Pengembangan Teknologi Wearable Headband Berbasis Deep Learning untuk Deteksi Rintangan dengan Panduan Suara Interaktif bagi Mobilitas Tunanetra

Mohamad Tegar Deyustian Muslim*[1], Azhar Ahmad Smaragdina[2]
Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang[1,2]
*e-mail: mohamad.tegar.2205336@students.um.ac.id

ABSTRAK

Mobilitas merupakan aspek vital bagi manusia, namun penyandang tunanetra menghadapi kendala signifikan untuk bergerak secara mandiri di ruang publik. Data Badan Pusat Statistik (BPS) tahun 2022 mencatat terdapat 277.200 penyandang tunanetra dari total 840 ribu warga Indonesia yang memiliki disabilitas sensorik. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan iSee, sebuah inovasi alat bantu mobilitas berupa *wearable headband* berbasis *deep learning* yang berfungsi untuk mendeteksi rintangan (*obstacle detection*) dan memberikan arahan melalui panduan suara interaktif (*interactive voice guidance*). Penelitian ini menerapkan metode *Research and Development* (R&D) model Borg and Gall, yang mencakup tahapan analisis kebutuhan hingga uji lapangan. Secara teknis, purwarupa ini dibangun menggunakan perangkat keras Raspberry Pi Zero 2W dan Camera Module 2, serta diintegrasikan dengan algoritma YOLO berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk pemindaian objek secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai akurasi deteksi sebesar 91% dengan seluruh fitur berfungsi secara valid. Selain itu, perangkat ini telah mencapai Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) level 8. Kesimpulannya, purwarupa iSee terbukti sangat layak untuk dikembangkan dan diproduksi sebagai solusi alat bantu pergerakan yang efektif bagi penyandang tunanetra.

Kata kunci : *Wearable Headband; Deep Learning; Obstacle Detection; Interactive Voice Guidance; Mobilitas Tunanetra.*

ABSTRACT

Mobility is a vital aspect for humans, yet visually impaired individuals face significant challenges in navigating public spaces independently. Data from Statistics Indonesia (BPS) in 2022 recorded 277,200 visually impaired individuals out of a total of 840,000 Indonesians with sensory disabilities. This study aims to develop iSee, an innovative mobility aid in the form of a deep learning-based wearable headband designed for obstacle detection and providing directions through interactive voice guidance. This research applies the Research and Development (R&D) method by Borg and Gall, encompassing stages from needs analysis to field testing. Technically, the prototype is built using a Raspberry Pi Zero 2W and a Camera Module 2, integrated with a Convolutional Neural Network (CNN)-based YOLO algorithm for real-time object scanning. The evaluation results demonstrate that the system achieves a detection accuracy of 91%, with all features functioning validly. Furthermore, the device has reached Technology Readiness Level (TRL) 8. In conclusion, the iSee prototype is proven to be highly feasible for further development and production as an effective mobility aid solution for the visually impaired.

***Keywords* :** *Wearable Headband; Deep Learning; Obstacle Detection; Interactive Voice Guidance; Visually Impaired Mobility.*

PENDAHULUAN

Laporan Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat, pada tahun 2022 ada sekitar 253 juta jiwa penduduk Indonesia berumur di atas lima tahun menderita disabilitas sensorik. Dari jumlah tersebut, 277,2 ribu di antaranya adalah penyandang tunanetra (BPS, 2022). Istilah tunanetra dipakai guna mendeskripsikan orang-orang dengan kendala fungsi penglihatan (Sabila et al., 2024). Kendala visual ini memunculkan rintangan besar bagi mereka saat bergerak, semisal ketika berjalan, mengenali rute pijakan, dan menelusuri lokasi baru. Hal ini jelas memperbesar peluang terjadinya kecelakaan maupun cedera (Yuwono et al., 2021; Arifin et al., 2024).

Bermobilitas merupakan problem krusial yang selalu dihadapi tunanetra dalam kehidupan harian mereka. Umumnya, kelompok ini memanfaatkan peranti bantu navigasi semacam tongkat putih (white cane) ataupun tongkat lipat (collapsible cane) (Istiqfariandi et al., 2021). Secara prinsip, kedua piranti tersebut punya kegunaan serupa dalam meraba rintangan, perbedaannya hanya terletak pada mekanisme pelipatannya (Haslindah et al., 2024). Lebih dari itu, kecakapan pergerakan serta orientasi spasial sangatlah esensial demi menunjang kebebasan penyandang tunanetra. Tanpa penglihatan, langkah mereka pasti sangat terbatas. Orientasi didefinisikan sebagai daya tangkap manusia terhadap kondisi sekelilingnya, sementara mobilitas dimaknai sebagai keluwesan bergerak berpindah antar lokasi (Rachman et al., 2024). Pemahaman orientasi dan mobilitas yang baik akan membuat tunanetra lekas beradaptasi dengan postur tubuhnya, ritme jalannya, dan teknik langkahnya. Dengan demikian, mereka bisa bergerak bebas menembus berbagai kawasan, baik di rute familiar maupun asing (Beny et al., 2023).

