Sistem IoT Modular Berbasis ESP32: Media Pembelajaran Transisi Pemrograman Arduino yang Fleksibel dan Berbiaya Efisien

ESP32-Based Modular IoT System: A Flexible and Cost-Effective Learning Tool for Transitioning to Arduino Programming

Danny Sebastian[1*], Aga Susanto[2], Yuan Lukito[3]
Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Kristen Duta Wacana
Yogyakarta, Indonesia
[1]danny.sebastian@staff.ukdw.ac.id
[2]aga.susanto@ti.ukdw.ac.id
[3]yuan@ti.ukdw.ac.id

*Corresponding Author: danny.sebastian@staff.ukdw.ac.id

Riwayat Artikel
Naskah diterima: 24/08/2026 | Naskah direvisi: 22/09/2026 | Naskah diterbitkan: 31/10/2026

Creative Commons License 4.0 (CC BY –NC)

Abstract*— Arduino programming instruction for elementary and junior HIGH school students is often hindered by HIGH cognitive load resulting from the simultaneous need to assemble hardware, grasp computational logic, and memorize syntax. Existing commercial solutions are generally expensive and offer limited flexibility. This study aimed to develop an ESP32-based Internet of Things (IoT) system using a modular approach to serve as a transitional learning tool from block-based to text-based programming. The system was designed to alleviate cognitive load through plug-and-play physical Sockets and baseline software that simplifies text syntax into intuitive functions. Evaluation was conducted in three main stages using a data triangulation approach. Technical testing (black-box testing) showed the system achieving a 100% Pass rate across 31 functional scenarios. Effectiveness testing, utilizing a between-subjects comparative design (n=9), revealed that the modular group outperformed the comparison group (Tinybit) in both Input-Process-Output (IPO) comprehension scores (3.20 vs. 2.50) and usability satisfaction (88.8% vs. 74.0%). The modular design also successfully prompted independent exploration initiatives in 100% of the participants. In flexibility testing, all seven test subjects successfully transferred their computational understanding to independently program new sensor modules with a perfect success rate. It is concluded that the developed modular IoT system is reliable, effective at reducing initial learning barriers, and HIGHly flexible as a cost-efficient tool for transitioning to Arduino programming.

Keywords*— ESP32, Internet of Thigs, learning tools, arduino programming, modular system, block programming

Intisari— Pembelajaran pemrograman Arduino pada siswa SD dan SMP sering kali terhambat oleh tingginya beban kognitif akibat keharusan merakit perangkat keras, memahami logika komputasional, dan menghafal sintaksis secara bersamaan. Solusi komersial yang ada umumnya berbiaya tinggi dan memiliki fleksibilitas terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem Internet of Things (IoT) berbasis ESP32 dengan pendekatan modular sebagai media pembelajaran transisi dari block programming ke pemrograman berbasis teks. Sistem dirancang untuk mereduksi beban ganda melalui soket fisik plug-and-play dan software baseline yang menyederhanakan sintaksis teks menjadi fungsi intuitif. Evaluasi dilakukan dalam tiga tahap utama dengan pendekatan triangulasi data. Pada pengujian teknis (black-box testing), sistem berhasil mencapai tingkat kelulusan 100% pada 31 skenario fungsional. Pada pengujian efektivitas menggunakan desain studi komparatif between-subject (n=9), kelompok modular mengungguli kelompok pembanding (Tinybit) dengan skor pemahaman Input-Process-Output (IPO) yang lebih tinggi (3,20 berbanding 2,50) serta tingkat kepuasan penggunaan (usability) yang lebih superior (88,8% berbanding 74,0%). Desain modular juga sukses memicu 100% inisiatif eksplorasi mandiri secara konkret. Pada pengujian fleksibilitas, ketujuh siswa uji berhasil mentransfer pemahaman komputasional mereka untuk memprogram modul sensor baru secara mandiri dengan tingkat keberhasilan sempurna. Disimpulkan bahwa sistem IoT modular yang dikembangkan terbukti andal, efektif menurunkan hambatan belajar di awal, dan sangat fleksibel digunakan sebagai media transisi pemrograman Arduino berbiaya efisien.

Kata Kunci— ESP32, Internet of Things, media pembelajaran, pemrograman Arduino, sistem modular, block programming.

I. PENDAHULUAN

Secara teoritis, proses pemerolehan pengetahuan dan keterampilan menuntut pendekatan yang bertahap (sekuensial) agar struktur kognitif pembelajar dapat mengakomodasi informasi baru secara efektif. Pendekatan ini berakar pada Cognitive Load Theory, yang menegaskan bahwa kapasitas memori kerja manusia sangat terbatas; oleh karena itu, materi pembelajaran harus dipecah menjadi tahapan fundamental yang dapat dikelola untuk mencegah kelebihan beban kognitif dan memfasilitasi pembentukan skema mental yang solid[1]. Konsep ini semakin diperkuat oleh prinsip scaffolding dalam pendidikan, di mana dukungan instruksional dirancang secara berjenjang dimulai dari bimbingan pada konsep dasar hingga perlahan dilepas saat pembelajar mulai mampu memecahkan masalah yang lebih abstrak dan kompleks secara mandiri[2]. Penguasaan konsep secara bertahap ini memastikan bahwa pondasi pemahaman telah benar-benar kokoh sebelum pembelajar melangkah ke tingkat kesulitan berikutnya.

Mengadopsi landasan teoritis tersebut, kurikulum belajar pemrograman modern juga telah dirancang secara sistematis melalui alur yang bertahap, dari logika dasar hingga arsitektur tingkat lanjut seperti Object-Oriented Programming (OOP) dan implementasi framework. Meskipun alur ideal bagi pemula umumnya diinisiasi melalui block-based programming untuk membangun logika komputasional tanpa beban syntax error, titik awal pembelajaran ini sejatinya bersifat fleksibel dan sangat bergantung pada tingkat perkembangan kognitif pembelajar. Bagi pembelajar dewasa yang telah memiliki kematangan pemikiran abstrak dan kapasitas pemecahan masalah yang lebih berkembang, tahap block programming sering kali dapat dilewati, sehingga mereka bisa langsung memulai dari bahasa pemrograman terstruktur berbasis teks[3]. Penyesuaian ini didasarkan pada temuan bahwa pembelajar dengan tingkat kognitif yang lebih matang sudah memiliki kesiapan mental untuk menangani beban sintaksis, serta cenderung lebih termotivasi ketika langsung dihadapkan pada lingkungan pemrograman yang autentik dan aplikatif[4].

Tren pendidikan saat ini menunjukkan peningkatan minat dalam pembelajaran robotika pada usia dini, sebuah pendekatan yang sangat sinkron dengan pengenalan Internet of Things (IoT). Berbagai penelitian menegaskan pentingnya media pembelajaran yang terstruktur dan bersifat hands-on. Penggunaan instrumen seperti robotika pendidikan terbukti membantu siswa memahami konsep pemrograman yang abstrak menjadi lebih nyata sekaligus meningkatkan motivasi belajar. Metode pembelajaran berbasis Arduino yang hands-on secara spesifik terbukti mampu mengatasi hambatan teknis, meningkatkan computational thinking, dan memperkuat penguasaan konten [5], [6]. Selain itu, implementasi pembelajaran berbasis proyek dengan robot Arduino juga dilaporkan berhasil meningkatkan capaian serta ketekunan siswa[7]. Pendekatan yang mengintegrasikan pemrograman dengan sistem fisik semacam ini sejatinya dirancang untuk menghasilkan pemahaman yang lebih baik, motivasi yang lebih tinggi, dan beban kognitif yang lebih terkendali dibandingkan metode pembelajaran konvensional[8]. Namun, implementasi langsung pada tingkat usia anak-anak sering kali menghadirkan kontradiksi dan permasalahan kognitif tersendiri. Transisi langsung dari lingkungan block programming menuju pengembangan IoT murni menggunakan platform seperti Arduino memaksa anak-anak untuk belajar secara berlebih; mereka dituntut untuk memahami logika komputasional, beradaptasi dengan sintaksis bahasa pemrograman berbasis teks, dan merakit sirkuit elektronika secara bersamaan. Lompatan drastis ini memaksa kapasitas memori kerja mereka memproses terlalu banyak beban secara simultan, menciptakan intrinsic cognitive load yang berisiko menyebabkan kelelahan mental alih-alih memfasilitasi pemahaman.

