

Rancang Bangun Alat Peraga Efek Doppler Menggunakan Sensor GY-MAX4466 Berbasis Arduino Uno

Igreya Mitchell Kumendong¹, Marianus¹, Jeane Verra Tumangkeng¹, dan Ishak Pawarangan^{2*}

¹Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Negeri Manado, Jl. Kampus Unima, Tonsaru, Kec. Tondano Selatan, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara 95618

²Program Studi Fisika Universitas Negeri Manado, Jl. Kampus Unima, Tonsaru, Kec. Tondano Selatan, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara 95618

*E-mail: ishakpawarangan@unima.ac.id

Abstrak. Keterbatasan alat praktikum fisika di banyak sekolah di Indonesia, khususnya untuk materi efek Doppler, menyebabkan rendahnya tingkat pemahaman peserta didik terhadap konsep ini. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan alat praktikum efek Doppler menggunakan Arduino Uno dengan sensor GY-MAX4466 dan sensor FC-51. Metode penelitian yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan tahapan perencanaan/perancangan, pembuatan, dan pengujian alat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat mampu membaca frekuensi suara pada rentang 250–3500 Hz dengan akurasi mencapai 100% dengan koefisien determinasi sebesar 0,99, sedangkan pengukuran kecepatan benda menunjukkan akurasi antara 94,80% hingga 99,75% terhadap nilai teoritis. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap perancangan dan pengembangan alat praktikum digital dalam meningkatkan pemahaman konsep efek Doppler pada peserta didik.

Kata kunci: Efek Doppler, Alat Peraga, Arduino Uno

Abstract. The limitations of physics lab props in many schools in Indonesia, especially for the Doppler effect material, cause a low level of understanding of this concept among students. This research aims to design and develop a Doppler effect props using Arduino Uno with GY-MAX4466 sensor and FC-51 sensor. The research method used is Research and Development (R&D) with the stages of planning/designing, making, and testing tools. The test results show that the device is able to read the sound frequency in the range of 250-3500 Hz with an accuracy of 100% with a coefficient of determination of 0.99, while the measurement of object speed shows an accuracy between 94.80% to 99.75% of the theoretical value. This research contributes to the design and development of digital practicum tools in improving the understanding of the concept of the Doppler effect in students.

Keywords: Doppler Effect, Props, Arduino Uno

1. Pendahuluan

Fisika adalah ilmu yang mempelajari tentang sifat, gejala, dan dampak berbagai fenomena di alam beserta dengan akibatnya, baik fenomena yang bersifat nyata maupun konseptual [1–3]. Dalam pembelajaran di sekolah, fisika sangat erat kaitannya dengan demonstrasi dan praktikum di dalam laboratorium untuk memverifikasi konsep yang didapat secara teoritis melalui eksperimen [4]. Kegiatan laboratorium penting dalam pengajaran fisika karena dapat membangkitkan minat peserta didik dan membantu mereka memahami hukum serta konsep fisika secara mendalam, sehingga praktikum fisika dapat memberikan peningkatan pemahaman konseptual dan keterampilan proses sains peserta didik [5–7]. Namun kenyataannya banyak sekolah di Indonesia masih mengalami kendala dalam praktikum fisika. Beberapa penelitian menjelaskan bahwa laboratorium fisika kurang dimanfaatkan sebagai fasilitas dalam belajar mengajar [5]. Kurangnya fasilitas alat peraga di dalam laboratorium merupakan masalah yang menyebabkan laboratorium fisika yang kurang dimanfaatkan oleh peserta didik dan guru [8]. Sehingga mengakibatkan alat praktikum seringkali terbatas dan tidak memadai. Akibat kondisi ini, beberapa konsep yang tidak dapat dijelaskan secara konkret dalam pembelajaran fisika, salah satunya materi efek Doppler [9]. Oleh karena itu, situasi ini menegaskan perlunya pengembangan alat praktikum fisika digital materi efek Doppler yang dapat dimanfaatkan oleh guru dan peserta didik.

Perkembangan teknologi abad ke-21 membawahkan angin segar dalam pembelajaran fisika terutama dalam pengembangan alat praktikum fisika, penggunaan mikrokontroler seperti Arduino Uno merupakan pilihan yang menarik dalam mengembangkan alat praktikum [3]. Arduino merupakan mikrokontroler yang dapat dimanfaatkan dikarenakan komponen-komponen pendukung yang mudah ditemukan dan variasi sensor yang sangat banyak. Pemanfaatan arduino di laboratorium fisika maupun dalam pengembangan alat praktikum fisika dapat diperkaya dengan rancangan alat serta runtutan percobaan baru berbasis digital [6,10]. Beberapa penelitian sebelumnya mengembangkan alat praktikum pelayanan gelombang berbasis arduino uno dengan memanfaatkan sensor *micro jack audio* dan *smartphone* sebagai sumber bunyi [11], merancang alat praktikum berbasis arduino uno dengan memanfaatkan sensor photodiode untuk menjelaskan konsep gerak jatuh bebas [12], dan mengembangkan alat demonstrasi yang menjelaskan fenomena medan magnet melalui rancangan alat tesla coil [7]. Inovasi semacam ini menunjukkan potensi pembuatan alat praktikum untuk meningkatkan pengalaman belajar peserta didik.