Tongkat diakui sebagai perangkat fundamental guna mendukung pergerakan harian, bertindak seolah menjadi ekstraksi lengan untuk menunjang keamanan berjalan (Mufit & Hambali, 2022). Sayangnya, realitas di lapangan menunjukkan bahwa penggunaan instrumen ini masih sering memunculkan kendala, terutama saat berhadapan dengan medan yang sama sekali belum dikenali. Alat bantu manual seperti tongkat konvensional maupun lipat punya jangkauan deteksi yang amat pendek. Akibatnya, pemakai sulit menghindari bahaya yang letaknya agak jauh atau tak tersentuh langsung secara mekanik (Dernayka et al., 2021). Keterbatasan jarak pantau ini menuntut tunanetra untuk terus melakukan penjajakan berulang kali, sehingga kurang praktis kala dipakai pada rute baru (Yuwono et al., 2021). Fakta tersebut mengindikasikan bahwa tunanetra butuh perangkat berteknologi mutakhir yang sifatnya lebih responsif serta sesuai profil penggunanya (Rahma et al., 2023). Salah satu terobosan cerdas yang kini dikembangkan yakni penggunaan sensor Light Detection and Ranging (LiDAR) dengan basis Arduino (Aryani et al., 2023). Sensor mutakhir ini mendeteksi keberadaan objek lewat metode pemantulan cahaya, di mana jangkauan pindainya bisa menyentuh angka 70 sampai 200 meter, sangat bergantung tipe perangkatnya (Hsu et al., 2021).

Teknologi lainnya adalah *chest strap* berbasis LiDAR yang digunakan untuk pemetaan dan pembaca kondisi ruangan yang kemudian akan memberikan informasi mengenai jalur yang aman untuk dilalui oleh pengguna, serta dilengkapi dengan kamera untuk memindai kode QR sebagai penunjuk jalur (Mahdi *et al.*, 2024). LiDAR sangat bergantung pada pantulan cahaya laser. Karena itu kinerjanya turun drastis kalau lingkungan tidak ideal. Selain itu, Sensor LiDAR nyatanya kerap mengalami kesulitan saat mengidentifikasi jenis permukaan tertentu seperti jalanan maupun objek-objek lain berwarna gelap (Kim et al., 2023; Pao et al., 2024). Permukaan gelap di area lingkungan redup jelas membuat tingkat akurasi pindai menurun, sehingga memangkas efektivitasnya secara drastis. Akibatnya, pemakaian teknologi instrumen LiDAR belum sepenuhnya maksimal untuk menyokong pergerakan mandiri penyandang tunanetra. Perangkat berbekal sensor fisik dan jaringan Internet of Things (IoT) sederhana ini masih sangat kurang cakap untuk mendeteksi rintangan dinamis. Karenanya, dibutuhkan terobosan visual yang lebih adaptif sekaligus responsif secara real-time. Berpijak pada urgensi nyata ini, diciptakanlah sebuah inovasi "Teknologi Wearable Headband Berbasis Deep Learning untuk Obstacle Detection dengan Interactive Voice Guidance guna Membantu Mobilitas Tunanetra".

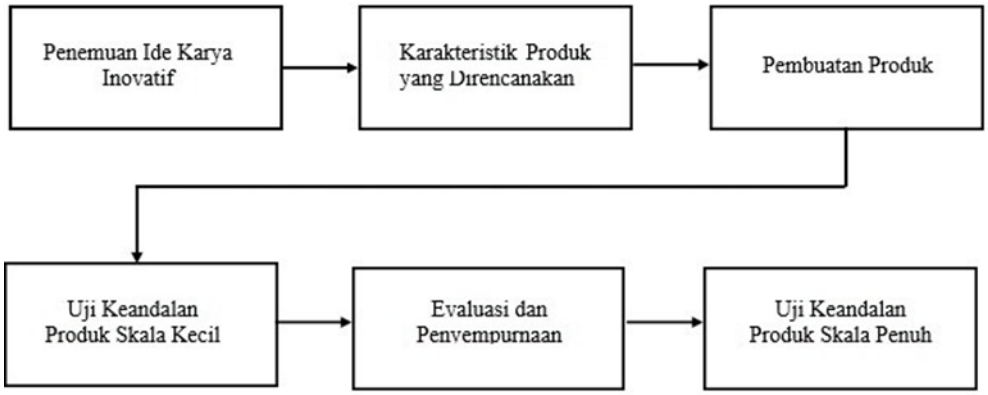
Alat bernama iSee ini mendayagunakan algoritma YOLO berbasis Convolutional Neural Network (CNN) guna memindai objek rintangan secara real-time. Hasil analisisnya kemudian diubah menjadi instruksi panduan suara berbahasa Indonesia bagi penggunanya. Lebih jauh, iSee turut terhubung sebuah aplikasi pendamping guna mempermudah pemantauan lokasi gawai secara langsung. Secara desain, peranti ini sengaja dirakit sangat ergonomis sehingga terjamin kenyamanannya ketika dipakai beraktivitas harian. Kehadirannya tidak sekadar mendongkrak kemandirian tunanetra, melainkan juga sinkron dengan poin ketujuh Program Kreativitas Mahasiswa (PKM), yaitu menguatkan kesetaraan gender serta perlindungan hak penyandang disabilitas, anak, dan perempuan. Merujuk paparan tersebut, pengembangan iSee menetapkan tiga target utama yakni: (1) menyajikan solusi inovatif agar mobilitas disabilitas tunanetra meningkat, (2) memproduksi wearable iSee pemindai rintangan real-time bersistem deep learning serta terhubung sistem

