

# Pengaruh Karakteristik Citra Bawah Air terhadap Kinerja Metode Enhancement Menggunakan White Balance, CLAHE, dan Gamma Correction

*Impact of Underwater Image Characteristics on the Performance of Enhancement Techniques Employing White Balance, CLAHE, and Gamma Correction*

**Septa Cahyani<sup>\*1</sup>, Zaid Romegar Mair<sup>2</sup>, Evi Yulianti<sup>3</sup>**

*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<sup>\*1</sup>, zaidromegar@uigm.ac.id<sup>2</sup>, eviyulianti@uigm.ac.id<sup>3</sup>*

*\*Corresponding author*

Received 3 July 2026; Revised 29 July 2026; Accepted 31 July 2026

**Abstrak** - Kualitas citra bawah air sering mengalami degradasi akibat penyerapan dan hamburan cahaya yang menyebabkan penurunan kecerahan, kontras, serta dominasi warna (*color cast*). Kondisi tersebut memengaruhi efektivitas metode *underwater image enhancement*, sehingga diperlukan analisis karakteristik citra sebelum proses peningkatan kualitas dilakukan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik *brightness*, *contrast*, dan *color cast* terhadap kinerja metode White Balance, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, serta dua metode kombinasi, yaitu White Balance–CLAHE dan CLAHE–White Balance. Sebanyak 243 citra dari dataset UIEB-Challenging dan OceanSet dievaluasi menggunakan metrik Underwater Image Quality Measure (UIQM) dan Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE). Selanjutnya dilakukan pengujian statistik menggunakan One-Way ANOVA dan Tukey HSD untuk menguji signifikansi perbedaan performa antar metode. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi CLAHE–White Balance menghasilkan nilai UIQM rata-rata tertinggi, sedangkan citra asli (raw image) memperoleh nilai UCIQE rata-rata tertinggi. Hasil One-Way ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar metode ( $p < 0,05$ ), yang kemudian dikonfirmasi melalui uji Tukey HSD. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas metode *enhancement* dipengaruhi oleh karakteristik citra serta urutan kombinasi metode yang digunakan.

**Kata kunci** - *Underwater Image Enhancement, CLAHE, White Balance, UIQM, UCIQE.*

**Abstract** - Underwater images often suffer from quality degradation due to light absorption and scattering, resulting in reduced brightness, contrast, and color cast. These degradations affect the effectiveness of underwater image enhancement methods, highlighting the importance of analyzing image characteristics before image enhancement is performed. This study investigates the influence of image characteristics, including brightness, contrast, and color cast, on the performance of White Balance, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, and two combined enhancement methods, namely White Balance–CLAHE and CLAHE–White Balance. A total of 243 underwater images from the UIEB-Challenging and OceanSet datasets were evaluated using the Underwater Image Quality Measure (UIQM) and Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE). Statistical analysis was conducted using One-Way Analysis of Variance (ANOVA) followed by Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test. The results indicate that the CLAHE–White Balance combination achieved the highest average UIQM score, whereas the raw images obtained the highest average UCIQE score. The ANOVA results revealed statistically significant differences among the evaluated methods ( $p < 0.05$ ), which were further confirmed by Tukey HSD. These findings indicate that the effectiveness of underwater image enhancement is influenced by both the image characteristics and the order in which enhancement methods are combined.

**Keywords** - *Underwater Image Enhancement, CLAHE, White Balance, UIQM, UCIQE.*

## 1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan citra bawah air (*underwater imaging*) semakin berkembang dalam berbagai bidang, seperti eksplorasi sumber daya kelautan, pemantauan ekosistem, inspeksi infrastruktur bawah air, dan navigasi *Autonomous Underwater Vehicle* (AUV). Kualitas citra yang baik menjadi faktor penting karena berpengaruh langsung terhadap kinerja berbagai aplikasi *computer vision*, seperti deteksi objek, segmentasi, klasifikasi, dan pemetaan lingkungan bawah air [1]. Namun, proses akuisisi citra di lingkungan bawah air masih menghadapi berbagai kendala akibat karakteristik media air yang menyebabkan kualitas visual citra menurun [2]. Berbeda dengan citra di udara, cahaya yang merambat di dalam air mengalami penyerapan (*absorption*) dan hamburan (*scattering*). Proses tersebut menyebabkan berkurangnya intensitas cahaya, penurunan kontras, hilangnya detail objek, serta munculnya dominasi warna biru atau hijau (*color cast*) akibat pelemahan kanal merah [3][4]. Kondisi tersebut berdampak pada menurunnya kualitas visual citra sehingga diperlukan proses *image enhancement* sebelum citra digunakan untuk tahap lanjut [5].

Berbagai metode *underwater image enhancement* telah dikembangkan, mulai dari pendekatan berbasis koreksi warna, peningkatan kontras, model fisik, hingga *deep learning*. Meskipun metode berbasis *deep learning* mampu menghasilkan kualitas citra yang tinggi, pendekatan tersebut umumnya memerlukan data pelatihan dalam jumlah besar dan komputasi yang lebih kompleks [6][7]. Oleh karena itu, metode konvensional seperti White Balance, CLAHE, dan Gamma Correction masih banyak digunakan karena sederhana, efisien, dan mudah diterapkan sebagai tahap preprocessing. Selain digunakan secara individual, kombinasi beberapa metode *enhancement* juga mulai dikembangkan untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing metode dalam memperbaiki kualitas visual citra bawah air [8].

Penelitian terdahulu umumnya berfokus pada perbandingan performa berbagai metode *enhancement* atau pengaruh kondisi lingkungan terhadap kualitas citra bawah air [9]. Penelitian pada dataset UIEB-Challenging menunjukkan bahwa setiap metode *enhancement* menghasilkan performa yang berbeda ketika dievaluasi menggunakan metrik kualitas citra [10]. Sementara itu, penelitian menggunakan dataset OceanSet menunjukkan bahwa variasi kedalaman pengambilan citra turut memengaruhi efektivitas metode *enhancement* yang diterapkan [11]. Meskipun berbagai penelitian telah berhasil meningkatkan kualitas citra bawah air menggunakan beragam metode *enhancement*. Namun, kajian mengenai pengaruh karakteristik visual awal citra terhadap efektivitas metode *enhancement* masih terbatas. Padahal, citra bawah air yang berasal dari lokasi atau kedalaman yang sama dapat memiliki tingkat *brightness*, *contrast*, dan *color cast* yang berbeda sehingga respons terhadap setiap metode *enhancement* juga dapat berbeda. Selain itu, kombinasi metode *enhancement* yang memiliki karakteristik berbeda, seperti koreksi warna dan peningkatan kontras, masih relatif jarang dianalisis secara sistematis.

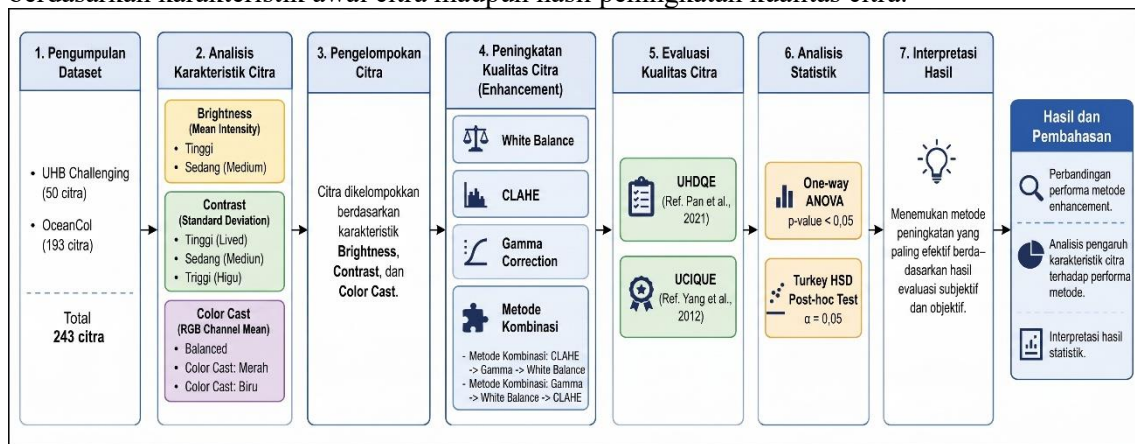
Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik *brightness*, *contrast*, dan *color cast* terhadap performa metode White Balance, CLAHE, Gamma Correction, serta dua metode kombinasi, yaitu White Balance–CLAHE dan CLAHE–White Balance menggunakan 243 citra dari dataset UIEB-Challenging dan OceanSet. Kinerja masing-masing metode akan dievaluasi menggunakan metrik Underwater Image Quality Measure (UIQM) [12] dan Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE) [13] [2], kemudian dianalisis menggunakan One-Way ANOVA [14] dan Tukey HSD [15] untuk mengetahui signifikansi perbedaan performa antar metode. Kontribusi utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh karakteristik visual citra bawah air terhadap efektivitas metode *enhancement*, membandingkan performa metode tunggal dan kombinasi, serta memvalidasi hasil evaluasi menggunakan dua metrik objektif dan analisis statistik sehingga menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik citra dan efektivitas metode *enhancement*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam menentukan metode peningkatan kualitas citra bawah air yang lebih sesuai dengan karakteristik visual citra.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh karakteristik citra bawah air terhadap kinerja metode White Balance, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), dan Gamma Correction. Tahapan penelitian meliputi pengumpulan dataset, analisis karakteristik citra, proses *image enhancement*, evaluasi kualitas citra menggunakan metrik UIQM dan UCIQE, analisis statistik menggunakan One-Way ANOVA dan Tukey HSD, serta pembahasan hasil.

