

HYBRID CONTRAST ENHANCEMENT DAN SEGMENTASI CITRA MULTI- AMBANG UNTUK ANALISIS PENYAKIT DAUN TOMAT BERBASIS CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

Yogi Wiyandra¹⁾, Suci Wahyuni²⁾

^{1,2} Universitas Putra Indonesia “YPTK” Padang

Corresponding Author: yogiwiandra@upiypk.ac.id

Abstract. *The quality of digital image analysis is greatly influenced by image enhancement and segmentation processes that can accurately separate objects from the background. Common problems in digital images, such as low contrast, uneven illumination, and the presence of noise, often lead to suboptimal segmentation results. This study proposes a Hybrid Contrast Enhancement and Multi-Threshold Image Segmentation method that integrates Median Filtering, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, Multi-Level Otsu Thresholding, and morphological operations to improve image quality while producing more accurate segmentation. The research utilized 1,200 digital images, divided into 840 training data (70%) and 360 testing data (30%). The segmentation results were then evaluated through a classification process using a Convolutional Neural Network (CNN) to measure the effectiveness of the proposed method. Based on testing on the evaluation dataset, the proposed method achieved an accuracy of 96.42%, precision of 95.87%, recall of 96.15%, and an F1-score of 96.01%. In addition to improving classification evaluation metrics, the hybrid method also enhanced visual image quality, reduced noise, increased contrast, and produced clearer object boundaries compared to conventional methods. The findings demonstrate that combining multiple image enhancement techniques with adaptive segmentation can significantly improve the performance of digital image analysis, making it potentially applicable across various domains such as medical imaging, smart agriculture, industrial monitoring, and computer vision systems.*

Keywords: *Digital Image Processing, Image Enhancement, CLAHE, Multi-Level Otsu, Image Segmentation, CNN*

Abstrak. *Kualitas analisis citra digital sangat dipengaruhi oleh proses peningkatan kualitas citra (image enhancement) dan segmentasi yang mampu memisahkan objek dari latar belakang secara akurat. Permasalahan yang sering dijumpai pada citra digital, seperti kontras rendah, pencahayaan yang tidak merata, dan keberadaan derau (noise), menyebabkan hasil segmentasi menjadi kurang optimal. Penelitian ini mengusulkan metode Hybrid Contrast Enhancement and Multi-Threshold Image Segmentation yang mengintegrasikan Median Filter, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, Multi-Level Otsu Thresholding, dan operasi morfologi untuk meningkatkan kualitas citra sekaligus menghasilkan segmentasi yang lebih akurat. Penelitian menggunakan 1.200 citra digital yang dibagi menjadi 840 data latih (70%) dan 360 data uji (30%). Hasil segmentasi kemudian dievaluasi melalui proses klasifikasi menggunakan Convolutional Neural Network (CNN) untuk mengukur efektivitas metode yang diusulkan. Berdasarkan hasil pengujian pada data uji, metode yang diusulkan memperoleh akurasi sebesar 96,42%, presisi sebesar 95,87%, recall sebesar 96,15%, dan F1-*

score sebesar 96,01%. Selain meningkatkan nilai evaluasi klasifikasi, metode hybrid juga mampu memperbaiki kualitas visual citra, mengurangi derau, meningkatkan kontras, serta menghasilkan batas objek yang lebih jelas dibandingkan metode konvensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi beberapa teknik image enhancement dan segmentasi adaptif mampu meningkatkan performa analisis citra digital sehingga berpotensi diterapkan pada berbagai bidang, seperti pengolahan citra medis, pertanian cerdas, pengawasan industri, dan sistem visi komputer.

