



Peningkatan Kualitas Citra Hilal Berdasarkan Kontras Menggunakan Metode *Histogram Equalization*, AHE, dan CLAHE

Ady Suprayitno^{*1}, Murinto², Kartika Firdausy³

Email: ¹adysuprayitno@unimma.ac.id, ²murintokusno@tif.uad.ac.id, ³kartika.firdausy@te.uad.ac.id

¹Program Studi Magister Informatika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

²Program Studi Informatika, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

³Program Studi Teknik Elektro, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta, Indonesia

Diterima: 20 Oktober 2025 | Direvisi: - | Disetujui: 11 Desember 2025

©2020 Program Studi Teknik Informatika Fakultas Ilmu Komputer,
Universitas Muhammadiyah Riau, Indonesia

Abstrak

Penentuan awal bulan Hijriah seringkali dibantu oleh teknologi pencitraan digital, namun kualitas citra hilal yang dihasilkan kerap menghadapi tantangan kontras yang sangat rendah. Cahaya hilal yang tipis sulit dibedakan dari latar belakang langit senja yang masih terang, diperparah oleh kondisi atmosfer dan noise sensor kamera yang menurunkan kualitas visual. Untuk memperbaiki citra, masih banyak yang melakukan peningkatan kontras secara manual. Di sisi lain, pemilihan metode peningkatan kontras sering tanpa dasar yang terukur. Penelitian ini bertujuan melakukan evaluasi kinerja komparatif antara tiga metode peningkatan kontras: Histogram Equalization (HE), Adaptive Histogram Equalization (AHE), dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). Tujuannya untuk mengidentifikasi teknik yang paling sesuai untuk meningkatkan kualitas citra hilal, yang penerapannya secara spesifik pada objek ini belum banyak dieksplorasi. Sebanyak 30 citra hilal diuji melalui pendekatan evaluasi kuantitatif menggunakan metrik Mean Squared Error (MSE) dan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR). Hasil menunjukkan bahwa CLAHE memberikan performa terbaik dengan rata-rata MSE terendah (89,97) dan PSNR tertinggi (30,92 dB), menunjukkan kemampuan terbaik dalam menyeimbangkan peningkatan kontras dan reduksi distorsi. Sebaliknya, metode HE dan AHE menghasilkan nilai MSE yang tinggi serta PSNR yang rendah, mengindikasikan distorsi visual yang signifikan. Dengan demikian, CLAHE direkomendasikan sebagai metode paling andal untuk peningkatan kualitas citra hilal berdasarkan kontras dalam sistem observasi berbasis teknologi digital. Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan eksplorasi penentuan parameter CLAHE secara otomatis dan penggunaan metrik evaluasi tambahan seperti SSIM (Structural Similarity Index Measure).

Kata kunci: AHE, Citra Hilal, CLAHE, Histogram Equalization, Peningkatan Kontras.

Improvement of Crescent Image Quality Based on Contrast Using the Histogram Equalization, AHE, and CLAHE Methods

Abstract

The determination of the beginning of the Hijri month is often aided by digital imaging technology, but the quality of the crescent images produced often faces the challenge of very low contrast. The faint light of the crescent is difficult to distinguish from the still bright background of the evening sky, exacerbated by atmospheric conditions and camera sensor noise that reduce visual quality. To improve the image, many still perform manual contrast enhancement. On the other hand, the selection of contrast enhancement methods is often without a measurable basis. This study aims to conduct a comparative performance evaluation between three contrast enhancement methods: Histogram Equalization (HE), Adaptive Histogram Equalization (AHE), and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). The goal is to identify the most suitable technique for improving the quality of crescent images, the specific application of which has not been widely explored. A total of 30 crescent images were tested through a quantitative evaluation approach using the Mean Squared Error (MSE) and Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) metrics. The results show that CLAHE provides the best performance with the lowest average MSE (89.97) and the highest PSNR

(30.92 dB), demonstrating the best ability to balance contrast enhancement and distortion reduction. In contrast, the HE and AHE methods produce high MSE and low PSNR values, indicating significant visual distortion. Thus, CLAHE is recommended as the most reliable method for improving the quality of crescent images based on contrast in digital technology-based observation systems. For further research, it is recommended to explore the automatic determination of CLAHE parameters and the use of additional evaluation metrics such as SSIM (Structural Similarity Index Measure).

Keywords: AHE, CLAHE, Contrast Enhancement, Crescent, Histogram Equalization.

1. PENDAHULUAN

Penentuan awal bulan dalam kalender Hijriah merupakan aspek penting bagi umat Islam, terutama untuk bulan Ramadan, Syawal, dan Dzulhijjah. Secara tradisional, penentuan dilakukan melalui observasi langsung bulan sabit pertama (*hilar*). Kini, proses tersebut telah banyak dibantu oleh teknologi pencitraan digital, di mana teleskop dihubungkan dengan kamera untuk merekam dan menganalisis hilal secara lebih objektif [1].

