

SKRIPSI

**PENGEMBANGAN SISTEM PENINGKATAN
KUALITAS CITRA DENGAN PENCAHAYAAN
RENDAH UNTUK ANALISIS VISUAL
MENGUNAKAN *FILTER* RETINEX DAN TEKNIK
BM3D**



POLITEKNIK NEGERI BALI

Oleh :

I Ketut Suaryana

NIM. 2115354074

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN
TEKNOLOGI REKAYASA PERANGKAT LUNAK
JURUSAN TEKNOLOGI INFORMASI
POLITEKNIK NEGERI BALI
2024**

ABSTRAK

Pencitraan dalam kondisi pencahayaan rendah sering kali menghasilkan kualitas visual yang buruk, seperti rendahnya kontras, tingginya *noise*, dan hilangnya detail penting. Penelitian ini mengembangkan sebuah sistem perangkat lunak untuk meningkatkan kualitas citra dalam kondisi tersebut dengan menggabungkan algoritma Multi-Scale Retinex with Color Preservation (MSRCP) dan teknik denoising Block Matching 3D (BM3D). Sistem dibangun menggunakan bahasa pemrograman Python dengan antarmuka pengguna grafis (GUI) berbasis Tkinter, serta menyediakan kontrol parameter seperti *gain*, *offset*, *color restoration*, *dynamic range compression*, dan sigma BM3D. *Dataset* yang digunakan terdiri dari 80 citra, yang diklasifikasikan menjadi tiga kategori: *underexposed*, *overexposed*, dan *low contrast*. Untuk setiap kategori, dilakukan pengujian otomatis terhadap 16 kombinasi parameter, yang dievaluasi menggunakan metrik Shannon Entropy, dan kombinasi optimalnya divalidasi dengan metrik PSNR dan SSIM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa parameter yang tepat dapat meningkatkan persepsi visual secara signifikan, meskipun nilai PSNR dan SSIM bervariasi tergantung pada karakteristik awal citra. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem peningkatan kualitas citra berbasis desktop dengan parameterisasi fleksibel dan evaluasi berbasis data, serta berpotensi untuk diterapkan dalam bidang digital forensik, analisis visual, dan pengolahan citra medis.

Kata kunci: MSRCP, BM3D, peningkatan kualitas citra, pencahayaan rendah, Shannon Entropy, PSNR, SSIM, GUI.

ABSTRACT

Imaging under low-light conditions often results in poor visual quality, such as low contrast, high noise, and the loss of important details. This study develops a software system to enhance image quality in such conditions by combining the Multi-Scale Retinex with Color Preservation (MSRCP) algorithm and the Block Matching 3D (BM3D) denoising technique. The system is built using the Python programming language with a graphical user interface (GUI) based on Tkinter, and provides adjustable parameters including gain, offset, color restoration, dynamic range compression, and BM3D sigma. The dataset consists of 80 images categorized into underexposed, overexposed, and low contrast types. For each category, automated testing of 16 parameter combinations was conducted and evaluated using the Shannon Entropy metric, while the optimal combination was validated using PSNR and SSIM metrics. The results show that proper parameter settings can significantly enhance visual perception, although PSNR and SSIM values vary depending on the initial characteristics of the image. This study contributes to the development of a desktop-based image enhancement system with flexible parameterization and data-driven evaluation, and holds potential for applications in digital forensics, visual analysis, and medical image processing.

Keywords: MSRCP, BM3D, image enhancement, low-light imaging, Shannon Entropy, PSNR, SSIM, GUI.