pelacak, dan (3) menguraikan prosedur operasional perangkat, mulai dari tahapan memindai objek, memproses data, mengirimkan panduan suara dan getaran, hingga fitur pelacakan rute.

Penciptaan inovasi iSee diharapkan kelak sanggup mewariskan manfaat konkret, merangkum eskalasi kebebasan bergerak tunanetra, membuka peluang pengajuan hak paten kekayaan intelektual, sekaligus menjanjikan potensi komersialisasi produk piranti mobilitas pintar yang sangat inklusif.

METODE PENELITIAN

Pengembangan alat iSee dilakukan selama 3,5 bulan, dengan rincian tahapan yang disajikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tahap Pelaksanaan

Metode yang digunakan dalam pelaksanaan program ini mengacu pada metode *Research and Develompent* (R&D) oleh Borg & Gall (1983). Metode R&D merupakan proses untuk mengembangkan suatu produk baru (Ade Rahayu, 2025). Metode ini sangat sesuai dengan tujuan pengembangan produk inovatif alat bantu mobilitas penyandang tunanetra. Tahapan pelaksanaan pengembangan produk iSee meliputi:

Penemuan Ide Karya Inovatif

Penemuan ide karya inovatif ini berawal dari analisis permasalahan, dan identifikasi kebutuhan penyandang tunanetra yang masih mengalami kesulitan dalam mobilitas dan deteksi hambatan di sekitarnya.

Karakteristik Produk yang direncanakan

Karakteristik utama produk iSee yang dapat dilihat pada Gambar 2a, 2b, dan 2c. mencakup fitur-fitur utama seperti Raspberry Pi Camera 2 untuk menangkap gambar lingkungan untuk diproses oleh YOLO yang terintegrasi dengan CNN guna mendeteksi objek, Raspberry Pi Zero 2W sebagai unit pemrosesan utama, serta LED untuk membantu kamera dalam kondisi pencahayaan rendah. Selain itu, iSee juga dilengkapi dengan GPS BN-220 untuk menentukan lokasi pengguna, yang datanya dikirim dan dapat dipantau secara *real-time* melalui *Firebase,* serta *React Native* sebagai *framework* untuk pengembangan aplikasi iSee.



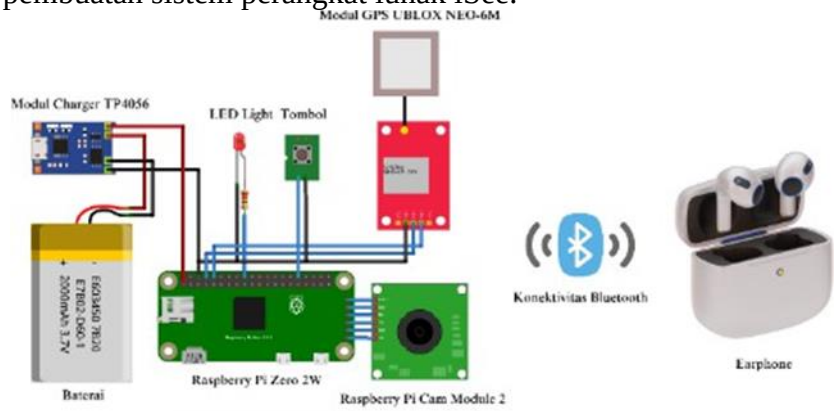
(a) (b) (c)

Gambar 2. (a) Desain Hardware (b) Perakitan komponen (c) Pembuatan Sistem Darurat

