DEWANTECH Jurnal Teknologi Pendidikan
Vol. 3, No. 1, Maret 2025, pp. 22 – 31
ISSN: 3025-0978
Open Access: https://journal.awatarapublisher.com/index.php/dewantech

RANCANGAN KIT EKSPERIMEN RESONANSI HELMHOLTZ BERBANTUAN SMARTPHONE DAN SIMULASI TEORETIS PADA MATERI GELOMBANG BUNYI DI SMA

Suciati Rahayu Widyastuti[1], Reza Rahmadi Hasibuan[2], Gemah Elgy Valerino[3]
[1]Pendidikan Jasmani Kesehatan dan Rekreasi, Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon, Kota Cirebon, Indonesia
[2]Manajemen, Universitas Perwira Purbalingga, Purbalingga, Indonesia
[3]Pendidikan Jasmani Kesehatan dan Rekreasi, Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon, Kota Cirebon, Indonesia
Email Penulis : suciati.rahayu@unucirebon.ac.id[1], rezarahmadi56@gmail.com[2], valenote555@gmail.com[3]

INFO ARTIKEL
Riwayat Artikel:
Diterima 18 Februari 2025
Direvisi 21 Maret 2025
Disetujui 25 Maret 2025

KEYWORDS
Helmholtz resonance
Smartphone
Sound waves
Experimental kit
Theoretical simulation

ABSTRACT

Smartphone-based experiments can link everyday phenomena to quantitative representations, yet bottle-and-smartphone Helmholtz resonance is already documented, and evidence on how such a design can be made usable in grade XI physics is limited. This study presents the design of a smartphone-assisted Helmholtz resonance kit for sound waves, comprising a bottle specification, setup guide, prediction-observation-explanation worksheet, spectrum guide, and theoretical simulation, together with an evaluation plan. The design follows the analysis and design stages of ADDIE through document analysis; physical assembly, expert assessment, and student trials have not been conducted. Assuming a 10 mm neck radius, 50 mm neck length, 343 m/s sound speed, and total end correction of 1.4 times the radius, air volumes of 150-500 mL yield predicted frequencies of approximately 312-171 Hz. A first-order uncertainty analysis shows that, with an assumed 0.5 mm uncertainty in neck radius, geometry contributes about 4.5% to the frequency, exceeding the nominal FFT bin spacing of 2.69 Hz. These are simulated values, not measurements. The contribution is a design and an uncertainty-aware measurement plan; technical accuracy, educational validity, and learning effectiveness require further testing.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

KATA KUNCI
Resonansi Helmholtz
Smartphone
Gelombang bunyi
Kit eksperimen
Simulasi teori

CORRESPONDING AUTHOR
Suciati Rahayu Widyastuti
Pendidikan Jasmani Kesehatan dan Rekreasi, Universitas Nahdlatul Ulama Cirebon
Kota Cirebon, Indonesia
suciati.rahayu@unucirebon.ac.id

ABSTRAK

Eksperimen berbasis *smartphone* dapat mengaitkan gejala sehari-hari dengan representasi kuantitatif, tetapi resonansi Helmholtz dengan botol dan *smartphone* telah terdokumentasi dan bukti tentang cara menjadikannya dapat dipakai pada fisika kelas XI masih terbatas. Naskah ini menyajikan rancangan kit resonansi Helmholtz berbantuan *smartphone* untuk materi gelombang bunyi berupa spesifikasi botol, panduan *setup*, LKPD prediksi-observasi-penjelasan, panduan spektrum, dan simulasi teori, beserta rencana evaluasi. Rancangan mengikuti tahap analisis dan desain ADDIE melalui analisis dokumen; perakitan fisik, penilaian ahli, dan uji siswa belum dilakukan. Dengan asumsi jari-jari leher 10 mm, panjang leher 50 mm, cepat rambat bunyi 343 m/s, dan koreksi ujung total 1,4 kali jari-jari, volume udara 150-500 mL memberikan frekuensi prediksi sekitar 312-171 Hz. Analisis ketidakpastian orde pertama menunjukkan bahwa dengan ketidakpastian jari-jari leher 0,5 mm (asumsi), geometri menyumbang sekitar 4,5% pada frekuensi, melampaui jarak bin FFT nominal 2,69 Hz. Angka tersebut merupakan simulasi, bukan pengukuran. Kontribusi naskah adalah rancangan dan rencana pengukuran yang

memperhitungkan ketidakpastian; akurasi teknis, validitas pendidikan, dan efektivitas belajar memerlukan pengujian lanjut.

PENDAHULUAN

Pemanfaatan *smartphone* sebagai alat eksperimen membuka kesempatan mengaitkan gejala sehari-hari dengan representasi kuantitatif. Pemetaan Monteiro dan Martí (2022) memperlihatkan keluasan penggunaan sensor perangkat bergerak dalam pengajaran fisika. Namun, ketersediaan sensor tidak dengan sendirinya menjamin keterukuran besaran atau keberhasilan pembelajaran. Pada eksperimen bunyi, siswa perlu memahami informasi yang ditampilkan aplikasi dan membedakan perubahan tinggi nada dari perubahan keras bunyi. Kit yang dikembangkan diarahkan untuk membuat hubungan tersebut dapat diperiksa melalui kegiatan terstruktur.

Botol berleher sempit dapat dimodelkan sebagai resonator Helmholtz ketika udara dalam leher berosilasi terhadap kompresibilitas udara rongga. Perubahan volume udara melalui penambahan air memungkinkan pengujian hubungan frekuensi dengan volume tanpa mengganti geometri leher. Zhai et al. (2023) telah memanfaatkan resonator Helmholtz dan *smartphone* untuk pengukuran cepat rambat bunyi. Zhang et al. (2024) juga mengembangkan pengukuran volume wadah dengan prinsip serupa. Dengan demikian, penggunaan botol dan *smartphone* bukan kebaruan, dan naskah ini tidak mengklaimnya sebagai penemuan pertama.

