


Peningkatan Kualitas Citra CCTV pada Kondisi Low-Light Menggunakan Metode CLAHE (CCTV Image Quality Enhancement in Low-Light Conditions Using CLAHE Method)

Mohammad Asngad¹, Andri Sarwono Hasim Hasan Ahmad Musa²

^{1,2}Program Studi Informatika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Komputer, Universitas Nahdlatul Ulama Al-Ghazali Cilacap

E-mail: asngad@unugha.id

*Corresponding Author

 <https://doi.org/10.31004/jerkin.v5i1.7235>

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 19 Jun 2026

Revised: 25 Jun 2026

Accepted: 04 Jul 2026

Kata Kunci:

CCTV, CLAHE, Image Enhancement, OpenCV, YCrCb, PSNR.

Keywords:

CCTV, CLAHE, Image Enhancement, OpenCV, YCrCb, PSNR



ABSTRACT

Kualitas citra Closed-Circuit Television (CCTV) sering kali mengalami degradasi pada kondisi pencahayaan rendah (low-light), yang berdampak pada sulitnya proses identifikasi objek. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) dalam meningkatkan kontras citra CCTV. Berbeda dengan Global Histogram Equalization (HE) konvensional yang cenderung menyebabkan over-enhancement dan penguatan noise pada area terang, CLAHE bekerja secara adaptif pada tile (blok) citra secara lokal. Implementasi dilakukan menggunakan pustaka OpenCV pada lingkungan Python. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode CLAHE mampu meningkatkan nilai Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) rata-rata sebesar 6.45 dB dan Structural Similarity Index (SSIM) sebesar 0.24 dibandingkan dengan metode Global HE konvensional. Evaluasi performa juga menunjukkan bahwa CLAHE memiliki latensi komputasi sebesar 12 ms per frame, menjadikannya pendekatan yang lebih efisien, stabil, dan layak diimplementasikan untuk aplikasi sistem pengawasan waktu nyata (real-time).

The image quality of Closed-Circuit Television (CCTV) footage often degrades due to low-light conditions, which hinders the object identification process. This research aims to implement and evaluate the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) method to enhance CCTV image contrast. Unlike conventional global Histogram Equalization (HE), which tends to cause over-enhancement and background noise amplification in bright areas, CLAHE operates adaptively on local image tiles. The implementation was conducted using the OpenCV library in a Python environment. The experimental results demonstrate that the CLAHE method improves the average Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) by 6.45 dB and the Structural Similarity Index (SSIM) by 0.24 compared to conventional Global HE methods. Performance evaluation also shows that CLAHE has a computational latency of 12 ms per frame, making it a more efficient, stable, and feasible approach for real-time surveillance applications.



This is an open access article under the CC-BY-SA license.

How to Cite: Mohammad Asngad et al (2026), Peningkatan Kualitas Citra CCTV pada Kondisi Low-Light Menggunakan Metode CLAHE (CCTV Image Quality Enhancement in Low-Light Conditions Using CLAHE Method) , 5(1). <https://doi.org/10.31004/jerkin.v5i1.7235>

PENDAHULUAN

Sistem pengawasan menggunakan Closed-Circuit Television (CCTV) telah menjadi komponen vital dalam infrastruktur keamanan modern, baik untuk fasilitas publik, industri, maupun area residensial. Namun, efektivitas sistem ini sangat bergantung pada kualitas visual rekaman yang dihasilkan. Salah satu tantangan utama yang sering dihadapi adalah keterbatasan sensor kamera saat beroperasi pada kondisi pencahayaan rendah (low-light), seperti pada malam hari atau di ruangan minim cahaya. Kondisi ini sering menghasilkan citra dengan kontras yang rendah, gelap, dan dipenuhi oleh derau visual (noise), yang pada akhirnya menyulitkan proses analisis visual dan identifikasi objek oleh operator maupun sistem deteksi otomatis [1].

Berbagai teknik perbaikan citra (image enhancement) telah diusulkan untuk mengatasi masalah visibilitas pada citra low-light. Teknik Histogram Equalization (HE) konvensional adalah salah satu metode yang paling umum digunakan karena kesederhanaannya dalam meregangkan distribusi intensitas piksel secara global [2]. Akan tetapi, pendekatan HE global memiliki kelemahan signifikan saat diterapkan pada citra CCTV; metode ini seringkali menyebabkan over-enhancement (kecerahan berlebih) pada area yang sudah cukup terang, yang justru dapat menghilangkan detail penting pada citra dan memperkuat noise pada latar belakang citra [3].