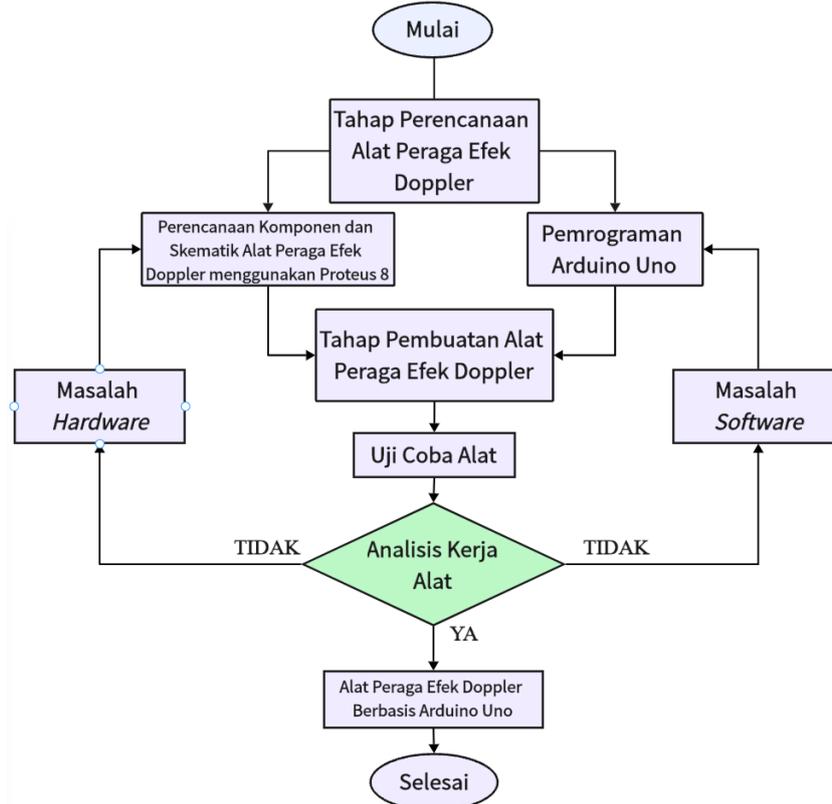
Secara teoretik, efek Doppler adalah fenomena perubahan frekuensi atau panjang gelombang gelombang bunyi yang diamati akibat adanya gerak relatif antara sumber bunyi dan pendengar [1,13,14]. Sebagai gambaran sehari-hari, peristiwa efek Doppler dapat diamati pada sirene mobil ambulans, ketika ambulans mendekat, nada sirene terdengar menciut, dan saat ambulans menjauh nada sirene terdengar meregang [14]. Fenomena abstrak ini terkadang sulit dipahami, jika hanya diajarkan secara teori, sehingga diperlukan alat peraga yang akan memudahkan peserta didik untuk dapat mengamati pergeseran frekuensi secara nyata. Dengan alat praktikum yang sesuai, peserta didik dapat mengamati langsung bagaimana frekuensi bunyi berubah saat sumber bergerak, sehingga konsep efek Doppler menjadi lebih jelas.

Berdasarkan gambaran di atas, penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan alat praktikum Efek Doppler berbasis Arduino Uno dengan sensor GY-MAX4466. Diharapkan dengan adanya pengembangan akan terdapat potensi penggunaannya sebagai media pembelajaran fisika berbasis digital yang mudah digunakan dan memadai dalam pembelajaran fisika. Alat ini dapat digunakan oleh peserta didik dan guru untuk memberikan peningkatan pemahaman konsep Efek Doppler melalui praktikum.

2. Metode

Penelitian serta pengembangan alat efek Doppler berbasis arduino uno (mikrokontroller) dilakukan dengan metode *Research and Development* (R&D). Metode R&D adalah sebuah pendekatan dalam penelitian yang bertujuan mendapatkan suatu produk dan menguji kegunaan dari produk tersebut, metode R&D terdiri atas 3 tahap yaitu perencanaan, pembuatan, dan pengujian [15,16].

Diagram alir merupakan panduan yang jelas tentang metode penelitian yang digunakan selama proses sains, yang mempertimbangkan pengambilan keputusan berbasis bukti dalam penelitian [17]. Diagram alir dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



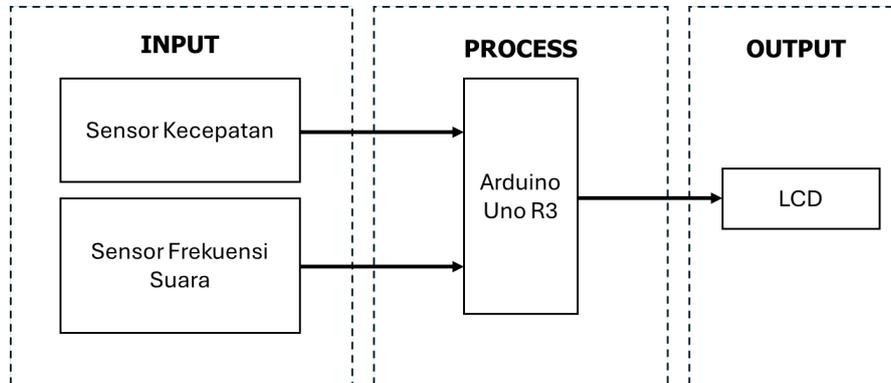
Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Alat Peraga Efek Doppler

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 1. dan metode yang digunakan maka terdapat beberapa tahapan yang dilaksanakan dalam penelitian ini. Tahapan tersebut dijelaskan sebagai berikut.