Pembuatan Produk

Dalam fase ini, rancangan yang telah dibuat direalisasikan ke wujud purwarupa fisik berskala 1:1 agar selaras dengan dimensi penggunaan aslinya. Perangkat yang tercipta wajib fungsional serta mampu beroperasi mengikuti target penciptaannya. Tahapan perakitan perangkat keras mengintegrasikan komponen-komponen inti, yakni Raspberry Pi Zero 2W selaku otak pemrosesan, Raspberry Pi Camera

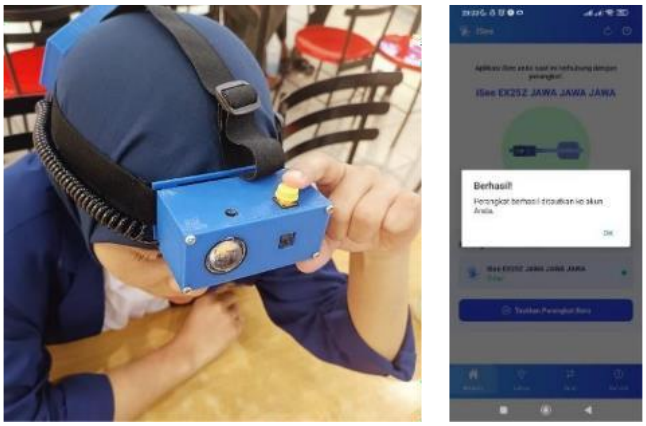
Module 2 guna merekam citra lingkungan, dan GPS BN-220 sebagai modul navigasi. Selanjutnya, uji konektivitas antarperangkat juga dieksekusi guna menjamin keseluruhan sistem berjalan optimal. Fase ini turut merangkum penulisan kode, penyematan fitur-fitur, perancangan basis data, hingga konfigurasi *hosting* demi merampungkan pembuatan sistem perangkat lunak iSee.



Gambar 3. Susunan alat elektronik

Uji Keandalan Produk Skala Kecil

Uji keandalan produk skala kecil dilakukan untuk memastikan sistem berfungsi dengan baik sebelum diimplementasikan secara langsung pada penyandang tunanetra. Pada tahap ini, dilakukan beberapa jenis pengujian, yakni pengujian terhadap performa model dan uji *experience* aplikasi yang dapat dilihat pada Gambar 4a dan 4b.



(a) (b)

Gambar 4. a) Pengujian Performa Model b) Pengujian *Experience* Aplikasi

Evaluasi dan Penyempurnaan

Pada fase evaluasi dan perbaikan perangkat iSee, dilaksanakan identifikasi kendala guna membenahi seluruh celah yang muncul. Tim pengembang turut meninjau ulang rancangan mekanis beserta kelengkapan fiturnya demi mendongkrak mutu operasional hingga terwujudnya skala 1:1. Modul kecerdasan buatan disini difungsikan layaknya pangkalan data untuk proses klasifikasi citra. Pengujian sistemnya dieksekusi lewat tahapan pelatihan model berulang (training), dipadukan dengan perhitungan matriks F1-Score sebagai tolok ukur performa. Pendekatan tersebut pada akhirnya memberikan gambaran presisi mengenai seberapa efektif serta konsistennya perangkat pintar ini dalam memindai suatu objek.

Uji Keandalan Produk Skala Penuh

Pada tahap uji keandalan produk skala penuh produk iSee diuji secara langsung kepada penyandang disabilitas tunanetra dengan kriteria *totally blind* di Universitas Negeri Malang pada tanggal 6 Oktober 2025 yang dapat dilihat pada Gambar 5. Serta dilakukan uji ahli sistem elektrik, sistem mekanik, sistem progaming dan fungsionalitas, uji Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) *Engineering*, uji *User Experience Questionnaire* (UEQ), uji Black Box, dan uji F1-*Score*.




Gambar 5. Uji keandalan produk ke penyandang disabilitas tunanetra

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produk Inovatif iSee



Gambar 6. Produk inovatif iSee

Perangkat iSee merupakan sistem *wearable* berbentuk *headband* yang dirancang untuk membantu mobilitas penyandang tunanetra yang dapat dilihat pada Gambar 6. Inovasi ini mendayagunakan teknologi Deep Learning berbasis Convolutional Neural Network (CNN) guna membaca pola visual dari kondisi sekelilingnya. Perangkat iSee dihubungkan dengan algoritma YOLO yang bertugas memindai benda, mengenali klasifikasinya, serta melacak letak objek secara presisi. Perangkat esensialnya merangkum Raspberry Pi Cam Module 2 selaku penangkap gambar dan Raspberry Pi Zero 2W selaku otak pengolah informasi. Detail spesifikasinya mencakup Raspberry Pi Cam Module 2 beresolusi 8 megapiksel, Raspberry Pi Zero 2W dengan RAM 512 megabyte, modul GPS BN-220 berakurasi letak dua meter, serta baterai LiPo berkapasitas 4000 mAh. Penjelasan rincian komponennya telah disajikan di dalam Tabel 1.