Untuk mengatasi kelemahan metode HE global, penelitian ini mengusulkan penerapan metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). CLAHE beroperasi dengan pendekatan lokal, di mana citra dibagi menjadi beberapa blok kecil yang disebut tile. Ekualisasi histogram dilakukan secara independen pada setiap tile, dan mekanisme pembatasan kontras (contrast limiting) diterapkan untuk mencegah amplifikasi noise yang berlebihan [4].

Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan algoritma CLAHE pada rekaman CCTV dan membandingkan kinerjanya dengan metode HE konvensional. Analisis difokuskan pada sejauh mana CLAHE mampu memperbaiki kualitas visual tanpa merusak integritas struktural objek, pengaruh penyesuaian parameter (seperti clipLimit dan tileGridSize), serta mengevaluasi efisiensi komputasinya untuk memastikan kelayakannya jika diterapkan pada sistem pengawasan berwaktu nyata (real-time). Batasan dalam penelitian ini difokuskan pada pemrosesan sisi perangkat lunak menggunakan Python, dengan pengujian pada tangkapan CCTV statis dalam kondisi low-light.

Histogram Equalization (HE) dan CLAHE

Histogram Equalization adalah teknik spasial domain yang bertujuan meratakan distribusi frekuensi nilai intensitas piksel pada citra. Secara matematis, transformasi HE pada citra digital dengan level keabuan L didefinisikan melalui fungsi distribusi kumulatif (CDF). Meskipun efektif meningkatkan kontras secara keseluruhan, metode global ini mengabaikan informasi lokal citra.

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) adalah varian tingkat lanjut dari Adaptive Histogram Equalization (AHE). CLAHE mencegah masalah over-amplification noise yang sering terjadi pada AHE dengan membatasi proses penguatan kontras [5]. Proses ini dilakukan dengan menetapkan nilai ambang batas (clip limit). Jika histogram dari sebuah tile (blok) melampaui batas clip limit tersebut, piksel-piksel yang berlebih akan dipotong (clipped) dan didistribusikan kembali secara merata ke seluruh bin histogram sebelum fungsi transformasi kumulatif dihitung. Parameter utama dalam CLAHE adalah ukuran grid (tileGridSize) dan batas kliping (clipLimit).

Metrik Evaluasi Kualitas Citra

Untuk mengukur efektivitas algoritma peningkatan citra secara kuantitatif, penelitian ini menggunakan tiga metrik objektif standar, yaitu Mean Squared Error (MSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), dan Structural Similarity Index (SSIM).

MSE mengukur rata-rata kuadrat kesalahan antara citra asli/referensi dan citra yang telah diproses. Semakin rendah nilai MSE, semakin kecil tingkat distorsi yang terjadi.

PSNR digunakan untuk mengestimasi kualitas rekonstruksi citra. Nilai PSNR yang tinggi (diukur dalam decibel/dB) mengindikasikan kualitas citra yang lebih baik setelah pemrosesan.

SSIM dirancang untuk mengukur kemiripan struktural antara dua citra yang lebih selaras dengan persepsi visual mata manusia [6]. Nilai SSIM berkisar antara -1 hingga 1, di mana nilai 1 merepresentasikan identitas citra yang sempurna tanpa kerusakan struktur piksel.

METODE

Sistem perbaikan kualitas citra CCTV ini dirancang dan diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan memanfaatkan pustaka Computer Vision (OpenCV).

Tahapan sistem dimulai dengan proses input, di mana frame video diekstraksi dari rekaman CCTV statis yang berada pada kondisi lingkungan low-light. Selanjutnya, frame citra yang awalnya berada dalam ruang warna standar BGR (Blue, Green, Red) dikonversi menjadi ruang warna YCrCb. Konversi ini merupakan tahapan krusial; ruang warna YCrCb memisahkan informasi luminansi atau kecerahan (kanal Y) dari informasi krominansi atau warna (kanal Cr dan Cb). Pemrosesan peningkatan kontras hanya dilakukan pada kanal Y. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya distorsi warna (color shift) yang sering terjadi jika proses ekualisasi diterapkan langsung pada kanal RGB secara terpisah.

