JURNAL REKAYASA INFORMATIKA (JRIT),
Vol 2, No.2 2025, Hal.47-55

ISSN : 3089-5375

Optimasi Histogram Equalization untuk Peningkatan Kualitas Citra Digital

Naufal Rafi Hanifan[1], Alam Rahmatulloh[2],
Program studi Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Siliwangi
Jl. Mugarsari, Kec. Tamansari, Tasikmalaya, Jawa Barat 46196
Corresponding Author: 227006148@student.unsil.ac.id[1] alam@unsil.ac.id[2]

Info Artikel

Histori Artikel:

Dikirim 01-12-2025
Revisi 07-12-2025
Diterima 14-12-2025

CLAHE
Kontras
Entropy
MSE
PSNR

ABSTRAK

Kualitas citra digital sering menurun akibat ketidakseimbangan pencahayaan, rendahnya kontras, serta gangguan visual lainnya yang membuat informasi pada citra sulit dikenali. Kondisi tersebut dapat menghambat proses analisis pada berbagai bidang, seperti medis, penginderaan jauh, maupun pemrosesan dokumen. Penelitian ini bertujuan meningkatkan kualitas citra dengan *menerapkan Histogram Equalization (HE)* dan metode turunannya, *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE*). Pengujian dilakukan pada sejumlah citra grayscale dengan bantuan MATLAB, dan kinerja masing-masing metode dievaluasi menggunakan *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR*), *Mean Square Error (MSE), dan Entropy*. Berdasarkan hasil pengolahan, CLAHE menunjukkan peningkatan kualitas yang lebih konsisten, tercermin dari nilai *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*dan *Entropy* yang lebih tinggi serta nilai Mean Square Error yang lebih rendah dibandingkan *HE* pada berbagai jenis citra. Temuan ini menunjukkan bahwa *CLAHE* lebih mampu menghasilkan citra dengan tingkat ketajaman dan distribusi intensitas yang lebih baik, sehingga berpotensi meningkatkan ketepatan tahap analisis lanjutan dalam pemrosesan citra digital.

Article Info

Article history:
Received 01-12-2025
Revised 07-12-2025
Accepted 14-12-2025

Keywords:
CLAHE
Contrast
Entropy
MSE
PSNR

ABSTRACT

The quality of digital images often decreases due to uneven lighting, low contrast, and various visual disturbances that make important details difficult to recognize. These limitations can affect the accuracy of analysis in fields such as medical imaging, remote sensing, and document processing. This study aims to improve image quality by applying Histogram Equalization (HE) and its variant, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). Several grayscale images were processed using MATLAB, and the performance of both methods was assessed through Peak Signal-to-Noise Ratio, Mean Square Error, and Entropy measurements. The results show that CLAHE provides more consistent improvements, indicated by higher Peak Signal-to-Noise Ratio and Entropy values, along with lower Mean Square Error compared to HE across different image types. These findings demonstrate that CLAHE is more capable of producing images with clearer intensity distribution and improved visual clarity, which can support more accurate analysis in subsequent image processing tasks.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital yang pesat telah meningkatkan kebutuhan terhadap citra berkualitas tinggi di berbagai bidang seperti medis, keamanan, penginderaan jauh, dan sistem pengenalan pola. Citra yang baik mampu memberikan informasi visual yang akurat dan mudah dianalisis. Pada praktiknya, citra sering mengalami penurunan mutu akibat pencahayaan tidak merata, noise, kabur, atau kesalahan dalam proses akuisisi sehingga menyebabkan rendahnya kontras dan ketidakmerataan distribusi intensitas piksel[1]. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk meningkatkan kualitas citra adalah *image enhancement*, yaitu proses memperbaiki tampilan visual agar informasi di dalamnya menjadi lebih jelas. Di antara berbagai metode peningkatan kualitas citra, *Histogram Equalization (HE)* merupakan teknik yang sederhana dan efektif untuk redistribusi intensitas piksel sehingga kontras citra meningkat secara global[2][3].

