

Desain Sistem Pendekripsi Nominal dan Keaslian Uang untuk Tunanetra Berbasis Sensor Optik–UV dengan Pendekatan Value Engineering

Eko Ari Wibowo^{1*}, Widyastuti², Lazuardi Fatahillah Hamdi³

^{1,2)} Prodi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Humaniora, Universitas Muhammadiyah Gombong

Jl. Yos Sudarso No. 461, Kebumen, Jawa Tengah, 54412

Email: ekoariwibowo@unimugo.ac.id, widyastuti@unimugo.ac.id

³⁾ Prodi Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Humaniora, Universitas Muhammadiyah Gombong

Jl. Yos Sudarso No. 461, Kebumen, Jawa Tengah, 54412

Email: lazuardi@unimugo.ac.id

ABSTRAK

Penyandang tunanetra menghadapi kendala signifikan dalam mengenali nominal dan keaslian uang kertas yang berdampak pada kemandirian dan keamanan transaksi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem otomasi pendekripsi uang berbasis sensor optik (ESP32-CAM) dan ultraviolet (UV LED) dengan pendekatan *Value Engineering* (VE). Metode VE digunakan untuk memastikan rancangan sistem memiliki fungsi optimal, efisien dalam penggunaan komponen, dan sesuai kebutuhan pengguna. Lima tahap utama VE meliputi tahap informasi, kreatif, evaluasi, pengembangan, dan rekomendasi yang diterapkan dalam penelitian ini. Hasil evaluasi terhadap tiga alternatif desain menunjukkan bahwa konfigurasi ESP32-CAM + DFPlayer Mini + UV LED memiliki nilai fungsi tertinggi (rata-rata 4,55). Pengujian laboratorium terhadap 700 sampel citra uang menunjukkan tingkat akurasi pengenalan nominal 90–98% dan verifikasi keaslian 90–97%. Hasil ini menegaskan bahwa metode VE efektif dalam menghasilkan sistem deteksi uang yang akurat, efisien, dan inklusif bagi penyandang tunanetra.

Kata kunci: Tunanetra, Pendekripsi Uang, Sensor Optik, Sensor Ultraviolet, *Value Engineering*.

ABSTRACT

Visually impaired individuals face significant challenges in recognising the denomination and authenticity of banknotes, which impacts their independence and transaction security. This study aims to design and test an automated banknote detection system based on optical sensors (ESP32-CAM) and ultraviolet (UV LED) with a Value Engineering (VE) approach. The VE method was used to ensure that the system design had optimal functionality, efficient use of components, and met user needs. The five main stages of VE, which include the information, creative, evaluation, development, and recommendation stages, were applied in this study. The evaluation results of the three design alternatives showed that the ESP32-CAM + DFPlayer Mini + UV LED configuration had the highest functional value (average of 4.55). Laboratory testing of 700 banknote image samples showed a recognition accuracy rate of 90–98% and authenticity verification of 90–97%. These results confirm that the VE method is effective in producing an accurate, efficient, and inclusive banknote detection system for the visually impaired.

Keywords: Visually Impaired, Money Detector, Optical Sensor, Ultraviolet Sensor, Value Engineering.

Pendahuluan

Penyandang disabilitas netra menghadapi tantangan signifikan dalam aktivitas keuangan sehari-hari, terutama dalam mengenali nominal dan keaslian uang kertas. Keterbatasan kemampuan visual menyebabkan mereka sangat bergantung pada bantuan orang lain, sehingga menimbulkan permasalahan dalam hal kemandirian, privasi, serta keamanan transaksi [1], [2]. Upaya untuk mengatasi kendala tersebut telah dilakukan melalui berbagai teknologi bantu, seperti aplikasi telepon pintar Cash Reader dan Mas Jawa. Namun, aplikasi tersebut masih memiliki keterbatasan, antara lain kebutuhan koneksi internet, perangkat dengan spesifikasi tinggi, serta tingkat akurasi yang menurun ketika uang dalam kondisi lusuh atau pencahayaan lingkungan kurang memadai [3], [4].

Berbagai penelitian terdahulu juga telah mengembangkan sistem deteksi uang berbasis sensor elektronik. Sistem yang menggunakan kombinasi sensor ultraviolet (UV GY-ML8511) dan sensor warna (TCS3200) menunjukkan kemampuan mendekripsi nominal tertentu dengan akurasi 90–100%, namun masih memiliki keterbatasan dalam aspek portabilitas dan kemudahan penggunaan bagi penyandang tunanetra [5], [6]. Sementara itu, pendekatan berbasis computer vision seperti template matching dan optical character recognition (OCR)

menghasilkan tingkat akurasi tinggi, tetapi membutuhkan daya komputasi besar yaitu salah satunya melalui penggunaan Raspberry Pi atau komputer sehingga kurang efisien untuk alat portabel [4], [7].

Meskipun berbagai pendekatan tersebut telah dikembangkan, masih terdapat kesenjangan penelitian dalam menghadirkan alat bantu yang cepat, akurat, hemat energi, mudah dioperasikan dan mampu memberikan umpan balik audio yang jelas bagi penyandang tunanetra. Sehingga diperlukan suatu pendekatan perancangan yang tidak hanya memperhatikan aspek teknis, tetapi juga mempertimbangkan kebutuhan dan keterbatasan pengguna secara langsung agar menghasilkan desain yang inklusif dan bernilai guna.

Metode *Value Engineering* (VE) dipilih karena memiliki efektivitas dan efisiensi tinggi dalam proses desain produk. VE termasuk dalam kategori metode desain yang paling efektif dalam menerjemahkan kebutuhan pengguna menjadi spesifikasi teknis produk [8], [9]. Pendekatan ini menekankan keseimbangan antara fungsi, biaya, dan nilai guna, dengan tahapan yang sistematis mulai dari informasi, kreatif, analisis, pengembangan, hingga rekomendasi [10]. Dalam konteks perancangan alat bantu bagi penyandang disabilitas, VE relevan digunakan karena dapat menghasilkan solusi desain yang efisien secara sumber daya namun tetap bernilai tinggi bagi pengguna akhir [11]. Beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan keberhasilan penerapan VE dalam desain produk berorientasi pengguna, seperti pada pengembangan material bangunan berkelanjutan dan produk teknologi tepat guna yang hemat biaya [10], [12], [13]. Penerapan VE pada sistem otomasi berbasis sensor untuk penyandang disabilitas masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam mengintegrasikan efisiensi fungsi, efektivitas komponen, dan pendekatan desain berpusat pada pengguna (*user-centered design*) dalam konteks sistem bantu otomatis bagi penyandang tunanetra.