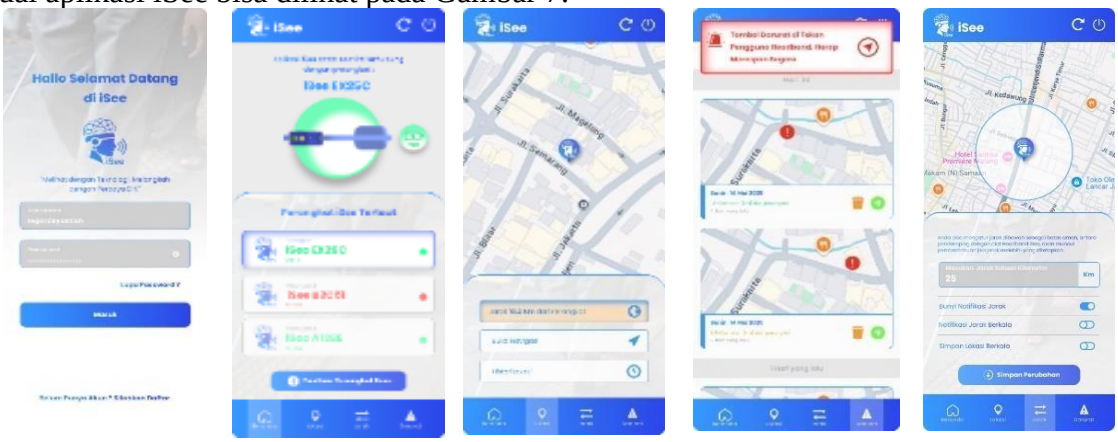
Tabel 1. Spesifikasi *Hardware* iSee

Spesifikasi Komponen	
Case Material	PETG
Dimensi	90 x 41 x 40 mm
Kamera	Raspberry Pi Cam Module 2
Mikrokomputer	Raspberry Pi Zero 2W
Modul GPS	Modul GPS Beitian BN-220
Baterai	Baterai Lithium Polymer 4000 mAh
Koneksi Berat produk	Wifi 150 gram

Seluruh komponen sistem iSee disusun guna menunjang keandalan gawai saat memindai rintangan secara seketika. Material PETG dipilih sebab sifat tangguh, enteng, serta tahan panas sehingga nyaman ketika dijadikan headband pakai. Kamera Raspberry Pi Modul 2 bertugas merekam gambar sekeliling dengan resolusi tajam, sementara Raspberry Pi Zero 2W mengolah algoritma CNN maupun YOLO demi

mengklasifikasikan dan melacak letak objek. Unit GPS Beitian BN-220 menyajikan presisi titik hingga radius dua meter serta tersambung ke aplikasi pengawal.

Baterai Litium Polimer berdaya 4000 mAh memasok tenaga operasional hingga beberapa jam. Perpaduan aneka elemen tersebut menciptakan piranti yang stabil, jitu, serta ergonomis, sehingga sukses menopang pergerakan tunanetra dengan optimal pada kegiatan hariannya. Aplikasi lunak iSee diciptakan sebagai instrumen pelengkap untuk wali tunanetra. Peran esensialnya melacak titik pengguna secara langsung lewat peta elektronik. iSee memuat modul penampil kondisi sinyal alat, jejak perjalanan, dan koordinat penggunanya. Fitur peringatan disiapkan untuk mengirimkan pemberitahuan saat pemakai memencet tombol darurat pada bando. Arsitektur aplikasi memakai prinsip one-to-many, dimana satu profil wali bisa dipasangkan dengan aneka gawai iSee. Tiap gawai cuma bisa tersinkronis pada profil wali tunggal. Wujud visual aplikasi iSee bisa dilihat pada Gambar 7.