Kedekatan rancangan juga terlihat pada panduan DigiPhysLab (2023), yang mengajak mahasiswa menguji model botol melalui pengukuran frekuensi dan geometri. Barro et al. (2023), dalam prapublikasi penelitian tingkat sarjana, membahas resonator botol sebagai salah satu contoh eksperimen berbasis perangkat bergerak. Kedua sumber menegaskan pentingnya menguji batas model. Keduanya tidak menyediakan bukti efektivitas kit yang diusulkan pada siswa kelas XI Indonesia. Transfer kegiatan antarkonteks memerlukan penyesuaian bantuan belajar, istilah, dan beban analisis.

Rancangan dalam naskah ini berbeda dari sumber-sumber tersebut pada sasaran dan perangkat pendukungnya: (i) sasaran adalah siswa kelas XI SMA, dengan LKPD prediksi-observasi-penjelasan yang membedakan perubahan tinggi nada dari perubahan keras bunyi; (ii) manipulasi volume udara dikaitkan secara eksplisit dengan pemilihan puncak spektrum dan penjelasan berbasis model; dan (iii) anggaran ketidakpastian disusun sebelum pengukuran untuk menentukan sumber galat yang perlu didahulukan. Perbedaan ini bersifat rancangan dan belum diuji. Kebutuhan kelas XI dirumuskan dari telaah dokumen, bukan dari survei kebutuhan, dan hal ini dinyatakan sebagai keterbatasan.

Kajian pengembangan media gelombang bunyi kelas XI oleh Oksaviona et al. (2023) melaporkan evaluasi aspek pedagogi, materi, dan media. Aspek tersebut relevan sebagai dasar penyusunan kisi-kisi, tetapi skor pada produk multimedia mereka tidak menjadi skor validasi kit resonansi ini. Kaps dan Stallmach (2022) menunjukkan bahwa evaluasi tugas eksperimen *smartphone* dapat meliputi pemahaman konsep dan beban kognitif. Lahme et al. (2025) menelaah persepsi terhadap tugas eksperimen dan pemrograman di mekanika. Bukti tersebut mendukung kebutuhan mengevaluasi rancangan aktivitas, sekaligus memperlihatkan keterbatasan generalisasi lintas materi dan jenjang.

Gasparini et al. (2026), dalam studi kuasi-eksperimen mekanika di sekolah menengah, melaporkan peningkatan belajar yang besar pada kelompok yang memakai tablet dan *smartphone* maupun kelompok kontrol, tanpa perbedaan signifikan pada pemahaman konsep dan motivasi di antara keduanya. Karena itu, naskah ini mengajukan kontribusi desain berupa pengaitan satu manipulasi fisik, yaitu volume udara, dengan pembacaan spektrum dan argumentasi berbasis model. Kontribusi tersebut belum merupakan kebaruan empiris yang teruji. Pertanyaan pengembangan adalah: bagaimana merancang perangkat agar perubahan volume terhubung dengan bukti frekuensi secara jelas; bagaimana memeriksa konsistensi perhitungan sebelum pengukuran; sumber ketidakpastian apa yang dominan pada pengukuran yang direncanakan; dan bukti apa yang diperlukan untuk menilai kelayakan teknis serta pendidikan kit. Tujuannya menghasilkan paket awal yang dapat diperiksa dan diuji lebih lanjut, beserta anggaran ketidakpastian yang mengarahkan pengukuran, bukan menyimpulkan peningkatan hasil belajar.

METODE PENELITIAN

Lingkup pengembangan dan bukti yang tersedia

Kerangka ADDIE dipakai sebagai acuan urutan kerja, dan naskah ini hanya melaporkan tahap analisis dan desain. Penggunaan kerangka ini mengikuti konteks pengembangan media gelombang bunyi pada Oksaviona et al. (2023), tanpa menyatakan seluruh tahap telah terlaksana. Analisis bersifat analisis dokumen terhadap bahan tugas dan sumber terpublikasi; tidak ada survei kebutuhan sekolah, responden, lokasi penelitian, atau pengamatan kelas, sehingga kebutuhan kelas XI belum terdokumentasi dan dinyatakan sebagai keterbatasan. Tahap desain menghasilkan spesifikasi, alur kegiatan, dan kisi-kisi evaluasi. Pengembangan terbatas pada berkas perangkat pembelajaran dan simulasi; perakitan fisik, implementasi kelas, dan evaluasi oleh ahli, guru, dan siswa belum dilakukan dan menjadi tahap berikutnya. Dengan demikian naskah ini berjenis rancangan dan simulasi teoretis, bukan penelitian pengembangan lengkap.

Unit yang diperiksa saat ini adalah dokumen perangkat dan keluaran perhitungan. Populasi sasaran penggunaan adalah siswa kelas XI SMA yang mempelajari gelombang bunyi, sedangkan sampel penelitian belum ditetapkan karena tahap implementasi belum dilaksanakan; rencana penilai dan peserta dirinci pada subbagian Simulasi dan rencana evaluasi. Penelusuran dilakukan pada 16 Oktober 2026 dan substansi rujukan dibatasi hingga 31 Maret 2026; basis data dan kata kunci tidak dicatat secara sistematis sehingga penelusuran ini tidak dapat direproduksi sepenuhnya. Rentang artikel jurnal utama mengikuti Maret 2021–Maret 2026. Penelusuran ini bersifat terarah untuk pengembangan produk, bukan tinjauan sistematis.