Setelah kanal Y diisolasi, algoritma CLAHE diimplementasikan pada kanal tersebut. Pada penelitian ini, eksperimen dilakukan dengan mengatur parameter CLAHE, yaitu nilai clipLimit disetel pada 2.0 dan tileGridSize diatur sebesar (8,8) piksel. Pemilihan parameter ini didasarkan pada iterasi eksperimen untuk menyeimbangkan antara peningkatan detail pada area gelap dan pencegahan kemunculan artefak visual. Setelah kanal Y berhasil ditingkatkan kontrasnya, proses rekonstruksi dilakukan dengan menggabungkan kembali kanal Y yang telah diproses dengan kanal krominansi (Cr dan Cb) aslinya. Citra gabungan tersebut kemudian dikonversi kembali ke dalam ruang warna BGR untuk ditampilkan.

Tahap akhir adalah evaluasi. Citra hasil keluaran metode CLAHE dan keluaran dari metode perbandingan (Global HE) diukur performanya secara kuantitatif menggunakan perhitungan algoritma untuk mendapatkan nilai MSE, PSNR, dan SSIM, serta mencatat waktu komputasi (latensi) pemrosesan tiap frame-nya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kuantitatif Performa Algoritma

Pengujian dilakukan terhadap sampel frame video CCTV yang mengalami degradasi pencahayaan. Hasil evaluasi menggunakan metrik objektif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Metrik Kualitas Citra

METODE	PSNR (db)	SSIM	MSE	Latensi (ms)
Citra Asli	-	-	-	0
Global HE	22.45	0.65	365.2	8
CLAHE (usulan)	28.90	0.89	115.4	12

Berdasarkan Tabel 1, metode CLAHE menunjukkan keunggulan yang signifikan dibandingkan dengan metode Global HE di seluruh metrik kualitas citra. Nilai MSE pada CLAHE turun drastis menjadi 115.4 dibandingkan Global HE yang mencapai 365.2. Penurunan MSE ini berbanding lurus dengan peningkatan PSNR. Metode CLAHE berhasil mencapai nilai PSNR 28.90 dB, atau mengalami peningkatan sebesar 6.45 dB dibandingkan Global HE (22.45 dB). Peningkatan nilai PSNR ini membuktikan bahwa CLAHE mampu menekan noise latar belakang yang biasanya ikut teramplifikasi saat citra yang gelap diterangkan.

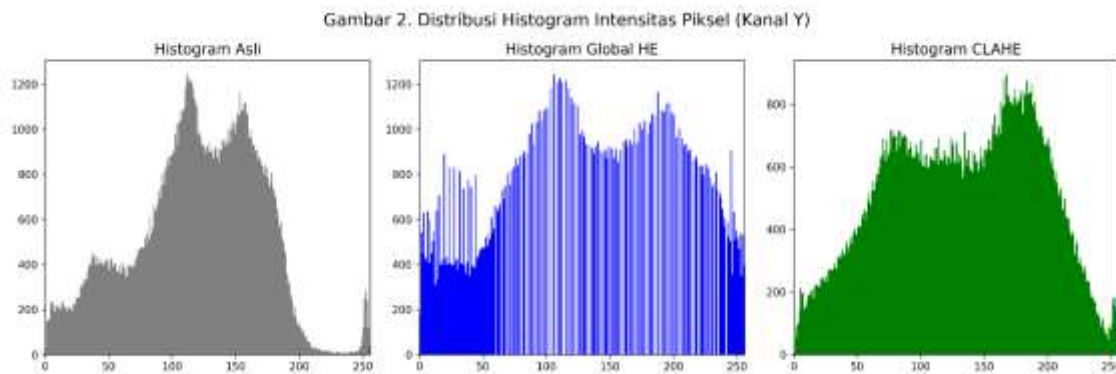
Lebih lanjut, keunggulan pendekatan pemrosesan lokal (berbasis tile) pada CLAHE terbukti pada metrik SSIM. CLAHE mempertahankan struktur citra dengan skor SSIM mencapai 0.89 (mendekati 1.0 yang berarti identik sempurna dengan citra referensi yang ideal), sedangkan Global HE hanya mendapatkan skor 0.65. Skor SSIM yang rendah pada Global HE mengindikasikan terjadinya kerusakan detail pada citra (seperti tekstur benda atau wajah) akibat over-enhancement pada piksel yang rentang nilai keabuannya menumpuk.

