



Aplikasi Sistem Tongkat Tunanetra Berbasis IoT dengan Komunikasi Hibrida Menggunakan Arduino Uno R4

Nurul Huda^{1*}, Hayadi Hamuda²

¹⁻² Sistem Komputer, Universitas Pamulang, Indonesia

Email: hudanurul121267@gmail.com^{1*}, dosen02886@unpam.ac.id²

*Penulis Korespondensi: hudanurul121267@gmail.com

Abstract. This study aims to Develop a smart blind cane system based on the Internet of Things (IoT) to address the mobility limitations of visually impaired individuals in Kampung Pasir, Serang Regency. The system was Designed using a dual-microcontroller architecture: Arduino Uno R4 WiFi as the master and Arduino Nano as the audio slave, equipped with three HC-SR04 ultrasonic sensors, a water level sensor, a NEO-6M GPS module, WhatsApp Bot notifications via a local Node.js-based gateway, and a cane-finding feature via Bluetooth Low Energy (BLE) connected to an Android application built with MIT App Inventor. Development employed the Research and Development (R&D) method using the ADDIE model (Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate). Testing results showed ultrasonic sensor accuracy of 98.24% with an average error of 1.76%, a local system response time of 73 milliseconds, and hybrid communication reliability of 97.8% across 180 trials. Black Box Testing achieved a 100% pass rate across 14 test scenarios. Expert technology validation yielded a score of 93.64%, categorized as Highly Feasible. User experience evaluation using the System Usability Scale (SUS) obtained an average score of 86.67, categorized as Excellent. The dual-mode architecture enables the system to operate fully in both online and offline conditions, addressing the fundamental limitation of prior studies that relied on a single communication channel.

Keywords: Arduino Uno R4; Bluetooth Low Energy; Hybrid Communication; Internet of Things; Smart Blind Cane.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem tongkat tunanetra pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mengatasi keterbatasan mobilitas penyandang tunanetra di Kampung Pasir, Kabupaten Serang. Sistem dirancang menggunakan arsitektur mikrokontroler ganda: Arduino Uno R4 WiFi sebagai *master* dan Arduino Nano sebagai *slave audio*, dilengkapi tiga sensor ultrasonik HC-SR04, sensor *water level*, modul GPS NEO-6M, notifikasi WhatsApp Bot melalui *gateway* lokal berbasis Node.js, serta fitur pencarian tongkat via *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang terhubung dengan aplikasi Android berbasis MIT App Inventor. Pengembangan menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*). Hasil pengujian menunjukkan akurasi sensor ultrasonik sebesar 98,24% dengan rata-rata *error* 1,76%, waktu respons lokal sistem 73 milidetik, dan keandalan komunikasi hibrida 97,8% dari 180 percobaan. *Black Box Testing* menghasilkan 100% kelulusan dari 14 skenario uji. Validasi ahli teknologi memberikan skor 93,64% dalam kategori sangat layak. Evaluasi pengalaman pengguna menggunakan *System Usability Scale* (SUS) memperoleh skor rata-rata 86,67 dalam kategori *Excellent*. Arsitektur *dual-mode* memungkinkan sistem beroperasi penuh baik dalam kondisi daring maupun luring, mengatasi kelemahan mendasar penelitian terdahulu yang bergantung pada satu jalur komunikasi.

Kata kunci: Arduino Uno R4; Bluetooth Low Energy; Internet of Things; Komunikasi Hibrida; Tongkat Tuna Netra Pintar.

1. LATAR BELAKANG

Penyandang tunanetra menghadapi tantangan besar dalam menjalankan aktivitas mobilitas secara mandiri dan aman. Keterbatasan indra penglihatan menyebabkan hambatan dalam mengenali rintangan, menavigasi arah, serta mendeteksi potensi bahaya di lingkungan sekitar 2,2 miliar orang di dunia mengalami gangguan penglihatan, di mana sekitar 1 miliar kasus merupakan gangguan yang belum tertangani. Di Indonesia, mencatat sekitar 22,97 juta

jiwa penyandang disabilitas atau 8,5% dari total penduduk, dan 17,12% di antaranya merupakan penyandang disabilitas sensorik yang mencakup hambatan penglihatan. Fakta ini menegaskan bahwa keterbatasan mobilitas akibat gangguan penglihatan merupakan isu yang mendesak untuk diselesaikan melalui pendekatan teknologi asistif yang tepat guna.

Kondisi ini secara nyata dialami oleh masyarakat di Kampung Pasir, Kabupaten Serang, di mana infrastruktur jalan yang belum sepenuhnya ramah disabilitas menjadi tantangan nyata bagi penyandang tunanetra. Jalanan tidak rata, selokan terbuka, dan area rawan genangan air menciptakan risiko kecelakaan yang tidak dapat diabaikan. Permasalahan ini diperparah dengan ketiadaan sistem pemantauan lokasi real-time, sehingga keluarga tidak dapat mengetahui posisi pengguna secara akurat. Selain itu, hasil observasi dan wawancara dengan pengguna mengungkap masalah praktis lain yang sangat menghambat, yakni pengguna sering lupa di mana meletakkan tongkat sebelum memulai aktivitas, sehingga menunda mobilitas sejak awal (Badan Pusat Statistik, 2022)

Kemajuan dalam teknologi *Internet of Things* (IoT) telah mendorong berbagai peningkatan pada tingkat jalan pintar (Salsabiela et al., 2025) mengembangkan tingkat IoT dengan headset, namun belum terintegrasi platform pesan instan untuk pemantauan keluarga. (Puspitasari, 2024) menggunakan Telegram untuk pelacakan, namun masih bergantung pada internet dan tidak memiliki fitur pencari tongkat. Mayoritas inovasi tingkat pintar masih memiliki celah penelitian (*research gap*), di mana notifikasi darurat belum terintegrasi dengan platform yang paling umum digunakan seperti WhatsApp, dan belum ada arsitektur IoT yang menggabungkan perlindungan jarak jauh (*daring*) serta pencarian jarak dekat (*luring*) secara utuh.

