

Pendekatan *Denoising* Hibrid untuk Pengenalan Aksara Jawa: Upaya Integrasi Teknologi dan Pelestarian Budaya Digital

Aji Priyambodo^{1, *}, Prihati¹

¹ Program Studi Sistem dan Teknologi Informasi, Institut Teknologi dan Bisnis Semarang, Indonesia

* Correspondence: priyambodo@itbsemarang.ac.id

Copyright: © 2025 by the authors

Received: 25 September 2025 | Revised: 16 Oktober 2025 | Accepted: 25 November 2025 | Published: 6 Desember 2025

Abstrak

Digitalisasi naskah beraksara Jawa masih terkendala oleh degradasi citra seperti *bleed-through*, noda, blur, dan iluminasi tidak merata yang menghilangkan detail grafem halus serta mengganggu stabilitas gradien, sehingga menurunkan akurasi *optical character recognition* (OCR). Dalam konteks pelestarian manuskrip sebagai bagian dari *computational heritage preservation*, isu ini menjadi krusial karena representasi visual yang terdistorsi berpotensi melemahkan integritas arsip digital. Penelitian ini bertujuan menerapkan dan mengevaluasi pendekatan *Structural-Preserving Denoising* (SPD) sebagai prapemrosesan yang dirancang untuk menjaga kontur dan struktur grafem selama peredaman *noise*. Penelitian menggunakan desain komparatif-eksperimental dengan variabel bebas enam teknik *denoising* (Wavelet, Bilateral, *Non-Local Means* (NLM), dan tiga hibrida) serta variabel terikat PSNR, SSIM, dan akurasi OCR. Dataset mencakup 4.632 citra aksara Jawa terdegradasi berukuran 64×64 piksel, diekstraksi menggunakan *Histogram of Oriented Gradients* (HOG) dan diklasifikasikan dengan *Support Vector Machine* (SVM) ber-kernel kosinus. Analisis meliputi evaluasi komparatif, analisis kesalahan, dan korelasi Pearson. Hasil temuan kami adalah bahwa *Bilateral Filtering* memberikan performa paling konsisten (SSIM 0,9108; PSNR 29,85 dB; akurasi 96,97%). Hasil temuan ini menunjukkan bahwa pelestarian struktur grafem berkontribusi langsung terhadap peningkatan akurasi OCR. Penelitian ini menawarkan kontribusi teoretis melalui kerangka SPD dan kontribusi praktis berupa rekomendasi *pipeline* prapemrosesan yang relevan bagi digitalisasi naskah tradisional.

Kata kunci: aksara jawa; *denoising hybrid*; *heritage computer vision*; pelestarian budaya digital; *structural-preserving denoising*

Abstract

The digitization of Javanese manuscripts is hindered by image degradation such as bleed-through, stains, blur, and uneven illumination that obscures fine graphemic details and reduces the reliability of optical character recognition (OCR). This challenge is significant for computational heritage preservation, as degraded visual inputs threaten the accuracy and longevity of digital cultural archives. This study applies and evaluates a Structural-Preserving Denoising (SPD) approach designed to retain graphemic contours during noise reduction. Using a comparative-experimental design, six denoising methods (Wavelet, Bilateral, Non-Local Means/NLM, and three hybrids) were tested as independent variables, with PSNR, SSIM, and OCR accuracy as dependent variables. A dataset of 4,632 degraded Javanese character images (64×64 pixels) was processed using Histogram of Oriented Gradients and classified via a cosine-kernel Support Vector Machine. Analyses included comparative evaluation, error analysis, and Pearson correlation. Results show that Bilateral Filtering achieved the best balance of structural preservation and recognition performance (SSIM 0.9108; PSNR 29.85 dB, accuracy 96.97%). The strong correlation between visual quality and OCR accuracy indicates that maintaining graphemic structure is crucial for robust recognition. The study contributes a theoretical SPD framework and a practical preprocessing pipeline applicable to the digital preservation of traditional scripts.



Keywords: *digital cultural preservation; hybrid denoising; heritage computer vision; javanese script; structural-preserving denoising*

PENDAHULUAN

Pelestarian naskah beraksara Jawa merupakan bagian penting dari upaya mempertahankan warisan budaya tulis sekaligus mendukung agenda global *computational heritage preservation* (Pratama & Ratnasari, 2024). Dalam konteks pengolahan citra digital, keberhasilan *optical character recognition* (OCR) sangat ditentukan oleh kualitas struktural citra, khususnya konsistensi kontur dan integritas grafem sebagai dasar ekstraksi fitur. Manuskrip tradisional umumnya mengalami degradasi fisik seperti *bleed-through*, noda, *smear*, *blur*, dan iluminasi tidak merata yang merusak detail grafemis serta menurunkan reliabilitas representasi fitur berbasis gradien (Bataineh et al., 2025; Rosalina et al., 2024). Kondisi tersebut menimbulkan tantangan serius dalam digitalisasi aksara Jawa yang secara morfologis memiliki struktur kurvilinear kompleks (Salehudin et al., 2023), sandhangan berukuran kecil, serta kemiripan antar-grafem yang tinggi sehingga lebih rentan terhadap distorsi dibandingkan skrip lain seperti Latin maupun Arab (Anggraeny et al., 2023; Anuradha et al., 2021; Damayanti et al., 2024).