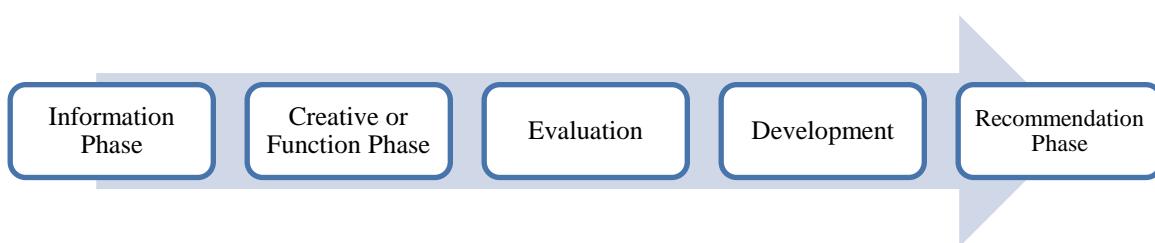
Pemilihan metode *Value Engineering* (VE) dalam studi ini didasarkan pada analisis komparatif terhadap metode desain produk lainnya, yaitu *Quality Function Deployment* (QFD) dan TRIZ. Meskipun QFD unggul dalam menerjemahkan suara konsumen menjadi spesifikasi teknis, metode ini cenderung tidak mempertimbangkan batasan biaya secara mendalam [14], [15]. Di sisi lain, TRIZ efektif untuk memecahkan kontradiksi teknis, namun kurang fokus pada evaluasi ekonomi komponen [16], [17]. VE dipilih karena keunggulan uniknya dalam menganalisis rasio Fungsi per Biaya **Value = Function / Cost**. Mengingat target pengguna adalah penyandang tunanetra dengan keterbatasan ekonomi, pendekatan VE memastikan bahwa setiap komponen (seperti pemilihan ESP32-CAM dibanding Raspberry Pi) memberikan fungsi esensial tanpa menambah biaya yang tidak perlu. Hal ini relevan dengan prinsip *frugal innovation* untuk teknologi asistif.

Berdasarkan keunggulan tersebut, penelitian ini menerapkan metode VE dalam perancangan sistem otomasi alat pendekripsi nominal dan keaslian uang bagi tunanetra berbasis sensor optik (ESP32-CAM) dan sensor ultraviolet (UV LED). Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan desain otomasi alat yang cepat dan akurat dalam mendekripsi nominal dan keaslian uang dengan mempertimbangkan kebutuhan nyata dari penyandang tunanetra. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada akurasi sensor semata (Fadlioni & Kusnoto, 2023) atau penggunaan perangkat berdaya komputasi tinggi seperti Raspberry Pi (Wulandari & Nasution, 2024), penelitian ini menawarkan kebaruan berupa kerangka kerja optimasi biaya-fungsi (cost-function optimization) menggunakan *Value Engineering* (VE). Novelty penelitian ini terletak pada integrasi metode VE untuk menyeimbangkan *trade-off* antara akurasi tinggi (melalui ESP32-CAM) dan keterjangkauan biaya (low-cost constraint) bagi negara berkembang. Pendekatan ini mengisi kesenjangan literatur mengenai pengembangan teknologi asistif yang tidak hanya fungsional secara teknis, tetapi juga efisien secara ekonomi dan ergonomis untuk adopsi massal.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan dan menguji sistem otomasi pendekripsi nominal dan keaslian uang berbasis sensor optik dan ultraviolet yang dirancang khusus bagi penyandang tunanetra. Sistem ini memanfaatkan kamera ESP32-CAM untuk menganalisis citra uang dan sensor UV LED untuk mendekripsi ciri keaslian, dengan hasil pengenalan yang disampaikan melalui umpan balik suara otomatis (*audio feedback*). Penelitian ini fokus pada pengujian performa sistem deteksi yang meliputi kecepatan pembacaan data, tingkat akurasi pengenalan, kejelasan hasil deteksi audio, dan efisiensi konsumsi daya. Pendekatan VE diterapkan untuk memastikan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki nilai fungsi optimal dengan penggunaan komponen yang efisien. Sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi asistif berbasis otomasi yang mendukung aksesibilitas dan kemandirian tunanetra dalam melakukan aktivitas finansial secara lebih aman dan mandiri.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan VE sebagai metode utama dalam perancangan sistem otomasi pendekripsi nominal dan keaslian uang berbasis sensor optik dan ultraviolet. VE dipilih karena mampu menyeimbangkan antara fungsi, biaya, dan nilai guna dari suatu sistem, dengan menekankan efisiensi komponen tanpa mengurangi kualitas fungsionalnya [10], [13]. Penerapan metode VE dilakukan dalam beberapa tahapan sistematis sebagaimana disarankan oleh *Society of American Value Engineers (SAVE International)* dan telah digunakan secara luas dalam penelitian pengembangan produk teknologi tepat guna [8], [18].



Gambar 1 Tahap Value Engineering

Sumber : [8]

Tahap Informasi (*Information Phase*)

Tahapan ini bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan pengguna dan fungsi utama alat. Data diperoleh melalui wawancara terbuka dan kuesioner terhadap 10 orang penyandang tunanetra yang tergabung dalam PERTUNI dan ITMI Kebumen. Jumlah responden ditentukan berdasarkan prinsip Nielsen's Heuristic Evaluation, yang menyatakan bahwa jumlah responden tersebut cukup untuk mengidentifikasi mayoritas masalah usabilitas dalam sebuah desain [5], [19]. Rumus yang digunakan yaitu sebagai berikut:

$$N=1-(1-L)^n \quad (1)$$

Keterangan :

N = Persentase masalah usability yang terdeteksi

L = Rata-rata proporsi masalah usability yang ditemukan satu responden (0.31)

n = Jumlah responden

Dengan target N sebesar 0,95, maka diperoleh nilai n = 10

Informasi yang dikumpulkan meliputi kesulitan dalam mengenali nominal uang, preferensi terhadap bentuk umpan balik (audio atau getar), serta kebutuhan akan kemudahan pengoperasian dan efisiensi daya [20]. Hasil pengumpulan data ini digunakan untuk menentukan fungsi dasar dan fungsi sekunder alat.