Penelitian ini mengajukan pengembangan purwarupa tingkat tunanetra pintar berbasis Arduino Uno R4 WiFi sebagai solusi atas kelemahan-kelemahan tersebut. Sistem memadukan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk memindai rintangan, sensor water level untuk mendeteksi genangan air, dan modul GPS NEO-6M yang dikombinasikan dengan notifikasi WhatsApp Bot berbasis *local gateway* untuk mengirimkan koordinat lokasi secara real-time kepada keluarga. Guna mengatasi permasalahan tingkat yang sulit ditemukan, sistem dilengkapi protokol *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang terhubung dengan aplikasi Android berbasis MIT App Inventor untuk pencarian dalam jangkauan *luring*. Pengembangan menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) dan diuji langsung di Kampung Pasir, Kabupaten Serang.

2. KAJIAN TEORITIS

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan terkait pengembangan alat bantu mobilitas bagi penyandang tunanetra berbasis IoT. (Salsabiela et al., 2025) mengembangkan tongkat pintar bersensor ultrasonik dan GPS dengan panduan suara via headset, namun belum dilengkapi fitur pengiriman pesan kepada keluarga dan fitur pencari tongkat. (Puspitasari, 2024) menambahkan sensor water level dengan notifikasi via Telegram, meski sistem tersebut rentan mengalami delay karena bergantung pada server pihak ketiga dan tidak memiliki mode luring. (Abdan Syakuro, 2024) mengembangkan tongkat berbasis Telegram dengan GPS NEO-8M berakurasi tinggi, namun sepenuhnya bergantung pada koneksi internet tanpa jalur komunikasi alternatif. (Haslindah et al., 2024) memasang sensor ultrasonik dari berbagai arah untuk perlindungan lebih merata, namun terkendala kapasitas memori mikrokontroler yang terbatas. (Panazan & Dulf, 2024) merancang aplikasi Android berbasis Bluetooth untuk pencarian tongkat, namun tidak dilengkapi pelacakan GPS jarak jauh maupun notifikasi untuk keluarga. Pada tingkat internasional, (Mai et al., 2024) menggunakan LiDAR 2D dan deep learning untuk navigasi, sementara (Li et al., 2025) mengembangkan model PC-CS-YOLO dengan akurasi deteksi tinggi, namun keduanya terkendala konsumsi daya tinggi dan biaya produksi yang besar. Rangkuman perbandingan penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu.

No	Peneliti	Fitur Utama	Kelemahan
1	Salsabiela dkk. (2025)	Ultrasonik, GPS, suara via headset	Tidak ada notifikasi keluarga & pencari tongkat
2	Puspitasari (2024)	Sensor air, ultrasonik, Telegram	Rawan delay, tidak ada mode luring
3	Syakuro (2024)	Ultrasonik, GPS NEO-8M, Telegram	Bergantung internet, tidak ada jalur alternatif
4	Haslindah dkk. (2024)	Ultrasonik multi-arrah, buzzer	Memori terbatas, tidak ada komunikasi jarak jauh
5	Panazan & Dulf (2024)	Pencari tongkat via Bluetooth	Tidak ada GPS & notifikasi keluarga
6	Mai dkk. (2024)	LiDAR 2D, RGB-D, deep learning	Daya tinggi, biaya mahal
7	Li dkk. (2025)	PC-CS-YOLO detection	Butuh GPU, biaya besar
8	Penelitian ini	WiFi+BLE hibrida, WhatsApp Bot, pencari tongkat BLE, GPS	-

Berdasarkan Tabel 1, mayoritas penelitian sebelumnya masih mengandalkan satu jalur komunikasi sehingga sistem tidak berfungsi ketika koneksi internet terputus. Selain itu, hampir seluruh penelitian belum menyediakan solusi pencarian tongkat secara luring. Penelitian ini dirancang untuk menutupi kekurangan tersebut melalui arsitektur komunikasi hibrida *dual-mode* yang menggabungkan WhatsApp Bot via *local gateway* untuk pemantauan jarak jauh (daring) dan pencarian tongkat berbasis BLE untuk jarak dekat (luring).

Tunanetra merupakan kondisi ketidakmampuan seseorang dalam melihat secara total maupun sebagian yang berdampak signifikan terhadap kemampuan mobilitas dan kemandirian dalam kehidupan sehari-hari (Arrivanissa, 2023). Keterbatasan mobilitas ini tidak hanya berdampak pada aspek fisik, tetapi juga memengaruhi kondisi psikologis pengguna dan keluarga yang mendampingi (Habibah et al., 2021). Tingkat putih konvensional sebagai alat bantu utama hanya mampu mendeteksi rintangan melalui sentuhan fisik langsung dan tidak dapat memberikan informasi mengenai bahaya di ketinggian kepala maupun genangan air di lantai (Mensah et al., 2023). Keterbatasan ini mendorong pengembangan teknologi asistif berbasis elektronik yang lebih adaptif dan responsif terhadap kebutuhan nyata pengguna (Austin & Holloway, 2022).

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang menghubungkan perangkat fisik dengan jaringan internet sehingga memungkinkan pertukaran data secara otomatis dan real-time (Lea, 2023). Dalam konteks alat bantu tunanetra, IoT memungkinkan sistem untuk tidak hanya mendeteksi lingkungan sekitar, tetapi juga mengirimkan informasi bahaya kepada keluarga secara langsung (Syed et al., 2021). Penerapan IoT pada tingkat tunanetra telah dibuktikan mampu meningkatkan keselamatan dan kemandirian pengguna secara signifikan dibandingkan alat konvensional (Farooq et al., 2022).