Meskipun *HE* efektif, metode ini memiliki keterbatasan berupa pergeseran tingkat kecerahan *(mean brightness shifting)* dan munculnya artefak pada citra dengan distribusi intensitas yang tidak homogen . Hal ini dapat menurunkan kualitas visual dan mengurangi ketepatan analisis, terutama pada citra dengan tekstur halus atau kontras rendah. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, berbagai pengembangan telah dilakukan, di antaranya *Adaptive Histogram Equalization (AHE), Contrast Limited AHE (CLAHE), Bi-Histogram Equalization (BHE*), dan *Multi-Histogram Equalization (MHE)* yang berfokus pada pelestarian kecerahan dan peningkatan detail lokal [4][5]. Meskipun metode tersebut memberikan hasil yang lebih baik, sebagian besar masih menghadapi tantangan dalam menentukan ambang optimal untuk pembagian histogram serta menjaga efisiensi komputasi [6].

Penelitian terkini menunjukkan, pendekatan optimasi berbasis algoritma metaheuristik mulai digunakan untuk meningkatkan kinerja HE. Metode seperti *Artificial Bee Colony (ABC)* dan *Bacteria Colony Optimization (BCO)* telah berhasil mengoptimalkan nilai ambang pembagian histogram agar diperoleh keseimbangan antara peningkatan kontras dan pelestarian kecerahan [7]. Selain itu, penelitian terkini juga menggabungkan HE dengan pendekatan fuzzy logic dan bilateral filtering guna memperhalus distribusi intensitas serta menekan noise tanpa mengorbankan detail citra [3][5]. Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, dapat disimpulkan bahwa pengembangan dan optimasi *Histogram Equalization* masih menjadi topik penting dalam bidang pengolahan citra digital. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada optimasi metode *Histogram Equalization* untuk peningkatan kualitas citra digital, dengan tujuan menghasilkan citra yang memiliki kontras tinggi, distribusi intensitas seimbang, dan kecerahan alami yang terjaga. penelitian ini berfokus pada optimasi metode *Histogram Equalization* melalui perbandingan performa antara *HE dan CLAHE* pada berbagai jenis citra digital menggunakan metrik *PSNR, MSE, dan Entropy*

2. Pekerjaan Terkait

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan kualitas citra digital dengan menerapkan teknik *Histogram Equalization (HE).* Daeng dan Mau [2] meneliti pengaruh HE terhadap perbaikan kualitas citra digital dan menyimpulkan bahwa metode ini mampu memperbaiki kontras serta distribusi intensitas piksel, meskipun masih menimbulkan efek *over-enhancement* pada area tertentu. Studi oleh JITE [4] melakukan perbandingan antara *HE, AHE, dan CLAHE* pada citra jalan malam dan memperoleh hasil bahwa CLAHE menghasilkan nilai PSNR tertinggi. Walaupun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada satu jenis objek citra, sehingga belum dapat memberikan gambaran menyeluruh terhadap performa metode pada karakteristik citra yang berbeda, seperti citra medis, wajah, atau pemandangan alami.. Kenyta dan Wonohadidjojo [6] kemudian menerapkan *HE* pada perangkat Android dan menemukan bahwa meskipun peningkatan kontras signifikan, metode ini belum mampu mempertahankan tingkat kecerahan asli gambar.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, Majeed et al. [8] mengembangkan pendekatan hibrida dengan menggabungkan *AHE* dan fuzzy logic, yang terbukti mampu meningkatkan kontras tanpa menghilangkan detail tekstur serta mengurangi efek noise.. Pendekatan serupa juga dilakukan oleh Mondal dan Chatterjee [7], melalui penerapan *Bacteria Colony Optimization (BCO)* guna menentukan ambang pembagian histogram secara adaptif. Metode ini menunjukkan stabilitas yang lebih baik dalam menjaga nilai *mean brightness* dibandingkan *HE* standar, meskipun kompleksitas komputasinya relatif meningkat. Dalam konteks pengenalan pola. Safrizal dan Kaswidjanti [9] memanfaatkan HE sebagai tahap preprocessing pada klasifikasi rempah menggunakan algoritma *K-Nearest Neighbor (KNN).* Penerapan HE terbukti mampu meningkatkan akurasi klasifikasi dari 73,8% menjadi 76,1%, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kualitas citra berkontribusi terhadap performa sistem klasifikasi. Namun demikian, penelitian tersebut tidak secara khusus membahas kestabilan kontras dan kecerahan hasil peningkatan citra secara visual maupun kuantitatif.

