JIPFRI
https://journal.unuha.ac.id/index.php/JIPFRI

JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah)
Vol. 10 No. 2, November 2026, hlm. 251–270
p-ISSN 2549-905X | e-ISSN 2549-9076
https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5662

Pemetaan Kebutuhan dan Rancangan Konseptual kit STEM Berbasis Arduino-Internet of Things untuk Pembelajaran Fisika Eksperimen

Dian Pertiwi Rasmi*, Fadillah Rahmayani, Febrina Rosa Winda, dan Rahmi Putri Z.

Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Jambi, Jambi, Indonesia
*Penulis korespondensi: dianrasmi@unja.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima: 29/09/2026
Direvisi: 21/11/2026
Disetujui: 22/11/2026
Terbit: 29/11/2026

Kata kunci:
Analisis kebutuhan
Arduino-IoT
Design science research
Fisika eksperimen
Keterampilan proses sains
Kit STEM
Project-based learning

Keywords:
Arduino-IoT
Design science research
Experimental physics
Need analysis
Project-based learning
Science process skills
STEM kit

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan memetakan kebutuhan mahasiswa dalam pembelajaran fisika eksperimen dan mengonstruksi rancangan konseptual kit STEM berbasis Arduino-IoT. Penelitian menggunakan pendekatan *Design Science Research* yang dibatasi pada identifikasi masalah dan perancangan artefak. Data dikumpulkan dari 43 mahasiswa program studi pendidikan fisika di Universitas Jambi melalui angket, wawancara dosen, dan observasi praktikum. Hasil menunjukkan bahwa praktikum masih didominasi prosedur baku (rerata 3,84) dan pencatatan data manual (3,79). Meskipun rerata pengalaman dan kesiapan Arduino-IoT mencapai 3,94, kemampuan menginterpretasikan grafik sensor secara real-time masih relatif rendah (3,74). Kebutuhan terhadap fitur kit, aktivitas Project-Based Learning (PjBL), latihan keterampilan proses sains (KPS), dan perangkat pendukung masing-masing memperoleh rerata 4,10; 4,13; 4,19; dan 4,34. Temuan tersebut menghasilkan 12 design requirements yang diwujudkan dalam rancangan kit modular dengan dua skenario eksperimen inti, yaitu getaran-gelombang-bunyi serta kinematika-dinamika gerak. Evaluasi oleh tiga pakar menghasilkan nilai S-CVI/Ave sebesar 0,97. Rancangan ini menjadi dasar pengembangan kit praktikum fisika yang lebih investigatif dan terintegrasi dengan teknologi digital. Kelayakan dan efektivitasnya masih perlu diuji melalui implementasi prototipe.

ABSTRACT

This study aimed to map students' needs in experimental physics learning and to construct a conceptual design of an Arduino-IoT-based STEM kit. It used a Design Science Research approach limited to problem identification and artifact design. Data were collected from 43 physics education students at Universitas Jambi through a questionnaire, lecturer interviews, and laboratory observations. The results show that laboratory work is still dominated by standard procedures (average 3.84) and manual data recording (3.79). Although the average Arduino-IoT experience and readiness reached 3.94, the ability to interpret sensor graphs in real time was still relatively low (3.74). The needs for kit features, Project-Based Learning (PjBL) activities, science process skills (SPS) exercises, and supporting devices obtained averages of 4.10; 4.13; 4.19; and 4.34, respectively. These findings resulted in 12 design requirements that were realized in a modular kit design with two core experimental scenarios, namely vibration-wave-sound and kinematics-dynamics of motion. An evaluation by three experts yielded an S-CVI/Ave score of 0.97. These findings give instructors and kit developers a basis for designing more investigative, technology-integrated physics laboratories. The kit's feasibility and effectiveness remain to be tested through a prototype.

Cara mengutip: Rasmi, D. P., Rahmayani, F., Winda, F. R., & Z., R. P. (2026). Pemetaan kebutuhan dan rancangan konseptual kit STEM berbasis Arduino-Internet of Things untuk pembelajaran fisika eksperimen. *JIPFRI (Jurnal Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), 10*(2), 251–270. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5662
Copyright © 2026 Penulis. Artikel akses terbuka di bawah lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0).

PENDAHULUAN

Praktikum merupakan bagian penting dalam pembelajaran fisika karena memungkinkan mahasiswa menghubungkan konsep teoretis dengan fenomena yang dapat diamati dan diukur. Namun, praktikum yang berorientasi pada prosedur baku berpotensi membatasi keterlibatan mahasiswa dalam merancang eksperimen dan mengambil keputusan ilmiah. La Braca dan Kalman (2021) membahas keterbatasan praktikum tradisional dalam mendukung keterlibatan konseptual mahasiswa, sedangkan Cai et al. (2021) melaporkan pentingnya kesempatan mahasiswa dalam merancang eksperimen. Temuan tersebut mengindikasikan perlunya kegiatan praktikum yang

tidak hanya berorientasi pada pelaksanaan prosedur, tetapi juga mendukung proses penyelidikan ilmiah.

Perkembangan teknologi digital membuka peluang untuk meningkatkan kualitas praktikum melalui pemanfaatan mikrokontroler dan sensor. Arduino memungkinkan akuisisi data eksperimen secara otomatis, sedangkan integrasi *Internet of Things* (IoT) mendukung pengiriman dan pemantauan data secara digital (Ga et al., 2021; Organtini & Tufino, 2022). Penerapannya dalam praktikum fisika mencakup penggunaan Arduino dan modul sensor untuk mendukung aktivitas pengukuran dan penalaran mahasiswa (Hadiati et al., 2021), serta pengembangan berbagai eksperimen pengukuran menggunakan sensor (Uzal, 2022). Tinjauan sistematis Saramati et al. (2026) terhadap 38 penelitian empiris melaporkan bahwa mikrokontroler telah dimanfaatkan dalam pembelajaran fisika pada berbagai topik, seperti mekanika, termodinamika, elektromagnetisme, dan optika. Meskipun mendukung pengukuran dan visualisasi data secara *real-time*, penerapannya masih menghadapi tantangan teknis dan pedagogis, termasuk kalibrasi perangkat, debugging, pelatihan pengajar, dan pemeliharaan.

Sejumlah penelitian telah mengembangkan Arduino dan IoT untuk kegiatan eksperimen fisika. Çoban dan Salar (2023) menggunakannya untuk analisis grafik kinematika, sedangkan Wahyudi et al. (2024) mengembangkan alat peraga digital berbasis IoT pada materi dinamika gerak. Integrasi Arduino dengan pembelajaran berbasis proyek juga dilaporkan oleh Taufik dan Hikmawati (2025) melalui proyek pengembangan alat ukur fisika, serta Riskawati et al. (2026) melalui pengembangan modul elektronika berbasis sensor. Sementara itu, Rasmi et al. (2023, 2026) mengkaji pemanfaatan Arduino-IoT melalui pengembangan 3C-STEMLAB dan STEMLAB fisika. Penelitian tersebut memperlihatkan beragam pemanfaatan mikrokontroler dalam eksperimen dan pembelajaran fisika, mulai dari pengembangan perangkat hingga penerapan dan evaluasi pembelajaran.

Pemanfaatan teknologi dalam praktikum perlu didukung kerangka pedagogis agar perangkat tidak hanya berfungsi sebagai alat ukur. Integrasi STEM menghubungkan sains, teknologi, rekayasa, dan matematika dalam pemecahan masalah kontekstual (Kelley & Knowles, 2016). Dalam penelitian ini, prinsip PjBL dioperasionalkan ke dalam lima fase kegiatan proyek, yaitu pertanyaan esensial, perencanaan proyek, pengembangan artefak, presentasi, dan evaluasi. Kelima fase tersebut merupakan operasionalisasi kegiatan pembelajaran yang digunakan dalam rancangan kit berdasarkan karakteristik PjBL, seperti pertanyaan pemandu, penyelidikan, kolaborasi, pemanfaatan teknologi, dan pengembangan artefak (Krajcik & Shin, 2014; Markula & Aksela, 2022). Kegiatan tersebut diarahkan untuk melatihkan keterampilan proses sains (KPS).

Keterampilan proses sains (KPS) merupakan kemampuan yang mencerminkan aktivitas ilmiah dan mendukung peserta didik dalam membangun pengetahuan melalui penyelidikan. Rezba et al. (2007) mengelompokkan KPS menjadi dua kategori, yaitu keterampilan proses dasar (basic science process skills) dan keterampilan proses terintegrasi (integrated science process skills). Dalam konteks praktikum fisika eksperimen, kedua kategori tersebut dioperasionalkan dalam penelitian ini ke dalam enam kelompok aktivitas, yaitu (1) merumuskan masalah dan hipotesis; (2) menentukan variabel dan merancang prosedur; (3) melakukan pengukuran dan pengambilan data; (4) mengolah dan menyajikan data; (5) menafsirkan data dan menarik simpulan; serta (6) mengomunikasikan hasil eksperimen.

Analisis kebutuhan merupakan tahap penting untuk memastikan kesesuaian produk dengan kebutuhan pengguna. Rahmayani et al. (2021) menganalisis kebutuhan aplikasi LKPD berbasis STEM, sedangkan Rasmi et al. (2023) mengidentifikasi kebutuhan e-modul STEM berdasarkan perspektif guru. Rasmi et al. (2026) mengkaji persepsi mahasiswa terhadap Arduino-IoT dan mengembangkan prototipe STEMLAB yang diuji secara terbatas. Berbeda dari fokus tersebut, penelitian ini diarahkan pada penerjemahan kebutuhan mahasiswa menjadi persyaratan desain kit praktikum fisika eksperimen.

Dalam penelitian ini, pemetaan kebutuhan dilakukan sebagai tahap awal untuk memperoleh gambaran kondisi praktikum, pengalaman dan kesiapan mahasiswa terhadap Arduino-IoT, kebutuhan fitur kit, kebutuhan aktivitas PjBL, kebutuhan latihan keterampilan proses sains, serta perangkat pendukung pembelajaran. Hasil

pemetaan tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam *design requirements* dan digunakan untuk mengonstruksi konsep kit STEM berbasis Arduino-IoT. Proses tersebut ditempatkan dalam kerangka *Design Science Research* (DSR), yang memungkinkan permasalahan pembelajaran diterjemahkan secara sistematis menjadi spesifikasi dan rancangan artefak (Weigand et al., 2021).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini mengkaji kondisi praktikum dan kesiapan mahasiswa menggunakan Arduino-IoT, kebutuhan terhadap fitur kit, aktivitas PjBL, keterampilan proses sains, serta perangkat pendukung pembelajaran. Hasil pemetaan tersebut diterjemahkan menjadi 12 design requirements untuk mengonstruksi rancangan konseptual kit STEM berbasis Arduino-IoT dalam kerangka Design Science Research (DSR) (Weigand et al., 2021). Rancangan mencakup sistem sensor modular, akuisisi dan visualisasi data, skenario eksperimen, aktivitas PjBL, latihan keterampilan proses sains, serta perangkat pendukung. Validitas isi rancangan dievaluasi oleh tiga pakar menggunakan CVI. Penelitian ini dibatasi pada konstruksi dan evaluasi rancangan konseptual sebagai dasar pengembangan serta pengujian prototipe pada tahap berikutnya.

