

Rancang Bangun Tongkat Pintar Berbasis IoT Dengan Sensor Navigasi Untuk Tunanetra

¹Mardiagus Pawara', ²Denis Prayogi, ³Hafizhan Zuhlilmi, ⁴Lies Hartono

^{1,2,3,4} Teknik Informatika, STMIK PPKIA Tarakanita Rahmawati, Tarakan, Kalimantan Utara
Email: ¹ 2251056@student.ppkia.ac.id, ²denis@ppkia.ac.id, ³hafizhan@ppkia.ac.id, ⁴lies@ppkia.ac.id

Abstrak

Penyandang tunanetra di Indonesia menghadapi risiko serius dalam mobilitas sehari-hari, terutama di lingkungan padat dan tidak familiar, karena tongkat putih konvensional hanya mampu mendeteksi rintangan melalui kontak fisik langsung dan tidak dilengkapi sistem komunikasi darurat. Keterbatasan ini meningkatkan risiko kecelakaan dan menghambat kemandirian pengguna. Oleh karena itu, penelitian ini merancang tongkat pintar berbasis IoT yang mampu mendeteksi rintangan secara elektronik dan menyediakan fitur pengiriman lokasi darurat guna meningkatkan keselamatan dan kemandirian pengguna. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, tiga sensor ultrasonik HC-SR04 dengan batas deteksi kritis 40 cm dari tiga arah (depan, kiri, kanan), modul GPS SIM7000G untuk penentuan lokasi, serta modul SIM GSM sebagai media komunikasi SMS. Informasi rintangan disampaikan melalui notifikasi suara menggunakan speaker dan DFPlayer Mini. Analisis sistem dilakukan menggunakan metode What-If Analysis melalui empat skenario (A1–A4) untuk mengevaluasi kemungkinan kondisi operasional dan memastikan setiap komponen bekerja secara terintegrasi. Hasil pengujian fungsional menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi rintangan pada jarak di bawah 40 cm dengan tingkat keberhasilan 75% berdasarkan empat data pengujian yang ditampilkan, menghasilkan notifikasi suara pada tiga dari empat skenario pengujian, serta mengirimkan lokasi darurat melalui SMS pada kondisi sinyal GPS tersedia; pada kondisi indoor pengiriman SMS mengalami keterlambatan atau kegagalan akibat lemahnya sinyal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem yang dirancang secara umum dapat berfungsi sesuai perancangan dan berpotensi digunakan sebagai alat bantu mobilitas bagi penyandang tunanetra, dengan catatan beberapa aspek masih memerlukan penyempurnaan lebih lanjut.

Kata Kunci: esp32, internet of things, sensor ultrasonik, tongkat pintar, what-if analysis

Design and Development of IoT-Based Smart Cane with Navigation Sensors for the Visually Impaired

Abstract

Visually impaired individuals in Indonesia face serious risks in their daily mobility, especially in crowded and unfamiliar environments, because conventional white canes can only detect obstacles through direct physical contact and are not equipped with an emergency communication system. These limitations increase the risk of accidents and hinder users' independence. Therefore, this study designed an IoT-based smart cane capable of electronically detecting obstacles and providing an emergency location-sharing feature to enhance user safety and independence. The system uses an ESP32 microcontroller as the control centre, three HC-SR04 ultrasonic sensors with a critical detection range of 40 cm in three directions (front, left, and right), a SIM7000G GPS module for location determination, and a SIM GSM module for SMS communication. Obstacle information is conveyed via voice notifications using a speaker and DFPlayer Mini. The system analysis was conducted using the What-If Analysis method across four scenarios (A1–A4) to evaluate potential operational conditions and ensure that each component functions in an integrated manner. The results of the functional testing show that the system is capable of detecting obstacles at a distance of less than 40 cm with a 75% success rate based on the four test data sets presented, generating audio notifications in three of the four test scenarios, and sending an emergency location via SMS when a GPS signal is available; in indoor conditions, SMS delivery experienced delays or failures due to a weak signal. These results indicate that the system generally functions as designed and has the potential to be used as a mobility aid for the visually impaired, though some aspects still require further refinement.

Keywords: esp32, internet of things, smart cane, ultrasonic sensor, what-if analysis

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi elektronika dan sistem tertanam (embedded system) telah memberikan banyak kontribusi dalam membantu aktivitas manusia, khususnya dalam menciptakan alat bantu yang lebih cerdas dan responsif. Pemanfaatan mikrokontroler yang dikombinasikan dengan berbagai sensor memungkinkan terciptanya perangkat yang mampu mendeteksi kondisi lingkungan sekitar dan memberikan respons secara otomatis, termasuk pada sistem keamanan, navigasi, dan alat bantu mobilitas [1].

