

Evaluasi Metode Preprocessing Sederhana, Retinex, dan Guided Filtering untuk Peningkatan Kualitas Citra Bawah Air

Evaluation of Simple Preprocessing, Retinex, and Guided Filtering Methods for Enhancing Underwater Image Quality

Septa Cahyani^{*1}, Zaid Romegar Mair², Indah Pratiwi Putri³

Universitas Indo Global Mandiri, Jl. Jend. Sudirman Km.4 No. 62, 20 Ilir D. IV, Kec. Ilir Tim. I, Kota Palembang, Sumatera Selatan, 0811-7322-710

E-mail : septacahyani@uigm.ac.id^{*1}, zaidromegar@uigm.ac.id², wiwid@uigm.ac.id²

**Corresponding author*

Received 15 July 2025; Revised 3 August 2025; Accepted 8 August 2025

Abstrak – Citra bawah air umumnya mengalami penurunan kualitas visual akibat penyerapan cahaya dan hamburan partikel, yang menyebabkan dominasi warna biru serta rendahnya kontras dan ketajaman. Penelitian ini mengusulkan metode preprocessing sederhana berupa white balance berbasis ruang warna Lab, red channel boosting, dan contrast stretching untuk meningkatkan kualitas visual citra bawah air. Evaluasi dilakukan pada 60 citra dari UIEB Challenging Set menggunakan metrik UIQM yang mencakup UICM, UISM, dan UIConM. Hasil menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan nilai UIQM dari 107,86 menjadi 191,34, melampaui metode Retinex dan Guided Filtering yang justru menurunkan kualitas visual. Secara visual, metode ini juga menunjukkan hasil yang lebih alami dan detail. Dengan implementasi ringan berbasis Python dan OpenCV, pendekatan ini dinilai cocok untuk sistem dengan keterbatasan komputasi serta relevan untuk digunakan dalam edukasi maupun aplikasi praktis. Hasil ini mengindikasikan bahwa pendekatan sederhana tetap mampu memberikan peningkatan kualitas citra bawah air yang signifikan.

Kata Kunci - citra bawah air, peningkatan kualitas citra, preprocessing sederhana, UIQM

Abstract – Underwater images usually have poor quality because of light absorption and particles in the water. This causes a strong blue color and low contrast and sharpness. This study proposes a simple preprocessing method that combines white balance (Lab color space), red channel boosting, and contrast stretching to improve image quality. The method was tested on 60 images from the UIEB Challenging Set using the UIQM metric, which includes color (UICM), sharpness (UISM), and contrast (UIConM). The results show that the proposed method increased the UIQM score from 107.86 to 191.34, while other methods like Retinex and Guided Filtering reduced image quality. Visually, the images became clearer and looked more natural. This method is simple to use, works fast with Python and OpenCV, and is suitable for systems with limited computing power. These results show that an easy preprocessing method can still give good improvements in underwater image quality.

Keywords - underwater image, image enhancement, simple preprocessing, UIQM

1. PENDAHULUAN

Citra bawah air umumnya mengalami penurunan kualitas visual yang cukup signifikan akibat proses fisik di lingkungan laut. Dua faktor utama yang menyebabkan hal ini adalah penyerapan cahaya pada berbagai panjang gelombang serta hamburan oleh partikel tersuspensi di dalam air [1]. Air menyerap cahaya secara selektif sehingga warna merah, hijau, dan kuning cenderung menghilang secara bertahap. Warna merah merupakan warna pertama yang hilang, umumnya setelah mencapai kedalaman sekitar 4 hingga 5 meter. Akibatnya, citra bawah air

cenderung didominasi oleh warna biru dan hijau, dengan tingkat kontras yang rendah dan detail objek yang kurang tajam [2].

Kualitas visual yang buruk pada citra bawah air memberikan tantangan besar dalam berbagai aplikasi, seperti pemantauan ekosistem laut, pemetaan bawah laut, penelitian biologi kelautan, serta navigasi kendaraan bawah air otonom (Autonomous Underwater Vehicle/AUV). Masalah ini muncul akibat penurunan ketajaman, kontras, dan perubahan warna akibat penyerapan selektif serta hamburan oleh partikel tersuspensi di dalam air [3]. Hal ini berdampak pada kinerja sistem pengenalan visual otomatis yang membutuhkan metode peningkatan citra yang andal, efisien, dan mampu bekerja secara waktu nyata [4]. Salah satu benchmark yang umum digunakan dalam evaluasi metode peningkatan kualitas citra bawah air adalah Underwater Image Enhancement Benchmark (UIEB), yang menyediakan citra bawah air nyata beserta citra referensinya untuk evaluasi kualitatif dan kuantitatif [2]. Selain itu, pendekatan berbasis medium transmission dan koreksi warna otomatis juga terbukti dapat meningkatkan kejernihan serta akurasi warna citra secara signifikan [5].

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas citra bawah air, mulai dari metode konvensional seperti histogram equalization dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), hingga pendekatan berbasis model fisik seperti Retinex [6] dan dehazing [7]. CLAHE banyak digunakan karena kemampuannya dalam meningkatkan kontras lokal, namun jika digunakan secara mandiri, dapat menyebabkan artefak atau kehilangan detail halus. Untuk mengatasi hal tersebut, beberapa penelitian menggabungkan CLAHE dengan metode seperti Total Generalized Variation (TGV) untuk mempertahankan tepi objek sekaligus mengurangi noise [8]. Selain itu, guided filtering juga banyak diterapkan karena kemampuannya dalam menjaga struktur lokal selama proses penyaringan pencahayaan dan warna [9]. Sementara itu, kajian literatur terbaru menunjukkan bahwa penggabungan strategi preprocessing dan filtering adaptif merupakan arah pengembangan terkini yang dapat mengatasi keterbatasan metode tunggal, serta cocok untuk berbagai aplikasi seperti identifikasi dan navigasi visual [10].

Beberapa penelitian terkini juga mulai mengarah pada pengembangan metode peningkatan kualitas citra bawah air yang lebih sederhana namun tetap efektif, dengan fokus pada efisiensi komputasi serta koreksi warna dan peningkatan kontras visual. Studi-studi tersebut menunjukkan bahwa pendekatan sederhana dapat memberikan hasil yang kompetitif dengan metode kompleks, namun dengan beban komputasi yang lebih ringan, sehingga cocok untuk sistem dengan keterbatasan sumber daya [11]. Meskipun metode-metode seperti Retinex, CLAHE, dan dehazing terbukti efektif dalam sejumlah kondisi, sebagian besar teknik tersebut memiliki kompleksitas implementasi yang tinggi serta sensitivitas terhadap parameter [8]. Pendekatan berbasis deep learning juga sering membutuhkan dataset besar dan arsitektur model yang kompleks, sehingga kurang ideal untuk sistem skala kecil atau sumber daya terbatas [12] [13].