### 2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui tujuh tahapan utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Tahapan tersebut terdiri atas pengumpulan dataset, analisis karakteristik citra, penerapan metode *enhancement*, evaluasi kualitas citra menggunakan UIQM dan UCIQE, analisis statistik menggunakan One-Way ANOVA dan Tukey HSD, analisis hasil, dan penyusunan kesimpulan. Urutan tahapan tersebut dirancang agar setiap metode dapat dievaluasi secara objektif berdasarkan karakteristik awal citra maupun hasil peningkatan kualitas citra.



Gambar 1. Tahapan Penelitian

### 2.2 Dataset Penelitian

Penelitian ini menggunakan 243 citra bawah air yang berasal dari dua dataset, yaitu UIEB-Challenging sebanyak 60 citra dan OceanSet sebanyak 183 citra. Dataset UIEB-Challenging dipilih karena memiliki variasi kondisi visual yang tinggi, sedangkan OceanSet menyediakan citra dengan tingkat degradasi yang beragam pada berbagai kondisi lingkungan bawah air. Kombinasi kedua dataset tersebut memungkinkan evaluasi metode *enhancement* dilakukan pada karakteristik citra yang lebih beragam sehingga hasil penelitian menjadi lebih representatif. Sebelum proses *enhancement* dilakukan, seluruh citra dianalisis berdasarkan karakteristik *brightness*, *contrast*, dan *color cast* sebagai dasar pengelompokan data. Selanjutnya, setiap citra dievaluasi pada enam kondisi, yaitu citra asli (*Raw*), White Balance, CLAHE, Gamma Correction, White Balance–CLAHE, dan CLAHE–White Balance. Evaluasi dilakukan tanpa menggunakan citra referensi (*ground truth*) karena penelitian ini menggunakan metrik *no-reference image quality assessment*.

### 2.3 Analisis Karakteristik Citra

Karakteristik awal citra dianalisis berdasarkan tiga parameter, yaitu *brightness*, *contrast*, dan *color cast*. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi visual setiap citra sebelum proses *enhancement* dilakukan sehingga setiap metode dapat dievaluasi pada karakteristik citra yang berbeda. Ketiga parameter tersebut dihitung menggunakan statistik dasar citra digital yang diperoleh dari nilai intensitas piksel dan rata-rata kanal warna RGB. Parameter tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan tingkat kecerahan, penyebaran intensitas, dan dominasi warna, serta memiliki kompleksitas komputasi yang rendah dan mudah diimplementasikan [16].

### 2.3.1 Brightness

Karakteristik *brightness* menunjukkan tingkat kecerahan rata-rata suatu citra. Nilai *brightness* dihitung berdasarkan rata-rata intensitas citra *grayscale* dinyatakan pada (1).

$$Brightness = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (1)$$

dengan  $I(i, j)$  menyatakan intensitas piksel pada koordinat  $(i, j)$ , sedangkan  $M$  dan  $N$  masing – masing menyatakan jumlah baris dan jumlah kolom citra. Berdasarkan nilai rata-ratanya, citra dikelompokkan menjadi kategori *Dark*, *Medium*, dan *Bright*.

### 2.3.2 Contrast

Karakteristik *contrast* menunjukkan tingkat penyebaran intensitas piksel pada citra. Nilai *contrast* dihitung berdasarkan simpangan baku (*standard deviation*) intensitas *grayscale* yang dinyatakan pada (2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum (I - \mu)^2} \quad (2)$$

dengan  $\mu$  menyatakan rata-rata intensitas citra. Nilai *contrast* selanjutnya dikelompokkan menjadi kategori *Low*, *Medium*, dan *High* menggunakan pendekatan threshold empiris. Pendekatan ini digunakan karena simpangan baku mampu menggambarkan penyebaran intensitas piksel sehingga sering digunakan sebagai indikator tingkat kontras citra.

### 2.3.3 Color cast

Karakteristik awal citra dianalisis berdasarkan tiga parameter, yaitu *brightness*, *contrast*, dan *color cast*. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi visual setiap citra sebelum proses *enhancement* dilakukan sehingga setiap metode dapat dievaluasi pada karakteristik citra yang berbeda. Ketiga parameter dihitung menggunakan statistik dasar citra digital yang diperoleh dari nilai intensitas piksel dan rata-rata kanal warna RGB. Parameter tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan tingkat kecerahan, penyebaran intensitas, dan dominasi warna citra bawah air, serta memiliki kompleksitas komputasi yang rendah dan mudah diimplementasikan. Nilai ambang (*threshold*) yang digunakan untuk mengelompokkan karakteristik *brightness* dan *contrast* ditentukan secara empiris berdasarkan distribusi nilai intensitas dan simpangan baku pada keseluruhan dataset penelitian. Pendekatan ini dipilih agar setiap kategori mampu merepresentasikan variasi kondisi visual citra bawah air yang terdapat pada dataset UIEB-Challenging dan OceanSet, sebagaimana dinyatakan pada (3).

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i, j) \\ \bar{G} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G(i, j) \\ \bar{B} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N B(i, j) \end{aligned} \quad (3)$$

dengan  $\bar{R}$  menyatakan rata-rata kanal merah,  $\bar{G}$  menyatakan rata-rata kanal hijau, sedangkan  $\bar{B}$  menyatakan rata-rata kanal biru.

Tabel 2. Kriteria Pengelompokan Karakteristik Citra

| Karakteristik     | Metode Perhitungan          | Kategori                                                                                                |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Brightness</i> | Mean Intensity              | Dark (<85), Medium (85–169), Bright ( $\geq 170$ )                                                      |
| <i>Contrast</i>   | Standard Deviation          | Low (<40), Medium (40–79), High ( $\geq 80$ )                                                           |
| <i>Color cast</i> | RGB Channel Mean Comparison | Blue Cast ( $(\bar{B} > \bar{R} + 30)$ ), Green Cast ( $(\bar{G} > \bar{R} + 30)$ ), Balanced (lainnya) |

*Threshold* pada Tabel 2 tidak mengacu pada standar baku tertentu karena hingga saat ini belum terdapat ketentuan *universal* mengenai pengelompokan *brightness* maupun *contrast* pada citra bawah air. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan empiris berdasarkan distribusi karakteristik dataset agar setiap kategori dapat merepresentasikan kondisi visual yang berbeda, yaitu citra gelap dan sedang untuk *brightness*, serta citra berkontras rendah, sedang, dan tinggi untuk *contrast*. Pendekatan ini bertujuan untuk mempermudah analisis pengaruh karakteristik awal citra terhadap performa masing-masing metode *enhancement*.

## 2.4 Metode *Enhancement* Citra

Setelah citra dikelompokkan berdasarkan karakteristik *brightness*, *contrast*, dan *color cast*, setiap kelompok citra diproses menggunakan tiga metode *image enhancement*, yaitu White Balance, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), dan Gamma Correction. Ketiga metode dipilih karena memiliki pendekatan yang berbeda dalam meningkatkan kualitas citra, sehingga memungkinkan dilakukan analisis terhadap pengaruh karakteristik visual citra terhadap performa masing-masing metode.

### 2.4.1 White Balance

White Balance merupakan metode koreksi warna yang bertujuan mengurangi dominasi warna tertentu (*color cast*) sehingga distribusi warna citra menjadi lebih seimbang. Pada penelitian ini digunakan pendekatan Gray World Assumption, yaitu dengan mengasumsikan bahwa rata-rata intensitas ketiga kanal warna (R, G, dan B) pada citra alami seharusnya memiliki nilai yang relatif sama. Pendekatan ini banyak digunakan pada penelitian *underwater image enhancement* karena sederhana, memiliki kompleksitas komputasi yang rendah, serta efektif dalam memperbaiki penyimpangan warna akibat penyerapan cahaya di dalam air. Rata-rata intensitas masing-masing kanal dinyatakan (4).

$$\begin{aligned} R_{avg} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N R(i, j) \\ G_{avg} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N G(i, j) \\ B_{avg} &= \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N B(i, j) \end{aligned} \quad (4)$$

Selanjutnya dihitung nilai rata-rata keseluruhan kanal yang dinyatakan pada (5):

$$Avg = \frac{R_{avg} + G_{avg} + B_{avg}}{3} \quad (5)$$

Kemudian setiap kanal dinormalisasi yang dinyatakan pada (6). Setelah proses normalisasi selesai, seluruh nilai piksel dibatasi pada rentang 0–255 agar sesuai dengan representasi citra 8-bit. Dimana  $R'$ ,  $G'$ ,  $B'$  adalah kanal warna setelah proses White Balance.

$$\begin{aligned} R' &= R \times \frac{Avg}{R_{avg}} \\ G' &= G \times \frac{Avg}{G_{avg}} \\ B' &= B \times \frac{Avg}{B_{avg}} \end{aligned} \quad (6)$$

### 2.4.2 CLAHE

Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) merupakan pengembangan dari Adaptive Histogram Equalization (AHE) yang meningkatkan kontras lokal dengan membagi citra menjadi beberapa blok (*tiles*) berukuran kecil. Berbeda dengan histogram equalization konvensional, CLAHE menerapkan batas (*clip limit*) pada setiap

histogram sehingga mampu mengurangi amplifikasi *noise* pada daerah yang homogen. Pada penelitian ini, CLAHE diterapkan pada kanal luminansi (L) pada ruang warna CIELAB, sedangkan kanal a dan b dipertahankan agar informasi warna tidak berubah selama proses peningkatan kontras. Parameter yang digunakan adalah clip limit = 2.0 dan tile grid size = (8×8). Setelah proses *equalization* dilakukan pada setiap blok, hasil transformasi digabungkan menggunakan interpolasi bilinear sehingga transisi antarblok menjadi lebih halus, setiap blok dinyatakan pada (7) [17].

$$s_k = (L - 1) \sum_{j=0}^k p(r_j) \quad (7)$$

dengan  $p(r_j)$  menyatakan probabilitas kemunculan intensitas,  $L$  merupakan jumlah Tingkat keabuan dan  $s_k$  menyatakan intensitas keluaran.