Berdasarkan data dari World Health Organization (2019), diperkirakan terdapat lebih dari 2,2 miliar orang di dunia yang mengalami gangguan penglihatan, dan sebagian di antaranya mengalami keterbatasan penglihatan berat atau kebutaan [2]. Individu dengan keterbatasan penglihatan menghadapi berbagai risiko saat beraktivitas di luar ruangan, seperti menabrak rintangan atau kesulitan meminta pertolongan saat dalam keadaan darurat.

Tongkat putih konvensional masih bekerja secara mekanis dan bergantung pada kontak fisik langsung untuk mendeteksi rintangan, sehingga berpotensi menimbulkan risiko tersandung, terutama pada lingkungan padat atau tidak familiar [3]. Selain itu, tongkat tradisional belum dilengkapi sistem peringatan suara maupun fitur komunikasi darurat untuk mengirimkan lokasi pengguna ketika berada dalam kondisi berbahaya.

Sistem ini dikategorikan sebagai IoT dalam arti luas karena mengintegrasikan perangkat fisik (sensor, mikrokontroler, modul GPS) yang saling terhubung dan bertukar data secara otomatis untuk menghasilkan respons cerdas terhadap lingkungan sekitar [4]. Pada prototipe ini, komunikasi darurat diimplementasikan melalui SMS berbasis modul GSM/LTE yang dipilih karena lebih stabil dan tersedia di daerah dengan keterbatasan jaringan data internet, sekaligus menjadi fondasi untuk pengembangan konektivitas berbasis internet pada iterasi berikutnya. Untuk memastikan keandalan alat, penelitian ini menggunakan metode What-If Analysis untuk mengevaluasi respons alat terhadap berbagai kemungkinan kondisi operasional seperti ketersediaan sinyal GPS maupun respons terhadap rintangan kritis [5].

Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan tongkat pintar berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor ultrasonik, mikrokontroler ESP32, serta modul komunikasi GPS dan SIM GSM, sehingga perangkat mampu memberikan informasi navigasi secara real-time melalui output audio dan menyediakan fitur komunikasi darurat yang praktis bagi penyandang tunanetra.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Smart Cane dan Tunanetra

Smart Cane adalah alat bantu mobilitas inovatif yang dirancang untuk membantu penyandang tunanetra, dilengkapi teknologi seperti sensor ultrasonik dan sistem peringatan berupa suara atau getaran yang mampu mendeteksi hambatan secara real-time [3]. Tunanetra adalah individu yang mengalami gangguan atau hambatan pada indera penglihatan,

baik sebagian (low vision) maupun secara keseluruhan (buta total), yang memerlukan dukungan alat bantu khusus untuk mobilitas dan akses informasi [2].

B. Komponen Utama Sistem

ESP32 adalah mikrokontroler yang sangat populer dalam proyek IoT karena kemampuannya dalam hal konektivitas dan performa. ESP32 dilengkapi dual-core Xtensa 32-bit LX6 processor @ 240 MHz, RAM 520 KB, triple UART untuk komunikasi bersamaan dengan tiga modul, WiFi 802.11 b/g/n, dan Bluetooth dual-mode [6].

Sensor HC-SR04 adalah modul ultrasonic range finder yang umum dipakai untuk mengukur jarak objek secara non-kontak. Sensor ini sering digunakan dalam robotika, sistem parkir otomatis, dan proyek IoT karena harganya murah dan mudah dihubungkan ke mikrokontroler [7]. SIM7000G adalah modul komunikasi seluler berbasis LTE Cat-M dan NB-IoT yang dilengkapi modul GPS, GNSS, dan GLONASS untuk penentuan posisi real-time, dikendalikan menggunakan perintah AT Command melalui antarmuka serial UART [8].

DFPlayer Mini adalah modul pemutar MP3 kompak yang dikendalikan melalui komunikasi serial UART (9600 bps), mendukung format MP3, WAV, dan WMA dari kartu Micro SD, dengan output daya 3W dan kompatibilitas tegangan 3.3V–5V yang sesuai dengan ESP32 [9]. Baterai 18650 digunakan sebagai sumber energi dengan tegangan nominal 3,7 volt dan kapasitas antara 1800–3500 mAh [10]. Rincian komponen perangkat dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Perangkat Tongkat Pintar