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN UJIAN SKRIPSI	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN KARYA SKRIPSI.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	7
2.2 Landasan Teori	9
2.2.1. Pengolahan Citra.....	9
2.2.2. Teknologi Implementasi	9
2.2.3. <i>Flowchart</i> (Diagram Alir).....	10
2.2.4. Multi-Scale Retinex with Color Preservation (MSRCP).....	10
2.2.5. Block-matching and 3D filtering (BM3D)	12
2.2.6. Evaluasi Kualitas Citra	13
2.2.7. Shannon Entropy sebagai Metrik Kualitas	14
BAB III METODE PENELITIAN.....	16
3.1 Objek dan Metode Penelitian.....	16
3.1.1 Objek Penelitian.....	16
3.1.2 Metode Penelitian	16

3.2	Analisis Kondisi Eksisting.....	17
3.3	Rancangan Penelitian.....	17
3.3.1	Kebutuhan Sistem	17
3.3.2	Flowchart Algoritma Retinex MSRCR	18
3.3.3	Flowchart Algoritma Pengurangan Noise BM3D	19
3.3.4	Flowchart Sistem	21
3.4	Pengujian Penelitian	23
3.4.1	Optimasi Parameter dengan Metrik Tanpa Referensi.....	24
3.4.2	Validasi Kualitas dengan Metrik Referensi	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Hasil Implementasi Sistem	29
4.1.1	Antarmuka Pengguna (GUI).....	29
4.1.2	Penjelasan Rentang Parameter Kontrol	30
4.2	Demonstrasi Hasil Visual	31
4.2.1	Citra Underexposed	31
4.2.2	Citra Overexposed	32
4.3	Hasil Pengujian Kuantitatif.....	33
4.3.1	Hasil Optimasi Parameter	33
4.3.2	Hasil Validasi Kualitas (PSNR & SSIM)	35
4.4	Pembahasan Hasil Pengujian	36
4.4.1	Paradoks Evaluasi Kualitas.....	36
4.4.2	Keterbatasan Parameter Denoising yang Seragam	37
4.4.3	Solusi dan Interpretasi Hasil	38
BAB V PENUTUP		39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	39
DAFTAR PUSTAKA.....		41
LAMPIRAN		43

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Simbol Flowchart [14].	10
Tabel 3. 1 Ruang Pencarian Parameter (Parameter Grid) untuk Pengujian Otomatis. ...	24
Tabel 4. 1 Rekomendasi Parameter Optimal per Kategori Berdasarkan Skor Entropy Rata-rata Tertinggi.	34
Tabel 4. 2 Hasil Uji Validasi Kualitas pada Sampel Citra.	35

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Flowchart Algoritma Retinex MSRCP	18
Gambar 3. 2 Flowchart Algoritma Pengurangan Noise BM3D.....	19
Gambar 3. 3 Flowchart Sistem	21
Gambar 4. 1 Tampilan Utama Aplikasi GUI.....	29
Gambar 4. 2 Menggunakan Parameter Optimal; a) Citra Asli, b) Citra Telah Di Optimisasi	32
Gambar 4. 3 Menggunakan Parameter Sub-optimal untuk Ketajaman; a) Citra Asli, b) Citra Telah Di Optimisasi	32
Gambar 4. 4 Menggunakan Parameter Optimal; a) Citra Asli, b) Citra Telah Di Optimisasi	33
Gambar 4. 5 Menggunakan Parameter Sub-optimal untuk Ketajaman; a) Citra Asli, b) Citra Telah Di Optimisasi	33

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Pengujian Pencarian Parameter Otomatis.....	43
Lampiran 2 Lembar Form Bimbingan Skripsi - Putu Indah Ciptayani, S.Kom., M.Cs.	83
Lampiran 3 Lembar Form Bimbingan Skripsi - I Putu Oka Wisnawa, S.Kom., M.T....	84
Lampiran 4 Lembar Perbaikan Ujian Komprehensif - Putu Indah Ciptayani, S.Kom., M.Cs.....	85
Lampiran 5 Lembar Perbaikan Ujian Komprehensif - I Nyoman Rai Widartha Kesuma, S.Kom., M.Kom.....	86
Lampiran 6 Lembar Perbaikan Ujian Komprehensif - Ida Bagus Adisimakrisna Peling, S.Kom., M.T.	87

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Manusia memiliki mata sebagai indera penglihatan yang sangat vital dalam kehidupan sehari-hari, yang mempermudah berbagai aktivitas. Kegiatan seperti berjalan, mengambil benda, menulis, dan membaca buku menjadi lebih sederhana dengan dukungan fungsi mata. Penglihatan bukan sekadar menangkap bayangan melalui mata, tetapi juga membangun persepsi terhadap apa yang dilihat, sehingga makna dari pengamatan tersebut dapat dipahami.