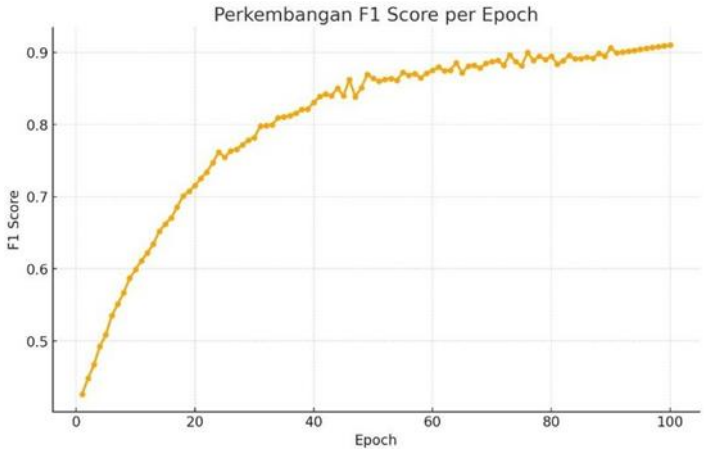


(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 7. (a) Tampilan Awal Aplikasi, (b) Menampilkan Daftar Perangkat *Headband* yang Terhubung Beserta Status Koneksinya, (c) Memperlihatkan Posisi Pengguna iSee secara *real-time* di Peta, (d) Menampilkan Peringatan (*alert*), dan (e) Menunjukkan Detail Posisi Pengguna.

Pengujian Performa iSee

Pengujian performa sistem iSee mencakup beberapa tahapan seperti Uji F1-*Score*, Uji Black Box, Uji Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT), Uji *User Experience Questionnaire* (UEQ), dan Uji Validasi Ahli. Uji F1-*Score* menunjukkan tingkat akurasi deteksi rintangan sebesar 91 persen seperti ditampilkan pada Gambar 8. Hasil tersebut menandakan bahwa sistem memiliki performa tinggi serta stabil dalam mengenali objek.



Gambar 8. Persentase F1-*Score*

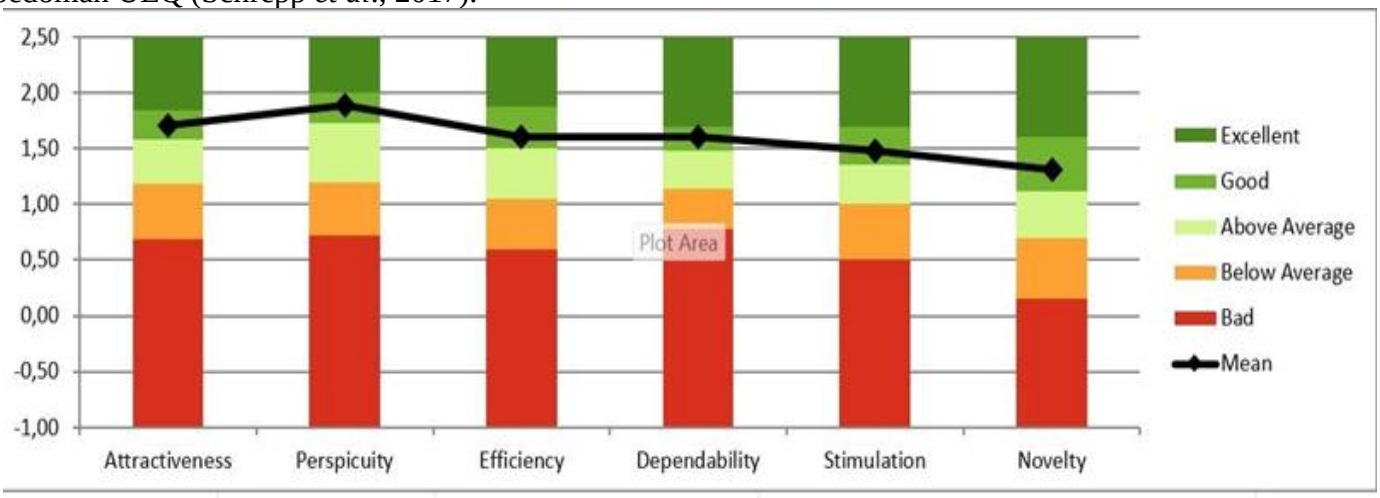
Pengujian Black Box terhadap seluruh fitur aplikasi menunjukkan fungsi berjalan sesuai rancangan dan dinyatakan valid sebagaimana terlihat pada Tabel 3. Sistem iSee juga melewati pengujian Tingkat Kesiapan Teknologi pada skema *Engineering* dengan hasil kesiapan level delapan. Nilai tersebut

menunjukkan bahwa sistem telah teruji secara menyeluruh dan siap digunakan di lingkungan sebenarnya (Suhendri *et al*., 2021).