No.	Komponen	Fungsi	Pin/Koneksi
1	ESP32	Pusat kendali sistem	–
2	HC-SR04 (×3)	Deteksi rintangan depan, kiri, kanan	GPIO TRIG/ECHO
3	SIM7000G	Komunikasi SMS & GPS	UART2
4	DFPlayer Mini	Pemutar audio peringatan	UART1
5	Speaker	Output suara	DFPlayer SPK
6	Push Button	Tombol darurat SOS	GPIO26
7	Baterai 18650	Sumber daya portabel	VCC
8	SimCard Telkomsel IoT	Koneksi jaringan seluler	Slot SIM

C. Metode What-If Analysis

Analisis What-If merupakan metode evaluasi sistem yang digunakan untuk mengkaji kemungkinan konsekuensi dari perubahan parameter atau kondisi operasional. What-If Analysis digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan sistem melalui pertanyaan sistematis "apa yang terjadi jika suatu komponen tidak berfungsi?" [5]. Metode ini efektif dalam mengevaluasi perubahan kondisi operasional karena mampu mengidentifikasi hubungan antar variabel yang

berpotensi menimbulkan risiko, menganalisis probabilitas kegagalan komponen, dan merumuskan strategi mitigasi yang tepat [11].

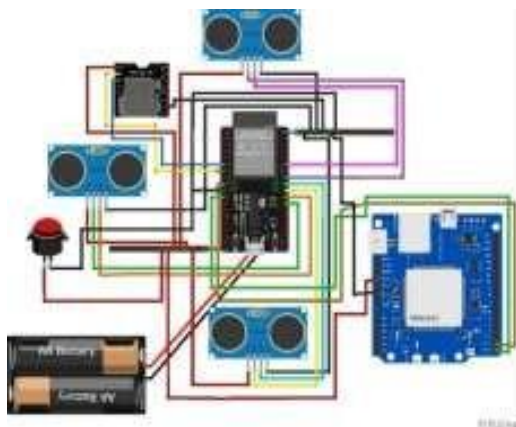
Penerapan metode What-If dilakukan melalui empat tahapan: (1) identifikasi faktor yang mempengaruhi sistem, (2) pengumpulan dan validasi data, (3) perumusan skenario alternatif, dan (4) pemodelan dan simulasi. Pada setiap skenario, metode ini diterapkan dengan mengajukan pertanyaan "apa yang terjadi jika..." terhadap kondisi kritis sistem, menganalisis konsekuensi yang mungkin timbul, memperkirakan probabilitas kegagalan, dan merumuskan langkah mitigasi. Sementara itu, jarak dibagi menjadi beberapa kategori kondisi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Perlu dicatat bahwa pada implementasi prototipe saat ini, sistem menggunakan satu threshold tunggal yaitu <40 cm sebagai batas kritis aktif (kondisi Bahaya); kategori Waspada dan Siaga merupakan rancangan pengembangan yang belum diimplementasikan pada versi prototipe ini dan dapat diterapkan pada iterasi berikutnya.

Tabel 2. Kategori Jarak dan Kondisi Sistem

No.	Jarak (cm)	Kondisi	Respons Sistem
1	>100	Aman	Tidak ada peringatan
2	60–100	Waspada	Suara level rendah
3	40–60	Siaga	Suara level sedang
4	<40	Bahaya	Peringatan segera

D. Perancangan Sistem

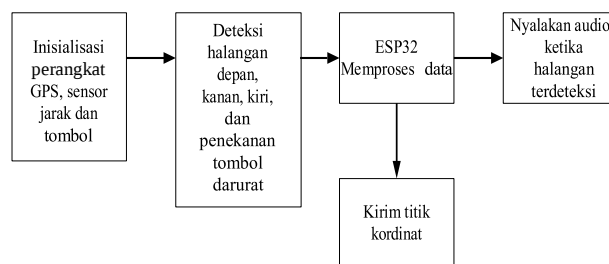
Sistem tongkat pintar terdiri atas empat bagian utama: perangkat input (sensor ultrasonik), pemrosesan (ESP32), komunikasi (SIM7000G + GPS), dan output (DFPlayer Mini + speaker). Sensor ultrasonik ditempatkan di tiga sisi tongkat (depan, kiri, kanan) untuk mendeteksi rintangan dari berbagai arah. Seluruh komponen ditempatkan dalam casing tongkat yang ergonomis dengan tombol darurat yang mudah dijangkau pengguna.



