

Pengembangan Prototipe IoT Navigasi Tunanetra Terintegrasi Firebase

Kevin Ricky Pradana¹, Mohammad Idhom², Henni Endah Wahanani³

^{1,3}Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

²Sains Data, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Indonesia

¹22081010256@student.upnjatim.ac.id, ²idhom@upnjatim.ac.id, ³henniendah@upnjatim.ac.id

Abstrak

Mobilitas penyandang tunanetra masih menghadapi risiko benturan, jatuh, dan keterbatasan pemantauan lokasi ketika alat bantu hanya mengandalkan kontak fisik. Penelitian ini mengembangkan prototipe sabuk pintar berbasis *Internet of Things* untuk mendeteksi hambatan depan, mengidentifikasi potensi lubang, memberikan peringatan lokal, dan mengirimkan lokasi pengguna ke Firebase Realtime Database. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali, dua sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai masukan jarak, GPS NEO-6M sebagai sumber koordinat, DFPlayer Mini sebagai keluaran audio, motor vibrator sebagai keluaran haptik, serta modem 4G sebagai akses internet portabel. Metode penelitian memakai pendekatan prototipe melalui analisis masalah, identifikasi kebutuhan, perancangan arsitektur tiga lapis, implementasi perangkat, integrasi Firebase, dan pengujian fungsional. Hasil pengujian dilakukan pada area parkir terkontrol. Sensor depan mendeteksi hambatan pada ambang ≤ 120 cm dengan *accuracy*, *precision*, dan *recall* sebesar 1,00. Sensor bawah mendeteksi potensi lubang pada pembacaan > 130 cm dengan *accuracy*, *precision*, dan *recall* sebesar 1,00. Pengujian *black-box* terhadap sepuluh fungsi utama menghasilkan tingkat keberhasilan 100%, sedangkan *User Acceptance Test* memperoleh persentase penerimaan 88,67%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi sensor ultrasonik, GPS, Firebase, dan aplikasi Android dapat membentuk sistem bantu navigasi *wearable* yang responsif. Fungsi keselamatan utama tetap ditempatkan pada perangkat lokal sehingga peringatan masih aktif ketika koneksi internet tidak stabil di lapangan.

Kata kunci: tunanetra, sabuk pintar, ESP32, Firebase, GPS, sensor ultrasonik.

1. Pendahuluan

Kemandirian mobilitas menjadi isu utama bagi penyandang tunanetra karena hambatan fisik tidak selalu terdeteksi sebelum pengguna berada pada jarak berisiko. Tongkat putih masih menjadi alat bantu utama karena sederhana dan mudah digunakan, tetapi alat tersebut bekerja melalui kontak langsung atau jarak dekat. Kondisi ini membuat pengguna tetap berpotensi terlambat merespons hambatan setinggi badan, objek di jalur berjalan, atau perubahan permukaan jalan yang tidak tersapu oleh tongkat.

Perkembangan mikrokontroler, sensor jarak, GPS, dan layanan *cloud* memberi peluang untuk membangun alat bantu navigasi yang lebih adaptif. Konsep *Internet of Things* memungkinkan perangkat membaca kondisi lingkungan, memproses data secara lokal, mengirimkan data ke *cloud*, dan menampilkan informasi kepada pendamping dalam satu siklus sistem (Xu et al., 2014; Yousef Abuadlla & Ismail Said, 2023). Pada konteks keselamatan pengguna, proses deteksi lokal harus tetap berjalan walaupun koneksi internet belum stabil, karena peringatan hambatan dan lubang tidak boleh bergantung penuh pada jaringan.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sensor ultrasonik banyak digunakan sebagai komponen

utama alat bantu navigasi tunanetra. (Rusito & Setiawan, 2020) mengembangkan alat bantu jalan tunanetra menggunakan sensor ultrasonik berbasis mikrokontroler. (Purwanto & Wahid, 2023) merancang alat bantu navigasi tunanetra berbasis Arduino dengan sensor ultrasonik. (Kazi et al., 2023) mengembangkan *smart cane* berbiaya rendah untuk penyandang tunanetra dengan pendekatan perangkat bantu portabel. (Sandhya et al., 2024) menekankan penggunaan keluaran suara sebagai media peringatan untuk membantu pengguna mengenali hambatan.

Pendekatan *wearable* juga telah dikaji pada beberapa penelitian. (Aldisa et al., 2022) merancang ikat pinggang ultrasonik berbasis Arduino Uno R3 dan modul HC-SR04 untuk membantu tunanetra berjalan. (Alamsyah et al., 2023) mengembangkan sabuk pengaman tunanetra dengan sensor ultrasonik dan GPS untuk mendeteksi objek penghalang serta mendukung informasi lokasi. Selain itu, pemanfaatan Firebase Realtime Database pada sistem *monitoring* berbasis web menunjukkan bahwa layanan *database realtime* dapat digunakan untuk sinkronisasi data secara langsung antara perangkat dan aplikasi pemantauan (Uliani et al., 2025). Pengujian sistem IoT berbasis ESP32 juga menunjukkan bahwa performa komunikasi perangkat sangat dipengaruhi oleh kesta-

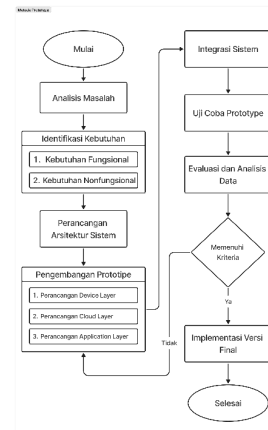
bilan jaringan dan mekanisme pengiriman data (Hadi et al., 2024).