#### 2.4.3 Gamma Correction

Gamma Correction merupakan metode transformasi intensitas yang digunakan untuk memperbaiki tingkat kecerahan citra melalui fungsi transformasi nonlinier. Hubungan antara intensitas masukan dan intensitas keluaran yang dinyatakan pada (8) [18]. Nilai parameter gamma akan digunakan sebesar 1,5.

$$I_{out} = 255 \left( \frac{I_{in}}{255} \right)^{1/\gamma} \quad (8)$$

dengan  $I_{in}$  menyatakan intensitas piksel masukan,  $I_{out}$  menyatakan intensitas piksel keluaran, dan  $\gamma$  menyatakan nilai gamma.

#### 2.4.4 Kombinasi White Balance dan CLAHE

Untuk meningkatkan kontribusi penelitian, selain mengevaluasi masing-masing metode secara individual, penelitian ini juga menguji kombinasi dua metode *enhancement* yang memiliki karakteristik berbeda, yaitu White Balance dan CLAHE. White Balance berfungsi memperbaiki keseimbangan warna akibat *color cast*, sedangkan CLAHE meningkatkan kontras lokal dan mempertahankan detail citra. Dua urutan kombinasi dievaluasi, yaitu White Balance yang diikuti CLAHE (WB→CLAHE) dan CLAHE yang diikuti White Balance (CLAHE→WB). Evaluasi dilakukan untuk mengetahui apakah kombinasi kedua metode mampu menghasilkan kualitas citra yang lebih baik dibandingkan penerapan metode secara tunggal.

### 2.5 Evaluasi Kualitas Citra

Kinerja masing-masing metode *enhancement* dievaluasi menggunakan dua metrik kualitas citra tanpa referensi yaitu UIQM dan UCIQE. Penggunaan kedua metrik tersebut bertujuan untuk memperoleh evaluasi kualitas citra yang lebih komprehensif karena masing-masing metrik memiliki karakteristik penilaian yang berbeda.

#### 2.5.1 Underwater Image Quality Measure (UIQM)

UIQM mengevaluasi kualitas citra berdasarkan kombinasi tiga komponen, yaitu Underwater Image Colorfulness Measure (UICM) yang menilai *colorfulness*, Underwater Image Sharpness Measure (UISM) yang menilai *sharpness*, dan Underwater Image Contrast Measure (UICoM) yang menilai *contrast* [19]. Nilai UIQM ditunjukkan pada (9). Semakin tinggi nilai UIQM menunjukkan kualitas citra yang semakin baik.

$$UIQM = 0.0282.UICM + 0.2953.UISM + 3.5753.UICoM \quad (9)$$

### 2.5.2 Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE)

UCIQE mengukur kualitas citra berdasarkan variasi warna (*chroma*), kontras luminansi, dan fungsi saturation. Ketiga parameter tersebut dikombinasikan secara linear untuk menghasilkan nilai UCIQE yang digunakan sebagai indikator kualitas visual citra bawah air. Semakin tinggi nilai UCIQE menunjukkan kualitas citra yang semakin baik [13]. Persamaan UCIQE ditunjukkan pada (10). Semakin tinggi nilai UCIQE menunjukkan kualitas visual citra yang semakin baik.

$$UCIQE = 0.4680\sigma_c + 0.2745con_l + 0.2576\mu_s \quad (10)$$

### 2.6 Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan performa antara enam kondisi citra, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, White Balance–CLAHE, dan CLAHE–White Balance berdasarkan nilai UIQM dan UCIQE. Pengujian dilakukan menggunakan One-Way Analysis of Variance (One-Way ANOVA) dengan tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ . One-Way ANOVA digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata nilai UIQM dan UCIQE yang dihasilkan oleh keenam kondisi citra sebagaimana dihitung pada Persamaan (11) [14]. Analisis karakteristik citra berdasarkan *brightness*, *contrast*, dan *color cast* hanya digunakan sebagai dasar pengelompokan data untuk analisis deskriptif dan interpretasi hasil, serta tidak digunakan sebagai kelompok pembanding dalam pengujian ANOVA. Dengan demikian, ketidakseimbangan jumlah sampel pada kategori *brightness*, *contrast*, dan *color cast* tidak memengaruhi pelaksanaan One-Way ANOVA karena pengujian dilakukan terhadap keenam kondisi citra, bukan terhadap kategori karakteristik citra.

$$F = \frac{M S_{Between}}{M S_{within}} \quad (11)$$

$$MS_{Between} = \frac{SS_{Between}}{k-1} ; MS_{Within} = \frac{SS_{within}}{N-k}$$

dengan  $MS_{Between}$  menyatakan rata-rata kuadrat antar kelompok,  $MS_{Within}$  menyatakan rata-rata kuadrat dalam kelompok,  $SS_{Between}$  menyatakan jumlah kuadrat antar kelompok, dan  $k$  dan  $N$  masing-masing menyatakan jumlah kelompok dan jumlah sampel.

Apabila hasil One-Way ANOVA menunjukkan p-value < 0,05, maka analisis dilanjutkan menggunakan Tukey Honestly Significant Difference (Tukey HSD) untuk mengidentifikasi pasangan metode yang memiliki perbedaan rata-rata secara signifikan. Nilai Tukey HSD dihitung menggunakan (12) [20].

$$HSD = q_\alpha \sqrt{\frac{MS_{within}}{n}} \quad (12)$$

dengan  $q_\alpha$  menyatakan nilai distribusi *Studentized Range*,  $MS_{Within}$  menyatakan rata-rata kuadrat dalam kelompok, dan  $n$  menyatakan jumlah sampel pada setiap kelompok.

Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas hipotesis nol ( $H_0$ ) dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ). Hipotesis nol ( $H_0$ ) menyatakan bahwa tidak terdapat perbedaan rata-rata nilai UIQM maupun UCIQE yang dihasilkan oleh keenam kondisi sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (13). Sebaliknya, hipotesis alternatif ( $H_1$ ) menyatakan bahwa terdapat sedikitnya satu kondisi citra yang memiliki rata-rata nilai UIQM atau UCIQE berbeda secara signifikan dibandingkan kondisi lainnya sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (14).

$$H_0: \mu_{RAW} = \mu_{WB} = \mu_{CLAHE} = \mu_{GAMMA} = \mu_{WB \rightarrow CLAHE} = \mu_{CLAHE \rightarrow WB} \quad (13)$$

$$H_1 : \exists i, j \text{ sehingga } \mu_i \neq \mu_j \quad (14)$$

Penelitian ini akan menggunakan tingkat signifikansi  $\alpha$  sebesar 0,05. Keputusan pengujian statistik ditentukan berdasarkan nilai p-value dengan kriteria sebagai berikut:

- Jika p-value < 0,05, maka  $H_0$  ditolak dan  $H_1$  diterima, yang menunjukkan adanya perbedaan performa yang signifikan di antara keenam kondisi citra yang diuji.
- Jika p-value  $\geq$  0,05, maka  $H_0$  gagal ditolak, sehingga tidak terdapat bukti yang cukup untuk menyatakan adanya perbedaan performa yang signifikan di antara keenam kondisi citra yang diuji.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Karakteristik Dataset Citra Bawah Air

Sebelum proses *image enhancement* dilakukan, seluruh citra dianalisis berdasarkan karakteristik *brightness*, *contrast*, dan *color cast* untuk mengidentifikasi kondisi visual awal dataset. Analisis ini bertujuan menggambarkan distribusi karakteristik citra yang digunakan dalam penelitian sekaligus menjadi dasar untuk mengevaluasi pengaruh karakteristik tersebut terhadap performa setiap metode *enhancement*. Komposisi dataset penelitian disajikan pada Tabel 3, sedangkan distribusi karakteristik citra ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 4.