Selanjutnya, Singh dan Kaur [5] dengan mengoptimasi *Multi-Histogram Equalization (MHE)* menggunakan algoritma *Artificial Bee Colony (ABC)* guna menjaga keseimbangan antara peningkatan kontras dan pelestarian kecerahan Surmayanti dan Sumijan [5] meneliti peningkatan kejernihan citra digital menggunakan HE dan melaporkan penurunan nilai *Mean Square Error (MSE)* serta peningkatan *Signal to Noise Ratio (SNR)*, walaupun metode tersebut masih berpotensi menimbulkan distorsi intensitas pada area tertentu.Dalam bidang medis, Winarno et al. [1] menerapkan HE untuk meningkatkan kualitas citra radiografi lumbosacral dan memperoleh perbaikan visual yang signifikan untuk kebutuhan diagnostik. Namun penelitian ini belum membandingkannya dengan metode adaptif lain seperti *CLAHE.*. Sementara Wu dan Zhong [3] mengombinasikan HE dengan bilateral filtering sehingga mampu meningkatkan kontras sekaligus menekan noise tanpa menghilangkan detail tepi, meskipun pendekatan tersebut memerlukan parameter khusus yang bersifat empiris.

Dari sisi pengembangan teoretis, Reza [11] memperkenalkan *metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)* untuk menghindari efek *over-enhancement* pada area homogen. Kim [12] mengusulkan Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization (BBHE) agar nilai kecerahan asli tetap terjaga, sementara Kim Y. [13] menyempurnakan metode tersebut *melalui Fuzzy Intensity Measure and Adaptive Clipping Histogram Equalization (FIMHE)* yang menyesuaikan parameter peningkatan kontras berdasarkan karakteristik histogram citra. Selain itu, Sebagai Tambahan, Goni et al. [14] mengaplikasikan HE pada citra satelit dan menemukan bahwa metode ini meningkatkan visibilitas area gelap tanpa mengorbankan detail di area terang. Meskipun berbagai metode tersebut telah menunjukkan keberhasilan dalam meningkatkan kualitas citra, sebagian besar penelitian masih terbatas pada objek citra tertentu, penggunaan parameter empiris yang kurang adaptif, serta belum melakukan evaluasi komparatif lintas jenis citra secara menyeluruh.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun HE dan metode turunannya telah banyak dikembangkan, masih terdapat kesenjangan penelitian terutama dalam optimasi parameter adaptif agar sesuai dengan berbagai karakteristik citra serta evaluasi komprehensif yang membandingkan efektivitas *HE dan CLAHE* pada beberapa kategori citra sekaligus. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada analisis komparatif metode HE dan CLAHE menggunakan metrik *PSNR, MSE, dan Entropy* sebagai upaya untuk mengkaji peningkatan kualitas citra secara visual dan kuantitatif guna memperoleh metode yang paling optimal dalam menjaga keseimbangan kontras, kecerahan, dan detail citra.

Tabel 1. State of the Art Penelitian Terkait Peningkatan Kualitas Citra

NO	Peneliti & Tahun	Metode Penelitian	Temuan Utama	Keterbatas Penelitian
1	Daeng & Mau (2016) [2]	Penerapan *Histogram Equalization (HE)* pada citra digital umum	HE terbukti meningkatkan kontras dan meratakan distribusi intensitas sehingga detail citra menjadi lebih jelas	Menghasilkan over-enhancement pada area terang dan tidak menjaga kestabilan kecerahan citra
2	Surmayanti & Sumijan (2024) []	HE untuk perbaikan citra ber-noise	HE mampu meningkatkan kejernihan, menurunkan MSE, dan meningkatkan SNR	Tidak mengevaluasi **p***elestarian brightness* serta belum

NO	Peneliti & Tahun	Metode Penelitian	Temuan Utama	Keterbatas Penelitian
				membandingkan dengan metode adaptif seperti CLAHE
3	Reza (2004) [12]	Pengenalan metode CLAHE untuk image enhancement	CLAHE efektif membatasi peningkatan kontras sehingga menghindari over-enhancement area homogen	Sensitif terhadap pemilihan parameter clip limit dan jumlah tile
4	Winarno et al. (2022) [1]	HE pada citra radiografi medis	Meningkatkan kualitas visual citra medis	Detail jaringan halus masih berpotensi terdistorsi
5	Singh & Kaur (2023) [11]	Artificial Bee Colony (ABC) Optimized Multi-Histogram Equalization	Optimasi ABC mampu menjaga keseimbangan peningkatan kontras dan brightness	Komputasi kompleks dan belum diuji pada banyak variasi jenis citra