Berdasarkan penelitian terdahulu, masih terdapat *gap* pada integrasi fungsi deteksi, peringatan lokal, dan pemantauan lokasi dalam satu sistem *wearable* yang terstruktur. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa sensor ultrasonik dapat digunakan untuk mendeteksi hambatan, tetapi sebagian besar sistem masih berfokus pada satu arah deteksi atau menggunakan media tongkat yang tetap mengikat tangan pengguna. Penelitian berbasis sabuk mulai dikembangkan, tetapi fungsi pelacakan lokasi masih terbatas pada GPS dan GSM/SMS, sehingga belum mendukung sinkronisasi data secara *realtime* melalui aplikasi pemantauan. Selain itu, beberapa sistem belum memisahkan fungsi keselamatan lokal dari fungsi *monitoring* jarak jauh, padahal peringatan hambatan dan lubang harus tetap aktif meskipun jaringan internet tidak stabil.

Kontribusi penelitian ini adalah merancang prototipe sabuk pintar berbasis IoT yang memisahkan fungsi sistem ke dalam *device layer*, *cloud layer*, dan *application layer*. *Device layer* menangani deteksi hambatan depan, deteksi potensi lubang, *audio warning*, dan getaran secara lokal. *Cloud layer* menangani sinkronisasi lokasi melalui Firebase Real-time Database. *Application layer* menampilkan lokasi perangkat pada aplikasi Android. Dengan pemisahan tersebut, penelitian ini tidak hanya menggabungkan beberapa komponen, tetapi juga menawarkan rancangan arsitektur *end-to-end* yang menjaga fungsi keselamatan tetap berjalan lokal sekaligus menyediakan *monitoring* lokasi secara *realtime*.

2. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode prototipe karena sistem terdiri dari perangkat keras, *firmware*, *cloud*, dan aplikasi Android yang perlu divalidasi secara bertahap. Metode prototipe dipilih karena memungkinkan rancangan awal diwujudkan menjadi versi kerja sederhana, diuji pada skenario terkontrol, lalu diperbaiki berdasarkan hasil evaluasi. (Dennis et al., 2022) menjelaskan bahwa *system prototyping* menjalankan proses *analysis*, *design*, dan *implementation* secara paralel untuk menghasilkan prototipe yang dapat dievaluasi oleh pengguna, kemudian diperbaiki melalui siklus analisis ulang, desain ulang, dan implementasi ulang. Pada penelitian ini, iterasi dilakukan terhadap pembacaan sensor, ambang deteksi, integrasi Firebase, dan antarmuka aplikasi Android sampai fungsi utama prototipe berjalan sesuai spesifikasi. Tahapan penelitian mencakup analisis masalah, identifikasi kebutuhan, perancangan arsitektur, pengembangan prototipe, integrasi sistem, uji coba, evaluasi data, dan penyusunan versi akhir. Setiap tahap menghasilkan keluaran teknis yang menjadi masukan bagi tahap berikutnya. Alur metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Metodologi Penelitian

Berdasarkan Gambar 1, proses pengembangan dilakukan secara iteratif. Ketika hasil uji belum memenuhi kriteria, rancangan perangkat, *firmware*, atau integrasi *cloud* diperbaiki sebelum dilakukan pengujian ulang.

2.1 Analisis Masalah

Analisis masalah dilakukan dengan mengidentifikasi kekurangan alat bantu navigasi tunanetra yang masih muncul pada penelitian terdahulu dan kebutuhan pengguna pada sistem yang dikembangkan. Masalah pertama adalah keterbatasan alat bantu berbasis kontak fisik, seperti tongkat, yang baru memberi informasi ketika objek sudah dekat dengan pengguna. Kondisi tersebut berisiko menyebabkan keterlambatan respons terhadap hambatan di depan tubuh.

Masalah kedua adalah keterbatasan deteksi arah. Beberapa sistem berbasis sensor ultrasonik hanya mendeteksi hambatan horizontal, sedangkan perubahan permukaan seperti lubang atau penurunan lantai belum ditangani dalam konfigurasi yang sama. Masalah ketiga adalah keterbatasan pemantauan lokasi. Sistem yang memakai GPS dan GSM/SMS belum menyediakan sinkronisasi lokasi secara *realtime* melalui aplikasi Android. Masalah keempat adalah ketergantungan terhadap koneksi internet apabila fungsi keselamatan ditempatkan pada *cloud*. Pada sistem bantu navigasi, peringatan lokal harus tetap aktif meskipun jaringan internet belum stabil.

Berdasarkan masalah tersebut, penelitian ini merancang sistem sabuk pintar yang menyelesaikan empat kebutuhan utama, yaitu deteksi hambatan tanpa kontak fisik, deteksi potensi lubang melalui sensor bawah, pemantauan lokasi melalui Firebase dan aplikasi Android, serta pemrosesan peringatan lokal agar fungsi keselamatan tidak bergantung penuh pada *cloud*.