Penggunaan Arduino dan IoT sebagai media pembelajaran telah banyak diteliti. Trainer kit berbasis Arduino dan IoT dinilai layak digunakan sebagai media pembelajaran, dan workshop Arduino yang menggabungkan pengenalan sensor, aktuator, serta pemrograman mikrokontroler meningkatkan pemahaman dan kepercayaan diri peserta [9], [10]. Mikrokontroler ESP32 semakin banyak diadopsi karena dukungan konektivitas Bluetooth dan WiFi yang memungkinkan pengembangan proyek IoT nyata dalam lingkungan belajar [11]. Penerapan IoT dalam pendidikan terbukti meningkatkan kinerja akademik, motivasi, dan keterlibatan siswa melalui tugas autentik[12], [13]. Selain itu, pendekatan modular secara konsisten meningkatkan motivasi dan keterlibatan karena memberi ruang eksplorasi mandiri, sekaligus memungkinkan penyesuaian kompleksitas materi secara bertahap sesuai prinsip scaffolding[14].

Menyikapi tantangan kognitif tersebut, diperlukan sebuah instrumen perantara yang secara khusus mampu menjembatani fase transisi dari block programming menuju pemrograman Arduino, khususnya bagi siswa pada jenjang SD dan SMP. Dalam praktiknya, upaya penjembatanan ini kerap menggunakan platform robotika terintegrasi siap pakai, seperti sistem Tinybit berbasis micro:bit. Meskipun platform semacam ini efektif untuk menghilangkan kerumitan perakitan di tahap awal, penggunaannya sering kali terhambat oleh biaya pengadaan yang relatif tinggi. Selain itu, arsitektur perangkat kerasnya yang tertutup (fixed) membatasi ruang eksplorasi siswa untuk menambahkan sensor-sensor eksternal secara leluasa. Oleh karena itu, dibutuhkan media transisi alternatif yang dirancang untuk mereduksi kompleksitas teknis, terutama meminimalkan

JUTEI Edisi Volume. 10 No.2 Oktober 2026
ISSN 2579-3675, e-ISSN-5538
DOI 10.21460/jutei.2026.102.533

beban perakitan sirkuit manual dengan biaya yang lebih efisien, namun tetap mempertahankan esensi eksplorasi hands-on yang krusial. Berdasarkan permasalahan dan kajian tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem IoT berbasis ESP32 dengan pendekatan modular sebagai media pembelajaran transisi pemrograman Arduino.

II. FORMAT HALAMAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan evaluasi formatif berjenjang untuk menguji kelayakan dan efektivitas media pembelajaran yang dikembangkan. Secara umum langkah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Guna menghasilkan kesimpulan yang komprehensif, proses analisis menerapkan pendekatan triangulasi yang memadukan data kuantitatif, data kualitatif, serta observasi naturalistik. Sebagaimana disajikan pada matriks evaluasi di atas, pengujian dirancang secara sekuensial ke dalam tiga tahap utama dan satu tahap validasi ahli. Pengujian Tahap 1 berfokus pada verifikasi keandalan perangkat keras dan lunak melalui black-box testing terhadap 31 skenario fungsional. Setelah lolos uji teknis, sistem dievaluasi pada Pengujian Tahap 2 menggunakan desain studi komparatif between-subject yang membandingkan sistem modular dengan Tinybit untuk mengukur peningkatan pemahaman konsep Input-Process-Output (IPO) menggunakan rubrik tugas berjenjang dan metrik skor nilai. Pengujian Tahap 3 kemudian menguji batas fleksibilitas sistem sekaligus mengukur tingkat transfer pengetahuan siswa saat melakukan eksplorasi mandiri menggunakan modul sensor baru. Sebagai penyempurnaan, kelayakan operasional dan potensi keberlanjutan sistem di lingkungan kelas sesungguhnya divalidasi langsung oleh para instruktur pengajar melalui instrumen penilaian berskala Likert yang mencakup aspek kemudahan implementasi, kejelasan alur pembelajaran, kesiapan perangkat, fleksibilitas penggunaan, serta relevansi sistem terhadap kebutuhan pembelajaran pemrograman Arduino di kelas.

Subjek dalam penelitian ini melibatkan 9 siswa aktif berusia 7–15 tahun dari jenjang Sekolah Dasar (SD) dan Sekolah Menengah Pertama (SMP) yang berlokasi di Robotics Education Center (REC) cabang Demangan, Yogyakarta. Pemilihan lokasi dan subjek ini tidak lepas dari kesediaan penuh pihak REC Demangan untuk menjadi mitra penelitian, serta kesesuaian kondisi empiris mereka dengan kebutuhan (case) yang sedang diteliti. Secara institusional, REC Demangan saat ini telah berhasil menerapkan alur pembelajaran block programming dasar menggunakan platform micro:bit, namun mereka sedang menghadapi tantangan riil untuk menemukan media yang tepat guna membawa siswa ke jenjang pemrograman Arduino berbasis teks. Keselarasan antara kurikulum yang sedang berjalan di REC dengan instrumen transisional yang sedang dikembangkan menjadikan institusi ini sebagai lingkungan uji coba yang sangat representatif. Oleh karena itu, pengembangan sistem IoT modular dalam penelitian ini sejatinya merupakan respons langsung yang dikontekstualisasikan untuk memecahkan permasalahan konkret mitra, sehingga pengujian kelayakan media dapat dilakukan pada subjek target yang paling ideal.



Gambar 1. Langkah Penelitian

TABEL I
DAFTAR PENGUJIAN

Tahap Pengujian	Fokus Analisis	Metode	Instrumen
Pengujian Teknis	Fungsionalitas perangkat keras dan lunak (pembacaan sensor, kendali aktuator, deteksi modul otomatis, dan komputasi multi-modul).	*Black-box testing*.	Lembar pengujian berisi 31 skenario dengan parameter kelulusan *Pass*/*Fail*.
Pengujian Efektivitas	Peningkatan pemahaman *Input-Process-Output (IPO)* serta studi komparatif *between-subject* (Sistem Modular vs. *Tinybit*).	Evaluasi kuantitatif komparatif & observasi.	1. Pre-test dan Post-test (dievaluasi melalui *Gain Score*). 2. Rubrik Penilaian Tugas (kriteria: keberhasilan fungsi, pemahaman IPO, kemandirian) dilengkapi *log hint* bertingkat. 3. Kuesioner *Usability* siswa. 4. Panduan Wawancara terstruktur.
Pengujian Fleksibiltas	Adaptabilitas sistem pada modul baru (DHT22 & Sensor Api) dan kemampuan transfer pengetahuan siswa secara mandiri.	Uji eksplorasi & refleksi.	1. Soal Refleksi (mengukur transfer pemahaman konsep). 2. Rubrik Penilaian Tugas ekslorasi mandiri. 3. Kuesioner *Usability* lanjutan. 4. Wawancara motivasi eksplorasi.

Tahap Pengujian	Fokus Analisis	Metode	Instrumen
Validasi Pengajar	Kelayakan sistem sebagai media ajar, kemudahan operasional, dan keandalan sistem dalam skenario kelas reguler.	Evaluasi tanggapan ahli/praktisi	Lembar Feedback berisi 14 item berskala 1-5 dan isian saran evaluatif terbuka.

A. *Kebutuhan Sistem*

Sebelum merancang arsitektur perangkat keras dan lunak, pengembangan sistem IoT modular ini didasarkan pada identifikasi kebutuhan operasional yang selaras dengan karakteristik siswa jenjang SD dan SMP di Robotics Education Center (REC). Spesifikasi sistem diturunkan ke dalam dua parameter utama, yakni kebutuhan fungsional yang memastikan sistem dapat mengeksekusi instruksi komputasional, serta kebutuhan non-fungsional yang menjamin pengalaman pengguna terbebas dari hambatan teknis yang tidak relevan dengan esensi pembelajaran. Rincian kebutuhan fungsional sistem dan non-fungsional sistem dapat dilihat pada TABEL II dan TABEL III.