Tahap Kreatif (*Creative Phase*)

Pada tahap ini dilakukan pengembangan ide dan alternatif sistem yang dapat memenuhi fungsi yang telah diidentifikasi. Proses *brainstorming* dilakukan oleh tim peneliti dengan mempertimbangkan kombinasi sensor yang berbeda, efisiensi daya, serta kemudahan integrasi antar komponen. Dari proses ini dihasilkan tiga alternatif sistem, yaitu:

- Alternatif 1: ESP32-CAM + DFPlayer + UV LED
- Alternatif 2: TCS3200 + Arduino Nano + DFPlayer + Sensor UV
- Alternatif 3: Raspberry Pi + Webcam + DFPlayer + UV LED

Tahap Analisis (*Evaluation Phase*)

Setiap alternatif sistem dianalisis berdasarkan empat kriteria utama yang diturunkan dari kebutuhan pengguna, yaitu: kecepatan pembacaan data, akurasi hasil deteksi, kejelasan audio feedback, dan efisiensi sumber daya. Penilaian dilakukan menggunakan skala Likert (1–5) berdasarkan diskusi tim peneliti dan kajian literatur terkait sistem deteksi optik dan ultraviolet [21]. Hasil analisis ini digunakan untuk menentukan alternatif dengan nilai fungsi tertinggi terhadap biaya dan kompleksitas sistem.

Tahap Pengembangan (*Development Phase*)

Alternatif terbaik dikembangkan lebih lanjut melalui perancangan sistem otomasi yang mencakup integrasi antara ESP32-CAM, DFPlayer Mini, dan UV LED. Perancangan ini difokuskan pada alur kerja sistem mulai dari pengambilan citra uang, analisis nominal dan keaslian, hingga keluaran audio. Pengujian dilakukan dalam kondisi laboratorium dengan berbagai variasi nominal uang dan kondisi pencahaayaan untuk mengukur akurasi dan waktu deteksi.

Tahap Rekomendasi (*Recommendation Phase*)

Rekomendasi desain ditetapkan berdasarkan hasil pengujian akurasi pembacaan mata uang pada tahap pengembangan. Tahap ini menghasilkan rancangan sistem yang direkomendasikan sebagai dasar dalam pengembangan alat bantu deteksi uang bagi penyandang tunanetra pada penelitian selanjutnya.

Hasil Dan Pembahasan

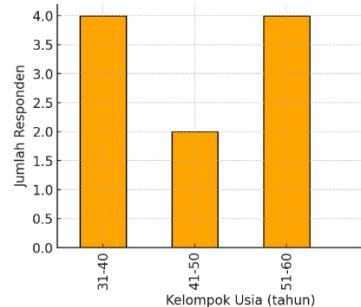
Tahap Informasi

Pengumpulan informasi terkait masalah, kebutuhan pengguna dan batasan-batasan yang ada yang diperoleh dari responden yang terhimpun pada Perhimpunan Tuna Netra Indonesia (PERTUNI) cabang Kebumen dan Ikatan Tuna Netra Muslim Indonesia (ITMI) cabang Kebumen. Sebanyak Proses penggalian kebutuhan ini dipandu oleh tiga aspek utama:

perasaan (*feeling*), gambaran fisik (*image*), dan antropometri, untuk memastikan desain akhir tidak hanya fungsional tetapi juga nyaman dan sesuai secara ergonomis bagi pengguna [22].

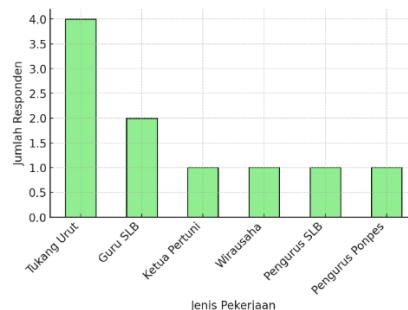
- a. Perasaan (*Feeling*): Perasaan yang diinginkan penyandang tunanetra ketika menggunakan alat.
- b. Gambaran Fisik (*Image*): Deskripsi fisik alat yang diinginkan oleh pengguna.
- c. Antropometri: Pengukuran dimensi tubuh pengguna yang berkaitan dengan interaksi fisik dengan alat.

Kuisisioner didistribusikan kepada 10 responden yang aktif dalam kegiatan organisasi dan bersedia berpartisipasi penuh dalam seluruh rangkaian. Gambar 2 menunjukkan sebaran rentang usia responden dan gambar 1 menunjukkan sebaran jenis pekerjaan responden.



Gambar 2 Distribusi Usia Responden

Responden penelitian berjumlah 10 orang, terdiri dari 6 laki-laki dan 4 perempuan. Rentang usia responden antara 31 hingga 69 tahun, dengan rata-rata usia sekitar 49 tahun. Sebaran usia menunjukkan bahwa sebagian besar responden berada pada kelompok usia produktif (30–50 tahun), namun ada juga yang sudah lanjut usia (≥ 60 tahun), yang menunjukkan keberagaman pengalaman dan kebutuhan.



Gambar 3 Distribusi Pekerjaan Responden

Berdasarkan pekerjaan, sebagian responden bekerja sebagai tukang urut (4 orang), guru/pengurus SLB (3 orang), pengurus ponpes (1 orang), wirausaha (1 orang), serta ketua organisasi disabilitas (1 orang). Data ini menunjukkan bahwa para responden tetap berdaya secara ekonomi dan sosial meskipun memiliki keterbatasan penglihatan.

Hasil wawancara menunjukkan terdapat empat kesulitan utama yang dihadapi responden dalam mengenali uang tunai [20], yaitu:

- a. Kesulitan membedakan nominal uang baru atau versi cetakan yang mirip.
- b. Ketergantungan pada aplikasi ponsel (*Cash Reader*, Mas Jawa) yang dinilai **kurang akurat**, sulit digunakan tanpa bantuan orang lain, dan tidak praktis untuk kondisi lapangan.
- c. Bagi yang tidak menggunakan aplikasi, metode manual (meraba tanda taktil atau mengukur panjang uang) tidak efektif pada uang yang lusuh.
- d. Kekhawatiran salah memberikan nominal saat transaksi, terutama ketika sendirian.

Kesulitan yang dialami responden kemudian dirumuskan sebagai kebutuhan utama terhadap rancangan alat pendekripsi nominal dan keaslian uang. Kebutuhan tersebut dikelompokkan menjadi empat variabel yang menjadi fokus pengembangan desain, sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 1** berikut.

Tabel 1 Kebutuhan Utama Alat

No	Variabel	Jumlah Responden
1	Kecepatan pembacaan data	8 orang
2	Akurasi hasil deteksi	9 orang
3	Informasi hasil deteksi	9 orang
4	Sumber daya (<i>rechargeable</i>)	10 orang

Tahap Kreatif

Proses pengembangan ide-ide alternatif desain ditentukan berdasarkan kebutuhan responden yang telah diidentifikasi pada tahap sebelumnya. Tujuan tahap ini yaitu menghasilkan berbagai opsi solusi yang dapat memenuhi fungsi dasar maupun sekunder alat.

Fungsi dasar:

1. Mendeteksi nominal uang kertas.
2. Mengidentifikasi keaslian uang kertas.

Fungsi sekunder:

1. Kecepatan pembacaan data: sistem mampu melakukan identifikasi nominal dan keaslian uang dalam waktu singkat untuk meningkatkan efisiensi penggunaan.
2. Akurasi hasil deteksi: sistem memberikan hasil pengenalan dengan tingkat ketepatan tinggi terhadap berbagai kondisi uang (baru, lusuh, atau variasi pencahayaan).
3. Informasi hasil deteksi (audio feedback): alat memberikan keluaran berupa suara yang jelas dan mudah dipahami oleh pengguna tunanetra.
4. Sumber daya (rechargeable): alat dilengkapi baterai isi ulang berkapasitas tinggi yang mendukung mobilitas dan durasi operasi yang panjang.

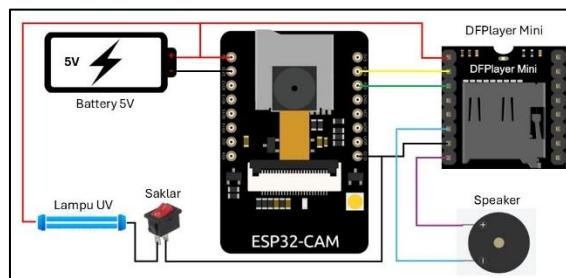
Alternatif Desain

Berdasarkan hasil studi literatur dan kajian empiris, dikembangkan tiga alternatif desain sebagai berikut:

Tabel 2 Alternatif Desain

Variabel	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Kecepatan pembacaan data	Waktu deteksi rata-rata 3,0–3,5 detik/lembar ; tergantung pencahayaan dan posisi uang; proses sedikit lebih lambat karena pemrosesan citra [23].	Waktu deteksi rata-rata 2,0–2,5 detik/lembar ; sensor langsung membaca warna dominan uang; respons lebih cepat [3], [6].	Waktu deteksi rata-rata 3,2–3,8 detik/lembar ; pemrosesan citra menggunakan OpenCV; cocok untuk analisis kompleks [4].
Akurasi pembacaan data	Akurasi pengenalan nominal $\pm 95\text{--}97\%$; akurasi verifikasi keaslian UV $\pm 94\%$ [23].	Akurasi pengenalan nominal $\pm 92\text{--}95\%$; akurasi verifikasi UV $\pm 90\text{--}93\%$ [3], [6].	Akurasi pengenalan nominal $\pm 96\text{--}98\%$; akurasi verifikasi UV $\pm 95\text{--}97\%$ [4].
Informasi hasil deteksi (audio feedback)	DFPlayer Mini memutar file mp3: "Nominal ... rupiah, asli/tidak asli". Audio jelas dan konsisten, dapat ditambah motor getar sebagai feedback tambahan di lingkungan bising.	DFPlayer Mini memutar file mp3 sederhana, ditambah LED indikator hijau/merah untuk status asli/tidak asli. Audio cukup jelas , namun lebih terbatas dalam variasi.	DFPlayer Mini menghasilkan output audio yang lebih variatif (multi bahasa/intonasi), dengan fleksibilitas dari Raspberry Pi untuk menambah fitur TTS.
Sumber daya (rechargeable)	Kebutuhan daya rata-rata sekitar 200 mA. Dengan kapasitas baterai 10.000 mAh, perangkat ini mampu beroperasi hingga ± 42 jam.	Konsumsi daya hanya sekitar 120 mA pada beban ringan. Dengan kapasitas baterai 10.000 mAh, durasi operasi optimal mencapai ± 71 jam.	Daya sekitar 600 mA meskipun pada beban ringan. Dengan baterai 10.000 mAh, durasi operasi diperkirakan hanya ± 14 jam.

Wiring Diagram Alternatif 1

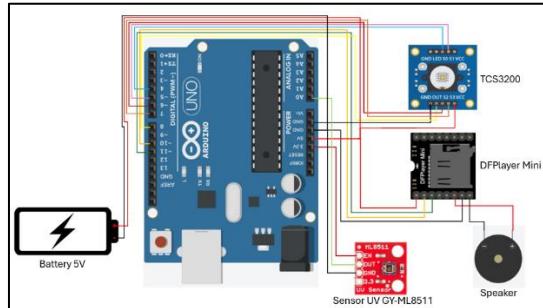


Gambar 4 Wiring Diagram Alternatif 1 - ESP32-CAM (Sensor Optik) + DFPlayer + UV LED

Rancangan sistem pendekripsi uang berbasis ESP32-CAM yang terintegrasi dengan beberapa komponen utama. Sumber daya menggunakan baterai 5V yang menyalurkan tegangan ke ESP32-CAM serta modul tambahan. Untuk proses verifikasi uang, digunakan lampu UV yang dihubungkan melalui saklar sehingga dapat dikendalikan secara manual. Pada sisi output informasi, DFPlayer Mini terhubung langsung dengan ESP32-CAM untuk mengakses file audio yang tersimpan di kartu memori. Hasil deteksi kemudian dikeluarkan melalui speaker, sehingga pengguna dapat memperoleh umpan balik berupa

suara. Dengan rancangan ini, sistem mampu menggabungkan fungsi pengenalan visual dari kamera ESP32-CAM dan verifikasi UV, serta memberikan keluaran informasi secara audio yang ramah bagi tunanetra.

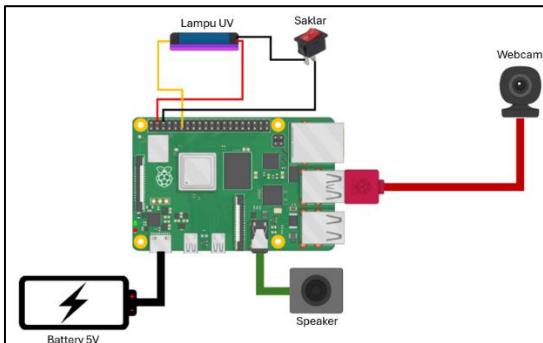
Wiring Diagram Alternatif 2



Gambar 5 Wiring Diagram Alternatif 2 - TCS3200 (Sensor Warna) + Arduino Nano + DFPlayer + Sensor UV

Sistem pendekripsi uang ini dirancang menggunakan Arduino Uno yang dipadukan dengan beberapa modul pendukung. Catu daya berasal dari baterai 5V yang menyalurkan energi ke papan Arduino serta seluruh sensor dan perangkat tambahan. Proses identifikasi nilai nominal dilakukan melalui sensor warna TCS3200 yang membaca karakteristik warna uang kertas, sedangkan sensor UV GY-ML8511 berfungsi memverifikasi keaslian uang berdasarkan respon fluoresensi. Sebagai media keluaran, DFPlayer Mini digunakan untuk memutar file audio yang tersimpan pada kartu memori, kemudian disalurkan ke speaker agar hasil deteksi dapat disampaikan dalam bentuk suara. Dengan konfigurasi ini, sistem tidak hanya mampu mengenali nominal dan keaslian uang, tetapi juga memberikan umpan balik audio yang memudahkan pengguna tunanetra dalam melakukan transaksi secara mandiri.

Wiring Diagram Alternatif 3



Gambar 6 Wiring Diagram Alternatif 3 - Webcam Camera + Raspberry Pi + DFPlayer + UV LED

Rancangan sistem pendekripsi uang berbasis Raspberry Pi ini mengintegrasikan beberapa komponen utama untuk mendukung proses deteksi dan verifikasi. Sumber daya berasal dari baterai 5V yang terhubung langsung ke Raspberry Pi untuk menyuplai tegangan ke seluruh sistem. Untuk proses verifikasi keaslian uang, digunakan lampu UV yang dikendalikan melalui saklar manual, sehingga pengguna dapat menyalakan atau mematikannya sesuai kebutuhan. Sementara itu, webcam berfungsi sebagai perangkat input visual untuk menangkap gambar uang kertas yang kemudian diproses oleh Raspberry Pi menggunakan algoritma pengolahan citra. Hasil analisis selanjutnya disampaikan kepada pengguna melalui speaker yang memberikan umpan balik suara. Dengan konfigurasi ini, sistem menggabungkan kemampuan pengenalan citra uang dengan verifikasi UV serta menghasilkan informasi deteksi dalam bentuk audio yang mudah diakses, khususnya bagi pengguna tunanetra.

Tahap Analisa

Alternatif desain dianalisis menggunakan skala Likert (1–5) dengan empat kriteria utama: portabilitas dan kemudahan operasi, fungsionalitas (mudah, cepat, akurat), kejernihan audio feedback, serta sumber daya *rechargeable*. Penilaian diperkuat dengan studi literatur dan kajian empiris sehingga desain terpilih tidak hanya memenuhi kebutuhan pengguna, tetapi juga memiliki dasar teknis yang kuat dan relevansi dengan studi terdahulu.

Tabel 3 Hasil Analisa Alternatif Desain

Kriteria	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
1. Kecepatan pembacaan data	4,4	4,6	4,0
2. Akurasi pembacaan data	4,7	4,5	4,8
3. Informasi hasil deteksi (audio feedback)	4,6	4,2	4,7

4. Sumber daya (<i>rechargeable</i>)	4,5	4,6	3,9
Rata-rata Total	4,55	4,47	4,35

Berdasarkan hasil analisis skala Likert, diperoleh bahwa **Alternatif 1 (ESP32-CAM + DFPlayer + UV LED)** merupakan pilihan paling seimbang dengan skor rata-rata total tertinggi (4,55). Alternatif ini unggul pada **akurasi pembacaan data (4,7)** dan **audio feedback (4,6)** karena penggunaan kamera ESP32-CAM yang mampu mengenali nominal dengan ketepatan tinggi serta modul DFPlayer Mini yang memberikan suara deteksi jelas dan konsisten. Dari sisi **sumber daya (4,5)**, performa perangkat juga memadai dengan konsumsi daya moderat dan ketahanan baterai hingga ±42 jam. Meskipun waktu deteksi sedikit lebih lama dibandingkan sistem berbasis sensor langsung, hasil yang diperoleh tetap stabil dan efisien.

Alternatif 2 (TCS3200 + Arduino Nano + DFPlayer + UV LED) menempati posisi kedua dengan skor rata-rata 4,47. Alternatif ini unggul pada **kecepatan pembacaan data (4,6)** dan **efisiensi daya (4,6)** karena penggunaan sensor warna TCS3200 yang mampu memberikan respons cepat dengan konsumsi energi rendah. Namun, aspek **akurasi pembacaan (4,5)** dan **audio feedback (4,2)** masih relatif lebih rendah dibanding Alternatif 1, terutama pada kondisi uang lusuh atau pencahayaan tidak stabil.

Sementara itu, **Alternatif 3 (Raspberry Pi + Webcam + DFPlayer + UV LED)** memperoleh skor rata-rata 4,35. Alternatif ini menonjol pada **akurasi pembacaan data (4,8)** karena dukungan sistem visi komputer (OpenCV) yang mampu mengenali detail uang secara komprehensif, termasuk kondisi uang yang lusuh. Namun, aspek **kecepatan pembacaan (4,0)** dan **efisiensi daya (3,9)** menjadi kelemahan utama karena kebutuhan pemrosesan dan konsumsi energi yang lebih tinggi.

Dengan demikian, **Alternatif 1 direkomendasikan sebagai rancangan otomasi prototipe utama** karena memiliki keseimbangan terbaik antara akurasi, efisiensi daya, dan kemudahan penggunaan, sedangkan **Alternatif 2 dan 3** dapat dipertimbangkan sebagai referensi pengembangan lebih lanjut, khususnya dari sisi efisiensi daya dan akurasi pengenalan.

Tahap Pengembangan

Berdasarkan hasil identifikasi kebutuhan pengguna dan analisis alternatif ide desain, pengembangan dilakukan pada Alternatif 1 yaitu dengan menggunakan kombinasi ESP32-CAM, DFPlayer Mini, dan UV LED. Casing yang digunakan dirancang semi-transparan dan portabel, dengan ukuran mendekati produk asli ($\pm 17 \times 12 \times 10$ cm). Pada bagian dalam casing ditempatkan ESP32-CAM sebagai sensor optik utama untuk mengenali nominal uang, DFPlayer Mini untuk menghasilkan keluaran audio, baterai lithium rechargeable sebagai sumber daya, serta speaker untuk mengeluarkan suara deteksi. UV LED diposisikan di dekat slot uang untuk mendukung verifikasi keaslian uang berdasarkan respon ultraviolet. Pengujian kinerja alat dilakukan dengan metode pengenalan objek, yaitu dengan membandingkan citra uang hasil tangkapan kamera dengan citra acuan atau data set yang telah disimpan dalam basis data [4], [7]. Berikut merupakan hasil pengujian kinerja alternatif 1.

Deteksi Nominal dan Keaslian

Data yang terdiri dari 508 item, dengan data training 406 dan data testing 102, menunjukkan hasil yang sudah terbaca 100% nominalnya seperti pada tabel berikut :

Tabel 4 Hasil Training dan Testing Data Nominal Uang

	BACKGR	100K	10K	1K	20K	2K	50K	5K
BACKGR	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
100K	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
10K	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
1K	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%
20K	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
2K	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%	0%
50K	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	0%
5K	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
F1 SCOR	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Di sisi lain data yang terdiri dari 96 item, dengan data training 77 dan data testing 19, menunjukkan hasil yang sudah terbaca 100% hologramnya seperti pada tabel berikut :

Tabel 5 Hasil Training dan Testing Data Keaslian Uang

BACKGROUND	BACKGROUND		ASLI
	ASLI	FAKE	
BACKGROUND	100%	0%	0%
ASLI	0%	100%	100%
F1 SCORE	1.00	1.00	1.00

Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan di laboratorium dengan 100 kali pengambilan sampel untuk setiap nominal uang kertas emisi 2022. Setiap pengujian melibatkan proses pengenalan nominal menggunakan kamera optik dan verifikasi keaslian melalui sensor ultraviolet (UV). Sebagian sampel diuji dengan variasi kondisi pencahayaan dan tingkat kelusuhan uang yang berbeda untuk mensimulasikan penggunaan nyata, sehingga hasil pengujian mencerminkan kinerja sistem secara lebih representatif.

Tabel 6 Hasil Training dan Testing Data Keaslian Uang

Nominal (Rp)	Kondisi Fisik	TP	FP	FN	TN	Precision	Recall	F1-Score
100.000	Baru	18	0	2	120	1,00	0,90	0,95
100.000	Agak lecek	16	0	4	120	1,00	0,80	0,89
50.000	Baru	19	0	1	120	1,00	0,95	0,97
50.000	Agak lecek	17	0	3	120	1,00	0,85	0,92
20.000	Baru	19	0	1	120	1,00	0,95	0,97
20.000	Agak lecek	15	0	5	120	1,00	0,75	0,86
10.000	Baru	18	0	2	120	1,00	0,90	0,95
10.000	Agak lecek	16	0	4	120	1,00	0,80	0,89
5.000	Baru	17	0	3	120	1,00	0,85	0,92
5.000	Agak lecek	16	0	4	120	1,00	0,80	0,89
2.000	Baru	17	0	3	120	1,00	0,85	0,92
2.000	Agak lecek	15	0	5	120	1,00	0,75	0,86
1.000	Baru	18	0	2	120	1,00	0,90	0,95
1.000	Agak lecek	16	0	4	120	1,00	0,80	0,89

Metrik evaluasi komputasi untuk setiap pecahan uang dan kondisi fisik disajikan pada Tabel 6. *Precision* untuk seluruh nominal mencapai 1,00 karena pada pengujian ini tidak ditemukan kasus *false positive*, yaitu tidak ada uang dengan nominal berbeda yang salah diklasifikasikan sebagai kelas tertentu. Nilai *recall* berada pada rentang 0,75–0,95; nilai tertinggi diperoleh pada pecahan Rp50.000 dan Rp20.000 dalam kondisi uang baru (0,95), sedangkan nilai terendah muncul pada pecahan Rp20.000 dan Rp2.000 dalam kondisi uang agak lecek (0,75). *F1-score* yang merupakan kompromi antara *precision* dan *recall* berada pada rentang 0,86–0,97, yang mengindikasikan bahwa secara umum sistem memiliki kinerja yang stabil tetapi sensitif terhadap perubahan kondisi fisik uang, khususnya pada uang yang mulai lusuh.

Tabel 7 Nominal dan Hologram Pecahan Uang Rupiah Kertas Tahun Emisi 2022

Nominal (Rp)	Uji Nominal (n)	Akurasi Nominal (%)	Uji Keaslian (n)	Akurasi Keaslian (%)	Akurasi Gabungan
Rp 100.000	100	98%	100	96%	97%
Rp 50.000	100	96%	100	97%	96,5%
Rp 20.000	100	94%	100	95%	94,5%
Rp 10.000	100	95%	100	96%	95,5%
Rp 5.000	100	92%	100	90%	91%
Rp 2.000	100	90%	100	93%	91,5%
Rp 1.000	100	93%	100	92%	92,5%

Analisis Kinerja Komputasi Berdasarkan Tabel 4, performa sistem dievaluasi menggunakan metrik *Precision*, *Recall*, dan *F1-Score*. Sistem mencapai rata-rata *F1-Score* sebesar 0,94 untuk seluruh nominal, yang mengindikasikan keseimbangan yang baik antara *false positives* dan *false negatives*. Hasil pengujian laboratorium, dilakukan pengujian usabilitas terhadap 10 responden tunanetra untuk mengukur kecepatan respon alat dalam skenario transaksi nyata. Parameter yang diukur adalah waktu respons (*response time*) mulai dari uang dimasukkan hingga keluaran audio terdengar.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat akurasi pengenalan nominal berkisar antara 90% hingga 98%, sedangkan akurasi deteksi keaslian uang berada pada rentang 90% hingga 97%. Nilai akurasi tertinggi diperoleh pada pecahan Rp100.000 dengan tingkat pengenalan nominal sebesar 98% dan keaslian 96%, menghasilkan akurasi gabungan sebesar 97%. Sementara itu, nilai akurasi terendah tercatat pada pecahan Rp5.000 dengan akurasi gabungan 91%.

Secara umum, perbedaan hasil akurasi antarpecahan disebabkan oleh perbedaan karakteristik visual dan intensitas reflektansi hologram pada masing-masing uang kertas. Pecahan dengan warna dominan cerah dan pola kontras tinggi (seperti Rp100.000 dan Rp50.000) cenderung lebih mudah dikenali oleh sistem pengolahan citra dibandingkan pecahan dengan kontras rendah atau latar warna seragam (seperti Rp5.000, Rp2.000 dan Rp1.000).

