

Implementasi *Gamma Correction* untuk Peningkatan Kualitas Citra *Low-Light Real-Time* pada Kamera Mobile

Teguh Ahmad Prayogo*, Tito Pinandita, Elindra Ambar Pambudi, Maulida Ayu Fitriani

Fakultas Teknik dan Sains, Program Studi Teknik Informatika, Universitas Muhammadiyah Purwokerto, Purwokerto, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 19 Juni 2026
Revisi Akhir: 07 Juli 2026
Diterbitkan Online: 20 Juli 2026

KATA KUNCI

Gamma Correction
Low-Light
Real-Time
Image Enhancement
Lux

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 812-2245-4485
E-mail: teguhahmadprayogo@gmail.com

A B S T R A K

Kualitas citra pada kamera mobile sering mengalami penurunan pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*) sehingga citra terlihat gelap dan detail objek menjadi kurang jelas. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra menggunakan metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation*. Sistem diimplementasikan menggunakan Unity dengan memanfaatkan *WebCamTexture* untuk memproses citra secara *real-time*. Pengujian dilakukan pada tiga kondisi pencahayaan, yaitu 5 lux, 10, dan 20 lux. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai *brightness* sebelum dan sesudah proses *enhancement* menggunakan perhitungan luminansi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai *brightness* mengalami peningkatan pada seluruh kondisi pencahayaan. Pada intensitas cahaya 5 lux, nilai *brightness* meningkat dari 0,031 menjadi 0,044, Pada intensitas cahaya 10 lux dari 0,102 menjadi 0,276, dan pada intensitas cahaya 20 lux dari 0,385 menjadi 0,580. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas citra, terutama pada kondisi *low-light*. Sistem juga mampu berjalan secara *real-time* dengan penerapan teknik *frame skipping* sehingga performa aplikasi tetap stabil tanpa lag yang signifikan.

PENDAHULUAN

Kualitas citra pada perangkat kamera mobile menjadi salah satu aspek penting dalam berbagai kebutuhan, seperti dokumentasi, komunikasi visual, pengenalan objek, serta pengolahan citra digital. Perkembangan teknologi kamera pada perangkat mobile telah mengalami peningkatan yang signifikan, namun masih terdapat keterbatasan dalam kondisi pencahayaan rendah (*low-light*). Kondisi ini sering menyebabkan penurunan kualitas citra yang dihasilkan, ditandai dengan rendahnya tingkat kecerahan, hilangnya detail objek, serta munculnya noise yang mengganggu kualitas visual. Permasalahan tersebut menjadi tantangan utama dalam menghasilkan citra yang informatif dan layak digunakan pada berbagai aplikasi berbasis citra. Keterbatasan sensor kamera pada perangkat mobile menjadi salah satu faktor utama yang mempengaruhi kualitas citra pada kondisi *low-light*. Sensor kamera memiliki kemampuan terbatas dalam menangkap cahaya, sehingga pada kondisi intensitas cahaya rendah, citra yang dihasilkan cenderung gelap dan kurang detail [1]. Upaya peningkatan kualitas citra pada kondisi tersebut menjadi penting untuk meningkatkan performa sistem kamera mobile. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pengolahan citra digital melalui metode peningkatan kualitas citra (*image enhancement*) [2]. Proses peningkatan kualitas citra bertujuan memperbaiki aspek visual seperti tingkat kecerahan (*brightness*), kontras (*contrast*), dan kejenuhan warna (*saturation*) sehingga informasi yang terkandung dalam citra dapat ditampilkan dengan lebih jelas dan mudah diamati [3], [4], [5].

Berbagai penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan citra *low-light*. Penelitian oleh [6] menggunakan metode *Histogram Equalization* untuk meningkatkan distribusi intensitas cahaya, namun metode ini cenderung menghasilkan peningkatan noise pada area tertentu. Penelitian oleh [7] mengembangkan metode *Adaptive Gamma Correction* yang mampu meningkatkan kontras citra, tetapi memiliki kompleksitas komputasi yang cukup tinggi.

Penelitian oleh [8] menerapkan metode *Retinex* untuk memperbaiki pencahayaan citra dengan hasil yang cukup baik, namun metode ini kurang efisien untuk implementasi *real-time*. Penelitian oleh [9] menggunakan pendekatan berbasis Deep Learning untuk meningkatkan kualitas citra *low-light*, tetapi memerlukan sumber daya komputasi yang besar sehingga kurang sesuai untuk perangkat mobile. Penelitian oleh [10] mengkombinasikan Gamma Correction dengan teknik filtering sederhana, namun belum mempertimbangkan aspek performa sistem secara optimal pada sistem *real-time*. Hasil kajian penelitian sebelumnya menunjukkan adanya kesenjangan antara kualitas hasil peningkatan citra dan performa sistem yang dihasilkan. Metode dengan kualitas peningkatan citra yang tinggi umumnya memiliki kompleksitas komputasi besar sehingga kurang efisien pada perangkat mobile. Sebaliknya, metode dengan komputasi ringan memiliki performa lebih baik namun hasil peningkatan citra masih kurang optimal. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pendekatan yang mampu menyeimbangkan kualitas visual citra dan performa sistem secara *real-time*.

Penelitian ini mengusulkan penerapan metode Gamma Correction yang dikombinasikan dengan penyesuaian brightness, contrast, dan *saturation* untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi *low-light*. Pendekatan ini dipilih karena memiliki kompleksitas yang relatif rendah, sehingga memungkinkan implementasi secara *real-time* pada perangkat mobile. Sistem dikembangkan menggunakan Unity dengan memanfaatkan WebCamTexture sebagai sumber input kamera. Penggunaan WebCamTexture memungkinkan citra dari kamera ditampilkan secara *real-time* pada lingkungan virtual maupun aplikasi berbasis Unity [11].

Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi pencahayaan yang diukur menggunakan *lux meter*, yaitu alat yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya dalam satuan lux, sehingga memastikan variasi intensitas cahaya yang terkontrol [12]. Pengujian dilakukan dengan objek dan posisi kamera yang sama untuk menjaga konsistensi data. Evaluasi dilakukan menggunakan nilai brightness sebagai representasi luminansi citra digital sebelum dan sesudah proses peningkatan citra. Performa sistem juga dianalisis berdasarkan kelancaran tampilan (*frame rate*) untuk memastikan sistem dapat berjalan secara stabil tanpa lag yang signifikan [13]. Luminansi merupakan representasi tingkat kecerahan citra yang dihitung dari kombinasi komponen warna merah, hijau, dan biru [14].

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan sistem peningkatan kualitas citra *low-light* yang mampu bekerja secara *real-time* dengan performa yang stabil serta menghasilkan citra dengan kualitas visual yang lebih baik. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi kamera mobile, khususnya dalam meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah. Hasil penelitian juga diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan metode pengolahan citra yang lebih efisien dan adaptif terhadap keterbatasan perangkat mobile.

TINJAUAN PUSTAKA

Gamma Correction

Gamma Correction merupakan metode image enhancement yang digunakan untuk memperbaiki tingkat luminansi citra melalui transformasi non-linear terhadap nilai intensitas piksel. Metode ini mampu meningkatkan kecerahan citra tanpa menghilangkan detail objek secara signifikan sehingga banyak digunakan pada pengolahan citra kondisi *low-light* [1], [2], [15].

Brightness, Contrast, dan Saturation

Brightness menunjukkan tingkat kecerahan citra, *contrast* menunjukkan perbedaan intensitas antara area terang dan gelap, sedangkan *saturation* menunjukkan tingkat kejenuhan warna pada citra [3], [4], [5]. Ketiga parameter tersebut dapat digunakan bersama Gamma Correction untuk menghasilkan kualitas visual yang lebih baik dan tetap terlihat natural.

Real-Time Image Processing dan Frame Skipping

Pemrosesan citra secara *real-time* merupakan proses pengambilan, pengolahan, dan penampilan citra yang dilakukan secara langsung dengan waktu tunda (*latency*) yang rendah sehingga hasil pemrosesan dapat ditampilkan tanpa mengganggu pengalaman pengguna. Pada perangkat mobile, implementasi sistem *real-time* menghadapi keterbatasan sumber daya komputasi, seperti kapasitas CPU, GPU, memori, serta konsumsi daya. Oleh karena itu, algoritma yang digunakan harus memiliki kompleksitas komputasi yang rendah agar mampu mempertahankan performa aplikasi selama proses pengolahan citra berlangsung [16], [17].

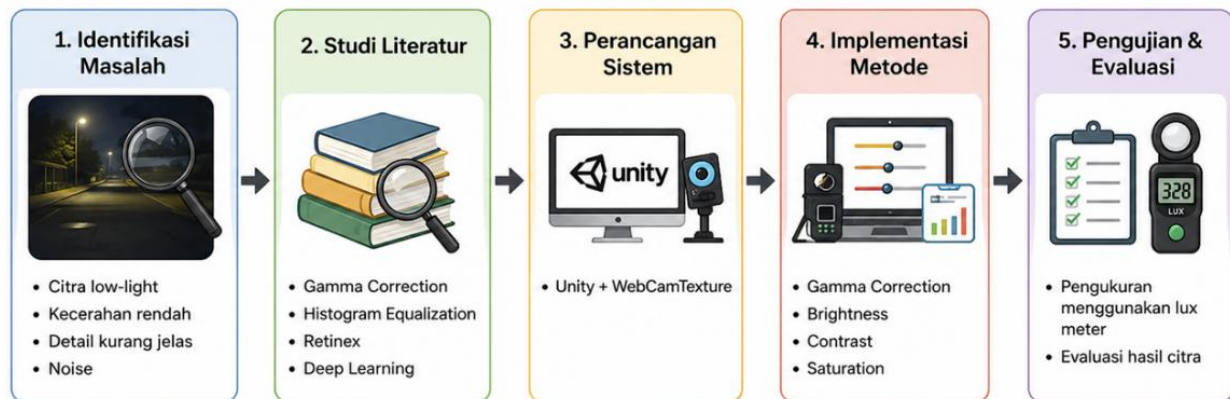
Salah satu teknik optimasi yang umum digunakan pada sistem *real-time* adalah *Frame Skipping*, yaitu teknik yang mengurangi beban komputasi dengan tidak memproses seluruh frame yang ditangkap kamera. Beberapa *frame* dilewati sehingga proses *enhancement* hanya dilakukan pada interval tertentu tanpa memberikan penurunan kualitas visual yang signifikan. Pendekatan ini mampu menjaga

kestabilan Frame Per Second (FPS) sekaligus mempertahankan responsivitas aplikasi pada perangkat dengan kemampuan komputasi yang terbatas [17], [18]. Dalam penelitian ini, teknik *Frame Skipping* diterapkan setiap 15 *frame* untuk menjaga keseimbangan antara kualitas hasil peningkatan citra dan performa sistem selama proses *enhancement* berlangsung secara *real-time*.

