

Perbandingan Filter Metode *Discrete Wavelet Transformation* untuk Perbaikan Kualitas Citra Digital

M. Mahaputra Hidayat

Teknik Informatika, Universitas Bhayangkara Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Email: mahaputra@ubhara.ac.id

Email Korespondensi: mahaputra@ubhara.ac.id

Abstrak—Perbaikan kualitas citra digital merupakan salah satu aspek penting dalam pemrosesan citra, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan visualisasi yang lebih jelas dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja berbagai filter dalam metode *Discrete Wavelet Transformation* (DWT) untuk meningkatkan kualitas citra digital. Studi ini menguji beberapa filter wavelet populer, seperti *Haar*, *Daubechies*, *Symlets*, dan *Coiflets*, pada dataset citra dengan noise dan detail yang beragam. Parameter evaluasi meliputi *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), *Mean Squared Error* (MSE), dan *Structural Similarity Index Measure* (SSIM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa filter *Daubechies* meningkatkan nilai PSNR hingga 25% dibandingkan *Haar* pada citra dengan noise tinggi, sementara filter *Coiflets* mencapai peningkatan SSIM sebesar 15% pada citra dengan detail kompleks. Secara keseluruhan, *Daubechies* dan *Coiflets* menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan filter lainnya dalam mereduksi noise sekaligus mempertahankan detail citra. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam memahami pilihan filter DWT yang optimal untuk aplikasi peningkatan kualitas citra digital, serta memberikan wawasan untuk pengembangan algoritma pemrosesan citra yang lebih efisien di masa depan.

Kata Kunci: *Discrete Wavelet Transformation*, filter wavelet, perbaikan kualitas citra, PSNR, SSIM, MSE.

Abstract—Improving the quality of digital imagery is one of the important aspects of image processing, especially for applications that require clearer and more accurate visualization. This study aims to compare the performance of various filters in the *Discrete Wavelet Transformation* (DWT) method to improve the quality of digital images. The study tested several popular wavelet filters, such as *Haar*, *Daubechies*, *Symlets*, and *Coiflets*, on imagery datasets with varying amounts of noise and detail. Evaluation parameters include *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), *Mean Squared Error* (MSE), and *Structural Similarity Index Measure* (SSIM). The test results showed that the *Daubechies* filter increased the PSNR value by up to 25% compared to *Haar* in high-noise images, while the *Coiflets* filter achieved a 15% increase in SSIM in images with complex details. Overall, *Daubechies* and *Coiflets* perform better than other filters in reducing noise while maintaining image detail. This research contributes to understanding the optimal choice of DWT filters for digital image quality improvement applications, as well as provides insights for the development of more efficient image processing algorithms in the future.

Keywords: *Discrete Wavelet Transformation*, wavelet filter, image quality improvement, PSNR, SSIM, MSE

1. PENDAHULUAN

Gambar atau citra mulai mengalami perkembangan dari yang sebelumnya berupa citra analog menjadi citra digital. Citra merupakan suatu representasi, kemiripan atau imitasi dari suatu obyek atau benda. Citra yang dikenal dalam komputer adalah citra dalam format digital [1]. Citra digital dapat mengalami penurunan kualitas atau gangguan yang disebut dengan derau (*noise*), *noise* adalah gambar atau piksel yang mengganggu kualitas citra. *Noise* dapat disebabkan oleh gangguan fisik (optik) pada alat akuisisi maupun secara disengaja akibat proses pengambilan dan pengolahan gambar yang tidak sesuai [2]. Contohnya adalah bintik gelap dan terang yang muncul secara acak yang menyebar pada obyek (citra) maupun latar belakangnya.

Gambar semisal foto dan lain sebagainya, bagi sebagian orang adalah kenangan yang membawa beribu makna. Meski saat sekarang, posisi gambar telah digeser oleh gambar bergerak seperti video, hanya saja penggunaan gambar sebagai media penyimpan sebuah peristiwa tetap berada pada posisi yang strategis. Atas dasar itulah, maka banyak bermunculan program (*software*) yang berfungsi untuk meningkatkan kualitas gambar dengan memakai berbagai metode perbaikan citra, misalnya perbaikan dari segi warna (*color*), kecerahan (*brightness*), pengurangan *noise* pada citra dan lain sebagainya [3].