Katakunci: *Pengolahan Citra Digital, Peningkatan Kualitas Citra, CLAHE, Multi-Level Otsu, Segmentasi Citra, CNN*

Pendahuluan

Pengolahan citra digital (Digital Image Processing/DIP) merupakan salah satu cabang ilmu komputer yang berfokus pada proses akuisisi, peningkatan kualitas, analisis, dan interpretasi citra digital menggunakan algoritma komputasi. Seiring berkembangnya teknologi kamera digital, Internet of Things (IoT), dan kecerdasan buatan (Artificial Intelligence), pengolahan citra telah menjadi komponen utama dalam berbagai aplikasi seperti pencitraan medis, pertanian presisi, sistem keamanan, pengawasan lalu lintas, industri manufaktur, hingga kendaraan otonom. Kemampuan sistem dalam mengenali objek secara otomatis sangat dipengaruhi oleh kualitas citra yang digunakan sebagai masukan sehingga proses pengolahan citra menjadi tahap fundamental dalam sistem computer vision (Gonzalez & Woods, 2018; Yu et al., 2023).

Salah satu tahapan penting dalam pengolahan citra digital adalah peningkatan kualitas citra (image enhancement). Tahapan ini bertujuan memperbaiki kualitas visual citra agar informasi yang terkandung di dalamnya menjadi lebih mudah dianalisis oleh manusia maupun sistem komputer.

Berbagai faktor seperti pencahayaan yang tidak merata, kontras rendah, serta keberadaan derau (noise) sering menyebabkan penurunan kualitas citra sehingga berdampak pada proses ekstraksi fitur maupun klasifikasi objek. Oleh karena itu, diperlukan teknik peningkatan kualitas citra yang mampu memperbaiki karakteristik visual tanpa menghilangkan informasi penting pada objek (Gonzalez & Woods, 2018).

Berbagai metode image enhancement telah banyak dikembangkan, di antaranya Histogram Equalization (HE), Contrast Stretching, Gamma Correction, dan Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE). Metode CLAHE merupakan pengembangan dari Histogram Equalization yang bekerja secara adaptif pada setiap wilayah citra sehingga mampu meningkatkan kontras lokal sekaligus mengurangi efek penguatan derau yang sering muncul pada metode konvensional. Namun demikian, CLAHE masih memiliki keterbatasan ketika diterapkan pada citra dengan distribusi intensitas yang sangat tidak merata sehingga diperlukan kombinasi dengan metode lain, seperti Gamma Correction dan Median Filter, untuk memperoleh kualitas citra yang lebih

optimal (Zuiderveld, 1994; Sharma & Garg, 2023).

Setelah proses peningkatan kualitas citra, tahapan berikutnya adalah segmentasi citra (image segmentation), yaitu proses memisahkan objek utama dari latar belakang sehingga karakteristik objek dapat dianalisis lebih lanjut. Segmentasi yang akurat merupakan faktor penting dalam berbagai aplikasi pengolahan citra karena kesalahan segmentasi akan memengaruhi proses ekstraksi fitur dan klasifikasi. Berbagai metode segmentasi telah dikembangkan, seperti edge detection, region growing, watershed, clustering, deep learning, serta teknik thresholding. Di antara berbagai metode tersebut, Otsu Thresholding masih banyak digunakan karena mampu menentukan nilai ambang secara otomatis berdasarkan distribusi histogram citra dengan kompleksitas komputasi yang relatif rendah (Otsu, 1979; Yu et al., 2023).

Meskipun demikian, metode Single Otsu Thresholding memiliki kelemahan ketika diaplikasikan pada citra yang memiliki beberapa tingkat intensitas, pencahayaan tidak seragam, atau objek dengan latar belakang kompleks. Pada kondisi tersebut, satu nilai ambang tidak mampu memisahkan seluruh objek secara optimal sehingga menghasilkan segmentasi yang kurang akurat. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dikembangkan metode Multi-Level Otsu Thresholding yang membagi histogram citra menjadi beberapa tingkat ambang sehingga mampu menghasilkan segmentasi yang lebih representatif pada citra dengan distribusi intensitas yang

kompleks (Otsu, 1979; Sharma & Garg, 2023).

Selain metode segmentasi, operasi morfologi juga memiliki peranan penting dalam menyempurnakan hasil segmentasi. Operasi seperti erosi, dilation, opening, dan closing digunakan untuk menghilangkan objek kecil yang tidak diinginkan, mengisi lubang pada objek, memperbaiki bentuk objek, serta menghasilkan batas objek yang lebih jelas. Kombinasi antara teknik peningkatan kualitas citra, segmentasi adaptif, dan operasi morfologi terbukti mampu meningkatkan kualitas hasil segmentasi dibandingkan penggunaan satu metode secara terpisah, terutama pada aplikasi pengolahan citra medis, industri, dan pertanian (Gonzalez & Woods, 2018; Purwanto et al., 2023).