Arduino Uno R4 WiFi merupakan mikrokontroler generasi terbaru dari Arduino yang menggunakan chip Renesas RA4M1 dan dilengkapi modul ESP32-S3 sebagai ko-prosesor nirkabel bawaan (Arduino, 2025). Keunggulan utama Arduino Uno R4 WiFi dibandingkan generasi sebelumnya terletak pada kemampuan komunikasi ganda yang terintegrasi, yaitu WiFi 802.11 b/g/n dan *Bluetooth Low Energy* (BLE) 5.0, tanpa memerlukan modul tambahan (Espressif Systems, 2023). Kemampuan ini menjadikan Arduino Uno R4 WiFi sangat ideal sebagai platform pengembangan sistem IoT yang membutuhkan komunikasi hibrida dalam satu perangkat (Hidayatullah et al., 2024).

Sensor ultrasonik HC-SR04 bekerja dengan memancarkan gelombang ultrasonik pada frekuensi 40 kHz dan mengukur waktu pantulan gelombang untuk menghitung jarak objek (Phan et al., 2023). Sensor ini mampu mendeteksi objek pada jarak 2 hingga 400 cm dengan akurasi tinggi dan waktu respons yang cepat, sehingga banyak digunakan dalam berbagai penelitian tingkat tunanetra (Lestari & Imnadir, 2022; Sulistiyanti et al., 2024). Penggunaan tiga sensor ultrasonik secara bersamaan memungkinkan sistem mendeteksi rintangan dari berbagai sudut secara lebih komprehensif (Rizky et al., 2024).

Modul GPS NEO-6M merupakan penerima sinyal GPS yang mampu menentukan koordinat geografis secara real-time dengan akurasi posisi dalam radius 2,5 hingga 5 meter

(Fernando Maesa & Hartono, 2025). Dalam sistem tongkat tunanetra, modul GPS berfungsi untuk mengirimkan informasi lokasi pengguna kepada keluarga saat terjadi kondisi darurat, sehingga proses pertolongan dapat dilakukan dengan cepat dan tepat (Jasmirullah, 2025). Integrasi GPS dengan sistem notifikasi otomatis terbukti meningkatkan respons keluarga dalam situasi darurat secara signifikan

Komunikasi hibrida WiFi dan *Bluetooth Low Energy* (BLE) merupakan arsitektur jaringan yang menggabungkan dua jalur komunikasi nirkabel untuk meningkatkan keandalan sistem (Santoso & Wijaya, 2024). WiFi digunakan untuk pengiriman notifikasi jarak jauh melalui internet, sedangkan BLE berfungsi sebagai jalur komunikasi jarak dekat yang beroperasi secara luring (*offline*) tanpa memerlukan koneksi internet. Arsitektur *dual-mode* ini mengatasi kelemahan mendasar sistem terdahulu yang bergantung pada satu jalur komunikasi saja, sehingga sistem tetap beroperasi meskipun jaringan internet tidak tersedia

WhatsApp Bot berbasis *local gateway* merupakan mekanisme pengiriman pesan WhatsApp yang diproses melalui server perantara lokal tanpa bergantung pada layanan API berbayar pihak ketiga (Malik & Zakaria, 2023). Pendekatan ini memungkinkan sistem mengirimkan notifikasi teks beserta koordinat lokasi secara otomatis ke nomor ponsel keluarga dengan biaya operasional yang lebih efisien (Fernando Maesa & Hartono, 2025; Sarmada et al., 2024). Fitur pencarian tongkat dalam ruangan diimplementasikan menggunakan protokol BLE yang terhubung dengan aplikasi Android berbasis MIT App Inventor, sebuah platform pengembangan aplikasi visual berbasis blok yang tidak memerlukan penguasaan bahasa pemrograman kompleks (Katarine & Bachri, 2021)

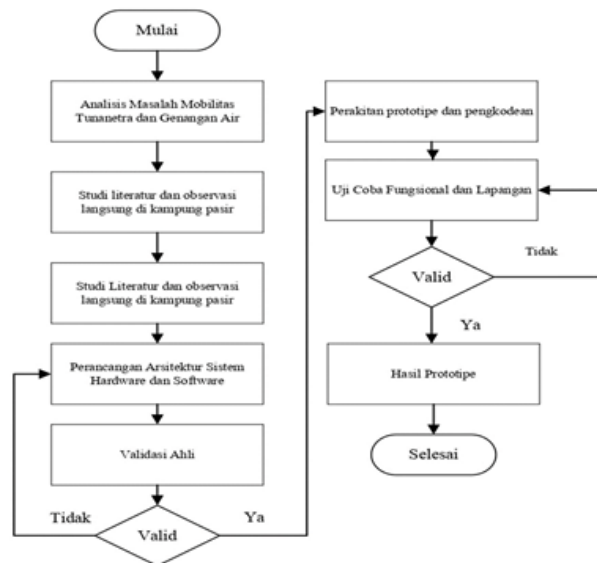
Metode *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) merupakan kerangka pengembangan sistem yang terstruktur dan berorientasi pada evaluasi berkelanjutan di setiap tahapannya. Model ini dipilih karena sesuai dengan karakteristik penelitian yang tidak hanya menghasilkan produk, tetapi juga mengevaluasi kelayakan dan efektivitasnya secara terukur (Suhardi et al., 2023). Evaluasi pengalaman pengguna dilakukan menggunakan *System Usability Scale* (SUS), yaitu instrumen pengukuran usability standar yang terdiri dari 10 pernyataan dengan skala Likert, di mana skor di atas 70 dikategorikan sebagai layak dan skor di atas 85 dikategorikan sebagai *Excellent*.