Data dan informasi tidak hanya dapat disajikan dalam bentuk teks, tetapi juga mencakup gambar, suara dan video, yang secara kolektif dikenal sebagai multimedia. Dalam era teknologi informasi modern, multimedia memiliki peran yang tidak terpisahkan. Sebagai salah satu elemen penting multimedia, citra atau gambar memainkan peran signifikan sebagai bentuk penyampaian informasi visual. Berbeda dari teks, citra memiliki karakteristik unik yang kaya akan informasi visual.

Perkembangan pesat dalam teknologi *computer vision* telah memungkinkan komputer untuk menganalisis dan memahami informasi visual secara otomatis. Teknologi ini memainkan peran penting dalam pengolahan citra digital, terutama dalam meningkatkan kualitas gambar yang diambil dalam kondisi pencahayaan rendah. Peningkatan kualitas citra ini sangat berguna untuk mempermudah analisis dan pemahaman visual yang lebih mendalam. Penelitian ini menggunakan algoritma *Retinex* MSRCP dan teknik pengurangan *noise* BM3D untuk meningkatkan kualitas citra malam hari, yang merupakan salah satu tantangan utama dalam pengolahan citra digital [1].

Tantangan dalam menghasilkan citra berkualitas tinggi tidak hanya terbatas pada perangkat keras, tetapi juga pada kondisi lingkungan yang tidak ideal. Pengambilan gambar dalam kondisi pencahayaan rendah secara fundamental menghadapi masalah jumlah foton yang minim, yang secara teknis menyebabkan rendahnya *signal-to-noise ratio* (SNR). Hal ini menghasilkan berbagai degradasi visual, seperti munculnya *noise* acak (*random noise*), hilangnya detail pada area gelap (*crushed blacks*), serta pergeseran warna (*color shift*) yang membuat citra menjadi tidak akurat. Dampak dari degradasi kualitas ini sangat terasa di berbagai bidang krusial. Dalam sistem keamanan, rekaman CCTV yang buram dapat menggagalkan proses identifikasi. Di bidang kendaraan

otonom, kamera yang tidak dapat melihat dengan jelas di malam hari dapat menyebabkan kecelakaan fatal. Demikian pula dalam fotografi jurnalistik atau dokumentasi, momen penting bisa kehilangan konteks dan makna jika detail visualnya tidak tersampaikan dengan baik.

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan kualitas gambar dalam kondisi pencahayaan rendah adalah *Retinex*, yang menyimulasikan cara mata manusia menyesuaikan diri dengan variasi pencahayaan. Di dalam algoritma *Retinex*, terdapat empat model utama, yaitu *Single Scale Retinex* (SSR), *Multi-Scale Retinex* (MSR), *Multi-Scale Retinex with Color Restoration* (MSRCR), dan *Multi-Scale Retinex with Color Preservation* (MSRCP). Dari semua model tersebut, MSRCP dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya tidak hanya meningkatkan kontras dan kecerahan gambar, tetapi juga menjaga keseimbangan warna sehingga citra tetap terlihat natural. MSRCP secara efektif mengatasi masalah pencahayaan yang tidak merata dan mengurangi *noise*, sehingga menghasilkan kualitas gambar yang lebih baik, terutama dalam konteks citra malam hari yang diambil dalam kondisi pencahayaan rendah [2].