Pendekatan restorasi citra telah banyak dikembangkan untuk naskah tradisional di berbagai skrip, misalnya karya El Khayati et al. (2024) pada naskah Arab, Kaneko et al. (2023) pada naskah Jepang, Zhang et al. (2025) pada aksara Mongolian, dan Ruldeviyani et al. (2024) pada Pegon, serta Siahaan et al. (2022) dan pada naskah Bali. Seluruh penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan OCR sangat ditentukan oleh efektivitas prapemrosesan, terutama teknik denoising yang mempertahankan struktur tepi. Namun, sebagian besar studi tersebut menggunakan citra yang relatif bersih sehingga belum memberikan gambaran komprehensif mengenai bagaimana metode denoising bekerja pada naskah yang terdegradasi secara nyata. Selain itu, penelitian sebelumnya (Anggraeny et al., 2023; Damayanti et al., 2024; Gonwirat & Surinta, 2022) pada aksara Jawa belum secara sistematis menghubungkan kualitas struktural hasil restorasi dengan stabilitas fitur gradien seperti HOG ataupun akurasi OCR.

Beberapa metode denoising menawarkan mekanisme pelestarian struktur grafem yang berbeda. Bilateral Filtering mempertahankan tepi melalui *edge-preserving smoothing*, sedangkan Non-Local Means (NLM) menjaga struktur visual melalui kesamaan patch non-lokal (Boudraa et al., 2024). Sementara itu, Wavelet Thresholding menekan noise pada domain frekuensi dan banyak digunakan dalam restorasi naskah, tetapi berpotensi menghapus detail berenergi rendah yang penting bagi aksara berskala kecil. Kombinasi metode tersebut membuka ruang bagi pendekatan hibrida yang dapat menyeimbangkan reduksi noise dan pelestarian kontur. Berdasarkan landasan tersebut, penelitian ini mengusulkan kerangka *Structural-Preserving Denoising* (SPD), yaitu paradigma prapemrosesan yang menekankan kontinuitas kontur dan stabilitas orientasi gradien sebagai prasyarat keberhasilan OCR, sejalan dengan berkembangnya arsitektur *script-aware* seperti HierCode (Zhang et al., 2025), SARN (Ke et al., 2024), serta model interpretatif seperti MetaChara dan FAIR-Net (Ge et al., 2025; Sun et al., 2023).

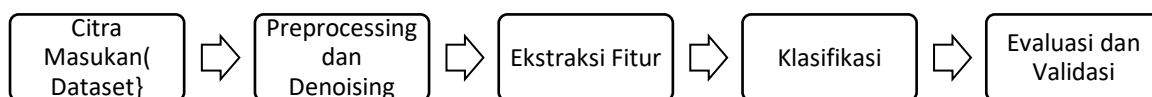
Berdasarkan hasil temuan sebelumnya, belum terdapat studi komparatif yang secara sistematis menilai efektivitas metode denoising klasik dan hibrida pada citra aksara Jawa yang terdegradasi secara nyata. Selain itu, belum ada penelitian yang menjelaskan hubungan fungsional antara pelestarian kontur grafem dengan stabilitas fitur HOG dan akurasi OCR. Sementara itu, tidak tersedia kerangka evaluasi terintegrasi yang menggabungkan metrik kualitas visual (PSNR, SSIM) dengan performa pengenalan huruf. Serta temuan sebelumnya juga mengenai tantangan klasifikasi pada grafem morfologis serupa seperti pasangan *da–dha* dan *ta–tha* belum dibahas secara eksplisit, padahal sangat bergantung pada pemeliharaan detail mikro. Hal ini semakin penting mengingat kajian restorasi naskah masih didominasi

pendekatan *deep learning*, sementara efektivitas metode klasik yang lebih efisien komputasi belum sepenuhnya dieksplorasi (Mao et al., 2025).

Berdasarkan hasil kajian dari temuan sebelumnya, penelitian ini bertujuan mengevaluasi enam metode denoising Wavelet, Bilateral, NLM, serta tiga konfigurasi hibrida pada dataset aksara Jawa terdegradasi, serta menguji keterkaitan antara kualitas visual hasil denoising dengan performa OCR menggunakan metrik PSNR, SSIM, akurasi, presisi, recall, dan F1-score. Penelitian ini juga menguji pelestarian struktur grafem berkontribusi langsung terhadap stabilitas fitur berbasis gradien, dan selanjutnya merumuskan kerangka SPD sebagai landasan konseptual bagi digitalisasi aksara tradisional. Hasil temuan ini dapat mengaitkan pelestarian struktur grafem dengan performa OCR, menyediakan pipeline evaluasi empiris yang mengintegrasikan metrik visual dan metrik klasifikasi, serta dapat dijadikan rekomendasi metode denoising terbaik untuk kebutuhan digitalisasi arsip budaya yang menuntut akurasi tinggi dan efisiensi komputasi.