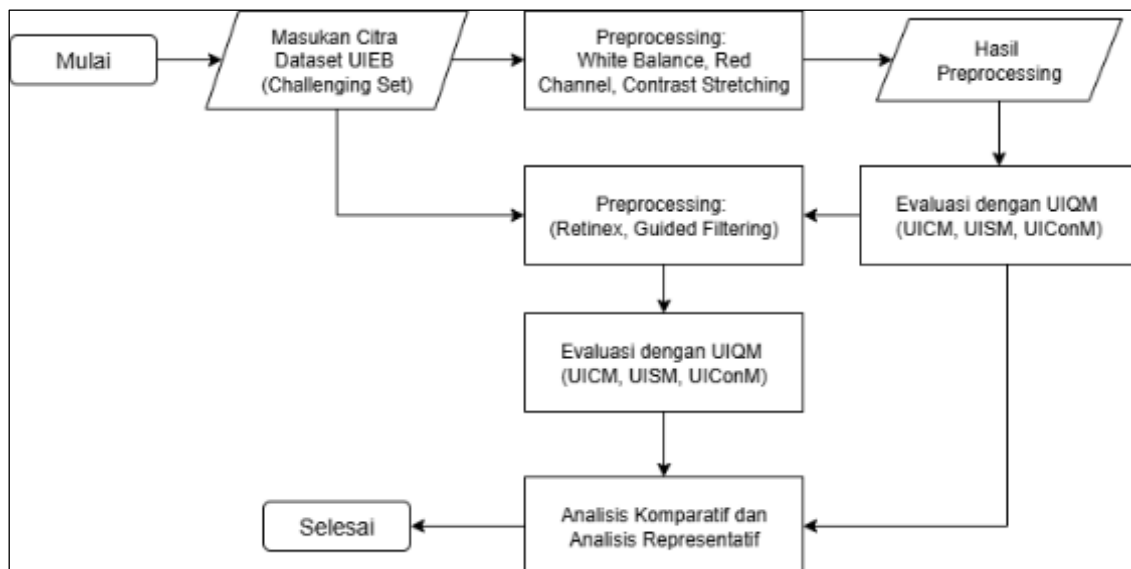
Dalam konteks tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan preprocessing sederhana namun efektif, yang terdiri dari tiga tahap: white balance berbasis ruang warna Lab untuk menormalkan dominasi warna, red channel boosting untuk memperkuat warna merah yang hilang, dan contrast stretching untuk memperluas rentang kontras global. Seluruh proses diimplementasikan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan pustaka OpenCV, sehingga mudah diakses dan direplikasi dalam konteks pendidikan maupun sistem komputasi ringan. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif menggunakan metrik UIQM (Underwater Image Quality Measure) yang terdiri dari tiga komponen utama: UICM (colorfulness), UISM (sharpness), dan UIConM (contrast). Dataset yang digunakan adalah Challenging Set dari UIEB, yang berisi citra nyata tanpa referensi. Selain itu, dilakukan perbandingan dengan metode Retinex dan Guided Filter untuk menilai sejauh mana pendekatan sederhana ini dapat bersaing dalam konteks peningkatan kualitas visual citra bawah air.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi pendekatan preprocessing tiga tahap yang ringan namun efektif. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah perancangan dan implementasi metode berbasis ruang warna Lab dan

red channel enhancement, serta evaluasi komprehensif menggunakan metrik UIQM terhadap dataset Challenging Set dari UIEB [2]. Diharapkan metode ini dapat menjadi alternatif efisien dalam peningkatan citra bawah air, khususnya untuk sistem komputasi terbatas atau penggunaan dalam lingkungan pendidikan.

2. METODE PENELITIAN

Tahapan proses metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian ini diawali dengan pengambilan data dari subset Challenging Set dalam UIEB (Underwater Image Enhancement Benchmark), karena mencerminkan kondisi visual paling sulit yang umum terjadi di bawah air, seperti kehilangan warna merah, kontras rendah, dan pencahayaan tidak merata [2]. Dataset ini terdiri dari 60 citra berformat PNG yang tersedia secara publik dan sering digunakan dalam penelitian peningkatan kualitas citra bawah air, namun tidak ada gambar referensinya. Setiap citra kemudian diproses menggunakan pendekatan preprocessing sederhana, yaitu white balance untuk menormalkan dominasi warna, red channel boosting untuk memperkuat warna merah yang hilang, dan contrast stretching untuk meningkatkan kontras global. Hasil preprocessing ini dievaluasi menggunakan metrik UIQM yang mencakup UICM (colorfulness), UISM (sharpness), dan UIConM (contrast). Sebagai pembandingan, citra yang sama juga diproses menggunakan metode Retinex dan Guided Filtering, lalu dievaluasi dengan metrik yang sama. Seluruh nilai metrik dari masing-masing metode dibandingkan secara komparatif untuk menentukan pendekatan dengan peningkatan kualitas paling signifikan. Selain itu, dilakukan analisis representatif terhadap delapan citra dengan karakteristik visual awal yang beragam seperti warna tidak seimbang, kontras rendah, atau ketajaman rendah serta dengan perubahan UIQM tertinggi dan terendah setelah preprocessing, guna mengevaluasi performa metode dalam berbagai kondisi nyata.



