

Optimasi Peningkatan Kontras Gambar Menggunakan Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

Muhammad Rafli Pratama¹, Shafira Zahrah Hidayat², Abdul Rahman Nuruddin³, Hamida Wefi Niamaputri⁴, dan Fetty Tri Anggraeny⁵

Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur

E-mail: rafliumh09@gmail.com¹, ²shafirazahrah12@gmail.com², abd.rahman120303@gmail.com³, hamidawefin23@gmail.com⁴, ⁵fettyanggraeny.if@upnjatim.ac.id⁵

ABSTRACT

Image processing is a field that continues to grow along with the advancement of computer technology, with a primary focus on improving image quality, especially in images with low contrast. One of the challenges often faced is the difficulty in identifying details in images with suboptimal lighting or inadequate contrast. This study proposes a hybrid approach that combines Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets (IVIFS) and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) to enhance image contrast. IVIFS plays a role in overcoming skin in pixel intensity, while CLAHE is designed to enhance local contrast without causing over-enhancement effects or excessive noise. A dataset of low-contrast images was taken from Kaggle to test the effectiveness of the proposed method. The entropy test results show that the CLAHE method produces the highest entropy value across all images, reflecting a significant increase in detail and contrast. The defuzzification process produces images with smoother entropy, providing optimal contrast without excessive distortion. The proposed method is proven to be more effective compared to traditional techniques such as Histogram Equalization (HE) and Adaptive Histogram Equalization (AHE). This approach offers an efficient and optimal solution for improving image quality, especially in medical imaging, remote sensing, and other image processing applications.

Kata Kunci

IVIFS; CLAHE; Pengolahan Citra; Kontras Rendah; Noise

Keywords

IVIFS; CLAHE; Image Processing; Low Contrast; Noise

ABSTRAK

Pengolahan citra merupakan bidang yang terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi komputer, dengan fokus utama pada peningkatan kualitas gambar, terutama pada gambar yang memiliki kontras rendah. Salah satu tantangan yang sering dihadapi adalah kesulitan dalam mengidentifikasi detail pada gambar yang memiliki pencahayaan yang kurang optimal atau kontras yang tidak memadai. Penelitian ini mengusulkan suatu pendekatan hibrida yang menggabungkan Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets (IVIFS) dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) untuk meningkatkan kontras gambar. IVIFS berperan dalam mengatasi ketidakpastian yang terdapat dalam intensitas piksel, sedangkan CLAHE dirancang untuk meningkatkan kontras lokal tanpa menyebabkan efek over-enhancement atau noise yang berlebihan. Dataset gambar dengan kontras rendah diambil dari Kaggle untuk menguji efektivitas metode yang diusulkan. Hasil pengujian entropi menunjukkan bahwa metode CLAHE menghasilkan nilai entropi tertinggi pada seluruh gambar, yang mencerminkan peningkatan signifikan dalam detail dan kontras. Proses defuzzifikasi menghasilkan gambar dengan entropi yang lebih halus, memberikan kontras yang optimal tanpa distorsi yang berlebihan. Metode yang diusulkan terbukti lebih efektif dibandingkan dengan teknik tradisional seperti Histogram Equalization (HE) dan Adaptive Histogram Equalization (AHE). Pendekatan ini menawarkan solusi yang efisien dan optimal untuk peningkatan kualitas citra, khususnya dalam aplikasi citra medis, penginderaan jauh, dan pengolahan citra lainnya.

PENDAHULUAN

Pengolahan citra merupakan bidang yang terus berkembang dalam teknologi komputer, khususnya untuk meningkatkan kualitas gambar guna mendukung interpretasi visual yang lebih baik. Salah satu permasalahan utama dalam pengolahan citra adalah rendahnya kontras pada gambar, yang dapat menyebabkan detail menjadi sulit terlihat atau bahkan hilang sepenuhnya. Kondisi ini umum terjadi pada gambar yang diambil dengan pencahayaan rendah atau kontras yang kurang baik [3].

Salah satu pendekatan untuk mengatasi masalah tersebut adalah dengan teknik image enhancement, yang bertujuan memperbaiki kontras dan kualitas visual gambar. Beberapa metode tradisional seperti *Histogram Equalization* (HE) dan *Adaptive Histogram Equalization* (AHE) telah

digunakan secara luas untuk meningkatkan kontras gambar. Namun, metode ini memiliki kelemahan, terutama dalam menghasilkan efek *over-enhancement* atau *noise* yang tidak diinginkan. Hal ini menjadi masalah karena peningkatan kontras yang berlebihan dapat menurunkan kualitas visual dan malah memperburuk interpretasi citra [4].