Peningkatan kualitas citra dapat dievaluasi dengan menggunakan PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*), yang mengukur rasio antara sinyal maksimum terhadap gangguan *noise* dalam sinyal, dinyatakan dalam *decibel* (dB). PSNR digunakan untuk membandingkan kualitas citra sebelum dan sesudah disisipkan pesan. Nilai PSNR yang lebih tinggi menunjukkan hasil rekonstruksi citra yang lebih mendekati aslinya, sehingga memberikan validasi kuantitatif terhadap keberhasilan metode yang diterapkan [2].

Penerapan metode *Retinex* terkadang dapat meningkatkan tingkat *noise* pada gambar asli, khususnya dalam kondisi pencahayaan yang sangat rendah atau gelap [3]. Besarnya peningkatan *noise* tersebut bergantung pada kondisi awal gambar dan konfigurasi pengaturan yang digunakan dalam proses penerapan algoritma. Untuk mengatasi hal ini, teknik seperti *Block-Matching* and *3D Filtering* (BM3D) dapat digunakan. BM3D adalah algoritma pengurangan *noise* yang efektif dan bekerja dengan menyocokkan blok-blok gambar yang serupa dengan menerapkan *filter* tiga dimensi untuk menghilangkan *noise* tanpa mengorbankan detail penting dalam gambar [4]. Berdasarkan evaluasi menggunakan PSNR (*Peak Signal-to-Noise Ratio*) dan SSIM (*Structural Similarity Index*), Pengaplikasian BM3D untuk citra berwarna membuat citra memiliki skor yang tinggi. Algoritma ini telah diuji pada citra luar ruangan, menunjukkan pengurangan *noise* secara signifikan dan mempertahankan struktur penting seperti tepi, ketajaman, dan kontur gambar [5].

Namun, tantangan utama dalam menggabungkan metode ini adalah penentuan parameter yang optimal, karena pengaturan manual bersifat subjektif dan tidak efisien. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan sebuah pendekatan sistematis untuk menemukan rekomendasi parameter terbaik melalui pengujian kuantitatif.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan sebelumnya, maka dapat dirumuskan beberapa permasalahan diantaranya sebagai berikut.

- A. Bagaimana membangun sebuah sistem aplikasi dengan antarmuka pengguna (GUI) untuk meningkatkan kualitas citra menggunakan gabungan metode MSRCR dan teknik pengurangan *noise* BM3D?
- B. Bagaimana merancang dan melaksanakan sebuah sistem pengujian otomatis untuk menentukan rentang parameter MSRCR (*Gain*, *Offset*, *Color Restore*) dan BM3D (*Sigma*) yang optimal untuk tiga kategori citra yang berbeda: *underexposed*, *overexposed*, dan *low contrast*?
- C. Bagaimana hasil analisis kuantitatif dari pengujian otomatis tersebut dalam memberikan rekomendasi parameter terbaik untuk setiap kategori citra berdasarkan metrik *Shannon Entropy*, dan bagaimana validasi kualitasnya menggunakan metrik PSNR dan SSIM?

1.3. Batasan Masalah

Diperlukan sebuah batasan-batasan masalah yang akan digunakan sebagai pedoman untuk mencapai target dari penelitian. Batasan masalah tersebut antara lain.

- A. Sistem peningkatan kualitas citra malam hari dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman *Python*, dengan *Library Graphic User Interface* Tkinter.
- B. Jenis citra yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra malam dengan masalah kekurangan atau berlebihan pencahayaan.
- C. Input gambar untuk sistem hanya akan dibatasi pada format file JPG/JPEG dan PNG untuk menjaga konsistensi dan kemudahan dalam pemrosesan citra.
- D. Evaluasi kualitas untuk optimasi parameter menggunakan metrik *Shannon Entropy*. Validasi kualitas hasil akhir pada aplikasi menggunakan metrik PSNR dan SSIM yang membandingkan citra hasil dengan citra asli sebelum diubah.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan diperlukan agar penelitian ini memiliki arah dan tujuan yang akan dicapai, maka tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