Penilaian penalaran eksperimen dibedakan dari penilaian kelayakan produk. Pollard et al. (2021) mengidentifikasi kebutuhan asesmen ketidakpastian yang berpijak pada tujuan pembelajaran. Vignal et al. (2023) mengembangkan Survey of Physics Reasoning on Uncertainty Concepts in Experiments (SPRUCE) dengan pendekatan evidence-centered design. Geschwind et al. (2024) melaporkan bukti validitas dan reliabilitas instrumen tersebut pada praktikum fisika perguruan tinggi. SPRUCE menjadi rujukan instrumen yang memiliki bukti validasi terpublikasi, tetapi belum diadministrasikan pada penelitian ini. Penerjemahan atau adaptasi untuk SMA memerlukan pemeriksaan bahasa, kesesuaian kompetensi, ketentuan akses, dan bukti penggunaan lokal; skor maupun butir tertutup instrumen tidak direproduksi di sini.

Model fisika dan variabel

Model frekuensi dituliskan sebagai $f_H = c/(2\pi) \times \sqrt{[A/(V\ L_{eff})]}$, dengan $A = \pi r^2$ dan $L_{eff} = L + \alpha r$. Besaran f_H adalah frekuensi resonansi (Hz), c cepat rambat bunyi (m/s), A luas penampang dalam leher (m^2), V volume udara rongga (m^3), L panjang geometris leher (m), dan α koefisien koreksi ujung total tanpa dimensi. Formulasi dasar dan kebutuhan mempertimbangkan panjang efektif konsisten dengan panduan DigiPhysLab (2023). Koreksi ujung menggambarkan keterlibatan udara di sekitar kedua batas leher, sehingga α bergantung pada geometri dan kondisi batas. Nilai $\alpha = 1{,}4$ hanya digunakan sebagai asumsi contoh, bukan konstanta universal untuk semua botol. Secara teoretis, koreksi ujung tiap ujung leher berkisar sekitar 0,6r (ujung bebas tanpa flensa) hingga 0,85r (ujung berflensa), sehingga α total berada pada rentang sekitar 1,2 hingga 1,7 (Kinsler et al., 2000); nilai 1,4 dipilih sebagai nilai tengah asumsi.

Definisi volume harus konsisten: V dalam simulasi adalah rongga utama di bawah leher, sedangkan udara leher dimodelkan sebagai massa yang bergerak. Pengukuran kapasitas seluruh botol sampai bibir perlu dikurangi volume leher sebelum digunakan sebagai pendekatan rongga utama. Batas antara rongga dan leher harus ditandai dan didokumentasikan. Untuk botol berbahu landai, ketidakjelasan batas ini menjadi sumber ketidakpastian model. Permukaan air pada kegiatan utama harus tetap berada di rongga dan di bawah pangkal leher. Spesifikasi botol mencatat kapasitas rongga di bawah pangkal leher (V total) dan volume air pada tiap kondisi, sehingga V udara = V total - V air. Rentang udara 150-500 mL mensyaratkan kapasitas rongga sekurang-kurangnya 500 mL, dengan volume air antara 0 dan (V total - 150) mL.

Variabel manipulasi adalah volume udara rongga, sedangkan besaran respons rencana adalah frekuensi puncak dominan yang konsisten dengan mode resonansi. Botol, diameter dan panjang leher, posisi mikrofon, cara menopang botol, aplikasi, serta pengaturan analisis dijaga tetap. Jarak awal mikrofon direncanakan 20 cm dari mulut botol dan di luar aliran tiupan langsung. Jarak ini

merupakan pilihan operasional yang perlu diuji, bukan standar kalibrasi. Uji awal merancang variasi jarak 10, 20, dan 30 cm serta dua posisi sudut mikrofon; konfigurasi dipilih yang memberi puncak dominan stabil dengan simpangan baku terkecil pada lima ulangan. Suhu ruang dicatat dengan termometer pada setiap seri dan c dihitung dari suhu terukur ($c \approx 331{,}3 + 0{,}606T$ m/s, T dalam °C). Karena f sebanding dengan c, selisih 5 °C menggeser prediksi sekitar 0,9%; nilai c = 343 m/s pada simulasi hanya asumsi untuk suhu sekitar 20 °C.

Model pendekatan berlaku ketika dimensi rongga relatif kecil terhadap panjang gelombang, dinding cukup kaku, amplitudo gangguan kecil, dan kehilangan energi serta rincian aliran tidak mendominasi. Model tidak berlaku otomatis pada botol yang dipukul, rongga yang hampir habis terisi air, atau keadaan dengan puncak akibat *noise* tiupan. Penyimpangan dari kurva harus diperiksa sebagai persoalan geometri, model, atau pengukuran; data tidak diubah agar mengikuti teori.

Perangkat dan prosedur pengukuran yang direncanakan

Kit fisik direncanakan memuat satu botol kaca utuh berleher tetap, air, gelas ukur, penggaris, penyangga antiselip, dan *smartphone*. Tidak ada klaim harga karena belum dilakukan pengadaan. Penggaris digunakan untuk ukuran awal, sementara ketelitian diameter dalam yang terbatas perlu dilaporkan dan dapat diperbaiki menggunakan jangka sorong bila tersedia. Aplikasi dipilih berdasarkan kemampuan merekam atau menampilkan spektrum pada tanggal penelusuran. Panduan DigiPhysLab (2023) telah menyebut phyphox dan Physics Toolbox Sensor Suite, sehingga pilihan tersebut tidak bergantung pada fitur yang baru muncul setelah panduan tersebut terbit. Versi aplikasi dan sistem operasi yang benar-benar digunakan wajib dicatat saat pengukuran.

