

PENINGKATAN KUALITAS CITRA WAJAH PADA KONDISI PENCAHAYAAN RENDAH MENGGUNAKAN MULTI-SCALE RETINEX WITH COLOR RESTORATION (MSRCR) UNTUK MENDUKUNG DETEKSI WAJAH

Muhammad Romadhona Kusuma

Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi,
Universitas Darunnajah, Jakarta, Indonesia
m.romadhona.kusuma@darunnajah.ac.id

ABSTRAK

Deteksi wajah pada kondisi pencahayaan rendah masih menjadi tantangan utama dalam sistem analisis wajah karena rendahnya kontras dan hilangnya detail visual yang berdampak pada menurunnya keandalan proses deteksi. Permasalahan ini umumnya disebabkan oleh distribusi pencahayaan yang tidak merata dan dominasi bayangan pada area wajah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas metode Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR) sebagai tahap pra-pemrosesan dalam meningkatkan kualitas citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah serta mendukung kestabilan proses deteksi wajah. Metode MSRCR diterapkan untuk menyeimbangkan pencahayaan global dan lokal sekaligus mempertahankan detail struktural wajah. Evaluasi dilakukan menggunakan Yale Face Database B dan Yale Face Database B+, yang menyediakan variasi pencahayaan ekstrem dan banyak digunakan dalam penelitian deteksi wajah. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa MSRCR mampu meningkatkan kontras dan detail wajah secara signifikan dibandingkan citra asli maupun metode peningkatan kecerahan sederhana, seperti koreksi gamma dan transformasi logaritmik. Selain itu, citra hasil MSRCR menunjukkan artefak visual yang lebih minimal dan memberikan indikasi positif terhadap kestabilan proses deteksi wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa MSRCR efektif digunakan sebagai metode peningkatan citra untuk mendukung sistem deteksi wajah pada lingkungan dengan pencahayaan tidak ideal.

Kata kunci : *Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR); Pencahayaan Rendah; Peningkatan Kualitas Citra; Deteksi Wajah; Pengolahan Citra Digital*

1. PENDAHULUAN

Pengenalan dan deteksi wajah merupakan komponen penting dalam berbagai aplikasi analisis citra dan sistem biometrik, seperti sistem keamanan, autentikasi identitas, dan pengawasan visual. Namun, keandalan sistem analisis wajah sangat dipengaruhi oleh kualitas citra masukan, khususnya kondisi pencahayaan. Variasi intensitas pencahayaan yang tidak terkontrol masih menjadi salah satu permasalahan paling krusial dalam praktik pengenalan dan deteksi wajah [1], [2].

Permasalahan pencahayaan pada citra wajah umumnya muncul dalam dua bentuk utama, yaitu bayangan lokal dan bayangan global. Bayangan lokal dapat mengubah tampilan bagian-bagian penting wajah, seperti mata, hidung, dan mulut, sehingga menyebabkan distorsi kontur dan batas area wajah. Sementara itu, bayangan global dapat menurunkan kontras secara keseluruhan dan menyulitkan sistem dalam membedakan area wajah dari latar belakang, bahkan dalam kondisi ekstrem dapat menyebabkan hilangnya informasi wajah secara signifikan. Kondisi ini berdampak langsung terhadap keandalan proses analisis wajah dan menurunkan performa sistem deteksi wajah secara keseluruhan [1], [2].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai pendekatan telah dikembangkan, terutama melalui tahap pra-pemrosesan citra berupa peningkatan kualitas citra dan normalisasi pencahayaan sebelum proses ekstraksi fitur dilakukan.

Tahap pra-pemrosesan ini terbukti berperan penting dalam meningkatkan visibilitas detail wajah serta menjaga kestabilan proses analisis wajah pada kondisi pencahayaan rendah [3]. Pada citra wajah dengan pencahayaan rendah, kontras cenderung rendah dan detail struktural wajah tidak tampak secara jelas, sehingga diperlukan metode peningkatan citra yang mampu menyeimbangkan distribusi intensitas tanpa menghilangkan informasi penting.

Berbagai metode peningkatan citra pencahayaan rendah telah dikembangkan, mulai dari pendekatan konvensional berbasis pengolahan citra hingga pendekatan berbasis pembelajaran mendalam yang memodelkan komponen pencahayaan secara adaptif [4]. Salah satu pendekatan klasik yang masih banyak digunakan dan relevan hingga saat ini adalah metode berbasis teori Retinex. Teori Retinex memodelkan citra sebagai kombinasi antara komponen reflektansi yang merepresentasikan karakteristik fisik objek dan komponen iluminasi yang bersifat halus secara spasial. Pendekatan ini memungkinkan peningkatan kualitas citra dengan menyeimbangkan pencahayaan global dan mempertahankan detail lokal secara lebih efektif dibandingkan metode peningkatan kecerahan sederhana [5].