Tahapan pertama adalah perencanaan/perancangan alat, pada tahap ini dilakukan penyusunan skema blok alat berdasarkan kebutuhan fungsi setiap komponen. Perancangan juga mencakup penyusunan cara kerja sensor untuk pembacaan frekuensi suara dan pembacaan kecepatan benda. Desain perancangan perangkat meliputi penentuan pin-pin Arduino yang terhubung ke sensor dan serta perencanaan alur program untuk pengolahan data dari kedua sensor tersebut. Desain perancangan alat digambarkan secara skematik dengan *software* penunjang seperti *Fritzing* dan *Proteus 8*.

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan alat. Pada tahap ini dilakukan perakitan seluruh komponen yang telah direncanakan. Arduino Uno, sensor GY-MAX4466, sensor FC-51, dan LCD LiquidCrystal 16×2 dirangkai pada breadboard sesuai dengan skema blok yang akan dirancang. Setelah perangkat tersusun secara fisik, dilakukan pemrograman Arduino menggunakan bahasa C/C++ pada *software* Arduino IDE. Program tersebut bertugas mengolah sinyal masukan dari sensor

GY-MAX4466 untuk menghitung frekuensi suara dan dari sensor FC-51 untuk menghitung kecepatan objek. Hasil pengolahan data kemudian ditampilkan pada LCD 16×2. Proses pemrograman juga mencakup pengaturan ambang batas sensor dan kalibrasi awal agar pembacaan sensor optimal.



Gambar 2. Diagram Blok Rencana Alat Efek Doppler

Pada tahap pengujian, setiap sensor diuji secara terpisah untuk mengetahui akurasi alat. Pengujian sensor GY-MAX4466 dilakukan dengan cara menghasilkan suara dari sumber bunyi dengan frekuensi tertentu lalu membandingkan frekuensi yang terukur oleh perangkat (tampilan LCD) dengan frekuensi asli suara. Sumber bunyi akan dihasilkan melalui *handphone* dengan menggunakan *software Frequency Generator*. Sedangkan pengujian sensor FC-51 dilakukan dengan menggerakkan objek pada kecepatan tertentu (misalnya objek dilepaskan dari titik tetap) dan membandingkan kecepatan yang terukur oleh alat dengan perhitungan manual kecepatan tersebut. Perhitungan teoritis dari kecepatan menggunakan prinsip kecepatan yang diturunkan dari besaran panjang dan waktu [1], secara matematis dinyatakan oleh Persamaan (1).

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

dimana s adalah jarak antara kedua buah sensor sebesar $0,02 \text{ m}$, t adalah waktu tempuh objek dalam s , dan v adalah kecepatan gerak objek dalam m/s .

Data hasil pengujian masing-masing dibandingkan untuk mengevaluasi kebenaran pembacaan frekuensi bunyi dan kecepatan benda oleh alat. Tahap selanjutnya adalah mencari taraf kesalahan dan koefisien determinasi R^2 dari alat untuk menganalisis kelayakan dari alat yang telah dirancang. Taraf kesalahan atau galat adalah kesalahan pada hasil perhitungan yang tidak diharapkan dalam pengukuran [18], galat dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2).

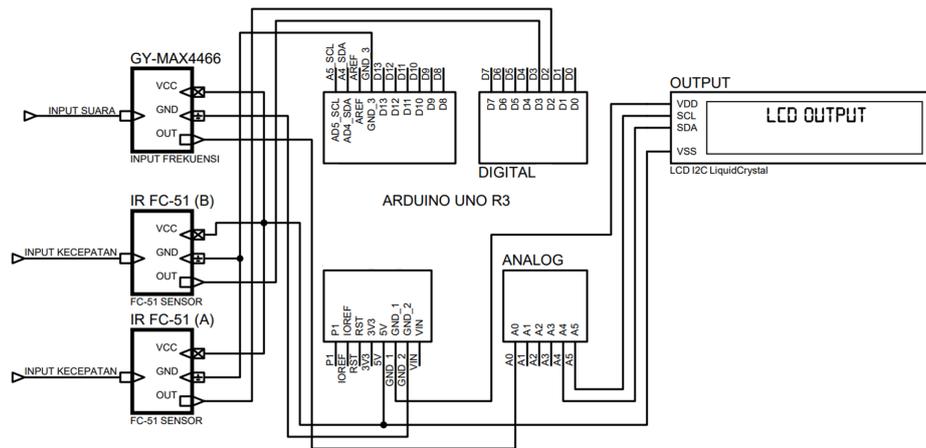
$$\% \text{ Error} = \frac{|approximate - exact|}{approximate} \times 100\% \quad (2)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian dalam rancang bangun alat peraga efek Doppler dijelaskan dengan tahapan-tahapan R&D yaitu perancangan, pembuatan, dan pengujian.

3.1. Perancangan/Perencanaan Alat

Tahap perancangan menggunakan proteus 8 dan telah menghasilkan desain alat peraga efek Doppler yang dirancang secara skematik. Desain alat secara skematik dapat dilihat pada Gambar 3.