Citra berkualitas rendah yang disebabkan *noise* memerlukan langkah-langkah perbaikan untuk meningkatkan kualitas citra tanpa mengurangi lebih banyak kualitas detail citra serta menghasilkan citra dengan informasi yang cukup akurat, salah satu teknik perbaikan citra yaitu dengan menggunakan pelembutan (*smoothing*) [4]. Dengan menggunakan *smoothing* dapat menekan gangguan yang disebabkan oleh noise. Banyak teknik atau metode yang bisa dilakukan untuk memperbaiki citra digital dengan menggunakan *smoothing*, salah satunya adalah dengan menggunakan metode *Wavelet* [3]. Sebelum *wavelet* berkembang, untuk menganalisa kelakuan gelombang digunakan deret dan transformasi *Fourier*. Contoh di dunia nyata antara lain dalam menganalisis gelombang bunyi, elektromagnetik dan lain-lain. Gelombang tersebut umumnya bukan gelombang periodik sederhana tetapi gelombang-gelombang lokal sehingga tidak mudah didekati dengan deret *Fourier* [5]. Jika bisa didekati maka diperlukan banyak koefisien *Fourier* yang mengakibatkan metode ini menjadi tidak efektif. Sedangkan metode *wavelet* dianggap lebih efektif dari deret *Fourier* karena basis

dalam *wavelet* ditentukan oleh letak dan skalanya sehingga mampu menangani masalah-masalah lokal yang tidak dapat dilakukan oleh *Fourier* [6]. Oleh karena itu pada penelitian ini dipilih teknik pelembutan (*smoothing*) dengan *wavelet* sebagai metode perbaikan kualitas citra.

2. METODOLOGI PENELITIAN

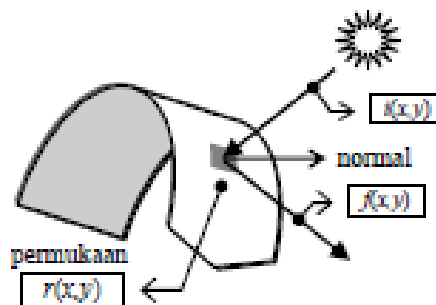
2.1 Pengertian Citra

Citra (foto) adalah gambar pada bidang dua-dimensi, maka sebuah citra merupakan dimensi spasial atau bidang yang berisi informasi warna yang tidak bergantung waktu [7]. Ditinjau dari sudut pandang matematis, citra merupakan fungsi menerus (*continue*) atas intensitas cahaya pada bidang dua dimensi. Sumber cahaya menerangi objek, objek memantulkan kembali seluruh atau sebagian berkas cahaya kemudian ditangkap oleh alat optis atau elektro-optis.

Citra terdiri atas sekumpulan titik-titik gambar, yang disebut piksel. Titik-titik tersebut menggambarkan posisi koordinat dan mempunyai intensitas yang dapat dinyatakan dengan bilangan yang disimbolkan dengan $f(x,y)$, yang dalam hal ini: (x,y) merupakan koordinat pada bidang duadimensi dan $f(x,y)$ intensitas cahaya (*brightness*) pada titik (x,y) [8]. Oleh karena cahaya merupakan bentuk energi, maka intensitas cahaya bernilai antara 0 sampai tak hingga. Nilai $f(x,y)$ sebenarnya adalah hasil kali atas:

- 1) $i(x,y)$ sebagai energi cahaya yang datang dari sumbernya (*illumination*), dengan nilai dari 0 sampai tak hingga, dan
- 2) $r(x,y)$ mewakili derajat kemampuan objek memantulkan cahaya (*reflection*) dengan nilai antara 0 dan 1 yaitu nilai 0 mengindikasikan penyerapan total, sedangkan nilai 1 mengindikasikan pemantulan total.

Pada gambar 1 memperlihatkan proses pembentukan intensitas cahaya. Sumber cahaya menyinari objek, jumlah pancaran cahaya yang diterima objek pada koordinat (x,y) adalah $i(x,y)$, kemudian objek memantulkan cahaya yang diterima dengan derajat pemantulan $r(x,y)$. Hasil kali antara $i(x,y)$ dan $r(x,y)$ menyatakan intensitas cahaya pada koordinat (x,y) yang ditangkap oleh sensor visual pada sistem optik.