METODOLOGI

Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan yang sistematis untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*). Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, implementasi metode, serta pengujian dan evaluasi. Setiap tahapan dilakukan secara berurutan untuk memastikan hasil penelitian sesuai dengan tujuan yang diharapkan.



Gambar 1. Tahap Penelitian

Gambar 1 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan secara sistematis, dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, implementasi metode, hingga tahap pengujian dan evaluasi. Setiap tahapan saling berkaitan untuk memastikan sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah secara *real-time*.

Identifikasi Masalah

Tahap identifikasi masalah dilakukan untuk memahami permasalahan utama dalam penelitian. Permasalahan yang diangkat adalah rendahnya kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*) pada kamera mobile. Citra yang dihasilkan cenderung memiliki tingkat kecerahan yang rendah, detail yang kurang jelas, serta munculnya *noise*. Analisis dilakukan dengan mengamati hasil citra secara langsung menggunakan kamera perangkat mobile. Hasil observasi menunjukkan bahwa kondisi pencahayaan rendah sangat mempengaruhi kualitas citra yang dihasilkan, sehingga diperlukan metode peningkatan citra yang mampu bekerja secara *real-time*.

Studi Literatur

Tahap studi literatur dilakukan untuk memperoleh referensi terkait metode peningkatan kualitas citra. Beberapa metode yang dikaji meliputi *Histogram Equalization*, *Retinex*, *Deep Learning*, dan *Gamma Correction*. Metode *Histogram Equalization* mampu meningkatkan distribusi intensitas cahaya, namun menghasilkan peningkatan *noise* [6]. Metode *Retinex* mampu memperbaiki pencahayaan citra, tetapi memiliki kompleksitas tinggi. Pendekatan *Deep Learning* memberikan hasil yang baik, namun membutuhkan sumber daya komputasi besar. Metode *Gamma Correction* dipilih karena memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah dan mampu meningkatkan luminansi citra secara efektif, sehingga cocok untuk implementasi *real-time* pada perangkat mobile [1]. Metode ini juga lebih ringan dibandingkan pendekatan berbasis *Deep Learning* dan *Retinex* yang membutuhkan proses komputasi lebih besar.

Perancangan Sistem

Tahap perancangan sistem dilakukan untuk menentukan arsitektur sistem yang akan digunakan. Sistem dikembangkan menggunakan Unity dengan memanfaatkan *WebCamTexture* sebagai sumber input kamera. Pengembangan dan pengujian sistem dilakukan menggunakan perangkat mobile iPhone XR dengan kamera utama 12 MP dan sistem operasi iOS.

Implementasi aplikasi dilakukan menggunakan Unity sebagai platform pengembangan sistem *real-time*. Sistem dirancang untuk melakukan pemrosesan citra secara *real-time*, sehingga setiap frame yang ditangkap kamera langsung diproses tanpa perlu proses penyimpanan terlebih dahulu. Pada tahap ini juga ditentukan parameter yang digunakan dalam peningkatan citra, yaitu *Brightness*, *Contrast*, *Saturation*. Perancangan sistem bertujuan untuk menghasilkan aplikasi yang mampu meningkatkan kualitas citra secara langsung dengan performa yang stabil.

Implementasi Metode

Tahap implementasi dilakukan dengan menerapkan metode *Gamma Correction* pada citra yang diperoleh dari kamera. Metode ini bekerja dengan melakukan transformasi non-linear terhadap nilai piksel untuk meningkatkan kecerahan citra. Persamaan *Gamma Correction* ditunjukkan pada Persamaan (1):

$$I' = I^\gamma \quad (1)$$

Keterangan:

I = nilai intensitas piksel awal (input image)

I' = nilai intensitas piksel setelah koreksi (output image)

γ = nilai gamma yang digunakan untuk mengatur tingkat kecerahan

Persamaan ini bekerja dengan melakukan transformasi non-linear terhadap nilai intensitas piksel. Nilai gamma (γ) berperan penting dalam menentukan hasil perubahan citra. Jika nilai $\gamma < 1$ gamma maka citra akan menjadi lebih terang karena nilai intensitas piksel diperbesar. Sebaliknya, jika $\gamma > 1$ gamma maka citra akan menjadi lebih gelap karena nilai intensitas piksel diperkecil [10].

Dalam penelitian ini, metode Gamma Correction digunakan untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*). Nilai gamma yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0.75. Nilai tersebut dipilih karena mampu meningkatkan luminansi citra secara optimal tanpa menyebabkan peningkatan brightness yang berlebihan. Penggunaan nilai gamma yang terlalu kecil dapat menyebabkan overexposure, sedangkan nilai gamma yang terlalu besar menghasilkan peningkatan kecerahan yang kurang optimal [15]. Proses ini dilakukan secara *real-time* pada setiap frame citra yang diperoleh dari kamera. Dilakukan juga penyesuaian parameter tambahan untuk meningkatkan kualitas citra, yaitu *brightness*, *contrast*, dan *saturation*. Untuk menjaga performa sistem tetap stabil, digunakan teknik frame skipping, yaitu tidak semua frame diproses, sehingga beban komputasi dapat dikurangi tanpa mengurangi kualitas visual secara signifikan [16]. Teknik frame skipping dilakukan dengan melewati beberapa frame tertentu sehingga proses pengolahan citra tidak dilakukan pada seluruh frame kamera secara terus-menerus. Pendekatan ini membantu menjaga performa aplikasi tetap stabil selama proses *real-time* berlangsung. Dalam implementasi sistem, proses frame skipping dilakukan setiap 15 frame untuk mengurangi beban komputasi selama proses *real-time* berlangsung.

Brightness

Brightness digunakan untuk meningkatkan atau mengurangi tingkat kecerahan citra secara keseluruhan. Persamaan brightness ditunjukkan pada Persamaan (2):

$$I_b = I + \beta \quad (2)$$

Keterangan:

I_b = nilai piksel setelah penyesuaian brightness

I = nilai piksel awal

β = nilai penambahan brightness

Contrast

Contrast digunakan untuk memperjelas perbedaan antara area terang dan gelap pada citra. Persamaan contrast ditunjukkan pada Persamaan (3):

$$I_c = \alpha(I - 128) + 128 \quad (3)$$

Keterangan:

I_c = nilai piksel setelah penyesuaian contrast

I = nilai piksel awal

α = faktor contrast

Jika $\alpha > 1$, kontras meningkat sehingga detail objek lebih terlihat jelas. Jika $0 < \alpha < 1$, kontras menurun.

Saturation

Saturation digunakan untuk mengatur tingkat kejenuhan warna pada citra. Persamaan saturation ditunjukkan pada Persamaan (4):

$$S^I = S \times k \quad (4)$$

Keterangan:

S^I = nilai saturation setelah penyesuaian

S = nilai saturation awal

k = faktor pengali saturation

Jika $k > 1$, warna menjadi lebih kuat atau lebih jenuh. Jika $k < 1$, warna menjadi lebih pudar.

Pada penelitian ini digunakan nilai gamma sebesar 0,75, contrast sebesar 1,15, dan saturation sebesar 0,90. Kombinasi parameter tersebut diterapkan pada setiap frame citra yang diperoleh dari kamera untuk meningkatkan luminansi, memperjelas detail objek, serta menjaga warna citra tetap terlihat natural pada kondisi pencahayaan rendah.

Pengujian dan Evaluasi

Tahap pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem dalam meningkatkan kualitas citra pada berbagai kondisi pencahayaan. Pengujian dilakukan dengan mengatur kondisi pencahayaan secara langsung di lingkungan pengambilan gambar serta mengukur intensitas cahaya menggunakan *lux meter* agar hasil yang diperoleh lebih akurat dan terkontrol [12]. Pengujian dilakukan dengan skenario kondisi pencahayaan yang diatur melalui kombinasi kondisi jendela dan lampu sebagai sumber cahaya. Skenario pengujian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Skenario pengujian

No	Intensitas Cahaya	Waktu Pengujian	Kondisi Lingkungan
1	5 lux	Malam Hari	Lampu ruangan dimatikan dan minim cahaya lingkungan
2	10 lux	Malam Hari	Terdapat sedikit cahaya dari lingkungan sekitar
3	20 lux	Sore Hari	Menggunakan pencahayaan redup dari cahaya luar ruangan

Tabel 1 menunjukkan skenario pengujian yang digunakan untuk merepresentasikan variasi kondisi pencahayaan. Pengaturan dilakukan dengan kombinasi kondisi jendela dan lampu sebagai sumber cahaya.