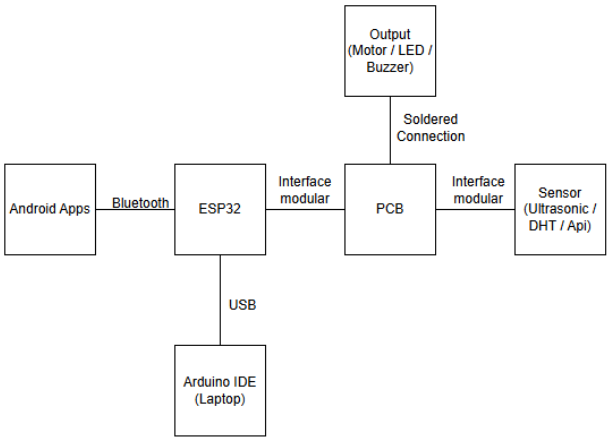
Berdasarkan analisis kebutuhan fungsional dan non-fungsional tersebut, arsitektur keseluruhan sistem dirancang dengan memetakan alur komunikasi antar komponen, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Arsitektur sistem *IoT* yang dikembangkan berpusat pada mikrokontroler *ESP32* yang bertindak sebagai unit pemroses utama. Dalam ekosistem ini, mikrokontroler dikonfigurasi dan diprogram menggunakan perangkat lunak *Arduino IDE* pada komputer (laptop) melalui koneksi kabel *USB*. *ESP32* juga berfungsi sebagai jembatan komunikasi data nirkabel menggunakan protokol Bluetooth untuk berinteraksi dengan aplikasi seluler (*Android Apps*). Aplikasi ini berperan sebagai antarmuka pengguna yang memfasilitasi pemantauan pembacaan data secara real-time sekaligus pengiriman instruksi kendali komputasional. Pada ranah perangkat keras fisik, *ESP32* diintegrasikan ke dalam sebuah *PCB* yang mendistribusikan jalur kelistrikan dan fungsionalitas sistem. *PCB* tersebut menaungi unit keluaran (output) bawaan sistem, seperti motor penggerak, indikator *LED*, dan buzzer yang ditanamkan secara permanen melalui sambungan solder (*soldered connection*). Lebih lanjut, untuk mendukung prinsip fleksibilitas, *PCB* ini dilengkapi dengan antarmuka modular (*interface modular*) berbasis soket plug-and-play. Antarmuka ini memungkinkan berbagai unit masukan (sensor), seperti sensor ultrasonik, modul *DHT* (suhu dan kelembapan), serta sensor deteksi api, untuk saling ditukar-pasang secara leluasa tanpa memerlukan pengetahuan elektronika maupun proses perakitan ulang komponen.

TABEL II
KEBUTUHAN FUNGSIONAL SISTEM

Komponen/Aspek	Deskripsi
Unit Kontrol (Perangkat Keras)	Membaca data dari modul sensor, memproses logika program siswa, mengaktifkan aktuator, serta memvalidasi kesesuaian fisik modul yang terpasang secara otomatis.
Software baseline	Menyediakan fungsi-fungsi kode yang telah disederhanakan agar siswa fokus pada logika *Input-Process-Output (IPO)*, serta menjalankan deteksi modul sebelum program utama dieksekusi.
Aplikasi Android	Memindai dan menghubungkan perangkat via *Bluetooth*, mengirimkan perintah aktuator, memantau data sensor secara *real-time*, serta menampilkan umpan balik status koneksi modul.

TABEL III
KEBUTUHAN NON-FUNGSIONAL SISTEM

Komponen/Aspek	Deskripsi
Usability (Kemudahan Pengguna)	Perakitan modul sensor dapat dilakukan secara *plug-and-play* tanpa pengetahuan pengkabelan, serta penulisan program minim hambatan sintaksis agar ramah bagi pembelajar pemula.
Reliability (kehandalan)	Sistem beroperasi secara konsisten berulang kali, koneksi *Bluetooth* terjalin stabil, dan sistem mampu merespons masukan sensor secara *real-time* tanpa penundaan signifikan.
Flexibility (Fleksibilitas)	Sistem mendukung eksplorasi mandiri di mana siswa leluasa mencabut, mengganti, atau menambahkan modul sensor secara cepat (di tengah sesi) tanpa perlu merakit ulang sirkuit dari awal.



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem

B. *Pengujian Fungsional Sistem*

Skenario pengujian Fungsional sistem dilakukan emnggunakan *Blackbox Testing*. Pengujian ini dirancang secara spesifik untuk mengisolasi setiap fungsi perangkat keras dan memastikan bahwa masukan (input) dari sistem berkesesuaian dengan luaran (output) yang diberikan, tanpa menguji struktur kode internalnya secara langsung. Parameter pengujian difokuskan secara ketat pada empat kelompok utama: akurasi pembacaan modul sensor (TABEL IV), responsivitas aktuator bawaan (TABEL V), keandalan algoritma deteksi modul otomatis (TABEL VI), serta ketangguhan kapabilitas komputasi mikrokontroler dalam

JUTEI Edisi Volume. 10 No.2 Oktober 2026
ISSN 2579-3675, e-ISSN-5538
DOI 10.21460/jutei.2026.102.533

mengeksekusi instruksi dari beberapa modul yang berjalan secara serentak(TABEL VII).

TABEL IV
BLACKBOX TESTING – FUNGSI MODUL INPUT

No	Skenario Uji	Cara Pengujian	Hasil yang Diharapkan
A1.1	Baca jarak objek dekat (< 10 cm)	Dekatkan tangan ke sensor < 10 cm, cek nilai yang tampil	Nilai terbaca 0–10 cm, akurasi ±2 cm
A1.2	Baca jarak objek sedang (10–30 cm)	Taruh objek 20 cm dari sensor, cek nilai	Nilai terbaca sekitar 20 cm, akurasi ±2 cm
A1.3	Baca jarak objek jauh (> 50 cm)	Taruh objek > 50 cm, cek nilai	Nilai terbaca sesuai jarak riil
A1.4	Responsivitas *real-time*	Gerakkan objek perlahan mendekat dan menjauh	Nilai berubah secara kontinu dan responsif
A2.1	Baca suhu ruangan normal	Jalankan sistem, bandingkan dengan termometer referensi	Selisih ≤ 2°C dari termometer referensi
A2.2	Respon perubahan suhu	Pegang sensor dengan tangan, cek apakah nilai berubah	Nilai suhu naik dalam 10–15 detik
A2.3	Baca kelembapan	Jalankan di kondisi normal	Nilai kelembapan terbaca dalam range wajar (40–80% RH)
A2.4	Tampil 2 data sekaligus	Cek apakah suhu dan kelembapan tampil bersamaan	Kedua nilai tampil tanpa konflik
A3.1	Deteksi api (positif)	Dekatkan korek api menyala pada jarak 10–15 cm	Sensor mendeteksi api, indikator aktif
A3.2	Tidak ada api (negatif)	Jalankan sensor tanpa sumber api	Sensor tidak mendeteksi, indikator tidak aktif
A3.3	Respon saat api dimatikan	Dekatkan korek → matikan → cek respon	Sensor merespon dalam < 2 detik setelah api mati
A3.4	Sensitivitas jarak	Uji deteksi di 5 cm, 10 cm, 20 cm	Tercatat jarak maksimal deteksi sistem

TABEL V
BLACKBOX TESTING – FUNGSI MODUL OUTPUT

No	Skenario Uji	Cara Pengujian	Hasil yang Diharapkan
B.1	LED menyala	Kirim perintah nyalakanLED()	LED menyala
B.2	LED mati	Kirim perintah matikanLED()	LED mati
B.3	LED berkedip	Kirim *HIGH–delay–LO* berulang	LED berkedip sesuai interval *delay*
B.4	Buzzer berbunyi	Kirim perintah nyalakanBuzzer()	Buzzer berbunyi pada frekuensi yang ditentukan
B.5	Buzzer mati	Kirim perintah matikanBuzzer()	Buzzer berhenti berbunyi
B.6	Motor berputar	Kirim perintah maju()	Motor berputar
B.7	Motor berhenti	Kirim perintah stopMotor()	Motor berhenti

TABEL VI
BLACKBOX TESTING – DETEKSI & VALIDASI MODUL

No	Skenario Uji	Cara Pengujian	Hasil yang Diharapkan
C.1	Deteksi modul terpasang saat startup	Pasang ultrasonik → nyalakan sistem	Sistem menampilkan info modul terdeteksi
C.2	Tidak ada modul saat startup	Nyalakan sistem tanpa modul	Sistem menampilkan info tidak ada modul
C.3	Pilih modul DHT di aplikasi, pasang modul	Pilih DHT di aplikasi → pasang modul DHT → jalankan	Data suhu & kelembapan terbaca sesuai pilihan user
C.4	Pilih modul sensor api di aplikasi, pasang modul	Pilih sensor api di aplikasi → pasang modul → jalankan	Data deteksi api terbaca sesuai pilihan user
C.5	Modul dicabut saat runtime	Jalankan sistem → cabut modul	Sistem memberi respons/peringatan < 3 detik
C.6	Ganti modul + update pilihan di aplikasi	Cabut sensor api → pilih DHT di aplikasi → pasang DHT → jalankan	Sistem berjalan sesuai pilihan baru user

TABEL VII
BLACKBOX TESTING – KOMBINASI MULTI-MODUL

No	Skenario Uji	Cara Pengujian	Hasil yang Diharapkan
D.1	Ultrasonik + LED	Pasang keduanya, LED menyala saat jarak < 20 cm	Kedua modul berjalan bersamaan sesuai logika
D.2	Ultrasonik + Buzzer	Pasang keduanya, buzzer bunyi saat jarak < 10 cm	Kedua modul berjalan bersamaan
D.3	DHT + LED	Pasang keduanya, LED menyala saat suhu > 30°C	Kedua modul berjalan bersamaan
D.4	DHT + Buzzer	Pasang keduanya, buzzer bunyi saat suhu > 35°C	Kedua modul berjalan bersamaan
D.5	Sensor Api + LED + Buzzer	Pasang ketiganya, semua aktif saat api terdeteksi	Ketiga modul berjalan tanpa konflik
D.6	2 modul input (Ultrasonik + DHT)	Pasang keduanya, cek apakah data keduanya terbaca	Kedua nilai sensor tampil tanpa saling mengganggu

C. Pengujian Efektivitas

Pengujian efektivitas dirancang untuk mengevaluasi sejauh mana sistem IoT modular yang dikembangkan mampu memfasilitasi peningkatan pemahaman siswa terhadap konsep dasar *Input-Process-Output (IPO)* dibandingkan dengan sistem pembanding (*Tinybit*).