Gambar 1. Proses Pembentukan Citra

Prapengolahan citra (*image pre-processing*), proses prapengolahan citra dilakukan untuk mendapatkan citra yang kualitasnya lebih baik daripada citra sebelumnya dengan cara memanipulasi parameter-parameter citra, sehingga menghasilkan bentuk yang lebih cocok terhadap nilai-nilai piksel citra tersebut untuk proses selanjutnya.

2.2 Pencitraan

Pencitraan (*imaging*) adalah kegiatan mengubah informasi dari citra tampak/citra non digital menjadi citra digital. Beberapa alat yang dapat digunakan untuk pencitraan adalah: *scanner*, kamera digital, kamera sinar-x/sinar infra merah [4].

2.3 Pengolahan Citra

Pengolahan Citra adalah kegiatan memperbaiki kualitas citra agar mudah diinterpretasi oleh manusia/mesin (komputer). Inputannya adalah citra dan keluarannya juga citra tapi dengan kualitas lebih baik daripada citra masukan, misal citra warnanya kurang tajam, kabur (*blurring*), mengandung *noise* (misal bintang-bintang putih), dan sebagainya [9]. Sehingga perlu ada pemrosesan untuk memperbaiki citra tersebut yang menjadi sulit diinterpretasikan karena informasi yang disampaikan menjadi berkurang.

2.4 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pengembangan perangkat lunak yang terdiri dari tahap-tahap berikut ini :

1. Observasi Awal
Tahap ini merupakan tahap untuk mengumpulkan referensi tentang perbaikan kualitas citra digital dan penjelasan tentang kasus yang akan diselesaikan. Observasi terhadap variasi *noise* pada citra digital juga diteliti.
2. Analisis kasus

Tahap ini merupakan tahap untuk menganalisis kasus yang diperoleh dari observasi. Pengamatan kasus yang dilanjutkan dengan pencocokan pustaka penyelesaian kasus untuk menyelesaikannya. Pada tahap ini juga dilakukan pemilihan metode perbaikan kualitas citra yang tepat digunakan.

3. Pengumpulan data

Pada tahap ini dilakukan pengambilan citra/foto yang dijadikan sampel. Lokasi pengambilan citra/foto di halaman *indoor* dan *outdoor* Universitas Bhayangkara Surabaya.

4. Perancangan sistem

Pada tahap ini akan dilakukan perancangan sistem untuk memproses citra digital yang akan dilakukan perbaikan kualitas citra dengan teknik *smoothing* menggunakan metode *wavelet*. Hasil prosesnya dapat berupa model yang nantinya digunakan untuk melakukan analisis pengaruh efek *noise* terhadap perbaikan kualitas citra digital.

5. Implementasi sistem

Tahap ini merupakan tahap untuk mengimplementasikan hasil rancangan menjadi perangkat lunak (*software*). Perangkat lunak dikembangkan di komputer, sedangkan hasil kompilasinya berupa file instalasi di perangkat komputer.

6. Pengujian sistem

Tahap ini akan melakukan uji coba dari perangkat lunak yang dibuat. Pengujian dilakukan dengan variasi-variasi diantaranya: percobaan semua fitur yang disediakan, percobaan pada versi sistem operasi berbeda, dan sebagainya.

7. Evaluasi dan perbaikan kesalahan

Tahap pengujian kemudian dijadikan dasar untuk membuat evaluasi dan perbaikan-perbaikan yang diperlukan untuk menghasilkan sistem seperti yang diharapkan. Beberapa versi pada tiap percobaan akan dilakukan untuk menunjukkan status kesiapan perangkat lunak untuk digunakan.