METODE

Penelitian ini mengadopsi kerangka *Design Science Research* (DSR) yang dibatasi pada dua aktivitas awal, yaitu *problem identification and motivation* serta *design and development of artifact*. Aktivitas pertama analisis kebutuhan berupa identifikasi kondisi praktikum fisika eksperimen dan kebutuhan mahasiswa sebagai dasar pengembangan kit. Aktivitas kedua berfokus pada penerjemahan hasil pemetaan kebutuhan menjadi *design requirements* dan rancangan artefak konseptual kit STEM berbasis PjBL-Arduino-IoT. Adapun hasil dari aktivitas tersebut berupa pemetaan analisis kebutuhan dan rancangan konseptual tervalidasi pakar.

Populasi sasaran adalah seluruh mahasiswa yang sedang atau telah menempuh mata kuliah Metode Eksperimen Fisika, yaitu 50 mahasiswa semester 5 dan 7. Tautan angket dibagikan kepada seluruh populasi tersebut melalui grup WhatsApp kelas dan LMS, dan 43 mahasiswa mengisi secara lengkap (tingkat respons 43/50 × 100 = 86,0%). Jumlah ini melampaui target minimum 15-20 responden yang ditetapkan pada rancangan penelitian. Secara lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 1. Mahasiswa yang mengisi angket disebut sebagai responden, otomatis menjadi sampel dalam penelitian. Adapun angket diisi secara daring pada 27-28 Agustus 2026. Sebagian besar responden angket (69,8%) adalah mahasiswa semester 5 yang baru memulai mata kuliah Metode Eksperimen Fisika sehingga penilaian kendala praktikum belum sepenuhnya utuh. Hambatan ini diatasi dengan analisis pembanding pada sub-kelompok yang telah menempuh mata kuliah (n = 13) serta penguatan data melalui wawancara dosen pengampu dan observasi langsung. Adapun partisipasi bersifat sukarela, responden menyatakan persetujuan pada halaman awal angket, identitas tidak dikumpulkan, dan data dilaporkan secara agregat.

Tabel 1. Karakteristik responden (N = 43)

Karakteristik	Kategori	Frekuensi	Persentase
Semester	5	30	69,8%
	7	13	30,2%
Status MK Metode Eksperimen Fisika	Sedang menempuh	30	69,8%
	Sudah menempuh	13	30,2%

Pengumpulan data pada tahap *problem identification and motivation* dilakukan melalui studi kurikulum dan CPMK mata kuliah Metode Eksperimen Fisika, observasi pelaksanaan praktikum, wawancara dengan dosen pengampu, penyebaran angket pemetaan kebutuhan, serta kajian literatur terkait PjBL-Arduino-IoT. Hasil kegiatan tersebut digunakan untuk merumuskan *problem statement* dan memetakan kebutuhan pengguna. Adapun analisis triangulasi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Joint display triangulasi angket, wawancara, dan observasi

Isu	Angket (N = 43)	Wawancara dosen	Observasi praktikum	Status
Praktikum mengikuti prosedur baku	Butir 4: rerata 3,84; 69,8% skor 4-5	Dosen menyebut praktikum umumnya mengikuti urutan modul yang telah disediakan.	Pada sesi contoh, mahasiswa mengikuti langkah kerja pada modul tanpa banyak mengubah prosedur.	Konvergen (simulasi)
Pencatatan data manual dan waktu tersita	Butir 3: rerata 3,79; 67,4%. Tema "waktu habis untuk mencatat" (12 respons)	Dosen menyampaikan pencatatan manual menyita waktu diskusi hasil.	Mahasiswa mencatat hasil ukur pada lembar kerja cetak selama sesi.	Konvergen (simulasi)
Keterbatasan jumlah dan kondisi alat	Butir 1: rerata 3,40; 48,8%. Tema alat terbatas/rusak (20 respons)	Dosen menyebut beberapa alat harus digunakan bergantian dan sebagian perlu pengecekan.	Terlihat mahasiswa bergantian menggunakan alat ukur; kondisi alat dicatat untuk verifikasi.	Konvergen (simulasi)
Kesempatan merancang eksperimen	Butir 5: rerata 3,67; 58,1%	Dosen menyatakan kesempatan merancang prosedur mandiri masih terbatas.	Prosedur utama telah ditentukan dalam petunjuk praktikum; ruang modifikasi terbatas.	Konvergen (simulasi)
Integrasi mikrokontroler/sensor digital	Butir 8: rerata 3,60; 51,2%	Dosen menyebut sensor digital belum digunakan secara merata pada semua topik.	Penggunaan sensor/mikrokontroler tidak tampak pada sesi contoh yang diamati.	Komplementer (simulasi)
Interpretasi grafik real-time	Butir 13: rerata 3,74 (terendah pada dimensi B)	Dosen menyampaikan mahasiswa memerlukan bantuan saat membaca grafik hasil sensor.	Mahasiswa membutuhkan arahan untuk menghubungkan bentuk grafik dengan konsep fisika.	Konvergen (simulasi)

Data hasil angket dianalisis secara deskriptif menggunakan rerata, simpangan baku, dan persentase responden yang memberikan skor 4-5. Konsistensi internal instrumen diperiksa menggunakan *Cronbach's alpha*, sedangkan jawaban pada pertanyaan terbuka dianalisis secara tematik melalui proses pengodean dan pengelompokan tema. Hasil angket kemudian dibandingkan dengan temuan wawancara dosen pengampu dan observasi pelaksanaan praktikum untuk memperkuat identifikasi masalah dan kebutuhan pengembangan kit. Adapun instrumen angket analisis kebutuhan terdiri atas 37 pernyataan dengan skala Likert 1-5 yang mencakup enam aspek, yaitu kondisi aktual praktikum, pengalaman dan kesiapan Arduino-IoT, kebutuhan fitur kit, kebutuhan kegiatan praktikum berbasis PjBL, kebutuhan latihan keterampilan proses sains, dan kebutuhan perangkat pendukung, yang dapat dilihat pada Tabel 3. Selain itu, terdapat lima pertanyaan pilihan untuk mengidentifikasi preferensi desain dan lima pertanyaan terbuka untuk menggali kendala serta kebutuhan mahasiswa.

Tabel 3. Rerata dimensi dan reliabilitas instrumen

Dim.	Nama dimensi	Butir	Rerata	% skor 4-5	Cronbach α
A	Kondisi aktual praktikum	8	3,59	56,1%	0,839
B	Pengalaman & kesiapan Arduino-IoT	6	3,94	75,6%	0,873
C	Kebutuhan fitur kit STEM	7	4,10	82,4%	0,962
D	Kebutuhan kegiatan praktikum PjBL	5	4,13	83,7%	0,887
E	Kebutuhan latihan KPS	6	4,19	87,2%	0,948
F	Kebutuhan perangkat pendukung	5	4,34	87,4%	0,944

Hasil pemetaan kebutuhan selanjutnya diterjemahkan menjadi 12 *design requirements*

yang dituangkan dalam *artifact specification matrix*. Adapun 12 design requirements dirumuskan melalui tiga langkah. Pertama, seluruh temuan angket, yaitu skor butir Likert, preferensi desain, dan tema jawaban terbuka, yang telah ditriangulasi dengan wawancara dan observasi dikelompokkan ke dalam tiga ranah desain: karakteristik perangkat dan skenario, aktivitas pembelajaran (PjBL dan KPS), serta perangkat pendukung. Kedua, setiap kebutuhan diterjemahkan menjadi pernyataan persyaratan yang dapat diverifikasi pada rancangan, dan setiap persyaratan ditautkan pada sumber bukti empiris yang mendasarinya. Ketiga, rumusan DR ditelaah terhadap CPMK mata kuliah dan dibahas dalam rapat tim peneliti untuk memeriksa keterlacakan kebutuhan, kelayakan implementasi, dan konsistensi antarkomponen. Persyaratan tersebut menjadi dasar dalam menentukan karakteristik kit, komponen dan sensor, sistem akuisisi serta penyajian data, skenario eksperimen, pemetaan aktivitas PjBL, keterampilan proses sains, dan perangkat pendukung pembelajaran. Rancangan artefak mencakup dua skenario eksperimen utama, yaitu getaran-gelombang-bunyi dan kinematika-dinamika gerak, serta pengembangan modular pada listrik dinamis dan suhu-kalor

Rancangan artefak konseptual kemudian dievaluasi oleh tiga pakar yang terdiri atas 1 orang pakar pendidikan fisika, 1 orang pakar pada bidang teknologi pembelajaran, dan 1 orang pakar pada rekayasa elektronika. Adapun validator dengan kepakaran pendidikan fisika, berfokus pada aspek kelayakan substansi dan pedagogis, Validator dengan kepakaran pada bidang teknologi pembelajaran berfokus pada aspek kelayakan desain pembelajaran dan pemanfaatan teknologi, dan Validator dengan kepakaran rekayasa elektronika berfokus pada aspek kelayakan teknis dan fungsionalitas perangkat. Evaluasi dilakukan menggunakan lembar validasi yang mencakup empat aspek, yaitu relevansi isi dan kesesuaian konsep fisika, kesesuaian pembelajaran/PjBL-KPS, kelayakan teknis kit Arduino-IoT, serta keterpaduan dan keterbacaan perangkat pendukung. Karena jumlah pakar tiga orang, butir dinyatakan valid apabila I-CVI = 1,00 (Lynn, 1986), dan rancangan secara keseluruhan dinyatakan valid apabila S-CVI/Ave ≥ 0,90 (Polit & Beck, 2006). Masukan terbuka pakar dirangkum untuk menentukan revisi artefak.

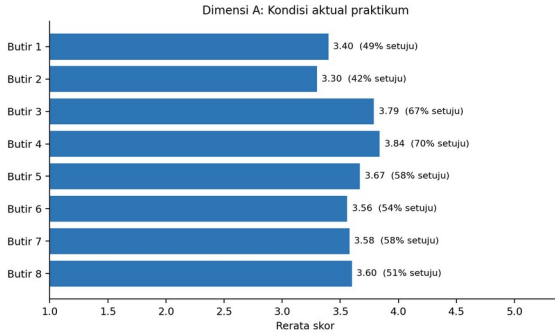
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Kondisi Aktual Praktikum Fisika Eksperimen

Hasil analisis kebutuhan terhadap kondisi aktual praktikum fisika eksperimen menunjukkan bahwa Rerata tertinggi terdapat pada pelaksanaan praktikum fisika eksperimen dengan mengikuti prosedur baku langkah demi langkah (butir 4; 3,84; 69,8%), diikuti pengambilan data secara manual pada lembar kerja cetak (butir 3; 3,79; 67,4%), seperti ditunjukkan pada Gambar 1, rerata skor delapan butir kondisi aktual praktikum berada pada rentang 3,30-3,84 yang menunjukkan sebagian besar responden setuju terhadap butir pernyataan yang diberikan.

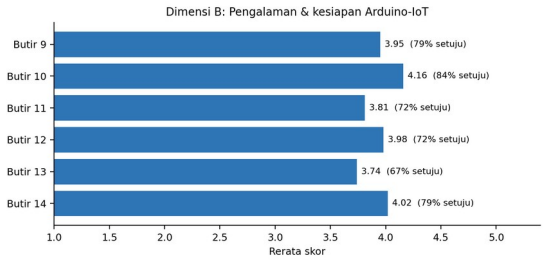
Kesempatan merancang prosedur atau rangkaian alat eksperimen sendiri memperoleh rerata 3,67, sedangkan akses digital terhadap data, tuntutan menghasilkan produk atau proyek, dan integrasi mikrokontroler masing-masing memperoleh rerata 3,56; 3,58; dan 3,60.