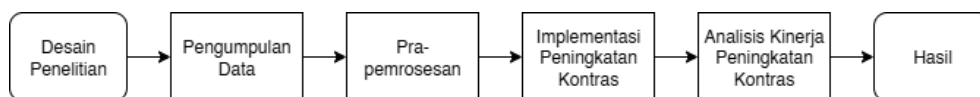
Hasil pengamatan citra hilal seringkali menghadapi tantangan besar, seperti kontras yang sangat rendah dan cahaya hilal yang tipis menyebabkan hilal sulit dibedakan dari latar belakang langit senja [2]. Faktor lain seperti kondisi atmosfer dan derau (*noise*) pada sensor kamera semakin menurunkan kualitas visual citra, sehingga menyulitkan proses identifikasi [3]. Kualitas citra yang buruk ini menjadi kendala utama dalam analisis hilal yang akurat. Mengatasi masalah ini, teknologi pengolahan citra, khususnya metode peningkatan kontras (*contrast enhancement*), dapat diterapkan untuk perbaikan kualitas citra. Selama ini peningkatan kontras pada citra hilal umumnya dilakukan secara manual, misalnya dengan menyesuaikan *brightness* dan *contrast* menggunakan perangkat lunak pengolah gambar. Pendekatan tersebut bersifat subjektif dan tidak terstandar, sehingga hasilnya sulit direproduksi. Di sisi lain, penelitian yang menerapkan metode peningkatan kontras secara otomatis masih dilakukan secara terbatas, bahkan sering tanpa dasar pemilihan metode yang terukur.

Terdapat berbagai metode peningkatan kontras yang telah terbukti efektif dalam beragam aplikasi. *Histogram Equalization* (HE) adalah teknik peningkatan kontras yang paling umum dan sederhana. Namun, HE mempunyai kelemahan yaitu meningkatkan kontras dengan mendistribusikan seluruh tingkat abu-abu secara seragam [4]. Akibatnya, pendekatan HE terkadang justru memperburuk citra. Teknik peningkatan kontras yang lebih baru adalah *Adaptive Histogram Equalization* (AHE) dan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE). AHE dan CLAHE sangat populer karena mampu membatasi area lokal tertentu dalam meningkatkan kontras [5]. Metode-metode ini banyak digunakan untuk memperbaiki kualitas visual pada citra medis hingga citra astronomis lainnya [6], [7]. Namun, penerapan dan evaluasi kinerja metode-metode tersebut secara spesifik pada citra hilal yang memiliki karakteristik unik seperti hilal belum banyak dieksplorasi.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan evaluasi kinerja antara metode HE, AHE, dan CLAHE dalam meningkatkan kualitas kontras pada citra hilal. Studi ini akan membandingkan hasil dari ketiga metode secara kuantitatif dan kualitatif untuk memberikan rekomendasi tentang teknik yang paling sesuai untuk membantu proses observasi hilal modern. Dengan menggunakan metode peningkatan kontras yang tepat, detail seperti tepi dan tekstur citra dapat lebih jelas terlihat, sehingga bisa memudahkan alur kerja selanjutnya dalam mengidentifikasi objek [8].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang sistematis dan terstruktur untuk memastikan tujuan penelitian dapat tercapai secara efektif. Alur tahapan penelitian secara keseluruhan, mulai dari perancangan hingga penarikan kesimpulan, diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok penelitian perbandingan peningkatan kontras

2.1. Desain Penelitian

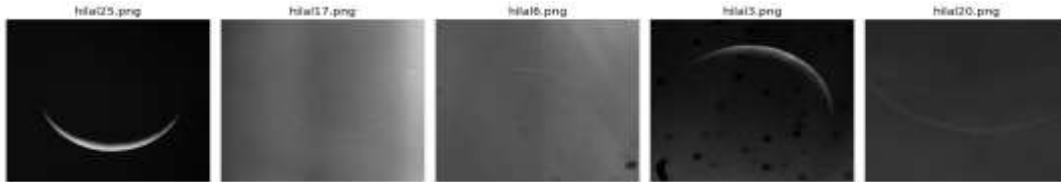
Penelitian ini dirancang untuk membandingkan kinerja peningkatan kontras antara HE, AHE, dan CLAHE dalam meningkatkan visibilitas citra hilal. Tujuannya adalah mengevaluasi kinerja dari ketiga teknik peningkatan kontras tersebut mampu meningkatkan kualitas citra namun tetap menjaga citra hilal itu sendiri.

2.2 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan dataset citra hilal yang didapatkan dari Pusat Studi Astronomi Universitas Ahmad Dahlan (PASTRON UAD) yang terdiri dari 30 citra hilal. Kumpulan data yang dipilih dinilai representatif karena mencakup citra yang diambil dalam beragam skenario pengamatan, seperti perbedaan elongasi bulan, variasi kecerahan langit, serta kondisi atmosfer yang fluktuatif, sehingga memberikan dasar evaluasi yang kokoh.

2.3 Pra-pemrosesan

Pra-pemrosesan atau dikenal *pre-processing* adalah metode untuk mengubah data mentah menjadi format yang bermanfaat dan efektif [9]. Proses pra-pemrosesan diawali dengan tahap standarisasi, di mana dimensi setiap citra diubah menjadi 512x512 piksel guna menyeragamkan ukuran dan mengoptimalkan beban komputasi. Setelah itu, citra diubah menjadi format monokromatik (*grayscale*) 8-bit. Langkah ini krusial karena fokus penelitian adalah pada peningkatan kontras, yang secara inheren merupakan manipulasi terhadap tingkat kecerahan (luminans), bukan komponen warna. Sebagai percobaan digunakan 5 gambar hilal acak dengan berbagai kondisi untuk ditampilkan seperti Gambar 2.