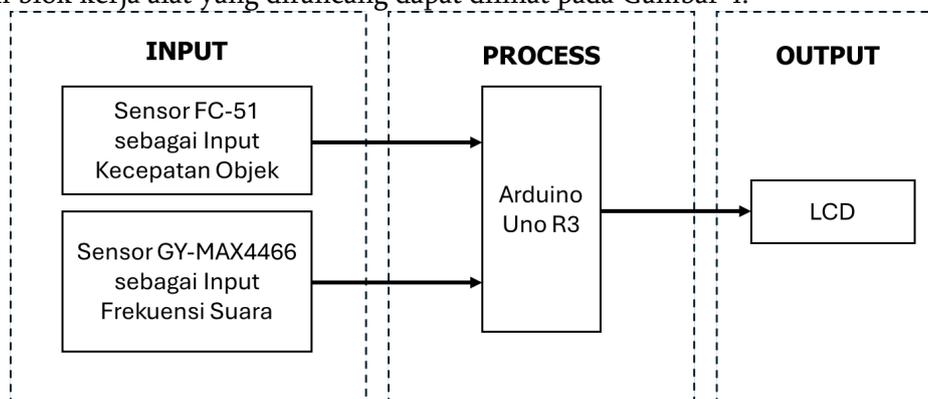
Gambar 3. Desain Alat Peraga Efek Doppler

Komponen – komponen dari alat peraga efek Doppler terdiri dari baterai sebagai sumber tegangan alat, Arduino Uno R3 sebagai pengendali utama, Sensor GY-MAX4466 sebagai sensor yang mengukur frekuensi suara, 2 buah Sensor FC-51 sebagai sensor yang mengukur kecepatan objek, LCD *Display (LiquidCrystal 1602)* yang digunakan untuk menampilkan luaran daripada alat, dan Breadboard sebagai papan sirkuit elektronik.

Dalam perancangan alat, komponen-komponen yang dihubungkan dapat dijelaskan sebagai berikut.

- 3.1.1 *Sensor GY-MAX4466*: Output terhubung dengan Pin A0 pada arduino uni; VCC terhubung dengan Pin 5 V pada arduino uno; dan GND terhubung dengan Pin GND pada arduino uno.
- 3.1.2 *Sensor FC-51*: Output masing-masing terhubung dengan Pin Digital 2 dan 3 pada arduino uno; VCC terhubung dengan Pin 5 V pada arduino uno; dan GND terhubung dengan Pin GND pada arduino uno.
- 3.1.3 *LCD Display (LiquidCrystal I2C)*: VSS terhubung dengan Pin 5 V pada arduino uno; VDD terhubung dengan Pin GND arduino uno; SDA terhubung dengan Pin A4 pada arduino uno; dan SCL terhubung dengan Pin A5 pada arduino uno.

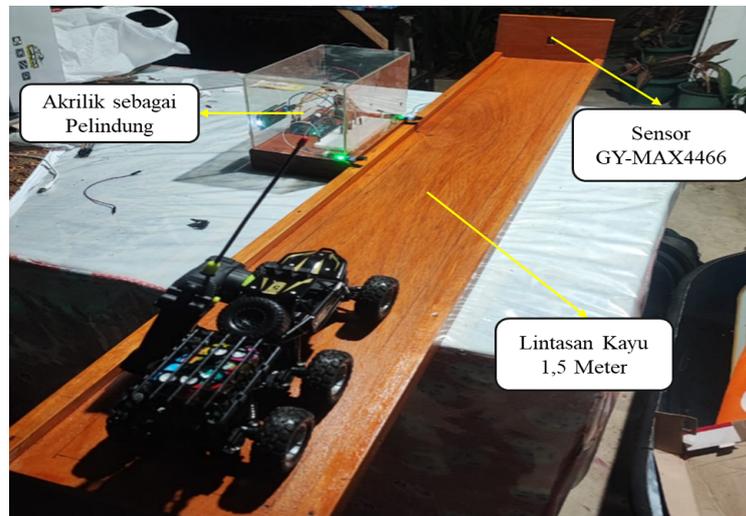
Diagram blok kerja alat yang dirancang dapat dilihat pada Gambar 4.



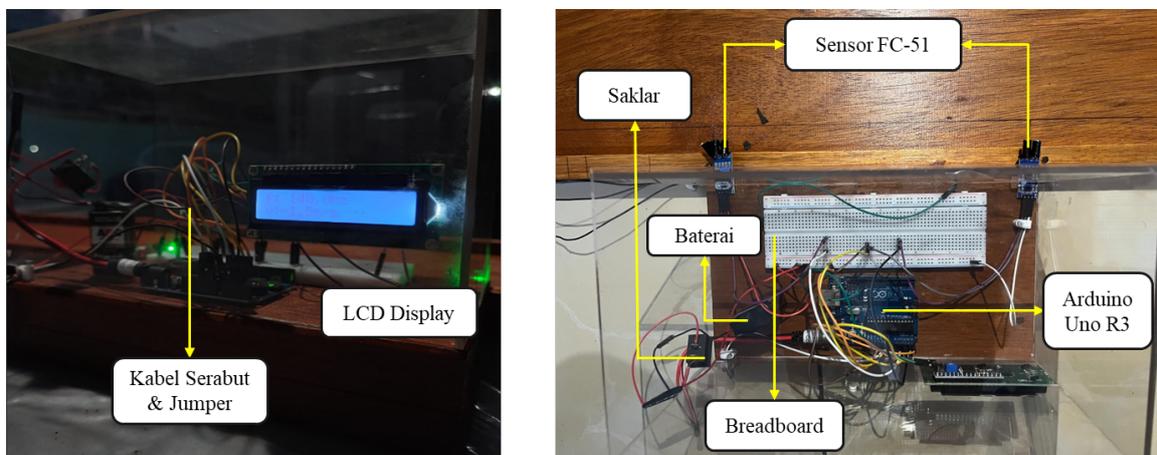
Gambar 4. Diagram Blok Rencana Kerja Alat Menggunakan Sensor GY-MAX4466 dan Sensor FC-51