2.2 Identifikasi Kebutuhan

Identifikasi kebutuhan dilakukan untuk menerjemahkan hasil analisis masalah menjadi spesi-

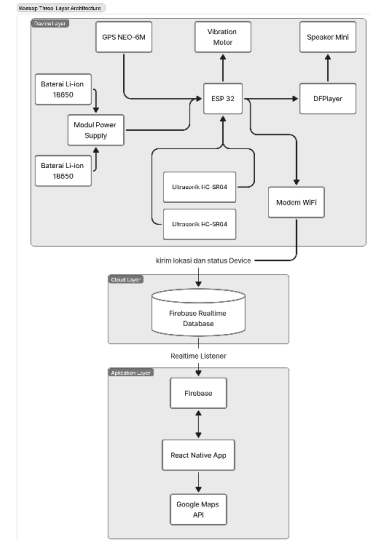
fikasi sistem yang dapat diimplementasikan dan diuji. Kebutuhan sistem dibagi menjadi kebutuhan fungsional dan kebutuhan nonfungsional. Kebutuhan fungsional berhubungan dengan fungsi utama yang harus dijalankan oleh perangkat, sedangkan kebutuhan nonfungsional berhubungan dengan kualitas sistem, seperti portabilitas, respons, dan kestabilan operasi.

Kebutuhan fungsional sistem meliputi deteksi hambatan depan pada jarak ≤ 120 cm, deteksi potensi lubang ketika pembacaan sensor bawah > 130 cm, keluaran peringatan berupa audio dan getaran, pembacaan koordinat GPS, pengiriman data lokasi ke Firebase Realtime Database, serta visualisasi lokasi perangkat pada aplikasi Android. Fungsi deteksi dan peringatan diproses secara lokal oleh ESP32 agar pengguna tetap menerima peringatan meskipun koneksi internet belum stabil. Sementara itu, Firebase dan aplikasi Android digunakan sebagai kanal *monitoring* lokasi oleh pendamping.

Ambang deteksi depan sebesar ≤ 120 cm dipilih sebagai batas peringatan dini agar pengguna masih memiliki ruang respons sebelum mencapai objek. Nilai ini berada di bawah jangkauan efektif sensor HC-SR04, tetapi masih cukup jauh untuk memberi peringatan sebelum kontak fisik. Pemilihan ambang tersebut mempertimbangkan hasil studi terdahulu yang menggunakan sensor ultrasonik untuk deteksi jarak pendek pada alat bantu tunanetra, hasil kalibrasi awal prototipe, posisi sensor pada sabuk, serta variasi tinggi badan pengguna. Karena sensor dipasang pada area pinggang, tinggi badan dan posisi pemakaian sabuk dapat memengaruhi arah pancaran sensor terhadap objek. Pada konfigurasi perangkat yang digunakan, jarak ≤ 120 cm menghasilkan peringatan yang masih responsif tanpa terlalu sering memicu peringatan pada kondisi aman.

Ambang sensor bawah sebesar > 130 cm dipilih berdasarkan perubahan jarak vertikal antara sensor dan permukaan bawah. Pada kondisi permukaan normal, pembacaan sensor bawah berada pada rentang aman sesuai posisi sabuk, tinggi badan pengguna, dan arah sensor. Ketika sensor mengarah ke area yang lebih rendah atau kehilangan pantulan normal karena adanya potensi lubang, nilai jarak meningkat melewati batas tersebut. Oleh karena itu, ambang > 130 cm digunakan untuk membedakan kondisi permukaan normal dan potensi lubang pada konfigurasi prototipe. Nilai ini tetap dibatasi sebagai parameter awal karena pembacaan sensor bawah dapat dipengaruhi oleh sudut sensor, tinggi pengguna, posisi sabuk, gerakan tubuh, dan karakteristik pantulan permukaan.

Kebutuhan nonfungsional sistem meliputi desain sabuk yang portabel, deteksi lokal yang tetap aktif saat perangkat *offline*, interval pembacaan sensor 500 ms, interval pembaruan lokasi 10 detik, dan kestabilan operasi saat perangkat digunakan di lapangan. Interval pembacaan sensor dibuat lebih



Gambar 2. Arsitektur Sistem IoT Tiga Lapis

rapat karena berhubungan langsung dengan keselamatan pengguna, sedangkan interval pembaruan lokasi dibuat lebih longgar agar komunikasi *cloud* tidak membebani proses deteksi lokal dan konsumsi daya perangkat.

2.3 Arsitektur Sistem IoT

Arsitektur sistem terdiri dari tiga lapisan, yaitu *device layer*, *cloud layer*, dan *application layer* sesuai prinsip sistem *Internet of Things* (Xu et al., 2014; Yousef Abuadlla & Ismail Said, 2023). *Device layer* berisi ESP32, sensor ultrasonik HC-SR04, GPS NEO-6M, DFPlayer Mini, motor vibrator, catu daya, dan modem 4G. *Cloud layer* menggunakan Firebase Realtime Database sebagai media sinkronisasi lokasi secara *realtime* (Google, 2023). *Application layer* berupa aplikasi Android React Native yang membaca data Firebase dan menampilkan posisi perangkat kepada pendamping. Arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Gambar 2, *device layer* menangani deteksi dan peringatan lokal, *cloud layer* menangani sinkronisasi data, sedangkan *application layer* menangani visualisasi lokasi. Pemisahan ini membuat fungsi keselamatan tidak bergantung penuh pada *cloud*, karena peringatan audio dan getaran diproses langsung pada ESP32.