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan nilai *brightness* sebelum (*before*) dan sesudah (*after*) proses peningkatan citra. Perhitungan *brightness* menggunakan persamaan luminansi sebagai berikut:

$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (5)$$

Keterangan:

L = nilai luminansi (*brightness*)

R = komponen warna merah (*red*)

G = komponen warna hijau (*green*)

B = komponen warna biru (*blue*)

Persamaan ini merupakan model perhitungan luminansi berdasarkan standar persepsi visual manusia. Setiap komponen warna memiliki kontribusi yang berbeda terhadap tingkat kecerahan citra. Komponen warna hijau (*green*) memiliki kontribusi terbesar sebesar 0.587 karena mata manusia paling sensitif terhadap warna tersebut. Komponen merah (*red*) memiliki kontribusi sebesar 0.299, sedangkan komponen biru (*blue*) memiliki kontribusi paling kecil yaitu 0.114.

Perhitungan ini digunakan untuk mengubah citra berwarna menjadi representasi tingkat kecerahan yang dapat dianalisis secara kuantitatif. Dalam penelitian ini, nilai luminansi digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi peningkatan kualitas citra sebelum dan sesudah proses *image enhancement*. *image enhancement* adalah proses peningkatan kualitas

citra untuk memperjelas detail dan meningkatkan visibilitas objek [17]. Nilai *brightness* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa citra menjadi lebih terang setelah dilakukan proses peningkatan kualitas. Selain evaluasi berdasarkan nilai *brightness*, dilakukan juga analisis visual terhadap hasil citra [18]. Analisis ini bertujuan untuk melihat peningkatan detail objek, pengurangan *noise*, serta keseimbangan warna setelah proses *image enhancement*. Evaluasi visual penting dilakukan untuk memastikan bahwa peningkatan nilai *brightness* tidak menyebabkan distorsi warna atau kehilangan detail pada citra [19].

Pengujian dilakukan pada tiga tingkat intensitas cahaya yang berbeda, yaitu 5 lux, 10 lux, dan 20 lux. Setiap kondisi diuji untuk mengetahui konsistensi performa metode yang digunakan. Hasil pengujian kemudian dibandingkan untuk melihat sejauh mana metode *Gamma Correction* mampu meningkatkan kualitas citra pada berbagai tingkat pencahayaan. Performa sistem juga dianalisis dari sisi kecepatan pemrosesan (*real-time performance*). Penggunaan teknik *frame skipping* bertujuan untuk mengurangi beban komputasi sehingga sistem tetap berjalan dengan lancar tanpa mengalami lag yang signifikan [20]. Pengujian performa dilakukan dengan mengamati kelancaran tampilan kamera saat sistem dijalankan.

Untuk mengevaluasi performa *real-time* sistem, dilakukan pengukuran Frame Per Second (FPS) selama proses *enhancement* berlangsung. FPS digunakan sebagai indikator jumlah frame yang dapat diproses dan ditampilkan setiap detik oleh aplikasi. Nilai FPS diperoleh secara langsung dari aplikasi Unity yang menampilkan FPS secara *real-time* selama proses pengujian. Pengukuran dilakukan pada setiap kondisi pencahayaan, yaitu 5 lux, 10 lux, dan 20 lux.

Hasil evaluasi dari seluruh pengujian digunakan untuk menentukan efektivitas metode yang diusulkan dalam meningkatkan kualitas citra. Metode dianggap berhasil apabila mampu meningkatkan nilai *brightness*, memperbaiki kualitas visual citra, serta tetap menjaga performa sistem secara stabil dalam kondisi *real-time*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil penelitian berdasarkan tahapan metodologi yang telah dilakukan, mulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, implementasi metode, hingga pengujian dan evaluasi sistem. Penelitian difokuskan pada penerapan metode *Gamma Correction* untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*) secara *real-time* pada kamera mobile. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu meningkatkan tingkat kecerahan citra dan memperjelas detail objek pada berbagai kondisi pencahayaan.

Hasil Identifikasi Masalah

Hasil identifikasi masalah menunjukkan bahwa kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah mengalami penurunan yang cukup signifikan. Citra yang dihasilkan kamera mobile terlihat gelap sehingga objek dan detail di dalam ruangan sulit diamati dengan jelas. Kondisi tersebut menyebabkan beberapa bagian objek kehilangan detail, terutama pada area yang minim cahaya. *Noise* juga muncul pada beberapa bagian citra sehingga kualitas visual menjadi kurang baik.

Pengamatan dilakukan secara langsung menggunakan kamera perangkat mobile pada beberapa kondisi pencahayaan yang berbeda. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin rendah intensitas cahaya, maka citra yang dihasilkan menjadi semakin gelap dan detail objek semakin sulit dikenali. Tingkat kontras pada citra juga terlihat rendah sehingga perbedaan antara area terang dan gelap kurang jelas. Keterbatasan sensor kamera mobile dalam menangkap cahaya menjadi salah satu penyebab utama permasalahan tersebut.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa diperlukan metode peningkatan kualitas citra yang mampu meningkatkan tingkat kecerahan dan memperjelas detail objek tanpa menyebabkan perubahan warna yang berlebihan. Metode yang digunakan juga harus mampu bekerja secara *real-time* agar dapat diterapkan secara langsung pada kamera mobile tanpa menurunkan performa sistem.

Hasil Studi Literatur

Hasil studi literatur menunjukkan bahwa terdapat berbagai metode yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi *low-light*. Metode *Histogram Equalization* mampu meningkatkan distribusi intensitas cahaya pada citra sehingga tingkat kecerahan menjadi lebih baik [6]. Metode tersebut memiliki kelemahan berupa peningkatan *noise* pada beberapa area citra sehingga kualitas visual terkadang terlihat kurang natural.

Metode *Retinex* mampu memperbaiki pencahayaan secara lokal dan menghasilkan detail objek yang lebih baik pada area gelap [8]. Kompleksitas komputasi metode tersebut cukup tinggi sehingga kurang optimal untuk implementasi *real-time* pada perangkat mobile. Pendekatan berbasis *Deep Learning* juga mampu menghasilkan kualitas citra yang baik, namun membutuhkan sumber daya komputasi yang besar serta proses pelatihan model yang cukup kompleks [9].

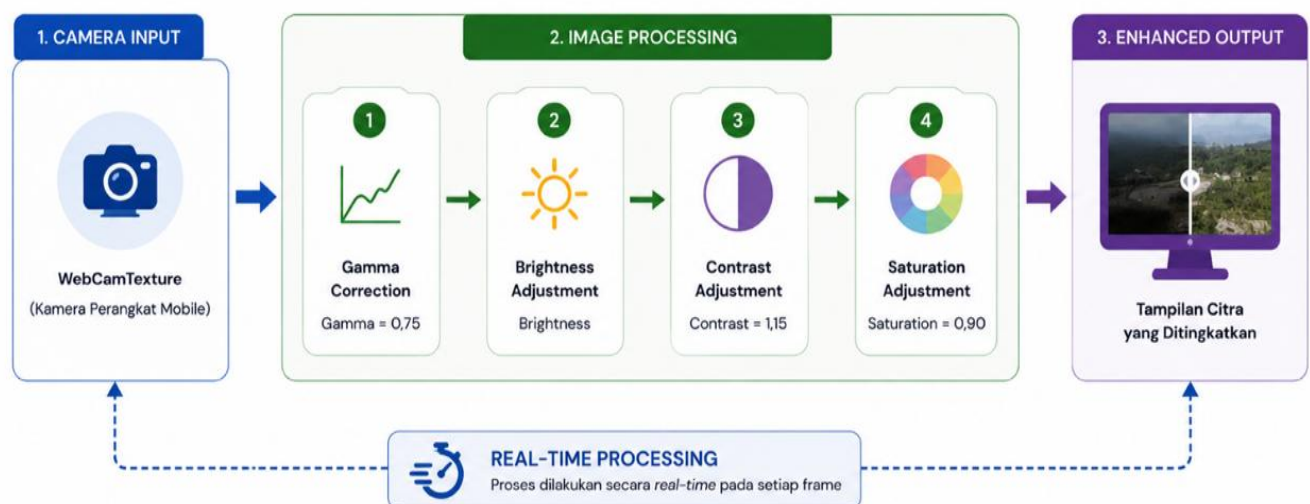
Berdasarkan hasil kajian tersebut, metode *Gamma Correction* dipilih karena memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah dan mudah diterapkan pada sistem *real-time*. Metode ini bekerja melalui transformasi non-linear terhadap nilai intensitas piksel sehingga mampu meningkatkan luminansi citra tanpa proses komputasi yang terlalu berat. Penggunaan metode ini juga dapat dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* untuk menghasilkan kualitas visual citra yang lebih baik dan tetap terlihat natural.

Hasil Perancangan Sistem

Hasil perancangan sistem menunjukkan bahwa sistem berhasil dirancang menggunakan Unity dengan memanfaatkan *WebCamTexture* sebagai sumber input kamera secara *real-time*. Sistem dirancang untuk melakukan proses pengolahan citra secara langsung pada setiap frame yang ditangkap kamera tanpa melalui proses penyimpanan terlebih dahulu. Pendekatan ini memungkinkan aplikasi mampu menampilkan hasil peningkatan kualitas citra secara cepat dan responsif sehingga sesuai untuk implementasi pada perangkat mobile. Sistem juga dirancang agar proses *enhancement* dapat berjalan secara stabil tanpa mengganggu performa aplikasi selama kamera digunakan.

Penggunaan Unity dipilih karena mampu mendukung proses *rendering* dan pengolahan citra secara *real-time* dengan performa yang cukup stabil pada perangkat mobile. *WebCamTexture* digunakan karena dapat mengambil input kamera secara langsung sehingga proses *enhancement* dapat dilakukan tanpa proses pengambilan gambar secara manual.