- A. Membangun sistem perangkat lunak dengan antarmuka pengguna (GUI) yang mengimplementasikan gabungan metode MSRCF dan teknik BM3D untuk peningkatan kualitas citra.
- B. Merancang dan mengimplementasikan skrip pengujian otomatis untuk mengevaluasi performa berbagai kombinasi parameter pada tiga kategori *dataset* citra yang berbeda.
- C. Menganalisis hasil pengujian kuantitatif untuk memberikan rekomendasi berbasis data mengenai rentang parameter optimal, serta memvalidasi kualitas peningkatannya menggunakan metrik PSNR dan SSIM.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat yang signifikan, baik untuk pengembangan ilmu pengetahuan maupun aplikasi praktisnya. Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Manfaat untuk Mahasiswa.

- 1. Program ini memberikan mahasiswa kesempatan untuk memperdalam pemahaman mereka mengenai teknik pengolahan citra, khususnya dalam metodologi MSRCF dan pengurangan *noise*. Ini akan menyiapkan mereka untuk karir di bidang teknologi informasi, dan multimedia.
- 2. Mahasiswa akan dapat menerapkan teori yang telah mereka pelajari dalam proyek nyata, meningkatkan keterampilan pemecahan masalah dan aplikasi praktis mereka dalam dunia nyata.
- 3. Dengan pengalaman dalam mengembangkan dan mengimplementasikan sistem peningkatan kualitas citra, mahasiswa akan memiliki keunggulan kompetitif ketika memasuki pasar kerja yang semakin mengutamakan teknologi dan data.

2. Manfaat untuk Akademika.

- 1. Hasil penelitian ini dapat menjadi materi studi kasus konkret untuk mata kuliah seperti 'Pengolahan Citra Digital' atau 'Computer Vision'. Kode sumber dari aplikasi yang dikembangkan dapat dijadikan sebagai *baseline* untuk proyek-proyek praktikum selanjutnya, memungkinkan mahasiswa angkatan berikutnya untuk membangun di atas fondasi yang sudah ada. Selain itu, publikasi hasil penelitian ini di jurnal atau konferensi nasional dapat meningkatkan sitasi dan reputasi institusi di bidang rekayasa perangkat lunak dan teknologi informasi.
- 2. Program ini dapat membuka peluang untuk kolaborasi antara dosen, mahasiswa, dan pihak industri. Hal ini tidak hanya meningkatkan kualitas penelitian di

institusi, tetapi juga dapat menarik perhatian bagi penelitian yang relevan dengan kebutuhan masyarakat dan industri.

3. Dengan mengembangkan teknologi yang dapat digunakan secara langsung dalam analisis bukti digital, Politeknik Negeri Bali dapat meningkatkan reputasinya sebagai institusi yang berkomitmen terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang aplikatif.
4. Hasil penelitian dapat menjadi referensi dan landasan bagi penelitian selanjutnya di bidang *image enhancement* dan *computational photography*.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah dalam mengetahui pembahasan yang terdapat pada skripsi ini, maka diperlukan sistematika yang berfungsi sebagai kerangka dan pedoman penulisan skripsi. Berikut adalah sistematika penulisannya:

A. Bagian Awal Skripsi

Pada bagian awal memuat halaman sampul depan, halaman persetujuan, halaman pengesahan, halaman pernyataan, halaman abstrak, halaman abstrak dalam bahasa inggris, halaman kata pengantar, halaman daftar isi, halaman daftar tabel, dan halaman daftar gambar.