Tabel 3. Hasil Pengujian Black Box

No.	Pengujian	Test Case	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Kesimpulan
1	Log in akun di Aplikasi iSee	Klik "*Username*", masukkan *username* dan *password*, kemudian klik "masuk".	Pengguna dapat masuk ke akun pribadi pada Aplikasi iSee	Sesuai harapan	Valid
2	Menghubungkan perangkat iSee dengan Aplikasi iSee	Klik perangkat iSee yang akan di tautkan pada halaman beranda	Pengguna aplikasi iSee dapat menghubungkan perangkat iSee dengan aplikasi iSee	Sesuai harapan	Valid
3	Menampilkan pengguna lokasi iSee	Klik fitur "Lokasi" pada layar Aplikasi iSee	Posisi dan lokasi pengguna iSee dapat ditampilkan secara *real-time*	Sesuai harapan	Valid
4	Menampilkan status zona pengguna iSee	Klik fitur "Jarak" pada layar Aplikasi iSee	Menampilkan indikator berwarna hijau dan notifikasi ketika pengguna berada di dalam zona aman, serta indikator berwarna merah dan notifikasi ketika pengguna berada di luar zona aman	Sesuai harapan	Valid
5	Menampilkan notifikasi darurat Ketika tombol ditekan	Pengguna menekan tombol darurat pada perangkat iSee saat berada di luar ruangan	Menampilkan peringatan darurat otomatis pada fitur "Darurat"	Sesuai harapan	Valid

Pengujian *User Experience Questionnaire* (UEQ) memperlihatkan hasil pada tingkat "*Good*" untuk seluruh indikator seperti daya tarik, kejelasan, efisiensi, ketepatan, stimulasi, dan kebaruan yang ditunjukkan pada Gambar 10. Penilaian kategori tersebut mengacu pada kriteria interpretasi yang didefinisikan dalam pedoman UEQ (Schrepp *et al*., 2017).



Gambar 10. Hasil pengujian UEQ

Validasi ahli terhadap aspek elektrik, mekanik, algoritma deteksi, serta fungsionalitas alat menunjukkan bahwa penilaian dari ahli mekanik memperoleh skor 78 dari 80, sedangkan penilaian dari ahli pendidikan luar biasa memperoleh skor 105 dari 115. Berdasarkan hasil tersebut, iSee dinyatakan "Sangat Layak".

Hasil pengujian tersebut membuktikan bahwa iSee layak untuk diproduksi secara massal dan dikomersialkan. Evaluasi model dilakukan menggunakan beberapa metrik utama, yaitu *precision*, *recall*, F1-*Score*, dan *mean Average Precision* (mAP). Pengujian dilakukan selama 100 *epoch* dengan ringkasan hasil yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Evaluasi model F1-*Score*

epoch	*precision*	*recall*	F1-*Score*	mAP@50	mAP@50–95	Keterangan
1	0.88	0.86	0.87	0.80	0.70	Awal pelatihan, model mulai belajar fitur dasar.
2	0.90	0.89	0.89	0.83	0.73	Peningkatan stabilitas matrik.
3	0.91	0.90	0.91	0.86	0.76	Model mulai konvergen
97	0.91	0.91	0.91	0.93	0.82	Model stabil, sedikit peningkatan.
98	0.91	0.92	0.91	0.94	0.83	Hasil konsisten dengan performa baik.
99	0.92	0.91	0.91	0.94	0.83	Model mencapai performa optimal.
100	0.91	0.91	0.91	0.95	0.84	Nilai F1 tertinggi dan stabil.

Nilai *precision* dan *recall* yang seimbang menunjukkan kemampuan model dalam mendeteksi objek secara akurat tanpa banyak kesalahan klasifikasi. Nilai F1-*Score* yang konsisten pada 0.91 mengindikasikan performa sistem yang tinggi dan stabil. Peningkatan bertahap pada mAP@50 dan mAP@50–95 membuktikan ketangguhan model terhadap berbagai skenario pengujian.

SIMPULAN

Pengembangan gawai iSee telah sukses diwujudkan menjadi peranti bando pintar (*wearable headband*) guna memfasilitasi para tunanetra. Terobosan inovatif ini menghadirkan metode navigasi termutakhir bersistem *Deep Learning*. Perangkat tersebut cakap memindai rintangan di area sekelilingnya sekaligus menyalurkan instruksi suara yang interaktif. Misi primernya yakni mendongkrak kebebasan bergerak dan kemandirian penyandang disabilitas penglihatan. Secara teknis, iSee dirakit menggunakan komponen Raspberry Pi Camera Module 2, Raspberry Pi Zero 2W, modul GPS BN-220, beserta baterai berkapasitas 4000 mAh.

Mekanisme pelacak rintangannya mendayagunakan algoritma YOLO yang terintegrasi pada *Convolutional Neural Network* (CNN). Fitur *Interactive Voice Guidance* dipadukan sensasi getar senantiasa memberikan respons tanggap atas situasi lingkungan. Integrasi GPS bersama platform Firebase mempermudah wali untuk melacak letak pemakainya.

Fase pengujian membuktikan bahwa tingkat akurasinya menyentuh angka 91 persen lewat kestabilan yang konsisten. Evaluasi pakar juga menegaskan predikat amat layak pada sektor mekanik, elektrik, pemrograman, serta fungsi totalnya. Penilaian *User Experience Questionnaire* (UEQ) menunjukkan kategori "Good" di seluruh indikatornya, sementara Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) menembus level delapan dari sembilan.