Tabel 3. Komposisi dataset penelitian

| Dataset          | Jumlah Citra | Persentase (%) |
|------------------|--------------|----------------|
| UIEB-Challenging | 60           | 24,69          |
| OceanSet         | 183          | 75,31          |
| <b>Total</b>     | <b>243</b>   | <b>100,00</b>  |

Tabel 4. Distribusi karakteristik citra bawah air

| Karakteristik     | Kategori   | Jumlah Citra | Persentase (%) |
|-------------------|------------|--------------|----------------|
| <b>Brightness</b> | Dark       | 56           | 23,05          |
|                   | Medium     | 187          | 76,95          |
| <b>Contrast</b>   | Low        | 56           | 23,05          |
|                   | Medium     | 185          | 76,13          |
|                   | High       | 2            | 0,82           |
| <b>Color cast</b> | Balanced   | 171          | 70,37          |
|                   | Blue Cast  | 47           | 19,34          |
|                   | Green Cast | 25           | 10,29          |
| <b>Total</b>      |            | <b>243</b>   | <b>100,00</b>  |

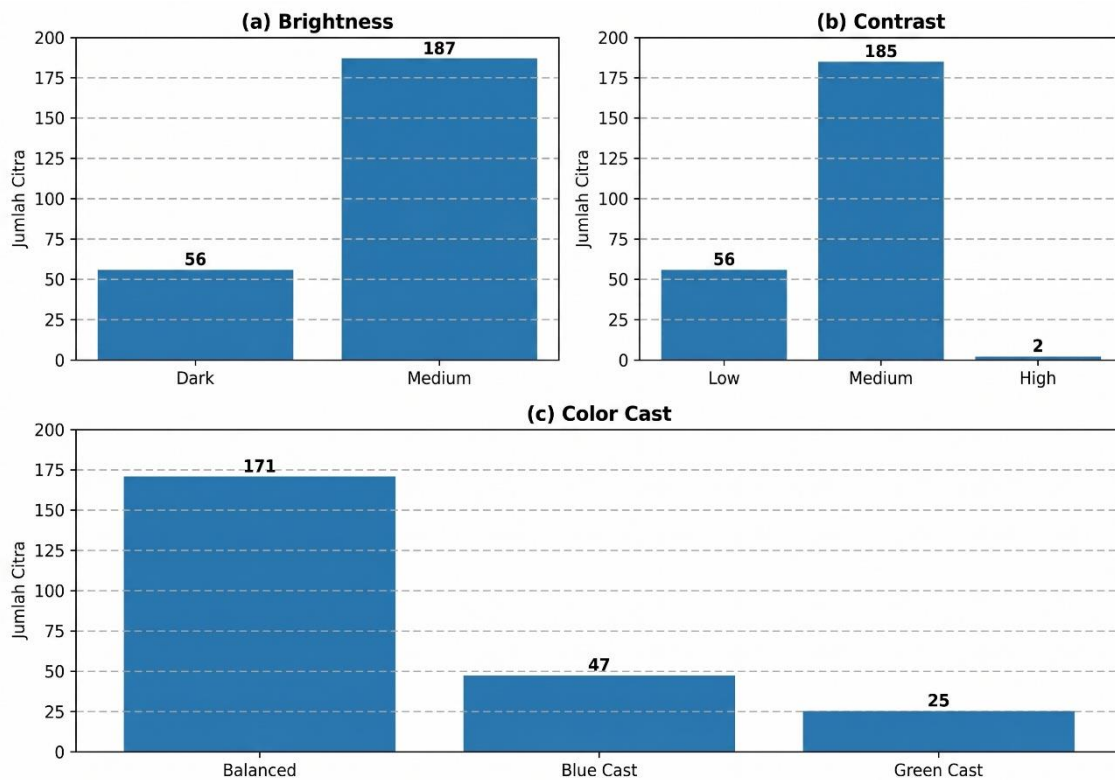
Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 2(a), sebagian besar citra berada pada kategori *Medium Brightness*, yaitu sebanyak 187 citra (76,95%), sedangkan 56 citra (23,05%) termasuk kategori *Dark* dan tidak ditemukan citra pada kategori *Bright*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa mayoritas citra masih memiliki tingkat pencahayaan yang cukup untuk mempertahankan informasi visual objek, meskipun mengalami degradasi akibat penyerapan (*absorption*) dan hamburan (*scattering*) cahaya di lingkungan bawah air.

Distribusi contrast pada Gambar 2(b) menunjukkan bahwa 185 citra (76,13%) berada pada kategori *Medium*, 56 citra (23,05%) termasuk kategori *Low*, dan hanya 2 citra (0,82%) yang memiliki *High Contrast*. Dominasi kategori kontras sedang menunjukkan bahwa sebagian besar citra masih mampu mempertahankan perbedaan intensitas antar objek, namun peningkatan kontras tetap diperlukan agar detail objek dapat ditampilkan dengan lebih jelas.

Sementara itu, hasil analisis *color cast* pada Gambar 2(c) menunjukkan bahwa kategori *Balanced* mendominasi dataset dengan 171 citra (70,37%), diikuti *Blue Cast* sebanyak 47 citra (19,34%) dan *Green Cast* sebanyak 25 citra (10,29%). Meskipun sebagian besar citra memiliki distribusi warna yang relatif seimbang, keberadaan citra dengan dominasi warna biru dan hijau



menunjukkan adanya variasi kondisi optik bawah air yang dipengaruhi oleh kedalaman, kekeruhan, dan pencahayaan saat proses akuisisi citra.



Gambar 2. Distribusi karakteristik citra (a) *brightness*, (b) *contrast*, dan (c) *color cast*.

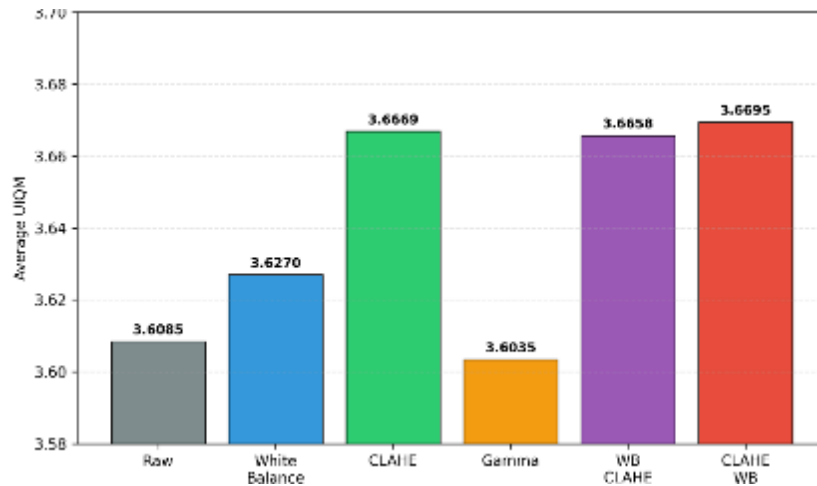
Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa dataset memiliki variasi karakteristik visual yang cukup beragam dari aspek *brightness*, *contrast*, dan *color cast*. Variasi karakteristik tersebut memberikan kondisi pengujian yang representatif untuk mengevaluasi konsistensi performa setiap metode *enhancement* pada berbagai kondisi citra bawah air. Pada penelitian ini, evaluasi dilakukan terhadap enam kondisi citra, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, White Balance–CLAHE, dan CLAHE–White Balance. Selanjutnya, efektivitas masing-masing kondisi dievaluasi menggunakan metrik UIQM dan UCIQE untuk menganalisis pengaruh karakteristik awal citra terhadap kualitas hasil *enhancement*.

### 3.2 Perbandingan Kinerja Metode Enhancement Berdasarkan UIQM dan UCIQE

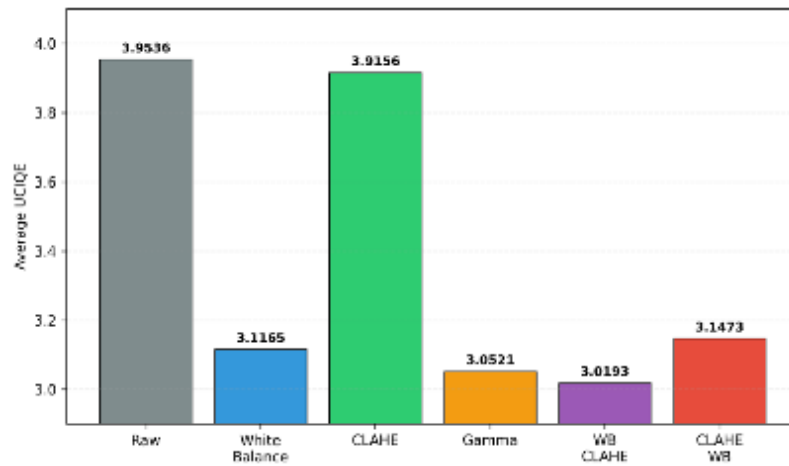
Setelah seluruh citra dianalisis pada enam kondisi, yaitu citra asli (Raw), White Balance, CLAHE, Gamma Correction, White Balance–CLAHE, dan CLAHE–White Balance, kualitas citra dievaluasi menggunakan metrik Underwater Image Quality Measure (UIQM) dan Underwater Color Image Quality Evaluation (UCIQE). Perbandingan ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas masing-masing metode maupun kombinasi metode dalam meningkatkan kualitas citra bawah air berdasarkan dua metrik evaluasi yang berbeda.

Tabel 5. Perbandingan rata-rata nilai UIQM dan UCIQE

| Method       | UIQM   | UCIQE  |
|--------------|--------|--------|
| CLAHE        | 3.6669 | 3.9156 |
| CLAHE WB     | 3.6695 | 3.1473 |
| Gamma        | 3.6035 | 3.0521 |
| Raw          | 3.6085 | 3.9536 |
| WB CLAHE     | 3.6658 | 3.0193 |
| WhiteBalance | 3.6270 | 3.1165 |



Gambar 3. Perbandingan rata-rata nilai UIQM pada setiap metode *enhancement*.