Seiring dengan perkembangan teknologi, pendekatan berbasis logika *fuzzy* mulai diterapkan dalam pengolahan citra. *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets* (IVIFS) muncul sebagai metode yang lebih fleksibel dalam menangani ketidakpastian, dengan memanfaatkan interval nilai keanggotaan dan ketidakberanggotaan untuk merepresentasikan intensitas piksel. Pendekatan ini sangat berguna dalam situasi di mana citra memiliki ketidakpastian atau variasi yang tinggi pada nilai intensitasnya. Di sisi lain, metode *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE) dikenal efektif dalam meningkatkan kontras lokal sambil meminimalkan *noise* melalui pembatasan histogram pada bagian-bagian kecil gambar. CLAHE terbukti mampu meningkatkan detail gambar di area dengan pencahayaan yang rendah tanpa menyebabkan *over-enhancement*, yang umum terjadi pada metode *Histogram Equalization* (HE) [3]. Misalnya, metode CLAHE pernah diimplementasikan untuk peningkatan kontras citra mamografi digital, yang menunjukkan bahwa metode ini dapat meningkatkan kontras citra mamografi secara signifikan, bergantung pada nilai *clip limit* yang digunakan [12].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode *fuzzy type-1* memiliki kemampuan lebih baik dibandingkan HE dalam meningkatkan kualitas citra. Namun, kelemahan *fuzzy type-1* terletak pada ketidakmampuannya menangani distribusi kontras yang tidak merata, yang kemudian diatasi oleh *fuzzy type-2* dan IVIFS. Sementara itu, CLAHE telah menunjukkan keberhasilan dalam meningkatkan visibilitas detail gambar dengan pencahayaan rendah, tetapi penerapannya umumnya dilakukan secara terpisah dari pendekatan *fuzzy* [4].

Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan peningkatan citra dengan pencahayaan rendah. Peneliti telah menggunakan berbagai ruang warna seperti RGB dan YCbCr untuk proses peningkatan. Studi komparatif menunjukkan bahwa ruang warna HSI paling efektif untuk peningkatan kualitas citra, memberikan hasil yang lebih baik dalam mengekstraksi dan meningkatkan detail gambar [5]. Penelitian terkait himpunan *fuzzy* intuisisionistik menunjukkan perkembangan yang signifikan. Beberapa peneliti telah mengaplikasikan metode ini dalam berbagai domain, mulai dari segmentasi citra medis hingga peningkatan citra dengan pencahayaan rendah. Eksplorasi generator *fuzzy* intuisisionistik dengan variasi parameter telah menjadi fokus utama, dengan pendekatan pemilihan citra berdasarkan entropi tertinggi [5].

Meski metode IVIFS dan CLAHE telah terbukti efektif dalam menangani masalah kontras rendah, integrasi kedua pendekatan ini belum banyak dieksplorasi. Penelitian sebelumnya lebih sering membandingkan hasil masing-masing metode secara terpisah, tanpa memanfaatkan keunggulan IVIFS dalam menangani ketidakpastian secara bersamaan dengan kemampuan CLAHE dalam meningkatkan kontras lokal [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan pendekatan hybrid yang menggabungkan IVIFS dan CLAHE guna meningkatkan kualitas gambar dengan kontras rendah. Metode yang diusulkan akan dievaluasi berdasarkan kualitas visual hasil gambar yang ditingkatkan, baik melalui pengamatan subjektif maupun melalui analisis perbandingan hasil gambar asli dan hasil peningkatan. Dataset gambar dengan pencahayaan rendah yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari *Kaggle*. Pendekatan ini diharapkan mampu mengatasi keterbatasan metode sebelumnya dan memberikan solusi yang lebih optimal.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan bidang teknologi yang mengalami perkembangan yang signifikan, dengan tujuan untuk meningkatkan kualitas gambar atau mempermudah analisis data visual. Salah satu teknik fundamental dalam pengolahan citra adalah segmentasi, yang bertujuan untuk memisahkan objek dari latar belakang, sehingga analisis dapat lebih terfokus pada objek yang relevan. Segmentasi memiliki peranan penting dalam berbagai aplikasi, seperti pengenalan objek, pengenalan pola, dan analisis citra medis. *K-Means Clustering* adalah salah satu metode segmentasi

yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengelompokkan piksel berdasarkan kesamaan intensitas. Dalam berbagai penelitian, metode ini telah terbukti efektif dalam memisahkan objek utama dengan tingkat keberhasilan yang tinggi, khususnya dalam pengolahan citra berwarna [1].

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

CLAHE adalah metode *histogram equalization* yang dirancang untuk mengatasi kelemahan histogram equalization konvensional, seperti efek *over enhancement* dan amplifikasi *noise*. Metode ini membagi citra menjadi blok-blok kecil (*tiles*) dan menerapkan penyeimbangan histogram secara lokal pada masing-masing blok. Parameter batas klip digunakan untuk membatasi penguatan histogram, sedangkan ukuran grid tile dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan resolusi citra. Penelitian menunjukkan bahwa CLAHE sangat efektif dalam meningkatkan kontras lokal tanpa mengorbankan detail citra, terutama dalam aplikasi seperti analisis citra medis dan citra dengan pencahayaan rendah [2].

Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets (IVIFS)

Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets atau IVIFS merupakan suatu pengembangan dari himpunan *fuzzy* yang menambahkan elemen keraguan di samping elemen keanggotaan dan ketidakanggotaannya. Dalam konteks pengolahan citra, IVIFS digunakan untuk mengatasi ketidakpastian yang muncul pada intensitas piksel, terutama pada citra yang memiliki pencahayaan rendah atau kontras yang tidak merata. Dengan memanfaatkan interval nilai *fuzzy*, IVIFS dapat merepresentasikan variasi intensitas piksel dengan lebih fleksibel dibandingkan dengan *fuzzy sets* konvensional. Penelitian menunjukkan bahwa penerapan IVIFS dapat secara signifikan meningkatkan distribusi kontras. Selain itu, digabungkan dengan metode lain seperti CLAHE untuk mengoptimalkan kualitas visual, karena kemampuan IVIFS dalam memperbaiki distribusi intensitas piksel di seluruh area gambar [5].

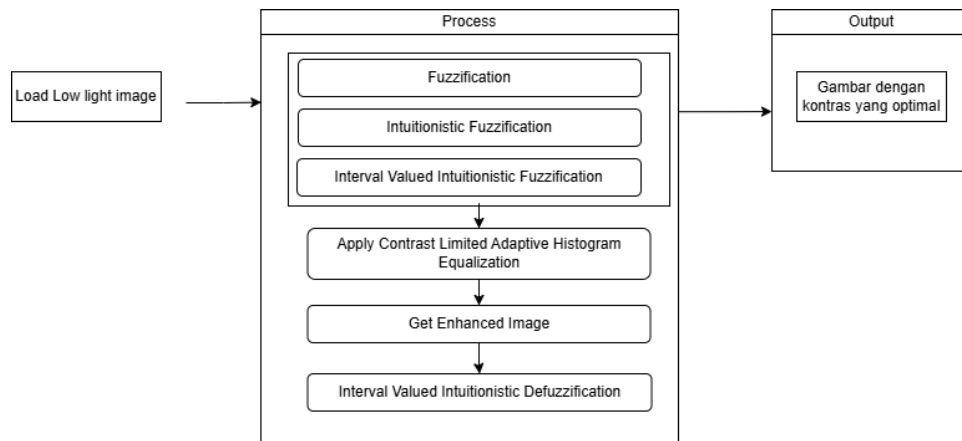
Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam pengolahan *fuzzy* yang berfungsi untuk mengubah data *fuzzy* menjadi nilai *crisp*. Proses ini sangat penting untuk menghasilkan gambar yang lebih realistis dan mudah diinterpretasikan secara visual. Defuzzifikasi dapat membantu dalam menggabungkan hasil *fuzzy* dengan teknik peningkatan kontras lainnya seperti CLAHE. Sebagai contoh, setelah citra diproses menggunakan IVIFS untuk memperbaiki distribusi intensitas, defuzzifikasi diterapkan untuk menyempurnakan hasil akhir, sehingga menghasilkan gambar dengan transisi visual yang lebih halus dan mengurangi gangguan *noise* yang tidak diinginkan [5]. Selain itu, defuzzifikasi sering kali diterapkan menggunakan fungsi khusus yang mempertimbangkan intensitas global untuk memastikan bahwa hasil gambar tetap konsisten dengan karakteristik aslinya [7].

Performance measurement using entropy for images

Entropi adalah ukuran informasi atau ketidakpastian dalam suatu data. Dalam konteks pengolahan citra, entropi digunakan untuk mengukur distribusi piksel dalam gambar. Gambar dengan nilai entropi rendah sering kali terlihat datar atau kurang detail, sedangkan entropi tinggi menunjukkan keberagaman yang lebih besar dalam nilai intensitas piksel [5].

METODE



Gambar 1. Diagram Kerangka Berpikir

Tahapan penelitian seperti pada Gambar 1. dimulai dengan pengumpulan dataset gambar pencahayaan rendah yang diambil dari *Kaggle*. Dataset ini dipilih karena mencakup berbagai kondisi pencahayaan yang sesuai dengan permasalahan kontras rendah, sehingga dapat menguji efektivitas metode yang diusulkan dalam berbagai skenario. Setelah dataset diperoleh, dilakukan analisis masalah untuk mengidentifikasi tantangan utama, termasuk kehilangan detail penting pada gambar, ketidakpastian intensitas piksel pada area dengan pencahayaan buruk, dan *noise* yang dihasilkan oleh metode peningkatan kontras tradisional.