METODE

Penelitian ini menggunakan rancangan komparatif-eksperimental untuk menilai pengaruh teknik *denoising* terhadap kinerja klasifikasi aksara Jawa, dengan kondisi kontrol tanpa *denoising* sebagai pembanding. Variabel bebas adalah jenis *denoising*, sedangkan variabel terikat mencakup metrik kualitas citra (PSNR, SSIM) dan metrik OCR (akurasi, presisi, *recall*, *F1-score*). Seluruh eksperimen menjaga parameter ekstraksi fitur dan pengklasifikasi tetap konsisten, menggunakan pembagian data berstrata dengan benih acak yang sama, serta prosedur validasi identik.



Gambar 1. Alur penelitian

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, alur penelitian disusun secara sistematis mulai dari akuisisi citra masukan, tahapan prapemrosesan dan penerapan skema *denoising*, kemudian ekstraksi fitur menggunakan HOG, pengklasifikasian melalui SVM ber-kernel kosinus, serta evaluasi dan validasi kinerja model.

Dataset terdiri atas 4.619 citra aksara dari dua repositori Kaggle (Hanacaraka Dataset dan Aksara Jawa Dataset) yang tidak mengalami kurasi manual, sehingga seluruh *noise* alami seperti *bleed-through*, noda, blur, dan variasi iluminasi dipertahankan untuk menjaga *ecological validity*. Dua puluh aksara nglegena dipilih karena merupakan inti sistem tulisan Jawa dan memiliki kompleksitas kontur yang tinggi serta kemiripan bentuk antar-grafem. Distribusi kelas relatif seimbang (± 170 -237 citra). Pembagian data menggunakan *stratified* 80:20. Pendekatan ini dapat digeneralisasi untuk aksara tradisional lain seperti Bali, Pegon, dan Batak yang memiliki kompleksitas grafem serupa.

Tahap *preprocessing* dibatasi pada konversi ke *grayscale*, penyesuaian ukuran ke 64×64 piksel, dan penyesuaian proporsi citra non-persegi. Tidak dilakukan normalisasi intensitas, *histogram equalization*, ataupun augmentasi, sehingga karakteristik *noise* alami tetap dipertahankan dalam format uint8 (0-255). Normalisasi hanya diterapkan pada fitur HOG menggunakan *StandardScaler* setelah proses ekstraksi fitur, untuk menstandarkan distribusi fitur sebelum klasifikasi SVM.

Tahap *denoising* mencakup evaluasi terhadap tiga metode tunggal dan tiga konfigurasi berantai terhadap kontrol. *Wavelet Thresholding* menekan komponen berfrekuensi tinggi pada *grayscale* (*channel_axis=None*, *rescale_sigma=True*), jenis wavelet menggunakan *Daubechies* dengan *soft-thresholding*. Bilateral filter diterapkan sebagai penapis pelestari tepi

($d=9$, $\sigma_{\text{Color}}=75$, $\sigma_{\text{Space}}=75$) sehingga area homogen dihaluskan tanpa menggerus kontur. *Non-Local Means* (NLM) memanfaatkan kemiripan *patch* non-lokal ($h=1.15 \times \text{estimate_sigma}$, $\text{fast_mode}=\text{True}$, $\text{channel_axis}=\text{None}$, $\text{patch_size}=5$, $\text{patch_distance}=6$). Semua parameter dipilih berdasarkan uji pendahuluan untuk menyeimbangkan kualitas dan waktu komputasi. Metode hibrida menggunakan urutan Wavelet-NLM, Wavelet-Bilateral, dan Bilateral-NLM sebagai *sequential cascade* untuk menggabungkan keunggulan domain frekuensi, spasial, dan *patch-based*.

Langkah berikutnya adalah ekstraksi ciri menggunakan *Histogram of Oriented Gradients*. HOG digunakan karena stabil untuk struktur grafem kurvilinear dan efektif pada citra beresolusi rendah, dengan ukuran sel 8×8 , ukuran blok 2×2 , 9 orientasi, dan normalisasi *StandardScaler*. Klasifikasi dilakukan menggunakan *Support Vector Machine* dengan kernel kosinus, yang selaras dengan sifat HOG berbasis arah gradien sehingga kesamaan orientasi lebih bermakna dibandingkan jarak *Euclidean*, linear, maupun RBF, efektivitas pendekatan ini telah dilaporkan pada tugas yang menekankan kontur dan orientasi (Rahman & Islam, 2022). Implementasi perangkat lunak memanfaatkan *scikit-learn*, *OpenCV*, dan *NumPy*.