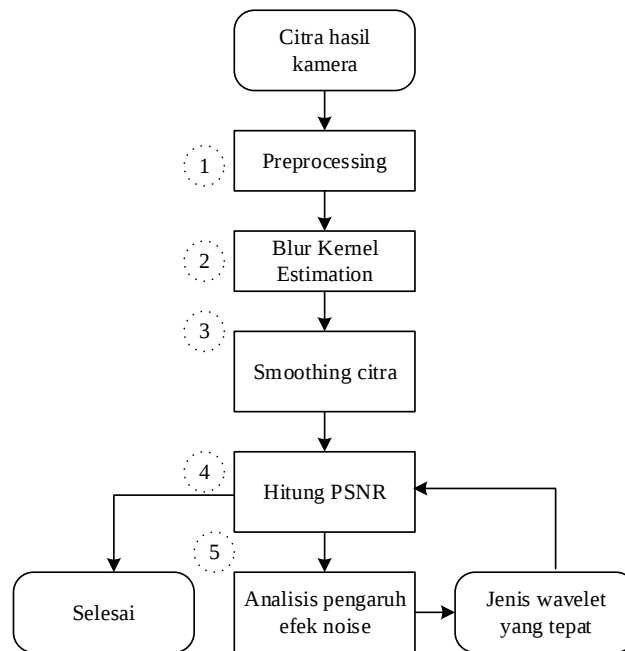
8. Hasil dan penyusunan laporan

Tahap ini akan memberikan hasil dan penyusunan laporan dari penelitian

2.5 Model yang Digunakan

Sistem yang akan dibangun mempunyai arsitektur model seperti pada gambar 2. Diawali dari citra yang diambil dari kamera *smartphone* sebanyak 100 buah dan dari kamera digital sebanyak 100 buah. Citra tersebut dilakukan *preprocessing* (pemrosesan awal) untuk menyesuaikan dengan kebutuhan sistem yang telah dibuat yaitu akan dikonversi ke dalam format BMP dengan ukuran 256x256. Kemudian dilakukan estimasi *blur kernel* untuk memperkirakan standar deviasi σ dari kernel blur. Pada penelitian ini, proses tersebut dilakukan dengan cara mendeteksi pergerakan piksel dari keadaan citra terhadap keadaan sebenarnya dan melakukan perbaikan citra berdasarkan pergerakan piksel. Pendekatan dilakukan dengan mencari faktor penyebab kekaburan citra (*blur kernel*). Faktor penyebab kekaburan biasanya terlihat melalui persebaran cahaya (*Point Spread Function/PSF*) yang terdapat pada citra [10]. PSF sendiri merupakan fungsi matematis yang menggambarkan pengaruh suatu titik pusat cahaya terhadap titik yang lain yang terdapat pada citra [6]. PSF dalam hal ini adalah *Gaussian Blur Kernel*.

Proses berikutnya adalah melakukan perbaikan kualitas citra dengan teknik *smoothing* [11]. Pada penelitian ini teknik *smoothing* dilakukan dengan menggunakan metode *wavelet* yaitu dekomposisi *wavelet* seperti yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Setelah melakukan proses dekomposisi, maka ditentukan koefisien *threshold* untuk proses perbaikan citra [12]. Disini terdapat 3 koefisien yang ditentukan yaitu *threshold*, kasar atau halus, dan aproksimasi. Langkah berikutnya adalah rekonstruksi citra menggunakan tipe *wavelet*. Pada penelitian ini digunakan 3 tipe filter *wavelet* yaitu, *daubechies*, *coiflets*, dan *symlets* untuk mendapatkan perbandingan kualitas hasil perbaikan citra. Pengukuran kualitas hasil perbaikan citra dapat dilakukan dengan menghitung nilai *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR) [10]. Parameter PSNR menunjukkan perbandingan antara nilai maksimum dari sinyal yang diukur dengan besarnya *noise* yang berpengaruh pada sinyal tersebut, diukur dalam satuan desibel (dB). Pada penelitian ini, PSNR digunakan untuk mengetahui kualitas citra hasil restorasi. Semakin besar nilai PSNR berarti semakin bagus hasil restorasi dan kualitas mendekati citra asli. Adapun diagram alirnya dapat digambarkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alur Sistem

2.6 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Penelitian ini menggunakan citra/foto yang diambil dari kamera *smartphone* sebagai masukan utama. Citra yang sudah diambil kemudian akan dilakukan *preprocessing* untuk menyesuaikan dengan kebutuhan sistem yang telah dibuat. Pengambilan citra dilakukan di lapangan maupun di laboratorium sebanyak 200 dataset citra berukuran 256x256 hasil kamera digital dan kamera *smartphone* dengan berbagai rotasi, jarak, fokus, blur, perspektif, dan kondisi cahaya. Dataset tersebut disimulasikan dengan menambahkan *blur noise* pada citra asli menggunakan kernel *blur Gaussian* dan *laplacian* dengan berbagai variasi standar deviasi. Kemudian citra dengan *blur noise* tersebut diperbaiki kualitasnya dengan menerapkan teknik *smoothing* menggunakan metode *wavelet* yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya.