Seiring berkembangnya sistem deteksi dan pengenalan wajah berbasis pembelajaran mendalam, citra wajah tidak lagi diproses secara langsung pada level piksel, melainkan ditransformasikan menjadi representasi fitur berdimensi tinggi (embedding).

Kualitas citra masukan memiliki pengaruh penting terhadap kestabilan dan konsistensi embedding yang dihasilkan. Pada kondisi pencahayaan rendah, hilangnya detail wajah dan peningkatan noise dapat menyebabkan degradasi kualitas embedding, yang pada akhirnya menurunkan keandalan proses deteksi dan pengenalan wajah [6].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas algoritma Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR) sebagai metode peningkatan citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Penelitian ini difokuskan pada analisis peran MSRCR sebagai tahap pra-pemrosesan dalam meningkatkan kualitas visual citra wajah serta mendukung kestabilan proses deteksi wajah pada kondisi pencahayaan yang tidak ideal. Rencana penyelesaian masalah dilakukan melalui penerapan MSRCR pada dataset citra wajah dengan variasi pencahayaan ekstrem, diikuti dengan evaluasi visual, kualitatif, serta analisis indikatif terhadap kestabilan representasi embedding wajah sebagai implikasi dari peningkatan kualitas citra.

Kontribusi penelitian ini meliputi: (1) analisis efektivitas MSRCR sebagai metode pra-pemrosesan citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah; (2) evaluasi visual dan kualitatif terhadap dampak peningkatan citra terhadap kestabilan proses deteksi wajah; serta (3) analisis indikatif stabilitas embedding wajah sebagai implikasi dari peningkatan kualitas citra masukan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian tinjauan pustaka menyajikan landasan teoretis dan kajian penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian ini. Pembahasan difokuskan pada karakteristik dataset citra wajah dengan kondisi pencahayaan rendah, metode peningkatan kualitas citra, serta pendekatan yang digunakan dalam analisis dan pemrosesan citra wajah. Tinjauan ini bertujuan untuk memberikan konteks ilmiah, memperkuat dasar metodologis penelitian, serta menunjukkan posisi dan kontribusi penelitian dalam pengembangan studi terkait.

2.1. Dataset dan Karakteristik Data

Penelitian ini menggunakan dataset citra wajah dengan variasi kondisi pencahayaan rendah sebagai data uji. Dataset yang digunakan adalah Yale Face Database B dan perluasannya, yaitu Yale Face Database B+, yang secara luas digunakan sebagai standar de facto dalam penelitian pengenalan dan deteksi wajah pada kondisi pencahayaan tidak ideal [7]. Dataset ini dipilih karena menyediakan variasi pencahayaan yang sistematis dan ekstrem, sehingga sesuai untuk mengevaluasi kinerja metode peningkatan citra pada kondisi cahaya rendah.

Dalam eksperimen ini digunakan sebanyak 2452 citra dari total 2470 citra yang tersedia pada Yale Face Database B dan Yale Face Database B+. Dataset tersebut mencakup 38 subjek, dengan setiap citra

disimpan dalam format grayscale dan berukuran 192×168 piksel.

Citra-citra dalam dataset ini dibagi ke dalam enam subset berdasarkan arah dan intensitas sumber cahaya. Subset 3 hingga Subset 5 merepresentasikan kondisi pencahayaan ekstrem yang sering menyebabkan penurunan signifikan pada keandalan proses deteksi wajah [7], [8]. Contoh citra dari dataset Yale Face Database B ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Contoh citra dari Yale Face Database B dengan variasi kondisi pencahayaan

2.2. Pra-pemrosesan Citra

Sebelum dilakukan peningkatan citra menggunakan metode utama, seluruh citra uji terlebih dahulu melalui tahap pra-pemrosesan. Tahap ini bertujuan untuk memastikan keseragaman format data dan mempersiapkan citra agar dapat diproses secara optimal pada tahap peningkatan pencahayaan. Pra-pemrosesan yang dilakukan meliputi konversi citra ke format grayscale (jika diperlukan) serta normalisasi nilai intensitas piksel ke dalam rentang standar.