Evaluasi mencakup PSNR, SSIM, akurasi, presisi, *recall*, *F1-score*, *confusion matrix*, dan korelasi Pearson. Normalitas diuji menggunakan Shapiro-Wilk. ANOVA digunakan jika asumsi terpenuhi, jika tidak, digunakan Kruskal-Wallis. Uji lanjut menggunakan Tukey's HSD dan ukuran efek dilaporkan dengan *eta-squared*. Validasi dilakukan dengan 10-fold CV, dengan tiap *fold* memuat ± 3.695 citra latih dan ± 924 citra uji. Ketidakpastian dievaluasi melalui bootstrapping 1.000 permutasi untuk membangun interval kepercayaan 95%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Evaluasi kualitas *denoising* (Tabel 1) menunjukkan bahwa Bilateral dan Bilateral-NLM menghasilkan SSIM tertinggi ($\approx 0,91$), sedangkan keluarga Wavelet berada pada kisaran lebih rendah ($\approx 0,81$). Hal ini mengindikasikan bahwa filter *edge-preserving* dan pendekatan *patch-based* lebih mampu mempertahankan struktur kontur dan detail halus yang relevan bagi fitur berbasis gradien. Nilai PSNR sangat tinggi pada kondisi tanpa *denoising* dan NLM ($\approx 999,999$ dB) merefleksikan nilai sentinel mendekati tak terhingga karena ketiadaan citra acuan bersih, oleh sebab itu interpretasi PSNR dilakukan secara relatif dan nilai tak terhingga diperlakukan secara konservatif. Dalam kerangka tersebut, Bilateral dan Bilateral-NLM menonjol sebagai metode dengan kualitas visual paling konsisten di antara konfigurasi yang dapat dibandingkan secara bermakna.

Tabel 1. Evaluasi kualitas *denoising* (psnr dan ssim)

Metode	PSNR (dB)	SSIM
tanpa <i>denoising</i>	999,9990	1,0000
wavelet	25,4863	0,8082
bilateral	29,8579	0,9108
nlm	999,9990	1,0000
wavelet_nlm	25,4817	0,8076
wavelet_bilateral	25,3993	0,8116
bilateral_nlm	29,8658	0,9110

Performa klasifikasi global (Tabel 2) memperlihatkan bahwa tanpa *denoising*, Bilateral, dan Bilateral-NLM mencapai akurasi tertinggi (0,9697) dengan *precision*, *recall*, dan *F1-score* yang seimbang. NLM murni sedikit lebih rendah (0,9665), sedangkan keluarga Wavelet (Wavelet, Wavelet-NLM, Wavelet-Bilateral) konsisten berada di bawah ($\approx 0,948$ -0,959).

Analisis per kelas (Tabel 3) mengungkapkan bahwa beberapa aksara seperti ba, ca, la, na, nga, ta, dan ya mencapai *F1-score* sempurna (1,00), menandakan bentuk grafem yang stabil

dan relatif mudah dipisahkan. Sebaliknya, kelas da dan dha menunjukkan *F1-score* lebih rendah ($\approx 0,88-0,90$), yang menunjukkan tingkat kemiripan bentuk tinggi dan kerentanan terhadap hilangnya detail halus akibat *smoothing*. Kelas lain seperti ma, ga, sa, dan tha berada pada rentang menengah dengan *F1-score* tinggi tetapi tidak sempurna.

Tabel 2. Evaluasi performa klasifikasi

Metode	<i>Accuracy</i>	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>
tanpa <i>denoising</i>	0,9697	0,9712	0,9697	0,9694
wavelet	0,9502	0,9516	0,9502	0,9496
bilateral	0,9697	0,9716	0,9697	0,9696
Nlm	0,9665	0,9686	0,9665	0,9662
wavelet nlm	0,9481	0,9510	0,9481	0,9480
wavelet bilateral	0,9589	0,9614	0,9589	0,9585
bilateral nlm	0,9697	0,9716	0,9697	0,9696

Tabel 3. Performa per kelas

Kelas Aksara Jawa	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>F1-score</i>	Support
Ba	1	1	1	54
Ca	1	1	1	59
Da	0,853659	0,897436	0,875	39
Dha	1	0,82	0,901099	50
Ga	1	0,931818	0,964706	44
Ha	0,93617	1	0,967033	44
Ja	1	0,9375	0,967742	48
Ka	0,941176	1	0,969697	48
La	1	1	1	54
Ma	0,878049	1	0,935065	36
Na	1	1	1	42
Nga	1	1	1	48
Nya	1	0,9375	0,967742	48
Pa	0,955556	1	0,977273	43
Ra	0,931818	1	0,964706	41
Sa	0,93617	0,93617	0,93617	47
Ta	1	1	1	46
Tha	1	0,930233	0,963855	43
Wa	0,928571	1	0,962963	39
Ya	1	1	1	51

Ringkasan kesalahan klasifikasi (Tabel 4) menunjukkan pola yang serupa: Wavelet-NLM dan Wavelet menghasilkan jumlah kesalahan tertinggi (48 dan 46), sementara Tanpa *Denoising*, Bilateral, dan Bilateral-NLM hanya menghasilkan 28 kesalahan. Dari sisi efisiensi, Bilateral paling cepat ($\approx 0,0007$ s per citra), NLM paling lambat ($\approx 0,0172$ s), sedangkan Bilateral-NLM menawarkan kompromi kualitas-waktu yang baik.