2.4 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras dibangun dengan ESP32 DevKit V1 sebagai pusat kendali. ESP32 dipilih karena memiliki Wi-Fi, GPIO, dan UART yang memadai untuk menghubungkan sensor, GPS, modul audio, dan koneksi *cloud* (Espressif Systems, 2021). Sensor HC-SR04 digunakan untuk mengukur jarak berdasarkan pantulan gelombang ultrasonik (Morgan, 2014). GPS NEO-6M digunakan sebagai sumber *latitude* dan *lon-*

gitude perangkat. Komponen utama perangkat keras disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Perangkat Keras

No	Komponen	Model	Fungsi
1	Mikrokontroler	ESP32 DevKit V1	Pemrosesan sensor, logika deteksi, dan komunikasi cloud
2	Sensor jarak	HC-SR04	Deteksi hambatan frontal dan potensi lubang
3	Modul GPS	NEO-6M	Pembacaan <i>latitude</i> dan <i>longitude</i> perangkat
4	Modul audio	DFPlayer Mini	Pemutaran suara peringatan
5	Speaker	Mini 8Ω	Keluaran suara kepada pengguna
6	Aktuator hap-tik	Motor vibrator	Peringatan getaran melalui driver transistor
7	Komunikasi internet	Modem 4G LTE	<i>Gateway</i> Wi-Fi portabel untuk akses Firebase
8	Catu daya	Li-ion 18650, BMS, regulator	Sumber daya dan proteksi sistem <i>wearable</i>

Konfigurasi pin mengikuti implementasi prototipe. Sensor depan menggunakan GPIO 5 sebagai *trigger* dan GPIO 18 sebagai *echo*. Sensor bawah menggunakan GPIO 23 sebagai *trigger* dan GPIO 22 sebagai *echo*. GPS NEO-6M terhubung melalui UART pada GPIO 16 dan GPIO 17. DFPlayer Mini menggunakan GPIO 27 dan GPIO 26, sedangkan motor vibrator dikendalikan melalui GPIO 25 dengan driver transistor.

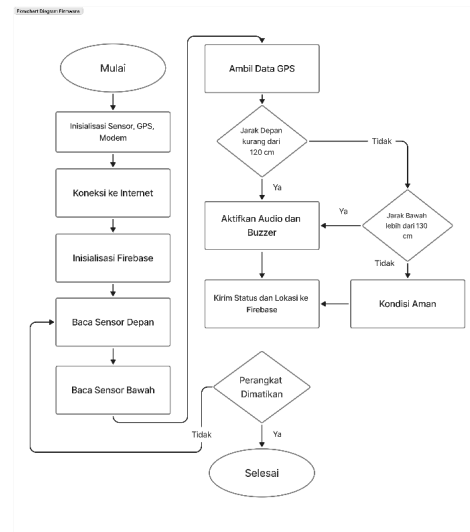
2.5 Integrasi Firebase dan Aplikasi Android

Firebase Realtime Database digunakan sebagai pusat sinkronisasi karena mendukung pembaruan data berbasis *event* dan struktur JSON yang sederhana (Google, 2023). ESP32 memperbarui *node* lokasi melalui koneksi internet dari modem 4G, sedangkan aplikasi Android berlangganan perubahan data melalui *realtime listener*.

Struktur data mengikuti *path* /devices/belt-001/location. *Node* tersebut menyimpan *latitude*, *longitude*, *speed*, *accuracy*, dan *timestamp*. Model *overwrite* pada *node* *location* dipakai agar aplikasi selalu membaca posisi terbaru tanpa menumpuk data yang tidak diperlukan. Pendekatan *monitoring* berbasis Firebase juga sesuai dengan penggunaan Firebase pada sistem pemantauan IoT (Uliani et al., 2025).

2.6 Perancangan Firmware dan Parameter Operasional

Firmware ESP32 dikembangkan pada Arduino *framework* dengan pendekatan *non-blocking* berbasis *millis()*. Pembacaan sensor dilakukan setiap 500 ms, sedangkan pembaruan lokasi ke Firebase dilakukan setiap 10 detik. Logika deteksi membentuk dua kondisi utama, yaitu halangan ketika sensor depan membaca jarak ≤ 120 cm dan lubang ketika sensor bawah membaca jarak > 130 cm. Diagram alur kerja



Gambar 3. Flowchart Alur Kerja *Firmware* ESP32

firmware ditunjukkan pada Gambar 3.

Parameter sistem ditetapkan berdasarkan konfigurasi aktual pada skripsi terbaru. Nilai ambang tidak dibuat terlalu dekat agar pengguna masih memiliki waktu merespons, sedangkan interval pengiriman lokasi dibuat lebih longgar daripada interval sensor agar koneksi *cloud* tidak membebani proses deteksi lokal. Ringkasan parameter ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Operasional Sistem

Parameter	Nilai
Ambang deteksi sensor depan	≤ 120 cm
Ambang deteksi sensor bawah	> 130 cm
Interval pembacaan sensor	500 ms
Interval pembaruan lokasi	10 detik
Indikator offline	Timestamp tidak berubah > 10 detik
Path Firebase	/devices/belt-001/location
Jenis output peringatan	Audio + getaran

Berdasarkan Tabel 2, pembacaan sensor dilakukan lebih rapat karena berhubungan langsung dengan keselamatan pengguna. Pembaruan lokasi dibuat lebih longgar agar koneksi *cloud* tidak membebani proses lokal dan konsumsi daya perangkat.