Gambar 2. Citra hilal grayscale

Menyadari bahwa citra hilal umumnya memiliki *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) yang rendah, langkah pra-pemrosesan dilanjutkan dengan aplikasi filter peredam derau (*noise filtering*). Metode yang dipilih adalah *bilateral filtering* yaitu sebuah teknik non-linear yang dikenal dengan kemampuannya melindungi integritas tepi objek [10], [11]. Filter ini beroperasi dengan mengevaluasi piksel tetangga berdasarkan dua kriteria; jarak spasial dan kemiripan nilai intensitas, yang dijelaskan dalam persamaan 1.

$$I_{filtered}(p) = \frac{1}{W_p} \sum_{q \in \Omega} G_{\sigma_s}(|p - q|) G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|) I(q) \quad (1)$$

dengan $I_{filtered}(p)$ adalah nilai intensitas piksel yang sudah diproses oleh filter bilateral di posisi p , Ω adalah wilayah tetangga dari piksel p , $G_{\sigma_s}(|p - q|)$ adalah fungsi gauss spasial yang menggambarkan kedekatan spasial antar piksel p, q , $G_{\sigma_r}(|I(p) - I(q)|)$ adalah fungsi gauss intensitas yang menggambarkan kedekatan intensitas antara dua piksel, dan W_p normalisasi untuk memastikan hasilnya berada dalam rentang yang tepat.

Berkat mekanisme gandanya, filter ini mampu mereduksi derau pada wilayah homogen seperti langit, seraya memastikan kontur tipis dari sabit bulan tidak menjadi kabur [12], [13].

2.4. Implementasi Peningkatan Kontras

Setelah citra dianggap bersih dari derau mayor, selanjutnya dilakukan penerapan metode peningkatan kontras pada citra hilal. Pada tahap ini, ada tiga metode peningkatan kontras yang akan dievaluasi yaitu HE, AHE, dan CLAHE.

2.4.1 Histogram Equalization (HE)

Histogram Equalization (HE) berfungsi untuk memperbaiki tampilan global suatu citra. Histogram sendiri merupakan grafik yang menampilkan jumlah piksel pada setiap tingkat intensitas tertentu [14]. HE bertujuan melebarkan rentang dinamis citra dengan cara menata ulang distribusi nilai kecerahan piksel agar lebih merata melalui Fungsi Distribusi Kumulatif (CDF) dengan persamaan 2.

$$S_k = T(r_k) = (L - 1) \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \frac{L-1}{M \times N} \sum_{j=0}^k n_j \quad (2)$$

dengan S_k adalah nilai intensitas piksel yang baru (output) setelah proses ekualisasi, r_k adalah nilai intensitas piksel asli (input) pada tingkat ke- k , L adalah jumlah total tingkat intensitas yang mungkin (misalnya, 256 untuk citra 8-bit), $\sum_{j=0}^k p_r(r_j)$ adalah Fungsi Distribusi Kumulatif (CDF) yang merupakan total probabilitas dari semua tingkat intensitas piksel mulai dari 0 hingga tingkat ke- k , n_j adalah jumlah piksel yang memiliki tingkat intensitas ke- j (nilai dari histogram), dan $M \times N$ adalah jumlah total piksel dalam gambar (lebar M x tinggi N).

2.4.2 Adaptive Histogram Equalization (AHE)

Berbeda dengan HE yang menerapkan fungsi pemerataan yang sama untuk seluruh citra, AHE membagi gambar menjadi blok-blok kecil. Setiap blok kemudian dianalisis secara terpisah, yang memungkinkan penggunaan histogram yang berbeda untuk masing-masing area, sehingga memberikan kemampuan untuk meningkatkan kontras lokal [15]. AHE berproses melibatkan

perhitungan histogram per blok dan interpolasi. Prinsip dasarnya mengacu pada rumus dasar HE yang diterapkan secara lokal dengan persamaan 3.

$$S_k = \text{round} \left[(L - 1) \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n} \right] \quad (3)$$

dengan S_k adalah nilai intensitas baru setelah *equalization*, L adalah jumlah tingkat intensitas (misalnya 256 untuk citra 8-bit), n_j adalah jumlah piksel dengan intensitas j , n adalah total piksel dalam citra (atau dalam satu tile/blok untuk AHE).

2.4.3 *Contras Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)*

Teknik peningkatan kontras CLAHE merupakan modifikasi canggih dari AHE yang mengintegrasikan mekanisme kontrol kontras. Pada setiap blok lokal, tinggi histogram dibatasi oleh sebuah ambang batas (*clip limit*), di mana setiap kelebihan frekuensi piksel akan didistribusikan kembali ke nilai intensitas lainnya. Langkah ini secara signifikan menekan potensi amplifikasi derau yang menjadi masalah pada AHE [16]. Lebih lanjut, CLAHE tidak hanya meningkatkan kontras visual tetapi juga menjaga detail penting tanpa memperlihatkan *noise* yang berlebihan [17]. CLAHE mengikuti rumus dasar dari AHE seperti pada persamaan (3), namun n_j yang merupakan frekuensi piksel dengan intensitas j dibatasi dengan clip limit menjadi $j = \min(n_j, \text{clip limit})$. Jika histogram suatu bin n_j melebihi *clip limit*, kelebihan piksel tersebut akan disebar merata ke seluruh bin histogram lainnya.

2.5 Analisis Hasil Peningkatan Kontras

Untuk menganalisis hasil dari metode peningkatan kontras, dilakukan pendekatan analisis kuantitatif menggunakan metrik *Mean Squared Error (MSE)* dan *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*. Dari metrik itu bisa didapatkan nilai sebagai validasi atas keberhasilan kinerja peningkatan kontras.

2.5.1 MSE

Mean Squared Error (MSE) adalah metrik evaluasi yang umum digunakan dalam analisis regresi dan pemrosesan citra untuk mengukur sejauh mana prediksi model menyimpang dari nilai aktual. MSE dihitung dengan mengkuadratkan selisih antara nilai yang diprediksi dan nilai aktual, menjumlahkan semua kuadrat tersebut, dan membaginya dengan jumlah total observasi [18]. Rumus matematis untuk menghitung MSE dapat dituliskan seperti pada Persamaan (4)

$$SE = \frac{1}{M \times N} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (4)$$

dengan $M \times N$ adalah dimensi citra dalam piksel (lebar x tinggi), $I(i,j)$ adalah nilai intensitas piksel pada baris ke- i dan kolom ke- j dari citra asli, $K(i,j)$ adalah nilai intensitas piksel pada baris ke- i dan kolom ke- j dari citra hasil.

Nilai MSE yang lebih kecil menunjukkan bahwa prediksi model lebih dekat dengan nilai aktual, mencerminkan performa yang lebih baik dari model tersebut [19].

2.5.2 PSNR

Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) adalah metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas citra dengan mengukur rasio antara sinyal yang diinginkan (gambar yang diolah atau gambar asli) terhadap *noise* yang ada dalam citra tersebut. PSNR sering digunakan dalam pemrosesan citra untuk menilai kualitas hasil kompresi, pengolahan, atau peningkatan citra, serta untuk menentukan apakah proses tersebut menyebabkan kehilangan kualitas yang signifikan. Rumus untuk menghitung PSNR dapat dinyatakan pada persamaan (5).

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) \quad (5)$$

dengan MAX adalah nilai piksel maksimum yang mungkin dari citra, untuk citra 8-bit (skala keabuan), nilainya adalah $2^8 - 1 = 255$, untuk citra biner nilainya adalah 1, dan MSE adalah nilai *Mean Squared Error* yang telah dihitung dari persamaan 4.

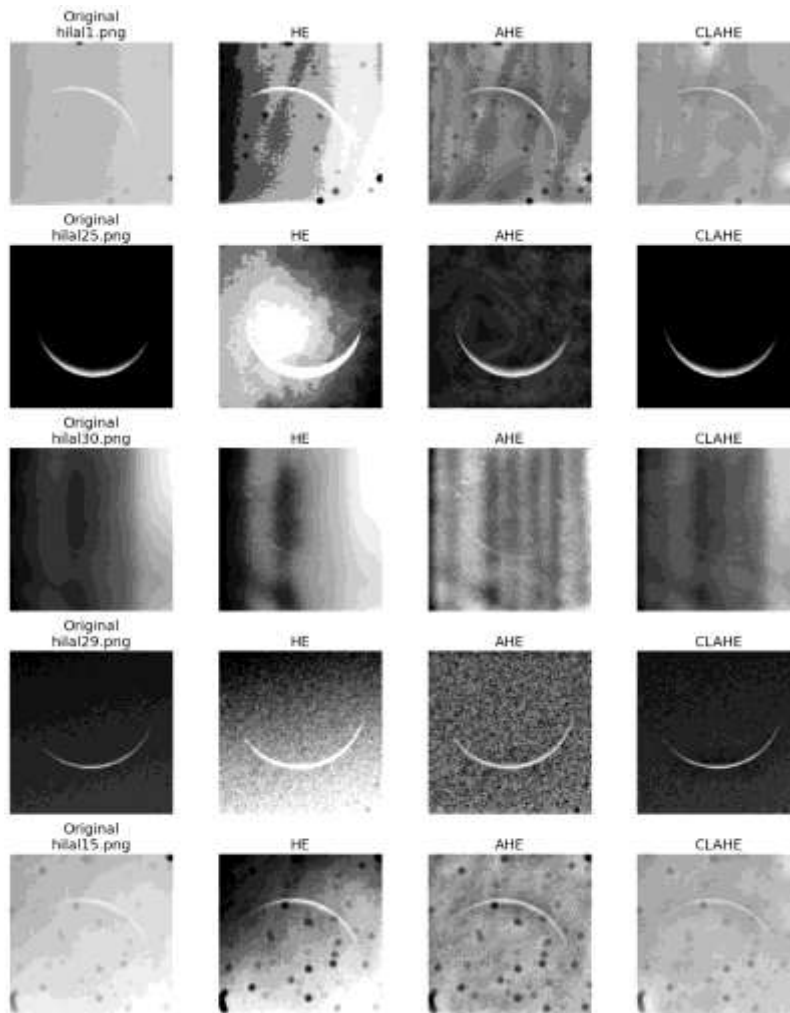
Nilai PSNR yang tinggi menunjukkan kualitas citra yang lebih baik, sementara nilai yang rendah mengindikasikan bahwa kualitas citra kurang baik, mungkin karena adanya *noise* atau kehilangan data selama proses kompresi atau pengolahan [20].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan pengumpulan dataset dan pra-pemrosesan, maka dilakukan eksperimen penerapan ketiga metode peningkatan kontras. Hasil dari eksperimen disajikan melalui dua pendekatan komplementer: analisis kualitatif berbasis visual dan analisis kuantitatif menggunakan metrik.

3.1 Analisis Kualitatif

Untuk analisis visual, lima citra hilal acak yang telah melalui pra-pemrosesan diolah menggunakan tiga metode. Metode AHE dikonfigurasi dengan parameter *Clip Limit* 40.0 dan *Tile Grid Size* 8x8, sedangkan CLAHE diatur pada *Clip Limit* 2.0 dan *Tile Grid Size* 8x8. Perbandingan hasilnya disajikan pada Gambar 3. Dari pengamatan visual, terlihat bahwa HE mampu meningkatkan kontras secara menyeluruh namun dengan konsekuensi amplifikasi derau (*noise*) yang signifikan pada latar belakang.



Gambar 3. Perbandingan Visual Penerapan Peningkatan Kontras HE, AHE, dan CLAHE

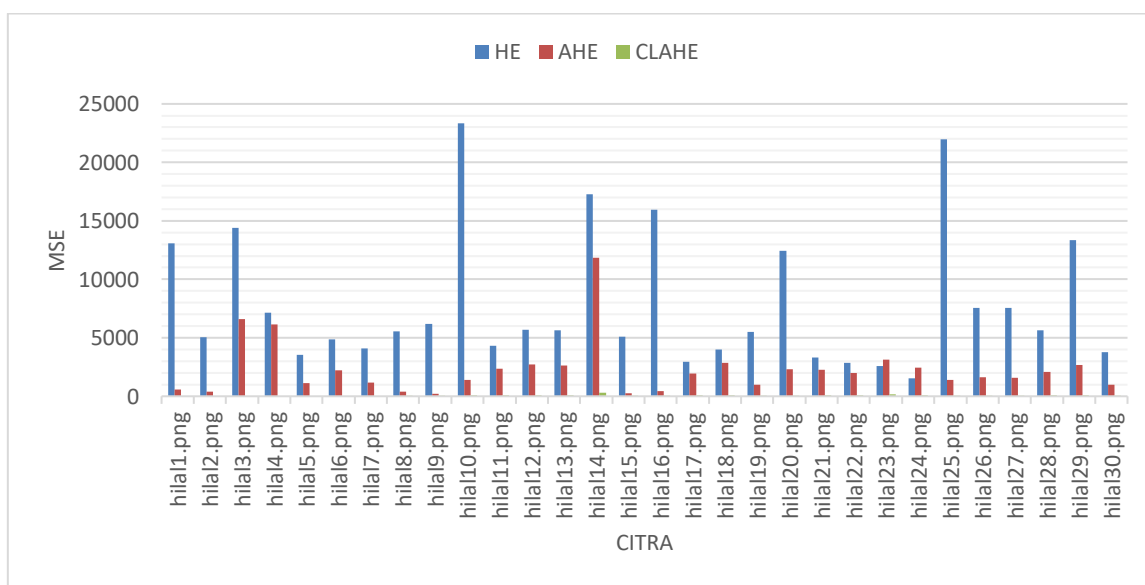
Hasil dari AHE menunjukkan kontras lokal yang sangat kuat, namun menjadi metode dengan hasil terburuk karena amplifikasi derau yang ekstrem hingga membuat citra tampak sangat kotor dan kasar. Sebaliknya, CLAHE memberikan output yang paling optimal. Metode ini berhasil meningkatkan keterlihatan sabit bulan secara tegas sambil secara efektif menekan amplifikasi derau, sehingga menghasilkan citra yang bersih, natural, dan seimbang antara penajaman objek dengan preservasi kualitas latar belakang.

3.2 Analisis Kuantitatif

Setelah dilakukan evaluasi dengan visual, selanjutnya dilakukan evaluasi dengan metrik MSE dan PSNR. Dalam konteks pengolahan citra, kombinasi MSE dan PSNR memberikan pemahaman yang komprehensif tentang kualitas citra yang diperoleh dari aplikasi teknik pengolahan tertentu, seperti *de-noising* atau *enhancement*. Keduanya menyoroti perubahan yang terjadi antara citra asli dan citra hasil, serta memberikan evaluasi objektif mengenai seberapa baik algoritma tersebut berjalan [21]. Hasil dari evaluasi metrik MSE ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4.

Tabel 1. Hasil Evaluasi MSE

| Nama Citra | HE | AHE | CLAHE | Nama Citra | HE | AHE | CLAHE |
|------------------|-----------|-----------|--------|-------------|-----------|----------|--------|
| hilal1.png | 13.084,52 | 567,70 | 26,32 | hilal16.png | 15.963,04 | 437,73 | 17,72 |
| hilal2.png | 5.033,31 | 393,30 | 13,77 | hilal17.png | 2.949,99 | 1.940,74 | 66,55 |
| hilal3.png | 14.382,44 | 6.608,59 | 386,92 | hilal18.png | 3.999,19 | 2.840,93 | 96,91 |
| hilal4.png | 7.129,60 | 6.158,54 | 596,38 | hilal19.png | 5.504,06 | 967,10 | 11,98 |
| hilal5.png | 3.547,45 | 1.142,01 | 57,92 | hilal20.png | 12.433,35 | 2.290,67 | 42,02 |
| hilal6.png | 4.879,30 | 2.198,65 | 97,79 | hilal21.png | 3.313,88 | 2.257,45 | 53,82 |
| hilal7.png | 4.101,39 | 1.185,05 | 37,89 | hilal22.png | 2.842,23 | 1.987,15 | 70,38 |
| hilal8.png | 5.543,00 | 410,81 | 24,45 | hilal23.png | 2.565,70 | 3.149,62 | 177,68 |
| hilal9.png | 6.208,97 | 208,87 | 12,47 | hilal24.png | 1.531,22 | 2.439,27 | 88,20 |
| hilal10.png | 23.347,45 | 1.396,37 | 70,46 | hilal25.png | 21.991,99 | 1.403,45 | 33,18 |
| hilal11.png | 4.328,87 | 2.376,84 | 86,49 | hilal26.png | 7.570,32 | 1.611,18 | 44,61 |
| hilal12.png | 5.690,62 | 2.732,60 | 57,24 | hilal27.png | 7.570,13 | 1.590,49 | 43,97 |
| hilal13.png | 5.618,62 | 2.612,04 | 56,88 | hilal28.png | 5.618,24 | 2.080,35 | 52,69 |
| hilal14.png | 17.289,10 | 11.834,26 | 287,77 | hilal29.png | 13.369,47 | 2.654,91 | 57,70 |
| hilal15.png | 5.110,94 | 254,10 | 15,42 | hilal30.png | 3.781,90 | 964,82 | 13,55 |
| Rata-rata | | | | | 7.876,68 | 2.289,85 | 89,97 |



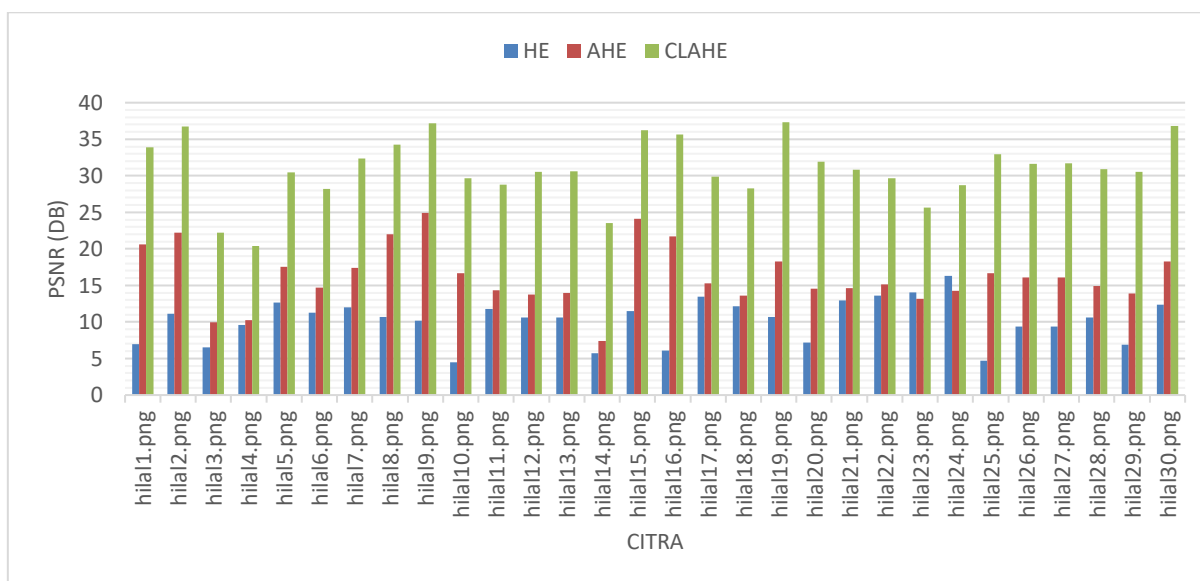
Gambar 4. Grafik MSE Citra Hilal setelah diberikan metode HE, AHE, dan CLAHE

Data diatas menunjukkan bahwa semua nilai citra yang diolah dengan pendekatan CLAHE menghasilkan nilai paling kecil. Nilai rata-rata MSE untuk HE (7.876,68) dan AHE (2.289,85) berada pada level yang sangat tinggi. Hal ini selaras dengan bukti visual, di mana perubahan drastis pada citra tidak hanya berasal dari penguatan objek, tetapi juga dari amplifikasi derau yang masif. Berbanding terbalik, CLAHE mencatatkan nilai rata-rata MSE yang jauh lebih rendah secara signifikan, yaitu 89,97. Sedangkan untuk hasil evaluasi metrik PSNR bisa dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 5.

Tabel 2. Hasil Evaluasi PSNR

| Nama Citra | HE | AHE | CLAHE | Nama Citra | HE | AHE | CLAHE |
|------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
| hilal1.png | 6,96 | 20,59 | 33,93 | hilal16.png | 6,10 | 21,72 | 35,65 |
| hilal2.png | 11,11 | 22,18 | 36,74 | hilal17.png | 13,43 | 15,25 | 29,90 |
| hilal3.png | 6,55 | 9,93 | 22,25 | hilal18.png | 12,11 | 13,6 | 28,27 |
| hilal4.png | 9,60 | 10,24 | 20,38 | hilal19.png | 10,72 | 18,28 | 37,34 |

| | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|
| hilal5.png | 12,63 | 17,55 | 30,50 | hilal20.png | 7,18 | 14,53 | 31,90 |
| hilal6.png | 11,25 | 14,71 | 28,23 | hilal21.png | 12,93 | 14,59 | 30,82 |
| hilal7.png | 12,00 | 17,39 | 32,35 | hilal22.png | 13,59 | 15,15 | 29,66 |
| hilal8.png | 10,69 | 21,99 | 34,25 | hilal23.png | 14,04 | 13,15 | 25,63 |
| hilal9.png | 10,20 | 24,93 | 37,17 | hilal24.png | 16,28 | 14,26 | 28,68 |
| hilal10.png | 4,45 | 16,68 | 29,65 | hilal25.png | 4,71 | 16,66 | 32,92 |
| hilal11.png | 11,77 | 14,37 | 28,76 | hilal26.png | 9,34 | 16,06 | 31,64 |
| hilal12.png | 10,58 | 13,77 | 30,55 | hilal27.png | 9,34 | 16,12 | 31,70 |
| hilal13.png | 10,63 | 13,96 | 30,58 | hilal28.png | 10,63 | 14,95 | 30,91 |
| hilal14.png | 5,75 | 7,4 | 23,54 | hilal29.png | 6,87 | 13,89 | 30,52 |
| hilal15.png | 11,05 | 24,08 | 36,25 | hilal30.png | 12,35 | 18,29 | 36,81 |
| Rata-rata | | | | | 10,16 | 16,21 | 30,92 |



Gambar 5. Grafik MSE Citra Hilal setelah diberikan metode HE, AHE, dan CLAHE

Data diatas menunjukkan bahwa metode yang menghasilkan nilai rata-rata PSNR paling besar adalah CLAHE (30,92), kemudian disusul AHE (16,21), dan yang lebih kecil adalah HE (10,16). Hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa pendekatan CLAHE menghasilkan kualitas citra hilal yang paling baik. Pada metrik PSNR, nilai di atas 30 dB dianggap baik, sedangkan nilai di atas 40 dB menunjukkan kualitas yang sangat tinggi [22].

Secara keseluruhan, sintesis antara bukti visual dan data kuantitatif secara konsisten menunjuk pada CLAHE sebagai metode yang paling unggul dan andal untuk pemrosesan citra hilal. Nilai MSE-nya yang lebih rendah, dan PSNR yang lebih tinggi, bila diinterpretasikan bersamaan dengan hasil visualnya yang bersih, mengonfirmasi bahwa CLAHE melakukan modifikasi yang lebih tepat dan terarah. Algoritma ini berhasil mencapai tujuan utama peningkatan kontras pada objek hilal dengan tingkat error atau distorsi yang jauh lebih kecil dibandingkan HE dan AHE. Kegagalan kedua metode tersebut terletak pada ketidakmampuan inheren mereka untuk mengendalikan amplifikasi derau, sementara kesuksesan CLAHE berakar pada fitur *contrast limiting*-nya. Berdasarkan temuan ini, adopsi CLAHE sebagai prosedur standar dalam alur kerja pengolahan citra untuk ruykatul hilal berbasis teknologi digital sangat direkomendasikan.

4. KESIMPULAN

Studi komparatif ini menyimpulkan bahwa dari tiga teknik peningkatan kontras yang diuji pada citra hilal, CLAHE menunjukkan performa yang paling superior dan konsisten. Dua metode lainnya, yaitu HE dan AHE, terbukti kurang sesuai untuk kasus ini. Meskipun keduanya mampu meningkatkan kontras secara umum, efek samping yang ditimbulkan berupa amplifikasi derau yang parah, membuat hasil citra menjadi tidak informatif. Hal ini ditunjukkan oleh artefak visual yang signifikan pada hasil gambar dan didukung oleh tingginya skor kuantitatif MSE dengan rata-rata masing-masing 7.876,68 dan 2.289,85, sedangkan CLAHE mendapatkan skor rata-rata PSNR terendah yaitu 89,97, yang mengindikasikan bahwa perubahan intensitas piksel pada hasil CLAHE lebih mendekati citra asli.

Hasil ini diperkuat oleh nilai PSNR, di mana CLAHE mencatat nilai tertinggi sebesar 30,92 dB, menunjukkan kualitas visual yang lebih baik dan minim distorsi. Sebaliknya, metode HE dan AHE menghasilkan PSNR yang jauh lebih rendah, masing-masing sebesar 10,16 dB dan 16,21 dB, yang mengindikasikan adanya distorsi cukup besar terhadap citra asli. Oleh karena itu, kesimpulan utama dari penelitian ini adalah bahwa CLAHE merupakan metode paling optimal untuk kebutuhan spesifik pengolahan citra hilal. Kombinasi uniknya antara efektivitas peningkatan kontras dan kemampuannya mengendalikan artefak menjadikannya sebagai solusi yang robust dan sangat aplikatif. Implementasinya berpotensi besar untuk meningkatkan kualitas data dan keandalan dalam sistem observasi hilal modern yang mengandalkan pencitraan digital.