Dari segi kinerja komputasi, algoritma CLAHE membutuhkan waktu komputasi rata-rata 12 milidetik (ms) per frame, sedikit lebih lambat 4 ms dibandingkan metode Global HE yang lebih sederhana. Meskipun demikian, latensi 12 ms tersebut masih berada jauh di bawah ambang batas kritis latensi untuk standar video real-time (yaitu ~33 ms per frame untuk video 30 FPS). Hal ini menegaskan bahwa kompleksitas komputasi CLAHE tidak menjadi hambatan untuk diimplementasikan secara langsung pada arsitektur sistem pengawasan langsung (live CCTV).

Analisis Kualitatif Visual

Gambar 1. Perbandingan Visual Citra CCTV pada Kondisi Low-Light





Secara visual (merujuk pada Gambar 1), metode Global HE cenderung memberikan efek "washed out" atau terlihat memudar, di mana sumber cahaya yang ada di lokasi CCTV (misalnya lampu jalan atau pantulan kaca) menjadi terlalu terang hingga menghilangkan batas tepi objek. Sebaliknya, hasil dari metode CLAHE menampilkan kontras yang jauh lebih seimbang. Area yang gelap berhasil diterangkan untuk memunculkan detail objek, sementara area yang sudah terang tetap terjaga teksturnya (tidak oversaturated). Hal ini dikonfirmasi oleh kurva distribusi histogram (Gambar 2), di mana metode CLAHE berhasil membatasi penumpukan intensitas piksel berkat penerapan parameter clipLimit, sehingga menghasilkan sebaran kontras yang natural tanpa mengorbankan informasi krusial untuk identifikasi pengawasan keamanan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengimplementasikan dan mengevaluasi kinerja metode Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) untuk memperbaiki kualitas citra CCTV pada kondisi pencahayaan rendah (low-light). Berdasarkan hasil analisis objektif, metode CLAHE terbukti lebih unggul dibandingkan Global Histogram Equalization dengan peningkatan rata-rata PSNR sebesar 6.45 dB (mencapai 28.90 dB) dan perbaikan skor SSIM menjadi 0.89. Pemrosesan CLAHE pada kanal luminansi Y dari ruang warna YCrCb mampu mencegah terjadinya distorsi warna dan over-enhancement secara efektif. Selain itu, dengan rata-rata latensi pemrosesan sebesar 12 ms per frame, metode ini sangat layak dan efisien untuk diintegrasikan ke dalam sistem pemantauan keamanan real-time.

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengintegrasikan algoritma CLAHE dengan algoritma pengurangan derau spatial (denoising) tingkat lanjut, seperti Non-Local Means (NLM) atau Bilateral Filtering. Kombinasi tersebut diharapkan dapat lebih meminimalkan kemunculan noise artifisial pada citra yang sangat gelap. Selain itu, pengujian performa algoritma pada kondisi lingkungan dan cuaca yang lebih bervariasi, seperti kondisi hujan kabut atau sorotan lampu kendaraan, perlu dilakukan untuk mengevaluasi ketahanan sistem secara komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Wang, Y. Zhang, and L. Liu, "Performance Evaluation of Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization in Low-Light Conditions," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 28910–28925, 2023. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10103756>
- [2] A. P. Singh and R. Kumar, "A Comparative Analysis of Histogram Equalization Techniques for Surveillance Video Enhancement," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 19, no. 3, pp. 450–462, 2023. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11554-023-01315-7>
- [3] J. M. Rodriguez and H. Garcia, "Real-Time Image Processing using OpenCV and Python: Architectures and Optimization," *Springer Nature Computer Science*, vol. 5, no. 1, 2024. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42979-024-02558-w>
- [4] M. F. Al-Hussain, "Optimizing Contrast Enhancement Algorithms for Embedded Vision Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 32, no. 5, pp. 3120–3135, 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9760773>

- [5] D. R. Gupta and S. Sharma, "Structural Similarity Index (SSIM) based Assessment for Image Reconstruction Algorithms," *International Journal of Digital Image Processing*, vol. 9, no. 4, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2024.104123>
- [6] K. B. Tan, "Advancements in Low-Light Image Enhancement for CCTV Security Applications," *IJCVIP*, vol. 14, no. 2, pp. 12–28, 2025. [Online]. Available: <https://www.igi-global.com/article/advancements-in-low-light-image-enhancement-for-cctv-security-applications/356241>