2.7 Metode Pengujian dan Metrik Evaluasi

Pengujian dilakukan melalui sensor depan, sensor bawah, transmisi data Firebase, daya tahan, *black-box*, dan *User Acceptance Test*. Pengujian sensor dilakukan pada kondisi terkontrol dengan pencatatan *True Positive*, *False Positive*, *False Negative*, dan *True Negative*. *False Negative* diperlakukan sebagai kegagalan kritis karena kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem gagal memberi peringatan saat kondisi bahaya terjadi.

Metrik evaluasi sensor meliputi *accuracy*, *precision*, dan *recall*. *Accuracy* dihitung dari $(TP +$



Gambar 4. Realisasi Prototipe Sabuk Pintar IoT

TN) / (TP + TN + FP + FN). *Precision* dihitung dari TP / (TP + FP). *Recall* dihitung dari TP / (TP + FN). Ketiga metrik tersebut umum digunakan dalam evaluasi berbasis *confusion matrix* untuk menilai ketepatan klasifikasi terhadap kelas positif dan negatif (Rainio, 2024). Dalam penelitian ini, *recall* menjadi metrik kritis karena *False Negative* berarti sistem gagal memberi peringatan ketika kondisi bahaya terjadi.

Pada *black-box testing*, pengujian dilakukan berdasarkan spesifikasi perilaku sistem tanpa memeriksa struktur internal kode program. Pendekatan ini sesuai untuk menguji fungsi utama perangkat, Firebase, dan aplikasi Android karena keluaran sistem dapat diverifikasi berdasarkan input, kondisi uji, dan output yang diharapkan (International Software Testing Qualifications Board, 2024). *User Acceptance Test* digunakan untuk menilai penerimaan pengguna terhadap kenyamanan sabuk, kejelasan audio, kejelasan getaran, ketepatan peringatan, dan rasa percaya diri pengguna. Pada tahap prototipe ini, UAT dilakukan pada lima responden non-tunanetra dengan mata ditutup kain. Kondisi tersebut digunakan sebagai simulasi awal sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasikan sebagai pengalaman pengguna tunanetra asli.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Implementasi Prototipe

Prototipe direalisasikan sebagai sabuk pintar yang memuatkan sensor, ESP32, GPS, modul audio, motor getar, modem, dan baterai dalam satu perangkat. Sensor depan diarahkan horizontal untuk membaca objek di jalur berjalan, sedangkan sensor bawah diarahkan ke permukaan tanah untuk membaca perubahan jarak yang mengindikasikan potensi lubang. Realisasi fisik prototipe ditunjukkan pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4, prototipe telah dibentuk sebagai perangkat *wearable*. Penempatan sen-

sor pada bagian depan sabuk membuat arah deteksi mengikuti orientasi tubuh pengguna. Keputusan desain ini lebih praktis daripada perangkat yang harus dipegang, tetapi stabilitas pembacaan tetap dipengaruhi oleh tinggi badan, kemiringan sabuk, dan sudut sensor terhadap objek atau permukaan.

3.2 Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik

Pengujian sensor depan dilakukan pada sepuluh kondisi. Delapan kondisi berada dalam ambang hambatan ≤ 120 cm dan dua kondisi berada di luar ambang. Setiap kondisi dicatat berdasarkan keluaran audio, getaran, status deteksi, dan kategori klasifikasi.

Jumlah sepuluh kondisi pada masing-masing sensor digunakan sebagai validasi fungsional awal pada tahap prototipe, bukan sebagai generalisasi statistik untuk seluruh kondisi lapangan. Skenario sensor depan dipilih untuk mencakup kondisi positif dan negatif terhadap ambang ≤ 120 cm, sedangkan skenario sensor bawah dipilih untuk mencakup kondisi normal dan potensi lubang terhadap ambang > 130 cm. Dengan pembagian tersebut, pengujian dapat mengevaluasi TP, FP, FN, dan TN secara langsung. Namun, jumlah skenario ini masih terbatas, sehingga hasil 100% hanya menunjukkan bahwa sistem bekerja sesuai parameter pada kondisi terkontrol. Validasi lanjutan tetap diperlukan dengan jumlah lintasan, jenis permukaan, variasi objek, tinggi pengguna, dan kondisi lingkungan yang lebih beragam.

Ringkasan hasil pengujian sensor depan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik Depan

Aspek	Hasil	Metrik	Makna
Hambatan	8 TP, 0 FN	Recall 1,00	≤ 120 cm terdeteksi
Aman	2 TN, 0 FP	Tidak ada FP	> 120 cm tidak aktif
Total	10/10 benar	100%	Sesuai target

Tabel 3 menunjukkan bahwa sensor ultrasonik depan menghasilkan 8 TP dan 2 TN tanpa FP maupun FN. Dengan demikian, *accuracy*, *precision*, dan *recall* bernilai 1,00 pada kondisi uji terkontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor depan mampu mendeteksi hambatan pada jarak ≤ 120 cm dan tidak memicu peringatan pada kondisi aman. Temuan ini konsisten dengan penelitian berbasis sensor ultrasonik yang menunjukkan bahwa sensor jarak efektif untuk deteksi hambatan jarak pendek ketika posisi sensor dan permukaan objek relatif stabil (Kazi et al., 2023; Purwanto & Wahid, 2023).

Pengujian sensor bawah juga dilakukan pada sepuluh kondisi. Enam kondisi merepresentasikan potensi lubang dengan pembacaan jarak > 130 cm, sedangkan empat kondisi merepresentasikan permukaan normal. Ringkasan hasil pengujian sensor bawah disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 menunjukkan bahwa sensor bawah menghasilkan 6 TP dan 4 TN tanpa FP maupun FN.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sensor Ultrasonik Bawah

Aspek	Hasil	Metrik	Makna
Lubang	6 TP, 0 FN	Recall 1,00	>130 cm terdeteksi
Normal	4 TN, 0 FP	Tidak ada FP	≤130 cm aman
Total	10/10 benar	100%	Sesuai target

Nilai *accuracy*, *precision*, dan *recall* mencapai 1,00 pada kondisi uji terkontrol. Hasil ini menunjukkan bahwa ambang > 130 cm dapat membedakan kondisi permukaan normal dan potensi lubang pada konfigurasi prototipe. Namun, hasil tersebut harus dibaca terbatas pada area uji yang terkontrol, karena sensor ultrasonik dapat berubah akibat sudut pantul, material lantai, permukaan mengkilap, dan gerakan tubuh pengguna.

3.3 Hasil Pengujian Firebase, *Black-Box*, dan UAT

Pengujian Firebase dilakukan dengan memverifikasi keberhasilan ESP32 memperbarui *node* lokasi dan keberhasilan aplikasi Android menerima perubahan data melalui *realtime listener*. Data *latitude* dan *longitude* berhasil muncul pada *path* yang sama dengan yang dibaca aplikasi, yaitu */devices/belt-001/location*. Aplikasi juga mampu menampilkan status *offline* ketika *timestamp* tidak berubah melebihi batas yang ditentukan. Hasil ini menunjukkan bahwa Firebase berfungsi sebagai kanal *monitoring* lokasi, sedangkan peringatan keselamatan tetap diproses secara lokal pada perangkat.

Pengujian *black-box* dilakukan terhadap sepuluh fungsi utama, meliputi deteksi hambatan, kondisi aman, deteksi lubang, permukaan normal, pengiriman lokasi, tampilan lokasi pada aplikasi, status *offline*, daftar perangkat, detail perangkat, dan respons aplikasi saat data Firebase berubah. Ringkasan hasil pengujian fungsional dan UAT ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ringkasan pengujian fungsional dan penerimaan pengguna

Jenis uji	Jumlah	Hasil	Interpretasi
Sensor depan	10 kondisi	10 benar, 0 salah	Deteksi hambatan sesuai ambang
Sensor bawah	10 kondisi	10 benar, 0 salah	Deteksi lubang sesuai ambang
Firestore	Node location	Data tampil pada Firestore dan aplikasi	Sinkronisasi cloud berjalan
Black-box	10 test case	10 Pass	Fungsi inti sesuai spesifikasi
UAT	5 responden, 6 item	Skor 133 dari 150 atau 88,67%	Diterima pada simulasi awal

Persentase UAT dihitung berdasarkan perbandingan antara total skor aktual dan total skor maksimum. Rumus yang digunakan adalah Persentase UAT = (Total skor aktual / Total skor maksimum) × 100%. Total skor maksimum diperoleh dari jumlah

responden × jumlah item × skor tertinggi. Pada penelitian ini, total skor maksimum adalah $5 \times 6 \times 5 = 150$. Total skor aktual yang diperoleh adalah 133, sehingga persentase UAT adalah $(133 / 150) \times 100\% = 88,67\%$.

Kriteria penerimaan ditetapkan berdasarkan konversi skala Likert 1 sampai 5 ke persentase. Nilai 80% setara dengan rata-rata skor 4 dari 5, yaitu kategori “Setuju”. Oleh karena itu, sistem dikategorikan diterima apabila persentase UAT mencapai minimal 80%. Kriteria interpretasi persentase UAT ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kriteria Interpretasi Persentase UAT

Persentase	Kategori	Interpretasi
0%	sampai 20%	Sangat tidak diterima
21%	sampai 40%	Tidak diterima
41%	sampai 60%	Cukup
61%	sampai 79%	Diterima bersyarat
80%	sampai 100%	Diterima

Berdasarkan Tabel 5, fungsi inti sistem telah memenuhi skenario pengujian terkontrol. Nilai UAT sebesar 88,67% berada di atas batas penerimaan 80%, sehingga perangkat dikategorikan diterima pada simulasi awal. Item dengan skor tinggi berada pada kejelasan getaran dan peringatan hambatan, sedangkan item rasa percaya diri berjalan memperoleh skor lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa responden masih membutuhkan waktu adaptasi terhadap perangkat. UAT belum melibatkan pengguna tunanetra asli karena penelitian masih berada pada tahap validasi prototipe awal, sehingga aspek keselamatan dan pendampingan perlu dikontrol terlebih dahulu. Oleh karena itu, hasil UAT ini hanya digunakan sebagai evaluasi awal penerimaan sistem, bukan sebagai representasi penuh pengalaman pengguna tunanetra.

3.4 Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Perbandingan dilakukan untuk memperjelas kontribusi penelitian terhadap studi terdahulu yang sudah digunakan dalam naskah. Aspek yang dibandingkan meliputi bentuk perangkat, arah deteksi, keluaran peringatan, pelacakan lokasi, dan integrasi *cloud*. Ringkasan perbandingan penelitian disajikan pada Tabel 7.

