking skills and experimentation views for all students. *Physical Review Physics Education Research*. <https://doi.org/10.1103/physrevphyseducres.18.010128>
- Wulandari, N. O., S., Doyan, A., & Rahayu, S. (2024). The Influence of Project Based Learning Model on Creative Thinking Skills and Physics Learning Outcomes. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i12.9738>