Sebagai arah pengembangan riset di masa depan, direkomendasikan eksplorasi lebih lanjut pada penentuan parameter CLAHE secara otomatis serta penggunaan metrik evaluasi tambahan seperti SSIM (*Structural Similarity Index Measure*) untuk penilaian yang lebih komprehensif dari sisi persepsi visual.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abd. Haji Amahoru, Ashari Bayu Prasada Dulhasyim, and Sri Rahmadani Pulu, "Analisis Citra Visual Fase-Fase Bulan dalam Tinjauan Sistem Koordinat Bola Langit," *Jurnal Pendidikan Mipa*, vol. 14, no. 1, pp. 114–123, 2024, doi: 10.37630/jpm.v14i1.1492.
- [2] W. N. J. H. W. Yussof, M. Man, R. Umar, A. N. Zulkeflee, E. A. Awalludin, and N. Ahmad, "Enhancing Moon Crescent Visibility Using Contrast-Limited Adaptive Histogram Equalization and Bilateral Filtering Techniques," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, vol. 1, no. 2022, pp. 3–13, 2022, doi: 10.26636/jtit.2022.155721.
- [3] W. Wang, X. Wu, X. Yuan, and Z. Gao, "An Experiment-Based Review of Low-Light Image Enhancement Methods," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 87884–87917, 2020, doi: 10.1109/access.2020.2992749.
- [4] K. G. Dhal, A. Das, S. Ray, J. Gálvez, and S. Das, "Histogram Equalization Variants as Optimization Problems: A Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 1471–1496, 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09425-1.
- [5] P. Härtinger and C. Steger, "Adaptive histogram equalization in constant time," *J Real Time Image Process*, vol. 21, no. 3, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1007/s11554-024-01465-1.
- [6] W. A. Mustafa and M. M. M. Abdul Kader, "A Review of Histogram Equalization Techniques in Image Enhancement Application," *J Phys Conf Ser*, vol. 1019, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1019/1/012026.
- [7] S. Saifullah, A. Pranolo, and R. Dreżewski, "Comparative analysis of image enhancement techniques for brain tumor segmentation: contrast, histogram, and hybrid approaches," *E3S Web of Conferences*, vol. 501, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202450101020.
- [8] S. Saifullah, "Analisis Perbandingan He Dan Clahe Pada Image Enhancement Dalam Proses Segmenasi Citra Untuk Deteksi Fertilitas Telur," *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika (Janapati)*, vol. 9, no. 1, p. 134, 2020, doi: 10.23887/janapati.v9i1.23013.
- [9] M. Santoso, S. Defit, and Yuhandri, "Penerapan Convolutional Neural Network pada Klasifikasi Citra Pola Kain Tenun Melayu," *Jurnal CoSciTech (Computer Science and Information Technology)*, vol. 5, no. 1, pp. 177–184, 2024, doi: 10.37859/coscitech.v5i1.6713.
- [10] C. Y. Lien, C. H. Tang, P. Y. Chen, Y. T. Kuo, and Y. L. Deng, "A Low-Cost VLSI Architecture of the Bilateral Filter for Real-Time Image Denoising," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 64278–64283, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2984688.
- [11] C. Chen, "Acceleration of Vector Bilateral Filtering for Hyperspectral Imaging With GPU," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 49, no. 5, pp. 1502–1514, 2021, doi: 10.1002/cta.2973.
- [12] A. Dermawan, T. Tommy, and D. Handoko, "Penerapan Bilateral Filtering untuk Peningkatan Kualitas Citra Digital Fokus pada Gaussian, Salt-and-Pepper, dan Speckle Noise," *Algoritma: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, vol. 8, no. 2, p. 98, 2024, doi: 10.30829/algoritma.v8i2.22130.
- [13] C. Anam, A. Naufal, H. Sutanto, K. Adi, and G. Dougherty, "Impact of Iterative Bilateral Filtering on the Noise Power Spectrum of Computed Tomography Images," *Algorithms*, vol. 15, no. 10, 2022, doi: 10.3390/a15100374.

- [14] K. G. Dhal, A. Das, S. Ray, J. Gálvez, and S. Das, "Histogram Equalization Variants as Optimization Problems: A Review," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, no. 3, pp. 1471–1496, 2021, doi: 10.1007/s11831-020-09425-1.
- [15] A. H. Sheer and H. G. Daway, "MRI Image Enhancement Based Fuzzy C-Mean Segment and Modified Adapted Histogram Equalization," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 402–409, 2023, doi: 10.22266/ijies2023.0228.35.
- [16] S. Suharyanto and F. Frieyadie, "Analisis Komparasi Perbaikan Kualitas Citra Bawah Air Berbasis Kontras Pemerataan Histogram," *INTI Nusa Mandiri*, vol. 15, no. 1, pp. 95–102, 2020, doi: 10.33480/inti.v15i1.1501.
- [17] S. Saifullah, "Enhancement Dalam Proses Segmenasi Citra Untuk Deteksi Fertilitas Telur," vol. 9, pp. 134–145, 2020.
- [18] A. P. Abriantoro and J. R. Khana, "Optimasi Mix Design Beton Melalui Teknologi Machine Learning," *Jurnal Rekayasa Infrastruktur*, vol. 9, no. 2, pp. 94–107, 2023, doi: 10.31943/jri.v9i2.228.
- [19] W. Mulyana, Aryanto, and M. Aprilia, "Penerapan Metode Single Exponential Smoothing Untuk Prediksi Kasus Positif COVID 10 di Kabupaten Bengkalis," *Jurnal CoSciTech (Computer Science and Information Technology)*, vol. 3, no. 3, pp. 415–421, 2022, doi: 10.37859/coscitech.v3i3.4363.
- [20] S. H. Majeed and N. A. M. Isa, "Iterated Adaptive Entropy-Clip Limit Histogram Equalization for Poor Contrast Images," *Ieee Access*, vol. 8, pp. 144218–144245, 2020, doi: 10.1109/access.2020.3014453.
- [21] E. Abdalhussein, N. J. Ibrahim, and Y. H. Ali, "Image Steganography Based on Hybrid Salp Swarm Algorithm and Particle Swarm Optimization," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 802–812, 2024, doi: 10.22266/ijies2024.0229.67.
- [22] D. O. Orucho, F. M. Awuor, R. Makiya, and C. Oduor, "An Enhanced Data Transmission in Mobile Banking Using LSB-AES Algorithm," *Asian Journal of Research in Computer Science*, vol. 16, no. 1, pp. 43–56, 2023, doi: 10.9734/ajrcos/2023/v16i1334.