3.2. Pembuatan Alat

Setelah didapatkan perencanaan alat, maka masuk ke tahapan pembuatan alat. Pada tahapan ini, dilakukan perakitan dengan komponen-komponen yang diperlukan. Alat peraga efek Doppler yang telah selesai dirancang dan dibangun dapat dilihat pada Gambar 5 dan bagian-bagian alat peraga efek Doppler Gambar 6.



Gambar 5. Hasil Keseluruhan Pembuatan Alat Peraga Efek Doppler



Gambar 6. Bagian-bagian Alat Peraga Efek Doppler

Gambar 5 menunjukkan keseluruhan tampilan alat, mulai dari lintasan, mobil pengangkut sumber suara, hingga posisi sensor. Sedangkan Gambar 6 memperlihatkan detail pelindung akrilik yang berisi rangkaian Arduino, sensor, baterai, dan LCD *Display*, serta komponen pelengkap lainnya.

Alat peraga efek Doppler berhasil dirancang dan dibangun dengan menggunakan kombinasi mikrokontroler Arduino Uno R3, sensor suara GY-MAX4466, dan sensor kecepatan FC-51. Alat ini dirancang untuk mendeteksi perubahan frekuensi suara akibat gerakan benda serta mengukur kecepatan benda secara *real-time*.

Struktur utama alat terdiri dari lintasan kayu sepanjang 1,5 meter yang digunakan sebagai jalur pergerakan kendaraan bermotor kecil yang membawa sumber suara. Semua komponen dipasang

pada sebuah *breadboard* yang ditempatkan di dalam pelindung akrilik transparan guna menjaga kestabilan serta keamanan rangkaian elektronik. Sistem ini dihidupkan melalui saklar yang menghubungkan sumber listrik dari baterai.

Sensor GY-MAX4466 berfungsi untuk menangkap perubahan frekuensi suara yang terjadi akibat pergerakan mobil, sedangkan sensor FC-51 mendeteksi waktu yang dibutuhkan mobil untuk melewati lintasan tertentu. Arduino Uno R3 kemudian mengolah data yang diperoleh dari kedua sensor tersebut. Hasil pembacaan frekuensi dan kecepatan ditampilkan secara langsung pada LCD *Display* 16x2, memudahkan pengguna untuk membaca hasil pengukuran tanpa perlu perangkat tambahan seperti komputer.

3.3. Pengujian Alat

Setelah alat peraga efek Doppler berbasis sensor GY-MAX4466 berhasil dirancang, selanjutnya dilakukan serangkaian uji coba untuk memperoleh data terkait kinerja alat. Hasil perhitungan akan menentukan proses kalibrasi untuk memastikan alat bekerja dengan baik dan akurat.

Hasil data pengukuran pengujian alat yang diperoleh dari sensor GY-MAX4466 merupakan perbandingan luaran frekuensi alat (f_{out}) terhadap frekuensi asli sumber (f_{source}). Pengujian alat dilakukan dengan mengukur frekuensi suara sebanyak 10 kali mulai 100 hz, 250 hz, 500 hz, 1000 hz, hingga 4000 hz. Hasil data yang didapatkan melalui pengukuran pengujian frekuensi suara pada alat dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengukuran Pengujian Frekuensi Suara

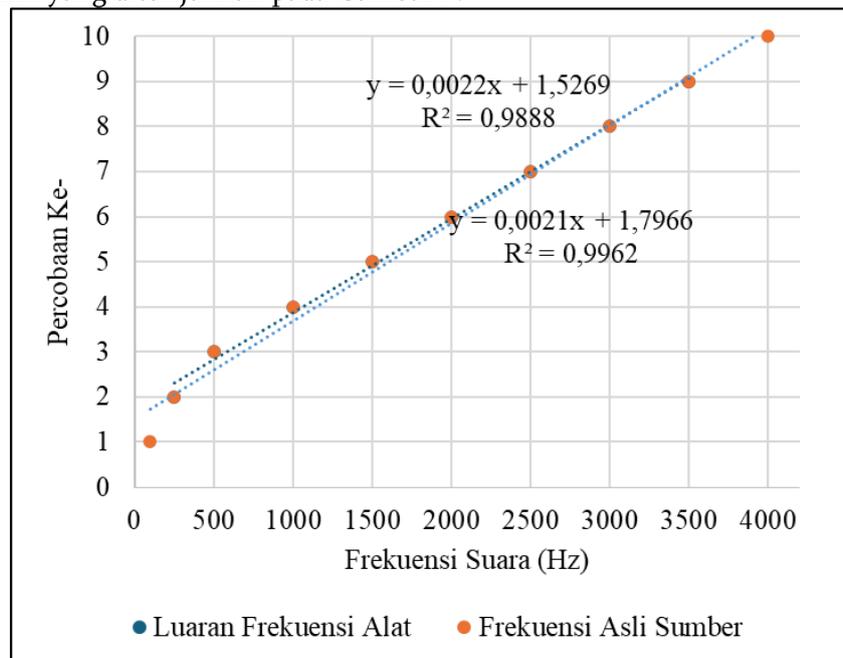
Percobaan Ke-	f_{out} (Hz)	f_{source} (Hz)	Ketepatan (%)	Galat (%)
1	140	100	60,00	40,00
2	250	250	100,00	0,00
3	500	500	100,00	0,00
4	1000	1000	100,00	0,00
5	1500	1500	100,00	0,00
6	2000	2000	100,00	0,00
7	2500	2500	100,00	0,00
8	3000	3000	100,00	0,00
9	3500	3500	100,00	0,00
10	2300	4000	57,50	42,50