Pengujian ini mengimplementasikan desain studi komparatif *between-subject* yang melibatkan 9 subjek siswa. Subjek dibagi secara paralel menjadi dua kelompok pengujian, yakni kelompok eksperimen yang menggunakan sistem IoT modular (5 siswa) dan kelompok kontrol yang menggunakan sistem *Tinybit* (4 siswa). Guna menjaga validitas komparasi, kedua kelompok mengikuti sesi pembelajaran dengan beban materi yang identik yakni pemrograman aktuasi berbasis pembacaan sensor ultrasonik melalui dua tugas utama, dengan alokasi waktu yang disetarakan selama kurang lebih 60 menit per sesi.

Untuk menghasilkan evaluasi yang holistik, proses pengumpulan data dilakukan secara bersamaan melalui pendekatan triangulasi instrumen. Evaluasi kognitif diukur melalui instrumen pre-test dan post-test yang dianalisis menggunakan perhitungan *Gain Score*. Kualitas capaian praktik diukur menggunakan rubrik penilaian tugas dengan tiga kriteria utama (keberhasilan fungsional program, pemahaman alur IPO, dan tingkat kemandirian), yang dikombinasikan dengan pencatatan *log hint* bertingkat sebagai representasi pendampingan *scaffolding*. Lebih lanjut, persepsi pengalaman pengguna dievaluasi menggunakan kuesioner *usability*, sementara aspek motivasi dan pendalaman pemahaman kualitatif digali melalui wawancara terstruktur dan observasi naturalistik selama sesi berlangsung.

Untuk mengukur signifikansi peningkatan pemahaman komputasional siswa secara objektif sebelum dan sesudah intervensi pembelajaran, evaluasi efektivitas pada penelitian ini dianalisis menggunakan metode perhitungan *Normalized Gain* (*N-Gain*). Pendekatan ini dipilih karena dinilai efektif dalam meminimalisasi bias statistik yang muncul akibat perbedaan tingkat kemampuan kognitif awal antar siswa, baik pada kelompok yang menggunakan sistem modular maupun kelompok pembanding (*Tinybit*). Perhitungan skor *N-Gain* diformulasikan melalui persamaan No. (1).

$$N - Gain = \frac{Skor\ PostTest - Skor\ PreTest}{Skor\ Maksimal - Skor\ Minimal} \quad (1)$$

Hasil perhitungan *N-Gain* tersebut kemudian dievaluasi dan diinterpretasikan berdasarkan kriteria klasifikasi standar Hake, di mana perolehan nilai $g > 0,7$ diindikasikan sebagai peningkatan dengan kategori tinggi, $0,3 \le g \le 0,7$ masuk dalam kategori sedang, dan nilai $g < 0,3$ dikategorikan rendah. Melalui metrik komparatif ini, dampak pemanfaatan media pembelajaran IoT berskema modular terhadap peningkatan pemahaman konsep *Input-Process-Output (IPO)* dapat dievaluasi secara lebih valid dan proporsional.

D. Pengujian Fleksibilitas

Pengujian tahap ketiga dirancang sebagai evaluasi lanjutan untuk mengukur dua aspek secara bersamaan, yakni fleksibilitas perangkat keras sistem dalam mengakomodasi modul yang beragam, serta kemampuan siswa dalam melakukan transfer pengetahuan secara mandiri. Berbeda dengan desain komparatif pada Tahap 2, pengujian pada tahap ini melibatkan seluruh subjek uji dari kedua kelompok asal (baik ex-Modular maupun ex-*Tinybit*) yang seluruhnya diinstruksikan untuk menggunakan sistem IoT modular. Pada tahap ini, siswa diperkenalkan dengan dua perangkat input yang sama sekali baru, yaitu modul sensor suhu dan kelembapan (DHT22) serta sensor deteksi api.

Guna menguji kemandirian dan transfer pemahaman komputasional, siswa tidak diberikan panduan atau tutorial pemrograman secara langsung. Siswa didorong untuk menyelesaikan empat tugas eksplorasi mandiri dua tugas untuk masing-masing modul baru dengan murni mengandalkan abstraksi konsep *Input-Process-Output (IPO)* yang telah mereka pelajari sebelumnya serta sebuah kamus fungsi (*function dictionary*) sebagai rujukan sintaksis tunggal.

Instrumen pengumpulan data pada pengujian ini tidak lagi menggunakan instrumen tes standar, melainkan berfokus pada pengukuran kemampuan transfer pemahaman lintas modul. Secara kuantitatif, transfer pengetahuan ini dievaluasi melalui penyelesaian soal refleksi di akhir sesi. Kualitas eksekusi tugas diukur menggunakan rubrik penilaian yang sama dengan Tahap 2 (keberhasilan fungsi, pemahaman IPO, dan kemandirian) yang didukung oleh *log hint* bertingkat guna memantau ketergantungan siswa terhadap bantuan instruktur. Evaluasi ini kemudian disempurnakan dengan kuesioner *usability* lanjutan, wawancara mendalam terkait motivasi eksplorasi mandiri, serta pencatatan observasi naturalistik untuk menganalisis apakah latar belakang penggunaan sistem pada tahap sebelumnya memengaruhi daya adaptasi siswa terhadap modul baru.

E. Validasi Pengajar

Tahap terakhir dalam desain penelitian ini adalah validasi ahli yang melibatkan para instruktur atau pengajar di Robotics Education Center (REC). Tahap ini bertujuan untuk mengukur tingkat kelayakan, kepraktisan, dan potensi keberlanjutan sistem apabila diimplementasikan secara riil dalam kurikulum dan ekosistem kelas reguler. Pengumpulan data pada tahap ini dilakukan setelah seluruh rangkaian sesi pengujian terhadap siswa (Tahap 2 dan Tahap 3) selesai dilaksanakan.

Instrumen utama yang digunakan adalah lembar evaluasi (*feedback form*) terstruktur yang memuat 14 item pernyataan dengan skala penilaian Likert (1-5). Parameter evaluasi difokuskan pada empat aspek krusial, yaitu: (1) kesesuaian pembelajaran dengan tahapan kognitif siswa, (2) kemudahan operasional bagi pengajar dalam menyiapkan perangkat, (3) keandalan sistem (reliability) untuk penggunaan kelas yang berulang, serta (4) potensi keberlanjutan sistem untuk diintegrasikan ke dalam silabus yang sudah ada. Di samping metrik kuantitatif, instrumen ini juga mengakomodasi evaluasi kualitatif melalui pertanyaan terbuka guna menjaring saran evaluatif, identifikasi risiko operasional di kelas (seperti potensi kerusakan perangkat keras), serta rekomendasi penambahan jenis modul sensor baru di masa depan dari perspektif praktisi pendidikan.