Gambar 1. Rerata skor kondisi aktual praktikum

Pengalaman dan Kesiapan Mahasiswa terhadap Arduino-IoT

Hasil analisis bahwa penggunaan sensor digital memperoleh rerata tertinggi, yaitu 4,16, diikuti dengan pengalaman memprogram atau memodifikasi program menggunakan Arduino IDE memperoleh rerata 3,98 dan pengetahuan mengenai Arduino Uno memperoleh rerata 3,95 (Gambar 2). Kondisi ini menunjukkan bahwa responden telah memiliki bekal teknologi dasar yang relevan untuk mengikuti pembelajaran berbasis Arduino.

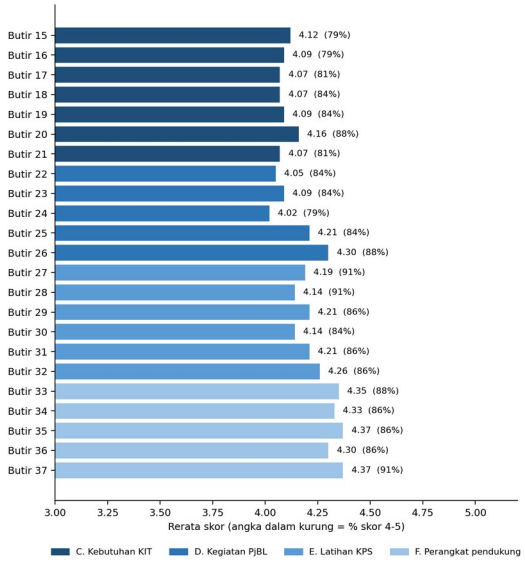


Gambar 2. Rerata skor butir pengalaman dan kesiapan Arduino-IoT (butir 9-14)

Pemahaman konsep IoT memperoleh rerata 3,81, sedangkan kemampuan menginterpretasikan grafik sensor secara *real-time* memperoleh rerata terendah, yaitu 3,74. Di sisi lain, kesiapan mahasiswa untuk mempelajari Arduino-IoT apabila memperoleh fasilitasi memperoleh rerata 4,02. Hasil analisis menunjukkan bahwa mahasiswa telah memiliki pengalaman awal menggunakan Arduino dan sensor digital, sementara aspek pemahaman IoT dan interpretasi data *real-time* memperoleh skor relatif lebih rendah.

Kebutuhan kit, Aktivitas PjBL, Keterampilan Proses Sains dan Perangkat Pendukung

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh butir kebutuhan pada aspek fitur kit, aktivitas PjBL, keterampilan proses sains, dan perangkat pendukung memperoleh respons tinggi. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, rerata skor seluruh butir berada pada rentang 4,02-4,37, dengan 79-91% responden memberikan skor 4-5. Pada aspek fitur kit, kebutuhan tertinggi terdapat pada panduan perakitan dan pemrograman untuk pemula (butir 20; rerata 4,16; 88%). Pada aspek aktivitas PjBL, penilaian yang mencakup proses kerja proyek memperoleh rerata tertinggi, yaitu 4,30 dengan 88% responden memberikan skor 4-5.



Gambar 3. Rerata skor butir kebutuhan kit, aktivitas PjBL, keterampilan proses sains, dan perangkat pendukung (butir 15-37)

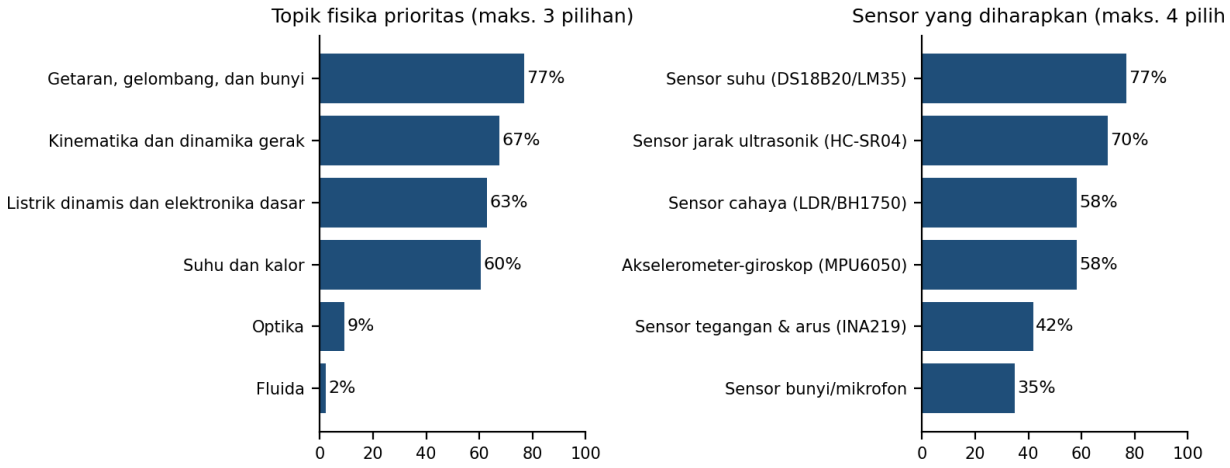
Hasilnya menunjukkan bahwa pada aspek perangkat pendukung, panduan penggunaan platform IoT dan contoh kode Arduino siap dimodifikasi memperoleh rerata masing-masing 4,37. Modul digital dengan video perakitan, LKPD berbasis PjBL, dan rubrik penilaian masing-masing memperoleh rerata 4,35; 4,33; dan 4,30.

Selain pemeringkatan berdasarkan rerata yang didapat, analisis Standard Deviation (SD) juga dilakukan untuk melihat variasi jawaban responden secara lebih detail. Adapun hasil analisis terhadap standar deviasi menunjukkan nilai berkisar antara 0,56–0,74. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa variasi jawaban responden pada setiap butir relatif terbatas. Butir mengenai latihan menentukan variabel dan merancang prosedur percobaan secara mandiri memiliki standar deviasi terendah (SD = 0,56), yang menunjukkan bahwa penilaian responden terhadap kebutuhan tersebut relatif lebih terkonsentrasi. Sebaliknya, kebutuhan terhadap visualisasi data eksperimen secara real time dan keterjangkauan biaya komponen memiliki standar deviasi tertinggi (SD = 0,74), yang menunjukkan variasi penilaian yang relatif lebih besar.

Preferensi Desain dan Temuan Jawaban Terbuka

Hasil pertanyaan preferensi desain menunjukkan pilihan mahasiswa terhadap topik, sensor, tampilan data, durasi proyek, dan pola kerja. Topik yang paling banyak dipilih adalah getaran, gelombang, dan bunyi sebesar 76,7%, diikuti kinematika dan

dinamika gerak sebesar 67,4%, listrik dinamis dan elektronika sebesar 62,8%, serta suhu dan kalor sebesar 60,5%. Pada pemilihan sensor, sensor suhu memperoleh persentase tertinggi sebesar 76,7%, diikuti sensor jarak ultrasonik 69,8%, sensor cahaya 58,1%, dan MPU6050 sebesar 58,1% (Gambar 4).



Gambar 4. Topik fisika prioritas dan jenis sensor yang diharapkan

Pada preferensi penyajian data, LCD pada perangkat kit dipilih oleh 62,8% responden, aplikasi pada telepon pintar 51,2%, *dashboard* berbasis *cloud* 41,9%, dan ekspor otomatis ke spreadsheet daring 27,9%. Untuk durasi proyek, 67,4% responden memilih dua sampai tiga pertemuan, sedangkan 30,2% memilih empat sampai enam pertemuan. Berdasarkan pola kerja, 83,7% responden memilih kelompok kecil yang terdiri atas 3-4 mahasiswa (Tabel 4).

Tabel 4. Preferensi tampilan data, durasi proyek, dan pola kerja (multi-pilihan; total dapat melebihi 100%)

Aspek	Pilihan	f	%
Tampilan & penyimpanan data (maks. 2)	Layar LCD pada perangkat kit	27	62,8
	Aplikasi pada telepon pintar	22	51,2
	Dashboard web berbasis *cloud*	18	41,9
	Ekspor otomatis ke *spreadsheet* daring	12	27,9
Durasi proyek ideal	Dua sampai tiga pertemuan	29	67,4
	Empat sampai enam pertemuan	13	30,2
	Satu pertemuan	1	2,3
Pola kerja paling efektif	Kelompok kecil (3-4 orang)	36	83,7
	Kelompok besar (5-6 orang)	6	14,0
	Individu	1	2,3

Distribusi lengkap pilihan topik dan sensor dapat dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Pilihan Topik dan Sensor

Jenis pilihan	Opsi	Persentase
Topik (maks. 3)	Getaran, gelombang, dan bunyi	76,7%
	Kinematika dan dinamika gerak	67,4%
	Listrik dinamis dan elektronika	62,8%
	Suhu dan kalor	60,5%
	Optika	9%
	Fluida	2%
Sensor (maks. 4)	Sensor suhu	76,7%
	Sensor jarak ultrasonik	69,8%
	Sensor cahaya	58,1%
	Akselerometer-giroskop MPU6050	58,1%
	Sensor tegangan dan arus INA219	41,9%
	Sensor bunyi/mikrofon	35%

Tabel 6. Batas maksimal dua pilihan Topik dan Sensor.

Tampilan data (maks.2)	Persentase
Layar LCD pada perangkat kit	62,8%
Aplikasi pada telepon pintar	51,2%
Dashboard web berbasis cloud	41,9%
Ekspor otomatis ke spreadsheet daring	27,9%

Adapun jawaban terbuka memperkuat temuan kuantitatif mengenai kondisi dan kebutuhan praktikum. Dari 40 respons mengenai kendala praktikum, tema yang paling banyak muncul adalah keterbatasan jumlah atau kondisi alat (20 respons), diikuti pengukuran manual yang tidak akurat atau lambat (14 respons). Pada kebutuhan fitur kit, data

real-time ke ponsel, laptop, atau aplikasi menjadi tema yang paling banyak disebut (29 respons), diikuti kebutuhan sensor yang lengkap, akurat, presisi, dan terkalibrasi (19 respons). Untuk mendukung penggunaan secara mandiri, modul atau buku panduan langkah demi langkah muncul pada 34 respons dan video tutorial pada 25 respons (Tabel 7).