Operator meniup melintasi mulut botol, tanpa memasukkan bibir atau memukul dinding botol. Setiap volume direncanakan memiliki lima rekaman terpisah dengan penataan tetap. Target rekaman stabil sekurang-kurangnya dua detik per ulangan perlu dikonfirmasi dalam uji awal. Rekaman latar tanpa tiupan diambil sebelum seri pengukuran. Spektrum ditelaah untuk menghindari pemilihan puncak *noise*, harmonik, atau sinyal yang terpotong. Frekuensi dominan tidak ditentukan semata-mata oleh puncak amplitudo tertinggi tanpa pemeriksaan perubahan puncak antarkondisi.

Ukuran jendela FFT, laju pencuplikan, dan jenis jendela dicatat bila aplikasi menampilkannya. Jarak bin frekuensi nominal adalah $\Delta f = f_s/N$; contoh $f_s = 44.100$ Hz dan $N = 16.384$ memberikan Δf sekitar 2,69 Hz. Contoh ini bukan konfigurasi perangkat yang sudah diuji. *Zero-padding* hanya memperhalus tampilan spektrum dan tidak menambah informasi waktu rekaman. Amplitudo aplikasi diperlakukan sebagai besaran relatif; *smartphone* tidak dinyatakan sebagai pengukur intensitas atau *sound level meter* terkalibrasi.

Botol diperiksa dari retak, ditempatkan di atas alas stabil, dan dijauhkan dari tepi meja. Pengisian air dilakukan terpisah dari telepon. Satu operator ditetapkan untuk satu botol, tanpa kontak mulut dan tanpa penggunaan bergantian melalui kontak oral. Guru mengawasi penanganan kaca. Peserta yang tidak dapat atau tidak nyaman meniup tetap dapat berperan sebagai pencatat atau analis. Pelaksanaan harus dihentikan jika terdapat risiko pecah, tumpahan, atau ketidaknyamanan peserta.

Simulasi dan rencana evaluasi

Simulasi deterministik menggunakan r = 0,010 m, L = 0,050 m, α = 1,4, dan c = 343 m/s. Volume rongga asumsi adalah 150, 200, 250, 300, 400, dan 500 mL, dikonversi dengan $1\ \text{mL} = 10^{-6}\ \text{m}^3$. Tidak ada penambahan *noise* atau pengacakan. Perhitungan juga membandingkan α = 0, 1,0, dan 1,7 sebagai pemeriksaan sensitivitas. Pemeriksaan fungsi meliputi nilai positif, kecenderungan monoton, rasio frekuensi pada penggandaan volume, dan konsistensi f_H^2V. Pemeriksaan tersebut hanya menilai implementasi perhitungan.

Untuk analisis ketidakpastian, ketidakpastian relatif frekuensi dipisahkan dari ketidakpastian prediksi model dengan propagasi orde pertama. Jika r, L, V, c, dan α dianggap saling bebas, $(u_f/f)^2 = (u_c/c)^2 + [(1/r - \alpha/(2L_eff))u_r]^2 + [u_V/(2V)]^2 + [u_L/(2L_eff)]^2 + [r\ u_\alpha/(2L_eff)]^2$. Persamaan ini diturunkan dari model pada naskah ini dengan memperhitungkan bahwa r memengaruhi luas leher sekaligus koreksi ujung, sehingga A dan L_eff tidak diperlakukan sebagai besaran bebas. Besaran u menyatakan ketidakpastian standar. Pada simulasi, u diasumsikan sesuai resolusi alat yang direncanakan (Tabel 3) dan bukan hasil pengukuran; pada pengukuran nyata, u harus berdasar spesifikasi alat atau pengulangan. Ketidakpastian bentuk model dan aliran tiupan yang kompleks tidak tercakup dalam propagasi parameter.

Evaluasi ahli yang direncanakan memakai aspek pedagogi, materi, dan media yang diadaptasi pada tingkat konstruk dari Oksaviona et al. (2023). Kisi-kisi memuat tiga aspek: pedagogi (kesesuaian tujuan, alur prediksi-observasi-penjelasan, dan keterbacaan LKPD), materi (kebenaran model Helmholtz, batas keberlakuan, dan penanganan ketidakpastian), serta media dan keselamatan (kejelasan spesifikasi botol dan penataan, keselamatan penanganan kaca, dan kebersihan). Butir khusus resonansi, pembacaan spektrum, dan keselamatan disusun untuk kit ini dan belum divalidasi. Penelaahan direncanakan oleh sekurang-kurangnya lima penilai, yaitu ahli fisika, ahli pembelajaran atau media, dan guru fisika SMA, dengan kompetensi yang didokumentasikan. Penilaian skala 1-5 diringkas per butir menggunakan $V = \Sigma(r_i - 1)/[n(5 - 1)]$, dengan n jumlah penilai dan r_i skor penilai ke-i. Butir dinyatakan layak bila V mencapai batas minimum pada tabel kritis indeks Aiken untuk jumlah penilai dan kategori yang dipakai; butir di bawah batas direvisi berdasarkan komentar penilai lalu dinilai ulang. Kit dinyatakan layak diujicobakan bila seluruh butir keselamatan memenuhi batas tersebut.