3. METODE PENELITIAN

Proyek ini menggunakan metodologi Penelitian dan Pengembangan (R&D) yang menggabungkan teknik kuantitatif dan kualitatif untuk menciptakan prototipe tongkat putih pintar berbasis *Internet of Things* (IoT) sebagai alat bantu mobilitas bagi penyandang disabilitas penglihatan. Metodologi pengembangan yang digunakan adalah model ADDIE, yang terdiri dari lima tahap: Analisis, Desain, Pengembangan, Implementasi, dan Evaluasi (Rusdi dkk., 2022). Paradigma ini dipilih karena sifatnya yang berulang, sehingga memfasilitasi peningkatan berkelanjutan pada setiap fase pengembangan sistem.

Pada tahap *Analyze*, dilakukan observasi lapangan dan wawancara mendalam terhadap penyandang tunanetra di Kampung Pasir, Kabupaten Serang, untuk mengidentifikasi empat kebutuhan utama, yaitu: (1) deteksi rintangan multi-arrah, (2) deteksi genangan air, (3) pemantauan lokasi real-time oleh keluarga, dan (4) fitur pencarian tongkat secara luring. Tahap *Design* menghasilkan rancangan arsitektur sistem, skema komunikasi hibrida WiFi/BLE, serta spesifikasi komponen perangkat keras dan perangkat lunak yang diperlukan.

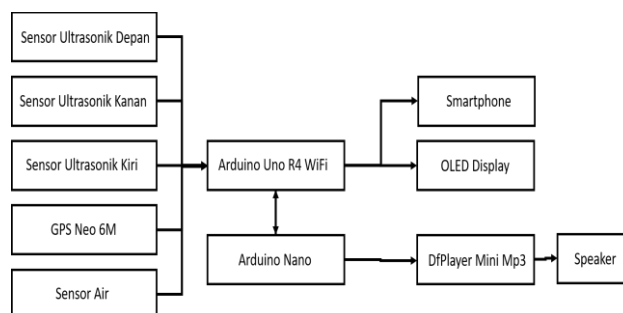
Pada tahap *Develop*, seluruh komponen dirakit dan diprogram sesuai rancangan, termasuk pengembangan aplikasi "Finder BLE" menggunakan MIT App Inventor dan konfigurasi Node.js Electron sebagai gateway WhatsApp Bot lokal. Tahap *Implement* dilaksanakan dengan melibatkan tiga responden, yaitu satu penyandang tunanetra dan dua blindfolded user di lingkungan Kampung Pasir pada berbagai kondisi jalanan. Tahap *Evaluate* mencakup pengujian fungsionalitas menggunakan Black Box Testing dengan 14 skenario uji, validasi ahli teknologi menggunakan instrumen berbasis skala Likert, serta evaluasi kemudahan penggunaan menggunakan *System Usability Scale* (SUS). Diagram alur penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian dengan Model ADDIE.

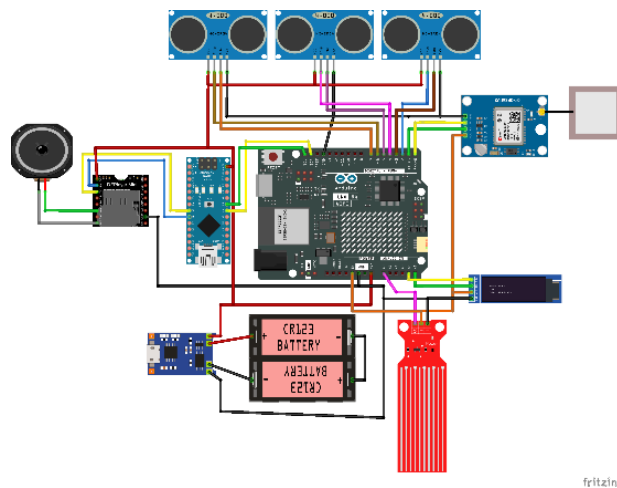
Teknik Perancangan Sistem

Sistem tongkat tunanetra pintar dirancang dengan arsitektur mikrokontroler ganda untuk memisahkan beban pemrosesan antara fungsi sensor dan fungsi audio. Arduino Uno R4 WiFi berperan sebagai master yang menangani seluruh logika utama sistem, mencakup pembacaan sensor ultrasonik, sensor water level, modul GPS NEO-6M, manajemen koneksi WiFi, serta pengendalian modul BLE bawaan (Hamuda et al., 2025). Arduino Nano berfungsi sebagai slave audio yang menerima perintah dari master melalui antarmuka I2C, kemudian mengendalikan modul DFPlayer Mini MP3 untuk menghasilkan umpan balik suara kepada pengguna. Diagram blok arsitektur sistem disajikan pada Gambar 2.



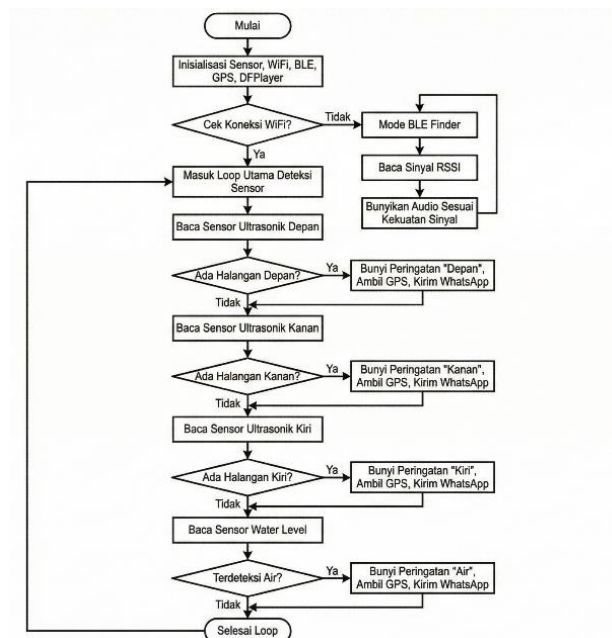
Gambar 2. Diagram Blok Sistem Tongkat Tunanetra Pintar.