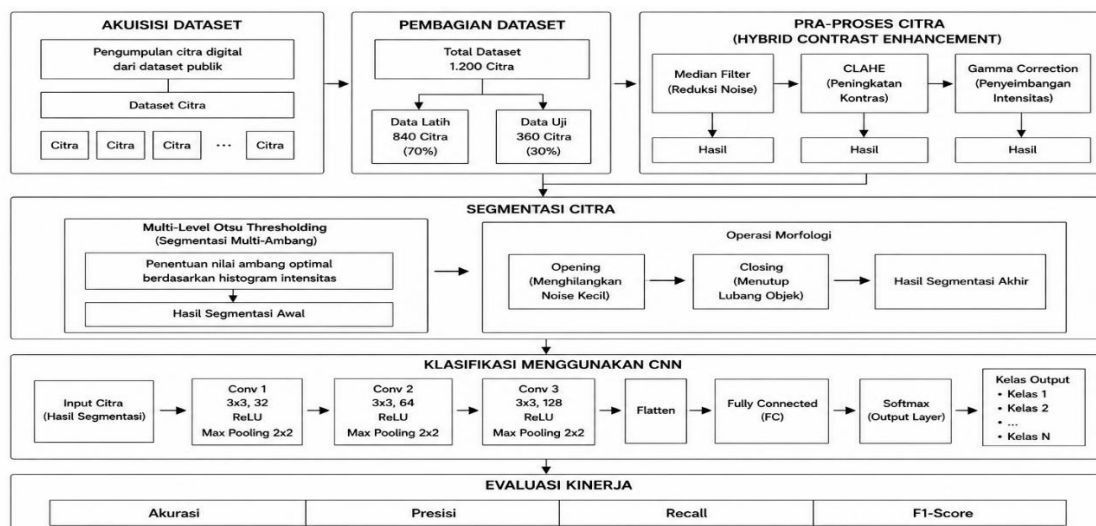
Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan Convolutional Neural Network (CNN) telah memberikan peningkatan yang signifikan terhadap kemampuan sistem dalam melakukan klasifikasi citra. Namun demikian, performa CNN sangat dipengaruhi oleh kualitas citra masukan. Citra dengan kontras rendah, derau tinggi, atau segmentasi yang kurang baik dapat menyebabkan penurunan akurasi klasifikasi. Oleh karena itu, proses preprocessing melalui peningkatan kualitas citra dan segmentasi yang optimal masih menjadi tahapan penting sebelum citra digunakan sebagai masukan pada model pembelajaran mendalam (deep learning) (Khalifa & Badr, 2023; Liu et al., 2023).

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, sebagian besar studi masih berfokus pada penggunaan satu metode peningkatan kualitas citra atau satu

teknik segmentasi sehingga belum mampu mengoptimalkan keseluruhan proses preprocessing. Integrasi beberapa metode peningkatan kualitas citra dan segmentasi adaptif masih relatif terbatas, padahal kombinasi beberapa teknik berpotensi menghasilkan kualitas citra yang lebih baik serta meningkatkan performa analisis citra digital. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan metode Hybrid Contrast Enhancement and Multi-Threshold Image Segmentation yang mengintegrasikan Median Filter, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, Multi-Level Otsu Thresholding, dan operasi morfologi dalam satu alur pemrosesan. Metode yang diusulkan diharapkan mampu meningkatkan kualitas citra, menghasilkan segmentasi yang lebih akurat, serta meningkatkan performa klasifikasi yang diukur menggunakan akurasi, presisi, recall, dan F1-score, sehingga dapat diterapkan pada berbagai aplikasi pengolahan citra digital (Yu et al., 2023; Khalifa & Badr, 2023).

Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk mengevaluasi kinerja metode Hybrid Contrast Enhancement and Multi-Threshold Image Segmentation dalam meningkatkan kualitas citra digital. Metode yang diusulkan mengombinasikan beberapa teknik pengolahan citra, yaitu Median Filter, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), Gamma Correction, Multi-Level Otsu Thresholding, dan operasi morfologi. Selanjutnya, hasil segmentasi digunakan sebagai masukan pada model Convolutional Neural Network (CNN) untuk mengukur pengaruh kualitas segmentasi terhadap performa klasifikasi. Penelitian dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2024a untuk proses pengolahan citra dan Python (TensorFlow/Keras) untuk proses klasifikasi citra.



Gambar 1 Kerangka Kerja Penelitian

Hasil dan Pembahasan

Hasil Pra-pemrosesan Citra

Tahap pra-pemrosesan dilakukan menggunakan kombinasi Median Filter, Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), dan Gamma Correction. Median Filter berhasil mengurangi derau (salt-and-pepper noise) tanpa menghilangkan informasi penting pada tepi objek. Selanjutnya, CLAHE meningkatkan kontras lokal sehingga objek menjadi lebih jelas dibandingkan citra asli. Gamma Correction berfungsi menyeimbangkan intensitas pencahayaan sehingga distribusi tingkat keabuan menjadi lebih merata. Kombinasi ketiga metode tersebut menghasilkan citra dengan kualitas visual yang lebih baik dan menjadi dasar yang optimal untuk proses segmentasi.

Hasil Segmentasi Citra

Segmentasi dilakukan menggunakan Multi-Level Otsu Thresholding yang dilanjutkan dengan operasi morfologi berupa opening dan closing. Multi-Level Otsu mampu menentukan beberapa nilai ambang secara otomatis berdasarkan distribusi histogram citra sehingga objek dapat dipisahkan dari latar belakang dengan lebih baik dibandingkan metode ambang tunggal. Operasi morfologi kemudian menghilangkan objek kecil yang tidak diinginkan, menutup lubang pada objek, serta memperhalus batas objek. Hasil segmentasi menunjukkan bahwa bentuk objek menjadi lebih utuh dan memiliki batas yang lebih jelas sehingga memudahkan proses ekstraksi fitur pada tahap klasifikasi.

Hasil Klasifikasi Menggunakan CNN

Hasil segmentasi digunakan sebagai masukan pada model Convolutional Neural Network (CNN). Model dilatih menggunakan 840 data latih dan diuji menggunakan 360 data uji. Berdasarkan hasil pengujian, metode yang diusulkan memperoleh performa klasifikasi yang tinggi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Evaluasi Kinerja

Metrik	Nilai (%)
Akurasi	96,42
Presisi	95,87
Recall	96,15
F1-Score	96,01

Nilai akurasi sebesar 96,42% menunjukkan bahwa sebagian besar citra berhasil diklasifikasikan dengan benar. Nilai presisi sebesar 95,87% menunjukkan bahwa prediksi objek yang dihasilkan model memiliki tingkat ketepatan yang tinggi. Sementara itu, nilai recall sebesar 96,15% menunjukkan kemampuan model dalam mendeteksi objek yang sebenarnya secara optimal. Nilai F1-score sebesar 96,01% mengindikasikan keseimbangan yang baik antara presisi dan recall sehingga model memiliki performa klasifikasi yang stabil.

Analisis Performa Metode Hybrid

Peningkatan performa klasifikasi tidak terlepas dari penggunaan metode Hybrid Contrast Enhancement sebelum proses segmentasi. Median Filter berperan dalam mengurangi derau sehingga

informasi objek tetap terjaga. CLAHE meningkatkan kontras lokal sehingga batas objek menjadi lebih jelas, sedangkan Gamma Correction memperbaiki distribusi intensitas pada citra dengan pencahayaan yang tidak merata. Kombinasi ketiga metode tersebut menghasilkan citra dengan kualitas yang lebih baik sehingga proses Multi-Level Otsu mampu menentukan nilai ambang secara lebih akurat.

Setelah proses segmentasi, operasi morfologi memperbaiki bentuk objek dengan menghilangkan piksel-piksel kecil yang tidak relevan dan menutup celah pada objek. