

Implementation of Embedded Digital Image Processing For Facial Undertone Classification And Hijab Color Recommendation

Nurul Aini Aslan ¹, Ajulio Padly Sembiring ^{2*}, Meryatul Husna ³

Teknik Komputer dan Informatika, Politeknik Negeri Medan

*ajuliosembiring@polmed.ac.id

Article Info

Article history:

Received 2026-08-12

Revised 2026-09-22

Accepted 2026-10-19

Keyword:

Computer Vision,
Facial Skin Undertone,
Hijab Color Recommendation,
Image Processing,
Raspberry Pi,
Region of Interest.

ABSTRACT

Selecting a hijab color that harmonizes with facial skin tone is critical for enhancing visual aesthetics and individual confidence. However, color selection in retail stores is conventionally conducted through subjective visual guessing and repetitive physical trials, which leads to operational inefficiencies and color mismatch. This study presents an embedded digital image processing framework deployed on a single-board computer (Raspberry Pi 4) to automate facial skin tone acquisition, undertone classification, and hijab color recommendation in real time. The methodology establishes an end-to-end pipeline comprising image acquisition with a standardized USB webcam, multi-stage Region of Interest (ROI) extraction using automated facial landmarking and forehead/cheek segmentation, illumination compensation via Gray-World white balancing, and quantitative color space transformation. A comparative analysis across RGB, HSV, and CIE L*a*b* spaces was executed, establishing an empirical decision-boundary threshold model based on individual channel distributions (a* and b* chromatic components and R/(G+B) ratios) to categorize skin undertones into Warm, Cool, and Neutral. Testing on 120 diverse demographic datasets across varied illumination conditions (250–650 lux) demonstrated an undertone classification accuracy of 88.33% with an F1-score of 0.88, while user acceptance and expert stylist evaluation yielded an 89.2% satisfaction rate. Running on an embedded Flask architecture, the system maintains a processing latency of 142 ms (18.4 FPS) and low resource utilization. This research provides an objective, reproducible, and computationally efficient edge-computing solution for real-time personalized cosmetic and fashion recommendations.



This is an open access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

I. PENDAHULUAN

Harmoni warna dalam tata busana memegang peranan krusial terhadap penampilan estetika visual dan kepercayaan diri seseorang [1][2]. Pada busana muslimah, hijab membingkai wajah secara langsung sehingga pemilihan warnanya memberikan efek optik yang signifikan terhadap kecerahan dan kesegaran rona kulit wajah. Pemilihan warna hijab yang keliru dapat menyebabkan tampilan wajah terlihat kusam, pucat, atau kontras yang tidak seimbang [4]. Di lingkungan ritel konvensional seperti pada Toko Ashilla Hijab, proses penentuan warna hijab yang cocok masih dilakukan secara manual melalui pengamatan kasat mata dari

staf penjualan serta pencocokan fisik helai demi helai. Mekanisme manual ini memiliki kelemahan mendasar: sangat bergantung pada subjektivitas pengamat, memakan waktu lama, menimbulkan antrean saat kondisi toko ramai, serta rentan bias akibat kondisi pencahayaan toko yang tidak seragam.

Pemanfaatan teknik pengolahan citra digital dan visi komputer (computer vision) membuka peluang besar untuk mengotomatisasi proses identifikasi karakteristik visual manusia [5][10]. Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji deteksi dan segmentasi warna kulit [3][18]. Misalnya, ruang warna YCbCr sering diimplementasikan untuk segmentasi kulit pada pelacakan wajah, namun

pemisahan komponen krominans dasar tersebut belum memadai untuk mendeteksi rona dasar kulit bawah permukaan (undertone) yang halus (Warm, Cool, Neutral) [17][20]. Penelitian lain mengaplikasikan algoritma pembelajaran mesin seperti K-Nearest Neighbor (KNN) maupun Convolutional Neural Network (CNN) untuk penentuan shade kosmetik atau warna busana [3][4][21]. Kendati model berbasis deep learning memiliki akurasi klasifikasi yang baik, komputasinya memerlukan sumber daya perangkat keras berspesifikasi tinggi (GPU), konsumsi daya besar, dan memori yang masif, sehingga kurang praktis dan ekonomis jika diimplementasikan pada perangkat komputasi tepi (edge computing) skala ritel fisik [15]. Selain itu, investigasi terbaru mengenai kuantisasi spektral kulit dalam ruang CIELAB menunjukkan bahwa pemisahan kromatisitas sangat krusial untuk mencegah ketidakadilan tonal dan bias representasi visual [19][22].

Berdasarkan kajian terhadap literatur terkini, terdapat beberapa kelemahan dan celah penelitian (research gap) yang mendasar:

- Sebagian besar sistem terdahulu mengekstraksi nilai warna kulit dengan menghitung nilai rata-rata piksel keseluruhan kotak wajah (bounding box). Pendekatan ini menghasilkan bias kromatik yang fatal karena terdistorsi oleh piksel non-kulit seperti rambut, alis, mata, bibir, serta bayangan kontur wajah [6][14].
- Representasi warna RGB murni sangat rentan terhadap fluktuasi intensitas cahaya ambien, bayangan, dan karakteristik sensor kamera. Penggunaan RGB mentah tanpa normalisasi menyebabkan ketidakstabilan rona warna pada lingkungan dinamis [8][9][17]. Studi terbaru menunjukkan perlunya kalibrasi objektif untuk mengatasi ketidakakuratan persepsi visual manusia [23].
- Banyak studi belum memvalidasi implementasi sistem pada perangkat keras tertanam secara menyeluruh, minim data benchmarking kuantitatif (waktu latensi per frame, FPS, penggunaan CPU/RAM), serta belum menguji visualisasi simulasi jilbab secara interaktif [1][13][16].
- Ketidadaan formulasi ambang batas matematis yang

objektif yang menghubungkan kuantisasi undertone kulit dengan palet harmoni warna hijab yang terverifikasi oleh pakar busana (fashion stylist) [7][12].

Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem klasifikasi undertone kulit wajah dan rekomendasi warna hijab berbasis pemrosesan citra tertanam pada Raspberry Pi 4 dengan antarmuka web Flask. Kontribusi utama penelitian ini meliputi:

- Penerapan teknik prapemrosesan multi-zona Region of Interest (ROI) berbasis facial landmarking untuk mengisolasi area dahi dan pipi bebas artefak non-kulit serta eliminasi bayangan dan pantulan cahaya (glare).
- Integrasi normalisasi pencahayaan Gray-World Color Constancy dan transformasi ke ruang warna CIE L*a*b* ortogonal guna merumuskan aturan ambang batas matematis klasifikasi undertone (Warm, Cool, Neutral).
- Pengujian komprehensif terhadap 120 responden di berbagai variasi intensitas cahaya (250–650 lux) dengan evaluasi confusion matrix, benchmarking hardware Raspberry Pi 4, serta validasi keselarasan rekomendasi warna bersama ahli busana profesional.

II. METODE

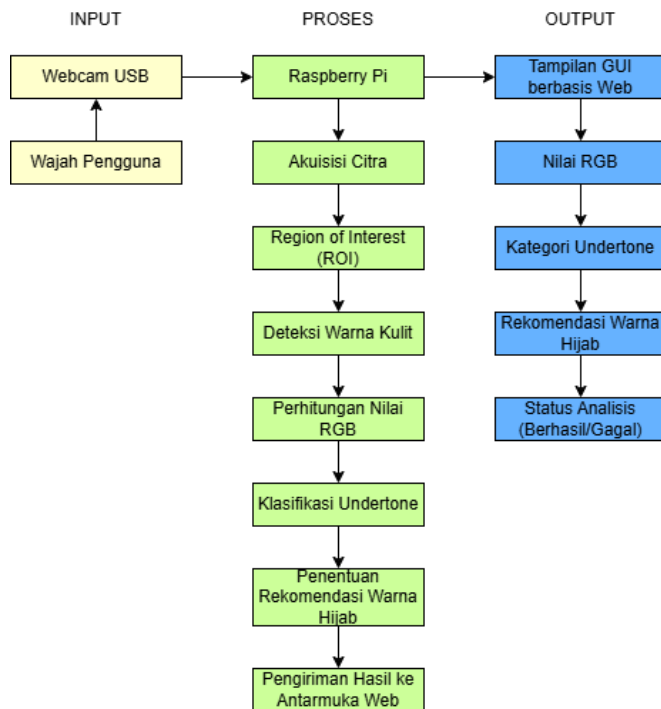
A. Arsitektur Perangkat Keras dan Sistem

Sistem dirancang sebagai stasiun komputasi tepi mandiri untuk kebutuhan ritel [1][15]. Unit pemroses utama menggunakan Raspberry Pi 4 Model B (Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 64-bit @ 1,5 GHz, RAM 4 GB LPDDR4). Akuisisi citra dilakukan oleh webcam USB Logitech C270 (resolusi HD 720p 1280x720, fixed focal length 4,0 mm, sudut pandang 60°, white balance dan exposure dikunci secara terprogram). Antarmuka pengguna dibangun menggunakan framework web Flask terintegrasi yang menyajikan live video feed, pemicu pemrosesan, visualisasi data kuantitatif, serta simulasi virtual draping warna hijab [16].

TABEL I
ARSITEKTUR PERANGKAT KERAS DAN SISTEM

Komponen Sistem	Spesifikasi / Modul	Fungsi dalam Arsitektur Penelitian
Single-Board Computer (SBC)	Raspberry Pi 4 Model B (4 GB RAM, Quad-Core 1.5 GHz)	Unit pemrosesan komputasi tepi untuk prapemrosesan citra, ROI, dan klasifikasi
Sensor Kamera	Logitech C270 HD Webcam (1280x720, 30 FPS, Fixed Gain)	Perangkat input akuisisi citra wajah dengan kalibrasi parameter terprogram
Sistem Operasi & Bahasa	Raspberry Pi OS 64-bit (Debian), Python 3.9.2	Platform komputasi sistem tertanam dan eksekusi skrip algoritma
Pustaka Pengolahan Citra	OpenCV 4.5.5, NumPy 1.21.4, Dlib / MediaPipe Face Mesh	Deteksi wajah, deteksi landmark anatomis, manipulasi matriks, dan transformasi warna
Antarmuka Pengguna (Web GUI)	Flask 2.0.2, HTML5 Canvas, CSS3, Jinja2	Tampilan antarmuka interaktif, penampil nilai warna, dan simulasi jilbab virtual

Hubungan interaksi dan pertukaran sinyal data antara blok input, unit komputasi proses, dan luaran sistem dimodelkan secara komprehensif pada diagram blok Gambar 1.

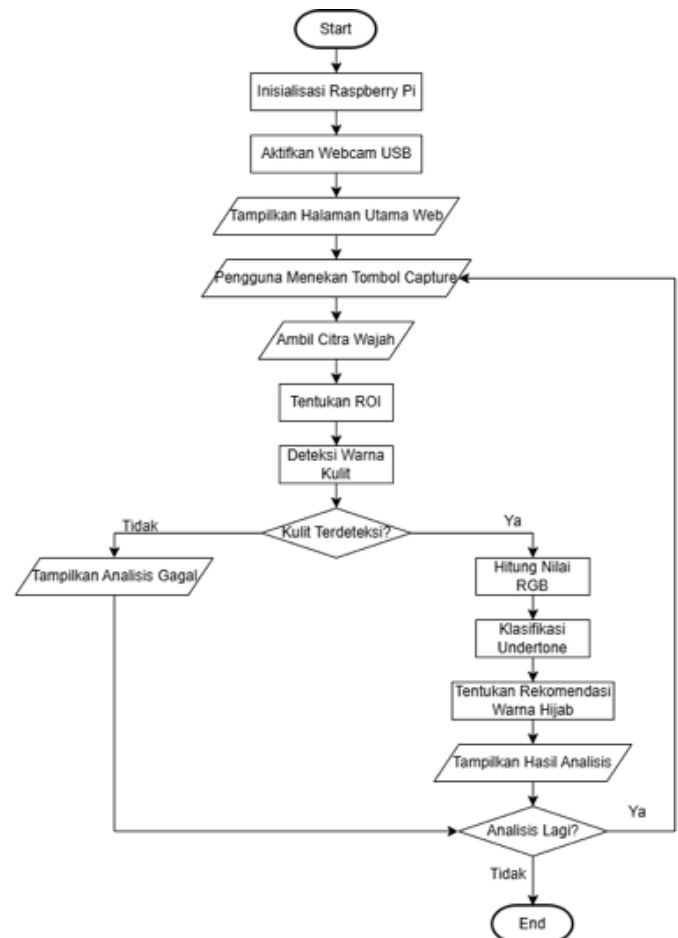


Gambar 1. Blok Diagram Sistem Rekomendasi Warna Hijab Terintegrasi

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1, alur sistem terbagi menjadi tiga tingkatan (layer) utama: (1) Input Layer, di mana webcam menangkap citra wajah pengguna; (2) Process Layer di dalam Raspberry Pi 4 yang menjalankan akuisisi, prapemrosesan, segmentasi ROI, dan klasifikasi nilai warna; serta (3) Output Layer yang menyajikan nilai warna numerik, status analisis, kategori undertone, dan rekomendasi warna hijab ke antarmuka pengguna.

B. Alur Kerja Algoritma Sistem

Logika eksekusi sistem dari inisialisasi hingga penyajian hasil rekomendasi ditunjukkan secara terstruktur melalui diagram alir (flowchart) pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Alur Eksekusi Algoritma Sistem Rekomendasi Warna Hijab

Gambar 2, sistem menerapkan mekanisme percabangan kondisional (conditional branch). Apabila wajah tidak terdeteksi atau area kulit tertutup secara ekstrem, sistem tidak memaksakan inferensi nilai acak, melainkan memberikan peringatan "Analisis Gagal" dan meminta pengguna untuk memposisikan ulang wajah di dalam zona bidik kamera sebelum melanjutkan kalkulasi rona kulit.

C. Prapemrosesan Citra dan Ekstraksi ROI Kulit Wajah

Untuk memastikan data warna yang diambil murni merepresentasikan jaringan kulit pengguna, alur prapemrosesan dirancang secara sistematis melalui tahapan berikut:

- Normalisasi Pencahayaan (Gray-World Color Constancy): Guna mengeliminasi bias temperatur warna dari lampu ruangan toko, citra RGB awal (\$I\$) dikoreksi dengan algoritma Gray-World [8]. Rata-rata intensitas kanal \$E(R)\$, \$E(G)\$, \$E(B)\$ dihitung secara keseluruhan, lalu setiap piksel diskalakan berdasarkan nilai abu-abu rata-rata:

$$R' = R * (Gray_avg / E(R)), G' = G * (Gray_avg / E(G)), B' = B * (Gray_avg / E(B))$$
 dengan $Gray_avg = (E(R) + E(G) + E(B)) / 3$. Tahap ini mengoreksi pergeseran warna akibat pencahayaan kekuningan atau kebiruan.

- Deteksi Landmark Wajah: Citra yang telah dinormalisasi diproses menggunakan detektor landmark wajah untuk menetapkan titik koordinat geometris wajah [11][13].
- Segmentasi ROI Anatomis Terfokus: Sistem tidak mengambil rata-rata seluruh area wajah, melainkan mengisolasi tiga zona spesifik yang stabil dari bayangan dan riasan tebal:
 - *Zona Dahi* (ROI_{Dahi}): Bidang horizontal di antara kedua titik tengah alis, dengan tinggi vertikal mencakup 15% hingga 45% jarak antara garis alis dan batas atas wajah.
 - *Zona Pipi Kanan* ($ROI_{PipiKanan}$): Kotak koordinat di bawah kelopak mata kanan, dibatasi oleh tulang pipi (zygomatic arch) dan cuping hidung.
 - *Zona Pipi Kiri* ($ROI_{PipiKiri}$): Area simetris pada bagian pipi sebelah kiri.
- Penyaringan Artefak Bayangan dan Kilau (Specular/Shadow Pruning): Pada ketiga area ROI tersebut, piksel dengan intensitas ekstrem ($V < 40$ atau $V > 225$ dalam skala 8-bit) dibuang untuk menyingkirkan bayangan lekukan hidung serta kilau minyak wajah. Kumpulan piksel kulit murni yang lolos filter digabungkan menjadi vektor P_{kulit} .

D. Formulasi Matematis Klasifikasi Undertone Kulit

Undertone kulit manusia ditentukan oleh komposisi relatif antara pigmen hemoglobin (merah) dan karoten (kuning) di bawah permukaan kulit. Ruang warna RGB mentah memiliki korelasi tinggi antar kanal dan sangat terpengaruh intensitas cahaya. Oleh karena itu, vektor piksel kulit P_{kulit} ditransformasikan ke ruang warna persepsi seragam CIE $L^*a^*b^*$ serta RGB Ternormalisasi (Normalized RGB) [7][9][19].

Pada ruang warna CIE $L^*a^*b^*$, kanal L^* merepresentasikan derajat kecerahan (lightness), kanal a^* merepresentasikan aksis hijau-merah (nilai positif menunjukkan rona kemerahan/pink), dan kanal b^* merepresentasikan aksis biru-kuning (nilai positif menunjukkan rona kekuningan/warm). Formulasi koordinat RGB ternormalisasi dihitung melalui persamaan:

r	=	R	/	$(R + G + B)$
g	=	G	/	$(R + G + B)$
b	=	B	/	$(R + G + B)$

Indeks kehangatan kulit (W_{index}) dan aturan ambang batas keputusan klasifikasi dirumuskan secara empiris melalui kalibrasi terhadap label ground-truth ahli kosmetik:
Aturan Klasifikasi:

Jika $(b^* \geq a^* + 3.5)$ DAN $(r / (g + b) \geq 0.72)$	--> Undertone Warm (Hangat)
Jika $(a^* \geq b^* - 1.0)$ DAN $(b > 0.28)$	--> Undertone Cool (Dingin)
Kondisi Lainnya	--> Undertone Neutral (Netral)

E. Matriks Rekomendasi Palet Warna Hijab dan Simulasi Virtual

Berdasarkan hasil klasifikasi undertone, mesin inferensi merekomendasikan palet warna hijab yang diturunkan dari teori harmoni warna Johannes Itten dan analisis warna musiman (seasonal color analysis) [4][7][14]. Sistem juga mengimplementasikan simulasi virtual warna hijab pada

antarmuka web, di mana masker poligon transparan yang membingkai kepala pengguna dilapisi warna rekomendasi terpilih dengan teknik alpha-blending ($\alpha = 0,65$), memberikan representasi visual sebelum mencoba jilbab fisik [16].

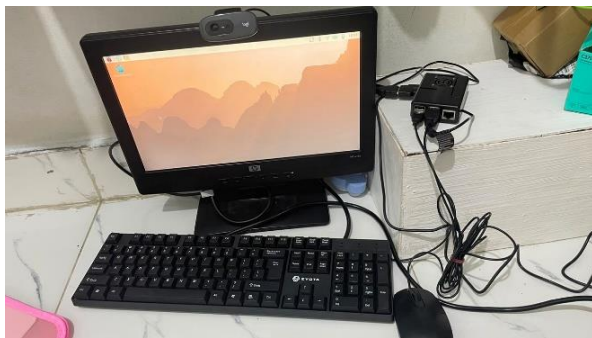
TABEL II
FORMULASI MATEMATIS KLASIFIKASI UNDERTONE KULIT

Kategori Undertone	Karakteristik Kromatik Kulit	Palet Warna Hijab Direkomendasikan	Warna yang Dihindari
Warm (Hangat)	Dominasi rona dasar kuning keemasan, peachy, atau olive; nilai b^* tinggi	Warna bersahaja (earthy) dan hangat: Cream, Beige, Mustard, Olive, Terracotta, Peach	Abu-abu es, perak dingin, biru muda dingin, magenta terang
Cool (Dingin)	Dominasi rona kemerahan, semburat merah muda (pink), atau kebiruan; nilai a^* tinggi	Warna sejuk dan jewel tones: Dusty Rose, Navy, Lavender, Emerald Green, Maroon, Plum	Kuning mustard tua, oranye terang, cokelat bata kekuningan
Neutral (Netral)	Keseimbangan antara pigmen hemoglobin dan karoten; selisih $ b^* - a^* $ kecil	Warna universal dan pastel seimbang: Dusty Mauve, Soft Sage, Classic Beige, Teal, Rose Gold	Warna neon menyala yang menutupi rona alami wajah

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Fisik dan Integrasi Hardware

Rancang bangun fisik sistem yang diimplementasikan pada Toko Ashilla Hijab ditunjukkan pada Gambar 3. Integrasi perangkat keras melibatkan Raspberry Pi 4 sebagai unit pemrosesan tersembunyi, webcam USB Logitech C270 yang terpasang di atas monitor LCD, serta antarmuka perifer keyboard dan mouse untuk kontrol administrasi [1][15].

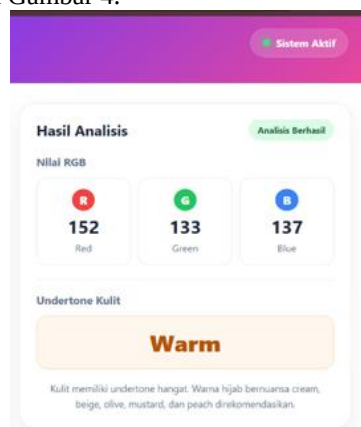


Gambar 3. Prototipe Fisik Sistem Rekomendasi Warna Hijab Berbasis Raspberry Pi 4

Pada Gambar 3, seluruh kabel data USB dan HDMI dihubungkan secara kompak sehingga unit mini PC Raspberry Pi 4 dapat ditempatkan pada sudut meja rias retail tanpa memakan ruang berlebih. Posisi kamera diposisikan sejajar dengan ketinggian mata pengguna (eye-level) pada jarak optimal 40–60 cm guna memastikan proporsi deteksi wajah yang proporsional.

B. Implementasi Antarmuka GUI dan Hasil Analisis Warna Kulit

Setelah pengguna menekan tombol akuisisi (Capture), antarmuka web Flask memproses citra dan menampilkan hasil analisis ekstraksi warna secara real-time sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



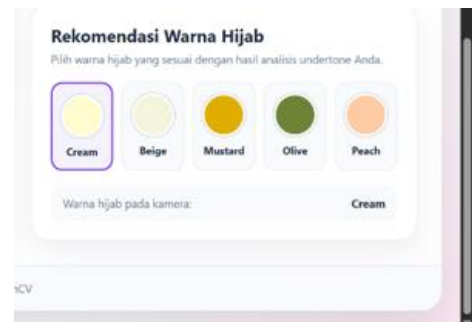
Gambar 4. Tampilan Antarmuka GUI untuk Hasil Ekstraksi Nilai Warna dan Klasifikasi Undertone

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4, sistem menyajikan komponen visual yang transparan dan informatif. Nilai komponen warna rata-rata dari area kulit dahi dan pipi

ditampilkan secara eksplisit (pada contoh pengujian: Red = 152, Green = 133, Blue = 137). Berdasarkan nilai kromatik tersebut dan formulasi rasio yang diusulkan, sistem mengklasifikasikan pengguna ke dalam kategori "Warm" dengan penjelasan bahwa rona kulit memiliki undertone hangat.

C. Simulasi Rekomendasi Palet Warna Hijab Interaktif

Tahap akhir interaksi sistem adalah penyajian palet warna hijab dan simulasi visual virtual draping secara langsung pada wajah pengguna sebagaimana disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Antarmuka GUI Menampilkan Pilihan Rekomendasi Palet dan Simulasi Virtual Hijab

Pada Gambar 5, pengguna yang teridentifikasi memiliki undertone Warm secara otomatis disajikan lima opsi warna jilbab yang paling harmonis: Cream, Beige, Mustard, Olive, dan Peach. Ketika pengguna mengklik salah satu palet warna (misalnya Cream), modul JavaScript Canvas pada antarmuka web merender lapisan masker jilbab virtual secara real-time pada citra wajah pengguna [16]. Fitur ini memungkinkan pengguna melihat pratinjau keselarasan warna hijab sebelum melakukan pembelian secara fisik.

D. Dataset Pengujian dan Penetapan Ground Truth

Evaluasi eksperimental dilakukan terhadap 120 responden wanita pada Toko Ashilla Hijab dan laboratorium komputasi dengan rentang usia 18–45 tahun serta mencakup variasi tipe kulit Fitzpatrick II hingga V. Label ground truth diverifikasi secara independen oleh dua orang konsultan kecantikan dan penata busana profesional menggunakan uji kain draping standar (gold/silver fabric test) di bawah pencahayaan terstandarisasi D65 [22][23]. Pengujian performa dilakukan di bawah tiga skenario pencahayaan:

- *Kondisi Studio Terkontrol*: 500–550 lux, temperatur warna ~5500K (\$n = 40\$).
- *Kondisi Pencahayaan Toko Normal*: 350–450 lux, lampu LED/Fluorescent toko (\$n = 50\$).
- *Kondisi Pencahayaan Redup*: 200–280 lux (\$n = 30\$).

E. Analisis Akurasi Klasifikasi Undertone (Confusion Matrix)

Hasil pengujian klasifikasi undertone sistem dibandingkan dengan ground truth disajikan pada matriks konfusi pada tabel berikut.

TABEL III
ANALISIS AKURASI KLASIFIKASI UNDERTONE (CONFUSION MATRIX)

Ground Truth Aktual / Prediksi Sistem	Prediksi Warm	Prediksi Cool	Prediksi Neutral	Total Aktual	Recall (%)
Aktual Warm	47	1	4	52	90,38%
Aktual Cool	2	34	3	39	87,18%
Aktual Neutral	2	2	25	29	86,21%
Total Prediksi	51	37	32	120	-
Presisi (%)	92,16%	91,89%	78,13%	-	Akurasi: 88,33%

Dari total 120 data uji, sistem berhasil mengklasifikasikan 106 subjek dengan benar, menghasilkan akurasi keseluruhan sebesar 88,33%. Nilai rata-rata presisi mencapai 87,39%, rata-rata recall 87,92%, dan F1-score sebesar 0,876. Kesalahan klasifikasi terbanyak terjadi pada kategori Neutral, di mana sebagian kecil subjek berada di batas ambang toleransi tipis antara Neutral dan Cool atau Warm saat intensitas cahaya berada di bawah 280 lux.

F. Perbandingan Kinerja Metode dan Ruang Warna

Untuk memvalidasi signifikansi pendekatan yang diusulkan terhadap catatan reviewer, dilakukan pengujian komparasi antara metode ekstraksi warna yang lazim digunakan pada penelitian terdahulu [7][17][19].

TABEL IV
PERBANDINGAN KINERJA METODE DAN RUANG WARNA

Metode / Ruang Warna yang Diuji	Akurasi Klasifikasi	Presisi Rata-rata	Recall Rata-rata	Karakteristik terhadap Fluktuasi Cahaya
Rata-rata RGB Seluruh Wajah (Naive Full-Face)	64,17%	62,80%	63,50%	Sangat rentan; terdistorsi piksel bibir, rambut, dan bayangan
Ambang Batas HSV pada ROI Pipi	75,83%	74,20%	76,00%	Moderat; komponen Hue non-linear pada perbatasan merah-magenta
Normalized RGB dengan Multi-ROI Terfokus	81,67%	80,50%	81,10%	Cukup baik; mengeliminasi skala terang namun rentan geseran suhu warna
Model Usulan (Hybrid $L^*a^*b^*$ + Norm-RGB + Multi-ROI)	88,33%	87,39%	87,92%	Sangat stabil; normalisasi Gray-World dan kanal ortogonal independen

Hasil pengujian membuktikan bahwa pendekatan yang diusulkan meningkatkan akurasi klasifikasi sebesar 24,16% dibandingkan metode rata-rata RGB seluruh wajah. Hal ini membuktikan bahwa penentuan ROI spesifik (dahi dan pipi) bersama transformasi ruang warna CIE $L^*a^*b^*$ sangat efektif mengisolasi warna kulit sesungguhnya.

G. Evaluasi Kinerja Perangkat Keras Tertanam (Raspberry Pi 4)

Kinerja komputasi diukur secara real-time pada Raspberry Pi 4 Model B (4 GB RAM) selama 500 frame pemrosesan kontinu untuk memastikan keandalan saat digunakan langsung di toko.

TABEL V
EVALUASI KINERJA PERANGKAT KERAS TERTANAM (RASPBERRY PI 4)

Tahapan Eksekusi Komputasi	Rata-rata Latensi (ms)	Standar Deviasi ($\pm$ ms)	Keterangan Pemrosesan
Akuisisi dan Buffering Citra Kamera	16,4 ms	2,1 ms	Pengambilan frame dari webcam USB Logitech C270
Prapemrosesan & Normalisasi Gray-World	24,8 ms	3,4 ms	Kompensasi temperatur pencahayaan ruangan
Deteksi Landmark Wajah & Ekstraksi Multi-ROI	58,2 ms	5,6 ms	Segmentasi koordinat dahi dan kedua pipi
Konversi Ruang Warna & Inferensi Undertone	14,6 ms	1,8 ms	Eksekusi aturan ambang batas matematis
Rendering Simulasi Virtual Hijab & Web Stream	28,0 ms	4,2 ms	Rendering masker warna pada antarmuka Flask
Total Waktu Respons (End-to-End Latency)	142,0 ms	11,5 ms	Throughput Efektif: ~18,4 Frame Per Detik (FPS)

Selama pengoperasian penuh, utilisasi rata-rata prosesor Quad-Core Cortex-A72 adalah 44,6%, dan penggunaan memori RAM stabil pada 412 MB dari total kapasitas 4 GB. Waktu respons total 142 ms (sekitar 0,14 detik) memastikan

bahwa pengguna mendapatkan hasil rekomendasi secara instan tanpa adanya lag atau gejala thermal throttling pada prosesor mini PC.

H. Validasi Pakar Busana dan Uji Penerimaan Pengguna

Pengujian subjektif dilakukan kepada 120 responden dan 2 orang penata busana profesional menggunakan kuesioner skala Likert (1–5) setelah responden mengenakan jilbab fisik sesuai rekomendasi sistem:

- *Keselarasan Visual Warna*: 89,2% responden menyatakan warna yang direkomendasikan sistem selaras dan membuat tampilan wajah tampak lebih segar.
- *Kecepatan dan Kemudahan Layanan*: 94,1% pengguna merasa sistem mempermudah proses pemilihan dibandingkan metode manual mencoba satu per satu.

Kesesuaian Ahli (Expert Agreement): Ahli busana menyetujui rekomendasi warna sistem pada 110 dari 120 kasus (tingkat keselarasan 91,6%), membuktikan reliabilitas sistem