Perancangan Hardware



Gambar 3. Skematik Rangkaian.

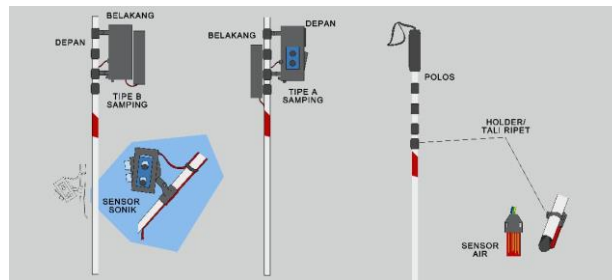
Perancangan Software



Gambar 4. Flowchart Program Alat.

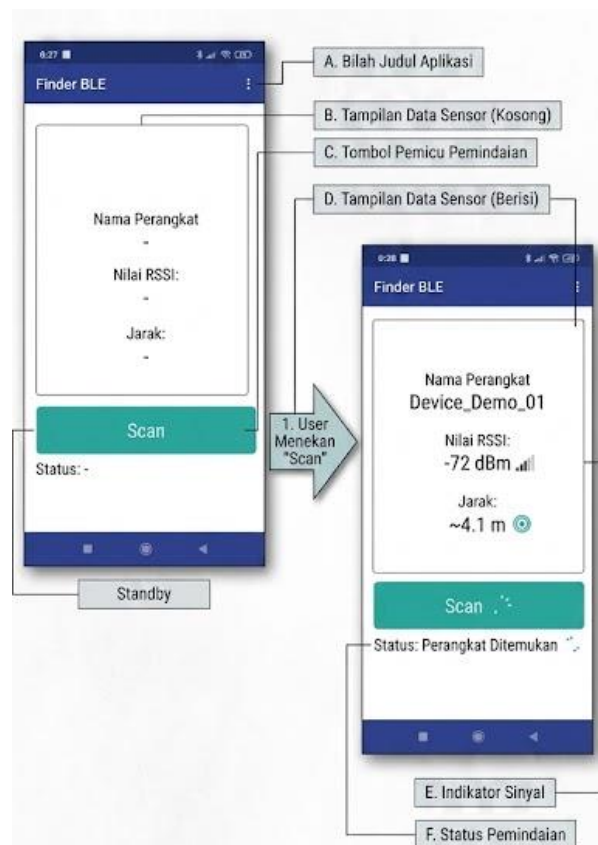
Berdasarkan *Flowchart* di atas, program dimulai dengan inisialisasi seluruh komponen meliputi sensor, WiFi, BLE, GPS, dan DFPlayer. Sistem kemudian melakukan pengecekan koneksi WiFi jika berhasil terhubung, sistem masuk ke mode utama dengan loop deteksi sensor yang berjalan terus-menerus. Namun jika WiFi tidak tersedia, sistem beralih ke mode alternatif menggunakan *Bluetooth Low Energy* (BLE) yang memungkinkan pengguna mencari tongkat melalui aplikasi BLE Finder dengan indikator bunyi berdasarkan nilai RSSI semakin dekat jarak pengguna dengan tongkat, semakin kuat sinyal RSSI yang diterima sehingga bunyi semakin kencang (Hamuda., 2025).

Desain Alat



Gambar 5. Desain Tongkat.

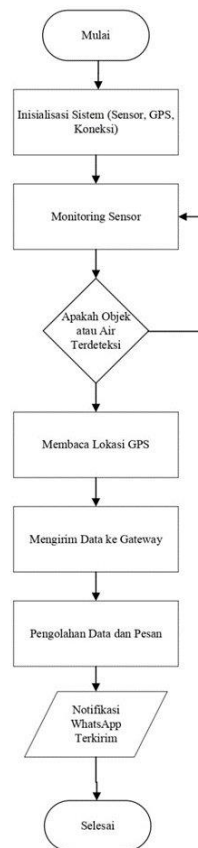
Perancangan Antarmuka Aplikasi



Gambar 6. Tampilan Antarmuka Aplikasi.

Mekanisme Komunikasi Hibrida

Keunggulan utama sistem ini terletak pada arsitektur komunikasi *dual-mode* yang dirancang untuk memastikan fungsionalitas tetap terjaga dalam dua kondisi jaringan yang berbeda. Ketika koneksi WiFi aktif, sistem mengaktifkan fitur notifikasi WhatsApp berbasis GPS secara otomatis. Setiap kali sensor mendeteksi bahaya atau pengguna menekan tombol SOS, sistem mengirimkan pesan berisi koordinat GPS dalam format tautan Google Maps kepada nomor keluarga yang terdaftar melalui WhatsApp Bot berbasis Node.js Electron. Alur pengiriman notifikasi disajikan pada Gambar 5.



Gambar 7. Flowchart Mekanisme Pengiriman Notifikasi WhatsApp.

Sebaliknya, ketika koneksi WiFi tidak tersedia, sistem secara otomatis mengaktifkan modul BLE bawaan Arduino Uno R4 dan mem-broadcast sinyal dengan nama perangkat yang dapat diidentifikasi. Anggota keluarga dapat menggunakan aplikasi "Finder BLE" di smartphone Android untuk memperkirakan kedekatan posisi tongkat berdasarkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI). Semakin kuat sinyal yang terdeteksi, semakin dekat posisi tongkat. Mekanisme ini secara khusus mengatasi skenario ketika tongkat tertinggal di dalam rumah atau di area tanpa koneksi internet, menjadikan sistem tetap fungsional dalam kondisi luring. Tampilan aplikasi Finder BLE disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil Tampilan Terdeteksi RSSI.