Beberapa metode peningkatan kecerahan sederhana, seperti koreksi gamma dan transformasi logaritmik, secara umum sering digunakan untuk menangani citra dengan pencahayaan rendah [9]. Metode-metode tersebut mampu meningkatkan visibilitas area wajah yang semula gelap, namun dalam banyak kasus dapat menimbulkan efek samping seperti hilangnya kontras lokal, munculnya noise, atau distorsi detail citra. Oleh karena itu, dalam penelitian ini metode koreksi gamma dan transformasi logaritmik tidak digunakan sebagai metode utama, melainkan hanya sebagai pembanding dalam analisis visual.

2.3. Peningkatan Citra Menggunakan MSRCR

Metode utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR). MSRCR merupakan metode peningkatan citra berbasis teori Retinex yang dirancang untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah dengan cara menyeimbangkan komponen iluminasi dan mempertahankan detail reflektansi objek [10]. Pendekatan multi-skala memungkinkan metode ini menangkap informasi pencahayaan global sekaligus detail lokal, sehingga lebih efektif dibandingkan metode Retinex skala tunggal [11].

Pada MSRCR, citra masukan diproses melalui beberapa skala Retinex menggunakan fungsi Gaussian dengan ukuran kernel yang berbeda. Fungsi Gaussian berperan sebagai surround function untuk

memodelkan komponen iluminasi pada setiap skala, dengan parameter simpangan baku (σ_i) yang merepresentasikan tingkat detail lokal dan global citra. Hasil dari masing-masing skala kemudian digabungkan untuk memperoleh representasi citra yang lebih stabil terhadap variasi pencahayaan [10], [11].

Secara matematis, proses Retinex pada skala ke- i dinyatakan sebagai berikut:

$$R_i(x, y) = \log I(x, y) - \log[I(x, y) * G(x, y, \sigma_i)] \quad (1)$$

Keterangan:

- $I(x, y)$: citra masukan
- $G(x, y, \sigma_i)$: fungsi Gaussian pada skala ke- i
- σ_i : parameter skala Gaussian

Nilai reflektansi dari beberapa skala kemudian digabungkan secara linier untuk membentuk representasi Multi-Scale Retinex (MSR). Selanjutnya, mekanisme Color Restoration diterapkan untuk menjaga konsistensi intensitas dan mencegah distorsi kontras yang berlebihan, meskipun citra yang digunakan berada dalam format *grayscale* [10].

Dalam penelitian ini, parameter MSRCR disesuaikan secara empiris berdasarkan karakteristik pencahayaan pada Yale Face Database B dan Yale Face Database B+, khususnya pada citra dengan pencahayaan sangat rendah. Penyesuaian parameter dilakukan untuk memperoleh keseimbangan antara peningkatan kecerahan, pelestarian detail wajah, dan minimisasi noise. Hasil peningkatan citra menggunakan MSRCR selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis dampak peningkatan pencahayaan terhadap proses deteksi wajah secara visual dan kualitatif.

2.4. Penelitian Terdahulu Terkait Peningkatan Citra Wajah

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas permasalahan peningkatan citra pada kondisi pencahayaan rendah serta dampaknya terhadap sistem pengenalan dan deteksi wajah. Penelitian oleh Yang et al. [1] dan Guo et al. [2] mengembangkan pendekatan berbasis pembelajaran mendalam untuk meningkatkan kualitas citra low-light dengan fokus pada kualitas visual dan persepsi manusia. Pendekatan ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, namun umumnya memerlukan kompleksitas komputasi yang tinggi serta data pelatihan dalam jumlah besar.

Sebagai alternatif yang lebih ringan secara komputasi, metode peningkatan citra berbasis teori Retinex banyak dikaji. Pan et al. [10] dan Sun et al. [11] menunjukkan bahwa pendekatan Retinex multi-skala mampu meningkatkan kontras dan detail citra pada kondisi pencahayaan rendah secara efektif. Meskipun demikian, sebagian penelitian tersebut masih berfokus pada evaluasi visual umum dan belum secara spesifik membahas implikasi peningkatan citra

terhadap kestabilan proses deteksi atau ekstraksi fitur wajah.