Uji teknis fisik berikutnya perlu menyimpan rekaman, spektrum, ukuran geometri, volume, dan alasan pengulangan atau penolakan rekaman. Analisis yang direncanakan meliputi rerata frekuensi dan simpangan baku per volume, galat relatif terhadap model, serta grafik f^2 terhadap 1/V dengan intersep bebas. Kelurusan ideal tidak menjadi ukuran efektivitas pembelajaran. Untuk siswa, evaluasi awal diarahkan pada keterbacaan LKPD, keberhasilan mengikuti prosedur, dan kualitas penjelasan. Uji ini direncanakan pada satu kelas XI dengan kelompok kecil (tiga sampai empat siswa) yang dipilih secara purposif berdasarkan kesediaan guru dan izin sekolah, dengan jumlah kelompok ditetapkan sesuai izin. Uji efektivitas dengan kelompok pembanding memerlukan rancangan dan instrumen tersendiri. Izin sekolah, persetujuan orang tua/wali dan *assent* sesuai konteks, serta perlindungan data harus dipenuhi sebelum pengumpulan data peserta anak. Pada tahap ini belum ada pelibatan peserta manusia atau pengumpulan data siswa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

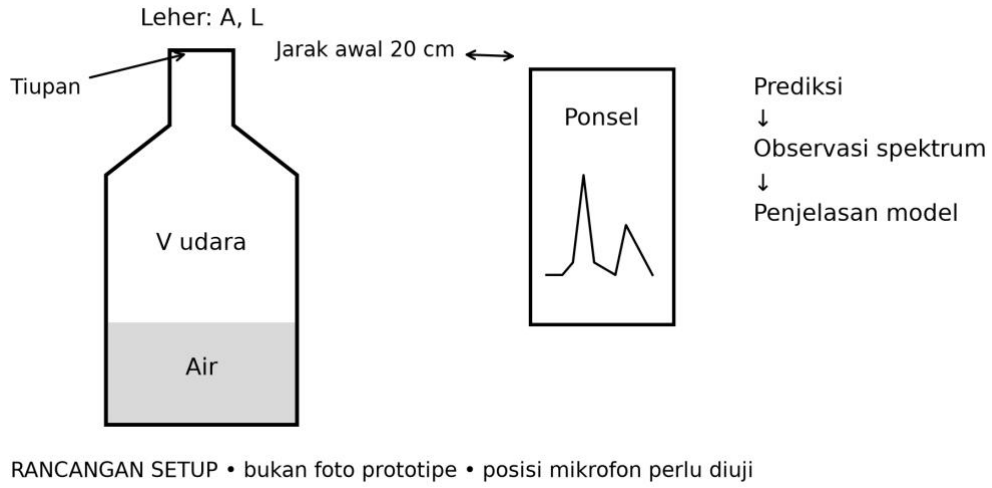
Hasil perancangan perangkat

Luaran tahap desain berupa dokumen spesifikasi kit, petunjuk penggunaan, LKPD, panduan spektrum, lembar pengukuran kosong, instrumen evaluasi awal, dan simulasi teori. Dokumen lengkap tidak dilampirkan pada naskah ini. Tidak ada foto prototipe, hasil pengukuran mikrofon, atau tanggapan validator karena kegiatan tersebut belum dilakukan. Tabel 1 menghubungkan komponen produk dengan tujuan belajar dan bukti yang perlu dikumpulkan.

Tabel 1 Pemetaan komponen produk dan bukti evaluasi

Komponen	Tujuan	Bukti yang diperlukan
Botol, air, ukuran leher	Mengendalikan V dan geometri	Dimensi dan volume aktual
Panduan spektrum	Membedakan f dan amplitudo	Rekaman latar dan ulangan
LKPD prediksi–observasi–penjelasan	Menghubungkan bukti dan model	Jawaban serta proses siswa
Simulasi teori	Memeriksa prediksi dan asumsi	Parameter dan log hitung
Kisi-kisi evaluasi	Menelaah kelayakan produk	Skor dan komentar ahli, belum ada

Gambar 1 menggambarkan rancangan penataan alat dan hubungan antara manipulasi volume dengan analisis spektrum. Diagram merupakan ilustrasi desain, bukan dokumentasi eksperimen. Aktivitas dimulai dari prediksi arah perubahan frekuensi, dilanjutkan pencatatan bukti spektrum, lalu penjelasan dengan model. Siswa diminta membedakan pernyataan “nada lebih tinggi” dari “sinyal lebih kuat”, sehingga penjelasan tidak hanya mengandalkan kesan pendengaran.



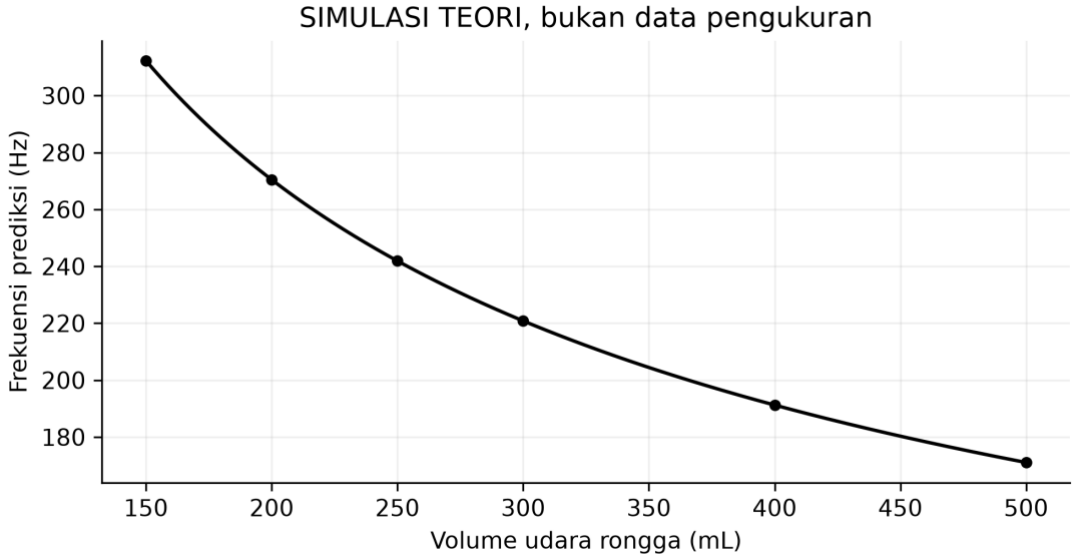
Gambar 1 Rancangan penataan kit, bukan prototipe fisik