Gambar 1. Skema Rangkaian Tongkat Pintar

Gambar 1 menunjukkan skema rangkaian elektronika perangkat, mencakup koneksi antara ESP32 dengan tiga sensor HC-SR04 (pin TRIG/ECHO), modul SIM7000G

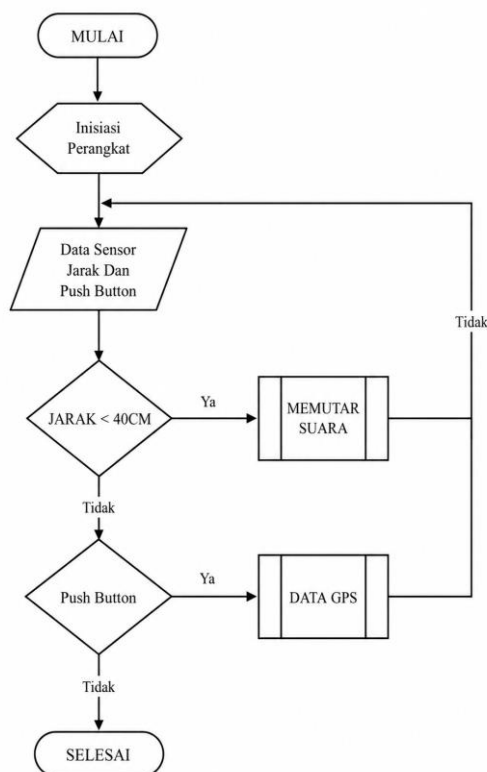
(UART2: pin RX/TX), DFPlayer Mini (UART1), push button (GPIO26), dan baterai 18650 sebagai sumber daya sistem.



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Tongkat Pintar

Gambar 2 menggambarkan blok diagram sistem, menunjukkan alur dari tiga sensor ultrasonik sebagai input ke ESP32 sebagai unit pemrosesan, lalu ke output berupa DFPlayer Mini/speaker (peringatan suara) dan SIM7000G/GPS (komunikasi darurat SMS) yang dikendalikan oleh push button.

Gambar 3 menampilkan flowchart utama sistem dimulai dari inisialisasi ESP32, pembacaan sensor ultrasonik, pengecekan jarak (< 40 cm), aktivasi peringatan suara jika terdeteksi, pengecekan tombol darurat, pengambilan data GPS, dan pengiriman SMS jika tombol ditekan.



Gambar 3. Flowchart Utama Sistem

Gambar 5 menampilkan flowchart pengiriman lokasi GPS: inisialisasi SIM7000G dan GPS, menunggu sinyal tombol darurat, pengambilan koordinat GPS (latitude dan longitude), pengecekan jaringan GSM, dan pengiriman SMS berisi koordinat atau pesan SOS tanpa koordinat jika GPS tidak tersedia.



Gambar 6 menampilkan desain fisik tongkat pintar dari berbagai sudut pandang: tampak depan (sensor HC-SR04 depan), tampak kiri dan kanan (sensor HC-SR04 kiri dan kanan), tampak belakang (antena 4G LTE dan antenna GPS), serta tampak atas (speaker, switch on/off, dan tombol darurat SOS).

A. Implementasi Sistem

Rancang bangun sistem tongkat pintar berbasis IoT yang diimplementasikan merupakan perancangan alat bantu mobilitas bagi penyandang tunanetra yang dilengkapi sensor ultrasonik, modul GPS, modul komunikasi SIM GSM, serta sistem notifikasi audio. Kebutuhan perangkat keras meliputi laptop Acer Aspire A514-54G (RAM 12 GB, SSD 762 GB) sebagai media pemrograman, sedangkan perangkat lunak menggunakan Windows 11 dan Arduino IDE 2.3.4.

```

graph TD
    A([MULAI]) --> B[/Inisiasi SIM700G, GPS dan push button/]
    B --> C[/Menerima Sinyal Button/]
    C --> D[Proses Mengambil Lokasi GPS lat dan lon]
    D --> E{Cek Jaringan eSIM}
    E -- Ya --> F[Mengirim Koordinat Lokasi via SMS]
    F --> G[/Lokasi Koordinat GPS/]
    E -- Tidak --> H[Lokasi GPS tidak ditemukan]
    H --> A
    G --> I([SELESAI])
    H --> I
  
```

```

❑ UNFLAYER: SIAP
CEB: SIMY000G...
>> AT
AT
OK

>> AT+Q
AT+Q
OK

>> AT+CFUN?
+CFUN: 0
OK

>> AT+CSQ
+CSQ: 14,99
OK

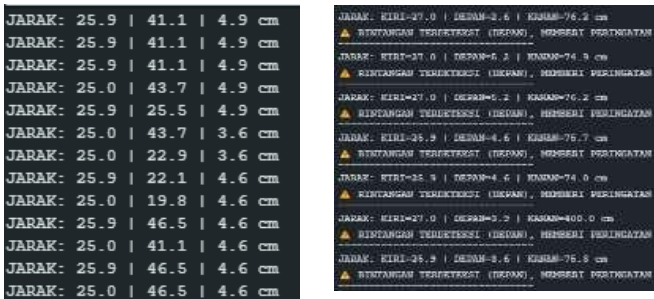
>> AT+CREG?
+CREG: 0,1

❑ SIMY000G: SIAP
SIMY000G: SIAP