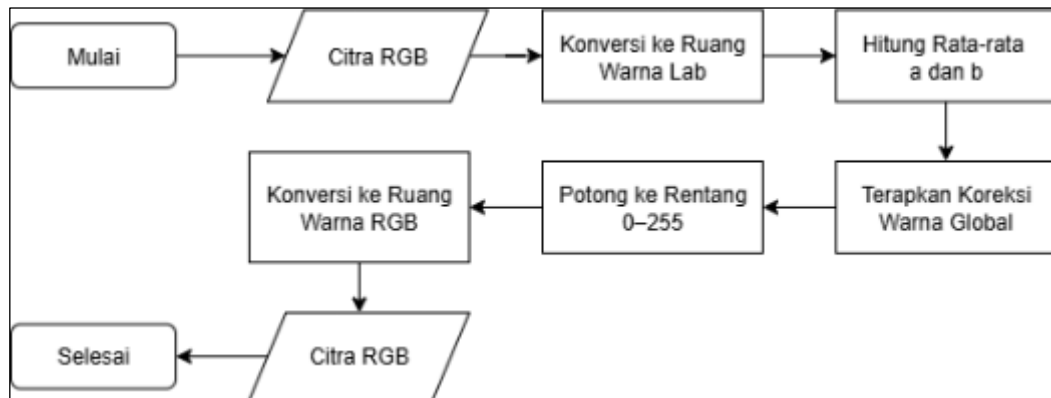
Gambar 1. Alur Proses Penelitian

2.1 White Balance (Keseimbangan Warna)

Koreksi warna dilakukan dalam ruang warna Lab dengan menyesuaikan nilai saluran a (merah–hijau) dan b (biru–kuning) agar mendekati nilai netral 128. Tujuan utamanya adalah mengurangi dominasi warna biru–kehijauan [4]. Proses white balance dimulai dengan konversi citra dari RGB ke ruang warna Lab. Selanjutnya, rata-rata saluran a dan b dihitung untuk mengukur dominasi warna. Nilai setiap piksel kemudian dikoreksi agar mendekati nilai netral 128, disesuaikan berdasarkan luminansi. Koreksi warna tersebut dilakukan menggunakan (1).

Setelah dikoreksi, nilai piksel dikembalikan ke rentang 0–255 dan citra dikonversi kembali ke RGB. Tahapan dari proses white balancing yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2. Dimana: $a(x, y)$, $b(x, y)$: nilai saluran a dan b pada piksel, \bar{a} , \bar{b} : rata-rata seluruh nilai a dan b, $L(x, y)$: luminansi (komponen tinggi) dari Lab, k : faktor koreksi (dalam kode = 1,1).

$$\begin{aligned} a'(x, y) &= a(x, y) - \left(\frac{L(x, y)}{255} \times (\bar{a} - 128) \cdot k \right) \\ b'(x, y) &= b(x, y) - \left(\frac{L(x, y)}{255} \times (\bar{b} - 128) \cdot k \right) \end{aligned} \quad (1)$$

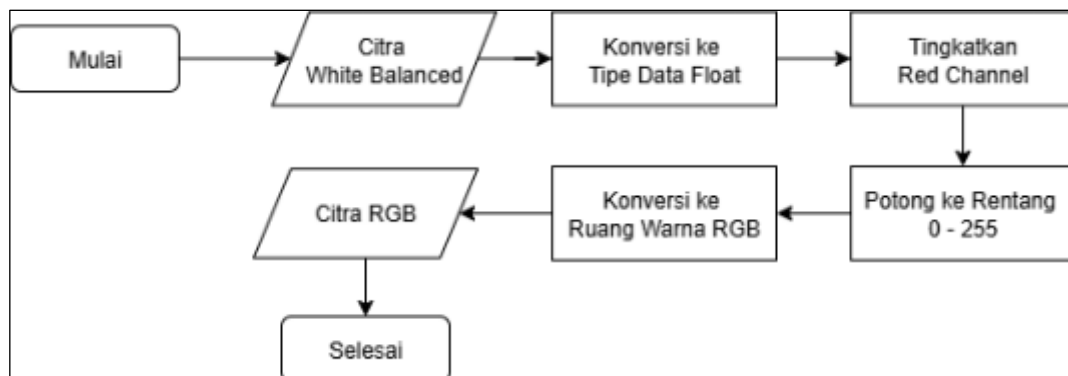


Gambar 2. Alur Proses White Balancing (RGB)

2.2 Red Channel Boosting (Penguatan Saluran Merah)

Metode ini memperkuat saluran merah dengan menyesuaikan perbedaan nilai antara saluran hijau dan merah. Teknik ini mengadopsi prinsip kompensasi saluran warna [14]. Proses dimulai dari input citra yang telah melalui tahap white balance. Citra dikonversi ke tipe data float untuk memungkinkan perhitungan yang lebih presisi. Selanjutnya, saluran merah diperkuat dengan menambahkan sebagian selisih antara saluran hijau dan merah menggunakan koefisien penguat. Koreksi ini dilakukan menggunakan (2). Setelah itu, nilai saluran merah diklip ke rentang 0–255 untuk menjaga batas intensitas piksel. Terakhir, citra dikembalikan ke format 8-bit untuk digunakan dalam tahap pemrosesan berikutnya. Proses tahapan dari metode red channel boosting yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Dimana: $R(x, y)$, $G(x, y)$: intensitas kanal merah dan hijau dan α : koefisien koreksi (dalam kode = 0.25).

$$R'(x, y) = R(x, y) + \alpha \cdot (G(x, y) - R(x, y)) \quad (2)$$

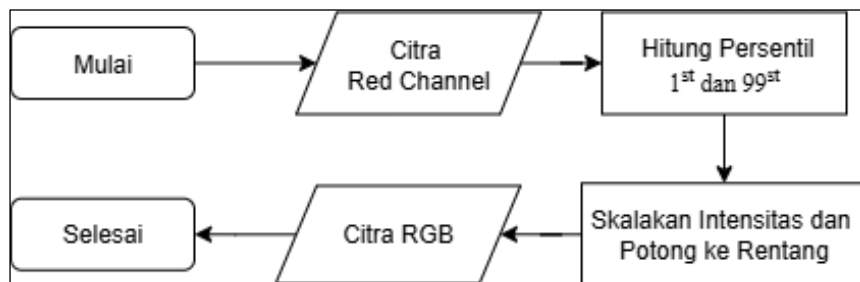


Gambar 3. Alur Proses Red Channel (RGB)

2.3 Contrast Stretching (Peregangan Kontras)

Histogram intensitas piksel direntangkan menggunakan batas persentil bawah dan atas (misalnya 1% dan 99%) untuk memperluas kontras global dan meningkatkan detail [15]. Tahapan ini dimulai dengan menentukan nilai intensitas pada persentil ke-1 dan ke-99 dari citra, yang berfungsi sebagai batas bawah dan atas untuk peregangan kontras. Selanjutnya, nilai intensitas setiap piksel diskalakan ke rentang 0–255 menggunakan rumus normalisasi linier sesuai (3). Hasil akhir berupa citra dengan distribusi kontras yang lebih merata, sehingga detail objek lebih terlihat jelas. Proses tahapan dari metode contrast stretching yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4. Dimana: $I_{max} - I_{min}$: nilai piksel pada persentil ke-1 dan ke-99, $I(x, y)$: intensitas awal pada piksel, $I'(x, y)$: hasil peregangan intensitas.

$$I'(x, y) = \frac{I(x, y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \quad (3)$$