Tabel 7. Tema jawaban pertanyaan terbuka (f = jumlah respons valid yang memuat tema; satu respons dapat memuat lebih dari satu tema)

Pertanyaan (n valid)	Tema utama	f
1. Kendala praktikum selama ini (n = 40)	Keterbatasan jumlah/kondisi alat (rusak, tidak terkalibrasi, harus bergantian)	20
	Pengukuran manual tidak akurat, lambat, rentan *human error*	14
	Keterbatasan waktu praktikum (habis untuk mencatat data)	12
	Kesulitan merangkai alat dan memahami prosedur/komponen	10
2. Topik paling sulit melalui praktikum konvensional (n = 38)	Listrik dan elektronika (rangkaian penyearah, dioda zener, arus AC, induksi elektromagnetik): besaran tidak kasat mata, banyak parameter diukur manual	23
	Getaran, gelombang, bunyi, resonansi: berubah terlalu cepat untuk alat manual	14
	Fisika modern (kuantum, relativitas, efek fotolistrik)	5
	Kinematika/gerak (GLBB, jatuh bebas); optika (penentuan fokus subjektif)	4; 3
3. Fitur kit yang paling diharapkan (n = 39)	Data *real-time* ke ponsel/laptop/aplikasi	29
	Sensor lengkap, akurat, presisi, terkalibrasi	19
	Rangkaian *plug-and-play*, tanpa solder, mudah dirakit	13
	Dashboard dan grafik otomatis; penyimpanan/ekspor data otomatis	12; 9
4. Bentuk panduan agar dapat mandiri (n = 40)	Modul/buku panduan langkah demi langkah	34
	Video tutorial (perakitan, pemrograman, *troubleshooting*)	25
	Gambar/skema rangkaian yang jelas; contoh kode Arduino siap pakai	14; 12
5. Saran rancangan kit (n = 36)	Sederhana, praktis, mudah dirakit dan digunakan	23
	Menampilkan data *real-time* via IoT/aplikasi	18
	Modular/*plug-and-play*, satu kit untuk beberapa topik	15
	Aman (anti-korsleting), kokoh, *casing* pelindung; disertai panduan, LKPD, contoh eksperimen	14; 13

Perumusan Design Requirements Berdasarkan Hasil Analisis Kebutuhan

Hasil analisis kebutuhan pada bagian sebelumnya selanjutnya digunakan untuk merumuskan 12 *design requirements* sebagai dasar penyusunan artefak konseptual kit STEM berbasis PjBL-Arduino-IoT. Setiap persyaratan desain disusun dengan menghubungkan bukti kebutuhan mahasiswa dengan karakteristik perangkat, aktivitas pembelajaran, dan perangkat pendukung yang akan dikembangkan. Hasil perumusan tersebut disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Pemetaan hasil analisis kebutuhan ke design requirements artefak konseptual kit STEM

Kode	Kebutuhan lapangan (bukti angket)	Design requirement	Sumber Data
DR-01	Topik gelombang-bunyi 76,7%; kinematika 67,4%; listrik 62,8%; suhu 60,5%	Dua skenario eksperimen inti (gelombang/bunyi; gerak) dengan perluasan modular (listrik dinamis; suhu-kalor)	Pertanyaan preferensi topik
DR-02	Sensor suhu 76,7%; ultrasonik 69,8%; cahaya dan MPU6050 masing-masing 58,1%	Konfigurasi sensor inti DS18B20/LM35, HC-SR04, LDR/BH1750, MPU6050; opsional INA219 dan mikrofon	Pertanyaan preferensi sensor
DR-03	Kebutuhan komponen modular 83,7%	Arsitektur modular dengan konektor instan (Grove/JST), tanpa solder	Butir 19, rerata 4,09; jawaban terbuka tentang modularitas 15 respons
DR-04	LCD 62,8%; aplikasi ponsel 51,2%; dashboard cloud 41,9%; ekspor spreadsheet 27,9%	Tiga lapis tampilan: LCD lokal, aplikasi/Bluetooth, dashboard IoT; tersedia mode luring	Pertanyaan preferensi tampilan data
DR-05	Kebutuhan penyimpanan data ke cloud 83,7%	Grafik *real-time* dan *data logging* otomatis dengan ekspor CSV/*spreadsheet*	Butir 18, rerata 4,07; preferensi dashboard cloud 41,9% dan ekspor spreadsheet 27,9%
DR-06	Alat terbatas/rusak/tidak terkalibrasi 20 respons; pengukuran manual tidak akurat/lambat 14 respons	*Casing* pelindung, proteksi polaritas/korsleting, fitur kalibrasi	Pertanyaan terbuka tentang kendala; saran keamanan 14 respons
DR-07	Biaya komponen terjangkau 81,4%	Batas biaya komponen per kit; komponen mudah diperoleh di pasar lokal	Butir 21, rerata 4,07
DR-08	Kebutuhan aktivitas PjBL 79,1–88,4%; proyek 2–3 pertemuan 67,4%; kelompok 3–4 orang 83,7%	Pemetaan sintaks PjBL (pertanyaan esensial, perencanaan, pengembangan, presentasi, evaluasi) ke aktivitas kit dalam 2-3 pertemuan berkelompok	Butir 22–26 dan pertanyaan preferensi durasi serta pola kerja
DR-09	Penilaian proses proyek 88,4%; rubrik diketahui sejak awal 86,0%	Rubrik asesmen proses dan produk proyek, disertakan di awal LKPD	Butir 26 dan 36
DR-10	Kebutuhan latihan KPS 83,7–90,7%; kemampuan interpretasi grafik real-time 67,4%	Setiap skenario memuat enam KPS eksplisit dan aktivitas khusus interpretasi grafik dinamis	Butir 27–32 dan butir 13
DR-11	Panduan pemula 88,4%; modul langkah demi langkah 34 respons; video tutorial 25 respons	Modul digital: teori, skema rangkaian berwarna, langkah perakitan, tautan video/QR, *troubleshooting*	Butir 20 dan pertanyaan terbuka tentang panduan
DR-12	Contoh kode Arduino 86,0%; panduan platform IoT 90,7%; pemahaman IoT 3,81	Pustaka contoh kode Arduino bertingkat dan panduan koneksi IoT langkah demi langkah	Butir 35, 37, dan 11

Pemetaan kebutuhan menghasilkan 12 *design requirements* yang mencakup karakteristik perangkat, aktivitas PjBL dan KPS, serta perangkat pendukung pembelajaran. Berdasarkan persyaratan tersebut, dua skenario eksperimen utama ditetapkan pada topik getaran-gelombang-bunyi dan kinematika-dinamika gerak, sedangkan listrik dinamis dan suhu-kalor dirancang sebagai perluasan modular. Hasil perumusan ini selanjutnya menjadi dasar penyusunan *artifact specification matrix* dan rancangan artefak konseptual kit.

Rancangan penelitian membatasi skenario inti pada dua topik, dan pemilihannya didasarkan pada tiga pertimbangan. Pertama, getaran-gelombang-bunyi dan kinematika-dinamika gerak merupakan dua topik dengan preferensi tertinggi (76,7% dan 67,4%), sedangkan optika dan fluida hampir tidak dipilih. Kedua, kedua topik melibatkan fenomena yang berubah terlalu cepat untuk diamati dengan alat manual (14 respons pada pertanyaan terbuka), sehingga paling diuntungkan oleh akuisisi data berbasis sensor dan visualisasi real-time. Ketiga, kedua topik secara langsung melatih interpretasi grafik dinamis seperti grafik posisi, kecepatan, dan simpangan terhadap waktu, yang merupakan kemampuan terendah responden pada dimensi pengalaman dan kesiapan (butir 13; rerata 3,74). Sensor yang dibutuhkan kedua skenario, yaitu sensor jarak ultrasonik (69,8%) dan MPU6050 (58,1%), juga termasuk sensor yang paling banyak dipilih.

Listrik dan elektronika merupakan topik yang paling sering disebut sulit dipelajari melalui praktikum konvensional (23 respons). Topik ini tetap diakomodasi sebagai perluasan modular karena preferensi terhadap sensor arus-tegangan INA219 lebih rendah (41,9%) dibandingkan sensor untuk kedua topik inti, dan alasan desain simulatif: skenario listrik memerlukan lapisan proteksi tambahan terhadap polaritas terbalik dan hubung

singkat (DR-06), sehingga lebih tepat dikembangkan setelah arsitektur inti stabil. Dengan arsitektur modular, topik listrik dapat ditambahkan tanpa mengubah skenario inti.

Konstruksi Konseptual kit STEM Berbasis Arduino-IoT

Hasil 12 *design requirements* dikonstruksikan menjadi artefak konseptual kit STEM berbasis PjBL-Arduino-IoT yang terdiri atas lima komponen utama, yaitu *artifact specification matrix*, peta sintaks PjBL-kit, skenario eksperimen, dapat dilihat pada Tabel 9, Tabel 10, dan Tabel 11. Adapun diagram blok sistem, dan skema rangkaian dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 9. Artifact specification matrix kit STEM berbasis PjBL-Arduino-IoT

DR	Komponen desain	Indikator pemenuhan (terukur)	Verifikasi tahap prototipe
DR-01	Dua skenario inti (getaran-gelombang-bunyi; kinematika-dinamika gerak) dan dua skenario perluasan (listrik dinamis; suhu-kalor), masing-masing dengan LKPD	Setiap skenario memuat pertanyaan esensial, variabel, prosedur, format data, dan analisis ketidakpastian; terlaksana dalam 2-3 pertemuan	Uji keterlaksanaan pada satu kelas praktikum
DR-02	Sensor inti: HC-SR04 (2-400 cm; akurasi 3 mm), MPU6050 (±2 g; 16 bit), DS18B20 (±0,5 °C; resolusi 0,0625 °C), BH1750/LDR, mikrofon MAX9814; opsional INA219	Ketidakpastian baku gabungan: percepatan ≤ 2% (k = 1); frekuensi bunyi ≤ 0,5 Hz pada 440 Hz; suhu ≤ 0,5 °C	Uji kalibrasi terhadap acuan (Tabel 15)
DR-03	Modul sensor dengan konektor JST berkunci, tanpa solder; bus I²C bersama	Perakitan ulang antarskenario ≤ 10 menit; nol salah pasang akibat konektor berkunci	Uji coba perakitan oleh kelompok mahasiswa
DR-04	Tiga lapis tampilan: LCD 16×2 I²C, aplikasi ponsel melalui BLE, dan dashboard (web lokal ESP32 mode luring; cloud mode daring)	Data tampil pada ketiga lapis; mode luring berfungsi penuh tanpa internet	Uji fungsi di laboratorium tanpa dan dengan internet
DR-05	Grafik real-time dan data logging berstempel waktu micros; ekspor CSV; mode burst 1.024 cuplik untuk bunyi	Laju data kinematika 16,7 Hz (HC-SR04) dan 100 Hz (MPU6050); kehilangan baris data < 1%; CSV berkolom baku	Perbandingan jumlah cuplik terkirim dan diterima
DR-06	Casing pelindung, polyfuse 1,1 A, dioda Schottky proteksi polaritas, buck 5 V terpisah untuk ESP32, menu kalibrasi	Tahan polaritas terbalik dan hubung singkat keluaran; kalibrasi per sensor ≤ 5 menit	Uji proteksi dan uji waktu kalibrasi
DR-07	Komponen modul umum yang tersedia di pasar lokal; satu ESP32 menggantikan modul Bluetooth dan Wi-Fi terpisah	Biaya komponen per kit	Rekapitulasi harga komponen
DR-08	Peta sintaks PjBL-kit lima fase (Tabel 10)	Kelima fase terpetakan ke aktivitas, fungsi kit, dan luaran; 2-3 pertemuan; kelompok 3-4 orang	Observasi keterlaksanaan sintaks
DR-09	Rubrik asesmen proses dan produk proyek di halaman awal LKPD	Rubrik memuat kriteria proses (perencanaan, kalibrasi, kualitas data, kolaborasi) dan produk (analisis, presentasi)	Telaah rubrik dan uji keterbacaan
DR-10	Enam KPS eksplisit pada setiap skenario dan aktivitas prediksi-observasi-penjelasan (POE) grafik dinamis	Setiap fase LKPD menyebut KPS sasaran; minimal satu tugas POE grafik real-time per skenario	Telaah LKPD
DR-11	Modul digital: teori, skema rangkaian berwarna, langkah perakitan, tautan video/QR, panduan troubleshooting	Setiap skenario memiliki skema, langkah bergambar, dan minimal satu video	Uji keterbacaan modul
DR-12	Pustaka kode bertingkat (Level 1 pembacaan sensor; Level 2 kalibrasi dan logging; Level 3 IoT dan analisis) dan panduan koneksi IoT langkah demi langkah	Setiap level dapat dijalankan tanpa modifikasi dan memiliki bagian bertanda untuk dimodifikasi mahasiswa	Uji jalan kode pada kit