Hasil data pengukuran frekuensi suara yang dilakukan sebanyak 10 kali menunjukkan bahwa alat bekerja dengan sangat baik pada rentang 250 – 3500 Hz. Akurasi alat pada rentang ini mencapai 100% yang artinya nilai luaran frekuensi suara alat sama seperti frekuensi suara asli sumber.

Namun pada percobaan pertama dan kesepuluh luaran frekuensi suara alat dan frekuensi suara asli sumber, memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan teknis dari sensor, yaitu sensor mikrofon (misal modul MAX4466 atau mikrofon kondensator) umumnya memiliki filter *high-pass* internal untuk menghilangkan komponen DC atau kebisingan sangat rendah. Karakteristik fisik ini menyebabkan frekuensi di bawah sekitar 100 Hz sulit terdeteksi dengan baik [19]. Selain itu, pada frekuensi rendah sering muncul *noise* lingkungan (misalnya getaran mekanis atau gangguan kelistrikan) sehingga sinyal berguna relatif lemah [20,21]. Kedua, batas atas deteksi dipengaruhi oleh sistem pengambilan sampel. Arduino Uno menggunakan ADC

10-bit yang secara bawahan melakukan konversi sekitar $104 \mu\text{s}$ per sampel, setara ~ 9600 sampel/detik [22]. Prinsip Nyquist mengharuskan laju sampel dua kali frekuensi sinyal dengan ~ 9600 sampel/s, frekuensi maksimum yang dapat diukur secara andal hanya sekitar 4–5 kHz. Dalam praktiknya, *overhead* pemrosesan (*serial printing*, dll.) dan *filter* pada rangkaian *input* menurunkan ambang ini, sehingga frekuensi di atas ~ 3500 Hz menjadi tidak terukur secara akurat [23].

Hubungan regresi linear antara pengukuran frekuensi suara alat terhadap frekuensi asli sumber didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Pengujian Alat dengan Mengukur Luaran Frekuensi Suara Alat serta Nilai Frekuensi Suara Asli Sumber

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan nilai frekuensi suara terhadap nomor percobaan pada alat peraga efek Doppler berbasis Arduino. Hubungan linear pada grafik ini menunjukkan bahwa tiap peningkatan frekuensi *input* yang diberikan (melalui aplikasi pembangkit frekuensi pada *smartphone*) tercatat secara konsisten oleh sensor. Dua persamaan garis regresi linear yang diperoleh, misalnya, untuk rentang percobaan 2–9 memiliki kemiringan (*slope*) yang mendekati satu ke arah peningkatan frekuensi. Nilai R^2 yang sangat tinggi (lebih dari 0,98) menunjukkan bahwa hampir seluruh variasi data frekuensi dijelaskan oleh garis regresi tersebut. Dengan kata lain, output frekuensi yang terukur oleh sensor sangat linier terhadap frekuensi sumber, menunjukkan performa kalibrasi alat yang baik. Temuan serupa dilaporkan Arifin dkk. pada tahun 2019, yang menyajikan data kalibrasi frekuensi di mana pembacaan sensor frekuensi berkorelasi linier dengan nilai frekuensi sebenarnya dengan kesalahan relatif hanya beberapa persen [9]. Kondisi ini mengindikasikan bahwa alat telah terkalibrasi secara efektif dalam rentang yang terukur, sehingga setiap percobaan menghasilkan pembacaan yang hampir identik ketika frekuensi sumber diulang.

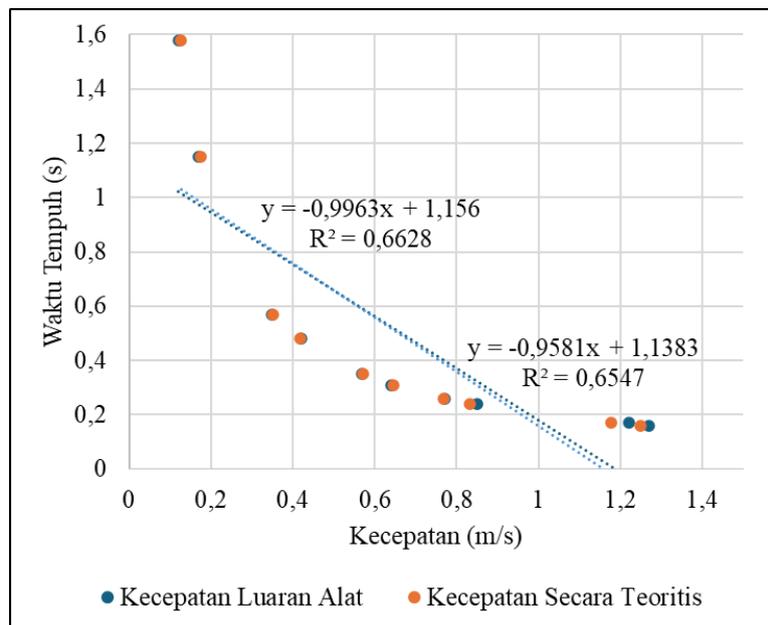
Hasil data pengukuran pengujian alat yang diperoleh dari sensor FC-51 merupakan perbandingan kecepatan luaran alat (v_{out}) terhadap kecepatan secara teoritis (v_{teori}) dengan menggunakan Persamaan 1. Pengujian alat dilakukan dengan mengukur kecepatan gerak objek dalam hal ini gerak mobil sebanyak 10 kali. Hasil data yang didapatkan melalui pengukuran pengujian kecepatan pada alat dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pengukuran Pengujian Kecepatan