B. Bagian Utama Skripsi

Pada bagian utama terbagi menjadi beberapa bab dan sub bab sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memuat tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat tentang penelitian sebelumnya yang relevan dan landasan teori yang mencakup konsep-konsep dasar seperti pengolahan citra, algoritma MSRCP, algoritma BM3D, dan metrik evaluasi yang digunakan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini memuat tentang rancangan penelitian, penjelasan objek penelitian atau *dataset* yang digunakan, serta metodologi pengujian kuantitatif yang mencakup parameter yang diuji, dan

metode analisis data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil implementasi sistem, data kuantitatif dari pengujian otomatis, dan pembahasan mendalam mengenai temuan tersebut.

BAB V PENUTUP

Bab ini memuat tentang kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian yang menjawab perumusan masalah serta saran untuk pengembangan di masa depan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang secara langsung menjawab perumusan masalah:

1. Sebuah sistem aplikasi dengan antarmuka pengguna (GUI) telah berhasil dibangun menggunakan Python dan *library* Tkinter. Sistem ini terbukti mampu mengimplementasikan gabungan metode MSRCR untuk *enhancement* dan BM3D untuk *denoising*, serta memberikan kontrol parameter secara interaktif kepada pengguna, sehingga tujuan pertama penelitian tercapai.
2. Sebuah metodologi pengujian kuantitatif berbasis skrip otomatis telah berhasil dirancang dan dieksekusi. Metodologi ini terbukti efektif dalam mengevaluasi 1.280 kombinasi eksperimen pada 80 gambar di tiga kategori yang berbeda, sehingga tujuan kedua penelitian tercapai.
3. Analisis kuantitatif berhasil memberikan rekomendasi parameter optimal berbasis metrik *Shannon Entropy* untuk setiap kategori citra. Namun, hasil validasi menunjukkan temuan penting: parameter yang optimal untuk meningkatkan informasi visual (skor Entropy tinggi) justru menurunkan kemiripan matematis dengan citra asli (skor PSNR dan SSIM lebih rendah). Hal ini membuktikan bahwa tujuan *enhancement* (mengubah citra menjadi lebih baik secara perseptual) dan tujuan metrik fidelitas (menjaga kemiripan dengan asli) dapat bertentangan, yang merupakan sebuah kontribusi penting dari penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan pengalaman dan temuan selama penelitian, terdapat beberapa saran untuk pengembangan di masa depan agar sistem yang dibangun menjadi lebih canggih dan relevan untuk aplikasi dunia nyata.

1. Aplikasi untuk Forensik Digital:

Sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam bidang forensik digital. Bukti visual dari kamera CCTV atau perangkat lain seringkali berkualitas rendah karena pencahayaan yang buruk. Aplikasi ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk membantu aparat penegak hukum dalam memperjelas detail pada bukti foto dan video, seperti wajah, plat nomor, atau objek penting lainnya.

2. Deteksi Kategori Otomatis:

Sistem dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan model *machine learning* sederhana (misalnya, klasifikasi berdasarkan histogram citra) untuk mendeteksi kategori gambar secara otomatis (*underexposed*, *overexposed*, dll.) dan kemudian menerapkan set parameter rekomendasi yang sesuai sebagai setelan awal.

3. Parameter Denoising Adaptif:

Untuk mengatasi masalah *denoising* yang seragam, penelitian selanjutnya dapat mengimplementasikan tahap pra-pemrosesan untuk estimasi tingkat *noise* pada citra input. Salah satu metode yang umum digunakan adalah dengan menganalisis variasi pada area gambar yang homogen (misalnya, area langit atau dinding polos). Standar deviasi piksel pada area homogen ini dapat dijadikan sebagai estimasi awal untuk nilai *noise*. Nilai estimasi ini kemudian dapat secara dinamis dimasukkan sebagai nilai awal untuk parameter *BM3D Sigma*, sehingga kekuatan *denoising* dapat beradaptasi secara otomatis sesuai dengan karakteristik setiap gambar.