```

Gambar 7 menampilkan tampilan monitor serial Arduino IDE saat proses booting sistem, menunjukkan status inisialisasi setiap komponen dan konfirmasi "SISTEM AKTIF"

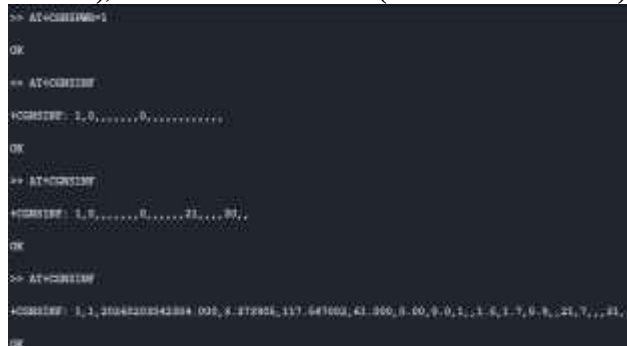
Inisialisasi sensor ultrasonik mengonfigurasi tiga sensor HC-SR04 (kiri: TRIG1/ECHO1 pada GPIO5/18, depan: TRIG2/ECHO2 pada GPIO16/17, kanan: TRIG3/ECHO3 pada GPIO19/21). Setiap sensor dihubungkan melalui pin trigger sebagai keluaran dan pin echo sebagai masukan untuk pembacaan jarak secara real-time.



Gambar 8. Inisialisasi Sensor Ultrasonik (a) dan Deteksi Jarak (b)

Gambar 8 menampilkan kode program inisialisasi sensor HC-SR04 dan logika deteksi jarak. Gambar tersebut menunjukkan pembacaan nilai d1 (kiri), d2 (depan), d3 (kanan) dari fungsi bacaUltrasonic(), serta kondisi adaRintangan yang aktif bila salah satu sensor mendeteksi jarak < JARAK_BAHAYA (40 cm).

Inisialisasi modul SIM7000G dilakukan menggunakan serangkaian perintah AT: AT (verifikasi koneksi), ATE0 (nonaktifkan echo), AT+CPIN? (status SIM), AT+CSQ (kualitas sinyal), AT+CREG? (registrasi jaringan), AT+CNMP=13 (mode GSM only), AT+CMGF=1 (mode SMS teks), dan AT+CGNSPWR=1 (aktifkan GPS internal).

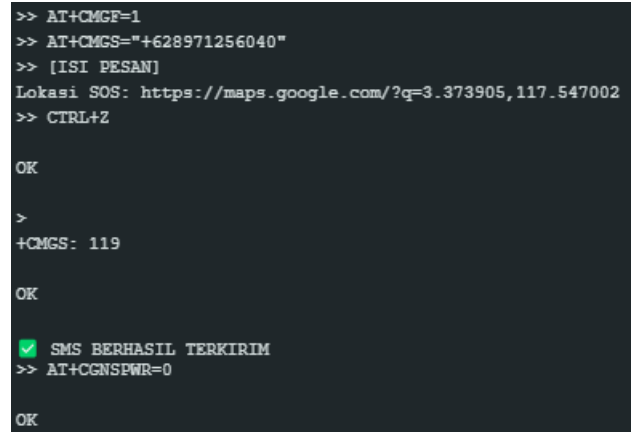


Gambar 9. Inisialisasi GPS

Gambar 9 menampilkan inisialisasi program fungsi kirimLokasi() dan Gambar 10 menampilkan inisialisasi dari fungsi kirimSMS().

Fungsi kirimLokasi() membaca koordinat GPS melalui perintah AT+CGNSINF hingga 20 percobaan, kemudian menyusun pesan berupa link Google Maps jika koordinat tersedia, atau pesan "SOS ditekan, GPS tidak ditemukan" jika tidak. Fungsi kirimSMS() mengirimkan pesan ke nomor tujuan menggunakan perintah AT+CMGS.