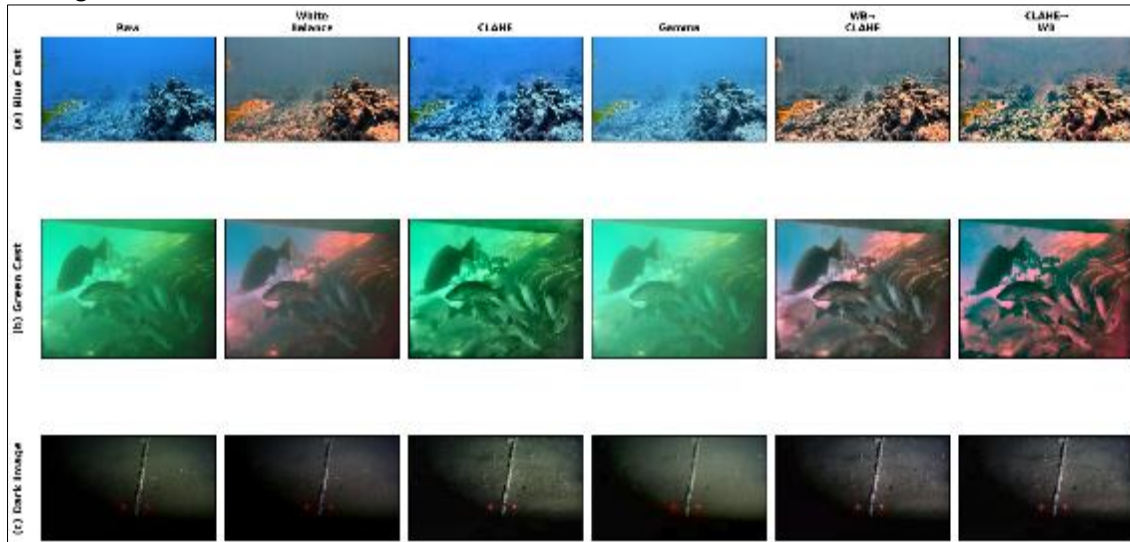
Gambar 4. Perbandingan rata-rata nilai UCIQE pada setiap metode *enhancement*.

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 3, kombinasi CLAHE–White Balance menghasilkan nilai UIQM rata-rata tertinggi sebesar 3,6695, diikuti oleh CLAHE sebesar 3,6669, White Balance–CLAHE sebesar 3,6658, White Balance sebesar 3,6270, Raw sebesar 3,6085, dan Gamma Correction sebesar 3,6035. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan CLAHE sebelum White Balance memberikan peningkatan kualitas visual citra bawah air yang lebih baik dibandingkan metode tunggal maupun kombinasi lainnya. CLAHE berperan meningkatkan kontras lokal dan mempertajam detail objek, sedangkan White Balance yang diterapkan setelahnya membantu menyeimbangkan distribusi warna sehingga menghasilkan kualitas visual yang lebih baik secara keseluruhan.

Berbeda dengan hasil UIQM, Gambar 4 menunjukkan bahwa citra asli (*Raw*) memperoleh nilai UCIQE rata-rata tertinggi sebesar 3,9536, diikuti CLAHE sebesar 3,9156, CLAHE–White Balance sebesar 3,1473, White Balance sebesar 3,1165, White Balance–CLAHE sebesar 3,0193, dan Gamma Correction sebesar 3,0521. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *enhancement* tidak selalu meningkatkan nilai UCIQE. Pada beberapa kondisi, peningkatan kontras dan koreksi warna menyebabkan perubahan distribusi chroma dan luminansi sehingga nilai UCIQE justru lebih rendah dibandingkan citra asli.

Perbedaan hasil UIQM dan UCIQE menunjukkan bahwa kedua metrik mengevaluasi kualitas citra dari aspek yang berbeda. UIQM lebih menekankan kombinasi warna, ketajaman, dan kontras sehingga metode CLAHE–White Balance memberikan performa terbaik, sedangkan UCIQE lebih sensitif terhadap distribusi chroma, luminansi, dan saturasi warna sehingga citra asli

(raw) memperoleh nilai tertinggi karena masih mempertahankan karakteristik warna yang lebih alami. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan lebih dari satu metrik diperlukan untuk memperoleh evaluasi kualitas citra yang lebih komprehensif serta bahwa efektivitas metode *enhancement* dipengaruhi oleh karakteristik metrik evaluasi yang digunakan. Oleh karena itu, subbab berikutnya membahas pengaruh karakteristik awal citra terhadap performa masing-masing metode *enhancement*.



Gambar 5. Perbandingan visual hasil *enhancement* pada citra bawah air dengan karakteristik (a) *blue cast*, (b) *green cast*, dan (c) *low brightness* menggunakan enam metode *enhancement*.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan visual hasil *enhancement* pada tiga citra bawah air yang mewakili karakteristik degradasi berbeda, yaitu *blue cast*, *green cast*, dan kondisi *low brightness*. Pada citra *blue cast*, metode White Balance mampu mengurangi dominasi warna biru sehingga menghasilkan tampilan warna yang lebih alami dibandingkan citra asli. Sebaliknya, pada citra *green cast*, penerapan White Balance cenderung menghasilkan koreksi warna yang berlebihan, sedangkan metode CLAHE mampu meningkatkan kontras dengan tetap mempertahankan karakteristik warna citra. Pada citra dengan kondisi *low brightness*, metode kombinasi, khususnya CLAHE→White Balance, memberikan peningkatan visibilitas tekstur dasar perairan dan detail objek yang lebih baik dibandingkan metode tunggal. Hasil pengamatan visual ini sejalan dengan hasil evaluasi kuantitatif menggunakan metrik UIQM dan UCIQE yang menunjukkan bahwa efektivitas metode *enhancement* dipengaruhi oleh karakteristik degradasi citra bawah air.

### 3.3 Pengaruh Brightness terhadap Kinerja Enhancement

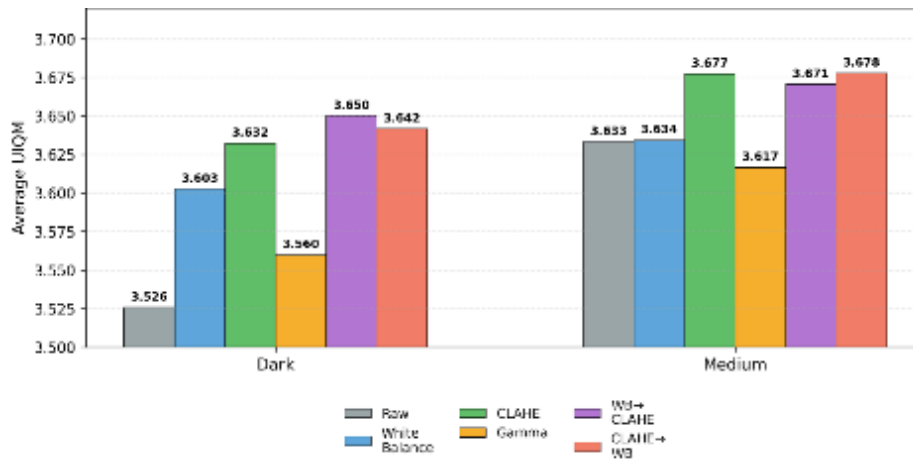
Untuk mengetahui pengaruh tingkat brightness terhadap performa metode *enhancement*, seluruh citra dikelompokkan ke dalam kategori *Dark* dan *Medium* berdasarkan hasil analisis karakteristik *brightness*. Setiap kelompok citra kemudian dievaluasi pada enam kondisi, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, White Balance–CLAHE, dan CLAHE–White Balance menggunakan metrik UIQM dan UCIQE. Perbandingan tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi metode yang paling efektif pada tingkat kecerahan citra yang berbeda.

Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 6, nilai UIQM pada kategori Dark dan Medium menunjukkan bahwa tingkat *brightness* memengaruhi performa setiap metode *enhancement*. Pada kategori Dark, metode White Balance–CLAHE menghasilkan nilai UIQM tertinggi sebesar 3,650, sedangkan pada kategori Medium, metode CLAHE–White Balance memberikan nilai tertinggi sebesar 3,678. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi CLAHE dan White Balance lebih efektif dibandingkan metode tunggal karena mampu menggabungkan peningkatan kontras lokal dengan perbaikan distribusi warna. Sebaliknya, Gamma Correction menghasilkan

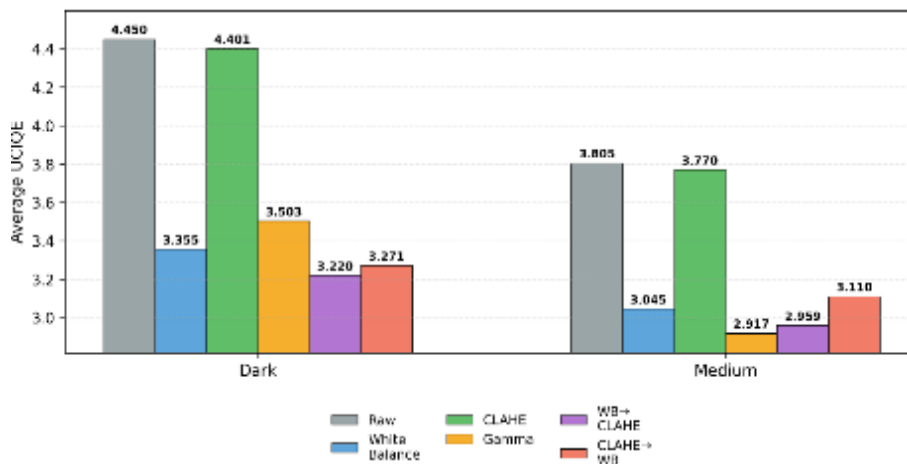
nilai UIQM yang relatif lebih rendah pada kedua kategori karena hanya melakukan transformasi intensitas tanpa meningkatkan kontras lokal maupun mengoreksi *color cast*. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan metode *enhancement* sebaiknya disesuaikan dengan tingkat *brightness* awal citra untuk memperoleh kualitas visual yang optimal.