Perancangan sistem difokuskan pada proses peningkatan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah (*low-light*). Sistem menerima citra dari kamera perangkat mobile, kemudian melakukan proses pengolahan citra menggunakan metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation*. Kombinasi parameter tersebut digunakan untuk meningkatkan tingkat kecerahan citra, memperjelas detail objek, serta menjaga warna citra tetap terlihat natural setelah proses *enhancement* dilakukan.



Gambar 2. Arsitektur Sistem Aplikasi

Gambar 2 menunjukkan bahwa sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu *camera input*, *image processing*, dan *enhanced output*. Tahap *camera input* berfungsi untuk menangkap citra secara langsung menggunakan kamera perangkat mobile melalui *WebCamTexture*. Citra yang diperoleh kemudian dikirim ke tahap *image processing* untuk dilakukan proses peningkatan kualitas citra.

Tahap image processing pada sistem dilakukan secara *real-time* pada setiap frame citra yang diperoleh dari kamera. Proses dimulai dengan penerapan *Gamma Correction* untuk meningkatkan luminansi pada area gelap. Setelah proses *Gamma Correction* dilakukan, sistem kemudian melakukan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* secara berurutan. Penyesuaian *brightness* digunakan untuk meningkatkan tingkat kecerahan citra, *contrast* digunakan untuk memperjelas perbedaan area terang dan gelap, sedangkan *saturation* digunakan untuk menjaga warna citra tetap terlihat natural sebelum hasil akhir ditampilkan pada enhanced output.

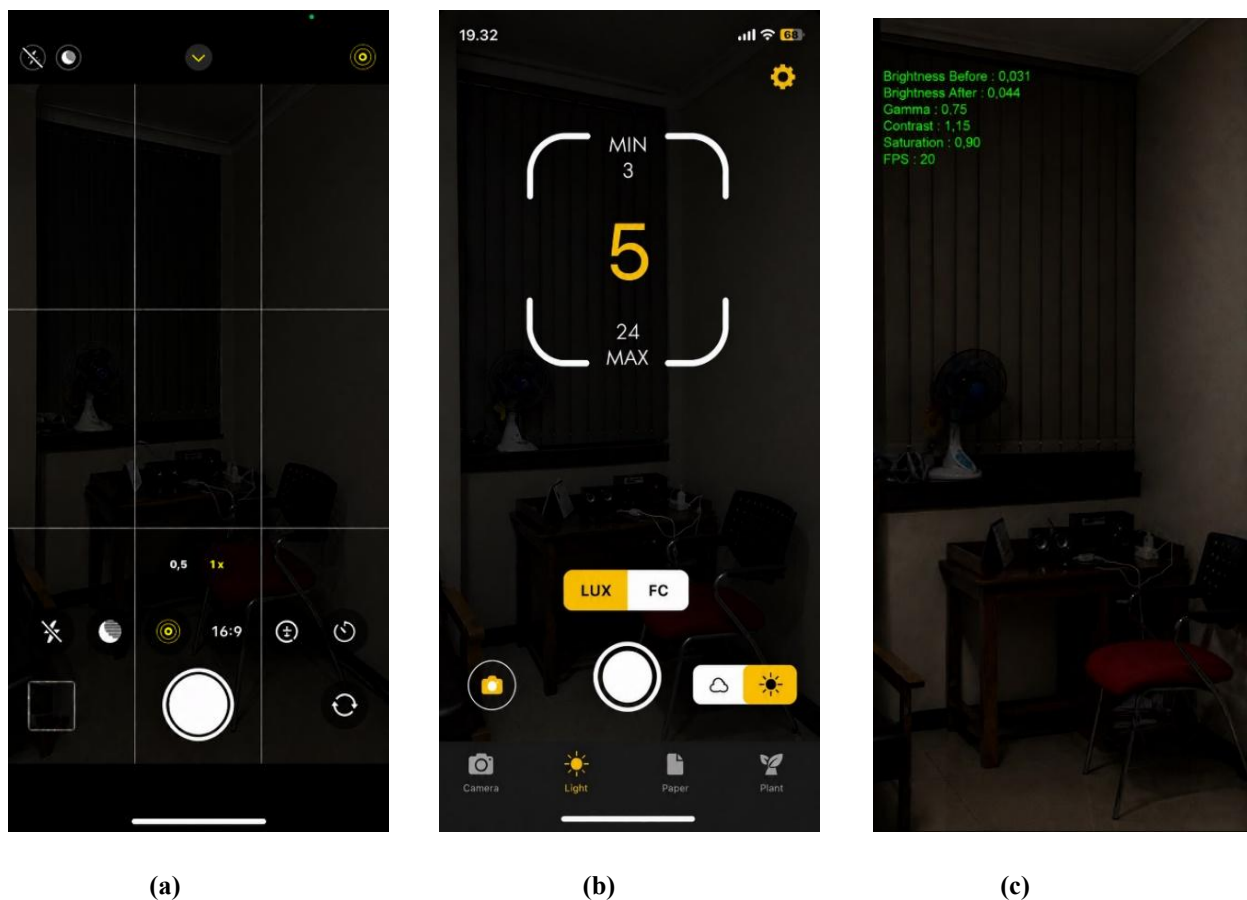
Hasil pengolahan citra kemudian ditampilkan pada tahap *enhanced output* berupa tampilan citra yang telah ditingkatkan kualitasnya. Citra hasil *enhancement* terlihat lebih terang, detail objek lebih mudah diamati, dan visibilitas area gelap menjadi lebih baik dibandingkan citra asli. Seluruh proses pada sistem dilakukan secara *real-time* sehingga pengguna dapat langsung melihat hasil peningkatan kualitas citra tanpa jeda yang signifikan.

Hasil Implementasi Metode

Hasil implementasi menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* berhasil diterapkan pada sistem kamera mobile berbasis Unity. Sistem mampu memproses citra secara *real-time* pada setiap frame yang ditangkap menggunakan *WebCamTexture*. Proses peningkatan kualitas citra dilakukan melalui transformasi nilai intensitas piksel menggunakan metode *Gamma Correction*, kemudian dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation*.

Transformasi *Gamma Correction* digunakan untuk meningkatkan luminansi pada area gelap sehingga detail objek yang sebelumnya sulit terlihat menjadi lebih jelas. Penyesuaian *brightness* digunakan untuk meningkatkan tingkat kecerahan citra secara keseluruhan sehingga tampilan citra menjadi lebih terang. Penyesuaian *contrast* berfungsi memperjelas perbedaan antara area terang dan gelap agar detail objek lebih mudah diamati. Penyesuaian *saturation* dilakukan untuk menjaga warna citra tetap terlihat natural setelah proses *enhancement* dilakukan.

Kondisi Pencahayaan 5 lux



Gambar 3. Tampilan Perbandingan pada Kondisi Pencahayaan 5 Lux
(a) Kamera Asli, (b) Pengukuran Lux, (c) Kamera Unity

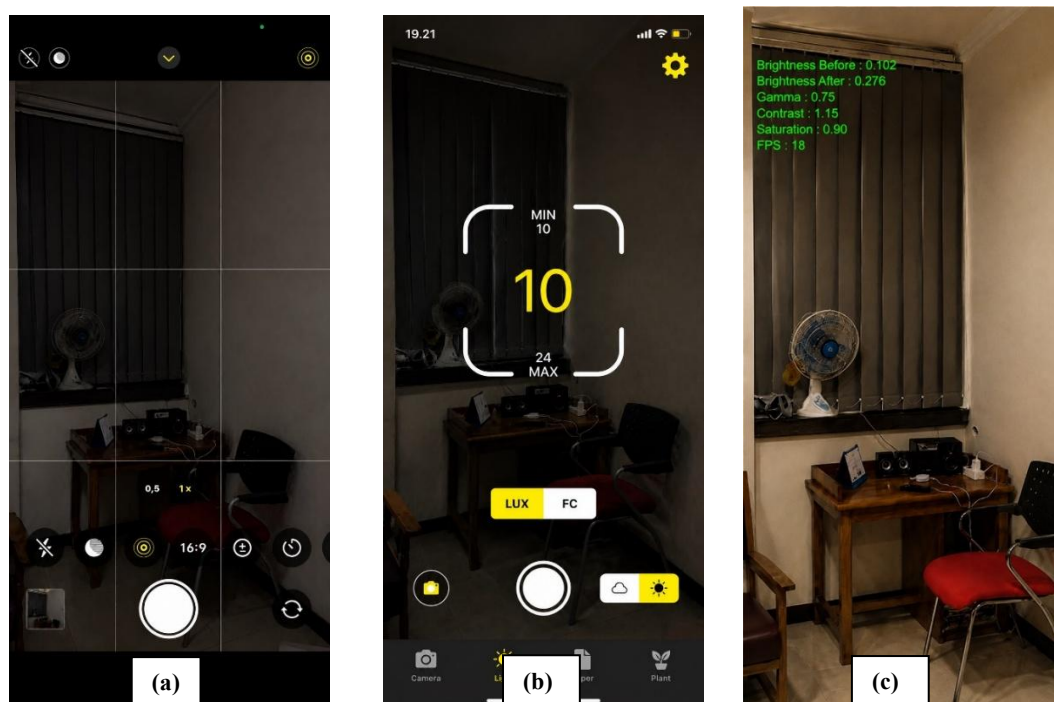
Gambar 3 menunjukkan hasil perbandingan citra pada kondisi pencahayaan dengan intensitas cahaya sekitar 5 lux. Kondisi ini menggambarkan lingkungan ruangan pada malam hari dengan sumber pencahayaan yang sangat minim sehingga cahaya yang diterima oleh sensor kamera menjadi sangat terbatas. Pada citra yang dihasilkan oleh kamera asli, tampilan objek di dalam ruangan terlihat sangat gelap dan sebagian besar detail objek sulit diamati dengan jelas. Area meja, kursi, kipas angin, dinding, serta sudut ruangan tampak memiliki tingkat visibilitas yang rendah karena kurangnya pencahayaan yang tersedia. Selain itu, detail tekstur pada objek juga tidak terlihat secara optimal sehingga citra yang dihasilkan memiliki kualitas visual yang rendah.