Dalam konteks analisis wajah berbasis pembelajaran mendalam, Wang dan Deng [7] serta Fan et al. [8] menegaskan bahwa kualitas citra masukan memiliki pengaruh signifikan terhadap kestabilan representasi fitur wajah (embedding). Penurunan kualitas citra akibat pencahayaan rendah dapat menyebabkan degradasi embedding dan menurunkan keandalan sistem deteksi wajah. Berdasarkan kajian tersebut, meskipun berbagai metode peningkatan citra telah dikembangkan, sebagian besar penelitian masih menitikberatkan pada kualitas visual citra, sementara analisis terhadap kestabilan representasi fitur wajah sebagai implikasi peningkatan citra masih relatif terbatas. Oleh karena itu, masih diperlukan analisis yang secara khusus mengkaji peran metode Retinex, khususnya Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR), sebagai tahap pra-pemrosesan dalam mendukung kestabilan deteksi wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Penelitian ini berupaya mengisi celah tersebut melalui evaluasi visual, kualitatif, serta analisis indikatif kestabilan embedding wajah.

2.5. Relevansi Peningkatan Citra terhadap Sistem Deteksi Wajah Berbasis Deep Learning

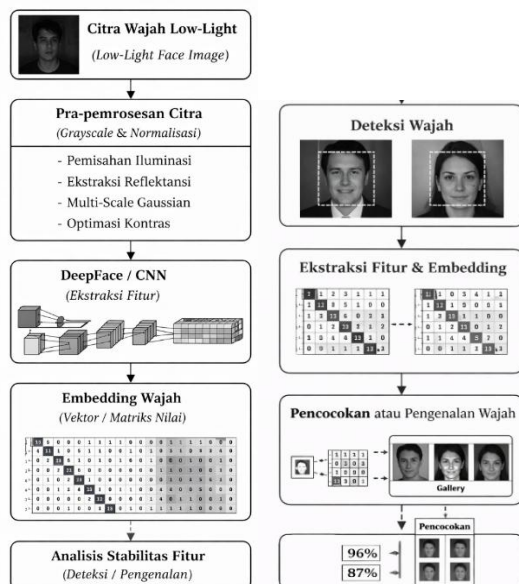
Dalam sistem deteksi dan pengenalan wajah berbasis pembelajaran mendalam, seperti DeepFace, kualitas citra masukan memiliki peran penting dalam kestabilan proses ekstraksi fitur. Model DeepFace mengekstraksi representasi wajah berdimensi tinggi (embedding) yang sensitif terhadap perubahan kontras, bayangan, dan noise [12]. Pada kondisi pencahayaan rendah, distribusi intensitas yang tidak merata dapat menyebabkan degradasi kualitas embedding wajah, sehingga menurunkan keandalan proses analisis dan deteksi wajah [8], [9].

Oleh karena itu, peningkatan citra menggunakan Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR) dapat dipandang sebagai tahap pra-pemrosesan yang bertujuan untuk memperbaiki kualitas visual citra sebelum diproses oleh jaringan saraf dalam. Dengan pencahayaan yang lebih seimbang dan detail wajah yang lebih terjaga, representasi fitur yang dihasilkan oleh model deep learning diharapkan menjadi lebih stabil dan representatif. Kondisi ini pada akhirnya dapat memberikan dukungan terhadap peningkatan keandalan proses deteksi wajah pada kondisi pencahayaan yang tidak ideal [10], [12].

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi efektivitas peningkatan kualitas citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah menggunakan metode Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR). Penelitian difokuskan pada analisis peran MSRCR sebagai tahap pra-pemrosesan dalam meningkatkan kualitas visual citra wajah sebelum digunakan pada sistem deteksi dan pengenalan wajah.

Alur metode penelitian ditunjukkan pada Gambar 2, yang menggambarkan tahapan pemrosesan citra wajah secara keseluruhan dalam satu kesatuan alur. Citra wajah dengan pencahayaan rendah digunakan sebagai masukan, kemudian melalui tahap pra-pemrosesan yang mencakup normalisasi intensitas dan peningkatan kontras. Selanjutnya, metode MSRCR diterapkan untuk meningkatkan kualitas citra dengan menyeimbangkan komponen iluminasi dan mempertahankan detail reflektansi wajah.



Gambar 2. Alur metode peningkatan citra wajah pencahayaan rendah menggunakan MSRCR

Citra hasil peningkatan selanjutnya dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan pencahayaan terhadap kualitas visual dan kestabilan hasil deteksi wajah. Pada tahap ini, citra hasil MSRCR digunakan sebagai masukan pada sistem deteksi dan pengenalan wajah berbasis ekstraksi fitur untuk mengamati perubahan kualitas representasi fitur secara visual dan kualitatif, tanpa melakukan modifikasi pada arsitektur model yang digunakan.