JUTEI Edisi Volume. 10 No.2 Oktober 2026
ISSN 2579-3675, e-ISSN-5538
DOI 10.21460/jutei.2026.102.533

TABEL VIII
BILL OF MATERIALS (BOM) PERANGKAT KERAS SISTEM

Gambar	Komponen	Total
	1x PCB Unit Kontrol (fabrikasi + komponen *SMD*)	Rp 240.576
	1x Mikrokontroler *ESP32 DevKit* V1	Rp 77.000
	2x *Female Pin Header Pitch* 2.54 1x40	Rp 8.000
	1x *Socket* XH 2.54 4pin	Rp 2.500
	2x Baterai *Li-Ion* 3.7V 14500 *AA Size*	Rp 24.000
	1x Sensor Ultrasonik HC-SR04	Rp 12.000
	1x Sensor Suhu & Kelembapan DHT22	Rp 35.000
	1x Sensor Api *IR Flame Sensor*	Rp 10.000

III. HASIL & PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem Perangkat Keras & Lunak

Implementasi pada sisi perangkat keras menghasilkan unit kontrol utama berbasis mikrokontroler *ESP32* yang difabrikasi dalam bentuk *Printed Circuit Board (PCB)*. Unit ini dirancang agar langsung siap pakai dengan mengintegrasikan komponen aktuator bawaan (*onboard*) seperti LED dan buzzer, yang ditenagai oleh baterai ganda *Li-Ion* 3.7V tipe 14500. Pendekatan modularitas pada sistem ini diwujudkan melalui penggunaan dua jenis antarmuka soket fisik yang dibedakan secara tegas berdasarkan fungsinya. Komponen yang bersifat tetap, seperti modul sensor ultrasonik, ditanamkan pada antarmuka *pin header* 2.54 mm. Sementara itu, modul sensor tambahan yang dirancang untuk saling ditukar-pasang (seperti sensor DHT22 dan sensor api) menggunakan antarmuka konektor XH 2.54 4-pin yang secara khusus dilengkapi dengan mekanisme pengunci mekanis (sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3). Perbedaan profil fisik antar konektor ini sukses merealisasikan mekanisme *plug-and-play*. Keputusan desain ini terbukti tidak hanya mempercepat proses bongkar-pasang tanpa alat bantu, tetapi juga berfungsi sebagai tindakan preventif perangkat keras yang efektif untuk memastikan siswa terhindar dari risiko menancapkan modul pada soket yang salah.



(a) (b)

Gambar 3. (a) Unit kontrol utama modular dengan *ESP32* dan sensor ultrasonik; (b) Modul DHT22 dan sensor api dengan konektor XH 2.54.

Sebagai pertimbangan kelayakan implementasi, arsitektur perangkat keras ini juga dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi anggaran. Rincian komponen dan estimasi biaya perakitan unit kontrol beserta seluruh modul disajikan pada TABEL VIII. Dengan total estimasi biaya pengembangan sebesar Rp398.576, perancangan sistem modular ini menawarkan alternatif yang jauh lebih terjangkau dibandingkan dengan pengadaan platform robotik komersial siap pakai.

Pada sisi perangkat lunak, *software baseline* diimplementasikan dalam bentuk berkas berekstensi .ino pada *Arduino* IDE yang berfungsi secara krusial sebagai lapisan perantara (intermediary layer) antara kode program siswa dan perangkat keras *ESP32*. Lapisan perangkat lunak ini secara efektif mengabstraksi berbagai kerumitan teknis di tingkat dasar, seperti deklarasi pin dan inisialisasi pustaka sensor, sehingga siswa tidak perlu berhadapan dengan konfigurasi perangkat keras yang rumit. Sebagai gantinya, sistem menyediakan serangkaian fungsi siap pakai dengan penamaan yang sangat intuitif, seperti bacaJarak() atau

nyalakanLED() (sebagaimana dirangkum pada TABEL IX). Penyederhanaan sintaksis teks ini dirancang secara spesifik agar siswa dapat langsung memusatkan perhatian kognitif mereka pada penyusunan logika *Input-Process-Output (IPO)*. Lebih lanjut, *software baseline* ini mengalokasikan sebuah area blok kode khusus bernama moduleLoop(). Area ini memberikan ruang yang aman bagi siswa untuk mengeksekusi logika program mereka secara berulang, tanpa menimbulkan risiko mengganggu siklus fungsi inti atau sistem komunikasi dasar mikrokontroler yang berjalan di latar belakang.

TABEL IX
DAFTAR FUNGSI *SOFTWARE BASELINE*

No	Fungsi	Kategori	Deskripsi
1	bacaJarak()	Input — Sensor Ultrasonik	Membaca jarak objek dari sensor ultrasonik HC-SR04, mengembalikan nilai dalam satuan cm
2	bacaSuhu()	Input — Sensor DHT22	Membaca nilai suhu dari sensor DHT22, mengembalikan nilai dalam satuan °C
3	bacaKelembapan()	Input — Sensor DHT22	Membaca nilai kelembapan dari sensor DHT22, mengembalikan nilai dalam satuan % RH
4	bacasensorApi()	Input — Sensor Api	Membaca nilai mentah dari sensor api, mengembalikan nilai analog sensor
5	adaApi()	Input — Sensor Api	Mendeteksi keberadaan api, mengembalikan nilai *true* apabila api terdeteksi
6	nyalakanLED()	Output — LED	Mengaktifkan LED *onboard*
7	matikanLED()	Output — LED	Menonaktifkan LED *onboard*
8	nyalakanBuzzer()	Output — Buzzer	Mengaktifkan buzzer *onboard*
9	matikanBuzzer()	Output — Buzzer	Menonaktifkan buzzer *onboard*
10	nyalakanAktuator()	Output — Gabungan	Mengaktifkan seluruh aktuator *onboard* secara bersamaan
11	maju()	Output — Motor	Menggerakkan motor ke arah maju
12	mundur()	Output — Motor	Menggerakkan motor ke arah mundur
13	stopMotor()	Output — Motor	Menghentikan pergerakan motor
14	moduleLoop()	Area Siswa	Area khusus bagi siswa untuk menuliskan logika program input–proses–output
15	checkModulePin()	Sistem	Mendeteksi apakah modul sensor terhubung secara fisik ke soket atau dalam kondisi melayang
16	peringatkanKeHP()	Sistem	Mengirimkan notifikasi peringatan ke aplikasi Android melalui koneksi *Bluetooth*

Untuk menjamin keandalan operasional, sistem mengimplementasikan mekanisme deteksi dan validasi perangkat keras secara otomatis melalui fungsi checkModulePin(). Algoritma ini bekerja dengan menguji status pin fisik melalui tarikan ke kondisi *pull-down* kemudian *pull-up* secara berurutan; apabila nilai bacaan selalu mengikuti arah tarikan paksa tersebut, sistem menyimpulkan bahwa pin dalam kondisi melayang (*floating*) yang berarti modul tidak terhubung (sebagaimana direpresentasikan pada potongan kode di Gambar 4). Ketika deteksi menemukan anomali koneksi ini, mikrokontroler akan segera memancarkan paket peringatan berformat $W:...$. Di sisi lain, pertukaran data normal antara *ESP32* dan perangkat seluler diimplementasikan melalui protokol *string* terstruktur dalam satu paket tunggal yang efisien, dengan format seperti $D:dist,mod1,act...$. Pengiriman paket data ini dirancang agar hanya dieksekusi berdasarkan permintaan dari aplikasi, sebuah pendekatan yang krusial untuk mencegah terjadinya kelebihan beban transmisi (*overload*) pada jaringan *Bluetooth*.

```
bool checkModulePin(int pin) {
  // 1. Tes paksa ditarik ke tanah/GND (Pull-Down)
  pinMode(pin, INPUT_PULLDOWN);
  delay(10);
  bool pullDownLow = (digitalRead(pin) == LOW);

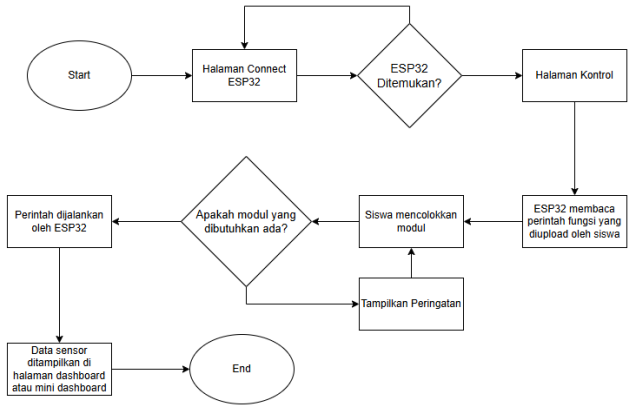
  // 2. Tes paksa ditarik ke logika positif (Pull-Up)
  pinMode(pin, INPUT_PULLUP);
  delay(10);
  bool pullUpHigh = (digitalRead(pin) == HIGH);

  // 3. Jika bacaan selalu mengikuti tarikan paksa, pin "melayang"
  bool isFloating = (pullDownLow && pullUpHigh);

  // Kembalikan true jika modul terpasang fisik, false jika dicabut
  return !isFloating;
}
```

Gambar 4. Potongan kode logika pendeteksian pin *floating* pada fungsi checkModulePin()

Alur eksekusi pencegahan galat (*error handling*) pada aplikasi Android dimodelkan pada diagram alir di Gambar 5. Diagram ini memastikan siswa tidak dapat mengirim instruksi komputasi tanpa terlebih dahulu terhubung dan memvalidasi eksistensi modul fisik.