Hasil pengukuran menggunakan aplikasi *lux meter* menunjukkan bahwa intensitas cahaya pada ruangan berada pada nilai 5 lux. Nilai tersebut termasuk dalam kategori pencahayaan sangat rendah sehingga memengaruhi kemampuan kamera dalam menangkap informasi visual secara optimal. Pada kondisi ini, area gelap mendominasi sebagian besar citra dan hanya beberapa bagian objek yang masih dapat terlihat. Perbedaan antara area terang dan gelap juga belum terlihat dengan jelas sehingga tingkat kontras citra menjadi rendah. Akibatnya, objek yang berada di dalam ruangan sulit dibedakan satu sama lain dan informasi visual yang diperoleh dari citra menjadi terbatas.

Pengujian pada kondisi pencahayaan 5 lux menghasilkan nilai *brightness* awal sebesar 0,031. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat luminansi citra masih sangat rendah akibat minimnya intensitas cahaya yang diterima kamera. Setelah proses enhancement menggunakan metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation*, nilai *brightness* meningkat menjadi 0,044. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu meningkatkan luminansi citra meskipun berada pada kondisi pencahayaan yang sangat rendah. Namun, karena jumlah cahaya yang tersedia pada citra awal sangat sedikit, peningkatan *brightness* yang diperoleh tidak sebesar pada kondisi pencahayaan yang lebih tinggi.

Hasil citra setelah proses enhancement yang ditampilkan pada Kamera Unity menunjukkan adanya peningkatan kualitas visual dibandingkan citra asli. Beberapa objek yang sebelumnya sulit diamati mulai terlihat lebih jelas, terutama pada area meja, kursi, dan bagian dinding ruangan. Detail objek yang sebelumnya hampir menyatu dengan area gelap menjadi lebih mudah dikenali setelah proses pengolahan citra dilakukan. Selain meningkatkan tingkat kecerahan, proses enhancement juga membantu memperbaiki visibilitas objek tanpa menyebabkan perubahan warna yang berlebihan sehingga tampilan citra tetap terlihat natural.

Kondisi Pencahayaan 10 lux



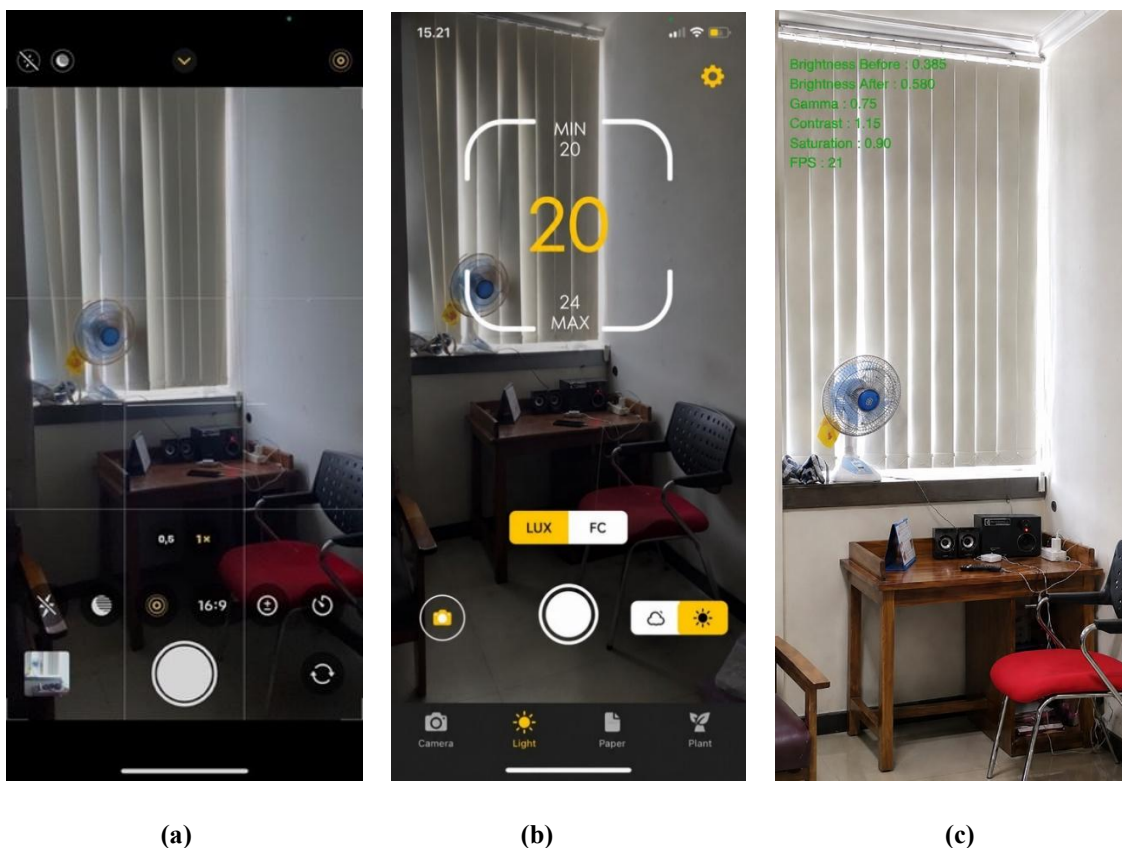
Gambar 4. Tampilan Perbandingan pada Kondisi 10 Lux
(a) Kamera Asli, (b) Pengukuran Lux, (c) Kamera Unity

Gambar 4 menunjukkan hasil perbandingan citra pada kondisi pencahayaan dengan intensitas cahaya sekitar 10 *lux*. Kondisi awal memperlihatkan bahwa citra yang dihasilkan kamera terlihat gelap sehingga beberapa objek di dalam ruangan masih sulit diamati dengan jelas. Area meja, kursi, dinding, dan bagian sekitar jendela tampak memiliki detail yang rendah akibat minimnya pencahayaan. Tingkat visibilitas objek pada citra awal masih terbatas sehingga kualitas visual citra belum optimal.

Pengujian pada kondisi dengan intensitas cahaya sekitar 10 *lux* menghasilkan nilai *brightness before* sebesar 0,102 dan meningkat menjadi 0,276 setelah proses *enhancement* dilakukan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* mampu meningkatkan tingkat luminansi citra pada kondisi *low-light*. Sistem menggunakan parameter *gamma* sebesar 0,75, *contrast* sebesar 1,15, dan *saturation* sebesar 0,90 untuk membantu meningkatkan kualitas visual citra.

Hasil citra setelah proses *enhancement* menunjukkan peningkatan kualitas visual yang cukup baik dibandingkan citra awal. Detail objek pada area meja, kursi, kipas, dan bagian sekitar ruangan menjadi lebih mudah diamati. Tampilan citra juga terlihat lebih terang dibandingkan kondisi awal, namun tetap mempertahankan suasana malam hari sehingga hasil akhir tidak terlihat berlebihan. Proses *enhancement* mampu meningkatkan visibilitas objek tanpa menimbulkan efek pencahayaan yang tidak natural. Kondisi pencahayaan gelap menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan performa *real-time* dengan nilai *frame rate (FPS)* yang stabil selama proses *enhancement* dilakukan. Proses pengolahan citra menggunakan metode *Gamma Correction* dan penyesuaian parameter tambahan dapat berjalan secara responsif pada aplikasi Unity tanpa menyebabkan penurunan performa yang signifikan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode yang diterapkan cukup ringan untuk digunakan pada perangkat *mobile* secara *real-time*.

Kondisi Pencahayaan 20 *lux*



Gambar 5. Tampilan Perbandingan pada Kondisi Pencahayaan 20 *lux*:
(a) Kamera Asli, (b) Pengukuran Lux, (c) Kamera Unity

Gambar 5 menunjukkan hasil perbandingan citra pada kondisi pencahayaan dengan intensitas cahaya sekitar 20 *lux*. Kondisi awal memperlihatkan bahwa citra yang dihasilkan kamera masih terlihat agak redup sehingga beberapa bagian objek di dalam ruangan belum terlihat secara optimal. Area meja, kursi, dinding, serta bagian sekitar jendela tampak

memiliki detail yang kurang jelas akibat pencahayaan yang terbatas. Tingkat kontras pada citra awal juga belum mampu menampilkan perbedaan area terang dan gelap secara maksimal sehingga visibilitas objek masih terlihat kurang baik.

Pengujian pada kondisi dengan intensitas cahaya sekitar 20 lux menghasilkan nilai *brightness* awal sebesar 0,385 dan meningkat menjadi 0,580 setelah proses *enhancement*. Nilai *brightness* awal menunjukkan bahwa citra masih memiliki tingkat pencahayaan yang cukup rendah sehingga detail objek belum terlihat dengan jelas. Peningkatan nilai *brightness* setelah proses *enhancement* menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* mampu meningkatkan luminansi citra dan memperbaiki kualitas visual pada kondisi pencahayaan 20 lux.

Hasil citra setelah proses *enhancement* menunjukkan peningkatan tingkat kecerahan yang cukup jelas dibandingkan citra awal. Detail objek di dalam ruangan menjadi lebih mudah diamati, terutama pada area meja, kursi, serta perangkat di atas meja yang sebelumnya terlihat kurang jelas. Proses *enhancement* juga mampu meningkatkan visibilitas objek tanpa menyebabkan perubahan warna yang berlebihan sehingga tampilan citra tetap terlihat natural. Peningkatan kualitas citra terlihat pada keseluruhan area ruangan yang tampak lebih terang dan detail setelah proses pengolahan citra dilakukan. Hasil pengujian pada kondisi pencahayaan 20 lux menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan peningkatan kualitas citra dengan performa *real-time* yang lebih optimal. Nilai *frame rate* (FPS) pada aplikasi Unity tetap stabil selama proses *enhancement* berlangsung sehingga tampilan kamera terlihat lancar dan responsif. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* memiliki kompleksitas komputasi yang cukup rendah dan sesuai untuk implementasi *real-time* pada perangkat *mobile*.