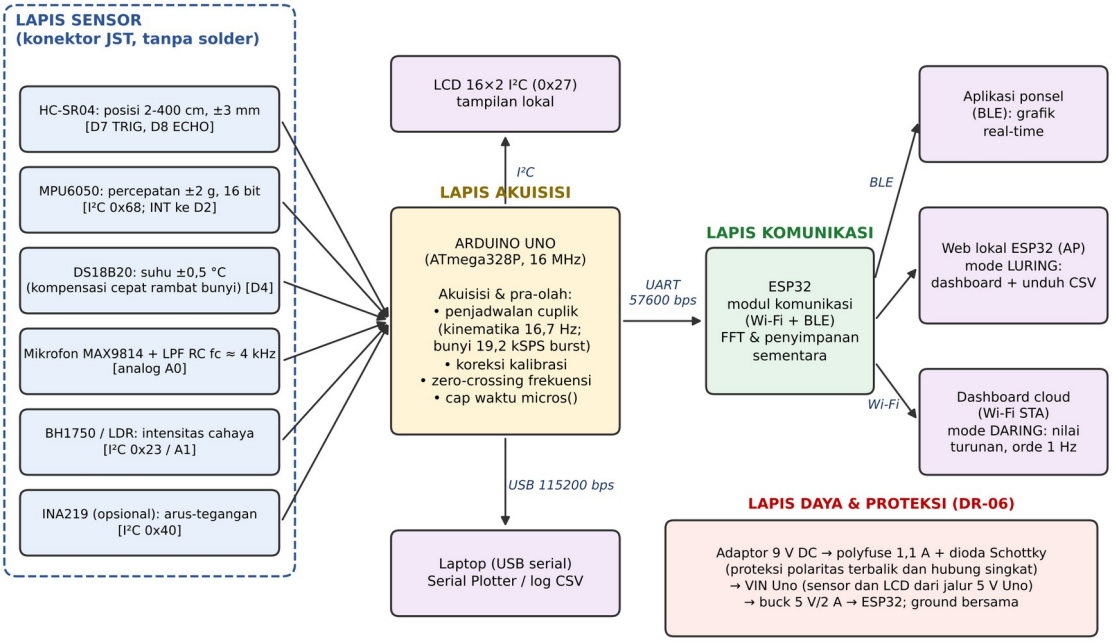
Tabel 10. Peta sintaks PjBL-kit

Fase PjBL	Aktivitas mahasiswa	Fungsi komponen Arduino-IoT	Luaran fase	KPS dilatihkan	Waktu
1. Pertanyaan esensial	Mengamati demonstrasi fenomena dan grafik real-time; memprediksi bentuk grafik (POE); merumuskan masalah dan hipotesis	Grafik real-time pada ponsel (BLE) dan LCD sebagai pemicu fenomena	Rumusan masalah dan hipotesis	Merumuskan masalah dan hipotesis	P1
2. Perencanaan proyek	Menentukan variabel, memilih sensor dan konfigurasi modul, merancang prosedur, menyusun rencana kalibrasi dan anggaran ketidakpastian awal	Konektor JST modular; pustaka kode Level 1-2; menu kalibrasi	Rancangan eksperimen, rencana kalibrasi, pembagian tugas	Menentukan variabel dan merancang prosedur	P1
3. Pengembangan	Merakit konfigurasi, mengalibrasi sensor, mengambil data berulang, memodifikasi kode sesuai rancangan	Akuisisi terjadwal; logging CSV berstempel waktu; web lokal (luring) atau cloud (daring)	Data terkalibrasi (CSV) dan log kalibrasi	Mengukur dan mengambil data secara akurat	P2
4. Presentasi	Mengolah data (regresi, grafik), menghitung ketidakpastian, membandingkan dua sensor, mempresentasikan hasil	Ekspor CSV; dashboard untuk visualisasi bersama	Grafik, nilai besaran ± U, bahan presentasi	Mengolah dan menyajikan data; mengomunikasikan hasil	P3
5. Evaluasi	Menafsirkan hasil terhadap hipotesis, merefleksikan keterbatasan alat, menerima umpan balik berbasis rubrik	Perbandingan dua sensor sebagai bahan refleksi keterbatasan pengukuran	Simpulan, refleksi, rencana perbaikan	Menafsirkan data dan menarik simpulan	P3

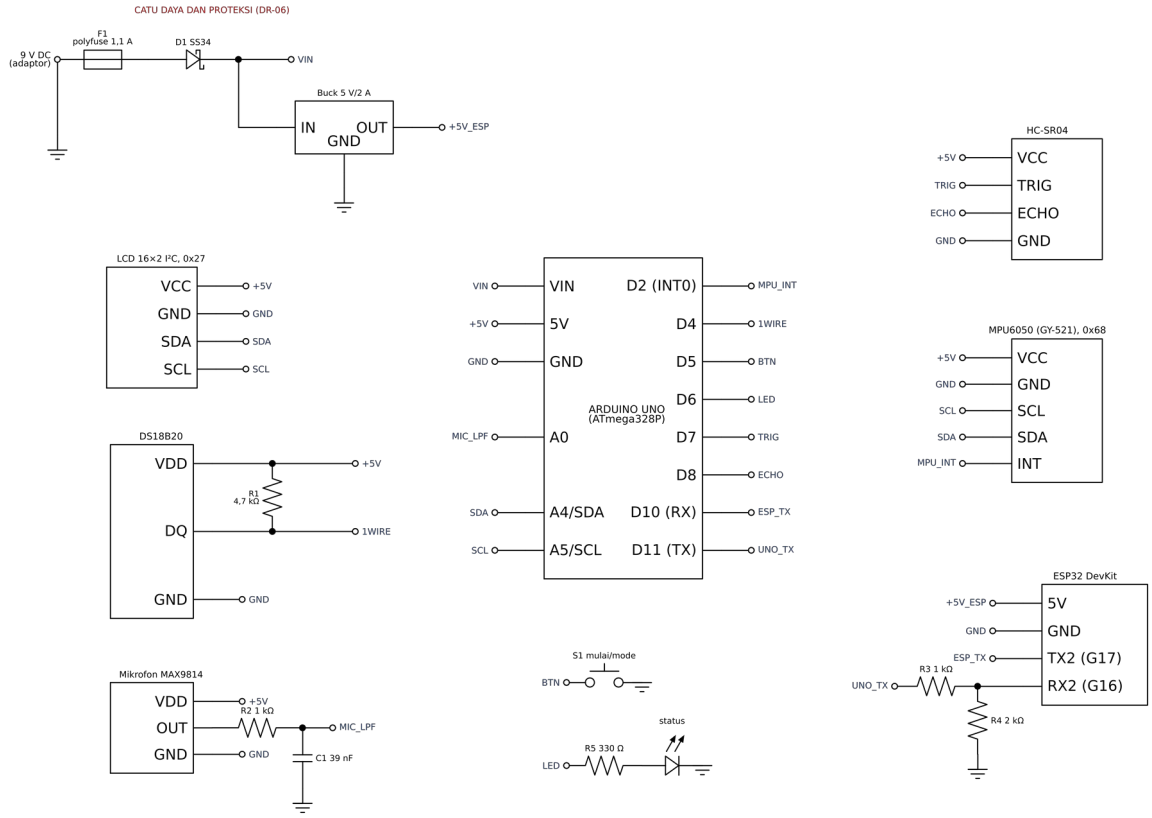
Tabel 11. Contoh skenario eksperimen lengkap: pada materi kinematika-dinamika gerak

Unsur	Rincian
Judul proyek	Troli Cerdas: Menguji Hukum II Newton pada Bidang Miring dengan Dua Sensor
Konsep dan capaian	GLBB, Hukum II Newton, gaya gesek, analisis ketidakpastian; mendukung CPMK merancang eksperimen, mengukur, dan menganalisis data beserta ketidakpastiannya
Pertanyaan esensial	Bagaimana sudut kemiringan lintasan memengaruhi percepatan troli, dan seberapa yakin kita terhadap percepatan yang terukur oleh dua sensor yang berbeda prinsip kerjanya?
Model fisika	$a = g(\sin\theta - \mu\cos\theta)$. Untuk sudut kecil, $a \approx g\sin\theta - \mu g$, sehingga grafik a terhadap sin θ linear dengan gradien g dan perpotongan -μg.
Contoh hipotesis mahasiswa	Percepatan troli bertambah secara linear terhadap sin θ; gradien grafik mendekati g lokal (≈ 9,78 m/s² untuk lintang dekat ekuator).
Variabel	Bebas: θ = 5°, 10°, 15°, 20°, 25°. Terikat: a (a US dari HC-SR04; a_{IMU} dari MPU6050). Kontrol: massa troli, permukaan lintasan, posisi awal, jarak tempuh 1,0 m. Dicatat: suhu udara (DS18B20).
Konfigurasi kit	Arduino Uno, HC-SR04 menghadap papan pemantul tetap (≥ 30 × 30 cm), MPU6050 dengan sumbu x sejajar lintasan, DS18B20, ESP32 (BLE ke ponsel), catu power bank 5 V dua port (mode portabel)
P1: pertanyaan esensial dan perencanaan	Demonstrasi satu peluncuran dengan grafik real-time; prediksi grafik x-t, v-t, a-t (POE); perumusan hipotesis; perancangan prosedur; kalibrasi HC-SR04 (10 titik) dan MPU6050 (enam posisi)
P2: pengembangan dan pengambilan data	Pengukuran θ secara statis dengan akselerometer (rerata 200 cuplik); lima sudut × lima ulangan; HC-SR04 16,7 Hz dan MPU6050 100 Hz direkam serentak ke CSV
Format data (CSV)	T_{US}, x_{mm}, ax_{raw}, ax_{ms^2}, T_c, theta_deg, id_ulangan
P3: analisis, presentasi, evaluasi	(1) Regresi kuadratik x(t) → $a_{us} \pm u$; (2) metode diferensial MPU6050 → $a_{imu} \pm u$; (3) uji konsistensi En; (4) regresi linear a terhadap sin θ → g dan μ; (5) presentasi dan refleksi sumber ketidakpastian
Aktivitas grafik dinamis (DR-10)	Tugas POE: mahasiswa menjelaskan mengapa akselerometer membaca hampir nol sepanjang lintasan saat troli meluncur dengan gesekan kecil, padahal troli jelas dipercepat (akselerometer mengukur gaya spesifik, bukan percepatan kinematik)
Prediksi teoretis (μ = 0,02; jarak 1,0 m)	θ = 10°: a ≈ 1,51 m/s², waktu tempuh 1,15 s, 20 titik HC-SR04. θ = 25°: a ≈ 3,97 m/s², 0,71 s, 12 titik. Rincian pada Tabel 13.

Unsur	Rincian
Luaran proyek	Data CSV terkalibrasi, grafik dan analisis ketidakpastian, nilai g dan μ, poster/presentasi, kode Level 2 yang dimodifikasi
Asesmen	Rubrik proses (perencanaan, kalibrasi, kualitas data, kolaborasi) dan produk (ketepatan analisis, presentasi) yang dibagikan sejak P1
Keselamatan	Bumper peredam di ujung lintasan; kit terkunci pada troli; power bank dalam casing



Gambar 5. Diagram blok sistem kit STEM berbasis Arduino-IoT



Gambar 6. Skema rangkaian kit (titik terbuka bernama sama saling terhubung)

Pada analisis laju cuplik ADC dan perekaman getaran-bunyi diketahui bahwa ADC ATmega328P pada Arduino Uno beresolusi 10 bit dan memerlukan 13 siklus clock ADC per konversi. Datasheet menyatakan laju hingga 76,9 kSPS, tetapi resolusi penuh hanya tercapai hingga sekitar 15 kSPS (Microchip Technology, 2018). Laju cuplik ditentukan oleh prescaler clock ADC (Tabel 12). Dengan pengaturan bawaan (prescaler 128), satu pemanggilan analogRead memerlukan sekitar 0,1 ms, sehingga laju efektifnya sekitar 9-10 kSPS. Selain ADC, jalur serial juga membatasi: pada 115200 bps (sekitar 11.520 byte/s), pengiriman data teks sekitar 6 byte per cuplik hanya menampung sekitar 1.900 cuplik/s. Karena itu, sinyal bunyi tidak dapat dialirkan secara kontinu ke komputer atau cloud.