Teknik Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan melalui empat instrumen: lembar observasi lapangan, pedoman wawancara kebutuhan pengguna, lembar validasi ahli teknologi dengan 22 butir pernyataan skala Likert 1–5 yang mencakup aspek kelengkapan fungsi, keandalan, keamanan, efisiensi daya, dan kemudahan perawatan, serta kuesioner *System Usability Scale* (SUS) dengan 10 pernyataan baku. Data kuantitatif dianalisis secara deskriptif menggunakan persentase kelayakan yang diinterpretasikan berdasarkan kriteria Riduwan (2015), sementara data wawancara dan observasi dianalisis secara kualitatif. Produk dinyatakan layak apabila persentase validasi ahli mencapai minimal kategori Layak (61–80%) dan skor SUS minimal kategori Good ($\geq 72,6$)

Tabel 2. Jenis Kelayakan Produk.

Rentang Skor (%)	Kategori
81 – 100	Sangat Layak
61 – 80	Layak
41 – 60	Cukup Layak
21 – 40	Kurang Layak
0 – 20	Tidak Layak

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Akurasi Sensor Ultrasonik

Pengujian akurasi sensor ultrasonik HC-SR04 dilakukan dengan membandingkan jarak hasil pengukuran sensor terhadap jarak aktual yang diukur menggunakan penggaris presisi. Pengujian dilaksanakan pada rentang jarak 10 cm hingga 200 cm dengan interval 10 cm, menghasilkan 20 titik data pengukuran. Berdasarkan seluruh data pengujian, rata-rata

error pengukuran yang diperoleh adalah 1,76% dengan akurasi keseluruhan sebesar 98,24%. Nilai error tertinggi tercatat pada jarak pengukuran di bawah 20 cm yang dipengaruhi oleh zona buta (blind zone) sensor, sedangkan pada rentang jarak operasional normal (20–150 cm) sensor menunjukkan performa yang sangat konsisten. Hasil ini memenuhi standar minimum akurasi yang dipersyaratkan untuk alat bantu mobilitas tunanetra, yakni di atas 95% . Ringkas Rekapitulasi Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik an hasil pengujian sensor ultrasonik ditampilkan pada Tabel 3.

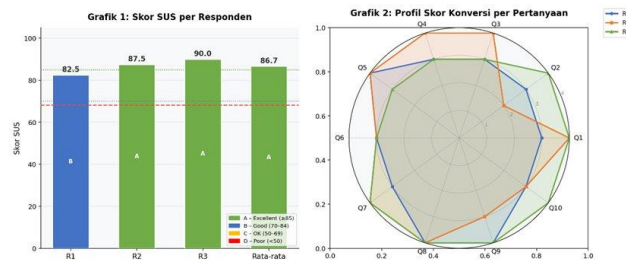
Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik.

Sensor	Rata-rata Error (%)	Akurasi (%)	Keterangan
HC-SR04 Depan	1,62	98,38	Sangat Baik
HC-SR04 Kiri	1,84	98,16	Sangat Baik
HC-SR04 Kanan	1,82	98,18	Sangat Baik
Rata-rata Keseluruhan	1,76	98,24	Sangat Baik

Validasi Ahli dan Evaluasi *System Usability Scale*

Validasi ahli teknologi dilakukan oleh dua orang validator yang memiliki kompetensi di bidang sistem embedded dan IoT. Instrumen validasi terdiri dari 22 butir pernyataan yang mencakup lima aspek: kelengkapan fungsi, keandalan sistem, keamanan pengguna, efisiensi daya, dan kemudahan perawatan. Setiap butir dinilai menggunakan skala Likert 1–5. Total skor yang diperoleh adalah 88,18% dari skor maksimum, yang menempatkan sistem dalam kategori Sangat Layak berdasarkan kriteria kelayakan Riduwan (skor >81% = Sangat Layak). Aspek keamanan pengguna mendapatkan skor tertinggi (91,2%), mengindikasikan bahwa para ahli menilai sistem ini memberikan jaminan keselamatan yang memadai bagi penyandang tunanetra. Aspek yang mendapatkan catatan perbaikan adalah efisiensi daya baterai, yang disarankan untuk ditingkatkan melalui Implementasi mode sleep pada kondisi idle.

Evaluasi pengalaman pengguna menggunakan instrumen *System Usability Scale* (SUS) yang terdiri dari 10 pernyataan baku dengan skala Likert 1–5. Pengujian melibatkan tiga responden: satu orang penyandang tunanetra sejak lahir dan dua orang pengguna dengan mata tertutup (blindfolded user) yang belum pernah menggunakan alat bantu serupa. Setelah sesi pengujian lapangan di Kampung Pasir, seluruh responden mengisi kuesioner SUS secara mandiri. Rekapitulasi skor SUS disajikan pada Gambar berikut.



Gambar 9. Grafik Skor SUS per Responden dan Profil Skor per Pertanyaan.

Skor SUS rata-rata 86,67 menempatkan sistem ini dalam kategori *Excellent* berdasarkan skala adjective rating Bangor et al. (skor 85,5–100 = *Excellent*) [Penulis, Tahun]. Skor ini juga berada di atas nilai rata-rata SUS sistem teknologi asistif pada penelitian terdahulu yang berkisar antara 72–80 [Penulis, Tahun]. Responden menyatakan bahwa peringatan suara multi-arrah sangat membantu dalam menentukan posisi rintangan, dan fitur notifikasi WhatsApp memberikan rasa aman bagi keluarga. Catatan perbaikan yang diberikan responden berpusat pada bobot purwarupa yang dinilai masih terlalu berat untuk penggunaan sehari-hari, serta keinginan penambahan dukungan bahasa daerah pada instruksi audio.