Tabel 6. Rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *brightness*

| Brightness Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|---------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| Dark                | 3.5257 | 3.6025       | 3.6322 | 3.5598 | 3.6501   | 3.6417   |
| Medium              | 3.6333 | 3.6343       | 3.6773 | 3.6166 | 3.6705   | 3.6778   |

Gambar 6. Perbandingan rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *brightness*.Tabel 7. Rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *brightness*

| Brightness Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|---------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| Dark                | 4.4497 | 3.3549       | 4.4008 | 3.5034 | 3.2201   | 3.2714   |
| Medium              | 3.8051 | 3.0451       | 3.7703 | 2.917  | 2.9591   | 3.1102   |

Gambar 7. Perbandingan rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *brightness*.

Berdasarkan Tabel 7 dan Gambar 7, nilai UCIQE pada kategori Dark maupun Medium menunjukkan bahwa citra Raw memperoleh nilai tertinggi, masing-masing sebesar 4,4497 dan 3,8051. Sementara itu, metode CLAHE menghasilkan nilai yang relatif mendekati citra asli, sedangkan White Balance, Gamma Correction, serta metode kombinasi memberikan nilai UCIQE yang lebih rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *enhancement* tidak selalu meningkatkan nilai UCIQE karena perubahan kontras dan distribusi warna dapat mengurangi karakteristik

chroma yang menjadi komponen utama dalam perhitungan metrik tersebut. Dengan demikian, peningkatan kualitas visual hasil *enhancement* belum tentu diikuti oleh peningkatan nilai UCIQE, sehingga evaluasi kualitas citra bawah air sebaiknya mempertimbangkan lebih dari satu metrik agar diperoleh penilaian yang lebih komprehensif.

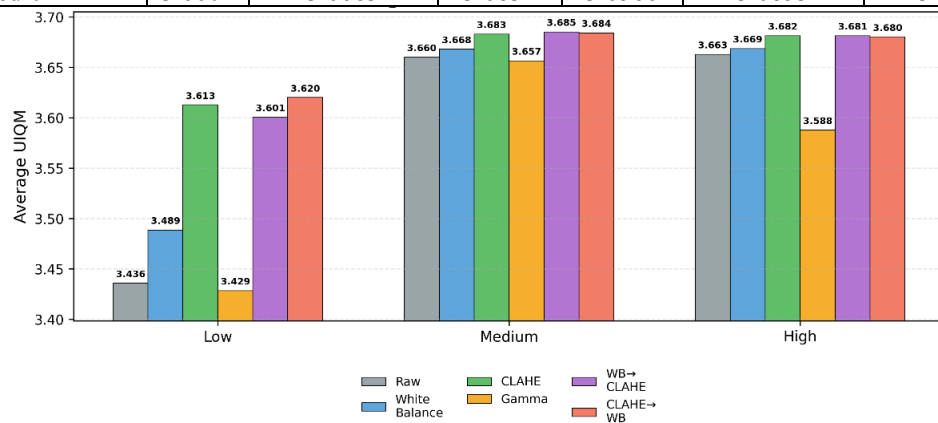
Perbedaan hasil antara UIQM dan UCIQE menunjukkan bahwa efektivitas metode *enhancement* dipengaruhi oleh karakteristik metrik evaluasi yang digunakan. UIQM lebih menekankan kualitas visual melalui kontras, ketajaman, dan keseimbangan warna, sedangkan UCIQE lebih sensitif terhadap distribusi warna dan *chroma*. Oleh karena itu, penilaian kualitas citra bawah air sebaiknya tidak hanya mengacu pada satu metrik, tetapi menggunakan beberapa metrik agar diperoleh evaluasi yang lebih komprehensif.

### 3.4 Pengaruh Contrast terhadap Kinerja Enhancement

Untuk menganalisis pengaruh tingkat *contrast* terhadap performa metode image *enhancement*, seluruh citra dikelompokkan ke dalam kategori *Low*, *Medium*, dan *High* berdasarkan hasil analisis karakteristik citra dengan menggunakan metrik UIQM dan UCIQE.

Tabel 8. Rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *contrast*

| Contrast Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|-------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| High              | 3.663  | 3.6687       | 3.6815 | 3.5878 | 3.6814   | 3.6804   |
| Low               | 3.4361 | 3.4887       | 3.6129 | 3.4286 | 3.6008   | 3.6202   |
| Medium            | 3.6601 | 3.6683       | 3.6831 | 3.6566 | 3.6853   | 3.6843   |



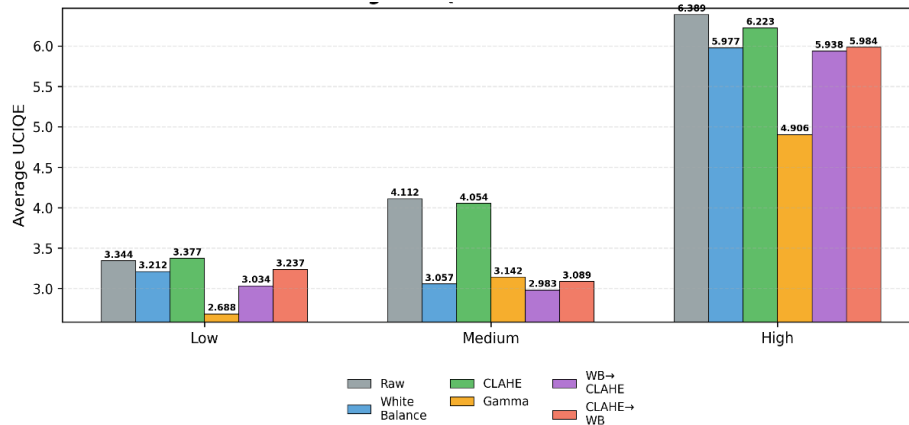
Gambar 8. Perbandingan rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *contrast*

Berdasarkan Tabel 8 dan Gambar 8, nilai UIQM pada kategori *Low*, *Medium*, dan *High* menunjukkan bahwa tingkat *contrast* memengaruhi performa setiap metode *enhancement*. Pada kategori *Low*, metode CLAHE–White Balance menghasilkan nilai UIQM tertinggi sebesar 3,6202, sedangkan pada kategori *Medium* metode White Balance–CLAHE memperoleh nilai tertinggi sebesar 3,6853. Pada kategori *High*, metode CLAHE menghasilkan nilai UIQM tertinggi sebesar 3,6815, meskipun selisihnya sangat kecil dibandingkan metode kombinasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi CLAHE dan White Balance lebih efektif pada citra dengan kontras rendah hingga sedang karena mampu meningkatkan kontras lokal sekaligus memperbaiki keseimbangan warna. Sebaliknya, pada citra yang telah memiliki kontras tinggi, penerapan CLAHE saja sudah cukup untuk meningkatkan kualitas visual tanpa memerlukan proses koreksi warna tambahan.

Tabel 9. Rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *contrast*

| Contrast Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|-------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| Low               | 3.3441 | 3.2115       | 3.3765 | 2.6878 | 3.0342   | 3.2373   |
| Medium            | 4.1118 | 3.0568       | 4.0538 | 3.1424 | 2.9832   | 3.0894   |
| High              | 6.3893 | 5.9771       | 6.2233 | 4.9056 | 5.9376   | 5.9839   |





Gambar 9. Perbandingan rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *contrast*

Berdasarkan Tabel 9 dan Gambar 9, nilai UCIQE pada kategori *Low*, *Medium*, dan *High* menunjukkan bahwa tingkat *contrast* memengaruhi kemampuan setiap metode dalam meningkatkan kualitas warna citra bawah air. Pada kategori *Low*, metode CLAHE menghasilkan nilai UCIQE tertinggi sebesar 3,3765, sedangkan pada kategori *Medium* dan *High*, citra Raw memperoleh nilai tertinggi masing-masing sebesar 4,1118 dan 6,3893. Hasil tersebut menunjukkan bahwa CLAHE lebih efektif pada citra dengan kontras rendah karena mampu meningkatkan kontras lokal sehingga variasi warna menjadi lebih jelas. Sebaliknya, pada citra dengan kontras sedang dan tinggi, proses *enhancement* tidak selalu meningkatkan nilai UCIQE karena perubahan distribusi warna selama proses peningkatan kualitas dapat mengurangi karakteristik *chroma* yang menjadi komponen utama dalam perhitungan metrik UCIQE. Temuan ini menunjukkan bahwa efektivitas metode *enhancement* terhadap nilai UCIQE bergantung pada karakteristik kontras awal citra bawah air.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa karakteristik *contrast* memengaruhi efektivitas setiap metode *image enhancement*. Pada metrik UIQM, metode terbaik bervariasi pada setiap kategori kontras, yaitu CLAHE–White Balance pada kategori *Low*, White Balance–CLAHE pada kategori *Medium*, dan CLAHE pada kategori *High*. Sementara itu, pada metrik UCIQE, CLAHE menghasilkan nilai tertinggi pada kategori *Low*, sedangkan citra Raw memperoleh nilai tertinggi pada kategori *Medium* dan *High*. Temuan ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode yang selalu memberikan performa terbaik pada seluruh kondisi kontras. Oleh karena itu, pemilihan metode *image enhancement* perlu mempertimbangkan karakteristik awal citra serta tujuan evaluasi yang digunakan.