Tabel 12. Laju cuplik ADC Arduino Uno menurut prescaler (clock 16 MHz; 13 siklus per konversi)

Prescaler	Clock ADC	Laju cuplik	Frekuensi Nyquist	Keterangan
128 (bawaan)	125 kHz	9,6 kSPS	4,8 kHz	Resolusi penuh 10 bit; dipakai untuk sinyal lambat
64	250 kHz	19,2 kSPS	9,6 kHz	Dipilih untuk mode burst bunyi; resolusi efektif sedikit menurun
32	500 kHz	38,5 kSPS	19,2 kHz	Resolusi efektif turun signifikan
16	1 MHz	76,9 kSPS	38,5 kHz	Batas datasheet; tidak dianjurkan untuk pengukuran

Berdasarkan batasan tersebut, perekaman bunyi dirancang dalam mode burst. Arduino mencuplik 1.024 data pada 19,2 kSPS (prescaler 64) ke SRAM sebagai data 8 bit (1 KB dari 2 KB SRAM yang tersedia), lalu mengirimkannya ke ESP32 setelah perekaman selesai. Jendela perekaman 53 ms cukup untuk sekitar 23 periode nada 440 Hz. Menurut teorema pencuplikan (Shannon, 1949), komponen di atas 9,6 kHz akan mengalami aliasing, sehingga keluaran mikrofon dilewatkan filter RC dengan fc ≈ 4,1 kHz. Filter orde satu ini hanya meredam sekitar 8 dB pada 9,6 kHz, sehingga sumber bunyi skenario dibatasi pada frekuensi dasar ≤ 2 kHz (minimal 9 cuplik per periode).

Resolusi frekuensi FFT sebesar $\Delta f = fs/N \approx 18{,}8$ Hz terlalu kasar untuk membedakan, misalnya, 440 Hz dan 450 Hz. Oleh karena itu, frekuensi ditentukan dengan menghitung zero-crossing pada banyak periode: $f = M/t_M$, dengan M jumlah periode utuh dan t_M durasinya. Untuk 440 Hz, ketidakpastian kuantisasi waktu (1/fs pada kedua ujung) menghasilkan u(f) ≈ 0,18 Hz. FFT di ESP32 tetap dipakai untuk menampilkan spektrum dan harmonik secara kualitatif. Getaran mekanis frekuensi rendah, seperti pegas-massa dan bandul (0,5-3 Hz), tidak memerlukan ADC cepat. Getaran ini direkam dengan HC-SR04 (16,7 Hz, minimal 5 titik per periode pada 3 Hz) atau MPU6050 (100-200 Hz), dan periodenya ditentukan dari pencocokan kurva pada banyak siklus.

Pada resolusi HC-SR04 dan MPU6050 untuk kinematika diketahui bahwa HC-SR04 memiliki jangkauan 2-400 cm dengan akurasi hingga 3 mm, dan siklus pengukurannya dianjurkan lebih dari 60 ms (Elecfreaks, t.t.), sehingga laju datanya sekitar 16,7 Hz. Resolusi waktu micros() pada Arduino Uno (4 µs) setara dengan 0,69 mm, sehingga tidak menjadi pembatas. Jarak dihitung dari $d = v \cdot t/2$ dengan v bergantung pada suhu, $v \approx 331{,}3 + 0{,}606T$ m/s. Pada 30 °C, v ≈ 349,5 m/s. Jika dipakai nilai tetap 340 m/s, jarak dan percepatan menjadi lebih kecil sekitar 2,7% secara sistematis. Galat ini lebih besar daripada galat acak, sehingga kompensasi suhu dengan DS18B20 (±0,5 °C, setara 0,09% pada v) dimasukkan ke dalam rancangan.

Percepatan tidak dapat diperoleh dari selisih numerik data posisi. Dengan $\sigma x = 3$ mm (asumsi konservatif) dan $\Delta t = 60$ ms, selisih pertama memberi $\sigma v \approx \sqrt{2} \cdot \sigma x/\Delta t \approx 0{,}07$ m/s, sedangkan selisih kedua memberi $\sigma a \approx \sqrt{6} \cdot \sigma x/\Delta t^2 \approx 2{,}0$ m/s², yaitu sebesar percepatan yang diukur. Karena itu, percepatan ditentukan dari regresi kuadratik $x(t) = x_0 + v_0 t + \tfrac{1}{2}at^2$ pada seluruh N titik selama durasi T. Untuk titik berjarak sama, ketidakpastian percepatan hasil regresi adalah:

$$\sigma a \approx 2\sigma x \sqrt{(180/N)} / T^2$$

Prediksi untuk skenario bidang miring disajikan pada Tabel 13. Ketidakpastian relatif acak berada pada 0,7-1,2%. Simulasi Monte Carlo (5.000 pengulangan dengan derau $\sigma x = 3$ mm) memberikan $\sigma a = 0{,}013$ m/s² untuk $\theta = 10°$ dan 0,046 m/s² untuk $\theta = 25°$, sesuai dengan estimasi analitis.

https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i2.5662

Tabel 13. Prediksi resolusi percepatan HC-SR04 dengan regresi kuadratik (jarak tempuh 1,0 m; μ = 0,02; σx = 3 mm; Δt = 60 ms)

θ	a teoretis (m/s²)	Waktu tempuh T (s)	Jumlah titik N	σa (m/s²)	σa relatif
5°	0,66	1,74	30	0,005	0,7%
10°	1,51	1,15	20	0,014	0,9%
15°	2,35	0,92	16	0,024	1,0%
20°	3,17	0,79	14	0,034	1,1%
25°	3,97	0,71	12	0,046	1,2%

MPU6050 pada rentang ±2 g memiliki sensitivitas 16.384 LSB/g (resolusi 0,0006 m/s²) dan rapat spektral derau 400 μg/√Hz. Dengan filter digital 44 Hz, derau rms-nya sekitar 0,033 m/s². Namun, toleransi offset awal sumbu x dan y mencapai ±50 mg (0,49 m/s²) dan toleransi sensitivitas ±3% (InvenSense, 2013). Offset tersebut melampaui percepatan troli pada sudut 5°. Selain itu, akselerometer mengukur gaya spesifik, bukan percepatan kinematik. Sepanjang lintasan, pembacaannya adalah f = a - g sin θ = -μg cos θ, yang mendekati nol bila gesekan kecil. Karena itu dirancang metode diferensial:

$$A_{IMU} = f_{gerak} - f_{diam}$$

Pada persamaan tersebut, f_diam adalah rerata pembacaan sumbu lintasan saat troli diam pada sudut yang sama sesaat sebelum dilepas. Pengurangan ini menghapus offset, sensitivitas silang terhadap komponen g cos θ, dan ketidakpastian sudut, karena ketiganya identik pada kedua kondisi. Yang tersisa adalah derau rerata (sekitar 0,003 m/s² untuk sekitar 100 cuplik independen) dan galat skala sensitivitas yang dikoreksi melalui kalibrasi enam posisi. Integrasi percepatan menjadi kecepatan tidak dianjurkan, karena sisa offset 5 mg saja menimbulkan galat kecepatan 0,05 m/s setiap detik. Kecepatan dan posisi tetap diambil dari HC-SR04. Pengukuran sudut θ secara statis dengan akselerometer memiliki galat hingga 2,9° sebelum kalibrasi (offset 50 mg) dan sekitar 0,3° setelah kalibrasi (sisa offset 5 mg).

Adapun ketidakpastian dievaluasi mengikuti GUM (JCGM, 2008). Komponen tipe A berasal dari sebaran data, sedangkan komponen tipe B berasal dari spesifikasi dan dianggap berdistribusi rektangular (u = a/√3). Ketidakpastian gabungan uc dihitung dengan akar jumlah kuadrat, dan ketidakpastian diperluas dinyatakan sebagai U = 2uc. Toleransi resonator keramik Arduino Uno sebesar ±0,5% memengaruhi semua besaran berbasis waktu. Pada HC-SR04, galat basis waktu ε mengubah jarak dan waktu secara bersamaan, sehingga percepatan berubah sebesar -ε. Pada frekuensi bunyi, galat ini setara dengan ±2,2 Hz pada 440 Hz dan menjadi komponen dominan, sehingga dirancang koreksi basis waktu terhadap nada acuan. Anggaran ketidakpastian rancangan disajikan pada Tabel 14. Konsistensi kedua sensor diuji dengan bilangan $E_n = |a_{US} - a_{IMU}| / \sqrt{(U_{US}^2 + U_{IMU}^2)}$, dan hasil dinyatakan konsisten bila $E_n \leq 1$ (ISO, 2022).

Tabel 14. Anggaran ketidakpastian rancangan (estimasi a priori; diverifikasi pada tahap prototipe)

Besaran dan metode	Sumber ketidakpastian	Tipe	u relatif / u
Percepatan, HC-SR04 dengan regresi kuadratik (θ = 10°; a ≈ 1,51 m/s²)	Derau posisi melalui regresi (σx = 3 mm; N = 20)	A	0,9%
	Cepat rambat bunyi setelah kompensasi DS18B20 (±0,5 °C)	B	0,05%
	Basis waktu resonator (±0,5%)	B	0,29%
	Skala jarak setelah kalibrasi terhadap meteran (target)	B	0,3%
	Gabungan uc; diperluas U (k = 2)		1,0%; 2,0% (≈ 0,03 m/s²)
Percepatan, MPU6050 dengan metode diferensial (θ = 10°)	Derau rerata (filter 44 Hz; sekitar 100 cuplik independen)	A	0,2%
	Skala sensitivitas setelah kalibrasi enam posisi (sisa ±0,5%)	B	0,29%
	Offset, sensitivitas silang, dan sudut	B	tereliminasi oleh metode diferensial
	Gabungan uc; diperluas U (k = 2)		0,35%; 0,7% (≈ 0,01 m/s²)
Frekuensi bunyi, zero-crossing (440 Hz; fs = 19,2 kSPS; 1.024 cuplik)	Kuantisasi waktu crossing	B	0,18 Hz

Besaran dan metode	Sumber ketidakpastian	Tipe	u relatif / u
	Basis waktu tanpa koreksi (±0,5%)	B	1,27 Hz
	Basis waktu setelah koreksi terhadap nada acuan (sisa ±0,05%; target)	B	0,13 Hz
	Gabungan uc setelah koreksi; diperluas U (k = 2)		0,22 Hz; 0,44 Hz
Suhu, DS18B20	Akurasi datasheet (±0,5 °C pada -10 °C sampai 85 °C)	B	0,29 °C

Protokol kalibrasi per sensor (Tabel 15) dimuat dalam modul digital dan menu kalibrasi kit. Kriteria penerimaan merupakan target desain yang diturunkan dari anggaran ketidakpastian. Dengan protokol ini, kebutuhan responden terhadap sensor yang akurat dan terkalibrasi diterjemahkan menjadi prosedur yang dilakukan mahasiswa sendiri pada fase perencanaan dan pengembangan PjBL, sekaligus menjadi bahan latihan KPS mengukur secara akurat.