Implementasi algoritma dilakukan menggunakan *Python*. Proses implementasi dimulai dengan *preprocessing*, yaitu konversi gambar berwarna menjadi *grayscale* untuk mempermudah penerapan CLAHE. Setelah itu, dilakukan pengolahan IVIFS dengan menghitung interval nilai keanggotaan, membentuk representasi *fuzzy*, dan menerapkan transformasi *interval-valued*. Selanjutnya, proses CLAHE dilakukan dengan membagi gambar menjadi beberapa *region (tiles)*, membatasi histogram setiap *region* untuk mencegah *over-enhancement*, dan menggabungkan hasilnya menggunakan interpolasi bilinear agar transisi antar-*region* terlihat halus.

Fuzzification

Fuzzification adalah proses pemetaan dari *input* sebuah himpunan *crisp* ke dalam himpunan *fuzzy* yang berada di dalam semesta wacana [7]. tahap awal dalam metode *fuzzy* yang bertujuan mengubah nilai piksel gambar menjadi nilai keanggotaan *fuzzy*. Setiap piksel dinormalisasi ke rentang $[0, 1]$ untuk menghitung nilai keanggotaan (μ) , ketidakanggotaannya $(1 - \mu)$, dan nilai keragu-raguannya $(1 - \mu - (1 - \mu))$. Tahapan ini menggunakan rumus:

$$\mu(x) = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

Di mana x merujuk pada nilai intensitas piksel pada gambar, sedangkan $\min(x)$ dan $\max(x)$ masing-masing adalah nilai intensitas terendah dan tertinggi yang terdapat dalam gambar. Misalnya, jika intensitas piksel $x = 128$, dengan nilai minimum 0 dan maksimum 255, maka $(128) = \frac{128-0}{255-0} = 0.502$

Intuitionistic Fuzzification

Pada tahap ini digunakan untuk menghitung nilai keanggotaan telah diperluas dengan konsep limit *fuzzy* dan meningkatkan hasil fuzzifikasi dengan mempertimbangkan transformasi *non-*

linear untuk meningkatkan detail pada gambar [6]. Setiap nilai intensitas piksel ditransformasikan menggunakan persamaan:

$$\mu'(x) = \min(\max(x^{1.3}, 0), 255)$$

Di mana x adalah nilai intensitas piksel, $\min(\cdot)$ memastikan bahwa nilai hasil tidak melebihi 255, dan $\max(\cdot)$ memastikan bahwa nilai hasil tidak kurang dari 0. Transformasi ini memperkuat detail pada area terang dan gelap sehingga menghasilkan gambar dengan tingkat kejelasan yang lebih tinggi. Sebagai contoh, jika $x=200$, hasilnya adalah $\mu'(200) = 249.27$ dibulatkan menjadi 249.

Interval Valued Intuitionistic Fuzzification (IVIFs)

Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets adalah perluasan dari himpunan fuzzy dari karakteristik dari setiap elemen yang mempunyai derajat keanggotaan dan non-keanggotaan yang jika dijumlahkan akan bernilai kurang dari satu [7]. *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Processing* menghitung nilai keanggotaan *lower* dan *upper* untuk setiap kanal warna (R, G, B) pada piksel gambar.

$$\mu_{lower}(x, y, c) = (1, \frac{I(x, y, z) - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}})$$

$$\mu_{upper}(x, y, c) = (1, \frac{I(x, y, z) - \mu_{min}}{\mu_{max} - \mu_{min}})$$

$$fuzzy\ membership = \frac{\mu_{lower}(x, y, c) + \mu_{upper}(x, y, c)}{2}$$

Pada rumus di atas x dan y melambangkan pixel dalam gambar, sedangkan c adalah kanal warna, dan I merupakan nilai intensitas pixel. Nilai *lower* dihitung dengan channel x 2.5 dan *upper* dengan channel x 3, keduanya dibatasi pada rentang 0 – 255. Rata-rata dari nilai *lower* dan *upper* menghasilkan keanggotaan fuzzy baru untuk setiap kanal.

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)

CLAHE adalah metode pengembangan dari *Adaptive Histogram Equalization* (AHE), CLAHE sendiri akan menghitung peningkatan kontras yang berlebihan pada AHE dengan cara memberikan nilai batas pada histogram yang biasa disebut *clip limit* [10]. CLAHE diterapkan pada citra RGB dengan memproses tiap kanal warna (R, G, B) secara terpisah. Histogram intensitas (0 – 255) dihitung untuk setiap kanal, diikuti dengan perhitungan dan normalisasi CDF untuk memetakan nilai piksel asli ke nilai baru. Histogram dan CDF masing-masing memiliki 256 nilai, dan total piksel yang diproses adalah $width \times height \times 3$ kanal. Tahapan ini ditransformasikan menggunakan persamaan:

$$CDF'(x) = \frac{CDF(x) - CDF_{min}}{CDF_{max} - CDF_{min}} \times (L - 1)$$

Di mana $CDF(x)$ adalah fungsi distribusi kumulatif untuk nilai intensitas x , CDF_{min} dan CDF_{max} masing-masing adalah nilai minimum dan maksimum dari CDF , dan L adalah jumlah level

intensitas yang digunakan dalam pemrosesan gambar. Proses ini mengurangi risiko *over-enhancement* pada gambar. Misalnya, sebuah gambar 100x100 piksel dengan 3 kanal warna (RGB) akan memproses total 30,000 piksel.