Secara keseluruhan, metode penelitian ini mencakup tiga tahapan utama, yaitu pra-pemrosesan citra wajah dengan pencahayaan rendah, peningkatan kualitas citra menggunakan metode MSRCR, serta analisis dampak peningkatan citra terhadap kestabilan proses deteksi dan pengenalan wajah. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi yang terfokus terhadap efektivitas MSRCR sebagai metode peningkatan citra pada kondisi pencahayaan yang tidak ideal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil eksperimen serta pembahasan mengenai pengaruh proses peningkatan dan restorasi citra terhadap kualitas visual citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Analisis difokuskan pada perubahan karakteristik visual citra sebelum dan sesudah dilakukan peningkatan menggunakan metode Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR), serta implikasinya terhadap kestabilan

proses deteksi wajah. Evaluasi dilakukan secara visual dan kualitatif dengan memperhatikan aspek kontras, detail wajah, dan artefak visual yang muncul pada citra hasil.

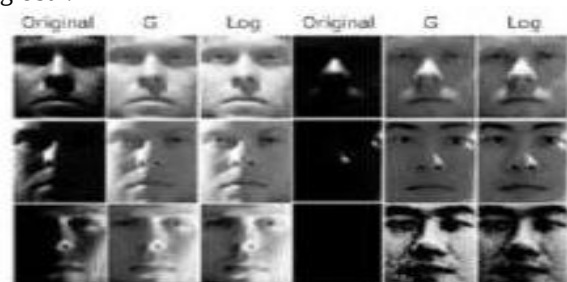
4.1. Analisis Citra Pra-restorasi

Citra wajah dengan kondisi pencahayaan rendah menunjukkan keterbatasan kualitas visual yang signifikan sebelum dilakukan proses restorasi. Area wajah yang berada pada bayangan gelap sulit dibedakan dari latar belakang, sementara detail penting seperti kontur wajah, mata, hidung, dan mulut tidak tampak secara jelas. Ketidakseimbangan intensitas pencahayaan ini menyebabkan distribusi intensitas piksel menjadi tidak merata dan berdampak langsung pada menurunnya keandalan proses deteksi wajah [13].

Pada kondisi pencahayaan ekstrem, bayangan global maupun lokal mendominasi citra sehingga informasi reflektansi objek wajah tidak dapat diekstraksi secara optimal. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya proses restorasi yang memadai, citra wajah dengan pencahayaan rendah belum memenuhi kualitas visual minimum yang dibutuhkan untuk mendukung proses deteksi wajah secara stabil [14].

4.2. Perbandingan dengan Metode Peningkatan Kecerahan Sederhana

Perbandingan dilakukan antara metode peningkatan citra yang digunakan dalam penelitian dengan metode peningkatan kecerahan sederhana, yaitu koreksi gamma dan transformasi logaritmik, untuk menggambarkan karakteristik serta keterbatasannya dalam menangani citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3, kedua metode tersebut mampu meningkatkan tingkat kecerahan citra secara global.



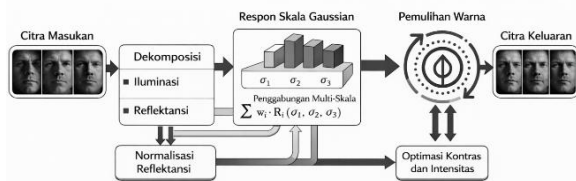
Gambar 3. Perbandingan hasil peningkatan kecerahan citra wajah menggunakan metode koreksi gamma dan transformasi logaritmik

Beberapa bagian wajah yang sebelumnya tersembunyi dalam bayangan dapat terlihat kembali setelah proses peningkatan diterapkan. Namun demikian, peningkatan kecerahan global tersebut sering kali disertai dengan munculnya artefak visual, seperti area terang berlebih (*over-exposure*), penurunan kontras lokal, serta peningkatan noise, sehingga metode peningkatan kecerahan sederhana

kurang mampu memberikan keseimbangan antara peningkatan visibilitas dan pelestarian struktur wajah serta berpotensi menurunkan kestabilan proses deteksi wajah apabila digunakan sebagai tahap pra-pemrosesan utama.

4.3. Analisis Proses Restorasi Citra Menggunakan MSRCR

Untuk memberikan gambaran visual mengenai tahapan restorasi citra yang terjadi pada metode MSRCR, Gambar 4 menyajikan ilustrasi proses peningkatan citra dari citra masukan hingga citra keluaran. Ilustrasi tersebut menunjukkan bagaimana citra wajah dengan pencahayaan rendah diproses secara bertahap untuk menghasilkan citra dengan kualitas visual yang lebih baik.