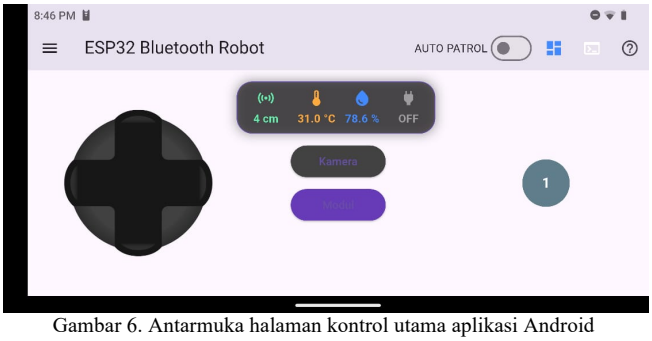


Gambar 5. Diagram Workf*lo* Sistem Media Pembelajaran

Sebagai elemen interaksi dan pemantauan akhir, antarmuka aplikasi seluler direalisasikan menggunakan *framework* Flutter yang berkomunikasi via protokol *Bluetooth* Classic. Alur penggunaan aplikasi dirancang secara ketat, di mana siswa diwajibkan melewati halaman pemindaian dan penyambungan koneksi perangkat sebelum dapat mengakses fitur utama, sebuah strategi desain untuk mencegah galat akibat pengiriman instruksi tanpa koneksi aktif. Setelah terhubung, pengguna diarahkan ke halaman

JUTEI Edisi Volume. 10 No.2 Oktober 2026
ISSN 2579-3675, e-ISSN-5538
DOI 10.21460/jutei.2026.102.533

kontrol berorientasi lanskap (*landscape*) yang menyajikan *mini-dashboard* untuk memantau data sensor secara *real-time* berdampingan dengan tombol kendali aktuator (seperti ditunjukkan pada Gambar 6). Keunggulan integrasi aplikasi ini semakin menonjol melalui sistem notifikasi *pop-up* peringatan yang langsung muncul di layar ketika paket *string* galat diterima dari mikrokontroler. Respons visual seketika ini memfasilitasi siswa untuk segera menyadari dan memperbaiki masalah perangkat keras secara mandiri, sehingga menyempurnakan ekosistem media pembelajaran dari hulu ke hilir.



Gambar 6. Antarmuka halaman kontrol utama aplikasi Android

B. *Evaluasi Fungsionalitas*

Evaluasi fungsionalitas sistem dilakukan melalui metode *black-box testing* yang mencakup 31 skenario pengujian, bertujuan untuk memverifikasi kesiapan teknis sistem secara menyeluruh sebelum media diujikan kepada siswa. Pada kelompok pengujian modul input (12 skenario), sistem terbukti berhasil membaca data secara presisi dari seluruh sensor yang disediakan, yakni sensor ultrasonik, DHT22, dan sensor api. Sebuah temuan teknis spesifik dari pengujian ini mencatat bahwa jarak maksimal deteksi sensor api berada pada rentang 15 cm; sebuah batasan yang secara praktis justru dinilai sangat memadai dan ideal untuk menjaga batas aman interaksi fisik siswa selama skenario pembelajaran di kelas. Selanjutnya, pada kelompok pengujian modul output (7 skenario), seluruh komponen aktuator bawaan (*onboard*) yang mencakup LED NeoPixel, buzzer, dan penggerak motor merespons instruksi dari *software baseline* dengan mulus tanpa adanya galat.

Keandalan arsitektur sistem diuji lebih lanjut melalui mekanisme deteksi dan validasi modul (6 skenario), di mana logika validasi berbasis pendeteksian pin melayang (*floating*) terbukti bekerja sangat andal. Sistem sukses mengidentifikasi modul yang dipasang maupun dicabut secara *real-time*, termasuk mempertahankan stabilitas saat terjadi skenario penggantian modul di tengah jalannya sesi (*hot-swap*) yang merupakan fitur fungsional utama dari desain modular ini. Pada pengujian kombinasi multi-modul (6 skenario), mikrokontroler sanggup mengeksekusi instruksi hingga tiga modul sekaligus secara bersamaan (misalnya sensor api, LED, dan buzzer) tanpa mengalami konflik data maupun gangguan instruksi. Secara keseluruhan, seluruh 31 skenario pengujian ini berhasil mencatatkan tingkat kelulusan (*Pass* rate) 100% sebagaimana direkapitulasi pada TABEL X, yang secara meyakinkan mengonfirmasi bahwa sistem telah memenuhi spesifikasi kelayakan teknis untuk dilanjutkan ke tahap pengujian efektivitas pembelajaran.

TABEL X
REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN TEKNIS

Kelompok Uji	Skenario	*Pass*	*Fail*	% *Pass*
A. Fungsi modul input	12	12	0	100%
B. Fungsi modul output	7	7	0	100%
C. Deteksi dan validasi modul	6	6	0	100%
D. Kombinasi multi-modul	6	6	0	100%
Total	**31**	**31**	**0**	**100%**

C. *Efektivitas Sistem*

Hasil pre-test, post-test, dan *Gain Score* kedua kelompok disajikan pada TABEL XI. Kelompok *Tinybit* memperoleh rata-rata *Gain Score* +0,50 dan kelompok modular +0,20. Perbedaan ini perlu ditafsirkan secara hati-hati mengingat ukuran sampel yang kecil serta adanya satu data pencilan pada kelompok modular, yaitu siswa yang skornya menurun karena sesinya terpaksa dilaksanakan sore hari ketika kondisi fisik sudah menurun akibat persiapan lomba. Apabila data pencilan dikeluarkan, rata-rata *Gain Score* kelompok modular menjadi +0,75, lebih tinggi dibanding kelompok *Tinybit*. Pada skala penelitian ini *Gain Score* lebih tepat diperlakukan sebagai data pendukung yang dikonfirmasi bersama rubrik, kuesioner, dan wawancara.

TABEL XI
HASIL PRE-TEST, POST-TEST, DAN *GAIN SCORE*

Kelompok	Rata Pre-test	Rata Post-test	Rata Gain
Tinybit (n = 4)	4,00	4,50	+0,50
Modular (n = 5)	3,80	4,00	+0,20
Modular tanpa pencilan (n = 4)	3,50	4,25	+0,75

Pada aspek pemahaman IPO yang diukur melalui rubrik tugas, kelompok modular secara konsisten memperoleh skor lebih tinggi, yaitu rata-rata 3,20 berbanding 2,50 pada Tugas 1 dan 3,20 berbanding 2,63 pada Tugas 2. Konsistensi perbedaan antar tugas mengindikasikan pola pemahaman yang lebih dalam pada kelompok modular, yang dapat dikaitkan dengan desain fisik sistem komponen input, proses, dan output terwujud terpisah sebagai modul yang dapat dipegang, sehingga konsep abstrak IPO menjadi konkret dan dapat diobservasi secara langsung. Pada aspek kemandirian, kedua kelompok relatif setara (3,00 berbanding 2,88) dengan variasi lebih besar pada kelompok modular, yang justru menunjukkan kemampuan sistem mengakomodasi perbedaan kemampuan siswa secara fleksibel sesuai prinsip ZPD melalui hint bertingkat. Skor kuesioner *usability*

kelompok modular (88,8%) juga lebih tinggi dibanding kelompok *Tinybit* (74,0%), sementara fitur khusus sistem memperoleh penilaian sangat tinggi: kemudahan aplikasi Android 100%, fitur peringatan modul 96%, dan kemudahan soket 96% (TABEL XII dan TABEL XIII). Ringkasan perbandingan disajikan pada TABEL XIV.