Berdasarkan lima penelitian utama tersebut, dapat dilihat bahwa HE konvensional efektif meningkatkan kontras namun menyebabkan distorsi kecerahan [2][5]. Pengembangan metode seperti CLAHE memperbaiki stabilitas visual dengan membatasi peningkatan kontras secara lokal [11], tetapi masih bergantung pada parameter yang tidak adaptif. Penerapan HE pada domain khusus seperti citra medis juga menunjukkan keberhasilan meningkatkan kualitas visual diagnostik, meskipun masih menyisakan tantangan pada detail jaringan halus [1]. Pendekatan optimasi berbasis algoritma metaheuristik melalui ABC pada Multi-HE [10] memberikan solusi adaptif yang lebih baik, namun biaya komputasinya relatif tinggi dan belum diuji luas pada berbagai jenis citra. Oleh karena itu, masih terdapat celah penelitian pada pengembangan metode peningkatan kontras yang mampu bekerja adaptif, efisien, serta stabil pada beragam karakter citra digital.

3. Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian ini menjelaskan tahapan dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian berjudul Optimasi Image Enhancement pada Citra Digital Menggunakan Metode Histogram Equalization. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk mengimplementasikan dan menguji berbagai metode peningkatan kualitas citra digital.

3.1. Desain Penelitian

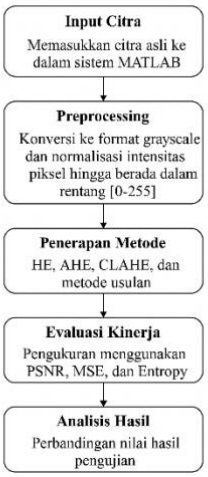
Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental yang bertujuan membandingkan performa empat metode peningkatan kualitas citra, yaitu Histogram Equalization (HE), Adaptive Histogram Equalization (AHE), Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), dan metode usulan berupa optimasi HE berbasis filter adaptif dan fungsi keanggotaan fuzzy. Pengujian dilakukan menggunakan dataset citra digital dengan karakteristik berbeda untuk mengevaluasi kualitas hasil berdasarkan nilai PSNR, MSE, dan Entropy.

3.2. Dataset Penelitian

Dataset penelitian terdiri dari sepuluh citra digital grayscale berformat .jpg dan .png dengan resolusi 512×512 piksel. Citra-citra tersebut diambil dari dataset publik seperti UCID dan kumpulan citra medis radiografi yang digunakan dalam penelitian Winarno et al. [1]. Setiap citra dikonversi ke grayscale untuk menghilangkan pengaruh warna dan memfokuskan analisis pada distribusi intensitas piksel.

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dijelaskan pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

a. Input Citra
   Proses dimulai dengan memasukkan citra asli ke dalam sistem MATLAB untuk dilakukan analisis awal.
b. Preprocessing
   Citra dikonversi ke format grayscale dan dilakukan normalisasi intensitas piksel agar berada dalam rentang [0–255].
c. Penerapan Metode
   Setiap metode (HE, AHE, CLAHE, dan metode usulan) diterapkan untuk meningkatkan kualitas citra.
d. Evaluasi Kinerja
   Kinerja dari masing-masing metode diukur menggunakan parameter PSNR, MSE, dan Entropy.
e. Analisis Hasil
   Nilai hasil pengujian dibandingkan untuk menentukan metode dengan hasil terbaik dalam peningkatan kontras dan pelestarian kecerahan.

3.4 Implementasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2023a. MATLAB digunakan karena memiliki pustaka pengolahan citra lengkap dan kemampuan perhitungan numerik yang tinggi. Spesifikasi perangkat keras yang digunakan adalah laptop dengan prosesor Intel Core i7, RAM 16 GB, dan sistem operasi Windows 11.