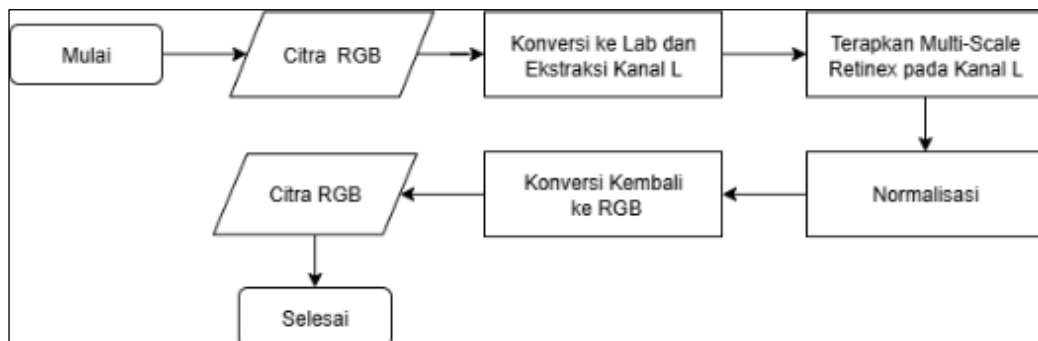


Gambar 4. Alur Proses Contrast Stretching (RGB)

2.4 Retinex (Multi-Scale Retinex / MSR)

Berdasarkan rasio logaritma intensitas piksel dan pencahayaan lokal dengan Gaussian blur [16]. Proses dimulai dengan input citra berformat RGB yang dikonversi ke ruang warna Lab untuk mengekstraksi saluran L (luminance). Selanjutnya, metode Multi-Scale Retinex diterapkan pada saluran L dengan menghitung perbedaan logaritmik antara intensitas asli dan hasil blur Gaussian pada beberapa skala. Perhitungannya dilakukan menggunakan (4). Nilai Retinex yang dihasilkan kemudian dinormalisasi ke rentang 0–255. Terakhir, saluran L yang telah diperbaiki digabung kembali dengan saluran A dan B, dan citra dikonversi kembali ke RGB. Proses tahapan dari metode Retinex yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5. Input untuk Retinex terdiri dari dua jenis, yaitu citra asli dan citra hasil preprocessing. Dimana: $L(x, y)$: saluran luminansi (L) dari ruang warna Lab, $G_{\sigma_i}(x, y)$: filter Gaussian pada skala ke-iii dengan deviasi standar σ_i , N: jumlah skala (dalam kode: 3 skala = [15, 40, 90]), *: konvolusi.

$$R(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\log L(x, y) - \log(L(x, y) * G_{\sigma_i}(x, y))] \quad (4)$$



Gambar 5. Alur Proses Retinex (RGB)

2.5 Guided Filter

Edge-preserving filtering yang mempertahankan struktur lokal [3]. Proses dimulai dengan input citra RGB yang dikonversi ke format float dalam rentang [0,1]. Untuk setiap kanal warna, dihitung nilai rata-rata dan korelasi menggunakan box filter. Berdasarkan hasil tersebut, diperoleh koefisien linier a_k dan b_k yang mewakili hubungan lokal antara citra pembimbing dan citra target. Model hubungan ini dijelaskan dalam (5), (6), (7), (8). Koefisien ini kemudian dirata-rata dan digunakan untuk membentuk output akhir melalui model linier lokal. Hasil akhirnya berupa citra yang lebih halus namun tetap mempertahankan struktur tepi objek. Proses tahapan dari metode Guided Filter yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6. Input Guided Filter dalam penelitian ini berasal dari citra hasil metode Retinex, baik pada citra asli maupun citra hasil preprocessing. Dimana: I : citra pembimbing (guide image), p : citra input yang akan difilter, q : output citra \bar{a}_i dan \bar{b}_i : nilai rata-rata dari a_k dan ϵ : parameter regulasi untuk mencegah pembagian oleh nol

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in w_k \quad (5)$$

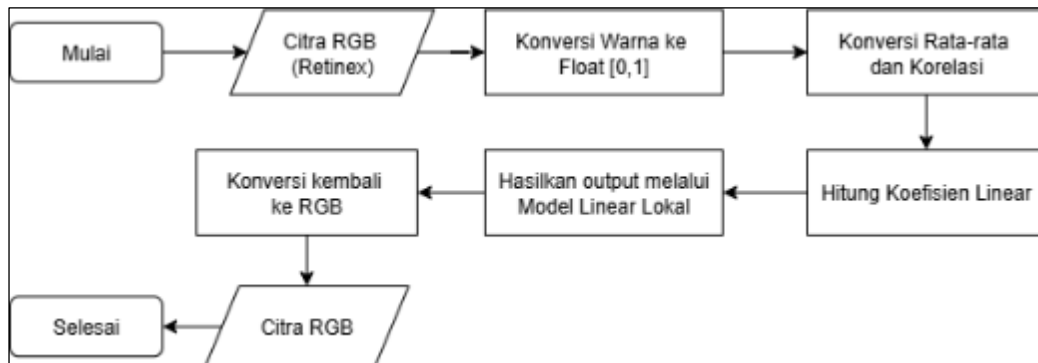
Koefisien a_k dan b_k dihitung sebagai:

$$a_k = \frac{\text{cov}(I, p)}{\text{var}(I) + \epsilon} \quad (6)$$

$$b_k = \bar{p} - a_k \bar{I} \quad (7)$$

Dan hasil akhir output untuk setiap piksel i :

$$q_i = \bar{a}_i I_i - \bar{b}_i \quad (8)$$



Gambar 6. Alur Proses Guided Filter (RGB)

2.6 Evaluasi Kualitas Visual

Untuk mengevaluasi kualitas visual citra bawah air secara objektif, penelitian ini menggunakan pendekatan non-referensi berbasis persepsi visual manusia (Human Visual System/HVS) yang dikenal dengan UIQM (Underwater Image Quality Measure) yang tidak memerlukan citra referensi. UIQM terdiri dari tiga komponen utama, yaitu UICM, UISM, dan UIConM, yang masing-masing merepresentasikan aspek warna, ketajaman, dan kontras [17].