4. Ekspansi Ruang Pencarian:

Setelah mendapatkan parameter optimal dari pengujian cepat ini, penelitian selanjutnya bisa melakukan "pencarian halus" (*fine-grained search*) di sekitar nilai-nilai optimal tersebut untuk menemukan setelan yang lebih presisi lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nagaraj, M. Sood, V. Kapoor, Y. Mathur, and B. Sinha, "Digital Image Forensics using Deep Learning," 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2210.09052>
- [2] D. D. Lubis, *Perbandingan Metode Contrast Stretching Dan Metode Retinex Untuk Peningkatan Kecerahan Citra Digital*. 2021.
- [3] A. B. Petro, C. Sbert, and J.-M. Morel, "Multiscale Retinex," *Image Processing On Line*, vol. 4, pp. 71–88, 2014, doi: 10.5201/ipol.2014.107.
- [4] M. Li, J. Liu, W. Yang, X. Sun, and Z. Guo, "Structure-Revealing Low-Light Image Enhancement Via Robust Retinex Model," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 27, no. 6, pp. 2828–2841, Jun. 2018, doi: 10.1109/TIP.2018.2810539.
- [5] M. Hasan and M. R. El-Sakka, "Improved BM3D image denoising using SSIM-optimized Wiener filter," *EURASIP J Image Video Process*, vol. 2018, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s13640-018-0264-z.
- [6] J. Wang, H. Wang, Y. Sun, and J. Yang, "Improved Retinex-Theory-Based Low-Light Image Enhancement Algorithm," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, 2023, doi: 10.3390/app13148148.
- [7] J. Wang, Y. Sun, and J. Yang, "Multi-Modular Network-Based Retinex Fusion Approach for Low-Light Image Enhancement," *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 11, 2024, doi: 10.3390/electronics13112040.
- [8] N. Fadillah and C. R. Gunawan, "Mendeteksi Keakuratan Metode Noise Salt and Pepper Dengan Median Filter," *Jurnal Informatika*, vol. 6, no. 1, pp. 91–95, 2019, doi: 10.31311/ji.v6i1.5439.
- [9] H. Sajati, "The Effect of Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) Values on Object Detection Accuracy in Viola Jones Method," *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 4, 2018, doi: 10.28989/senatik.v4i0.139.
- [10] R. Rajaram, B. Castellani, and A. N. Wilson, "Advancing Shannon entropy for measuring diversity in systems," *Complexity*, vol. 2017, no. c, 2017, doi: 10.1155/2017/8715605.
- [11] T. T. Han, H. Van Nguyen, and P. Nguyen Huu, "Denoising Method for MRI Images Using Modified BM3D Filter with Complex Network and Artificial Neural Networks," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/2606485.
- [12] D. Kurnia, A. A. Rahmansyah, and T. S. Manik, "Aplikasi Pengolahan Citra Dengan Metode MultiScale Retinex Untuk Perbaikan Citra 2 Dimensi," *Jurnal Rekayasa, Teknologi Proses dan Sains Kimia*, vol. 2, no. 09-12–2022, p. 10, 2022, [Online]. Available: <https://akses.ptki.ac.id/jurnal/index.php/reprokimia/article/view/50>

- [13] F. D. Marleny, *Pengolahan Citra Digital Menggunakan Python*. CV. Pena Persada, 2021.
- [14] A. Zalukhu, P. Singly, and D. Darma, “Perangkat Lunak Aplikasi Pembelajaran Flowchart,” *Jurnal Teknologi, Informasi dan Industri*, vol. 4, no. 1, pp. 61–70, 2023, [Online]. Available: <https://ejurnal.istp.ac.id/index.php/jtii/article/view/351>
- [15] T. T. Han, H. Van Nguyen, and P. Nguyen Huu, “Denoising Method for MRI Images Using Modified BM3D Filter with Complex Network and Artificial Neural Networks,” *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/2606485.
- [16] U. Sara, M. Akter, and M. S. Uddin, “Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—A Comparative Study,” *Journal of Computer and Communications*, vol. 07, no. 03, pp. 8–18, 2019, doi: 10.4236/jcc.2019.73002.