Hasil Pengujian dan Evaluasi

Analisis Hasil

Berdasarkan hasil implementasi yang telah dilakukan, selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengevaluasi kinerja metode dalam meningkatkan kualitas citra pada berbagai kondisi pencahayaan. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif menggunakan nilai *brightness* serta didukung dengan analisis visual terhadap hasil citra.

Tabel 2. Analisis Hasil

No	Intensitas (lux)	<i>Brightness Before</i>	<i>Brightness After</i>
1	5	0,031	0,044
2	10	0,102	0,276
3	20	0,385	0,580

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa nilai *brightness* mengalami peningkatan pada seluruh kondisi pencahayaan. Pada kondisi pencahayaan 5 lux, peningkatan terjadi namun belum terlalu signifikan karena intensitas cahaya yang diterima kamera sangat minim sehingga detail objek masih sulit terlihat secara jelas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* tetap mampu meningkatkan luminansi meskipun pada kondisi pencahayaan yang sangat rendah.

Pada kondisi pencahayaan 10 lux, peningkatan *brightness* terjadi lebih baik dibandingkan kondisi sebelumnya. Area objek di dalam ruangan mulai terlihat lebih jelas setelah proses *enhancement* dilakukan. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa metode mampu memperbaiki visibilitas objek pada kondisi pencahayaan rendah tanpa menyebabkan perubahan warna yang berlebihan.

Pada kondisi pencahayaan 20 lux peningkatan *brightness* terjadi secara signifikan dari 0,385 menjadi 0,580. Kondisi ini menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* bekerja lebih optimal ketika citra masih memiliki sedikit pencahayaan awal sehingga proses peningkatan luminansi dapat menghasilkan detail objek yang lebih jelas dan tampilan citra yang lebih natural.

Sebagai kondisi referensi, digunakan intensitas cahaya sebesar 150 lux karena nilai tersebut termasuk dalam kategori pencahayaan normal untuk aktivitas di dalam ruangan. Pada kondisi ini, objek dapat terlihat dengan jelas oleh kamera tanpa mengalami *underexposure* maupun *overexposure* yang signifikan. Oleh karena itu, citra yang diambil pada

intensitas cahaya 150 lux digunakan sebagai acuan untuk merepresentasikan kondisi pencahayaan normal dalam penelitian ini.

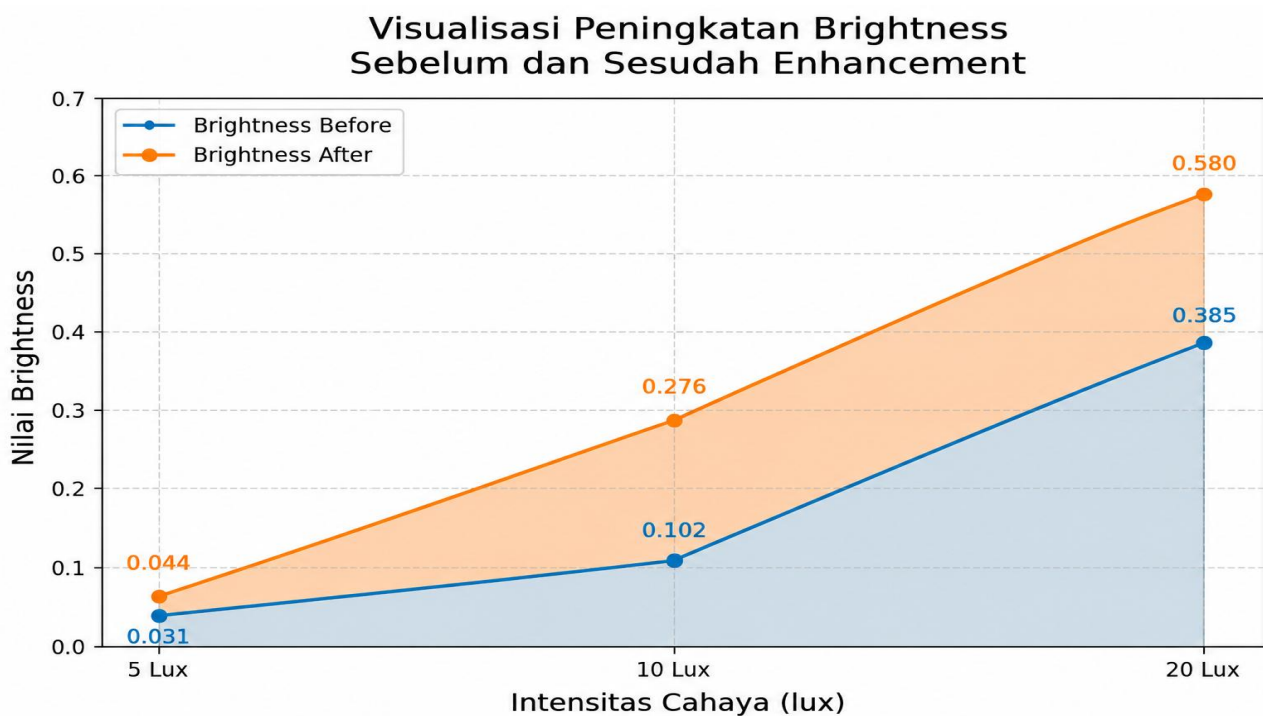
Sebagai acuan evaluasi, digunakan citra referensi pada kondisi pencahayaan normal yang memiliki nilai *brightness* sebesar 0,649. Hasil *enhancement* pada intensitas cahaya 20 lux menghasilkan nilai *brightness* sebesar 0,580. Jika dibandingkan dengan citra referensi, nilai tersebut telah mencapai sekitar 89,37% dari kondisi normal. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* mampu meningkatkan kualitas pencahayaan citra hingga mendekati kondisi normal.

Tabel 3. Hasil Pengujian Frame Rate (FPS)

Intensitas Cahaya	FPS
5 Lux	20
10 Lux	18
20 Lux	21

Hasil pengujian performa menunjukkan bahwa aplikasi mampu mempertahankan frame rate sebesar 20 FPS pada kondisi pencahayaan 5 lux, 18 FPS pada kondisi 10 lux, dan 21 FPS pada kondisi 20 lux. Meskipun terdapat perbedaan nilai FPS pada masing-masing kondisi pengujian, sistem tetap mampu menampilkan hasil *enhancement* secara kontinu selama proses pengolahan citra berlangsung.

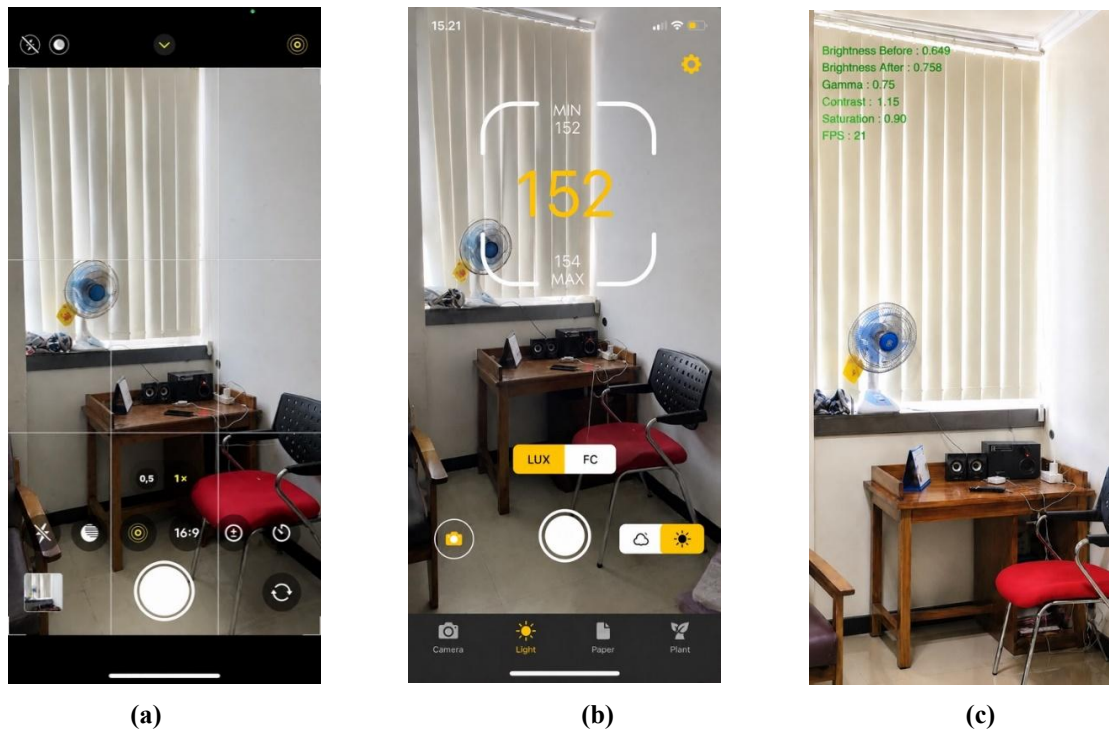
Nilai FPS terendah diperoleh pada kondisi pencahayaan 10 lux yaitu sebesar 18 FPS. Namun demikian, nilai tersebut masih memungkinkan aplikasi berjalan secara responsif tanpa gangguan yang signifikan pada tampilan kamera. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah sehingga dapat diterapkan pada perangkat mobile secara real-time. Dalam penelitian ini, real-time diartikan sebagai kemampuan sistem untuk memproses dan menampilkan hasil *enhancement* secara langsung selama kamera aktif tanpa jeda yang mengganggu pengguna.