Hasil simulasi dan pemeriksaan fungsi

Luas penampang hasil perhitungan adalah $3{,}1416 \times 10^{-4}$ m² dan panjang efektif asumsi 0,064 m. Tabel 2 menyajikan hasil simulasi. Gambar 2 menunjukkan kurva frekuensi terhadap volume udara dengan parameter yang sama. Angka tersebut tidak merepresentasikan botol tertentu yang sudah dibuat.

Tabel 2 Frekuensi hasil simulasi teori, bukan data eksperimen

V udara (mL)	L efektif (m)	f prediksi (Hz)
150	0,064	312
200	0,064	270
250	0,064	242
300	0,064	221
400	0,064	191
500	0,064	171



Gambar 2 Kurva simulasi teori dengan r = 10 mm, L = 50 mm, α = 1,4 dan c = 343 m/s

Pada volume 150 mL, frekuensi prediksi sekitar 312 Hz, sedangkan pada 500 mL sekitar 171 Hz. Ketika volume bertambah dua kali dari 150 ke 300 mL, rasio frekuensi mendekati 0,7071. Hasil ini mengikuti bentuk $V^{-1/2}$ dan menjadi pemeriksaan konsistensi perhitungan, bukan penemuan empiris. Dalam arah kegiatan pengisian air, volume udara justru mengecil, sehingga model memprediksi frekuensi meningkat. Arah perubahan air dan udara perlu dinyatakan eksplisit agar siswa tidak keliru membaca tabel.

Mengabaikan koreksi ujung pada parameter contoh menghasilkan prediksi frekuensi sekitar 13,14% lebih tinggi daripada $\alpha = 1{,}4$ untuk seluruh volume. Pada 300 mL, variasi α dari 1,0 hingga 1,7 memberikan kisaran prediksi sekitar 228 hingga 216 Hz. Sensitivitas ini menunjukkan bahwa kecocokan angka tidak patut ditafsirkan tanpa menyatakan asumsi panjang efektif. Koefisien koreksi tidak boleh disetel hanya untuk memperoleh hasil yang tampak paling sesuai, kemudian disebut sebagai verifikasi independen model.

Pemeriksaan fungsi menunjukkan bahwa implementasi perhitungan konsisten dengan persamaan: frekuensi positif, menurun ketika volume membesar, dan f^2V tetap dalam toleransi aritmetika. Pemeriksaan ini hanya memverifikasi perhitungan dan bukan temuan fisika. Sensitivitas mikrofon, ketepatan puncak spektrum rekaman nyata, keterulangan tiupan, dan perbandingan antar*smartphone* belum diperiksa dan merupakan pekerjaan eksperimental yang berbeda dari pemeriksaan kalkulator teori. Skrip perhitungan dan log pemeriksaan tidak dilampirkan pada naskah ini.

Tabel 3 menyajikan anggaran ketidakpastian pada V = 250 mL berdasarkan persamaan propagasi pada subbagian Simulasi dan rencana evaluasi. Ketidakpastian standar yang dipakai adalah asumsi sesuai resolusi alat yang direncanakan, bukan hasil pengukuran. Jari-jari leher memberi kontribusi terbesar (sekitar 4,5%), jauh di atas jarak bin 2,69 Hz (sekitar 1,1% pada 242 Hz) dan di atas kontribusi tiap sumber lain. Bila diameter dalam leher diukur dengan jangka sorong ($u_r = 0{,}05$ mm), kontribusi r turun menjadi sekitar 0,45% dan ketidakpastian gabungan menjadi sekitar 2,1%, sehingga koreksi ujung (sekitar 1,6%) menjadi sumber dominan. Dengan demikian, kecocokan antara frekuensi terukur dan prediksi dalam kisaran beberapa persen tidak dapat dipakai untuk menguji model tanpa memperkecil ketidakpastian geometri dan menyatakan nilai α.

Tabel 3 Anggaran ketidakpastian relatif frekuensi pada V = 250 mL dengan ketidakpastian standar asumsi

Sumber	Ketidakpastian standar (asumsi)	Kontribusi relatif pada f (%)
Cepat rambat bunyi (c)	1,2 m/s (suhu ± 2 °C)	0,35
Jari-jari leher (r)	0,50 mm (penggaris)	4,45
Volume udara (V)	5 mL (gelas ukur)	1,00
Panjang leher (L)	1,0 mm	0,78
Koreksi ujung (α)	0,2	1,56
Gabungan	-	4,9 (sekitar 12 Hz)

Bentuk f sebanding dengan V^(-1/2) pada simulasi ini sejalan dengan prinsip yang dipakai Zhang et al. (2024) untuk pengukuran volume wadah dan Zhai et al. (2023) untuk pengukuran cepat rambat bunyi. Perbandingan kuantitatif dengan nilai terukur pada kedua studi tidak dilakukan karena parameter simulasi di sini adalah asumsi, bukan dimensi wadah pada studi tersebut. Temuan Gasparini et al. (2026) bahwa penggunaan perangkat bergerak tidak otomatis memberi keunggulan belajar mengingatkan bahwa kelayakan teknis kit tidak berarti efektivitas pembelajaran.