Gambar 4. Ilustrasi tahapan proses restorasi citra menggunakan metode Multi-Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR).

Ilustrasi ini menunjukkan tahapan restorasi yang terjadi pada citra wajah dengan pencahayaan rendah, meliputi pemisahan komponen iluminasi dan reflektansi, pemrosesan multi-skala berbasis Gaussian, serta optimasi kontras dan intensitas hingga menghasilkan citra keluaran dengan kualitas visual yang lebih baik.

Pada tahap awal, citra masukan mengalami pemisahan konseptual antara komponen iluminasi dan reflektansi. Pemisahan ini memungkinkan proses peningkatan pencahayaan difokuskan pada komponen iluminasi tanpa mengorbankan detail struktural wajah yang direpresentasikan oleh komponen reflektansi. Selanjutnya, komponen reflektansi diproses pada beberapa skala menggunakan fungsi Gaussian dengan ukuran kernel yang berbeda, sehingga informasi detail lokal dan pencahayaan global dapat ditangkap secara bersamaan.

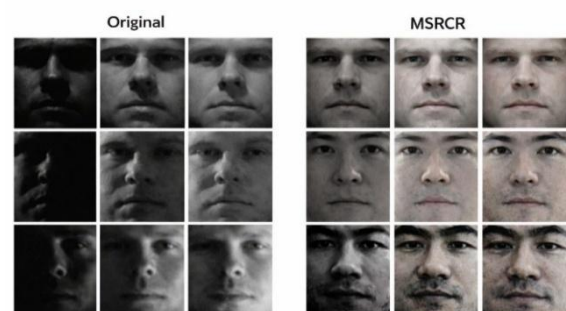
Penggabungan hasil pemrosesan multi-skala menghasilkan citra dengan distribusi intensitas yang lebih seimbang. Bayangan pada area wajah dapat direduksi secara bertahap, sementara detail penting seperti kontur wajah, mata, dan hidung tetap terjaga. Tahap optimasi kontras dan intensitas selanjutnya berperan dalam menyesuaikan rentang dinamis citra agar tidak terjadi peningkatan kecerahan yang berlebihan. Mekanisme color restoration atau pemulihan intensitas memastikan bahwa citra keluaran memiliki tampilan visual yang lebih natural dan stabil

4.4. Dampak Restorasi Peningkatan Citra terhadap Kualitas Visual dan Deteksi Wajah

Hasil restorasi citra menggunakan MSRCR menunjukkan peningkatan kualitas visual yang lebih

konsisten dibandingkan metode peningkatan kecerahan sederhana. Citra hasil MSRCR memiliki kontras yang lebih seimbang, detail wajah yang lebih jelas, serta artefak visual yang relatif minimal. Bayangan yang sebelumnya mendominasi citra dapat dikurangi secara signifikan tanpa menyebabkan distorsi berlebih pada area terang.

Peningkatan kualitas visual ini memberikan dampak positif terhadap kestabilan proses deteksi wajah. Dengan distribusi intensitas yang lebih merata dan detail wajah yang lebih terjaga, proses deteksi wajah dapat berjalan lebih stabil pada kondisi pencahayaan rendah. Hal ini menunjukkan bahwa MSRCR efektif digunakan sebagai proses restorasi citra yang mendukung sistem deteksi wajah pada lingkungan dengan pencahayaan tidak ideal.

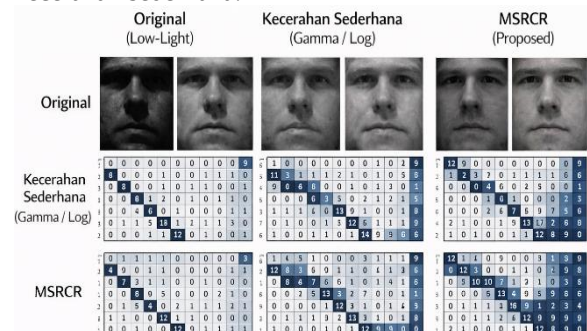


Gambar 5. Perbandingan citra wajah sebelum dan sesudah peningkatan menggunakan metode Multi Scale Retinex with Color Restoration (MSRCR)

Tabel 1. Evaluasi Kualitatif Kualitas Citra Restorasi Pada Kondisi Cahaya Rendah

Metode	Kontras	Noise	Detail Wajah	Kualitas Visual
Original	Rendah	Rendah	Buruk	Buruk
Gamma	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang
Log	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang
MSRCR	Tinggi	Rendah	Baik	Baik

Tabel 1 menyajikan evaluasi kualitatif terhadap kualitas citra hasil restorasi pada kondisi pencahayaan rendah. Berdasarkan penilaian visual, metode MSRCR menunjukkan keseimbangan terbaik antara peningkatan kontras, minimisasi noise, dan pelestarian detail wajah dibandingkan metode peningkatan kecerahan sederhana.