TABEL XII
HASIL KUESIONER ITEM 1–5 (KOMPARATIF)

No	Nama	Kelompok	Total Skor (%)
1	Kh	*Tinybit*	80%
2	Af	*Tinybit*	84%
3	Se	*Tinybit*	68%
4	Ke	*Tinybit*	64%
		Rata-rata *Tinybit*	**74,0%**
1	An	Modular	96%
2	Ja	Modular	100%
3	Ak	Modular	80%
4	No	Modular	84%
5	Ab	Modular	84%
		Rata-rata Modular	**88,8%**

TABEL XIII
HASIL KUESIONER ITEM 6–8 KELOMPOK MODULAR (FITUR KHUSUS)

No	Nama	Item 6: Kemudahan Aplikasi HP (%)	Item 7: Fitur Peringatan (%)	Item 8: Kemudahan Soket (%)
1	An	100%	100%	100%
2	Ja	100%	80%	100%
3	Ak	100%	100%	100%
4	No	100%	100%	100%
5	Ab	100%	100%	80%
Rata-rata		**100%**	**96%**	**96%**

TABEL XIV
PERBANDINGAN EFEKTIVITAS MODULAR & *TINYBIT*

Aspek	Modular	*Tinybit*
Pemahaman IPO (rubrik, Tugas 1)	3,20	2,50
Pemahaman IPO (rubrik, Tugas 2)	3,20	2,63
Kemandirian (rubrik)	3,00	2,88
Kuesioner *usability* (item 1–5)	88,8%	74,0%
Ide eksplorasi mandiri yang konkret	5 dari 5	1 dari 4

Temuan wawancara memperkuat data kuantitatif. Perbedaan paling mencolok terlihat pada motivasi eksplorasi mandiri: seluruh siswa kelompok modular menyebutkan ide eksplorasi konkret yang langsung mengacu pada komponen sistem seperti menambahkan buzzer, membuat LED berkedip, atau membangun mobil anti-tabrakan, sementara sebagian besar siswa kelompok *Tinybit* tidak memiliki ide lanjutan. Hal ini mengindikasikan bahwa desain modular berhasil membangkitkan rasa ingin tahu sebagai efek samping positif pembelajaran. Secara keseluruhan, hasil pembandingan dengan sistem *Tinybit* ini memberikan bukti kuat terkait keunggulan media IoT modular yang dikembangkan. Kelompok modular mampu mengimbangi, bahkan melampaui, kelompok *Tinybit* pada aspek pemahaman IPO, *usability*, dan motivasi eksplorasi, meskipun kelompok *Tinybit* memiliki keuntungan awal berupa familiaritas dengan *micro:bit*. Fakta bahwa sistem baru berskema modular dengan biaya perakitan yang jauh lebih terjangkau ini mampu menandingi platform komersial berbiaya tinggi (*Tinybit*) menjadi indikasi valid akan efektivitas desain sistem dalam mereduksi hambatan awal pembelajaran pemrograman berbasis teks.

D. Fleksibilitas Modul & Transfer Pengetahuan Siswa

Pada pengujian fleksibilitas, seluruh 7 siswa berhasil memasang dan mengoperasikan modul DHT22 maupun sensor api tanpa kesulitan teknis berarti, dan sistem mendeteksi serta memvalidasi kedua modul secara otomatis sehingga pergantian modul berjalan lancar. Seluruh siswa berhasil menyelesaikan keempat tugas dengan skor keberhasilan fungsi sempurna meskipun modul tersebut belum pernah diajarkan, dengan murni mengandalkan kamus fungsi sebagai satu-satunya rujukan. Fakta empiris ini menegaskan bahwa keberadaan *software baseline* yang didokumentasikan dalam wujud kamus fungsi bukan sekadar pelengkap teknis, melainkan berperan krusial sebagai instrumen *scaffolding* pedagogis yang amat kuat. Tingkat kelengkapan kamus fungsi tersebut terbukti secara langsung menjadi penentu utama sejauh mana siswa sanggup melakukan eksplorasi logika secara mandiri tanpa memerlukan panduan atau intervensi langsung dari instruktur. Rata-rata skor refleksi transfer pengetahuan sebesar 79,3% menunjukkan sebagian besar siswa mampu mengartikulasikan pemahaman IPO dalam konteks modul baru. Ringkasan hasil disajikan pada TABEL XV.

TABEL XV
HASIL PENGUJIAN FLEKSIBILITAS (N=7)

Indikator	Hasil
Keberhasilan fungsi (4 tugas)	3,00 (sempurna)
Pemahaman IPO (rubrik, rata-rata)	3,14–3,29
Skor refleksi transfer pengetahuan	79,3%
Kuesioner *usability* (item 1–5)	86,9%
Kemudahan soket modul	97,1%
Keyakinan dapat memakai sensor baru	7 dari 7 siswa

Skor kuesioner item 1–5 pada tahap ini (86,9%) konsisten dengan kelompok modular pada pengujian efektivitas (88,8%), menunjukkan pengalaman belajar yang positif tetap terjaga meski modul berganti. Menariknya, dua siswa yang berasal dari kelompok *Tinybit* menunjukkan performa yang tidak kalah dengan siswa ex-modular; salah satunya bahkan menyelesaikan tiga dari empat tugas tanpa menggunakan hint sama sekali, yang menunjukkan sistem mudah dipelajari bahkan oleh siswa yang baru pertama kali menggunakannya. Seluruh siswa pada wawancara menyatakan keyakinan dapat menggunakan sistem untuk mempelajari sensor lain yang belum diajarkan, seperti sensor gerak, sensor suara, dan sensor warna, disertai contoh penerapan konkret. Satu catatan adalah seorang siswa yang memperoleh skor refleksi

JUTEI Edisi Volume. 10 No.2 Oktober 2026
ISSN 2579-3675, e-ISSN-5538
DOI 10.21460/jutei.2026.102.533

rendah (28%) meskipun tugas-tugasnya berhasil, yang mengindikasikan ia lebih mudah memahami konsep secara praktis dibanding secara tertulis.

E. Validasi Pengajar dan Rekomendasi Implementasi Pembelajaran

Penilaian dari empat pengajar REC melalui lembar feedback 14 item menunjukkan rata-rata keseluruhan 84,6%, sebagaimana dirangkum pada TABEL XVI. Aspek kesesuaian pembelajaran dan potensi keberlanjutan memperoleh skor tinggi; materi IPO dinilai sesuai dengan tahapan belajar siswa dan penamaan fungsi seperti bacaJarak() dan nyalakanLED() dinilai mudah dipahami. Catatan utama yang perlu ditindaklanjuti adalah pendampingan awal pengajar dalam menyiapkan sistem secara mandiri serta pengawasan proses pemasangan modul untuk meminimalkan risiko kerusakan perangkat keras. Pengajar juga mengusulkan penambahan modul sensor seperti getaran, cahaya, dan hujan.

TABEL XVI
HASIL FEEDBACK PENGAJAR REC

Aspek	Rata-rata (skala 5)	%
Kesesuaian pembelajaran	4,38	87,5%
Kemudahan operasional	4,25	85,0%
Keandalan sistem	3,83	76,7%
Potensi keberlanjutan	4,42	88,3%
Rata-rata keseluruhan	**4,23**	**84,6%**

Hasil observasi dan wawancara secara konsisten menunjukkan bahwa sistem paling tepat diposisikan sebagai media pembelajaran lanjutan setelah siswa menguasai *block programming*. Beberapa siswa secara konsisten menyarankan urutan belajar dari *block programming* terlebih dahulu, dan siswa yang belum memiliki dasar tersebut membutuhkan pendampingan lebih intensif. Berdasarkan observasi, siswa berusia 9 tahun sudah mampu mengerjakan tugas secara mandiri sehingga usia tersebut dijadikan batas minimal rekomendasi. Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa sampel yang kecil (9 siswa), rentang usia yang lebar (7–15 tahun), serta durasi yang singkat, sehingga temuan bersifat indikatif dan belum dapat menjawab retensi pengetahuan jangka panjang.

Lebih lanjut, hasil observasi selama sesi pengujian menyoroti adanya dinamika kesenjangan tingkat kesulitan yang cukup signifikan antar rentang usia dan pengalaman subjek. Siswa yang lebih matang secara kognitif atau lebih berpengalaman cenderung menyelesaikan tugas jauh lebih cepat dan terlihat kurang tertantang, sementara siswa yang lebih muda secara natural masih membutuhkan waktu pemrosesan tambahan. Temuan kesenjangan empiris ini menegaskan perlunya diferensiasi pedagogis; implementasi sistem IoT modular ini ke depannya mutlak harus didampingi dengan pengembangan materi ajar yang dirancang berjenjang dengan berbagai tingkat kesulitan (mulai dari tugas dasar fungsi sensor tunggal hingga tugas lanjutan multi-modul). Strategi ini krusial agar sistem dapat senantiasa mengakomodasi perbedaan kapasitas kognitif siswa secara berkelanjutan.