Analisis data primer berupa kualitas citra hasil *smoothing* tersebut kemudian diukur, diperlukan alat ukur yang akan digunakan sebagai parameter. Alat ukur tersebut adalah *Peak Signal to Noise Ratio* (PSNR). Parameter PSNR menunjukkan perbandingan antara nilai maksimum dari sinyal yang diukur dengan besarnya *noise* yang berpengaruh pada sinyal tersebut, diukur dalam satuan desibel (dB) [13]. Pada penelitian ini, PSNR digunakan untuk mengetahui kualitas citra hasil restorasi. Semakin besar nilai PSNR berarti semakin bagus hasil restorasi dan kualitas mendekati citra asli.

Untuk data primer pengujian sistem didapat dengan membandingkan hasil perbaikan kualitas citra terhadap masing-masing jenis *wavelet* dan tingkat *noise* pada citra tersebut, sehingga nantinya akan didapat jenis *wavelet* yang tepat untuk variasi *noise* tertentu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kinerja Filter Berdasarkan PSNR

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR) adalah metrik yang digunakan untuk mengukur kualitas citra hasil rekonstruksi [14]. Nilai PSNR yang lebih tinggi menunjukkan kualitas citra yang lebih baik. Rata-rata PSNR untuk setiap filter pada tiga tingkat noise dapat dilihat pada Tabel 1.

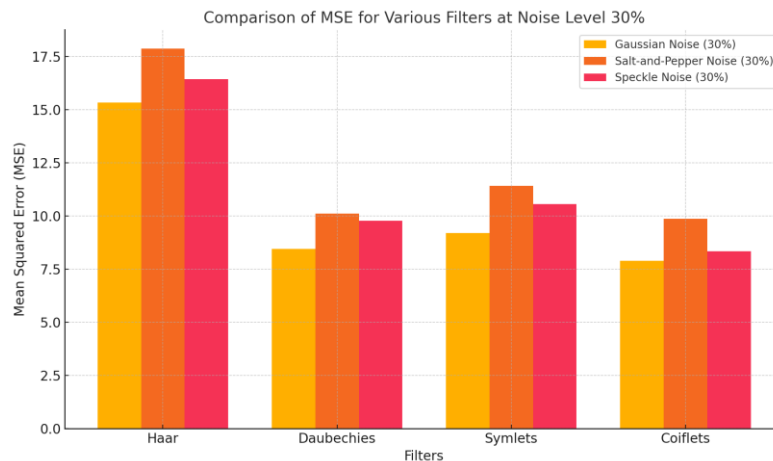
Tabel 1. Rata-rata Nilai PSNR

Filter	Gaussian Noise (30%)	Salt-and-Pepper Noise (30%)	Speckle Noise (30%)
Haar	25.67	23.45	24.12
Daubechies	29.34	27.89	28.45
Symlets	28.12	26.75	27.34
Coiflets	30.21	28.45	29.12

Dari hasil ini, filter Coiflets menunjukkan performa terbaik pada semua jenis noise dengan rata-rata PSNR tertinggi.

3.2 Analisis Kinerja Filter Berdasarkan MSE

Mean Square Error (MSE) digunakan untuk mengukur rata-rata kesalahan kuadrat antara citra asli dan citra hasil rekonstruksi [15]. Semakin kecil nilai MSE, semakin baik kualitas citra. Grafik pada Gambar 3 menunjukkan perbandingan nilai MSE untuk setiap filter.



Gambar 3. Perbandingan Nilai MSE

3.3 Analisis Kinerja Filter Berdasarkan SSIM

Structural Similarity Index Measure (SSIM) digunakan untuk mengevaluasi kesamaan struktural antara citra asli dan citra hasil rekonstruksi [16]. Tabel 2 memperlihatkan nilai SSIM rata-rata.