Defuzzification

Defuzzification adalah proses pemetaan aksi kontrol *fuzzy* ke aksi kontrol *non-fuzzy (crisp)* dan juga tahapan akhir penelitian untuk memproses peningkatan gambar [11]. tujuan *defuzzification* untuk menyempurnakan hasil gambar setelah diterapkannya CLAHE. gambar yang akan diinputkan akan disesuaikan dengan cara mengatur kontras ke skala 0.8 yang sedikit menurunkan dari kondisi aslinya, tujuan dari penyesuaian ini untuk memperhalus tampilan gambar setelah proses CLAHE. tahapan ini menggunakan rumus :

$$I'(x, y) = \text{mean}(I) + k \cdot (I(x, y) - \text{mean}(I))$$

Di mana $I(x, y)$ adalah intensitas awal piksel pada koordinat (x, y) , $\text{mean}(I)$ adalah rata-rata intensitas semua piksel dalam gambar yang menjadi referensi untuk pergeseran kontras, $I'(x, y)$ adalah intensitas piksel hasil setelah penyesuaian kontras, dan k adalah faktor yang menentukan tingkat penyesuaian kontras. Jika $k > 1$, kontras akan meningkat, sedangkan jika $0 < k < 1$, kontras akan berkurang, seperti yang diterapkan dalam kode dengan nilai $k = 0.85$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Kinerja

Citra yang dianalisis dalam penelitian ini memiliki format JPEG dengan dimensi 250x250 piksel dan kedalaman warna 8 bit per saluran. Gambar-gambar tersebut menunjukkan tingkat kontras yang rendah, yang sering kali disebabkan oleh pencahayaan yang tidak memadai atau adanya gangguan *noise*. Tujuan dari proses peningkatan kualitas citra adalah untuk memperbaiki kontras serta memperjelas objek yang sebelumnya terhalang oleh gangguan atau *noise*. Dalam penelitian ini, terdapat dua metode utama yang diterapkan untuk perbaikan kontras adalah *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets (IVIFS)* dan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE)*.

1. Tampilan Gambar Kontras Rendah

Gambar yang dianalisis dalam penelitian ini adalah citra dengan kontras yang rendah, yang memperlihatkan detail yang samar dan hampir tidak terlihat, terutama pada bagian-bagian yang memiliki pencahayaan minim. Citra ini berukuran 250x250 piksel dan disimpan dalam format JPG. Sebagai gambar awal yang digunakan dalam proses peningkatan citra, terlihat jelas bahwa kualitas gambar sangat terbatas, dengan detail yang hampir tidak ada.



Gambar 2. Citra dengan Kontras Rendah

Gambar 2 menunjukkan gambar yang diambil dalam kondisi pencahayaan yang rendah, sehingga detail-detail yang ada dalam gambar sangat sulit untuk diidentifikasi.

2. Perbaikan Gambar Dengan *Fuzzification*

Setelah proses fuzzifikasi selesai, gambar diperbaiki dengan mengubah nilai intensitas piksel menjadi nilai keanggotaan *fuzzy* melalui pendekatan *Fuzzification*. Pada tahap ini, setiap piksel dalam gambar diubah menjadi nilai keanggotaan, ketidakanggotaannya, dan keragu-raguannya, sesuai dengan rumus yang telah dijelaskan sebelumnya. Proses ini menghasilkan gambar dengan kontras yang lebih baik, meskipun masih terdapat area yang belum optimal.

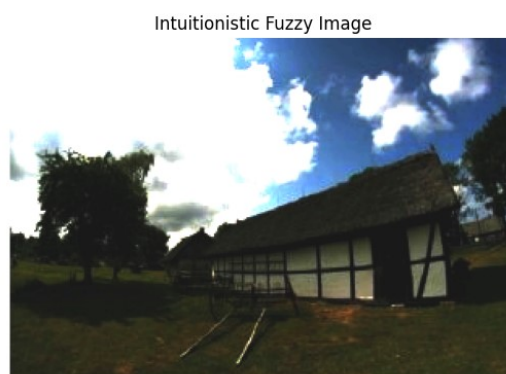


Gambar 3. Citra setelah Fuzzification

Hasil dari proses fuzzifikasi pada gambar 3 menunjukkan adanya peningkatan detail pada gambar, meskipun kontras global masih memerlukan perbaikan lebih lanjut.