1. UICM – Underwater Image Colorfulness Measure

UICM dirancang untuk mengevaluasi keseimbangan dan kejenuhan warna dalam citra bawah air. Komponen ini menggunakan pendekatan opponent color theory, yaitu dengan membandingkan perbedaan warna antara kanal merah-hijau (RG) dan kuning-biru (YB). Nilai rata-rata dan variansi dari selisih saluran tersebut digunakan untuk menilai dominasi dan distribusi warna. Semakin besar variansi dan semakin kecil deviasi rata-ratanya,

maka warna dianggap semakin seimbang dan kaya. Perhitungan nilai UICM dilakukan menggunakan (9).

$$UICM = -0.0268 X \sqrt{\mu_{rg}^2 + \mu_{yb}^2} + 0.1586 x \sqrt{\sigma_{rg}^2 + \sigma_{yb}^2} \quad (9)$$

Dimana: μ_{rg} , μ_{yb} : nilai rata-rata dan standar deviasi saluran perbedaan merah–hijau, σ_{rg}^2 , σ_{yb}^2 : nilai rata-rata dan standar deviasi saluran perbedaan kuning–biru. Nilai UICM yang tinggi menunjukkan keberagaman dan keseimbangan warna yang baik dalam citra bawah air

2. UISM – Underwater Image Sharpness Measure

UISM digunakan untuk mengevaluasi ketajaman citra dengan mendeteksi tepi objek yang biasanya hilang akibat penyebaran cahaya di bawah air. Proses ini menggunakan operator tepi, seperti Sobel atau Laplacian, untuk setiap saluran warna. Setelah tepi terdeteksi, dilakukan pengukuran kontras lokal di area tersebut untuk menilai seberapa jelas batas objek dalam citra. Nilai UISM yang lebih tinggi menunjukkan ketajaman dan kejelasan objek yang lebih baik. Perhitungan UISM dilakukan menggunakan (10).

$$UISM = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\nabla I(i, j)| \quad (10)$$

Dimana: $I(i, j)$: nilai intensitas piksel pada posisi (i,j) dalam citra grayscale, $\nabla I(i, j)$: nilai konvolusi tepi terhadap $I(i, j)$, M dan N: dimensi citra. Nilai UISM yang lebih tinggi mencerminkan citra yang lebih baik secara visual.

3. UIConM – Underwater Image Contrast Measure

UIConM digunakan untuk mengukur seberapa besar kontras lokal yang ada di berbagai area dalam citra. Pengukuran ini memperhitungkan persepsi visual manusia (HVS) terhadap perubahan luminansi. Prosesnya dilakukan dengan membagi citra menjadi blok-blok kecil, lalu menghitung distribusi kontras menggunakan pendekatan statistik, seperti logaritma atau model nonlinier (contohnya PLIP), agar lebih sensitif terhadap area gelap yang sering muncul pada citra bawah air. Formulasi sederhana UIConM dapat dinyatakan dalam (11).

$$UIConM = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \mu)^2} \quad (11)$$

Dimana: $I(i, j)$: nilai intensitas piksel grayscale, μ : nilai rata-rata intensitas, M, N: ukuran citra. Nilai UIConM yang semakin besar/tinggi penyebaran piksel (semakin kontras) yang lebih baik.

4. UIQM – Underwater Image Quality Measure (Gabungan)

Skor UIQM akhir merupakan kombinasi linier dari tiga komponen utama, yaitu UICM (warna), UISM (ketajaman), dan UIConM (kontras). Setiap komponen diberi bobot berdasarkan hasil regresi linier yang dikalibrasi terhadap persepsi manusia terhadap kualitas visual citra bawah air. Perhitungan UIQM dituliskan dalam (12).

$$UIQM = 0.0282 X UICM + 0.2953 X UISM + 3.5753 X UIConM \quad (12)$$

Nilai UIQM yang lebih tinggi menunjukkan kualitas visual citra bawah air yang lebih baik secara keseluruhan dari segi warna, ketajaman, dan kontras. Oleh karena itu, metrik

ini sering digunakan sebagai evaluasi objektif dalam penelitian peningkatan citra bawah air [17].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

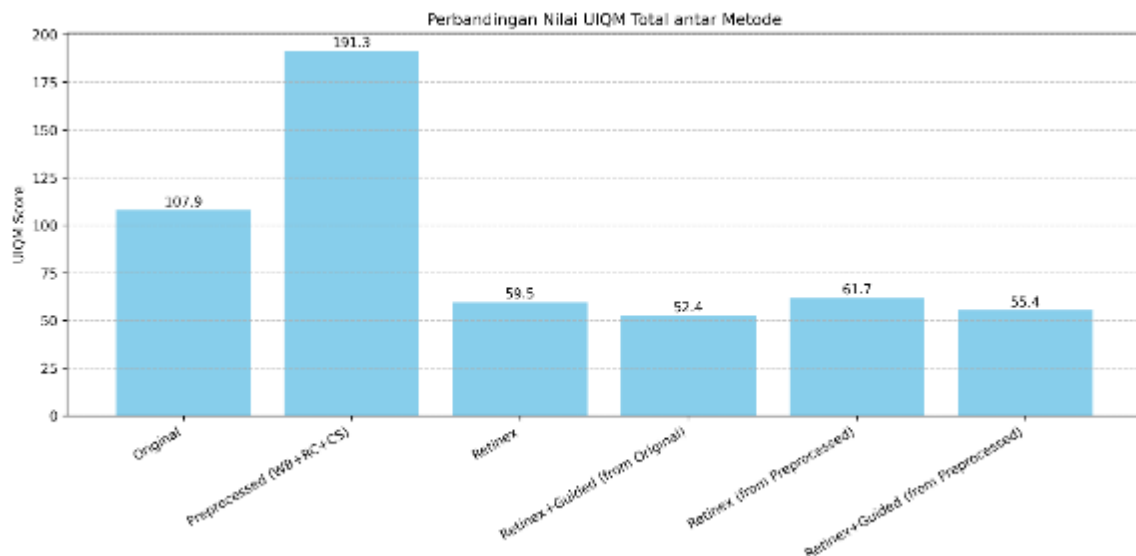
3.1 Hasil Evaluasi Kuantitatif

Evaluasi dilakukan terhadap 60 citra dari UIEB Challenging Set menggunakan metrik UIQM (Underwater Image Quality Measure). Tujuannya adalah untuk mengukur efektivitas metode preprocessing sederhana (kombinasi White Balance, Red Channel Boosting, dan Contrast Stretching) dibandingkan dengan metode Retinex dan Guided Filter, baik diterapkan secara langsung maupun setelah preprocessing. Tabel 1 menunjukkan bahwa metode preprocessing memberikan peningkatan skor UIQM tertinggi, dari 107.86 menjadi 191.34, dengan selisih sebesar +83.48 poin. Sebaliknya, Retinex dan kombinasi Retinex + Guided Filter justru menurunkan skor UIQM secara signifikan, bahkan di bawah citra asli. Hal ini menunjukkan bahwa metode Retinex kurang efektif jika tidak disesuaikan secara adaptif terhadap karakteristik citra bawah air.