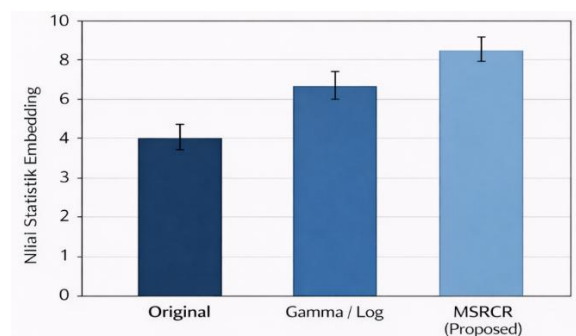
Gambar 6. Perbandingan hasil peningkatan citra wajah dan stabilitas representasi embedding pada kondisi pencahayaan rendah

Gambar 5 dan Gambar 6 memperlihatkan bahwa peningkatan citra menggunakan MSRCR tidak hanya berdampak pada perbaikan kualitas visual, tetapi juga berimplikasi pada kestabilan representasi embedding wajah. Pada citra dengan pencahayaan rendah, distribusi intensitas yang tidak merata pada citra asli maupun hasil peningkatan kecerahan sederhana (γ /log) menghasilkan pola embedding yang kurang konsisten. Sebaliknya, citra hasil MSRCR menunjukkan pola embedding yang lebih stabil dan terstruktur, yang mengindikasikan bahwa detail wajah dan informasi diskriminatif dapat dipertahankan dengan lebih baik. Temuan ini mengindikasikan bahwa MSRCR berpotensi menjadi tahap pra-pemrosesan yang efektif dalam mendukung kestabilan proses deteksi wajah pada kondisi pencahayaan tidak ideal.

4.5. Analisis Statistik Sederhana Embedding Wajah

Untuk melengkapi analisis visual, dilakukan analisis statistik sederhana terhadap nilai embedding wajah yang dihasilkan pada tiga kondisi citra, yaitu citra asli, citra dengan peningkatan kecerahan sederhana, dan citra hasil restorasi menggunakan MSRCR. Analisis ini bertujuan untuk memberikan indikasi tambahan mengenai kestabilan representasi fitur wajah sebagai implikasi dari peningkatan kualitas citra.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa embedding yang dihasilkan dari citra hasil MSRCR cenderung lebih stabil dan konsisten dibandingkan embedding dari citra asli maupun citra dengan peningkatan kecerahan sederhana. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kualitas citra melalui MSRCR berkontribusi positif terhadap representasi fitur wajah, meskipun evaluasi dilakukan secara sederhana dan tidak dimaksudkan sebagai pengukuran performa kuantitatif sistem pengenalan wajah.



Gambar 7. Perbandingan nilai statistik embedding wajah pada berbagai metode peningkatan citra.

Pada gambar 7 menunjukkan perbandingan nilai statistik embedding wajah yang dihasilkan dari citra wajah asli (Original), citra dengan peningkatan kecerahan sederhana (γ /Log), dan citra hasil peningkatan menggunakan metode Multi-Scale

Retinex with Color Restoration (MSRCR). Nilai statistik embedding digunakan sebagai indikator kestabilan representasi fitur wajah setelah citra melalui proses peningkatan kualitas. Berdasarkan grafik tersebut, citra asli menghasilkan nilai embedding terendah yang mencerminkan keterbatasan kualitas representasi fitur akibat kondisi pencahayaan rendah, sedangkan metode peningkatan kecerahan sederhana, seperti koreksi γ dan transformasi logaritmik, mampu meningkatkan nilai embedding namun masih menunjukkan variasi yang relatif tinggi. Sebaliknya, citra hasil peningkatan menggunakan MSRCR menghasilkan nilai embedding tertinggi dengan tingkat variasi yang lebih kecil, yang mengindikasikan representasi fitur wajah yang lebih stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan citra menggunakan MSRCR memberikan dampak positif terhadap kualitas citra masukan dan mampu mendukung kestabilan proses ekstraksi fitur wajah dibandingkan metode peningkatan kecerahan sederhana pada kondisi pencahayaan rendah.