Analisis statistik (Tabel 5) menunjukkan bahwa perbedaan performa antar-metode signifikan secara global. Hasil ANOVA atas nilai akurasi antar-*fold* menunjukkan F sebesar 3,2869 dengan nilai p sebesar 0,0071 dan ukuran efek *eta squared* (η^2) sebesar 0,2384 yang mengindikasikan pengaruh besar. Namun, uji lanjut Tukey tidak menemukan perbedaan signifikan antar-pasangan setelah koreksi *family wise* sehingga perbedaan terutama mencerminkan pola kecenderungan, bukan perbedaan tegas antar-metode.

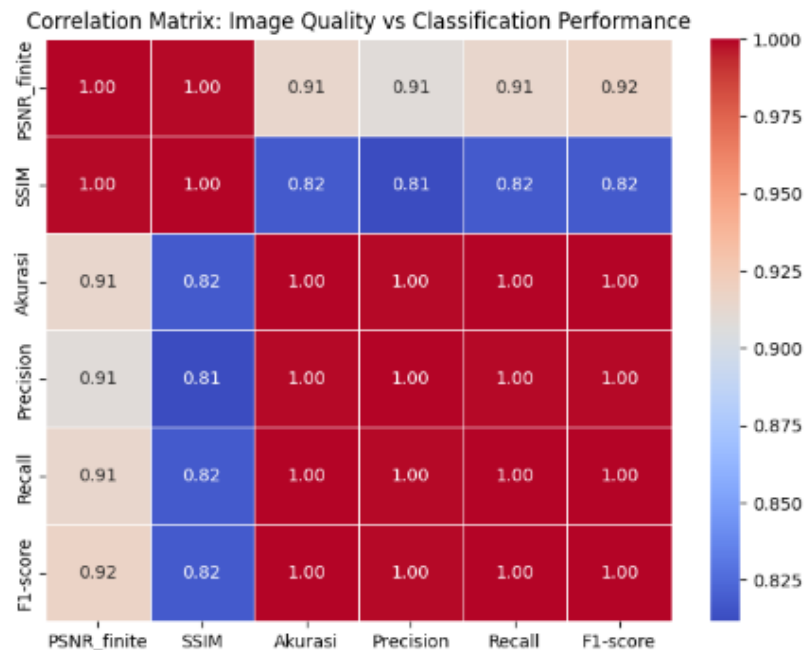
Tabel 4. Ringkasan kesalahan klasifikasi

Metode <i>Denoising</i>	Jumlah Kesalahan
Tanpa <i>Denoising</i>	28
wavelet	46
bilateral	28
nlm	31
wavelet_nlm	48
wavelet_bilateral	38
bilateral_nlm	28

Tabel 5. Analisa statistik

Sumber Variasi	df	F	p	η^2
Antarmetode	6	3,2869	0,0071	0,2384

Analisis korelasi (Gambar 2) menunjukkan hubungan positif kuat antara metrik kualitas citra dan akurasi. SSIM berkorelasi signifikan dengan akurasi ($r = 0,82$), sedangkan PSNR setelah nilai tak terhingga diatasi secara konservatif memiliki korelasi lebih tinggi lagi ($r = 0,91$). Korelasi ini mendukung hipotesis bahwa keberhasilan *denoising* tidak hanya ditentukan oleh reduksi *noise*, tetapi terutama oleh pelestarian struktur grafem yang penting bagi deskriptor HOG.



Gambar 2. Korelasi metrik visual dan metrik klasifikasi



Gambar 3. Contoh *over-smoothing* artefak

Analisis visual gambar 3 menampilkan contoh aksara “pa” yang diproses dengan beberapa metode *denoising*. Pemrosesan berbasis Wavelet mengubah grafem menjadi blok-

blok intensitas yang tidak lagi merepresentasikan bentuk aslinya, sehingga model salah mengklasifikasikan sebagai “ma”. Sebaliknya, Bilateral dan NLM mempertahankan kontur dan kurva utama aksara sehingga struktur grafem tetap terbaca dan prediksi model konsisten dengan label “pa”, yang menegaskan pentingnya pelestarian struktur dibanding sekadar penekanan *noise*.

Analisis visual gambar 4 memperlihatkan citra rata-rata dan peta tepi beberapa kelas aksara pada kondisi *baseline* dan setelah pemrosesan Bilateral. Pada *baseline*, *edge map* menunjukkan pola tepi yang lebih acak dan terfragmentasi, sedangkan hasil Bilateral menampilkan kontur yang lebih kontinu dengan *noise* latar yang lebih rendah. Secara visual, Bilateral menghasilkan struktur tepi yang lebih stabil dan terdefinisi, sebagaimana terlihat dari konsistensi bentuk grafem pada *mean image* dan pola *edge response* yang lebih terorganisasi.