Berdasarkan Tabel 7, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sensor ultrasonik telah banyak digunakan sebagai komponen utama pada alat bantu navigasi tunanetra. (Rusito & Setiawan, 2020), serta (Kazi et al., 2023) menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat digunakan untuk membaca hambatan di sekitar pengguna. Namun, sebagian sistem masih berbentuk alat bantu yang harus dipegang atau belum

Tabel 7. Perbandingan dengan Penelitian Terkait

Penelitian	Media dan teknologi utama	Pembanding terhadap penelitian ini
(Rusito & Setiyawan, 2020)	Alat bantu berbasis mikrokontroler dan sensor ultrasonik	Fokus pada deteksi hambatan, belum menekankan integrasi GPS dan cloud monitoring
(Purwanto & Wahid, 2023)	Alat bantu navigasi berbasis Arduino dan sensor ultrasonik	Membuktikan sensor ultrasonik dapat digunakan untuk deteksi jarak, tetapi belum memakai Firebase dan aplikasi Android
(Kazi et al., 2023)	Smart cane berbiaya rendah untuk penyandang tunanetra	Berbentuk tongkat sehingga tangan pengguna tetap terikat pada alat bantu
(Aldisa et al., 2022)	Ikat pinggang, Arduino Uno R3, dan HC-SR04	Sudah berbentuk wearable, tetapi belum menekankan pemantauan lokasi realtime
(Alamsyah et al., 2023)	Sabuk tunanetra, sensor ultrasonik, GPS, dan GSM	Sudah memakai sabuk dan GPS, tetapi komunikasi lokasi masih berbasis GSM/SMS
(Sandhya et al., 2024)	Sensor ultrasonik dan voice guidance	Menekankan keluaran suara, tetapi belum menggabungkan audio, getaran, Firebase, dan aplikasi Android
Penelitian ini	Sabuk pintar, dual HC-SR04, GPS, Firebase, Android, audio, dan getaran	Wearable, dua arah deteksi, peringatan lokal, dan monitoring lokasi realtime

dilengkapi pemantauan lokasi secara *realtime*.

Pendekatan *wearable* pada penelitian (Aldisa et al., 2022) dan (Alamsyah et al., 2023) menjadi dasar bahwa perangkat berbentuk sabuk dapat meningkatkan kepraktisan penggunaan karena tidak membebani tangan pengguna. Perbedaanannya, penelitian ini tidak hanya menempatkan sensor pada sabuk, tetapi juga menggabungkan dua arah deteksi, yaitu depan untuk hambatan dan bawah untuk potensi lubang. Selain itu, sistem menggunakan keluaran audio dan getaran agar peringatan dapat diterima melalui dua bentuk umpan balik.

Dari sisi komunikasi, penelitian (Alamsyah et al., 2023) telah menggunakan GPS dan GSM untuk mendukung informasi lokasi. Penelitian ini mengembangkan pendekatan tersebut dengan Firebase Realtime Database dan aplikasi Android, sehingga data lokasi dapat dipantau oleh pendamping melalui mekanisme *realtime listener*. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini berada pada integrasi perangkat *wearable*, deteksi dua arah, peringatan lokal, dan *monitoring* lokasi *realtime* dalam satu arsitektur sistem.

Meskipun hasil pengujian menunjukkan keberhasilan deteksi 100% pada kondisi terkontrol, hasil tersebut belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh kondisi lapangan. Sensor ultrasonik tetap dipengaruhi oleh sudut pantul, posisi sabuk, jenis permukaan, gerakan pengguna, dan kestabilan koneksi internet. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai validasi awal prototipe yang masih memerlukan pengujian lanjutan pada lingkungan dan responden yang lebih beragam.

3.5 Analisis Performa dan Keterbatasan

Secara fungsional, sistem menunjukkan bahwa rancangan tiga lapis dapat memisahkan fungsi deteksi, sinkronisasi data, dan visualisasi lokasi. *Device layer* menangani pembacaan sensor serta peringatan lokal, *cloud layer* menangani sinkronisasi data lokasi, dan *application layer* menampilkan posisi perangkat

kepada pendamping. Pemisahan ini penting karena fungsi keselamatan tidak boleh bergantung penuh pada *cloud*. Ketika koneksi Firebase atau jaringan modem mengalami keterlambatan, audio dan getaran tetap dapat aktif karena logika deteksi diproses pada ESP32.

Hasil sensor depan dan bawah yang mencapai *accuracy*, *precision*, dan *recall* 1,00 menunjukkan bahwa konfigurasi ambang bekerja sesuai rancangan pada kondisi terkontrol. Namun, hasil tersebut belum cukup untuk menyatakan sistem stabil pada seluruh kondisi nyata. Sensor ultrasonik dapat dipengaruhi oleh sudut pantul, ukuran objek, material permukaan, posisi sabuk, tinggi pengguna, dan gerakan tubuh. Pada sensor bawah, arah sensor yang tidak tegak terhadap permukaan dapat mengubah pembacaan jarak dan berpotensi memicu *false alarm* atau kehilangan deteksi.

Dari sisi komunikasi IoT, Firebase berhasil digunakan sebagai kanal *monitoring* lokasi, tetapi performanya tetap dipengaruhi oleh sinyal modem 4G, koneksi Wi-Fi antara ESP32 dan modem, serta respons layanan *cloud*. Ketika koneksi internet tertunda, aplikasi Android dapat terlambat menerima pembaruan lokasi. Kondisi tersebut tidak menghentikan fungsi peringatan lokal, tetapi dapat memengaruhi ketepatan *monitoring* oleh pendamping.

Keterbatasan lain berada pada jumlah skenario dan responden. Pengujian sensor masih dilakukan pada area parkir terkontrol dengan sepuluh kondisi untuk masing-masing sensor, sehingga hasilnya lebih tepat disebut validasi fungsional awal. UAT juga masih melibatkan lima responden non-tunanetra dengan mata ditutup kain. Kondisi tersebut belum sepenuhnya mewakili pengalaman mobilitas penyandang tunanetra yang memiliki kebiasaan orientasi, strategi berjalan, dan respons terhadap alat bantu yang berbeda. Pengujian berikutnya perlu melibatkan pengguna tunanetra asli, variasi permukaan, variasi objek, dan durasi penggunaan yang lebih panjang.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan prototipe sabuk pintar berbasis IoT yang menggabungkan deteksi hambatan depan, deteksi potensi lubang, peringatan audio, peringatan getar, sinkronisasi Firebase Realtime Database, dan aplikasi Android. Hasil uji terkontrol menunjukkan bahwa sensor depan memperoleh 8 TP dan 2 TN dengan *accuracy*, *precision*, dan *recall* sebesar 1,00, sedangkan sensor bawah memperoleh 6 TP dan 4 TN dengan nilai metrik yang sama. Pengujian *black-box* menghasilkan 10 dari 10 *test case Pass* dan UAT memperoleh persentase penerimaan 88,67% pada simulasi awal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi dasar perangkat, komunikasi Firebase, dan aplikasi *monitoring* telah berjalan sesuai spesifikasi prototipe. Pengembangan berikutnya perlu memprioritaskan pengujian lapangan dengan pengguna tunanetra asli, variasi permukaan dan objek yang lebih luas, penguatan Firebase Rules berbasis autentikasi, optimasi konsumsi daya, perbaikan desain catu daya, serta penambahan metode penyaringan *noise* atau sensor tambahan agar deteksi lebih stabil di luar kondisi terkontrol.

Daftar Pustaka

- Alamsyah, M., Anshory, I., Ahfas, A., Hadidjaja, D., & Saputra, R. (2023): *Sabuk pengaman tunanetra untuk mendeteksi objek penghalang menggunakan sensor ultrasonic dan GPS*, Journal of Electrical Engineering and Computer (JEECOM), 5(2), 115–123.
- Aldisa, R. T., Abdullah, M. A., & Maulana, P. (2022): *Rancangan ikat pinggang ultrasonik untuk membantu tunanetra berjalan dengan Arduino Uno R3 dan modul HC-SR04*, Building of Informatics, Technology and Science (BITS), 3(4), 667–673. <https://doi.org/10.47065/bits.v3i4.1304>
- Dennis, A., Wixom, B. H., & Roth, R. M. (2022): *Systems analysis and design (8th ed.)*, John Wiley & Sons.
- Espressif Systems. (2021): *DOIT ESP32 DevKit V1* [Technical documentation].
- Google. (2023): *Firestore Realtime Database documentation*, Firebase.
- Hadi, M., Rahaningsih, N., & Danar, R. (2024): *Analisa performa sistem smart home berbasis IoT menggunakan Telegram Messenger Bot dan NodeMCU ESP32*, JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika), 8(1), 653–659. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i1.8462>
- International Software Testing Qualifications Board. (2024): *Certified Tester Foundation Level syllabus v4.0.1*, ISTQB.
- Kazi, W., Limu, T. J., & Rakibuzzaman, M. (2023): *Smart cane: A low cost assistive device for the visually impaired*, EAI Endorsed Transactions on Internet of Things, 8(4), e5. <https://doi.org/10.4108/eetiot.v8i4.1707>
- Morgan, E. J. (2014): *HC-SR04 ultrasonic sensor datasheet*.
- Purwanto, T. G., & Wahid, S. N. (2023): *Rancang bangun alat bantu navigasi tuna netra berbasis Arduino dengan sensor ultrasonik*, Jurnal Qua Teknik, 13(1), 91–101. <https://doi.org/10.35457/quateknika.v13i1.2157>
- Rainio, O., Teuho, J., & Klén, R. (2024): *Evaluation metrics and statistical tests for machine learning*, Scientific Reports, 14, 6086. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56706-x>
- Rusito, & Setiyawan, D. (2020): *Alat bantu jalan untuk tuna netra menggunakan sensor ultrasonik berbasis mikrokontroler*, Jurnal Teknologi Manufaktur, 12(1), 80–87.
- Sandhya, K., Malasri, T., Yagna, E., & Rao, V. (2024): *Voice guidance for blind people with ultrasonic obstacle avoidance*, International Journal of Multidisciplinary Research and Explorer, 4(3), 33–47. <https://doi.org/10.70454/IJMRE.2024.40303>
- Uliani, I., Suendri, & Harahap, A. M. (2025): *Implementasi Firebase Realtime Database pada sistem informasi monitoring peternakan Dinas Ketapang Kabupaten Serdang Bedagai berbasis web*, Journal of Science and Social Research, 8(1), 883–889. <https://doi.org/10.54314/jssr.v8i1.2788>
- Xu, L. D., He, W., & Li, S. (2014): *Internet of Things in industries: A survey*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10(4), 2233–2243. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753>
- Yousef Abuadlla, & Ismail Said. (2023): *Survey on the Internet of Things definitions and applications*, Bani Waleed University Journal of Humanities and Applied Sciences, 8(5), 429–440. <https://doi.org/10.58916/jhas.v8i5.123>