Percobaan Ke-	t (s)	v_{out} (m/s)	v_{teori} (m/s)	Ketepatan (%)	Galat (%)
1	0,57	0,35	0,35	99,75	0,25
2	0,16	1,27	1,25	98,40	1,60
3	0,24	0,85	0,83	98,00	2,00
4	0,35	0,57	0,57	99,75	0,25
5	0,31	0,64	0,65	99,20	0,80
6	0,26	0,77	0,77	99,90	0,10
7	0,17	1,22	1,18	96,30	3,70
8	1,58	0,12	0,13	94,80	5,20
9	1,15	0,17	0,17	97,75	2,25
10	0,48	0,42	0,42	99,20	0,80

Dari hasil data pengukuran kecepatan yang dilakukan sebanyak 10 kali menunjukkan bahwa alat bekerja dengan baik. Akurasi alat berkisar pada rentang nilai 94,80 – 99,75% yang artinya nilai kecepatan luaran alat mendekati nilai kecepatan secara teoritis. Hasil ini menegaskan bahwa alat peraga efek Doppler digital yang telah dikembangkan dapat dimanfaatkan dalam menunjang pembelajaran melalui penggunaannya sebagai alat praktikum fisika berbasis digital.

Hubungan regresi linear antara pengukuran kecepatan alat terhadap kecepatan secara teoritis didapatkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik Pengujian Alat dengan Mengukur Kecepatan Luaran Alat serta Kecepatan Secara Manual.

Tidak seperti data yang didapatkan oleh sensor GY-MAX4466, data pengujian kecepatan sensor FC-51 ini tidak dapat dibuatkan grafik regresi linear, dikarenakan data yang diperoleh relatif acak. Tidak ada salah satu variabel yang memiliki kekonsistenan dalam pengambilan data. Hal ini merupakan keterbatasan manusia yang tidak dapat menjalankan mobil mainan dengan waktu atau kecepatan yang konstan. Jika dipaksakan maka koefisien determinasi R^2 tidak akan signifikan. Jika diperhatikan pada Gambar 8, nilai koefisien determinasi pada kecepatan secara teoritis juga

mengalami pengurangan, nilai $R^2 \approx 0,65-0,66$ tergolong sedang, memperlihatkan sisa $\sim 35\%$ varians dipengaruhi faktor lain atau fluktuasi acak [16,24].

Hal ini tidak lantas bertentangan dengan laporan bahwa akurasi alat tinggi ($> 94\%$) pada tiap pengukuran individual. Sebab, R^2 lebih berkaitan dengan kecocokan model regresi linier secara keseluruhan, sedangkan akurasi pengukuran lebih berkaitan dengan kesalahan absolut antara nilai terukur dan nilai sebenarnya [25,26]. Dengan akurasi $> 90\%$, berarti rata-rata kesalahan relatif kecil walaupun titik-titik data masih terhambur akibat faktor-faktor yang telah dijelaskan di atas.

4. Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan bahwa alat peraga efek Doppler berbasis Arduino Uno dengan sensor GY-MAX4466 dan sensor FC-51 telah berhasil dirancang, dibuat, dan telah berfungsi dengan baik melalui uji coba alat. Pengujian frekuensi suara menunjukkan bahwa alat mampu membaca frekuensi dalam rentang 250–3500 Hz dengan tingkat akurasi mencapai 100%, sedangkan pada frekuensi di bawah 100 Hz dan di atas 3500 Hz terdapat deviasi signifikan akibat keterbatasan teknis sensor. Pada pengujian kecepatan objek, alat menunjukkan akurasi tinggi sebesar 94,80%–99,75%, walaupun koefisien determinasi R^2 regresi linier relatif sedang ($\sim 0,65$), disebabkan oleh sifat hubungan non-linier antara kecepatan dan waktu serta adanya faktor fluktuasi acak dan *noise sensor*. Secara keseluruhan, alat ini layak digunakan sebagai media praktikum maupun demonstrasi dalam memperagakan fenomena efek Doppler secara digital untuk meningkatkan pemahaman konsep peserta didik.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan penggunaan sensor dengan sensitifitas lebih luas serta peningkatan metode pengukuran kecepatan menggunakan sistem optik atau sensor *time-of-flight* untuk mengurangi fluktuasi pembacaan. Selain itu, diperlukan penelitian lanjutan dengan prosedur kalibrasi lebih rinci dan pengujian dalam kondisi lingkungan berbeda untuk meningkatkan keandalan alat dalam berbagai situasi pembelajaran.