Gambar 6. Grafik Perbandingan Nilai Brightness

Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai *brightness* mengalami peningkatan pada seluruh kondisi pencahayaan. Peningkatan paling kecil terjadi pada kondisi pencahayaan 5 lux karena intensitas cahaya awal sangat rendah sehingga detail objek

masih terbatas meskipun proses *enhancement* telah dilakukan. Pada kondisi pencahayaan 10 lux peningkatan *brightness* terlihat lebih jelas dan mampu meningkatkan visibilitas objek di dalam ruangan. Kondisi pencahayaan 20 lux menunjukkan peningkatan paling optimal karena citra awal masih memiliki pencahayaan yang cukup sehingga proses *enhancement* dapat menghasilkan kualitas visual yang lebih baik dan natural.



Gambar 7. Citra Referensi pada Kondisi Pencahayaan Normal:

(a) Kamera Asli, (b) Pengukuran Lux, (c) Kamera Unity

Gambar 7 menunjukkan citra referensi pada kondisi pencahayaan normal yang digunakan sebagai acuan evaluasi. Pengambilan citra dilakukan pada ruangan dan objek yang sama dengan skenario pengujian sehingga kondisi pengamatan tetap konsisten. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan fungsi *CalculateBrightness* pada aplikasi Unity, diperoleh nilai *brightness* sebesar 0,649. Nilai tersebut digunakan sebagai pembandingan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan metode *enhancement* dalam mendekati kondisi pencahayaan normal.

Tabel 4. Data Citra Referensi pada Kondisi Pencahayaan Normal

No	Parameter	Nilai
1	Intensitas Cahaya	150 Lux
2	Brightness	0,649

Tabel 5. Perbandingan terhadap Citra Referensi

No	Kondisi	Brightness
1	Referensi Normal	0,649
2	5 Lux (After)	0,044
3	10 Lux (After)	0,276
4	20 Lux (After)	0,580

Tabel 6. Persentase Brightness terhadap Citra Referensi

No	Kondisi	Brightness After	Kedekatan
1	5 Lux	0,044	6,78%
2	10 Lux	0,276	42,53%
3	20 Lux	0,580	89,37%

Hasil pada Tabel 6 menunjukkan adanya peningkatan tingkat kedekatan terhadap citra referensi pada setiap kondisi pencahayaan. Kondisi 20 lux menghasilkan nilai kedekatan tertinggi sebesar 89,37%, sedangkan kondisi 10 lux dan 5 lux masing-masing menghasilkan nilai sebesar 42,53% dan 6,78%. Pencapaian tersebut menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu meningkatkan kualitas pencahayaan citra hingga mendekati kondisi pencahayaan normal.

Perhitungan:

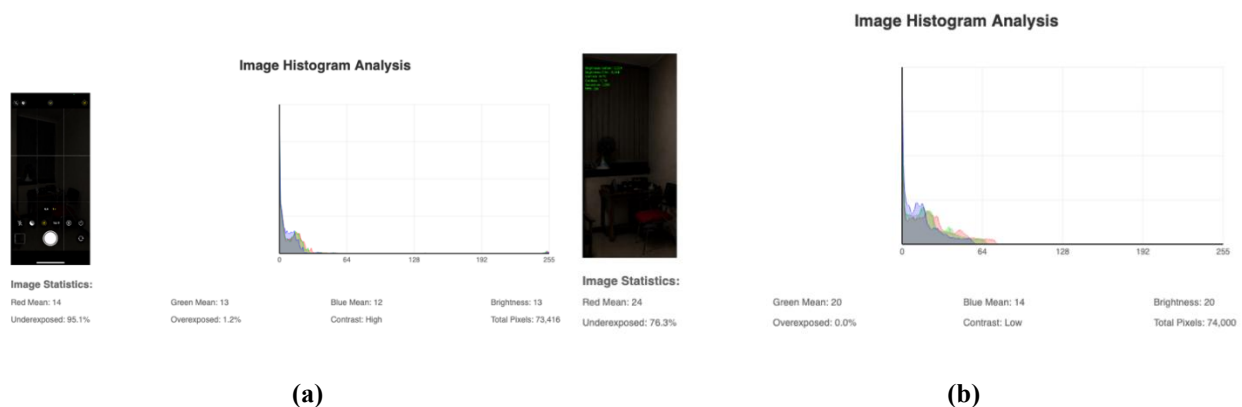
$$\text{Persentase} = \frac{\text{Brightness After}}{\text{Brightness Referensi}} \times 100\%$$

Dengan:

$$\text{Brightness Referensi} = 0.649$$

Contoh:

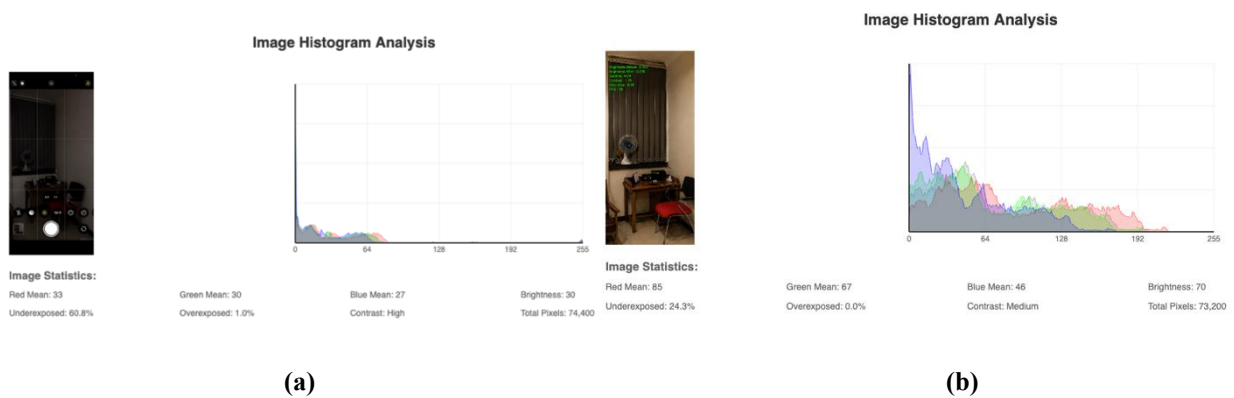
$$\frac{0.580}{0.649} \times 100\% = 89.37\%$$



Gambar 8. Grafik Perbandingan Histogram Analysis Kondisi pencahayaan 5 Lux
(a) Kamera Asli, (b) Kamera Unity

Gambar 8 menunjukkan hasil *histogram analysis* pada kondisi pencahayaan 5 lux. Histogram pada citra awal memperlihatkan distribusi intensitas piksel terkonsentrasi pada sisi kiri grafik yang menunjukkan tingkat kecerahan citra masih rendah. Nilai *underexposed* pada citra awal mencapai sekitar 95,1% sehingga sebagian besar area citra terlihat gelap dan detail objek sulit diamati.

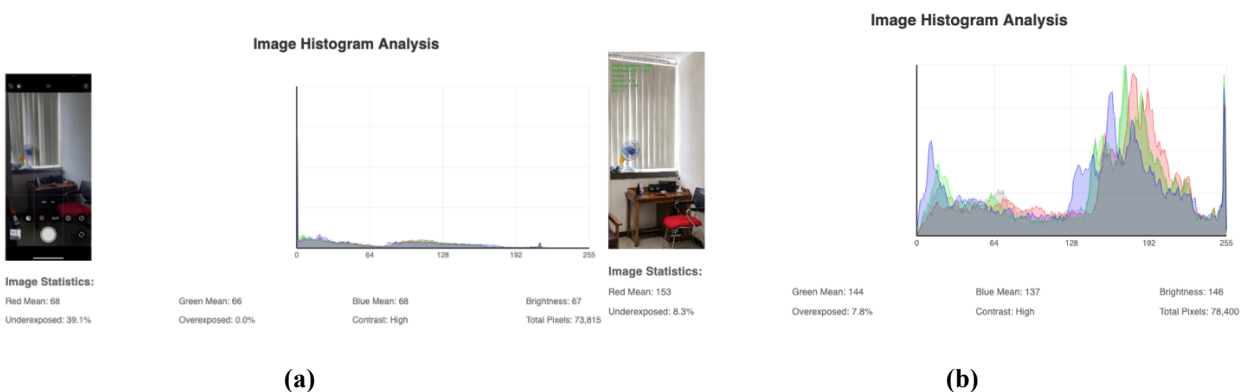
Histogram hasil *enhancement* menunjukkan distribusi piksel mulai menyebar ke arah intensitas menengah. Nilai *underexposed* menurun menjadi sekitar 76,8% dan nilai *brightness* meningkat sehingga beberapa area objek menjadi lebih terlihat dibandingkan citra awal. Nilai *overexposed* tetap rendah sehingga hasil citra masih terlihat natural pada kondisi *very low-light*.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Histogram Analysis Kondisi Pencahayaan 10 Lux
(a) Kamera Asli, (b) Kamera Unity

Gambar 9 menunjukkan hasil *histogram analysis* pada kondisi pencahayaan 10 lux. Histogram citra awal masih didominasi distribusi piksel pada sisi kiri grafik dengan nilai *underexposed* sekitar 80,0% yang menunjukkan citra masih memiliki tingkat luminansi rendah.