3.5 Evaluasi dan Analisis

Setiap citra hasil diproses untuk mendapatkan nilai PSNR, MSE, dan Entropy. Hasil pengujian dari setiap metode dibandingkan secara kuantitatif. Nilai rata-rata dari seluruh citra digunakan sebagai acuan untuk menentukan metode terbaik.

$$MSE = \frac{1}{MN}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}[I(i,j) - K(i,j))^2 \quad (6)$$

$$PSNR = 10log_{10}(\frac{MAX^2}{MSE}) \quad (7)$$

$$Entropy = -\sum_{i=0}^{L-1} p(i)Log_2\, p(i) \quad (8)$$

3.6 Pengujian Metode

Seluruh citra diuji pada keempat metode peningkatan kualitas. Setiap metode menghasilkan nilai PSNR, MSE, dan Entropy untuk masing-masing citra. Nilai rata-rata digunakan sebagai indikator performa metode.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menguji 4 jenis citra digital yang mewakili berbagai kondisi pencahayaan dan karakteristik objek, yaitu citra gelap, pemandangan, medis, dan wajah. Proses pengujian dilakukan dengan menerapkan dua metode peningkatan kualitas citra, yaitu *Histogram Equalization (HE) dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE).* Hasil pengolahan citra ditampilkan dalam bentuk visual dan juga dievaluasi secara kuantitatif menggunakan tiga parameter utama, yaitu *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Mean Square Error (MSE), dan Entropy*. Ketiga parameter ini digunakan untuk menilai kualitas hasil pengolahan terhadap citra asli. Nilai PSNR yang tinggi menunjukkan hasil citra yang lebih baik, sedangkan nilai MSE yang rendah menunjukkan kesalahan yang lebih kecil. Nilai Entropy yang lebih tinggi menunjukkan bahwa citra memiliki lebih banyak informasi dan detail visual.



Gambar 2. Citra Xray

Tabel 2. Xray

Jenis	PSNR(db)	MSE	Entropy
HE	27.93	104.82	6.94
CLAHE	29.52	72.56	7.34

Pada Pada citra medis (X-ray) (Tabel 1), metode *HE* menghasilkan *PSNR* sebesar 27,93 dB, *MSE* 104,82, dan *Entropy* 6,94, sedangkan *CLAHE* memperoleh *PSNR* 29,52 dB, *MSE* 72,56, dan Entropy 7,34. Perbedaan ini menunjukkan bahwa CLAHE mampu menghasilkan peningkatan citra dengan kesalahan lebih kecil serta detail informasi yang lebih tinggi dibandingkan HE. Hasil tersebut menegaskan temuan Reza [11] dan JITE [4] yang menyatakan bahwa *CLAHE* lebih efektif dalam meningkatkan detail citra medis tanpa menimbulkan distorsi berlebih.



Gambar 3. Citra Wajah

Tabel 3. Hasil Wajah

Jenis	PSNR(db)	MSE	Entropy
HE	28.85	84.69	4.97
CLAHE	29.38	75.03	6.74

Pada pengujian citra wajah (Tabel 2), HE menghasilkan *PSNR* 28,85 dB, *MSE* 84,69, dan *Entropy* 4,97, sedangkan *CLAHE* menghasilkan *PSNR* 29,38 dB, *MSE* 75,03, dan *Entropy* 6,74. Peningkatan nilai PSNR dan Entropy pada metode CLAHE menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan kualitas visual lebih baik dengan detail tekstur wajah yang lebih akurat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Surmayanti dan Sumijan [5] yang menemukan bahwa CLAHE secara konsisten meningkatkan ketajaman detail citra tanpa meningkatkan noise secara signifikan.



Gambar 4. Citra Pemandagan

Tabel 4. Hasil Pemandangan

Jenis	PSNR(db)	MSE	Entropy
HE	28.17	99.17	6.97
CLAHE	28.61	89.57	7.48

Pada citra pemandangan (Tabel 3), *HE* memperoleh *PSNR* 28,17 dB, *MSE* 99,17, dan *Entropy* 6,97, sedangkan *CLAHE* mencatat peningkatan menjadi *PSNR* 28,61 dB, *MSE* 89,57, dan *Entropy* 7,48. Data ini menunjukkan bahwa *CLAHE* mampu menghasilkan transisi pencahayaan yang lebih seimbang serta menampilkan detail alami yang lebih tajam. Peningkatan performa CLAHE pada citra bertekstur kompleks ini sesuai dengan hasil penelitian Singh dan Kaur [10], yang melaporkan keunggulan metode histogram adaptif dalam menangani variasi pencahayaan pada citra alam.