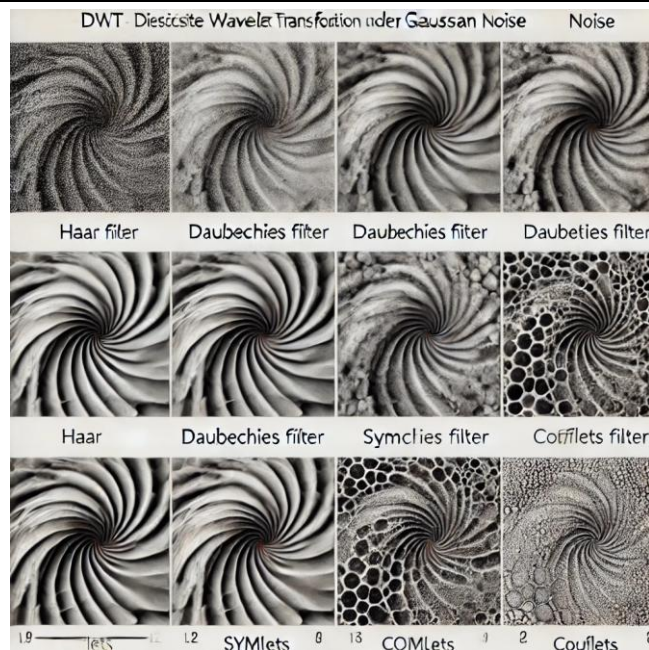
Tabel 2. Rata-rata Nilai SSIM

Filter	Gaussian Noise (30%)	Salt-and-Pepper Noise (30%)	Speckle Noise (30%)
Haar	0.82	0.79	0.80
Daubechies	0.89	0.87	0.88
Symlets	0.85	0.83	0.84
Coiflets	0.91	0.89	0.90

3.4 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan filter dalam DWT memiliki dampak signifikan terhadap kualitas citra hasil rekonstruksi. Beberapa temuan penting dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Efisiensi Filter *Coiflets*; Filter *Coiflets* secara konsisten menunjukkan performa yang superior dibandingkan filter lainnya. Hal ini disebabkan oleh kemampuan filter *Coiflets* dalam menjaga keseimbangan antara detail citra dan pengurangan *noise*.
2. Kinerja *Daubechies* pada *Noise Gaussian*; Filter *Daubechies* menunjukkan performa yang baik pada *noise Gaussian* dengan PSNR yang hampir mendekati *Coiflets*. Hal ini menunjukkan bahwa struktur *Daubechies* cocok untuk menangani distribusi *noise* yang lebih halus.
3. Kelemahan Filter *Haar*; Filter *Haar* memiliki performa yang lebih rendah dibandingkan filter lainnya, terutama pada citra dengan *noise* kompleks seperti *speckle*. Hal ini disebabkan oleh sifat filter *Haar* yang kurang mampu menangani detail frekuensi tinggi.
4. Peran SSIM dalam Penilaian Subjektif; SSIM memberikan perspektif yang lebih mendalam terhadap kualitas visual citra. Filter *Coiflets* menunjukkan skor SSIM yang lebih tinggi, menunjukkan kemampuannya untuk mempertahankan struktur visual yang mirip dengan citra asli.
5. Visualisasi Citra; Hasil visualisasi citra menunjukkan perbedaan yang mencolok pada detail yang dipertahankan oleh setiap filter. Gambar 4 memperlihatkan contoh citra hasil rekonstruksi dengan masing-masing filter pada *noise Gaussian*.



Gambar 4. Contoh Citra Hasil Rekonstruksi Berbagai Filter DWT

4. KESIMPULAN

Penelitian ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa pemilihan filter dalam metode *Discrete Wavelet Transformation* (DWT) memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kualitas citra hasil rekonstruksi. Berdasarkan analisis metrik PSNR, MSE, dan SSIM, filter *Coiflets* terbukti menjadi filter yang paling efektif dalam mereduksi *noise* sekaligus mempertahankan detail citra. Filter ini mampu menghasilkan nilai PSNR dan SSIM yang tertinggi pada semua jenis *noise* yang diuji, seperti *Gaussian*, *salt-and-pepper*, dan *speckle noise*. Hal ini mengindikasikan bahwa struktur matematis *Coiflets* sangat sesuai untuk menangani distribusi *noise* yang kompleks sekaligus menjaga integritas citra. Sebagai filter kedua terbaik, *Daubechies* menunjukkan performa yang mendekati *Coiflets*, terutama pada citra dengan *noise Gaussian*. Di sisi lain, filter *Haar*, meskipun sederhana dan cepat dalam komputasi, tidak mampu mempertahankan detail citra yang kompleks, terutama pada citra dengan *noise speckle*.