Histogram setelah proses *enhancement* memperlihatkan distribusi intensitas piksel lebih merata pada area intensitas menengah. Nilai *underexposed* menurun menjadi sekitar 32,9% dan nilai *brightness* meningkat sehingga detail objek di dalam ruangan menjadi lebih jelas. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* mampu meningkatkan visibilitas objek tanpa menyebabkan pencahayaan berlebih.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Histogram Analysis Kondisi Pencahayaan 20 Lux
(a) Kamera Asli, (b) Kamera Unity

Gambar 10 menunjukkan hasil *histogram analysis* pada kondisi pencahayaan 20 lux. Histogram citra awal memperlihatkan distribusi intensitas piksel mulai menyebar, namun beberapa area citra masih terlihat redup dengan nilai *underexposed* sekitar 38,1%.

Histogram hasil *enhancement* menunjukkan distribusi piksel menyebar lebih luas hingga area intensitas terang. Nilai *underexposed* menurun menjadi sekitar 1,7% dan nilai *brightness* meningkat secara signifikan sehingga detail objek terlihat lebih jelas. Nilai *overexposed* tetap rendah sehingga kualitas visual citra tetap terlihat natural setelah proses *enhancement* dilakukan.

Evaluasi

Berdasarkan hasil pengujian, metode *Gamma Correction* terbukti mampu meningkatkan kualitas citra secara konsisten pada kondisi pencahayaan rendah. Secara visual, peningkatan terlihat dari bertambahnya tingkat kecerahan dan kejelasan objek, terutama pada area yang sebelumnya gelap sehingga detail objek menjadi lebih mudah diamati. Pada intensitas cahaya 5 lux, hasil *enhancement* masih menunjukkan tingkat kecerahan yang terbatas akibat minimnya cahaya yang diterima sensor kamera. Meskipun demikian, objek dalam ruangan tetap mengalami peningkatan visibilitas dibandingkan citra sebelum *enhancement*.

Pada intensitas cahaya 10 lux dan 20 lux, proses enhancement mampu meningkatkan kualitas citra dengan lebih optimal. Detail objek seperti meja, kursi, dinding, dan perangkat di dalam ruangan terlihat lebih jelas tanpa menyebabkan perubahan warna yang berlebihan sehingga tampilan citra tetap terlihat natural. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* efektif digunakan untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi *low-light*. Dari sisi performa, aplikasi mampu mempertahankan proses pengolahan citra secara *real-time* selama enhancement berlangsung. Penerapan teknik *frame skipping* membantu mengurangi beban komputasi sehingga proses pengolahan dapat dilakukan secara berkelanjutan pada perangkat mobile.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan frame rate pada kisaran 18–21 FPS pada seluruh kondisi pencahayaan, yaitu 20 FPS pada 5 lux, 18 FPS pada 10 lux, dan 21 FPS pada 20 lux. Meskipun terdapat variasi nilai FPS, sistem tetap mampu menampilkan hasil *enhancement* secara kontinu tanpa gangguan yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* memiliki kompleksitas komputasi yang relatif rendah sehingga dapat diterapkan pada perangkat mobile untuk mendukung pengolahan citra *low-light* secara *real-time*.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, metode *Gamma Correction* yang dikombinasikan dengan penyesuaian *brightness*, *contrast*, dan *saturation* berhasil diimplementasikan pada sistem kamera mobile berbasis Unity untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi *low-light* secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode yang diterapkan mampu meningkatkan nilai *brightness* pada seluruh kondisi pencahayaan yang diuji, yaitu 5 lux, 10 lux, dan 20 lux. Peningkatan kualitas citra paling optimal diperoleh pada kondisi pencahayaan 20 lux dengan nilai *brightness* meningkat dari 0,385 menjadi 0,580 atau mencapai 89,37% dari kondisi pencahayaan normal yang memiliki nilai *brightness* sebesar 0,649. Selain meningkatkan tingkat kecerahan, metode yang diterapkan juga mampu memperjelas detail objek sehingga visibilitas citra menjadi lebih baik.

Dari sisi performa, sistem mampu berjalan secara *real-time* dengan mempertahankan nilai *frame rate* pada kisaran 18–21 FPS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Gamma Correction* memiliki kompleksitas komputasi yang cukup rendah sehingga sesuai untuk diterapkan pada perangkat mobile. Dengan demikian, metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas visual citra sekaligus menjaga performa sistem selama proses pengolahan citra berlangsung.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan metode *Adaptive Gamma Correction* sehingga nilai gamma dapat menyesuaikan secara otomatis terhadap perubahan intensitas cahaya pada setiap kondisi pencahayaan. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan peningkatan kualitas citra yang lebih optimal tanpa mengurangi performa sistem secara *real-time*. Selain itu, pengujian dapat dilakukan pada berbagai perangkat mobile dengan spesifikasi sensor kamera yang berbeda, baik pada perangkat kelas bawah maupun kelas atas, untuk mengevaluasi konsistensi performa metode yang diusulkan. Penelitian berikutnya juga dapat menambahkan parameter evaluasi objektif seperti *Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)*, *Structural Similarity Index Measure (SSIM)*, serta waktu komputasi setiap *frame* sehingga penilaian terhadap kualitas citra dan efisiensi sistem menjadi lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Fransisca and H. Santoso, "Penerapan Gamma Correction Dalam Peningkatan Pendeteksian Objek Malam Pada Algoritma YOLOv5," *Build. Informatics, Technol. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 59–69, 2023.
- [2] T. W. Yin, K. A. Subaramaniam, A. S. Shibghatullah, and N. F. Mansor, "Enhancement of low-light image using homomorphic filtering, unsharp masking, and gamma correction," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 13, no. 8, pp. 552–559, 2022, doi: 10.14569/IJACSA.2022.0130864.
- [3] H. Fitriyah and R. C. Wihandika, *Dasar-Dasar Pengolahan Citra Digital*. Universitas Brawijaya Press, 2021.
- [4] M. Aulia, K. Kurniawati, P. A. Topan, T. Andriani, and D. Maulidyawati, "Implementasi Sistem Kendali Proporsional Integral Derivatif (PID) pada Porototype Pendeteksi Brightness Cahaya Ruangan," *Jurnal Bumigora Information Technology (BITe)*, vol. 4, no. 2, pp. 217–230, 2022.

- [5] A. M. Chmutin, "Saturation Contrast and Brightness Shift: Photoshop Paradoxes," *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 12–24, 2019.
- [6] F. Zhang, Y. Shao, Y. Sun, C. Gao, and N. Sang, "Self-supervised low-light image enhancement via histogram equalization prior," in *Chinese conference on pattern recognition and computer vision (PRCV)*, Springer, 2023, pp. 63–75.
- [7] A. H. Alsaeedi, S. M. Hadi, and Y. Alazzawi, "Adaptive Gamma and Color Correction for Enhancing Low-Light Images," *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, vol. 17, no. 4, 2024.
- [8] Y. Cai, H. Bian, J. Lin, H. Wang, R. Timofte, and Y. Zhang, "Retinexformer: One-stage retinex-based transformer for low-light image enhancement," in *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 2023, pp. 12504–12513.
- [9] H. Tang, H. Zhu, L. Fei, T. Wang, Y. Cao, and C. Xie, "Low-illumination image enhancement based on deep learning techniques: A brief review," in *Photonics*, MDPI, 2023, p. 198.
- [10] Y. Wang, Z. Liu, J. Liu, S. Xu, and S. Liu, "Low-light image enhancement with illumination-aware gamma correction and complete image modelling network," in *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, 2023, pp. 13128–13137.
- [11] C. George, M. Spitzer, and H. Hussmann, "Training in IVR: investigating the effect of instructor design on social presence and performance of the VR user," in *Proceedings of the 24th ACM symposium on virtual reality software and technology*, 2018, pp. 1–5.
- [12] A. E. NURANI and A. H. Kuspranoto, "Perancangan Simulasi Alat Pengukuran Intensitas Cahaya Menggunakan Lux Meter Berbasis Ldr Dan Arduino Dengan Pengaturan Led," *MEDIKA TRADA*, vol. 4, no. 2, pp. 58–63, 2023.
- [13] A. Handa, R. A. Newcombe, A. Angeli, and A. J. Davison, "Real-time camera tracking: When is high frame-rate best?," in *European Conference on Computer Vision*, Springer, 2012, pp. 222–235.
- [14] A. Ismanto, "Perbedaan Kontras Luminansi Sebagai Pembentuk Karakter Bidang/Modeling Pada Pencapaian Fasade Bangunan Edutainment," *Lintas Ruang: Jurnal Pengetahuan dan Perancangan Desain Interior*, vol. 5, no. 2, 2017.
- [15] C. Hia, E. Megawati, A. F. Matondang, and M. Ananda, "PENINGKATAN CITRA CCTV MALAM MENGGUNAKAN METODE GAMMA CORRECTION ADAPTIF DAN BILATERAL FILTER," *Jurnal Informatika Teknologi dan Sains (Jinteks)*, vol. 7, no. 4, pp. 2270–2276, 2025.
- [16] X. Guo, "LIME: A Method for Low-light Image Enhancement," Jul. 2016, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1605.05034>
- [17] M. T. Rasheed, D. Shi, and H. Khan, "A comprehensive experiment-based review of low-light image enhancement methods and benchmarking low-light image quality assessment," *Signal Processing*, vol. 204, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.sigpro.2022.108821.
- [18] B. Purba, "Aplikasi perbaikan kualitas citra hasil penginderaan jauh (remote sensing) dengan metode contrast stretching," *Jurnal TIMES*, vol. 6, no. 2, pp. 26–36, 2017.
- [19] W. A. Syamsi, N. Setianto, A. Saepuloh, and A. M. Suyono, "Analisis Intensitas Cahaya di Laboratorium PT X Metode SNI 7062: 2019," *Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri*, vol. 4, no. 1, pp. 163–170, 2024.
- [20] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Pearson, 2018.