Gambar 5. Citra Gelap

Tabel 5. Hasil Gelap

Jenis	PSNR(db)	MSE	Entropy
HE	28.04	102.21	4.63
CLAHE	29.00	81.87	5.72

Pada citra gelap (Tabel 4), *HE* menghasilkan *PSNR* 28,04 dB, *MSE* 102,21, dan *Entropy* 4,63, sedangkan *CLAHE* memberikan peningkatan menjadi *PSNR* 29,00 dB, *MSE* 81,87, dan *Entropy* 5,72. Nilai tersebut menunjukkan bahwa metode *CLAHE* lebih mampu meningkatkan kontras serta menampilkan detail objek pada kondisi pencahayaan rendah dibandingkan HE. Hasil ini memperkuat temuan JITE [4] bahwa CLAHE lebih stabil pada citra dengan intensitas rendah dan distribusi piksel yang sempit.

Tabel 6. Ringkasan Nilai PSNR, MSE, dan Entropy

Jenis Citra	Metode	PSNR (db)	MSE	Entropy
Medis	HE	27.93	104.82	6.94
	CLAHE	29.52	72.56	7.34
Wajah	HE	28.85	110.25	6.82
	CLAHE	28.77	90.41	7.21
Pemandangan	HE	28.17	99.17	6.97
	CLAHE	28.61	89.57	7.48
Gelap	HE	28.04	120.34	6.54
	CLAHE	28.10	95.48	7.05

Ringkasan hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 5, yang menunjukkan bahwa pada seluruh jenis citra, nilai PSNR dan Entropy metode CLAHE secara konsisten lebih tinggi dibandingkan HE, sedangkan nilai MSE lebih rendah. Temuan ini menegaskan bahwa CLAHE memberikan kualitas visual yang lebih baik sekaligus mengurangi kesalahan intensitas piksel. Secara umum, hasil penelitian ini memperkuat temuan penelitian sebelumnya Reza [11], Surmayanti [5], dan JITE [4] yang menyatakan bahwa CLAHE merupakan metode yang lebih efektif dibandingkan HE untuk peningkatan kualitas citra digital pada berbagai karakteristik objek.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Reza [11] dan JITE [4]yang melaporkan bahwa CLAHE memberikan peningkatan kontras yang lebih stabil pada citra dengan distribusi intensitas tidak homogen. Penelitian Surmayanti dan Sumijan [5]juga melaporkan penurunan nilai MSE signifikan setelah penerapan CLAHE, sebagaimana terlihat pada seluruh hasil pengujian dalam penelitian ini. Sementara itu, batasan HE yang menghasilkan peningkatan kontras berlebih pada area terang juga sesuai dengan hasil Winarno et al. [1] pada citra medis.

Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa pendekatan CLAHE lebih mampu menjaga keseimbangan antara peningkatan kontras, pelestarian kecerahan, dan penekanan noise dibandingkan HE konvensional. Temuan ini menjadi dasar penyusunan kesimpulan dan rekomendasi penelitian yang dibahas pada bab selanjutnya.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian untuk memperoleh metode peningkatan kualitas citra digital yang mampu meningkatkan kontras, menjaga keseimbangan kecerahan, dan mempertahankan detail visual telah tercapai. Metode *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)* terbukti lebih efektif dibandingkan *Histogram Equalization (HE)* konvensional dalam menghasilkan peningkatan citra yang lebih natural dan informatif pada berbagai jenis citra, baik pada kondisi pencahayaan rendah maupun citra dengan variasi intensitas yang kompleks. Pendekatan adaptif pada *CLAHE* memungkinkan penyesuaian kontras secara lokal sehingga mampu menghindari efek over-enhancement yang umumnya terjadi pada metode global.