Daftar Pustaka

- [1] Walker J, Halliday D and Resnick R 2014 *Fundamentals of Physics Halliday & resnick 10ed*
- [2] Dwi Tisa Haspen C and Syafriani 2022 Praktikalitas dan Efektifitas E-Modul Fisika SMA Berbasis Inkuiri Terbimbing Terintegrasi Etnosains Untuk Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kreatif Peserta Didik *Jurnal Penelitian dan Pembelajaran Fisika* **8** 10–6
- [3] Restianingsih T, Pebralia J and Mutia Anggraini R 2023 Pelatihan Pembuatan Kit Praktikum Fisika Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno di SMK Negeri 9 Muaro Jambi *JPM Pinang Masak* **4** 31–8
- [4] Wea K N, Hau R R H and Kleruk E D 2021 Penerapan Metode Pembelajaran Inkuiri Terbimbing dengan Mind Mapping untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep Fisika Siswa *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan* **7** 770–4
- [5] Sarjono 2018 PENTINGNYA LABORATORIUM FISIKA DI SMA/MA DALAM *Jurnal Madaniyah* **8** 262–71
- [6] Uzal G 2022 The Use of Arduino in Physics Laboratories *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology* **21**
- [7] Deo E, Sindim C, Makahinda T, Rampengan A M and Setiawan Lahope K 2025 RANCANG BANGUN ALAT DEMONSTRASI TESLA COIL DALAM PEMBELAJARAN MEDAN MAGNET *CHARM SAINS* **6** 159–65

- [8] Sudirman S, Kennedy D and Soeharto S 2023 The teaching of physics at upper secondary school level: A comparative study between Indonesia and Ireland *Front Educ (Lausanne)* **8**
- [9] Arifin F, Indrasari W and Rustana C E 2019 PENGEMBANGAN ALAT PRAKTIKUM PELAYANGAN BUNYI DAN EFEK DOPPLER BERBASIS MODUL MIKROFON KONDENSER DAN MIKROKONTROLER *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2019* 445–59
- [10] Sobari A and Suchayo I 2016 PENGEMBANGAN ALAT PERAGA TICKER TIMER SEBAGAI MEDIA PEMBELAJARAN FISIKA POKOK BAHASAN GERAK LURUS Achmad Sobari, Imam Suchayo *Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika (JIPF)* **05** 154–60
- [11] Tina A, Saehana S and Wahyono U 2021 PENGEMBANGAN MEDIA ALAT PRAKTIKUM PELAYANGAN GELOMBANG BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika* **8**
- [12] Humairoh S, Yakob M, Lubis N A and Putra R A 2021 Perancangan Alat Praktikum Berbasis Arduino Untuk Menentukan Waktu Dan Kecepatan Secara Otomatis Pada Gerak Jatuh Bebas *GRAVITASI: Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains* **4** 23–32
- [13] Emile O and Emile J 2023 Rotational Doppler Effect: A Review *Ann Phys* **535**
- [14] Habibi N and Suchayo I 2015 Perancangan Alat Ukur Kecepatan Menggunakan Sensor Ultrasonik dan Prinsip Efek Doppler *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia* **4**
- [15] Gustiani S 2019 Research and Development (R&D) Method as a Model Design in Educational Research and Its Alternatives *HOLISTICS JOURNAL* **11**
- [16] Sugiyono 2019 *Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D (23rd ed.)* (Alfabeta)
- [17] Daigl M, Abogunrin S, Castro F, McGough S F, Sturup R H, Boersma C and Abrams K R 2024 Advancing the role of real-world evidence in comparative effectiveness research *J Comp Eff Res* **13**
- [18] Morris A S 2001 Measurement and Instrumentation Principles *Meas Sci Technol* **12**
- [19] Shin K, Kim C, Sung M, Kim J and Moon W 2020 A modeling and feasibility study of a micro-machined microphone based on a field-effect transistor and an electret for a low-frequency microphone *Sensors (Switzerland)* **20**
- [20] Shin W, Hong S, Jeong Y, Jung G, Park J, Kim D, Choi K, Shin H, Koo R H, Kim J J and Lee J H 2023 Low-frequency noise in gas sensors: A review *Sens Actuators B Chem* **383**
- [21] Leaffer D J, Suh H, Durant J L, Tracey B, Roof C and Gute D M 2023 Long-term measurement study of urban environmental low frequency noise *J Expo Sci Environ Epidemiol*
- [22] Svatos J, Fischer J and Holub J 2023 High-speed equivalent-time sampling virtual instrument based on microcontroller ADC *Measurement (Lond)* **220**
- [23] Tropp J A, Laska J N, Duarte M F, Romberg J K and Baraniuk R G 2010 Beyond Nyquist: Efficient sampling of sparse bandlimited signals *IEEE Trans Inf Theory* **56**
- [24] Kothari C R 2004 *Research Methodology: Methods & Techniques*
- [25] Kutner M H ., Nachtsheim Chris, Neter John and Li William 2005 *Applied linear statistical models* (McGraw-Hill Irwin)
- [26] Cheng C L, Shalabh and Garg G 2014 Coefficient of determination for multiple measurement error models *J Multivar Anal* **126**