Tabel 1. Hasil kuantitatif Metode

Metode	UIQM Sebelum	UIQM Sesudah	Selisih (Δ)
Citra Asli	107.86	—	—
Preprocessing (WB + RC + CS)	107.86	191.34	+83.48
Retinex (langsung dari citra asli)	107.86	59.47	-48.39
Retinex + Guided Filter (dari asli)	107.86	52.38	-55.48
Retinex dari citra preprocessed	191.34	61.73	-129.61
Retinex + Guided dari preprocessed	191.34	55.37	-135.97

Perbedaan nilai UIQM yang cukup besar ($\Delta > 70$ poin) mencerminkan dampak signifikan dari metode yang digunakan terhadap kualitas visual citra, meskipun uji statistik inferensial tidak dilakukan. Besarnya selisih nilai ini dapat dijadikan indikator kuat efektivitas metode secara praktis. Untuk memperjelas perbandingan visual antar metode, grafik skor UIQM disajikan pada Gambar 7.



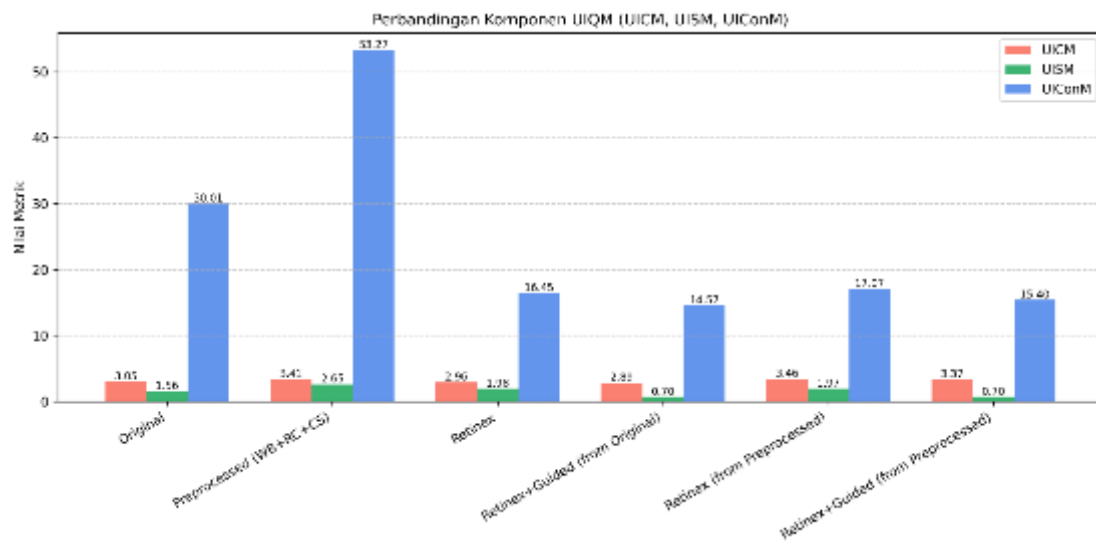
Gambar 7. Grafik perbandingan skor UIQM

3.2 Analisis Komparatif Visual

Secara visual, citra hasil preprocessing sederhana menunjukkan peningkatan kualitas yang signifikan:

- **White Balance** menetralkan dominasi warna biru-kehijauan.
- **Red Channel Boosting** berhasil mengembalikan warna merah yang hilang.
- **Contrast Stretching** memperluas distribusi intensitas piksel, memberikan tampilan lebih cerah dan detail yang lebih menonjol.

Sebaliknya, metode Retinex menghasilkan efek pencahayaan berlebih (overexposure), kehilangan detail, dan warna yang tidak alami. Guided Filter memang menjaga struktur tepi, tetapi tidak meningkatkan warna dan kontras secara signifikan, sehingga hasil akhirnya tampak datar. Gambar 8 menunjukkan grafik batang dari masing-masing komponen UIQM, yang menegaskan bahwa metode preprocessing memberikan peningkatan seimbang di seluruh aspek warna, ketajaman, dan kontras.



Gambar 8. Grafik komparatif UICM, UISM, dan UIConM dari masing-masing metode

Peningkatan skor UIQM dari 107.86 menjadi 191.34 menunjukkan bahwa preprocessing berbasis White Balance, Red Channel Boosting, dan Contrast Stretching secara konsisten meningkatkan kualitas citra bawah air. Metode ini unggul tidak hanya dalam satu komponen, melainkan secara menyeluruh. Retinex dan Guided Filter, baik digunakan langsung maupun setelah preprocessing, justru menurunkan kualitas, menandakan kurangnya kecocokan terhadap karakteristik spektral citra bawah air.

Secara umum, analisis menunjukkan bahwa:

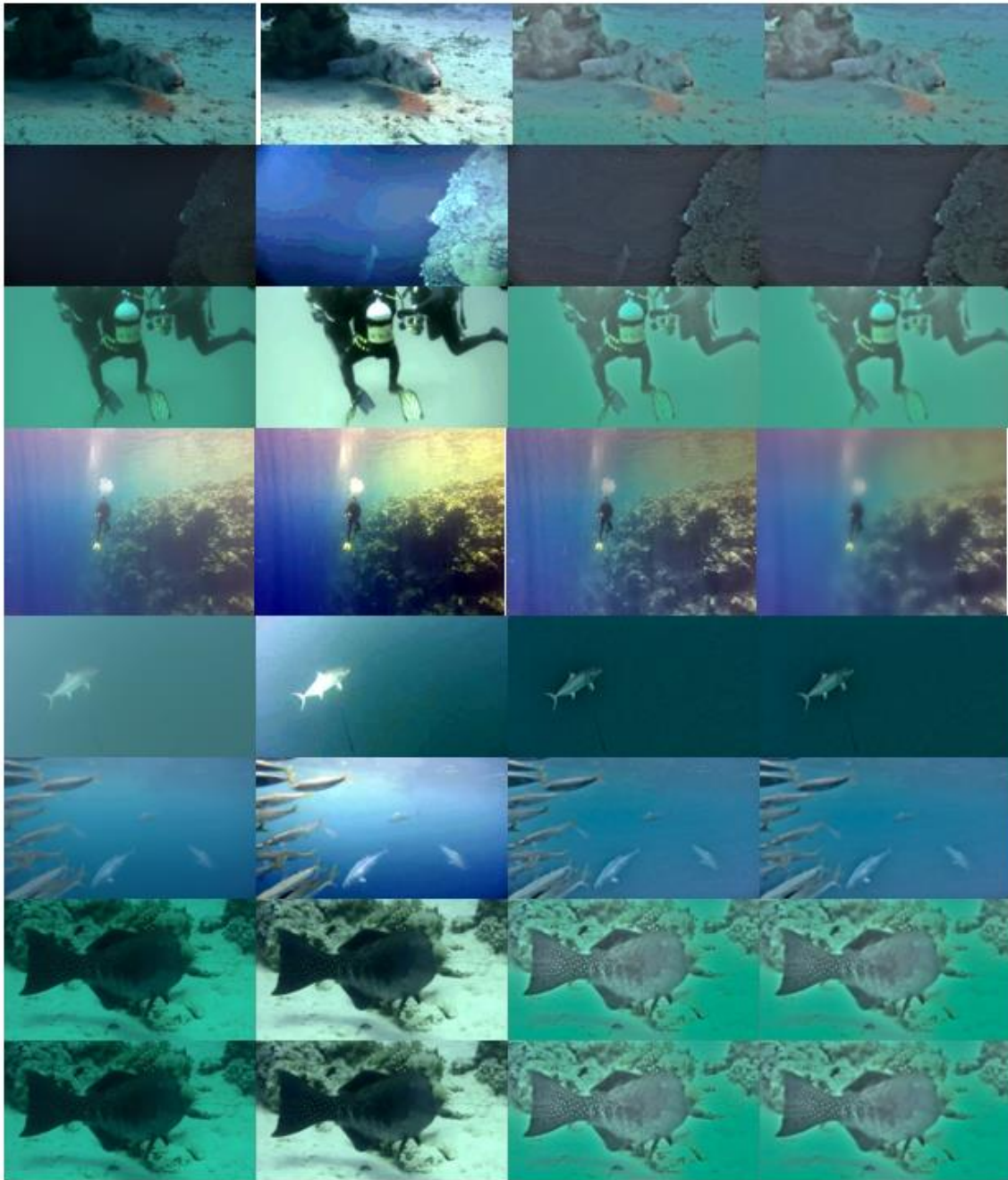
- Metode preprocessing sangat cocok digunakan sebagai tahap awal
- Retinex dan Guided Filter lebih tepat untuk kondisi pencahayaan alami di udara terbuka.
- Kombinasi preprocessing → Retinex tidak meningkatkan hasil, bahkan bisa menurunkan kualitas citra.

Dengan demikian, pemilihan metode peningkatan citra harus mempertimbangkan kondisi lingkungan citra serta dampaknya terhadap ketiga komponen kualitas visual. Evaluasi ini mencakup analisis kuantitatif (melalui skor UIQM), komparatif (melalui perbandingan antar metode), dan akan dilengkapi dengan analisis representatif (pada subbab selanjutnya) untuk menggambarkan efektivitas metode pada berbagai kondisi visual citra bawah air.

3.3 Analisis Representatif

Untuk memperoleh pemahaman kontekstual mengenai efektivitas metode preprocessing sederhana, dilakukan analisis visual terhadap delapan citra representatif dari dataset UIEB. Citra

dipilih berdasarkan kriteria: (1) peningkatan UIQM tertinggi dan terendah, (2) karakteristik visual yang menantang seperti dominasi warna tertentu, kontras rendah, atau pencahayaan buruk, dan (3) situasi ekstrem di mana metode tertentu gagal mengatasi kondisi visual. Pendekatan ini bertujuan memperlihatkan performa metode dalam menangani variasi kondisi nyata pada citra bawah air.



Gambar 9. Contoh citra representatif: (a) Citra asli, (b) Preprocessing, (c) Retinex, (d) Retinex + Guided Filtering

Gambar 9 mevisualisasikan delapan contoh citra bawah air dengan variasi kondisi visual, mulai dari dominasi warna ekstrem, kontras rendah, hingga kualitas awal yang sudah tinggi.

Berikut ini uraian per citra yang dianalisis untuk menggambarkan konteks dan hasil secara lebih sistematis:

- **Citra 1 (UIQM: 148.93 → 272.63)**
Dominasi hijau dan kontras rendah berhasil diperbaiki. Preprocessing menyeimbangkan warna dan memulihkan saluran merah. Retinex menghasilkan overexposure; Guided Filtering tidak efektif.
- **Citra 2 (UIQM: 26.49 → 164.10)**
Kondisi awal sangat buruk. Preprocessing memperbaiki persebaran intensitas dan warna. Retinex terlalu kontras dan tidak alami; Guided Filtering terlalu lembut.
- **Citra 3 (UIQM: 107.12 → 254.75)**
Warna kusam dan kontras lemah meningkat drastis. Preprocessing mempertajam objek. Retinex menambah pencahayaan berlebih; Guided Filtering menghilangkan detail.
- **Citra 4 (UIQM: 172.72 → 270.43)**
Citra awal sudah baik, namun preprocessing tetap efektif tanpa merusak warna. Retinex mengganggu tampilan alami; Guided Filtering kurang berdampak.
- **Citra 5 (UIQM: 45.49 → 157.06)**
Warna gelap dan buram menjadi lebih terang dan jelas. Retinex menimbulkan artefak warna; Guided Filtering tidak signifikan.
- **Citra 6 (UIQM: 75.58 → 186.95)**
Dominasi biru ekstrem berhasil dikoreksi. Retinex gagal mengatur warna, dan Guided Filtering hanya melembutkan tepi.
- **Citra 7 (UIQM: 153.54 → 266.62)**
UIQM awal tinggi, namun tetap meningkat. Retinex menurunkan kualitas; preprocessing tetap unggul.
- **Citra 8 (UIQM: 248.77 → 284.39)**
UIQM awal tertinggi, tetapi masih bisa ditingkatkan. Retinex menyebabkan over-enhancement, dan Guided Filtering terlalu pasif.