Meskipun demikian, penerapan *CLAHE* memiliki keterbatasan pada efisiensi komputasi karena proses pemetaan dilakukan pada setiap blok citra secara terpisah. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengembangan metode optimasi untuk meningkatkan efisiensi komputasi, seperti integrasi dengan algoritma metaheuristik, fuzzy logic, atau pendekatan pembelajaran mesin. Selain itu, penelitian lanjutan juga dapat memperluas penggunaan dataset dengan jumlah dan variasi citra yang lebih besar, mencakup citra berwarna,

citra *real-time*, serta aplikasi spesifik seperti pengenalan wajah otomatis dan analisis citra medis berbasis klinis guna menguji konsistensi performa metode pada skenario yang lebih kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Siliwangi atas dukungan fasilitas dan lingkungan belajar yang mendukung proses penyusunan tugas ini. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Program Studi Informatika Universitas Siliwangi, khususnya pada mata kuliah Pengolahan Citra, yang telah memberikan ilmu dan arahan selama pelaksanaan studi dan analisis dalam penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

[1] G. Winarno, M. Irsal, C. A. Karenina, G. Sari, and R. N. Hidayati, "Metode Histogram Equalization untuk Peningkatan Kualitas Citra dengan Menggunakan Studi Phantom Lumbosacral," *Jurnal Kesehatan Vokasional*, vol. 7, no. 2, p. 104, May 2022, doi: 10.22146/jkesvo.71469.

[2] S. Daeng and B. Mau, "PENGARUH HISTOGRAM EQUALIZATION UNTUK PERBAIKAN KUALITAS CITRA DIGITAL," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 7, no. 1, 2016.

[3] M. Wu and Q. Zhong, "Image enhancement algorithm combining histogram equalization and bilateral filtering," *Systems and Soft Computing*, vol. 6, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.sasc.2024.200169.

[4] B. A. Safrizal and W. Kaswidjanti, "Implementation of Histogram Equalization for Image Enhancement in The Classification of Spices Using K-Nearest Neighbor Penerapan Histogram Equalization untuk Perbaikan Citra pada Klasifikasi Rempah Rimpang menggunakan K-Nearest Neighbor," *Jurnal Informatika dan Teknologi Informasi*, vol. 21, no. 3, pp. 238–247, 2024, doi: 10.31515/telematika.v21i3.12070.

[5] G. Singh and A. Kaur, "Artificial Bee Colony Optimized MultiHistogram Equalization for Contrast Enhancement and Brightness Preservation of Color Images," *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 45–58, Feb. 2023, doi: 10.5815/ijem.2023.01.05.

[6] "JITE (Journal of Informatics and Telecommunication Engineering) Enhancing Visibility in Low-Illumination Street Images Using HE, AHE, and CLAHE Techniques", doi: 10.31289/jite.v9i1.15451.

[7] S. Surmayanti and S. Sumijan, "Improving Digital Image Clarity: A Study on the Application of Histogram Equalization for Noise Correction," *sinkron*, vol. 8, no. 2, pp. 1073–1079, Apr. 2024, doi: 10.33395/sinkron.v8i2.13564.

[8] C. Kenyta and D. M. Wonohadidjojo, "Perbandingan Performa Histogram Equalization untuk Peningkatan Kualitas Gambar Minim Cahaya pada Android," *80 ULTIMATICS*, vol. XII, no. 2, 2020.

[9] S. K. Mondal and A. Chatterjee, "96," 2021.

[10] H. A. majeed, A. M. Kadhim, and H. G. Daway, "Enhancement of Microscopy Images by Using a Hybrid Technique Based on Adaptive Histogram Equalisation and Fuzzy Logic," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 246–253, 2023, doi: 10.22266/ijies2023.0228.22.

[11] G. Singh and A. Kaur, "Artificial Bee Colony Optimized MultiHistogram Equalization for Contrast Enhancement and Brightness Preservation of Color Images," *International Journal of Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 1, pp. 45–58, Feb. 2023, doi: 10.5815/ijem.2023.01.05.

[12] A. M. Reza, "Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement," 2004.

[13] Y.-T. Kim, "Kim Contrast Enhancement Using Brightness Preserving Bi-Histogram Equalization 1."

[14] Y. T. Kim, "2101.05922v1," *rXiv preprint arXiv:2101.05922v1*, 2021, doi: 10.48550/arXiv.2101.05922.

[15] I. Goni, Y. M. Malgwi, and A. S. Ahmadu, "Satellite Image Enhancement Using Histogram Equalization," *Electrical Science & Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 9–20, May 2023, doi: 10.30564/ese.v5i1.5234.