Hasil penelitian ini tidak hanya memberikan panduan praktis dalam memilih filter DWT yang optimal tetapi juga memberikan wawasan teoritis untuk pengembangan algoritma pemrosesan citra yang lebih baik. Studi ini dapat menjadi acuan bagi pengembangan aplikasi citra digital di bidang medis, penginderaan jauh, dan multimedia, yang membutuhkan peningkatan kualitas citra dengan presisi tinggi.

REFERENCES

- [1] R. C. Gonzalez, *Digital image processing*. Pearson education india, 2009.
- [2] Z. Wang dan A. C. Bovik, "A universal image quality index," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 9, no. 3, hlm. 81–84, 2002.
- [3] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, hlm. 674–693, 1989.
- [4] A. SAID, "A New, Fast, and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees," *IEEE Trans Circ Syst*, vol. 10, no. 8, hlm. 1374–1387, 2000.
- [5] G. Strang, *Wavelets and Filter Banks*. Wellesley-Cambridge Press, 1996. Diakses: 23 Desember 2024. Tersedia pada: https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=Z76N_Ab5pp8C&oi=fnd&pg=PR9&dq=G.+Strang+and+T.+Nguyen,+%22Wavelets+and+Filter+Banks,%22+Wellesley-Cambridge+Press,+1996.&ots=qYQPcq0x8_&sig=d16rqANeCg4uzIOx3_AMy6ns3Po
- [6] P. K. de M. M. Freire, C. A. G. Santos, dan G. B. L. da Silva, "Analysis of the use of discrete wavelet transforms coupled with ANN for short-term streamflow forecasting," *Appl. Soft Comput.*, vol. 80, hlm. 494–505, 2019.

- [7] R. Gonydjaja, *Pengantar Pengolahan Citra Digital*. Penerbit P4I, 2023.
- [8] T. Blu, P. Thévenaz, dan M. Unser, "Linear interpolation revitalized," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 13, no. 5, hlm. 710–719, 2004.
- [9] S. Sumijan dan P. A. W. Purnama, "Teori dan Aplikasi Pengolahan Citra Digital Penerapan dalam Bidang Citra Medis." PENERBIT INSAN CENDEKIA MANDIRI, 2021.
- [10] M. Moradi, "Wavelet transform approach for denoising and decomposition of satellite-derived ocean color time-series: Selection of optimal mother wavelet," *Adv. Space Res.*, vol. 69, no. 7, hlm. 2724–2744, 2022.
- [11] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. doi: 10.1137/1.9781611970104.
- [12] A. A. Al-Taee, R. N. Khushaba, T. Zia, dan A. Al-Jumaily, "Feature Extraction Using Wavelet Scattering Transform Coefficients for EMG Pattern Classification," dalam *AI 2021: Advances in Artificial Intelligence*, vol. 13151, G. Long, X. Yu, dan S. Wang, Ed., dalam Lecture Notes in Computer Science, vol. 13151. , Cham: Springer International Publishing, 2022, hlm. 181–189. doi: 10.1007/978-3-030-97546-3_15.
- [13] H. K. Sawant dan Z. Jalali, "Detection and classification of EEG waves," *Orient. J. Comput. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, hlm. 207–213, 2010.
- [14] M. Orkisz dan A. Szewczuk, "Spectrum shape based roller bearing fault detection," dalam *2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, IEEE, 2019, hlm. 371–376. Diakses: 23 Desember 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8864888/>
- [15] M. Unser, "Texture classification and segmentation using wavelet frames," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 4, no. 11, hlm. 1549–1560, 1995.
- [16] P. K. D. M. M. Freire dan C. A. G. Santos, "Optimal level of wavelet decomposition for daily inflow forecasting," *Earth Sci. Inform.*, vol. 13, no. 4, hlm. 1163–1173, Des 2020, doi: 10.1007/s12145-020-00496-z.