Ilustrasi saat proses pengiriman SMS dapat dilihat pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Proses Kirim SMS

B. Hasil Pengujian What-If Analysis

Skenario A1 menerapkan What-If Analysis terhadap konektivitas GPS dengan pertanyaan: "Apa yang terjadi jika sinyal GPS tidak tersedia saat pengguna menekan tombol darurat?" Konsekuensi yang diidentifikasi adalah sistem tidak dapat mengirimkan koordinat lokasi yang akurat, sehingga responden darurat tidak mengetahui posisi pengguna. Probabilitas kegagalan ini cukup tinggi terutama di lingkungan indoor. Sebagai mitigasi, sistem dirancang untuk tetap mengirimkan SMS darurat meskipun tanpa koordinat GPS. Hasil pengujian memvalidasi strategi mitigasi tersebut: pada area terbuka GPS mampu memperoleh sinyal valid dan mengirimkan koordinat lengkap, sedangkan pada area tertutup sistem tetap mengirimkan SMS darurat tanpa koordinat, membuktikan sistem tetap berfungsi meskipun GPS gagal memperoleh sinyal.

Tabel 3. Skenario A1 – Hasil Uji Koneksi GPS

No.	Status GPS	Isi SMS	Status Pengiriman
1	Sinyal Tersedia	Pesan + Koordinat	Terkirim
2	Sinyal Tidak Tersedia	Pesan Tanpa Koordinat	Terkirim

Tabel 3 menampilkan dokumentasi pengujian skenario A1 yang menunjukkan: (a) tampilan monitor serial saat GPS berhasil memperoleh sinyal dan koordinat terkirim via SMS, dan (b) tampilan saat GPS gagal memperoleh sinyal namun SMS darurat tetap terkirim tanpa koordinat.

Tabel 4 berisi skenario A2 yang menerapkan What-If Analysis terhadap kinerja sensor dengan pertanyaan: "Apa yang terjadi jika sensor ultrasonik gagal mendeteksi rintangan pada jarak kritis?" Konsekuensi yang diidentifikasi adalah pengguna tunanetra dapat menabrak rintangan tanpa peringatan, yang berpotensi menyebabkan cedera. Probabilitas kegagalan meningkat pada jarak yang mendekati batas threshold karena toleransi pembacaan sensor. Sebagai mitigasi, disarankan kalibrasi threshold pada nilai 45 cm

(bukan 40 cm) untuk memberikan buffer keamanan. Berdasarkan empat data pengujian yang ditampilkan, tiga pengujian berhasil terdeteksi sehingga tingkat keberhasilan adalah 75%. Pengujian ke-4 pada jarak 39 cm tidak terdeteksi karena nilai tersebut berada tepat di batas ambang 40 cm dan sensitif terhadap toleransi pembacaan sensor. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem memerlukan kalibrasi lebih lanjut untuk konsistensi deteksi pada jarak mendekati batas kritis.

Tabel 4. Skenario A2 – Hasil Uji Deteksi Sensor Ultrasonik

No.	Posisi Sensor	Jarak Uji (cm)	Deteksi	Notifikasi Suara
1	Depan	30	Terdeteksi	Aktif
2	Kanan	35	Terdeteksi	Aktif
3	Kiri	38	Terdeteksi	Aktif
4	Depan	39	Tidak terdeteksi	Tidak Aktif



Gambar 11. Pengujian Skenario A2 – Deteksi Rintangan Depan (a), Kanan (b), Kiri (c)

Gambar 11 menampilkan dokumentasi uji coba deteksi rintangan dari tiga arah: (a) deteksi rintangan depan, (b) deteksi rintangan kanan, dan (c) deteksi rintangan kiri, menunjukkan respons sistem berupa peringatan suara saat jarak < 40 cm pada masing-masing sensor.

Skenario A3 menerapkan What-If Analysis terhadap mekanisme tombol darurat dengan pertanyaan: "Apa yang terjadi jika pengguna menekan tombol darurat tetapi sistem tidak merespons?". Konsekuensi yang diidentifikasi adalah permintaan pertolongan tidak terkirim, yang dapat berakibat fatal dalam situasi darurat nyata.

Probabilitas kegagalan dapat terjadi akibat koneksi longgar pada tombol atau kegagalan modul SIM. Sebagai mitigasi, sistem menggunakan push button dengan konfirmasi status melalui monitor serial dan indikator LED. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tombol darurat mampu merespons setiap penekanan dengan baik. Seluruh tahapan proses—mulai dari aktivasi GPS, pembacaan koordinat, hingga pengiriman SMS—dapat dijalankan secara konsisten tanpa memerlukan intervensi tambahan pengguna.

Gambar 12 menampilkan dokumentasi pengujian tombol darurat (push button), menunjukkan tampilan monitor serial saat tombol ditekan dengan urutan proses: aktivasi mode darurat → inisialisasi GPS → pembacaan koordinat → pengiriman SMS melalui SIM7000G, serta konfirmasi "SMS BERHASIL TERKIRIM".