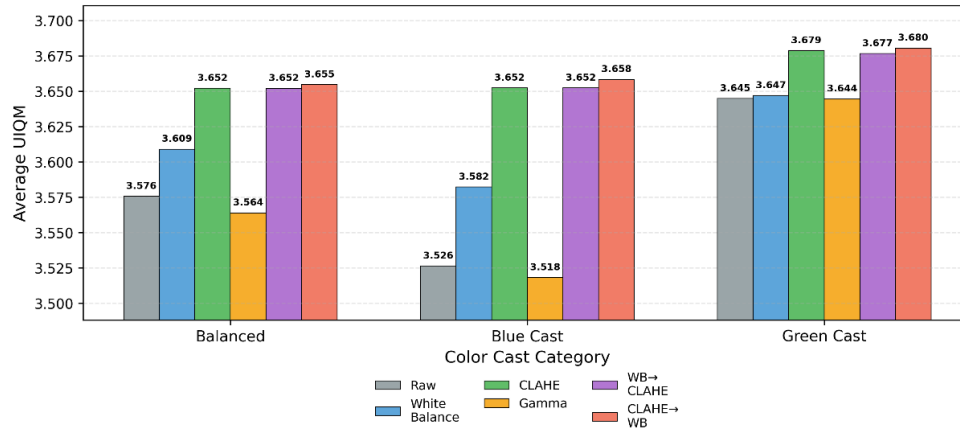
### 3.5 Pengaruh *Color cast* terhadap Kinerja *Enhancement*

Untuk menganalisis pengaruh *color cast* terhadap performa metode *image enhancement*, seluruh citra dikelompokkan ke dalam kategori *Balanced*, *Blue Cast*, dan *Green Cast* berdasarkan hasil analisis distribusi warna. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik UIQM dan UCIQE.

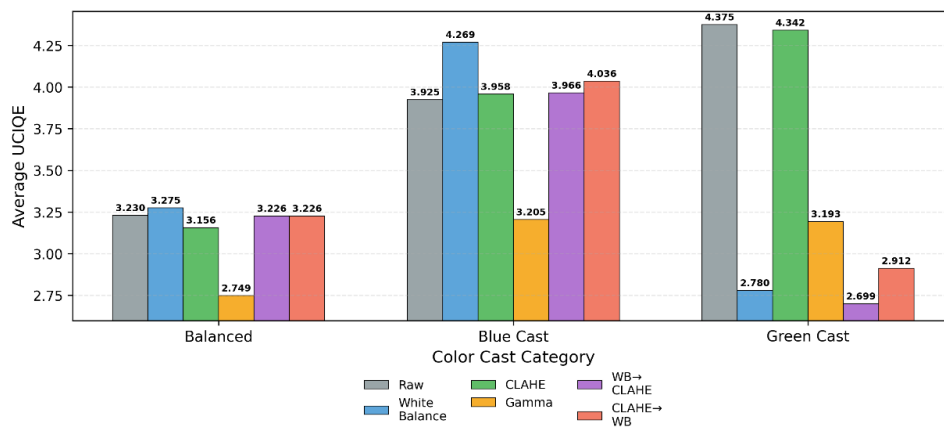
Berdasarkan Tabel 10 dan Gambar 10, karakteristik *color cast* memengaruhi nilai UIQM yang dihasilkan oleh setiap metode *image enhancement*. Pada kategori *Balanced*, metode CLAHE\_WB menghasilkan nilai UIQM tertinggi sebesar 3,6546, sedangkan pada kategori *Blue Cast* dan *Green Cast*, metode yang sama juga memberikan performa terbaik dengan nilai masing-masing sebesar 3,6582 dan 3,6804. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi CLAHE yang diikuti oleh White Balance mampu meningkatkan kualitas visual citra bawah air secara lebih konsisten dibandingkan metode lainnya, karena CLAHE terlebih dahulu meningkatkan kontras lokal, kemudian White Balance memperbaiki keseimbangan warna sehingga kualitas citra menjadi lebih optimal pada berbagai karakteristik *color cast*.

Tabel 10. Rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *color cast*

| ColorCast Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|--------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| Balanced           | 3.5757 | 3.6089       | 3.652  | 3.5639 | 3.6519   | 3.6546   |
| Blue Cast          | 3.5264 | 3.5822       | 3.6523 | 3.5182 | 3.6523   | 3.6582   |
| Green Cast         | 3.6448 | 3.6469       | 3.6786 | 3.6444 | 3.6766   | 3.6804   |

Gambar 10. Perbandingan rata-rata nilai UIQM berdasarkan kategori *color cast*Tabel 11. Rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *color cast*

| ColorCast Category | Raw    | WhiteBalance | CLAHE  | Gamma  | WB CLAHE | CLAHE WB |
|--------------------|--------|--------------|--------|--------|----------|----------|
| Balanced           | 3.2304 | 3.2748       | 3.1559 | 2.7492 | 3.2259   | 3.2264   |
| Blue Cast          | 3.9249 | 4.2692       | 3.9581 | 3.2052 | 3.9659   | 4.0364   |
| Green Cast         | 4.3746 | 2.7799       | 4.3422 | 3.1932 | 2.6988   | 2.9124   |

Gambar 11. Perbandingan rata-rata nilai UCIQE berdasarkan kategori *color cast*

Berdasarkan Tabel 11 dan Gambar 11, karakteristik *color cast* memengaruhi nilai UCIQE yang dihasilkan oleh setiap metode *image enhancement*. Pada kategori Balanced dan Blue Cast, metode White Balance menghasilkan nilai UCIQE tertinggi masing-masing sebesar 3,2748 dan 4,2692, sedangkan pada kategori Green Cast, nilai tertinggi diperoleh oleh citra Raw sebesar 4,3746, diikuti CLAHE sebesar 4,3422. Berbeda dengan metrik UCIQE, hasil UIQM menunjukkan bahwa metode CLAHE\_WB secara konsisten menghasilkan nilai tertinggi pada seluruh kategori *color cast*. Temuan ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu metode yang selalu memberikan performa terbaik untuk semua karakteristik warna citra bawah air, sehingga pemilihan metode *image enhancement* perlu disesuaikan dengan karakteristik *color cast* pada citra awal agar kualitas hasil *enhancement* lebih optimal.

### 3.6 Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan performa yang signifikan antara enam metode, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, WB\_CLAHE, dan CLAHE\_WB berdasarkan metrik UIQM dan UCIQE. Pengujian dilakukan menggunakan One-Way ANOVA dengan tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ . Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan, analisis dilanjutkan menggunakan uji lanjut Tukey HSD untuk mengidentifikasi pasangan metode yang memiliki perbedaan signifikan.

### 3.6.1 One-Way ANOVA

Hasil pengujian One-Way ANOVA berdasarkan metrik UIQM dan UCIQE disajikan pada Tabel 12 dan Tabel 13.

**Tabel 12.** Hasil One-Way ANOVA nilai UIQM pada enam metode

| Metrik | F-Statistic | p-value                 | Keputusan   |
|--------|-------------|-------------------------|-------------|
| UIQM   | 8,1227      | $1,4275 \times 10^{-7}$ | Tolak $H_0$ |

Berdasarkan Tabel 12, diperoleh nilai F-Statistic sebesar 8,1227 dengan p-value sebesar  $1,4275 \times 10^{-7}$ . Karena nilai p-value lebih kecil daripada tingkat signifikansi  $\alpha = 0,05$ , maka hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak. Hasil ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan rata-rata nilai UIQM yang signifikan di antara enam metode image *enhancement*, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, WB\_CLAHE, dan CLAHE\_WB. Dengan demikian, sedikitnya terdapat satu metode yang memberikan performa yang berbeda secara signifikan berdasarkan metrik UIQM.

**Tabel 13.** Hasil One-Way ANOVA nilai UCIQE pada enam metode

| Metrik | F-Statistic | p-value                  | Keputusan   |
|--------|-------------|--------------------------|-------------|
| UCIQE  | 20,0436     | $2,2539 \times 10^{-19}$ | Tolak $H_0$ |

Berdasarkan Tabel 13, diperoleh nilai F-Statistic sebesar 20,0436 dengan p-value sebesar  $2,2539 \times 10^{-19}$ . Nilai p-value yang lebih kecil dari  $\alpha = 0,05$  menunjukkan bahwa hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak. Hasil ini menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada nilai UCIQE di antara enam metode image *enhancement*. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan menggunakan uji lanjut Tukey HSD untuk mengidentifikasi pasangan metode yang memiliki perbedaan signifikan.

### 3.6.2 Tukey HSD

Hasil pengujian Tukey HSD berdasarkan metrik UIQM dan UCIQE disajikan pada Tabel 14 dan Tabel 15.