Tabel 15. Protokol kalibrasi sensor inti kit

Sensor	Acuan	Prosedur	Model koreksi	Kriteria penerimaan (target)	Frekuensi
HC-SR04	Meteran baja (skala 1 mm); suhu dari DS18B20	10 titik pada 10-100 cm; 20 pembacaan per titik; pemantul datar tegak lurus berkas	d = b0 + b1·d_ukur, dengan d_ukur terkompensasi suhu	Residu rms ≤ 3 mm	Awal semester dan bila suhu berubah > 5 °C
MPU6050	Gravitasi lokal; permukaan datar dicek waterpass	Enam posisi statis (±x, ±y, ±z searah g); 500 cuplik per posisi; bias giroskop dari 1.000 cuplik diam	Offset dan faktor skala per sumbu	Sisa offset ≤ 5 mg; skala dalam ±0,5%	Offset tiap sesi; skala tiap semester
Mikrofon dan basis waktu	Nada acuan dari generator sinyal atau garpu tala 440/512 Hz	Rekam 10 burst nada acuan; hitung frekuensi rerata	Faktor koreksi k = f_acuan / f_ukur	|Δf| ≤ 0,5 Hz pada 440 Hz setelah koreksi	Sekali per kit; cek ulang tiap semester
DS18B20	Campuran es-air (0 °C) dan termometer acuan pada suhu ruang	Rendam sensor hingga stabil; 60 pembacaan per titik	Offset	Selisih ≤ 0,5 °C	Tiap semester

Rancangan tersebut kemudian dievaluasi oleh tiga pakar, yaitu pakar pendidikan fisika, teknologi pembelajaran, dan rekayasa elektronika. Adapun hasil evaluasi ketiga pakar disajikan pada Tabel 16. Nilai I-CVI pada keempat aspek berada pada rentang 0,89–1,00 dengan S-CVI/Ave sebesar 0,97, sehingga artefak konseptual perlu dilakukan revisi hingga dinyatakan valid atau nilai validasi sempurna (1). Sebanyak 1 butir memperoleh I-CVI di bawah 1,00, yaitu butir aspek relevansi isi mengenai proteksi polaritas/korsleting (contoh butir DR-06), dan butir tersebut telah direvisi sesuai masukan pakar. Masukan utama pakar dan tindak lanjutnya dirangkum pada Tabel 17.

Tabel 16. Hasil validasi isi artefak konseptual oleh tiga pakar

Aspek penilaian	Jumlah butir	Rentang I-CVI	Rerata I-CVI	Keputusan
Relevansi isi dan konsep fisika	3	0,67–1,00	0,89	Valid setelah revisi
Kesesuaian pembelajaran (PjBL dan KPS)	3	1,00	1,00	Valid
Kelayakan teknis kit Arduino-IoT	3	1,00	1,00	Valid
Keterpaduan dan keterbacaan perangkat	3	1,00	1,00	Valid
S-CVI/Ave keseluruhan	12		0,97	Valid

Tabel 17. Masukan utama pakar dan revisi yang dilakukan

Pakar	Masukan utama	Revisi yang dilakukan	Komponen artefak terdampak
V1	Perjelas hubungan tujuan eksperimen, variabel, dan besaran yang diukur.	Menambahkan pemetaan tujuan–variabel–sensor serta indikator pengukuran pada LKPD.	Skenario eksperimen dan LKPD
V2	Panduan perlu lebih bertahap dan mudah diikuti mahasiswa pemula.	Menambahkan urutan perakitan, diagram alir pemrograman, QR video, dan langkah troubleshooting.	Blueprint modul digital
V3	Perlu memperjelas proteksi rangkaian dan konsistensi spesifikasi sensor.	Menambahkan keterangan polaritas, proteksi dasar, dan tabel spesifikasi/koneksi komponen.	Spesifikasi teknis kit

Pembahasan

Temuan tentang penggunaan prosedur baku pencatatan data manual mencerminkan karakteristik praktikum fisika eksperimen responden saat ini. Penggunaan prosedur baku dan pencatatan data secara manual dapat membatasi ruang mahasiswa untuk mengambil keputusan selama eksperimen, terutama dalam merancang prosedur, menentukan strategi pengukuran, dan mengevaluasi hasil yang diperoleh. La Braca dan Kalman (2021) membandingkan praktikum tradisional dan labatorial dalam mata kuliah *introductory experimental mechanics*. Praktikum tradisional yang mengandalkan instruksi langkah demi langkah cenderung membuat mahasiswa berfokus pada pelaksanaan prosedur dan menghindari kesalahan, sehingga dapat menghambat pembelajaran konseptual. Oleh karena itu, pengembang perangkat praktikum harus mengintegrasikan aspek teknis dan pedagogis agar memberi ruang bagi mahasiswa untuk merancang, melaksanakan, dan menganalisis eksperimen.

Keterlibatan mahasiswa dalam proses penyelidikan juga menjadi pertimbangan dalam merumuskan kebutuhan pengembangan kit. Analisis kebutuhan memperlihatkan bahwa mahasiswa mengharapkan adanya latihan keterampilan proses sains (KPS). Cai et al. (2021) melaporkan bahwa pemberian kesempatan kepada mahasiswa untuk merancang prosedur dapat meningkatkan partisipasi dalam desain eksperimen dan proses pengambilan keputusan. Temuan penelitian ini konsisten dengan pentingnya menyediakan ruang bagi mahasiswa untuk mengambil keputusan dalam kegiatan eksperimen. Dengan demikian, penyediaan fitur kit dan panduan praktikum perlu diarahkan untuk mendukung keterlibatan mahasiswa dalam proses investigasi. Efektivitas rancangan tersebut masih perlu diuji melalui implementasi kit dalam kegiatan pembelajaran.

Dalam hal persiapan teknologi, pengalaman mahasiswa dalam menggunakan sensor digital menunjukkan adanya bekal awal untuk mengikuti praktikum berbasis Arduino-IoT. Namun, pengalaman tersebut belum sepenuhnya diikuti dengan pemahaman tentang konsep IoT dan kemampuan untuk memahami grafik sensor secara *real-time*. Temuan ini menggambarkan pengalaman dan persepsi kesiapan mahasiswa berdasarkan respons angket, sehingga belum dapat digunakan untuk menyimpulkan kemampuan teknis mahasiswa secara objektif. Meskipun begitu, kesenjangan antara pengalaman menggunakan perangkat dan kemampuan memahami serta menganalisis data menjadi hal yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan karakteristik perangkat pendukung pembelajaran.

Organtini dan Tufino (2022) melaporkan penggunaan Arduino dan smartphone untuk mengintegrasikan pengukuran dengan analisis data dalam laboratorium fisika. Sementara itu, Çoban dan Salar (2023) menggunakan Arduino untuk mendukung analisis grafik posisi, kecepatan, dan percepatan. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan relevansi penggunaan perangkat digital dalam kegiatan pengukuran dan analisis data eksperimen. Dalam konteks penelitian ini, relevansi tersebut diterjemahkan ke dalam kebutuhan penyediaan fitur visualisasi data dan panduan interpretasi grafik, sehingga teknologi tidak hanya digunakan untuk memperoleh data, tetapi juga menjadi bagian dari aktivitas analisis eksperimen.

Kebutuhan terhadap fitur kit, aktivitas Project-Based Learning (PjBL), keterampilan proses sains (KPS), dan perangkat pendukung menunjukkan bahwa responden mengharapkan integrasi antara perangkat pengukuran dan aktivitas pembelajaran. Hal ini penting karena penggunaan teknologi

pengukuran tidak secara otomatis menghadirkan pengalaman belajar yang investigatif. Teknologi perlu diintegrasikan ke dalam aktivitas yang memberi kesempatan kepada mahasiswa untuk mengidentifikasi permasalahan, merencanakan dan melaksanakan eksperimen, mengolah data, serta mengomunikasikan hasilnya. Pendekatan tersebut sejalan dengan Dat et al. (2024) yang mengembangkan eksperimen berbasis Arduino beserta rancangan pembelajaran yang mengintegrasikan scientific inquiry dan engineering design. Sementara itu, Firdaus et al. (2024) mengembangkan kit gerak lurus berbasis mikrokontroler dan sensor yang dilengkapi perangkat pembelajaran untuk mendukung KPS.

Preferensi desain dan jawaban terbuka responden juga memperjelas karakteristik perangkat yang diharapkan, terutama terkait penyajian data *real-time*, akurasi sensor, rangkaian *plug-and-play*, serta panduan penggunaan yang lengkap. Temuan ini menunjukkan bahwa kebutuhan pengembangan kit mencakup aspek teknis sekaligus pedagogis. Dengan demikian, kit perlu diposisikan bukan hanya sebagai perangkat pengukuran, tetapi juga sebagai bagian dari pengalaman pembelajaran yang mengintegrasikan aktivitas eksperimen dan pengolahan data. Kontribusi penelitian ini terletak pada analisis kebutuhan dan perumusan spesifikasi awal kit berdasarkan konteks pembelajaran fisika eksperimen di perguruan tinggi.

Keseluruhan temuan penelitian ini menghasilkan 12 *design requirements* (DR) yang menerjemahkan kebutuhan mahasiswa menjadi spesifikasi awal pengembangan kit STEM berbasis Arduino-IoT untuk praktikum fisika eksperimen. Kedua belas DR menghubungkan kebutuhan pengguna dengan karakteristik perangkat, aktivitas *Project-Based Learning* (PjBL), keterampilan proses sains (KPS), dan perangkat pendukung pembelajaran. Perumusan tersebut sejalan dengan kerangka Weigand et al. (2021), yang menjelaskan elemen artefak melalui rencana konstruksi (*make plan*) dan rencana penggunaan (*use plan*). Dalam penelitian ini, *make plan* mencakup spesifikasi teknis kit, seperti konfigurasi sensor, modularitas komponen, konektivitas, sistem akuisisi, dan penyajian data. Sementara itu, *use plan* mencakup skenario eksperimen, aktivitas PjBL, latihan dan asesmen KPS, serta perangkat pendukung pembelajaran. Kedua elemen tersebut diwujudkan dalam bentuk spesifikasi konseptual yang disusun berdasarkan kebutuhan mahasiswa pada konteks program studi yang diteliti. Oleh karena itu, kedua belas DR ini merupakan persyaratan desain awal yang kontekstual, bukan prinsip desain yang telah teruji atau dapat digeneralisasi. Pengujian lebih lanjut melalui implementasi dan evaluasi prototipe diperlukan untuk menilai penerapan persyaratan desain tersebut.

Secara praktis, hasil penelitian dapat menjadi acuan dalam merancang praktikum yang mengintegrasikan pengukuran digital, perancangan eksperimen, dan interpretasi data. Kedua belas design requirements dapat digunakan sebagai spesifikasi awal dalam menentukan karakteristik kit dan perangkat pendukung pembelajaran. Pengembangan selanjutnya perlu diarahkan pada realisasi prototipe dan pengujian dalam kegiatan praktikum untuk mengevaluasi kelayakan perangkat serta potensinya dalam mendukung pengembangan KPS mahasiswa.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada cakupan responden yang hanya melibatkan 43 mahasiswa dari satu program studi, sehingga penerapan hasilnya pada konteks institusi lain perlu dilakukan secara hati-hati. Selain itu, data pengalaman dan kesiapan teknologi diperoleh melalui respons angket, bukan pengukuran kemampuan teknis secara langsung. Preferensi desain juga terbatas pada pilihan yang disediakan dalam instrumen. Dari sisi luaran, penelitian ini menghasilkan rancangan konseptual yang belum diwujudkan menjadi prototipe dan diuji dalam kegiatan praktikum. Oleh karena itu, hasil penelitian perlu dipahami sebagai pemetaan kebutuhan dan dasar perumusan spesifikasi awal untuk pengembangan kit STEM berbasis Arduino-IoT pada tahap berikutnya.

SIMPULAN

Hasil pemetaan kebutuhan terhadap 43 mahasiswa menunjukkan bahwa praktikum fisika eksperimen masih didominasi oleh penggunaan prosedur baku dan pencatatan data secara manual. Mahasiswa telah memiliki pengalaman awal dengan Arduino dan sensor digital, tetapi masih memerlukan penguatan pemahaman tentang IoT serta kemampuan menginterpretasikan data secara *real-time*. Selain kebutuhan terhadap fitur kit,

mahasiswa juga mengharapkan aktivitas pembelajaran yang mendukung pengembangan keterampilan proses sains (KPS) dan dilengkapi perangkat pendukung pembelajaran.

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan tersebut, dirumuskan 12 *design requirements* (DR) sebagai persyaratan desain awal pengembangan kit STEM berbasis Arduino-IoT. Kedua belas DR mencakup aspek teknis perangkat, skenario eksperimen, integrasi aktivitas *Project-Based Learning* (PjBL), latihan dan asesmen KPS, serta perangkat pendukung pembelajaran. Selanjutnya, DR tersebut dikonstruksikan ke dalam artefak konseptual yang mencakup artifact specification matrix, pemetaan PjBL-kit, skenario eksperimen, diagram blok sistem, dan skema rangkaian. Hasil ini merupakan spesifikasi awal yang kontekstual berdasarkan kebutuhan mahasiswa pada program studi yang diteliti, sehingga belum dapat diposisikan sebagai prinsip desain yang telah teruji atau dapat digeneralisasi.

Penelitian ini terbatas pada 43 mahasiswa dari satu program studi, dengan data pengalaman dan kesiapan yang berasal dari respons angket dan preferensi desain yang terbatas pada pilihan dalam instrumen. Selain itu, artefak yang dihasilkan masih berupa rancangan konseptual yang belum direalisasikan menjadi prototipe. Oleh karena itu, dosen praktikum dapat menggunakan hasil pemetaan kebutuhan ini sebagai pertimbangan dalam merancang aktivitas praktikum yang mengintegrasikan pengukuran digital dan kegiatan investigatif. Pengembang kit dapat menggunakan 12 DR sebagai spesifikasi awal dalam merealisasikan prototipe kit STEM berbasis Arduino-IoT. Sementara itu, peneliti selanjutnya disarankan merealisasikan prototipe, mengujinya dalam praktikum dengan sampel yang lebih luas dan beragam, serta mengevaluasi kelayakan teknis dan pengaruhnya terhadap keterampilan proses sains mahasiswa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Jambi atas dukungan pendanaan melalui skema Penelitian Dosen Pemula Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Jambi Tahun Anggaran 2026, berdasarkan Surat Perjanjian Kontrak Nomor 529/DST/UN21.11/PT.01.05/SPK/2026. Dukungan pendanaan tersebut telah mendukung pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini

PERNYATAAN

Kontribusi Penulis: Dian Pertiwi Rasmi: konseptualisasi penelitian, penyusunan metodologi, supervisi pelaksanaan penelitian, koordinasi kegiatan penelitian, dan penyusunan artikel ilmiah; Fadillah Rahmayani: investigasi, pengumpulan dan pengelolaan data wawancara serta angket, analisis data kualitatif, dan perumusan masalah penelitian; Febrina Rosa Winda: investigasi kondisi praktikum, pengolahan data angket, serta perancangan skenario eksperimen berbasis Arduino-IoT; Rahmi Putri Z. berkontribusi dalam penyusunan blueprint modul digital dan LKPD berbasis PjBL, validasi artefak konseptual, serta penghitungan Content Validity Index (CVI). Seluruh penulis telah membaca dan menyetujui naskah akhir.

Pendanaan: Penelitian ini didanai oleh Universitas Jambi dengan nomor kontrak 529/DST/UN21.11/PT.01.05/SPK/2026.

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan yang berkaitan dengan penelitian, penulisan, maupun publikasi artikel ini.

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial (AI): Dalam penyusunan naskah ini, penulis menggunakan ChatGPT untuk membantu penyusunan, peninjauan, dan penyuntingan bahasa serta keterbacaan naskah. Seluruh isi yang dihasilkan dengan bantuan aplikasi tersebut telah ditelaah dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas keakuratan, integritas, dan isi publikasi. Aplikasi AI tidak digunakan untuk menghasilkan data penelitian, melakukan analisis data, atau membuat gambar hasil penelitian.

Persetujuan Etik: Pelaksanaan penelitian ini didasarkan pada persetujuan dalam kontrak penelitian Universitas Jambi Nomor 529/DST/UN21.11/PT.01.05/SPK/2026.
Persetujuan tertulis (*informed consent*) diperoleh dari seluruh partisipan sebelum pengumpulan data.

Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

REFERENSI

Cai, B., Mainhood, L. A., Groome, R., Laverty, C., & Mclean, A. (2021). Student behavior in undergraduate physics laboratories: Designing experiments. *Physical Review Physics Education Research*, *17*(2), Article 020109. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.020109

Çoban, A., & Salar, R. (2023). Analyzing position, velocity and acceleration graphs using Arduino. *Jurnal Pendidikan Fisika Indonesia*, *19*(1), 36–46. https://doi.org/10.15294/jpfi.v19i1.32246

Dat, N. D., Bien, N. V., Khuyen, N. T. T., Ha, N. T. V., An, H. T. T., & Anh, N. T. P. (2024). Arduino-based experiments: Leveraging engineering design and scientific inquiry in STEM lessons. *International Journal of STEM Education for Sustainability, 4*(1), 38–53. https://doi.org/10.53889/ijses.v4i1.317

Elecfreaks. (t.t.). Ultrasonic ranging module HC-SR04 [Lembar data]. https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf

Firdaus, F., Syahrial, A., Ardhuha, J., & Susilawati. (2024). Pengembangan kit gerak lurus berbasis mikrokontroler Arduino Uno dan sensor infrared untuk meningkatkan keterampilan proses sains peserta didik. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, *5*(2), 118–122. https://doi.org/10.29303/goescienceed.v5i2.303

Ga, S.-H., Cha, H.-J., & Kim, C.-J. (2021). Adapting Internet of Things to Arduino-based devices for low-cost remote sensing in school science learning environments. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (IJOE)*, *17*(2), 4–18. https://doi.org/10.3991/ijoe.v17i02.20089

Hadiati, S., Saputri, D. F., Wahyudi, W., & Pramuda, A. (2021). Model-based reasoning in the deductive laboratory work with Arduino and sensor module. *Berkala Ilmiah Pendidikan Fisika*, *9*(3). https://doi.org/10.20527/bipf.v9i3.8735

InvenSense. (2013). MPU-6000 and MPU-6050 product specification (Rev. 3.4; PS-MPU-6000A-00). InvenSense Inc.

ISO. (2022). ISO 13528:2022 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison. International Organization for Standardization.

JCGM. (2008). Evaluation of measurement data: Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008). Joint Committee for Guides in Metrology. https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf

Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, *3, Article 11.* https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z

Krajcik, J. S., & Shin, N. (2014). Project-based learning. In R. K. Sawyer (Ed.), *The Cambridge handbook of the learning sciences* (2nd ed., pp. 275–297). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.018

La Braca, F., & Kalman, C. S. (2021). Comparison of labatorials and traditional labs: The impacts of instructional scaffolding on the student experience and conceptual understanding. *Physical Review Physics Education Research*, *17*(1), Article 010131. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010131

Lynn, M. R. (1986). Determination and quantification of content validity. Nursing Research, 35(6), 382–385. https://doi.org/10.1097/00006199-198611000-00017

Markula, A., & Aksela, M. (2022). The key characteristics of project-based learning: How teachers implement projects in K-12 science education. *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research*, *4, Article 2.* https://doi.org/10.1186/s43031-021-00042-x

Microchip Technology. (2018). ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P megaAVR data sheet (DS40002061A). https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf

Organtini, G., & Tufino, E. (2022). Effectiveness of a laboratory course with Arduino and smartphones. *Education Sciences, 12*(12), Article 898. https://doi.org/10.3390/educsci12120898

Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). The content validity index: Are you sure you know what's being reported? Critique and recommendations. Research in Nursing & Health, 29(5), 489–497. https://doi.org/10.1002/nur.20147

Rahmayani, F., Hendri, M., & Pertiwi, D. (2021). Need analysis for developing a STEM-based student worksheet application. *Jurnal Pendidikan Sains*, *9*(2), 137–145. https://doi.org/10.26714/jps.9.2.2021.137-145

Rasmi, D. P., Hendri, M., & Azriyanti, R. (2023). Analysis of the need for development of teaching materials in the form of STEM-based electronic modules. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, *9*(6), 4135–4141. https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i6.2683

Rasmi, D. P., Lestari, N., Sirait, J. V., & Dharma, E. (2026). Pemanfaatan Arduino-IoT dalam pengembangan STEMLAB fisika: Studi eksploratif terhadap persepsi mahasiswa. *JIPFRI (Jurnal*

Inovasi Pendidikan Fisika dan Riset Ilmiah), *10*(1), 1–11. https://doi.org/10.30599/jipfri.v10i1.4847

Rezba, R. J., Sprague, C. R., McDonnough, J. T., & Matkins, J. J. (2007). *Learning and assessing science process skills* (5th ed.). Kendall/Hunt Publishing Company.

Riskawati, R., Rusdiana, D., Said, S., Sanusi, D. K., & Indira, I. (2026). Development of an integrated electronics learning module using sensors and Arduino to enhance conceptual understanding in physics. *Tadris: Jurnal Keguruan dan Ilmu Tarbiyah*, *11*(1), 119–126. https://doi.org/10.24042/tadris.v11i1.27555

Saramati, B., Vidak, A., & Mešić, V. (2026). Learning physics with microcontrollers: A systematic review of empirical research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, *22*(6), Article em2848. https://doi.org/10.29333/ejmste/18710

Shannon, C. E. (1949). Communication in the presence of noise. Proceedings of the IRE, 37(1), 10–21. https://doi.org/10.1109/JRPROC.1949.232969

Taufik, M., & Hikmawati, H. (2025). Penerapan project-based learning berbasis Arduino pada mata kuliah Fisika Instrumentasi untuk meningkatkan keterampilan instrumentasi dan motivasi belajar mahasiswa pendidikan fisika. *Empiricism Journal*, *6*(4), 2160–2168. https://doi.org/10.36312/dmz11v84

Uzal, G. (2022). The use of Arduino in physics laboratories. *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, *21*(3), 88–100. https://www.tojet.net/articles/v21i3/2137.pdf

Wahyudi, M., Azmar, A., Muhayadi, S., & Firmansyah, M. A. (2024). Development of physics digital props based on the Internet of Things (IoT) on the material of motion dynamics. *Jurnal Pendidikan Fisika*, *12*(2), 109–120. https://doi.org/10.26618/jpf.v12i2.12476

Weigand, H., Johannesson, P., & Andersson, B. (2021). An artifact ontology for design science research. *Data & Knowledge Engineering*, *133, Article 101878*. https://doi.org/10.1016/j.datak.2021.101878