4.6. Diskusi

Secara keseluruhan, hasil eksperimen dan analisis visual menunjukkan bahwa proses restorasi citra memiliki peranan penting dalam meningkatkan keandalan sistem deteksi wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Metode peningkatan kecerahan sederhana mampu meningkatkan visibilitas secara global, namun masih memiliki keterbatasan dalam mempertahankan detail wajah dan mengendalikan artefak visual, sedangkan metode *Multi-Scale Retinex with Color Restoration* (MSRCR) mampu memberikan keseimbangan yang lebih baik antara peningkatan kecerahan, pelestarian detail struktural, dan kestabilan visual. Temuan ini memperkuat indikasi bahwa peningkatan kualitas citra berkontribusi langsung terhadap kestabilan proses ekstraksi fitur pada sistem pengenalan wajah berbasis pembelajaran mendalam, tanpa mengklaim evaluasi performa secara kuantitatif.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa metode *Multi-Scale Retinex with Color Restoration* (MSRCR) efektif dalam meningkatkan kualitas citra wajah pada kondisi pencahayaan rendah. Penerapan MSRCR mampu menyeimbangkan pencahayaan global dan lokal, meningkatkan kontras, serta mempertahankan detail struktural wajah yang sebelumnya sulit teramati akibat bayangan dan distribusi intensitas yang tidak merata. Dibandingkan citra asli maupun metode peningkatan kecerahan sederhana, seperti koreksi γ dan transformasi logaritmik, MSRCR menghasilkan kualitas visual yang lebih konsisten dan natural dengan artefak visual yang relatif minimal. Pengujian pada Yale Face Database B dan Yale Face Database B+ menunjukkan bahwa peningkatan kualitas citra menggunakan MSRCR memberikan dampak positif terhadap kestabilan proses deteksi

wajah, khususnya pada kondisi pencahayaan ekstrem yang umumnya menurunkan keandalan sistem deteksi.

Sebagai saran, metode MSRCR dapat direkomendasikan sebagai tahap pra-pemrosesan citra yang efektif dan relatif sederhana untuk mendukung sistem deteksi wajah pada lingkungan dengan pencahayaan tidak ideal. Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada integrasi MSRCR ke dalam sistem deteksi wajah berbasis pembelajaran mendalam secara end-to-end serta dilengkapi dengan evaluasi kuantitatif menggunakan metrik performa yang relevan untuk memperoleh analisis yang lebih komprehensif dan objektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan kontribusi dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada rekan sejawat atas masukan yang konstruktif, serta kepada keluarga, khususnya istri, atas dukungan moral dan doa selama proses penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Yang, S. Wang, Y. Fang, Y. Wang, and J. Liu, "From fidelity to perceptual quality: A semi-supervised approach for low-light image enhancement," in Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020.
- [2] C. Guo, C. Li, and C. C. Loy, "Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement," in Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2020.
- [3] L. Ma, T. Liu, R. Shuai, X. Zhang, L. Li, and C. Chen, "Toward fast, flexible, and robust low-light image enhancement," in Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022.
- [4] Y. Cai, H. Bian, J. Lin, H. Wang, R. Timofte, and Y. Zhang, "Retinexformer: One-stage Retinex-based transformer for low-light image enhancement," in Proc. IEEE/CVF Int. Conf. Computer Vision (ICCV), 2023.
- [5] S. W. Zamir et al., "Restormer: Efficient transformer for high-resolution image restoration," in Proc. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2022.
- [6] W. Liu et al., "Benchmarking low-light image enhancement and beyond," International Journal of Computer Vision, 2021.
- [7] M. Wang and W. Deng, "Deep face recognition: A survey," Neurocomputing, vol. 429, pp. 215–244, 2021.
- [8] Y. Fan et al., "Low-FaceNet: Face recognition-driven low-light image enhancement," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 73, pp. 1–13, 2024.
- [9] R. B. Theofilus, O. J. Dharmadinata, and I. Negara, "Low-light face detection using deep learning," Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2022.
- [10] X. Pan et al., "Low-light image enhancement method based on Retinex theory," Applied Sciences, vol. 12, no. 10, 2022.
- [11] Y. Sun et al., "Low-illumination image enhancement algorithm based on improved multi-scale Retinex," Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2022.
- [12] Z. Wang et al., "Retinex decomposition based low-light image enhancement," IET Image Processing, 2024.
- [13] J. Guo et al., "A survey on image enhancement for low-light images," Heliyon, 2023.
- [14] R. Alrawili, A. A. S. AlQahtani, M. K. Khan, et al., "Comprehensive survey: Biometric user authentication application, evaluation, and discussion," 2023.