DAFTAR PUSTAKA

Ade Rahayu. (2025). Metode Penelitian dan Pengembangan (R&D): Pengertian, jenis dan tahapan. DIAJAR: *Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*, 4(3), 459–470.

Aryani, D., Gunawan, A. I., Reski, Nisa, K., & Zubair, A. (2023). Alat bantu jalan tunanetra menggunakan sensor light detection and ranging (LiDAR) berbasis arduino. *Jurnal Teknologi Elekterika*, 35-40.

Beny, A. O. N., Murtadlo, M., & Andajani, S. J. (2023). Pelatihan program kekhususan orientasi dan mobilitas pada guru sekolah dasar inklusi di kota surabaya: pelatihan program kekhususan orientasi mobilitas, guru sekolah dasar inklusi, guru pembimbing khusus. Transformasi Dan: *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 58–63.

Borg, W.R. & Gall, M.D. (1983). *Educational research: An introduction*. New York: Longman.

BPS. (2022). *Disabilitas*. Diakses dari https://sensus.bps.go.id/topik/dataset/sp2022/19. pada 5 Januari 2025.

Dernayka, A., Amorim, M.-A., Leroux, R., Bogaert, L., & Farcy, R. (2021). Tom Pouce III, an Electronic White Cane for Blind People: Ability to detect obstacles and mobility performances. *Jurnal MDPI*, 21(20), 6854.

Haslindah, A., Sukirman, S., Hakis, A. W., & Sa'na, N. I. T. (2024). Pengembangan alat bantu jalan tunanetra dengan tongkat cerdas berbasis arduino. ILTEK: *Jurnal Teknologi*, 19(01), 12–17.

Hsu, C.-P., Li, B., Solano-Rivas, B., Gohil, A. R., Chan, P. H., Moore, A. D., & Donzella, V. (2021). A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR. IEEE *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 27(1), 1–16.

Imran, M. (2024). Peningkatan pemberdayaan penyandang tunanetra melalui perancangan social media newsletter di yayasan sosial tunanetra. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, 229-239.

Kim, J., Park, B., & Kim, J. (2023). Empirical analysis of autonomous vehicle's lidar detection performance degradation for actual road driving in rain and fog. *Sensors*, 23(6), 2972.

Mahdi, A., Marlina, Silvia, R., Safaruddin, & Purwanto, W. (2024). Maps berbasis sensor lidar untuk navigasi tunanetra. *Jurnal Pendidikan Kebutuhan Khusus*, 39-47.

Marwani Rachman, Kasmawati, & Zulitrah. (2024). Peningkatan kemampuan penguasaan landmark melalui pelatihan orientasi dan mobilitas pada murid tunanetra kelas III di SLB A YAPTI. *Jurnal Metafora Pendidikan (JMP)*, 2(3), 16–29.

Misbahul Arifin, Abdul Rahman, & Ravik Karsidi. (2024). Dampak pengembangan teknologi asistif terhadap layanan pendidikan berbasis iptek bagi individu tunanetra. JST (*Jurnal Sains Dan Teknologi)*, 13(1), 33–40.

Mufit, C., & Hambali, I. (2022). Rancang bangun alat bantu tongkat tunanetra berbasis ESP32 *Jurnal Kajian Teknik Elektro*, 7(2), 64–69.

Pao, W. Y., Howorth, J., Li, L., Agelin-Chaab, M., Roy, L., Knutzen, J., Baltazar-y-Jimenez, A., & Muenker, K. (2024). Investigation of automotive lidar vision in rain from material and optical perspectives. *Sensors*, 24(10), 2997.

Ramadhani, R. D., Thohari, A. N., Kartiko, C., Junaidi, A., Laksana, T. G., & Nugraha, N. A. (2021). Optimasi akurasi metode convolutional neural network untuk identifikasi jenis sampah. *Jurnal Resti*, 312-318.

Schrepp, M., Hinderks, A., & Thomaschewski, J. (2017). Design and evaluation of a short version of the user experience questionnaire (UEQ-S). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, *4*(6), 103.

Suhendri, D., Rosadi, A. H. Y., Sudarmin, Kusumawati, M. B., Setiawati, U., Fifianny, H., & Januarti, V. (2021). Kesiapan teknologi dalam pengembangan stasiun pengisian baterai kendaraan listrik. *Prosiding Seminar Nasional*, 210–217.

Yuwono, I., Mirnawati, Kusumastuti, D. E., & Rahmah, N. (2021). Efektifitas pengembangan alat bantu mobilitas bagi penyandang tunanetra di lingkunggan lahan basah. *Jurnal Ortopedagogia, VII*, 130-134.