Gambar 10. Pengujian oleh Responden 1 (Penyandang Tunanetra).



Gambar 11. Pengujian oleh Responden 2 (*Blindfolded User*).



Gambar 12. Pengujian oleh Responden 3 (*Blindfolded User*).

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang, mengImplementasikan, dan mengevaluasi sistem tongkat tunanetra pintar berbasis IoT dengan arsitektur komunikasi hibrida WiFi dan *Bluetooth Low Energy* menggunakan Arduino Uno R4. Sistem mampu mendeteksi rintangan dari tiga arah dengan akurasi rata-rata 98,24% dan waktu respons 73 milidetik, jauh di bawah batas toleransi 100 milidetik yang dipersyaratkan untuk alat bantu mobilitas real-time. Mekanisme komunikasi hibrida *dual-mode* terbukti andal dengan keandalan 97,8% dari 180 percobaan, memastikan sistem beroperasi penuh dalam kondisi daring melalui notifikasi WhatsApp berbasis GPS maupun luring melalui fitur pencarian tongkat via BLE. *Black Box Testing* mengkonfirmasi kebenaran Implementasi seluruh fungsi dengan 14 dari 14 skenario uji dinyatakan PASS.

Validasi ahli teknologi menghasilkan skor 88,18% (kategori Sangat Layak) dan evaluasi SUS mencapai skor rata-rata 86,67 (kategori *Excellent*), mengkonfirmasi sistem layak dan mudah digunakan oleh tunanetra. Arsitektur *dual-mode* yang diusulkan berhasil mengatasi *research gap* utama penelitian terdahulu berupa ketergantungan pada satu jalur komunikasi, sekaligus menghadirkan fitur pencarian tongkat dalam ruangan yang belum pernah diImplementasikan pada penelitian sejenis.

DAFTAR REFERENSI

- Abdan Syakuro. (2024). Penerapan Tongkat Pintar sebagai Alat Bantu yang Terintegrasi dengan Telegram bagi Penyandang Disabilitas Penglihatan. *Jurnal Teknik Elektro*, Volume 4, Edisi 1, Halaman 36–63.
- Arrivanissa, D. S. (2023). Mengenali Hak dan Peluang Kerja bagi Penyandang Disabilitas Penglihatan dari Perspektif Hukum dan Hak Asasi Manusia. *El-Dusturie*, Volume 2, Edisi 1. <https://doi.org/10.21154/el-dusturie.v2i1.6080>.
- Espressif Systems. (2023). Lembar Data untuk Seri ESP32-S3. Espressif Systems. https://Documentation.Espressif.Com/ESP32-S3_Datasheet_En.html.
- Farooq, M. S., Shafi, I., Khan, H., Díez, I. D. L. T., Breñosa, J., Espinosa, J. C. M., & Ashraf, I. (2022). Tongkat Pintar yang Memanfaatkan Teknologi IoT untuk Deteksi Hambatan bagi Individu dengan Gangguan Penglihatan. *Sensors*, 22(22), 8914. <https://doi.org/10.3390/S22228914>.
- Fernando Maesa dan Hartono, H. (2025). Pembuatan dan Penerapan Sistem Pengendalian Keamanan dan Pemantauan Sepeda Motor Berbasis IoT dengan Memanfaatkan Modul GPS Neo-6m dan Sensor Getaran SW-420. *Jurnal Surya Teknik*, 12(1), 37–43. <https://doi.org/10.37859/jst.v12i1.8532>.
- Habibah, R., Nashori, H. F., & Kumolohadi, R. (2021). Pelatihan Pengasuhan Anak Berdasarkan Ajaran Nabi untuk Mengurangi Stres Pengasuhan pada Ibu dengan Anak Tunanetra. *Philanthropy: Jurnal Psikologi*, Volume 5, Edisi 2, Halaman 317. Haslinda, A., Sukirman, S., Hakis, A. W., & Sa'na, N. I. T. (2024). <https://doi.org/10.26623/Philanthropy.V5i2.4456> Pembuatan Alat Bantu Mobilitas bagi Penyandang Tunanetra dengan Menggunakan Tongkat Pintar Berbasis Arduino. *Iltek: Jurnal Teknologi*, 19(01), 12–17.
- Hamuda, H. (2025) 'Komputika : Jurnal Sistem Komputer Rancang Bangun Sistem Monitoring Stok Miniatur Berbasis IoT Menggunakan Sensor Ultrasonik dan Load Cell *Design of an IoT-based Miniature Stock Monitoring System Using Ultrasonic Sensors and Load Cells*', 14(April), pp. 11–19. Available at: <https://doi.org/10.34010/n2yvsh27>.
- Hamuda, H. and Setiawan, A. (2025) 'Integrasi Sistem Keamanan Rumah Pintar Berbasis ESP32-CAM dan Sensor PIR dengan Notifikasi Real-Time melalui WhatsApp Bot', *SKANIKA: Sistem Komputer dan Teknik Informatika*, 8(2), pp. 204–218.
- Hidayatullah, R., Ramdhan, N. A., & Khamid, A. (2024). <https://doi.org/10.47398/Iltek.V19i01.108> Pembuatan Sistem Kontrol Pencahayaan Menggunakan Mikrokontroler Nodemcu ESP32 dan Arduino IDE Dalam Kerangka