Gambar 4. Analisis karakteristik grafem

Cross-validation dan *bootstrapping* menghasilkan interval kepercayaan akurasi yang relatif sempit dan saling tumpang tindih, sehingga performa tiap metode dapat dianggap stabil antar-*fold*. Dengan demikian, perbedaan global terutama muncul sebagai kecenderungan kelompok Wavelet berada di bawah Bilateral dan Bilateral-NLM, meskipun selisihnya belum melampaui ambang signifikansi pada tingkat pasangan.

Pembahasan

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa keberhasilan prapemrosesan pada OCR aksara Jawa bergantung pada kemampuan metode *denoising* dalam mempertahankan struktur grafem, termasuk kontur kurvilinear, sandhangan kecil, dan pola orientasi gradien yang menjadi fondasi representasi diagnostik. Pendekatan *edge-preserving* seperti *Bilateral Filtering* dan *patch-based* seperti *Non-Local Means* (NLM) menunjukkan kinerja unggul karena mampu menjaga kontinuitas tepi serta stabilitas gradien lokal, selaras dengan temuan lintas-skrup pada naskah Arab, Jepang, Mongolia, Pegon, dan Bali (El Khayati et al., 2024; Kaneko et al., 2023; Ruldeviyani et al., 2024; Siahaan et al., 2022; Zhang et al., 2025), serta sejalan dengan penelitian restorasi dokumen tradisional yang mengintegrasikan *denoising* dalam *pipeline* pengenalan karakter (Gonwirat & Surinta, 2022; Maheswari et al., 2024). Mekanisme ini memperkuat integritas fitur berbasis HOG, yang sensitif terhadap pola orientasi dan struktur kontur.

Sebaliknya, metode berbasis Wavelet menunjukkan keterbatasan akibat proses *thresholding* yang menghilangkan detail berenergi rendah seperti kurva sempit, serif tipis, dan dinamika sandhangan. Hilangnya komponen multiskala ini menyebabkan attenuasi gradien dan pendataran orientasi, sehingga ruang fitur menjadi kurang diskriminatif. Fenomena ini diperjelas oleh artefak *over-smoothing* yang menyebabkan terputusnya kontur diagnostik yang diperlukan untuk membedakan grafem berdekatan yang terlihat pada visualisasi, ketika kontur diagnostik terputus dan menyebabkan salah klasifikasi, terutama pada grafem yang morfologinya berdekatan. Kerusakan struktural yang terjadi pada tahap awal transformasi Wavelet juga menjelaskan mengapa konfigurasi hibrida seperti Wavelet-NLM atau Wavelet-

Bilateral gagal memberikan peningkatan: sinyal yang terdistorsi tidak dapat dipulihkan oleh mekanisme *patch-based* ataupun *edge-preserving*.

Analisis per kelas memperlihatkan bahwa aksara dengan struktur stabil (ba, ca, la, nga, ya) menghasilkan performa tinggi, sedangkan pasangan mirip seperti da-dha atau ta-tha rentan mengalami kesalahan ketika detail mikro terhilang akibat *smoothing*. Pola ini konsisten dengan laporan lintas-skrip bahwa huruf berkontur rapat atau kurvilinear kompleks merupakan penyebab dominan kesalahan OCR.

Analisis statistik memberikan dukungan inferensial terhadap temuan empiris. Hasil ANOVA menunjukkan perbedaan signifikan secara global antar-metode, walaupun uji lanjut Tukey tidak menemukan perbedaan signifikan antar-pasangan setelah koreksi *family-wise*. Hal ini mengindikasikan bahwa pola superioritas Bilateral dan Bilateral-NLM konsisten tetapi belum mencapai perbedaan tegas pada tingkat pasangan. *Cross-validation* dan *bootstrapping* menghasilkan interval kepercayaan yang sempit dan saling tumpang tindih, menunjukkan stabilitas performa model di seluruh subset data.

Keterkaitan antara kualitas visual dan performa OCR tercermin dari korelasi kuat antara SSIM dan akurasi, sedangkan PSNR hanya dapat ditafsirkan secara relatif. SSIM lebih sensitif terhadap kontinuitas kontur dan struktur lokal, sehingga menjadi prediktor yang lebih relevan bagi sistem berbasis gradien. Visualisasi menunjukkan bahwa Bilateral mempertahankan peta tepi dan struktur bentuk lebih baik daripada baseline atau Wavelet, sehingga mendukung stabilitas HOG.

Efisiensi komputasi menunjukkan bahwa NLM memiliki latensi tertinggi akibat pencarian *patch* non-lokal yang kompleks (Guo et al., 2021), sedangkan Bilateral menawarkan keseimbangan optimal antara kecepatan dan stabilitas struktur, selaras dengan temuan restorasi naskah Arab dan Devanagari (El Khayati et al., 2024). Bilateral-NLM muncul sebagai kompromi kualitas-waktu yang sesuai untuk digitalisasi arsip berkualitas tinggi.