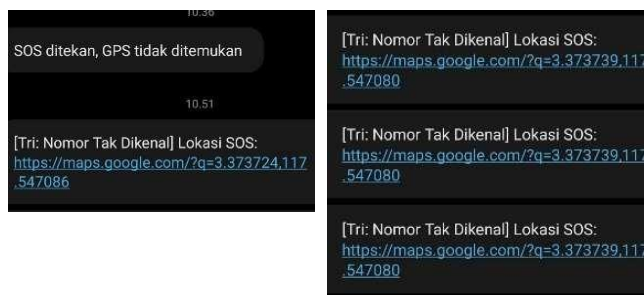
Tabel 5. Skenario A4 – Uji Kondisi Jaringan dan Lingkungan GPS

No.	Kondisi Lingkungan	Status GPS	Isi SMS	Status
1	Outdoor (terbuka)	Sinyal Stabil	Pesan + Koordinat	Terkirim
2	Indoor (tertutup)	Sinyal Lemah	Pesan Tanpa Koordinat	Tertunda/Gagal



Gambar 12. Pengujian Skenario A3 – Tombol Darurat

Tabel 5 berisi skenario A4 yang menerapkan What-If Analysis terhadap kondisi lingkungan dengan pertanyaan: "Apa yang terjadi jika pengguna berada di dalam ruangan saat menekan tombol darurat?" Konsekuensi yang diidentifikasi adalah sinyal GPS tidak optimal sehingga koordinat tidak dapat diperoleh, dan sinyal seluler yang lemah menyebabkan SMS tertunda atau gagal terkirim. Probabilitas kegagalan ini tinggi di lingkungan indoor seperti gedung bertingkat atau area bawah tanah. Sebagai mitigasi jangka pendek, pengguna disarankan berpindah ke area terbuka sebelum mengaktifkan fitur darurat; mitigasi jangka panjang adalah penggunaan modul multi-satelit dan integrasi dengan jaringan Wi-Fi indoor. Pada area terbuka (outdoor), modul GPS mampu memperoleh sinyal satelit dengan baik dan data lokasi berhasil dikirim secara lengkap. Pada area tertutup (indoor), GPS memerlukan waktu lebih lama dan dalam beberapa pengujian sinyal tidak diperoleh secara optimal, namun sistem tetap berjalan stabil.



Gambar 13. Pengujian Skenario A4 – GPS Indoor dan Outdoor

Gambar 13 menampilkan dokumentasi uji GPS pada dua kondisi: (a) pengujian di dalam ruangan menunjukkan sinyal GPS yang tidak stabil dan koordinat tidak selalu berhasil diperoleh, (b) pengujian di luar ruangan menunjukkan sinyal GPS stabil dan koordinat berhasil terkirim melalui SMS ke nomor tujuan.

C. Analisa Hasil

Berdasarkan seluruh pengujian Skenario A1 hingga A4, sistem tongkat pintar berbasis IoT secara umum telah bekerja sesuai perancangan. Sensor ultrasonik mampu mendeteksi halangan pada jarak kurang dari 40 cm dengan tingkat keberhasilan 75% berdasarkan data pengujian yang ditampilkan; pengujian pada jarak 39 cm tidak terdeteksi akibat toleransi pembacaan sensor di sekitar nilai ambang, sehingga diperlukan kalibrasi lebih lanjut. Notifikasi suara aktif pada tiga dari empat skenario pengujian sesuai data Tabel 4. Tombol darurat berfungsi dengan baik dalam mengaktifkan GPS dan mengirimkan SMS pada kondisi outdoor. Pada kondisi indoor, sinyal GPS dan jaringan seluler yang lemah menyebabkan pengiriman SMS tertunda atau gagal sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5; kondisi ini merupakan keterbatasan yang perlu diantisipasi pengguna. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik batang atau grafik radar yang memvisualisasikan tingkat keberhasilan per skenario, waktu respons deteksi sensor, dan waktu pengiriman SMS pada berbagai kondisi jaringan, sehingga perbandingan performa sistem dapat dipahami lebih mudah oleh pembaca. Secara keseluruhan, sistem bersifat fungsional dan responsif pada kondisi outdoor, namun masih memerlukan peningkatan untuk performa pada kondisi indoor.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian sistem tongkat pintar berbasis IoT, dapat disimpulkan bahwa sistem yang dirancang mampu mendeteksi rintangan pada jarak kritis kurang dari 40 cm menggunakan tiga sensor ultrasonik HC-SR04 dari arah depan, kiri, dan kanan, serta memberikan peringatan suara secara real-time melalui DFPlayer Mini dan speaker dengan tingkat keberhasilan 75% berdasarkan empat data pengujian yang ditampilkan. Sistem juga berhasil mengintegrasikan modul GPS dan modul SIM7000G untuk mengirimkan informasi lokasi darurat melalui SMS ketika tombol SOS ditekan pada kondisi outdoor; namun pada kondisi indoor, pengiriman SMS mengalami keterlambatan atau kegagalan akibat sinyal yang lemah. Pengujian menggunakan metode What-If Analysis menunjukkan bahwa sistem bersifat adaptif terhadap berbagai kondisi operasional, meskipun terdapat beberapa keterbatasan yang memerlukan penyempurnaan. Untuk pengembangan selanjutnya, sistem dapat ditingkatkan dengan menambahkan modul komunikasi berbasis internet (MQTT atau aplikasi mobile) agar pengiriman lokasi lebih cepat dan real-time. Akurasi navigasi dapat ditingkatkan dengan sensor tambahan seperti