3. Perbaikan Gambar Dengan *Intuitionistic Fuzzy*

Langkah selanjutnya adalah penerapan Citra Dengan *Intuitionistic Fuzzy*. Pada tahap ini, transformasi *non-linear* diterapkan untuk meningkatkan detail gambar dengan mempertimbangkan intensitas piksel di area terang dan gelap. Hasil dari tahap ini adalah gambar yang memiliki kontras lebih tajam dan lebih jelas pada bagian-bagian yang sebelumnya kurang terang. Penerapan citra *fuzzy* intuitif berkontribusi pada peningkatan kualitas visual gambar dengan mengurangi *noise* dan memperjelas bagian yang sebelumnya tidak terlihat.



Gambar 4. Citra setelah penerapan Citra Fuzzy Intuitif

Gambar 4 menunjukkan perbaikan detail yang lebih baik, terutama di area terang dan gelap, setelah penerapan citra *fuzzy* intuitif.

4. Perbaikan Gambar Dengan *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Image*

Pada tahap ini, diterapkan *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets* (IVIFS). Metode IVIFS menawarkan pendekatan yang lebih akurat dalam mengatasi ketidakpastian intensitas piksel dengan

menghitung nilai keanggotaan dalam dua interval (bawah dan atas) untuk setiap saluran warna (R, G, B). Hasilnya adalah citra dengan kontras yang lebih seimbang di seluruh bagian gambar. Penerapan IVIFS memungkinkan distribusi kontras yang lebih seragam dan meningkatkan detail pada area dengan pencahayaan yang sangat minim.

Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Image



Gambar 5. Citra setelah penerapan Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Image.

Gambar 5 menunjukkan peningkatan kontras yang lebih seimbang dan detail yang lebih tajam setelah penerapan metode IVIFS. Perbaikan ini berhasil mengatasi ketidakmerataan kontras yang sebelumnya terdapat pada gambar.

5. Perbaikan Gambar Dengan CLAHE

Gambar yang telah melalui proses difuzzifikasi kemudian diterapkan metode *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE). Metode CLAHE dirancang untuk meningkatkan kontras lokal dengan cara membagi gambar menjadi beberapa *tile* dan membatasi histogram pada setiap *tile* tersebut, sehingga dapat menghindari efek peningkatan kontras yang berlebihan. Proses CLAHE ini menghasilkan gambar dengan kontras yang lebih tajam serta detail yang lebih jelas pada area yang sebelumnya terlihat kabur, tanpa menambah tingkat kebisingan yang berlebihan.



Gambar 6. Citra setelah Proses CLAHE

Hasil dari penerapan CLAHE pada gambar 6 menunjukkan peningkatan kontras lokal yang signifikan, terutama pada bagian-bagian gambar yang sebelumnya kurang terang.

6. Perbaikan Gambar *Defuzzified Image*

Tahap akhir dalam proses ini adalah Defuzzifikasi, yang bertujuan untuk memperbaiki hasil citra setelah penerapan CLAHE. Pada tahap ini, nilai kontras disesuaikan dengan faktor $k=0,85$ untuk menghasilkan citra dengan kontras yang sedikit lebih rendah, sehingga memberikan kesan yang lebih alami. Proses ini menghasilkan citra dengan transisi yang lebih halus antara area terang dan gelap, serta mengurangi kemungkinan munculnya artefak yang dapat terjadi setelah penerapan CLAHE.