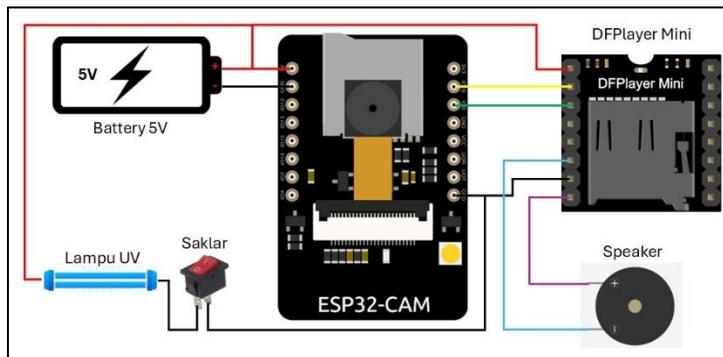
Implikasi Sosial dan Kemandirian Ekonomi

Penerapan alat ini memberikan dampak signifikan terhadap aspek psikososial penyandang tunanetra. Berdasarkan wawancara pasca-ujicoba, responden menyatakan bahwa umpan balik audio yang akurat mengurangi 'beban kognitif' dan kecemasan saat bertransaksi. Secara ekonomi, alat ini berpotensi mengurangi risiko penipuan uang palsu atau kembalian yang

salah, yang sering dialami tunanetra. Dibandingkan dengan solusi berbasis aplikasi seluler (seperti *Cash Reader*) yang mewajibkan pengguna memegang *smartphone* mahal dengan layar sentuh—yang seringkali sulit bagi tunanetra lansia—solusi berbasis perangkat keras fisik (taktile) ini menawarkan aksesibilitas yang lebih inklusif dan kurva pembelajaran yang lebih rendah.

Tahap Rekomendasi

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem dengan konfigurasi ESP32-CAM sebagai sensor optik yang terintegrasi dengan lampu ultraviolet (UV LED) serta modul DFPlayer Mini direkomendasikan sebagai alternatif desain terbaik. Sistem ini menunjukkan tingkat akurasi rata-rata mencapai 94,6% dalam mengenali nominal dan keaslian uang, dengan performa tertinggi pada pecahan Rp100.000 sebesar 97%.



Gambar 7 Wiring Diagram Prototype Alat Pendeksi Nominal dan Kelayakan Uang

Rangkaian wiring diagram pada alternatif ini terbukti stabil, efisien dalam konsumsi daya, serta menghasilkan keluaran audio yang jelas, sehingga memenuhi kebutuhan utama pengguna tunanetra. Dengan demikian, alternatif ini direkomendasikan untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai prototipe final karena memberikan keseimbangan antara akurasi deteksi, efisiensi energi, dan kemudahan penggunaan.

Simpulan

Penelitian Penelitian ini merancang dan menguji prototipe awal alat pendeksi nominal dan keaslian uang bagi tunanetra berbasis sensor optik (ESP32-CAM) dan ultraviolet (UV LED) dengan pendekatan Value Engineering (VE). Penerapan lima tahapan VE berhasil menghasilkan alternatif desain yang efisien, di mana konfigurasi ESP32-CAM + UV LED + DFPlayer Mini menunjukkan nilai fungsi tertinggi dan dipilih sebagai prototipe utama. Hasil pengujian eksperimental di laboratorium menunjukkan bahwa sistem mampu mengenali nominal dan keaslian uang dengan tingkat akurasi tinggi pada kondisi terkontrol, sehingga memberikan proof of concept yang kuat terhadap efektivitas pendekatan VE dalam merancang teknologi asistif yang sederhana, hemat daya, dan mudah dioperasikan oleh tunanetra.

Meskipun hasil awal menunjukkan performa yang menjanjikan, penelitian ini masih berada pada tahap eksperimental laboratorium, sehingga generalisasi temuan masih terbatas. Jumlah sampel citra uang dan variasi kondisi uji masih relatif kecil, dan pengujian belum mencakup skenario lapangan secara luas. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan untuk memperluas skala pengujian pada kondisi nyata yang melibatkan variasi pencahayaan, uang lusuh, perilaku pengguna berbeda, serta durabilitas penggunaan berulang.

Sebagai arah pengembangan berikutnya, penelitian dapat mengintegrasikan algoritma deteksi yang lebih adaptif berbasis TinyML atau edge computing pada ESP32 untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mengenali uang dengan kondisi ekstrem tanpa ketergantungan koneksi internet. Selain itu, pengembangan fitur aksesibilitas bagi penyandang low-vision dan deaf-blind dapat dilakukan melalui penambahan umpan balik haptik, audio adaptif, serta desain casing yang lebih ergonomis berdasarkan antropometri pengguna tunanetra yang lebih beragam.