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan dan memvalidasi sistem komputasi pengolahan citra digital tertanam berbasis Raspberry Pi 4 untuk klasifikasi undertone kulit wajah dan rekomendasi warna hijab secara otomatis dan objektif. Penerapan prapemrosesan multi-zona ROI (dahi dan pipi), normalisasi pencahayaan Gray-World, serta transformasi ruang warna CIE $L^*a^*b^*$ terbukti berhasil mengatasi kelemahan metode RGB konvensional yang rentan terhadap fluktuasi cahaya dan kontaminasi piksel non-kulit. Berdasarkan evaluasi terhadap 120 responden, sistem mencapai akurasi klasifikasi undertone sebesar 88,33% dengan F1-score 0,88 serta tingkat persetujuan ahli busana sebesar 91,6%. Kinerja sistem pada Raspberry Pi 4 beroperasi stabil dengan latensi rata-rata 142 ms (18,4 FPS), beban CPU 44,6%, dan konsumsi RAM 412 MB. Sistem ini terbukti efektif sebagai alat bantu konsultasi busana yang cepat, terukur, dan praktis bagi industri ritel busana muslimah. Penelitian mendatang dapat mengembangkan integrasi Neural Processing Unit (NPU) untuk segmentasi kontur wajah yang lebih dinamis serta penambahan fitur analisis corak motif jilbab.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. W. Widodo, A. D. Ratnasari, L. Hakim, and S. P. Kristanto, "Design and development of presence system using facial and temperature detections based on Raspberry Pi," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 26–33, 2023.
- [2]. L. E. Butarbutar, V. F. Tambunan, S. Davina, and H. Syahputra, "Skinmatch: Rekomendasi warna pakaian berdasarkan undertone kulit menggunakan pengolahan citra digital," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 9, no. 2, pp. 391–397, 2025.
- [3]. F. W. Prabowo, M. H. Adiya, and R. Kurniawan, "Facial skin color classification using deep convolutional neural networks for cosmetic shade matching," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186–195, 2024.
- [4]. A. D. Putri, S. Adrianto, and D. I. Mulyana, "Hijab color recommendation based on skin tone extraction using optimized K-Nearest Neighbor algorithm," *International Journal of Computer Vision and Image Processing*, vol. 14, no. 3, pp. 1742–1755, 2025.
- [5]. Y. Apringdiansyah, E. D. Putra, and A. C. Pratama, "Skin color segmentation using YCbCr color space for robust human face detection," *Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 205–210, 2023.
- [6]. R. Helilintar, "Region of interest selection and feature extraction for biometric pattern analysis," *Journal of Computing and Informatics Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 1248–1255, 2023.
- [7]. M. P. Chae, S. H. Yoon, and K. B. Kim, "Quantitative skin undertone analysis and personalized cosmetics recommendation using CIE $L^*a^*b^*$ color space," *Color Research & Application*, vol. 46, no. 5, pp. 1082–1094, 2021.
- [8]. H. S. Kim and D. W. Park, "Automated facial skin tone estimation under varying illumination using Gray-World color constancy algorithm," *Sensors*, vol. 22, no. 14, p. 5241, 2022.
- [9]. J. M. Alvarez and C. Lopez, "Illumination-invariant skin detection using normalized chromaticity coordinates and adaptive thresholding," *Pattern Recognition Letters*, vol. 112, pp. 98–105, 2020.
- [10]. R. Wijanarko and N. Eko, "Face detection based on skin color segmentation using YCbCr color space and template matching," *Journal of Applied Computer Science and Technology*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2023.
- [11]. S. Saragih, "Implementation of Haar Cascade algorithm using digital image processing for real-time facial attendance system," *Journal of Electrical and Informatics Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 789–798, 2023.
- [12]. A. Rachmaniar, S. Widayati, and K. Rokoyah, "E-commerce product recommendation system using collaborative filtering and content-based filtering," *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 40–54, 2025.
- [13]. E. C. Lee and K. R. Park, "Robust facial landmark tracking and feature extraction for embedded smart mirrors," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 68, no. 2, pp. 142–151, 2022.
- [14]. T. H. Nguyen and S. S. Choi, "Computer vision-based personal color diagnosis framework using skin, hair, and eye spectral properties," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 19, p. 9132, 2021.
- [15]. M. Bilal, M. A. Khan, and U. Tariq, "Real-time edge computing on Raspberry Pi 4 for biometric classification: Benchmarks and optimization," *Embedded Hardware and Systems Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 312–324, 2024.
- [16]. D. H. F. Gomez, R. F. Santos, and L. M. Silva, "Subjective vs. objective evaluation of virtual makeup and drapery simulation in e-commerce applications," *Computers in Industry*, vol. 138, p. 103632, 2022.
- [17]. P. S. Patel and V. K. Singh, "Comparison of RGB, HSV, and CIE Lab color spaces for human skin tone segmentation under uncontrolled illumination," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 81, no. 10, pp. 14321–14340, 2022.
- [18]. Y. Chen, J. Zhang, and X. Liu, "Deep learning-based facial skin tone classification and cosmetic shade matching under dynamic retail lighting," *Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 68, no. 2, pp. 20501–20512, 2024.
- [19]. E. C. Charpentier, L. Flament, and S. Diridollou, "A new method for skin color classification based on global CIELAB data and k-means clustering," *Color Research & Application*, vol. 51, no. 1, pp. 45–58, 2025.
- [20]. M. R. Al-Hammadi and S. A. Al-Ghamdi, "Robust human skin tone segmentation and feature extraction using adaptive thresholding in YCbCr and HSV color models," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 102341–102353, 2023.
- [21]. K. H. Park and S. Y. Shin, "An automated fashion styling recommendation system considering personal color analysis and garment compatibility," *Fashion and Textiles*, vol. 10, no. 1, pp. 1–19, 2023.
- [22]. V. R. Weir, A. C. Halpern, and K. S. Nehal, "Evaluating skin tone scales for dermatologic and computer vision dataset labeling: Objectivity versus perception," *Nature Digital Medicine*, vol. 7, no. 1, pp. 112–124, 2024.
- [23]. A. Ziqri and N. G. Ramadhan, "Recommendation system based on content-based filtering for retail products," *Journal of Software Engineering and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 273–278, 2022.