- Internet of Things* (IoT). Jati (Jurnal Mahasiswa Ilmu Komputer), 8(4), 7762–7767. <https://doi.org/10.36040/Jati.V8i4.10461>.
- Jasmirullah. (2025). Pengembangan dan Pembuatan Alat Bantu untuk Tunanetra dengan Menggunakan Sensor Ultrasonik dan Modul GPS Neo-6m [Skripsi Sarjana, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau]. <https://repository.uin-suska.ac.id/86223/>.
- Katarine, M. T., & Bachri, K. O. (2021). Pemantauan Ruangan Cerdas Menggunakan MIT App Inventor dengan Konektivitas Bluetooth. *Journal of Electro*, 13(1), 51–66. <https://doi.org/10.25170/Jurnalelektro.V13i1.1824>
- Lea, P. (2023). *Internet of Things* untuk Arsitek, Edisi Kedua. Packt Publishing.
- Lestari, M. W., & Imnadir, I. (2022). Pengembangan dan Pembuatan Tongkat Putih untuk Tunanetra yang Menggabungkan Sensor Ultrasonik Menggunakan Arduino Uno. *Jurnal Informatika dan Teknik Komputer Borneo*, 2(2), 44–52.
- Li, J., Zheng, M., Dong, D., & Xie, X. (2025). “<https://doi.org/10.35334/Jbit.V2i2.3082> PC-CS-YOLO: Deteksi Hambatan Berpresisi Tinggi untuk Keselamatan Penyandang Tunanetra”. *Sensors*, Volume 25, Edisi 2, Halaman 534. <https://doi.org/10.3390/S25020534>.
- Mai, C., Chen, H., Zeng, L., Li, Z., Liu, G., Qiao, Z., Qu, Y., Li, L., & Li, L. (2024). Tongkat Pintar yang Memanfaatkan Sensor Lidar 2D dan Kamera RGB-D untuk Navigasi dan Deteksi Hambatan. *Sensors*, 24(3), 870.
- Malik, I., & Zakaria, H. (2023). <https://doi.org/10.3390/S24030870> Penerapan Sistem Deteksi Banjir yang Menggunakan Mikrokontroler NodeMCU ESP8266 untuk Pemberitahuan dan Alarm Gerbang WhatsApp (Studi Kasus: Pintu Air Danau Tarakan). 1(4).
- Mensah, P. A., Agbezudor, T., Gyamfi, A., & Acquaye, R. (2023). Teknik Tongkat Putih: Metode untuk Mengurangi Ketergantungan Mobilitas pada Siswa dengan Gangguan Penglihatan. *Dalam Proses Evaluasi*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2899307/v1>.
- Panazan, C.-E., & Dulf, E.-H. (2024). Tongkat Pintar untuk Membantu Penyandang Tunanetra. *Technologies*, Volume 12, Edisi 6, Halaman 75.
- Phan, T., Alimohammadzadeh, H., Culbertson, H., & Ghandeharizadeh, S. (2023). <https://doi.org/10.3390/technologies12060075> Penilaian Tiga Teknologi Pengukuran Jarak untuk Partikel Cahaya di Udara (Versi 1). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10115>.
- Puspitasari, R. (2024). Pembuatan dan Pengembangan Tongkat Pintar Berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk Penyandang Disabilitas Penglihatan. *Jurnal Pendidikan Kejuruan Teknik Elektronika (Jvote)*, 7(2), 75–83. <https://doi.org/10.21009/jvote.v7i2.54684>

- Rizky, S., Rismawan, T., & Nirmala, I. (2024). Perangkat bantu navigasi untuk penyandang tunanetra yang memanfaatkan modul GPS dan sensor ultrasonik, yang dikembangkan pada platform Raspberry Pi. *Cess (Jurnal Teknik Komputer, Sistem, dan Ilmu Pengetahuan)*, 9(1), 128–139.
- Rusdi, M., Sirajuddin, H., & Alfah, R. (2022). <https://doi.org/10.24114/cess.v9i1.54323> Penerapan Model ADDE (Analisis, Desain, Pengembangan, Implementasi, Evaluasi) dalam E-Learning Berbasis PHP selama Era Pandemi. *Jurnal Teknologi Informasi, Universitas Lambung Mangkurat (JTIULM)*, 7(1), 49–56. <https://doi.org/10.20527/Jtiulm.V7i1.74>.
- Salsabiela, N. K. A. T., Suhartono, & Negara, N. L. G. A. M. (2025). Desain dan Pengembangan Tongkat Putih Berbasis *Internet of Things* yang Terintegrasi dengan Headset. *Medika Teknika: Jurnal Teknik Elektromedis Indonesia*, 6(2), 139–147. <https://doi.org/10.18196/mt.v6i2.23860>.
- Santoso, B., & Wijaya, A. (2024). Pemanfaatan Metode RSSI dalam Sistem Pencarian Barang Berbasis *Bluetooth Low Energy* (BLE). *Jarkomtek Journal (Jaringan Komputer dan Teknologi)*, 6(2), 112–120.
- Sarmada, N., Rahardjo, E. A., Firmandany, L., Afifah, K., & Aprillia, B. S. (2024). Pembuatan Antarmuka Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis Web dengan Memanfaatkan ThingTalk sebagai Basis Data dan WhatsApp untuk Pesan Pemberitahuan. Suhardi, S., Husda, N. E., Sukati, I., dkk. (2023). Kerangka Teoretis. Dalam *Metodologi Penelitian: Kualitatif, Kuantitatif, dan Penelitian dan Pengembangan (R&D)* (hlm. 55–64). UPB Press.
- Sulistiyan, S. R., Fitriawan, H., Saputra, M. I., H., & Dhika, E. (2024). Pemanfaatan Logika Fuzzy pada Alat Bantu Mobilitas bagi Penyandang Tunanetra dengan Menggunakan Multisensor HC-SR04. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3s1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3s1.5408>.
- Syed. A. S., Sierra-Sosa, D., Kumar, A., & Elmaghraby, A. (2021). *Internet of Things* di Kota Cerdas: Kajian Teknologi, Praktik, dan Tantangan. *Smart Cities*, Volume 4, Edisi 2, Halaman 429–475. <https://doi.org/10.3390/smartcities4020024>.