IV. KESIMPULAN & SARAN

Dari segi keandalan teknis dan kelayakan operasional, sistem IoT modular ini beroperasi secara optimal dengan melewati 100% dari 31 skenario pengujian black-box tanpa satupun kegagalan fungsional, mencakup akurasi pembacaan sensor, pengaktifan aktuator, hingga kelancaran deteksi dan validasi modul otomatis. Kesiapan teknis ini sejalan dengan validasi positif dari para pengajar di Robotics Education Center (REC) yang memberikan skor rata-rata kelayakan 84,6%. Para praktisi pendidikan tersebut secara spesifik menilai bahwa sistem ini sangat relevan untuk tahapan belajar siswa (skor 87,5%) dan memiliki potensi keberlanjutan yang sangat baik (skor 88,3%) sebagai media pembelajaran di kelas.

Dalam evaluasi efektivitas, sistem modular terbukti lebih unggul dibandingkan sistem pembanding (*Tinybit*) dalam meningkatkan pemahaman sekaligus antusiasme siswa. Kelompok modular mencetak rata-rata skor pemahaman *Input-Process-Output (IPO)* yang konsisten lebih tinggi pada kedua tugas (3,20 vs 2,50 dan 3,20 vs 2,63), serta melaporkan tingkat kepuasan penggunaan (*usability*) yang lebih superior (88,8% berbanding 74,0%). Tingginya penilaian pada kemudahan aplikasi (100%) dan fitur peringatan (96%) juga berdampak langsung pada motivasi; seluruh siswa (100%) di kelompok modular sukses mencetuskan ide eksplorasi lanjutan secara konkret, seperti merakit mobil anti-tabrakan, kontras dengan kelompok *Tinybit* yang hanya diwakili oleh 1 dari 4 siswa.

Keunggulan sistem semakin terbukti melalui tingkat fleksibilitasnya dalam memfasilitasi penggunaan perangkat keras baru di luar materi dasar. Tanpa diberikan panduan pemrograman langsung, ketujuh siswa uji sukses merangkai dan mengoperasikan modul sensor baru (DHT22 dan sensor api) hingga mencapai skor sempurna dalam keberhasilan fungsi pada empat tugas mandiri. Pencapaian ini menegaskan bahwa logika komputasional berhasil ditransfer dengan baik ke kasus baru, dibuktikan oleh skor refleksi transfer pengetahuan sebesar 79,3% serta keyakinan mutlak dari seluruh siswa bahwa mereka sanggup menggunakan sistem ini untuk mempelajari sensor-sensor jenis lain di masa depan.

Beberapa saran utama untuk pengembangan dan implementasi lanjutan, yakni perlunya penyederhanaan bahasa pengantar modul bagi siswa, penyediaan pendampingan awal bagi para pengajar, serta pengawasan saat proses bongkar-pasang guna mencegah risiko kerusakan perangkat keras. Secara pedagogis, sistem ini disarankan untuk diterapkan sebagai media pembelajaran lanjutan pasca-*block programming* dengan batas usia minimal 9 tahun, diiringi dengan penyusunan materi ajar yang memiliki berbagai tingkat kesulitan dan perluasan kamus fungsi. Guna memperkaya ruang eksplorasi, sistem perlu dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan ragam modul sensor (seperti sensor gerak, suara, dan warna) maupun modul

aktuator (seperti motor servo, layar LCD, dan relay). Terakhir, untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih valid, disarankan adanya penelitian lanjutan yang melibatkan jumlah sampel lebih besar, kelompok usia yang seragam, serta durasi pengujian yang diperpanjang untuk mengukur retensi pengetahuan siswa secara jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Robotics Education Center Cabang Yogyakarta, yaitu cabang Jongke dan cabang Demangan. Karena sudah memberikan ijin dan kesempatan untuk melakukan uji coba penelitian ini kepada beberapa siswa yang dipilih.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan terkait dengan publikasi artikel ini.

PENDANAAN

Penelitian ini tidak mendapatkan dukungan keuangan spesifik dari lembaga pendanaan sektor publik, komersial atau nirlaba.

DEKLARASI PENGGUNAAN ALAT AI

Selama penyiapan naskah ini, penulis menggunakan Gemini untuk menyempurnakan tata bahasa dan mengecek ejaan asing. Setelah penggunaan alat ini, penulis merevisi dan memverifikasi isi teks secara mandiri dan bertanggung jawab penuh atas keseluruhan isi publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] J. Sweller, "The Role of Evolutionary Psychology in Our Understanding of Human Cognition: Consequences for Cognitive Load Theory and Instructional Procedures," *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 34, no. 4, pp. 2229–2241, Dec. 2022, doi: 10.1007/s10648-021-09647-0.

[2] R. D. Pea, "The Social and Technological Dimensions of *Scaffolding* and Related Theoretical Concepts for Learning, Education, and Human Activity," *Journal of the Learning Sciences*, vol. 13, no. 3, pp. 423–451, Jul. 2004, doi: 10.1207/s15327809jls1303_6.

[3] G. Strong, N. Bresnihan, and B. Tangney, "Supporting learners in the transition from block-based to text-based programming, a systematic review," *J. Comput. Lang.*, vol. 84, p. 101342, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.cola.2025.101342.

[4] Z. Xu, A. D. Ritzhaupt, F. Tian, and K. Umapathy, "Block-based versus text-based programming environments on novice student learning outcomes: a meta-analysis study," *Computer Science Education*, vol. 29, no. 2–3, pp. 177–204, Jul. 2019, doi: 10.1080/08993408.2019.1565233.

[5] F. A. Nannim, N. E. Ibezim, G. C. Agbo, C. Mgboji, S. O. R. Ngwoke, and M. Mosia, "Development of a Project-Based *Arduino* Learning App: Fostering Robotics Programming Competence among Preservice Teachers of Computer and Robotics Education," *ACM Transactions on Computing Education*, vol. 25, no. 1, pp. 1–24, Mar. 2025, doi: 10.1145/3719016.

[6] F. A. Pacala, A. Turaev, U. Sharipovich, and A. Addumuminov, "PROFESSIONAL DEVELOPMENT PROGRAMS FOR STEM IN-SERVICE-TEACHERS IN *ARDUINO* TECHNOLOGY: A SYSTEMATIC REVIEW," *Information Technologies and Learning Tools*, vol. 109, no. 5, pp. 237–256, Oct. 2025, doi: 10.33407/itlt.v109i5.6049.

[7] F. A. Nannim, N. E. Ibezim, M. Mosia, and B. C. E. Oguguo, "Project-based learning with *Arduino* robots: impact on undergraduate students' achievement and task persistence in robotics programming," *Front. Robot. AI*, vol. 12, Jul. 2025, doi: 10.3389/frobt.2025.1615427.

[8] Y.-T. Huang, C.-L. Li, C.-C. Chang, and W. Tarng, "Enhancing *Computational thinking* and Programming Logic Skills with App Inventor 2 and Robotics: Effects on Learning Outcomes, Motivation, and Cognitive Load," *Sensors*, vol. 25, no. 22, p. 7059, Nov. 2025, doi: 10.3390/s25227059.

[9] E. Budihartono, A. Maulana, A. Rakhman, and A. Basit, "PENINGKATAN PEMAHAMAN SISWA TENTANG TEKNOLOGI IoT MELALUI *WORKSHOP* TEKNOLOGI IoT," *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*, vol. 6, no. 3, p. 1595, Jun. 2022, doi: 10.31764/jmm.v6i3.7519.

[10] N. Prihatiningrum, M. H. Barri, B. A. Pramudita, A. Z. Fuadi, I. Istiqomah, and F. Budiman, "*WORKSHOP ARDUINO* UNTUK MENUNJANG PEMBELAJARAN STEM UNTUK GURU IPA SMP," *JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri)*, vol. 6, no. 5, Oct. 2022, doi: 10.31764/jmm.v6i5.9783.

[11] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of *ESP32*-Based IoT Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, p. 6739, Jul. 2023, doi: 10.3390/s23156739.

[12] D. Tsipianitis, A. Misirli, K. Lavidas, and V. Komis, "IoT Devices and Their Impact on Learning: A Systematic Review of Technological and Educational Affordances," *IoT*, vol. 6, no. 3, p. 45, Aug. 2025, doi: 10.3390/iot6030045.

[13] M. M. Asad, A. Naz, A. Shaikh, M. Alrizq, M. Akram, and A. Alghamdi, "Investigating the impact of IoT-Based smart laboratories on students' academic performance in *HIGH*er education," *Univers. Access Inf. Soc.*, vol. 23, no. 3, pp. 1135–1149, Aug. 2024, doi: 10.1007/s10209-022-00944-1.

[14] R. Ruiz-Torrubiano, S. Knopp, A. Krystallidis, and L. M. Wolf, "A scheduling perspective on modular educational systems in Europe," *Heliyon*, vol. 10, no. 21, p. e39694, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e3