inframerah atau LiDAR untuk mendeteksi objek yang lebih kecil dan permukaan berlubang. Optimalisasi akurasi GPS dapat dilakukan dengan menggunakan modul multi-satelit (GPS, GLONASS, Galileo). Pengembangan berikutnya juga dapat mencakup fitur pelacakan melalui aplikasi Android, peningkatan efisiensi daya baterai, serta desain fisik yang lebih ergonomis dan tahan air.

REFERENSI

- [1] P. Marwedel, *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems*, 3rd ed. Springer, 2021. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60910-8>
- [2] World Health Organization, *World Report on Vision*. World Health Organization, 2019. [Online]. Tersedia: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241516570>
- [3] A. Bhatlawande, J. Mahajabn, and M. Mukhopadhyay, "Design and development of ultrasonic spectacles and waist-belt for visually impaired and blind persons," *Journal of Medical Engineering & Technology*, vol. 38, no. 1, pp. 37–43, 2014. [Online]. Tersedia: <https://doi.org/10.3109/03091902.2013.853136>
- [4] A. D. Wibisono, "Rekayasa sistem terintegrasi pengelolaan antrian pasien berbasis web dan IoT," Skripsi, Program Sarjana Teknik Informatika, STMIK PPKIA Tarakanita Rahmawati, Tarakan, 2024.
- [5] N. A. Syuhada, L. Lukman, dan P. Parji, "Analisis risiko K3 menggunakan metode HIRADC dengan pendekatan What-If Analysis," *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (JUTIN)*, vol. 8, no. 4, pp. 4372–4381, 2025. [Online]. Tersedia: <https://journal.universitaspahlawan.ac.id/index.php/jutin/article/view/35999>
- [6] M. Izat Raesyafudin Stiawan et al., "Pemanfaatan mikrokontroler ESP32 dalam pengembangan sistem Internet of Things," *Jurnal Informatika dan Teknologi Komputer*, vol. 9, no. 2, pp. 101–109, 2024. [Dokumen tersedia melalui institusi penerbit]
- [7] A. Adhamatika et al., "Penerapan sensor ultrasonik HC-SR04 pada sistem deteksi jarak berbasis mikrokontroler," *Jurnal Teknologi dan Sistem Tertanam*, vol. 5, no. 1, pp. 45–52, 2024. [Dokumen tersedia melalui institusi penerbit]
- [8] L. Yuan et al., "Design of IoT communication systems using SIM7000G LTE Cat-M module," *International Journal of Embedded Systems and IoT*, vol. 10, no. 1, pp. 25–34, 2024.
- [9] R. Rizkika Fitri et al., "Implementasi DFPlayer Mini sebagai media audio pada sistem peringatan berbasis mikrokontroler," *Jurnal Elektronika dan Sistem Tertanam*, vol. 6, no. 2, pp. 60–68, 2023. [Dokumen tersedia melalui institusi penerbit]
- [10] Y. N. Yusuf Nurul Hilal et al., "Rancang bangun sistem catu daya menggunakan baterai 18650 pada perangkat IoT portabel," *Jurnal Teknologi Energi Terbarukan*, vol.

- 8, no. 1, pp. 40–48, 2025. [Dokumen tersedia melalui institusi penerbit]
- [11] R. Patel and S. Krishnamurthy, "What-If Analysis for fault tolerance evaluation in embedded sensor systems," IEEE Sensors Journal, vol. 21, no. 5, pp. 6701–6710, 2021.[Online].
Tersedia: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3037845>