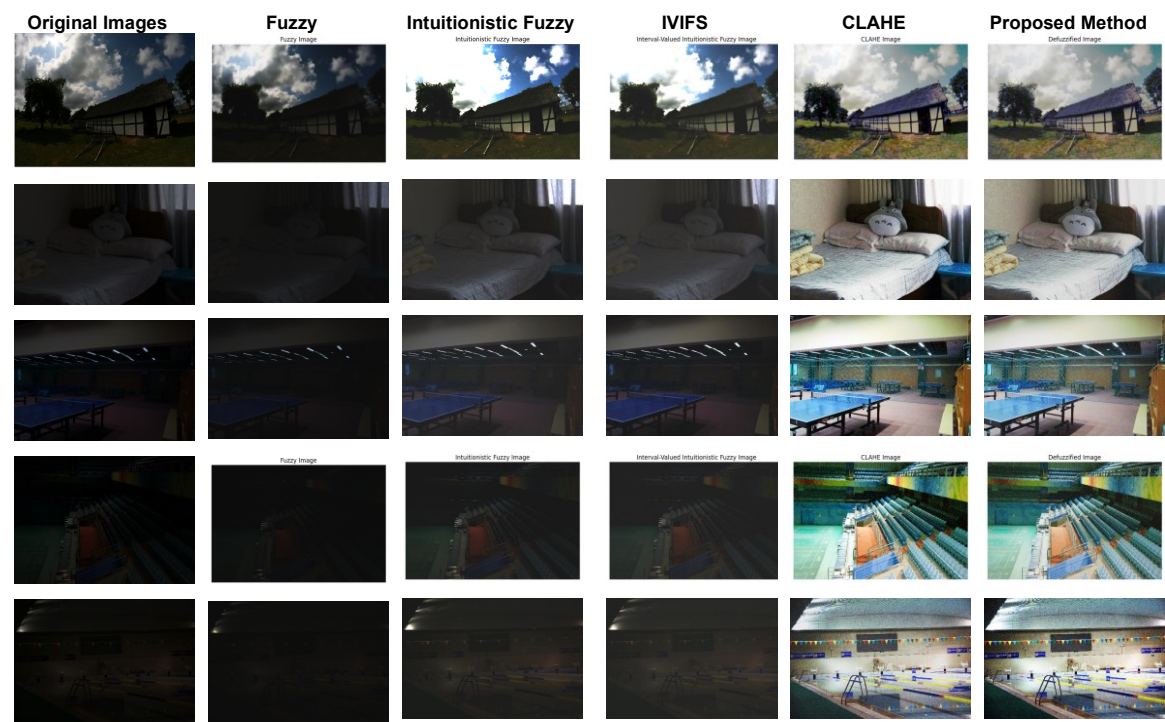


Gambar 7. Citra setelah Defuzzifikasi

Gambar 7 menunjukkan citra akhir yang dihasilkan dari proses defuzzifikasi menunjukkan kontras yang optimal, dengan detail yang jelas dan transisi yang lebih halus antara area terang dan gelap.

Hasil Kinerja Citra dengan Kontras Gambar Optimal

Setelah melalui serangkaian tahapan pengolahan citra menggunakan metode *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets* (IVIFS) dan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE), hasil akhir yang dihasilkan menunjukkan kontras yang optimal. Gambar yang telah diperbaiki memperlihatkan peningkatan kualitas visual yang signifikan dibandingkan dengan citra aslinya, baik dalam aspek kecerahan, ketajaman detail, maupun visibilitas objek yang sebelumnya tidak terlihat. Gambar berikut memperlihatkan hasil akhir citra setelah penerapan IVIFS dan CLAHE, yang memberikan kontras optimal dengan transisi yang lebih halus antara area terang dan gelap.



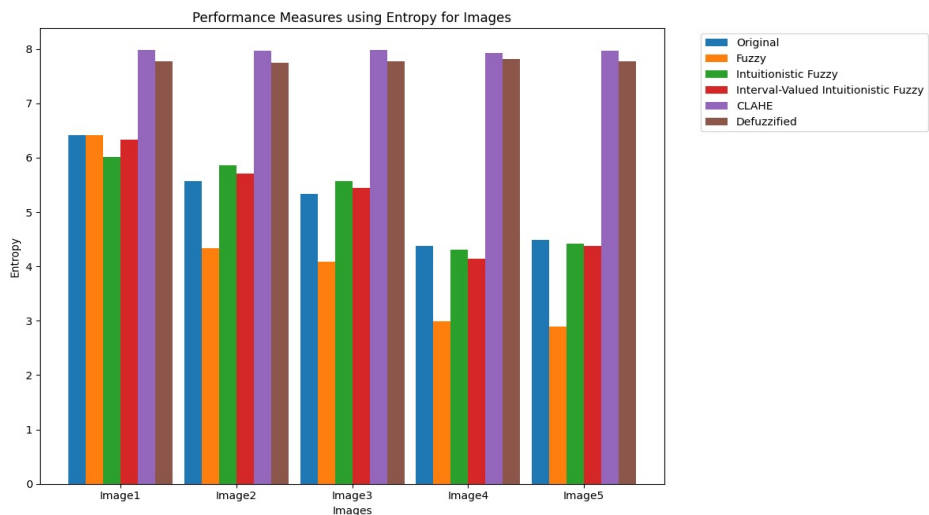
Gambar 8. Usulan Gambar yang Disempurnakan dengan IVIFS dan CLAHE

Gambar 8 menunjukan metode yang diusulkan dalam setiap analisis kinerja menunjukkan hasil yang memuaskan dan efisien dalam meningkatkan kualitas citra.