Temuan ini juga berhubungan dengan perkembangan model *script-aware* seperti HierCode dan SARN serta pendekatan interpretabilitas seperti MetaChara dan FAIR-Net (Ge et al., 2025; Ke et al., 2024; Sun et al., 2023; Zhang et al., 2025). Berbeda dari pendekatan *denoising* berorientasi MSE yang cenderung menghasilkan *over-smoothing* (melemahkan magnitudo dan orientasi gradien) atau *perceptual-loss* yang dapat mengaburkan mikro-goresan atau menghalusinasi tekstur, paradigma *Structural-Preserving Denoising* (SPD) yang dirumuskan dalam penelitian ini menekankan kontinuitas kontur dan stabilitas orientasi sebagai fondasi representasi fitur. SPD melengkapi lanskap metode *denoising* digital mutakhir sebagaimana dipetakan dalam kajian komprehensif (Mao et al., 2025) dan menawarkan fondasi konseptual yang kompatibel dengan *pipeline* CNN *end-to-end*.

Implikasi penelitian ini meliputi rekomendasi Bilateral untuk OCR *real-time* serta Bilateral-NLM untuk preservasi arsip. Kontribusi teoretik mencakup penyusunan kerangka evaluasi terpadu yang menautkan metrik visual dengan performa OCR secara sistematis. Batasan penelitian mencakup resolusi citra yang rendah, penggunaan *pipeline* HOG-SVM yang klasik, dan belum dilakukannya uji generalisasi lintas korpus. Penelitian selanjutnya perlu mencakup uji pada naskah historis beresolusi tinggi, eksplorasi integrasi SPD dalam arsitektur CNN atau transformer, serta evaluasi adaptasi untuk aksara lain seperti Batak, Bugis, atau skrip Asia Selatan.

SIMPULAN

Bilateral Filtering terbukti sebagai metode terbaik untuk pengenalan aksara Jawa pada naskah terdegradasi, dengan SSIM tinggi ($\sim 0,91$), PSNR kompetitif ($\sim 29,85$ dB), dan akurasi 96,97%, mengungguli NLM dalam hal biaya komputasi. Keberhasilan *denoising* berhubungan langsung dengan pelestarian morfologi tepi grafem yang menstabilkan fitur berbasis gradien (HOG), yang menjelaskan korelasi kuat antara kualitas citra dan kinerja OCR ($r \approx 0,81-0,91$).

Penelitian ini merupakan kajian pertama yang menghubungkan metrik visual (SSIM/PSNR) dengan performa klasifikasi aksara Jawa terdegradasi. Kontribusi utama meliputi kerangka evaluasi empiris terpadu yang menautkan metrik visual dan OCR, serta identifikasi Bilateral/Bilateral-NLM sebagai kompromi kualitas-waktu terbaik. SPD yang diusulkan memberikan kontribusi teoretik sekaligus kerangka praktik bagi OCR warisan budaya yang dapat diadaptasi ke aksara lain (Batak, Bugis, Asia Selatan) dan relevan untuk OCR multibahasa/*zero-shot*. Bilateral direkomendasikan untuk aplikasi *real-time*, sementara NLM/Bilateral-NLM lebih tepat untuk digitalisasi arsip dengan prioritas kualitas. Keterbatasan penelitian mencakup cakupan dataset, ketiadaan *ground truth* bersih, dan keterbatasan generalisasi lintas skrip. Riset lanjutan perlu mengevaluasi *out-of-domain*, mengembangkan metrik pelestarian struktur, serta mengintegrasikan SPD dengan arsitektur sadar-skrip dalam pelatihan *end-to-end*.