Rujukan acuan evaluasi dari penelitian terpublikasi

Penelitian terdahulu dipakai sebagai acuan penyusunan aspek evaluasi dan kebutuhan bukti, bukan sebagai validasi kit ini. Oksaviona et al. (2023) melaporkan indeks Aiken rata-rata 0,86 pada produk multimedia gelombang bunyi mereka. Nilai itu dicantumkan sebagai hasil penelitian terdahulu, bukan hasil kit ini. Adaptasi konstruk pedagogi, materi, dan media menghasilkan kisi-kisi awal; perubahan konteks menjadi kit akustik memerlukan penilaian ulang terhadap butir, terutama keselamatan kaca, geometri leher, dan pembacaan spektrum. Validasi produk lain tidak berpindah otomatis ketika indikatornya diadaptasi.

Kaps dan Stallmach (2022) memberi contoh evaluasi tugas eksperimen *smartphone* yang memperhatikan tujuan konseptual dan pengalaman belajar. Ini mendukung rencana menilai proses penggunaan kit, tetapi instrumen mekanika mereka tidak langsung menjadi tes resonansi. Sementara itu, penelitian Zhai et al. (2023) dan Zhang et al. (2024) menyediakan bukti bahwa prinsip resonansi dapat digunakan dalam eksperimen *smartphone*. Bukti tersebut mendukung kelayakan pendekatan secara umum dan tidak memastikan kualitas botol, aplikasi, atau prosedur yang akan digunakan di sini.

Staacks et al. (2022) membahas pengumpulan data eksperimen *smartphone* secara kolaboratif. Dalam pengembangan berikutnya, gagasan itu relevan bagi pengumpulan berkas dari kelompok tanpa menggabungkan rekaman yang tidak jelas asalnya. Namun, paket awal ini tetap memakai pencatatan lokal dan satu penataan tetap agar sumber variasi mudah ditelusuri. Identitas perangkat, versi aplikasi, dan nama berkas rekaman perlu dicantumkan dalam lembar data sebelum dilakukan perbandingan antarkelompok.

Implikasi kerangka asesmen dan ketidakpastian bagi rancangan

Ketonen et al. (2023) membedakan sasaran dan praktik penilaian dalam praktikum serta mengidentifikasi ruang bagi penilaian formatif dan keterlibatan siswa. Dalam kit ini, prinsip tersebut diterjemahkan sebagai pemeriksaan alasan prediksi, umpan balik atas pemilihan puncak, dan revisi penjelasan setelah siswa membandingkan bukti. Hasil akhir LKPD tidak menjadi satu-satunya bukti: catatan keputusan eksperimen dan alasan pengulangan juga diperlukan. Rancangan ini merupakan implikasi desain, bukan hasil penerapan model asesmen pada siswa.

Lu et al. (2023) menelaah integrasi pengetahuan dalam pembelajaran ketidakpastian pengukuran. Implikasinya bagi paket ini adalah meminta siswa menjelaskan mengapa hasil ulangan menyebar dan mengapa perbedaan terhadap teori tidak cukup dilabeli sebagai kesalahan manusia. SPRUCE menyediakan contoh instrumen dengan bukti pengembangan dan validasi yang terdokumentasi (Vignal et al., 2023; Geschwind et al., 2024). Namun, instrumen penalaran ketidakpastian mengukur konstruk yang berbeda dari kelayakan botol, keselamatan, atau kepraktisan LKPD. Oleh sebab itu, evaluasi produk tetap menggunakan penilaian ahli dan uji penggunaan tersendiri.

Keterbatasan dan kebutuhan penyelesaian

Batas utama penelitian ini adalah tidak tersedianya kit fisik dan data pengujian. Analisis kebutuhan belum melibatkan sekolah, spesifikasi dimensi bersifat asumsi, dan biaya belum diverifikasi. Satu nilai koreksi ujung tidak mewakili seluruh geometri botol. Efek tiupan, resonansi ruangan, respons mikrofon, kompresi audio, serta pemilihan segmen stabil belum diukur. Karena itu, hasil yang tersedia hanya cukup untuk menilai kelengkapan rancangan dan konsistensi simulasi.

Bagian empiris perlu dilengkapi secara spesifik dengan dimensi dan dokumentasi botol; enam seri volume dan lima ulangan per seri jika layak; rekaman serta spektrum yang dapat diaudit; daftar revisi dari ahli; dan hasil uji keterbacaan atau keterlaksanaan sesuai izin. Selama tahap itu belum dikerjakan, naskah ini berstatus rancangan dan simulasi teoretis. Klaim “valid”, “praktis”, “efektif”, atau “meningkatkan hasil belajar” belum dapat digunakan sebagai kesimpulan produk ini.

KESIMPULAN

Rancangan paket awal kit resonansi Helmholtz berbantuan *smartphone* telah disusun pada tingkat desain, perangkat pembelajaran, dan simulasi teori. Rancangan menghubungkan perubahan volume udara, pemilihan puncak spektrum, dan penjelasan menggunakan model frekuensi. Untuk parameter asumsi, anggaran ketidakpastian menunjukkan bahwa ukuran jari-jari leher merupakan sumber galat terbesar (sekitar 4,5% dengan penggaris), sehingga pengukuran geometri dengan jangka sorong dan penetapan koreksi ujung perlu didahulukan. Hasil simulasi tidak membuktikan akurasi kit fisik atau dampak pendidikan. Langkah berikutnya adalah merakit kit dan mengukur spektrum dengan lima ulangan per volume, menilai kit bersama ahli dan guru, serta menguji keterbacaan LKPD dengan izin yang diperlukan.