Tabel 1. Pengukuran kinerja menggunakan entropi untuk gambar pada Gambar 8

C>Nama	Original Image	Fuzzy	Intuitionistic Fuzzy	IVIFS	CLAHE	Defuzzified
Image1	6.41	6.41	6.016	6.327	7.98	7.776
Image2	5.564	4.341	5.863	5.713	7.972	7.743
Image3	5.333	4.088	5.575	5.441	7.975	7.775
Image4	4.375	2.994	4.303	4.142	7.931	7.817
Image5	4.492	2.89	4.414	4.38	7.973	7.774

Berdasarkan tabel 1 diatas yaitu pengukuran kinerja menggunakan entropi pada Gambar 8, nilai entropi menunjukkan peningkatan kualitas visual setelah diterapkan berbagai metode. Metode CLAHE memberikan entropi tertinggi pada semua gambar, mencerminkan peningkatan detail dan kontras secara signifikan, sementara hasil akhir defuzzifikasi sedikit menurunkan entropi untuk menghasilkan gambar yang lebih natural. Metode IVIFS dan Intuitionistic *Fuzzy* menunjukkan peningkatan entropi dibandingkan gambar asli, namun tidak seoptimal CLAHE. Dengan demikian, integrasi metode IVIFS dan CLAHE terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas gambar dengan kontras rendah.



Gambar 9. Pengukuran kinerja menggunakan entropi untuk gambar pada Gambar

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang dilakukan, metode *Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets* (IVIFS) dan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE) sangat efektif dalam meningkatkan kualitas citra dengan kontras rendah. Metode IVIFS memiliki keunggulan dalam menangani ketidakpastian intensitas piksel, sedangkan CLAHE berfungsi untuk meningkatkan kontras lokal tanpa menambah *noise* yang berlebihan. Proses defuzzifikasi pada tahap akhir menghasilkan citra dengan kontras yang optimal dan transisi yang lebih halus, sehingga secara keseluruhan meningkatkan kualitas visual. Metode ini berhasil mengatasi kelemahan teknik konvensional seperti *Histogram Equalization* (HE) dan *Adaptive Histogram Equalization* (AHE), yang sering kali menyebabkan over-enhancement atau noise yang mengganggu. Dengan demikian, integrasi antara IVIFS dan CLAHE terbukti lebih efektif dan efisien dalam meningkatkan kontras citra, menjadikannya sangat cocok untuk aplikasi seperti citra medis, penginderaan jauh, dan pengolahan citra lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Fetty, T. A., Syahrul, M., & Unggul, W. A. (2019). Segmentasi K-Means Clustering pada Citra Warna Daun Tunggal Menggunakan Model Warna Lab. SCAN - *Jurnal Teknologi Informasi dan Komunikasi*, 14(2), 38-40.
- [2] Parthiban, M. (2024). Image Contrast Enhancement Using CLAHE. *Analytics Vidhya Blogathon*.
- [3] Sunoto, T. D., Saragih, R. A., Jarden, J. J., & Wijaya, K. O. O. R. (2021). Perbaikan Kualitas Citra Menggunakan Metode Fuzzy Type-2. *Jurnal Telematika*, 16(2), 46-54.
- [4] Sugiarti, S. (2018). Peningkatan Kualitas Citra Dengan Metode Fuzzy Possibility Distribution. *ILKOM Jurnal Ilmiah*, 10(1), 100-104.
- [5] C V, Mahesh Kumar and Micheal, David Raj and D, Saraswathi, On Generalized Sugeno's Class Generator and Best Parameter Value Based Intuitionistic Fuzzy Approach for Enhancing Low-Light Images. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4940408> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4940408>
- [6] Jebadass, J. R., & Balasubramaniam, P. (2022). Low contrast enhancement technique for color images using interval-valued intuitionistic fuzzy sets with contrast limited adaptive histogram equalization. *Soft Computing*, 26(10), 4949-4960.
- [7] KW, K. D., & Noviardi, Z. (2015, July). Penerapan inferensi fuzzy untuk kendali suhu ruangan pada pendingin ruangan (AC). In *Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF)* (Vol. 1, No. 4).
- [6] ZENIAN, S. B. (2018). SEQUENCE OF IMAGE ENHANCEMENT OF FLAT ELECTROENCEPHALOGRAPHY USING INTUITIONISTIC FUZZY SET.
- [7] Sugihandardji, C., Wardayani, A., & Pratama, D. (2022). GENERALISASI OPERATOR $\boxplus$ dan $\boxtimes$ PADA SUBGRUP FUZZY INTUITIONISTIK. *Jurnal Lebesgue: Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika, Matematika dan Statistika*, 3(2), 287-294.
- [10] Miranda, N. D., Novamizanti, L., & Rizal, S. (2020). Convolutional Neural Network pada klasifikasi sidik jari menggunakan RESNET-50. *Jurnal Teknik Informatika*, 1(2), 61-68.
- [11] KW, K. D., & Noviardi, Z. (2015, July). Penerapan inferensi fuzzy untuk kendali suhu ruangan pada pendingin ruangan (AC). In *Seminar Nasional Informatika (SEMNASIF)* (Vol. 1, No. 4).
- [12] Saputra, K. S., Taufik, I., Dharma, D. F., & Hidayat, M. (2021). Analisis perbaikan kualitas citra menggunakan CLAHE dan HE pada citra X-Ray Covid-19 dan Pneumonia. *Indonesian Journal on Computer and Information Technology*, 6(2), 97-104.