**Tabel 14.** Hasil Tukey HSD berdasarkan metrik UIQM

| Perbandingan     | Mean Difference | p-value | Keputusan          |
|------------------|-----------------|---------|--------------------|
| CLAHE – Gamma    | -0,0634         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| CLAHE – Raw      | -0,0584         | 0,0019  | Berbeda signifikan |
| CLAHE WB – Gamma | -0,0660         | 0,0020  | Berbeda signifikan |
| CLAHE WB – Raw   | -0,0610         | 0,0010  | Berbeda signifikan |
| Gamma – WB CLAHE | 0,0623          | 0,0007  | Berbeda signifikan |
| Raw – WB CLAHE   | 0,0573          | 0,0026  | Berbeda signifikan |

Berdasarkan Tabel 14, terdapat enam pasangan metode yang menunjukkan perbedaan signifikan berdasarkan metrik UIQM (p-value < 0,05). Perbedaan tersebut terutama melibatkan metode CLAHE, CLAHE\_WB, dan WB\_CLAHE terhadap metode Gamma Correction maupun Raw. Sebaliknya, beberapa pasangan seperti CLAHE–White Balance, CLAHE\_WB–White Balance, dan Raw–White Balance tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas visual berdasarkan



metrik UIQM lebih dipengaruhi oleh kombinasi metode *enhancement* dibandingkan penggunaan metode tunggal.

Tabel 15. Hasil Tukey HSD berdasarkan metrik UCIQE

| Perbandingan          | Mean Difference | p-value | Keputusan          |
|-----------------------|-----------------|---------|--------------------|
| CLAHE – CLAHE_WB      | -0,7682         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| CLAHE – Gamma         | -0,8635         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| CLAHE – WB CLAHE      | -0,8963         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| CLAHE – White Balance | -0,7991         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| CLAHE_WB – Raw        | 0,8063          | <0,001  | Berbeda signifikan |
| Gamma – Raw           | 0,9015          | <0,001  | Berbeda signifikan |
| Raw – WB CLAHE        | -0,9344         | <0,001  | Berbeda signifikan |
| Raw – White Balance   | -0,8372         | <0,001  | Berbeda signifikan |

Berdasarkan Tabel 15, terdapat delapan pasangan metode yang memiliki perbedaan signifikan berdasarkan metrik UCIQE. Sebagian besar perbedaan melibatkan metode CLAHE, Raw, CLAHE\_WB, dan WB CLAHE, sedangkan beberapa pasangan seperti CLAHE\_WB–Gamma, CLAHE\_WB–White Balance, Gamma–White Balance, dan WB CLAHE–White Balance tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa setiap metode memiliki kemampuan yang berbeda dalam meningkatkan kualitas warna citra bawah air berdasarkan metrik UCIQE.

Secara keseluruhan, hasil One-Way ANOVA dan Tukey HSD menunjukkan bahwa terdapat perbedaan performa yang signifikan di antara metode *image enhancement* yang digunakan. Hasil ini konsisten dengan pembahasan pada subbab sebelumnya, yang menunjukkan bahwa setiap metode memiliki keunggulan pada karakteristik citra tertentu. Oleh karena itu, efektivitas metode *image enhancement* tidak hanya dipengaruhi oleh algoritma yang digunakan, tetapi juga oleh karakteristik citra bawah air yang dievaluasi, seperti tingkat kecerahan, kontras, dan *color cast*.

### 3.7 Pembahasan Umum

Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik awal citra bawah air, yaitu *brightness*, *contrast*, dan *color cast*, mempengaruhi efektivitas metode *image enhancement*. Berdasarkan metrik UIQM, metode CLAHE\_WB memberikan performa yang paling konsisten dalam meningkatkan kualitas visual citra melalui peningkatan kontras dan detail objek. Sementara itu, berdasarkan metrik UCIQE, performa setiap metode bergantung pada karakteristik citra, sehingga tidak terdapat satu metode yang selalu memberikan hasil terbaik pada seluruh kondisi.

Hasil uji One-Way ANOVA dan Tukey HSD menunjukkan bahwa perbedaan performa antar metode *image enhancement* signifikan secara statistik ( $p\text{-value} < 0,05$ ). Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan metode *image enhancement* sebaiknya disesuaikan dengan karakteristik awal citra dan tujuan peningkatan kualitas yang diinginkan. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan dalam pemilihan metode *underwater image enhancement* yang lebih tepat untuk berbagai aplikasi pengolahan citra bawah air.

## 4. CONCLUSION

Penelitian ini menganalisis pengaruh karakteristik citra bawah air terhadap performa enam metode *underwater image enhancement*, yaitu Raw, White Balance, CLAHE, Gamma Correction, WB CLAHE, dan CLAHE\_WB, menggunakan metrik evaluasi UIQM dan UCIQE pada 243 citra dari dataset UIEB-Challenging dan OceanSet. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik awal citra, meliputi *brightness*, *contrast*, dan *color cast*, memengaruhi efektivitas metode *image enhancement*. Berdasarkan metrik UIQM, metode CLAHE\_WB memberikan performa yang paling konsisten dalam meningkatkan kualitas visual citra, sedangkan berdasarkan

metrik UCIQE tidak terdapat satu metode yang selalu memberikan hasil terbaik pada seluruh karakteristik citra. Hasil uji One-Way ANOVA dan Tukey HSD juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan performa yang signifikan antar metode *image enhancement* ( $p\text{-value} < 0,05$ ), sehingga efektivitas metode dipengaruhi oleh karakteristik citra yang dianalisis.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menunjukkan bahwa karakteristik visual citra bawah air perlu dipertimbangkan dalam pemilihan metode *image enhancement*. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya hanya membandingkan performa metode secara umum, penelitian ini mengintegrasikan analisis karakteristik citra, evaluasi menggunakan dua metrik objektif, serta pengujian statistik untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara karakteristik citra dan performa metode *enhancement*. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan menggunakan dataset dengan kondisi lingkungan yang lebih beragam serta membandingkan metode konvensional dengan metode berbasis deep learning untuk mengembangkan sistem rekomendasi metode *enhancement* yang adaptif terhadap karakteristik citra bawah air.

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] C. Y. Li and A. Cavallaro, “ON THE LIMITS OF PERCEPTUAL QUALITY MEASURES FOR ENHANCED UNDERWATER IMAGES,” *IEEE Trans. Multimed.*, vol. 24, 2022.
- [3] Y. L. Lai and T. F. Ang, “Color correction methods for underwater image *enhancement* : A systematic literature review,” *PLoS One*, vol. 20, no. March, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0317306.
- [4] D. Berman, T. Treibitz, and S. Avidan, “Diving into haze-lines: Color restoration of underwater images,” *Br. Mach. Vis. Conf. 2017, BMVC 2017*, pp. 1–12, 2017.
- [5] M. Moiz Ashrafi, A. Verma, and A. Badholia, “A Review on Underwater Image *Enhancement*,” *Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol.*, pp. 27–34, 2020, doi: 10.32628/ijrsrset207313.
- [6] C. Li, S. Anwar, and F. Porikli, “Underwater scene prior inspired deep underwater image and video *enhancement*,” *Pattern Recognit.*, vol. 98, p. 107038, 2020, doi: 10.1016/j.patcog.2019.107038.
- [7] Z. Wang, D. Zhou, Z. Li, Z. Yuan, and C. Yang, “Underwater Image *Enhancement* via Adaptive Color Correction and Stationary Wavelet Detail *Enhancement*,” *IEEE Access*, vol. 12, no. January, pp. 11066–11082, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3354169.
- [8] 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.
- [9] M. Kazem and M. Farahnaz, “Real - time underwater image *enhancement* : a systematic review,” *J. Real-Time Image Process.*, vol. 18, no. 5, pp. 1509–1525, 2021, doi: 10.1007/s11554-020-01052-0.
- [10] S. Cahyani, Z. R. Mair, and I. P. Putri, “Evaluasi Metode Preprocessing Sederhana , Retinex , dan Guided Filtering untuk Peningkatan Kualitas Citra Bawah Air,” vol. 24, no. 3, pp. 931–943, 2025.
- [11] S. Cahyani, I. P. Putri, and Z. R. Mair, “PERBANDINGAN TEKNIK PREPROCESSING SEDERHANA PADA CITRA BAWAH AIR OCEAN SET BERDASARKAN KEDALAMAN,” *Inform. Teknol. dan Sains*, vol. 7, no. 4, pp. 2214–2222, 2025.
- [12] 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.
- [13] M. Yang and A. Sowmya, “An Underwater Color Image Quality Evaluation Metric,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 24, no. 12, pp. 6062–6071, 2015, doi: 10.1109/TIP.2015.2491020.
- [14] J. Juarros-basterretxea, “Post-Hoc Tests in One-Way ANOVA : The Case for Normal Distribution,” *Methodology*, vol. 20, no. 2, pp. 84–99, 2024.
- [15] P. A. Castillo, P. Garc, J. L. J. Laredo, and P. Garcia, “Determining the significance and relative importance of parameters of a simulated quenching algorithm using statistical tools,” *arXiv*, 2024.
- [16] R. C. Gonzales and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd editio., vol. 9. Prentice Hall, 2008.
- [17] C. Yahui, L. Yit, L. Yongfeng, L. Hongyue, and L. Lan, “Underwater Image *Enhancement* via Higher-Order Moment CLAHE Model and V Channel Substitute,” vol. 15, no. 3, pp. 199–208, 2024.
- [18] C. Li, S. Tang, J. Yan, and T. Zhou, “Low-Light Image *Enhancement* Based on Quasi-Symmetric Correction Functions by Fusion,” pp. 1–18, 2020.
- [19] K. Panetta, 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.
- [20] H. Kim, “Statistical notes for clinical researchers : post-hoc multiple comparisons,” vol. 7658, pp. 172–176, 2015.