Dari keseluruhan analisis, terlihat bahwa metode preprocessing sederhana secara konsisten memberikan peningkatan visual yang signifikan, baik pada citra berkualitas rendah maupun tinggi. Sementara Retinex cenderung tidak adaptif dan Guided Filtering kurang agresif, pendekatan berbasis White Balance, Red Channel Boosting, dan Contrast Stretching terbukti efisien dan efektif dalam berbagai kondisi visual bawah air., terlihat bahwa metode preprocessing sederhana secara konsisten memberikan peningkatan visual yang signifikan, baik pada citra berkualitas rendah maupun tinggi. Sementara Retinex cenderung tidak adaptif dan Guided Filtering kurang agresif, pendekatan berbasis White Balance, Red Channel Boosting, dan Contrast Stretching terbukti efisien dan efektif dalam berbagai kondisi visual bawah air.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra bawah air dengan menerapkan metode preprocessing gabungan, yaitu White Balance, Red Channel Boosting, dan Contrast Stretching, serta membandingkannya dengan metode Retinex dan Retinex + Guided Filtering baik terhadap citra asli maupun citra yang telah dipreproses. Berdasarkan hasil evaluasi terhadap 60 citra uji menggunakan metrik objektif UIQM (Underwater Image Quality Measure), diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Metode preprocessing gabungan (WB + RC + CS) terbukti paling efektif dalam meningkatkan kualitas citra bawah air. Peningkatan UIQM dari 107.86 menjadi 191.34 menunjukkan perbaikan yang signifikan dalam aspek warna, ketajaman, dan kontras.

2. Metode Retinex, baik tunggal maupun dikombinasikan dengan Guided Filtering, memberikan hasil yang tidak lebih baik dibandingkan citra asli. UIQM menurun drastis, menunjukkan bahwa pendekatan ini tidak cocok digunakan secara langsung pada citra bawah air.
3. Penerapan Retinex terhadap citra yang telah dipreproses juga tidak memberikan hasil positif. Nilai UIQM justru mengalami penurunan, terutama pada aspek ketajaman (UISM) dan kontras (UIConM), menandakan bahwa penggunaan Retinex sebagai tahap lanjutan tidak memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas citra.
4. Secara umum, metode berbasis penyesuaian warna dan kontras lebih stabil dan efektif untuk peningkatan kualitas citra bawah air dibanding metode berbasis persepsi visual seperti Retinex.

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, berikut beberapa saran yang dapat disampaikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Penggunaan metode berbasis deep learning seperti U-Net, GAN, atau transformasi domain warna berbasis pembelajaran dapat dipertimbangkan untuk memperoleh hasil peningkatan yang lebih kontekstual dan otomatis.
2. Evaluasi kualitas citra sebaiknya tidak hanya menggunakan metrik UIQM, tetapi juga mempertimbangkan metrik tambahan seperti UCIQE, NIQE, atau bahkan penilaian subjektif visual dari pengguna akhir untuk memberikan penilaian yang lebih holistik.
3. Penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi optimasi parameter preprocessing secara otomatis (misalnya dengan PSO atau algoritma genetika) untuk menyesuaikan perbaikan kualitas terhadap karakteristik masing-masing citra secara adaptif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Li, S. Anwar, J. Hou, R. Cong, C. Guo, and W. Ren, "Underwater Image Enhancement via Medium Transmission-Guided Multi-Color Space Embedding," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 30, pp. 4985–5000, 2021, doi: 10.1109/TIP.2021.3076367.
- [2] C. Li *et al.*, "An Underwater Image Enhancement Benchmark Dataset and beyond," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 29, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1109/TIP.2019.2955241.
- [3] S. B. Gao, M. Zhang, Q. Zhao, X. S. Zhang, and Y. J. Li, "Underwater Image Enhancement Using Adaptive Retinal Mechanisms," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 28, no. 11, pp. 5580–5595, 2019, doi: 10.1109/TIP.2019.2919947.
- [4] X. Xu, X. Fan, and Y. Liu, "Real-Time Underwater Image Enhancement Using Adaptive Full-Scale Retinex," vol. 38, no. 2021, pp. 885–898, 2023, doi: 10.1007/s11390-022-1115-z.
- [5] B. R. Rao and E. College, "UNDERWATER IMAGE ENHANCEMENT VIA MEDIUM TRANSMISSION USING MULTI COLOR SPACE EMBEDDING," no. 4, pp. 346–357, 2023.
- [6] S. Chen and D. Li, "A Novel Image Enhancement Method Using Retinex-based Illumination Map Weighted Guided Filtering," *Comput. Sci. Inf. Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1745–1764, 2024.
- [7] G. Hou, J. Li, G. Wang, Z. Pan, and X. Zhao, "Underwater image dehazing and denoising via curvature variation regularization," *Multimed. Tools Appl.*, vol. 79, no. 27–28, pp. 20199–20219, 2020, doi: 10.1007/s11042-020-08759-z.
- [8] T. S. Kavitha, A. Vamsidhar, and G. S. Kumar, "Underwater Image Enhancement using Fusion of CLAHE and Total Generalized Variation," no. November, 2023.
- [9] Y. Ning, Y. Jin, Y. Peng, and J. Yan, "Low-illumination underwater image enhancement based on non-uniform illumination correction and adaptive artifact elimination," no. September, pp. 1–15, 2023, doi: 10.3389/fmars.2023.1249351.

- [10] Y. J. Cao *et al.*, “Recent Advances of Generative Adversarial Networks in Computer Vision,” *IEEE Access*, vol. 7, no. c, pp. 14985–15006, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2886814.
- [11] S. Cahyani, A. K. Sari, and A. Harjoko, “Underwater Quality Enhancement Based on Mixture Contrast Limited Adaptive Histogram and Multiscale Fusion,” *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 15, no. 7, pp. 647–655, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0150763.
- [12] T. Bariyah, M. A. Rasyidi, and N. Ngatini, “Convolutional Neural Network untuk Metode Klasifikasi Multi-Label pada Motif Batik,” *Techno.Com*, vol. 20, no. 1, pp. 155–165, 2021, doi: 10.33633/tc.v20i1.4224.
- [13] Y. Liu *et al.*, “Underwater image enhancement based on optimally weighted histogram framework and improved Fick ’ s law algorithm,” pp. 1–21, 2024.
- [14] W. Xiang, P. Yang, S. Wang, B. Xu, and H. Liu, “Underwater image enhancement based on red channel weighted compensation and gamma correction model,” no. October, pp. 1–9, 2018, doi: 10.29026/oea.2018.180024.
- [15] H. S. Lee, S. W. Moon, and I. K. Eom, “Underwater Image Enhancement Using Successive Color Correction and Superpixel Dark Channel Prior,” pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/sym12081220.
- [16] S. Lin, Z. H. E. Li, F. Zheng, Q. I. Zhao, and S. Li, “Underwater Image Enhancement Based on Adaptive Color Correction and Improved Retinex Algorithm,” *IEEE Access*, vol. PP, p. 1, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3258698.
- [17] K. Panetta, C. Gao, S. Agaian, C. Gao, and S. Agaian, “Human-Visual-System-Inspired Underwater Image Quality Measures,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 541–551, 2016, doi: 10.1109/JOE.2015.2469915.