Penulis menyampaikan apresiasi atas dukungan pendanaan melalui hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) yang diselenggarakan oleh Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia, yang berperan penting dalam menunjang keberhasilan seluruh tahapan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] D. Atriani And A. Yustikaningtyas, "Pemenuhan Hak Aksesibilitas Pelayanan Jasa Perbankan Bagi Penyandang Disabilitas Tunanetra Dalam Membuka Rekening Bank Di Yogyakarta," *Jurnal Hukum Bisnis*, Vol. 12, No. 03, Art. No. 03, May 2023, Doi: 10.47709/Jhb.V12i03.3291.
- [2] M. Imran, "Peningkatan Pemberdayaan Penyandang Tunanetra Melalui Perancangan Social Media Newsletter Di Yayasan Sosial Tunanetra," *Jurnal Komunitas : Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, Vol. 6, No. 2, Pp. 229–239, Jan. 2024, Doi: 10.31334/Jks.V6i2.3587.
- [3] F. Fadlioni And K. Kusnoto, "Rancang Bangun Dan Implementasi Alat Pendekripsi Nilai Uang Untuk Tuna Netra Menggunakan Mikrokontroler Arduino," *Resistor (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, Vol. 6, No. 1, Pp. 17–24, May 2023, Doi: 10.24853/Resistor.6.1.17-24.
- [4] Y. Wulandari And Y. R. Nasution, "Currency Nominal Detection With Tempalate Matching Method To Help Turnanetra," *Dinasti International Journal Of Education Management And Social Science*, Vol. 5, No. 6, Pp. 2200–2220, Aug. 2024, Doi: 10.38035/Dijemss.V5i6.3157.
- [5] M. U. Hidayat And M. Iqbal, "Alat Pendekripsi Uang Palsu Portabel Dengan Menggunakan Sensor Uv, Sensor Cahaya Dan Sensor Warna Berbasis Mikrokontroller," *Jurnal Teknik Elektro*, Vol. 6, No. 1, Art. No. 1, Oct. 2022, Doi: 10.31000/Jte.V6i1.6962.
- [6] S. P. Santosa, M. Reynaldi, And L. Aditya, "Rancang Bangun Alat Pendekripsi Keaslian Dan Nominal Uang Menggunakan Sensor Uv Gyml8511 Dan Tcs3200," *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, Vol. 13, No. 1, Jan. 2025, Doi: 10.23960/Jitet.V13i1.5967.
- [7] F. S. Azindha And J. Sutopo, "Sistem Deteksi Uang Kertas Untuk Penyandang Tunanetra Dengan Metode Tempalate Matching," *Jurnal Pendidikan Tambusai*, Vol. 7, No. 3, Pp. 26958–26965, Nov. 2023, Doi: 10.31004/Jptam.V7i3.10973.
- [8] W. Widayastuti, E. Suparti, And A. E. Tontowi, "Pemetaan Efektivitas Dan Efisiensi Metode Desain Produk: Telaah Pustaka," *Tekinfo: Jurnal Ilmiah Teknik Industri Dan Informasi*, Vol. 12, No. 2, Pp. 79–96, May 2024, Doi: 10.31001/Tekinfo.V12i2.2277.
- [9] S. O. Ongbali, O. O. Okwilagwe, E. S. Yekini, S. A. Afolalu, And T. Somefun, "The Role Of Value Engineering In Product Design And Profitability Improvement In Manufacturing Setting - A Review," In *2024 International Conference On Science, Engineering And Business For Driving Sustainable Development Goals (Seb4sdg)*, Apr. 2024, Pp. 1–6. Doi: 10.1109/Seb4sdg60871.2024.10630157.
- [10] S. Atabay, "Determination Of Exterior Material In Sustainable Buildings By Value Engineering Method According To Leed Criteria," *Jscmt*, Vol. 8, No. 1, Pp. 1–11, Mar. 2023, Doi: 10.47481/Jscmt.1246202.
- [11] C. Quintero And J. Gallego, "Interdisciplinary Co-Design Process Of Assistive Technology In Value Elicitation," In *Proceedings Of The 9th International Conference On Software Development And Technologies For Enhancing Accessibility And Fighting Info-Exclusion*, In *Dsai '20*. New York, Ny, Usa: Association For Computing Machinery, June 2021, Pp. 1–5. Doi: 10.1145/3439231.3439234.
- [12] W. Septiani, N. Rahmawati, D. M. Safitri, And M. Luis, "Usability Evaluation For Mobile Health Application: Systematic Literature Review," *Sinergi*, Vol. 28, No. 2, Pp. 287–304, May 2024, Doi: 10.22441/Sinergi.2024.2.009.
- [13] M. N. Uğural, "Material Selection With Value Engineering Technique - A Case Study In Construction Industry," *Tehnički Vjesnik*, Vol. 30, No. 1, Pp. 292–301, 2023, Doi: 10.17559/Tv-20220201102150.
- [14] V. P And F. Thomas, "Enhancing Product Development Phase Of Quality Function Deployment Using Algorithm Based Interfaces," *Ijmet*, Vol. 9, No. 10, Pp. 662–669, Nov. 2018.
- [15] R. Ginting And M. Riski Satrio, "Integration Of Quality Function Deployment (Qfd) And Value Engineering In Improving The Quality Of Product : A Literature Review," *Iop Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Vol. 1003, No. 1, P. 012002, Dec. 2020, Doi: 10.1088/1757-899x/1003/1/012002.
- [16] K. Hmina, A. El, L. Lasri, And M. Sallaou, "Preferences-Based Approach For Triz Contradiction Matrix Exploitation In Preliminary Design," *Fme Transactions*, Vol. 48, No. 3, Pp. 588–599, 2020, Doi: 10.5937/Fme2003588h.
- [17] J. Weijie, "Research And Application Of Mechanical Product Design Process Based On Qfd And Triz Integration," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1544, No. 1, P. 012088, May 2020, Doi: 10.1088/1742-6596/1544/1/012088.
- [18] S. O. Ongbali, O. O. Okwilagwe, E. S. Yekini, S. A. Afolalu, And T. Somefun, "The Role Of Value Engineering In Product Design And Profitability Improvement In Manufacturing Setting - A Review," In *2024 International Conference On Science, Engineering And Business For Driving Sustainable Development Goals (Seb4sdg)*, Apr. 2024, Pp. 1–6. Doi: 10.1109/Seb4sdg60871.2024.10630157.
- [19] C. Tanaka, R. Ginting, N. Wijaya, And W. Kokman, "Uji Validitas Dan Reliabilitas Hasil Survei Perancangan Produk Sinar Infrared Multi-Fungsi," *Talenta Conference Series: Energy And Engineering (Ee)*, Vol. 5, No. 2, Art. No. 2, Dec. 2022, Doi: 10.32734/Ee.V5i2.1631.

- [20] E. A. Wibowo *Et Al.*, “Menuju Transaksi Tunai Inklusif: Edukasi Transaksi Aman Dan Pemetaan Kebutuhan Bagi Tunanetra,” *Jurnal Pengabdian Masyarakat Kesosi*, Vol. 8, No. 2, Pp. 270–280, July 2025, Doi: 10.57213/Abdimas.V8i2.374.
- [21] E. A. Wibowo, M. N. W. Hidayah, G. M. Munandar, R. Ardiyansah, And N. F. Rahmawati, “Desain Inovatif Alat Pemotong Ring Amdk Gelas Plastik: Meningkatkan Efisiensi Dan Keamanan Proses Daur Ulang Di Sektor Informal Dengan Pendekatan Value Engineering,” *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi (Jutin)*, Vol. 8, No. 1, Pp. 807–813, Jan. 2025, Doi: 10.31004/Jutin.V8i1.40635.
- [22] E. R. S. H. Saputra And A. C. Frobenius, “Identifikasi Kebutuhan Pengguna Tunanetra Untuk Platform Mobile Menggunakan Metode User Persona - Design Thinking,” *Melek It : Information Technology Journal*, Vol. 8, No. 1, Art. No. 1, Oct. 2022, Doi: 10.30742/Melekitjournal.V8i1.197.
- [23] F. Risha, S. W. Dari, And T. A. T. Nasution, “Prototype Smart Packet Box Cash On Delivery Menggunakan Esp-32cam,” *Majalah Iptek Politeknik Negeri Medan Polimedia*, Vol. 26, No. 03, Pp. 1–10, 2023.