REFERENSI

- Anggraeny, F. T., Via, Y. V., & Mumpuni, R. (2023). Image preprocessing analysis in handwritten Javanese character recognition. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(2), 860–867. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i2.4172>
- Anuradha, I., Liyanage, C., & Weerasinghe, R. (2021). Estimating the Effects of Text Genre, Image Resolution and Algorithmic Complexity needed for Sinhala Optical Character Recognition. *International Journal on Advances in ICT for Emerging Regions (ICTer)*, 14(3), 43–51. <https://doi.org/10.4038/icter.v14i3.7231>
- Bataineh, B., Tounsi, M., Zamzami, N., Janbi, J., Abu-ain, W. A. K., AbuAin, T., & Elnazer, S. (2025). A Comprehensive Review on Document Image Binarization. *Journal of Imaging*, 11(5), 133. <https://doi.org/10.3390/jimaging11050133>
- Boudraa, M., Bennour, A., Mekhaznia, T., Alqarafi, A., Marie, R. R., Al-Sarem, M., & Dogra, A. (2024). Revolutionizing Historical Manuscript Analysis: A Deep Learning Approach with Intelligent Feature Extraction for Script Classification. *Acta Informatica Pragensia*, 13(2), 251. <https://doi.org/10.18267/j.aip.239>
- Damayanti, F., Yuniarno, E. M., & Suprpto, Y. K. (2024). Deep Learning-Based Inpainting for Reconstructing Severely Damaged Handwritten Javanese Characters. *Register: Jurnal Ilmiah Teknologi Sistem Informasi*, 10(2), 160–174. <https://doi.org/10.26594/register.v10i2.4929>
- El Khayati, M., Kich, I., & Taouil, Y. (2024). CNN-based Methods for Offline Arabic Handwriting Recognition: A Review. *Neural Processing Letters*, 56(2), 115. <https://doi.org/10.1007/s11063-024-11544-w>
- Ge, Y., Zhang, Y., & Roh, S.-B. (2025). FAIR-Net: A Fuzzy Autoencoder and Interpretable Rule-Based Network for Ancient Chinese Character Recognition. *Sensors*, 25(18), 5928. <https://doi.org/10.3390/s25185928>
- Gonwirat, S., & Surinta, O. (2022). DeblurGAN-CNN: Effective Image Denoising and Recognition for Noisy Handwritten Characters. *IEEE Access*, 10, 90133–90148. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201560>
- Guo, Y., Davy, A., Facciolo, G., Morel, J.-M., & Jin, Q. (2021). Fast, Nonlocal and Neural: A Lightweight High Quality Solution to Image Denoising. *IEEE Signal Processing Letters*, 28, 1515–1519. <https://doi.org/10.1109/LSP.2021.3099963>
- Kaneko, H., Ishibashi, R., & Meng, L. (2023). Deteriorated Characters Restoration for Early Japanese Books Using Enhanced CycleGAN. *Heritage*, 6(5), 4345–4361. <https://doi.org/10.3390/heritage6050230>
- Ke, W., Hou, Q., Liu, Y., Song, X., & Wei, J. (2024). SARN: Script-Aware Recognition Network for scene multilingual text recognition. *Expert Systems with Applications*, 250, 123753. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123753>

- Maheswari, S. U., Maheswari, P. U., & Aakaash, G. R. S. (2024). An intelligent character segmentation system coupled with deep learning based recognition for the digitization of ancient Tamil palm leaf manuscripts. *Heritage Science*, 12(1), 342. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01438-4>
- Mao, J., Sun, L., Chen, J., & Yu, S. (2025). Overview of Research on Digital Image Denoising Methods. *Sensors*, 25(8), 2615. <https://doi.org/10.3390/s25082615>
- Pratama, N. Z. S., & Ratnasari, C. I. (2024). Sinau: Javanese Educational Games for Early Childhood as an Effort to Preserve Javanese Heritage. *Edumatic: Jurnal Pendidikan Informatika*, 8(2), 645–654. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v8i2.27889>
- Rahman, M. G., & Islam, M. Z. (2022). A Framework for Supervised Heterogeneous Transfer Learning Using Dynamic Distribution Adaptation and Manifold Regularization. *IEEE Transactions on Services Computing*, 1–18. <https://doi.org/10.1109/TSC.2022.3213238>
- Rosalina, R., Afriliana, N., Utomo, W. H., & Sahuri, G. (2024). Deep learning utilization in Sundanese script recognition for cultural preservation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 36(3), 1759. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i3.pp1759-1768>
- Ruldeviyani, Y., Suhartanto, H., Sotardodo, B. A., Fahreza, M. H., Septiano, A., & Rachmadi, M. F. (2024). Character recognition system for pegon typed manuscript. *Heliyon*, 10(16), e35959. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35959>
- Salehudin, M. A. M., Basah, S. N., Yazid, H., Basaruddin, K. S., Safar, M. J. A., Som, M. H. M., & Sidek, K. A. (2023). Analysis of Optical Character Recognition using EasyOCR under Image Degradation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2641(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2641/1/012001>
- Siahaan, D., Sutramiani, N. P., Suciati, N., Duija, I. N., & Darma, I. W. A. S. (2022). DeepLontar dataset for handwritten Balinese character detection and syllable recognition on Lontar manuscript. *Scientific Data*, 9(1), 761. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01867-5>
- Sun, L., Li, H., & Muhammad, G. (2023). A Metaverse text recognition model based on character-level contrastive learning. *Applied Soft Computing*, 149, 110969. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110969>
- Zhang, H., Gao, G., & Bao, F. (2025). Multi-scene Traditional Mongolian OCR and Its Public Dataset. *Data Intelligence*, 2025. <https://doi.org/10.3724/2096-7004.di.2025.0119>
- Zhang, Y., Zhu, Y., Peng, D., Zhang, P., Yang, Z., Yang, Z., Yao, C., & Jin, L. (2025). HierCode: A lightweight hierarchical codebook for zero-shot Chinese text recognition. *Pattern Recognition*, 158, 110963. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2024.110963>