KONTRIBUSI PENULIS

Suciati Rahayu Widyastuti[1], Reza Rahmadi Hasibuan[2], Gemah Elgy Valerino[3]: Conceptualization, Methodology, Investigation, Formal analysis, Writing - original *draft*, dan Writing - review and editing. Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi akhir dari naskah ini.

PERNYATAAN KETERSEDIAAN DATA

Data yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia dari para penulis atas permintaan yang wajar, dengan mempertimbangkan persetujuan etik dan peraturan institusi yang berlaku.

PERNYATAAN BEBAS KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat mempengaruhi hasil yang dilaporkan dalam naskah ini.

PERNYATAAN ETIKA PENELITIAN DAN PUBLIKASI

Para penulis menyatakan bahwa penelitian dan penulisan naskah ini telah mematuhi standar etika penelitian dan publikasi, sesuai dengan prinsip ilmiah, serta bebas dari plagiasi.

PERNYATAAN PEMANFAATAN TEKNOLOGI ASISTIF

Para penulis menyatakan bahwa Kecerdasan Buatan Generatif (*Generative Artificial Intelligence*) dan teknologi asistif lainnya tidak digunakan secara berlebihan dalam proses penelitian dan penulisan naskah ini. Secara khusus, Codex digunakan untuk membantu penelusuran sumber, penyusunan draf, pembuatan perangkat pembelajaran, serta penyiapan perhitungan dan visualisasi; Python digunakan untuk menjalankan perhitungan simulasi. Para penulis telah meninjau dan menyunting semua konten yang dihasilkan AI guna memastikan ketepatan, kelengkapan, serta kepatuhan terhadap standar etika dan ilmiah. Tim penulis bertanggung jawab penuh atas naskah versi akhir.

REFERENSI

Barro, S., Beguin, C., Brouzet, D., Charosky, L., Darmendrail, L., & Müller, A. (2023). *Smartphone* experiments in undergraduate research [Prapublikasi, versi 1]. arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07483

DigiPhysLab. (2023, January 12). How to model a bottle? Instructor version. University of Jyväskylä. https://www.jyu.fi/sites/default/files/2023-06/How_to_model_a_bottle_Instructor.pdf

Gasparini, A., Stern, F., Delaval, M., & Müller, A. (2026). Using *smartphone*s and tablets as experimental tools in the physics classroom: Effects on learning and motivation. Physical Review Physics Education Research, 22(1), 010129. https://doi.org/10.1103/96gp-gqvj

Geschwind, G., Vignal, M., Caballero, M. D., & Lewandowski, H. J. (2024). Evidence for validity and reliability of a research-based assessment instrument on measurement uncertainty. Physical Review Physics Education Research, 20(2), 020125. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020125

Kaps, A., & Stallmach, F. (2022). Development and didactic analysis of *smartphone*-based experimental exercises for the smart physics lab. Physics Education, 57(4), 045038. https://doi.org/10.1088/1361-6552/ac68c0

Ketonen, L., Lehtinen, A., & Koskinen, P. (2023). Assessment designs of instructional labs: A literature review and a design model. Physical Review Physics Education Research, 19(2), 020601. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020601

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. (2000). Fundamentals of acoustics (4th ed.). John Wiley & Sons.

Lahme, S. Z., Dorsel, D., Heinke, H., Klein, P., Müller, A., Stampfer, C., & Staacks, S. (2025). Recitation tasks revamped? Students' perceptions of *smartphone*-based experimental and programming tasks in introductory mechanics. Physical Review Physics Education Research, 21(2), 020110. https://doi.org/10.1103/bwpv-z3xh

Lu, C., Liu, Y., Xu, S., Zhou, S., Mei, H., Zhang, X., Yang, L., & Bao, L. (2023). Conceptual framework assessment of knowledge integration in student learning of measurement uncertainty. Physical Review Physics Education Research, 19(2), 020145. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020145

Monteiro, M., & Martí, A. C. (2022). Resource Letter MDS-1: Mobile devices and sensors for physics teaching. American Journal of Physics, 90(5), 328–343. https://doi.org/10.1119/5.0073317

Oksaviona, V., Islami, N., & Nasir, M. (2023). Development of PBL-Based Sound Wave Interactive Multimedia Using Lumi for Class XI High School Students. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA, 9(10), 8008–8015. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i10.4426

Pollard, B., Hobbs, R., Henderson, R., Caballero, M. D., & Lewandowski, H. J. (2021). Introductory physics lab instructors' perspectives on measurement uncertainty. Physical Review Physics Education Research, 17(1), 010133. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010133

Staacks, S., Dorsel, D., Hütz, S., Stallmach, F., Splith, T., Heinke, H., & Stampfer, C. (2022). Collaborative *smartphone* experiments for large audiences with phyphox. European Journal of Physics, 43(5), 055702. https://doi.org/10.1088/1361-6404/ac7830

Vignal, M., Geschwind, G., Pollard, B., Henderson, R., Caballero, M. D., & Lewandowski, H. J. (2023). Survey of physics reasoning on uncertainty concepts in experiments: An assessment of measurement uncertainty for introductory physics labs. Physical Review Physics Education Research, 19(2), 020139. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.020139

Zhai, L.-p., Cheng, L., Zhang, J.-w., Chang, K.-g., & Tong, T. (2023). Using Helmholtz resonators to measure sound velocity based on *smartphone*. College Physics, 42(6), 40. https://doi.org/10.16854/j.cnki.1000-0712.220247

Zhang, D., Liu, Y., Wei, Q., Zhou, W., & Wang, L. (2024). Experimental design of vessel volume measurement based on Helmholtz resonance. Experiment Science and Technology, 22(5), 142–146. https://doi.org/10.12179/1672-4550.20240163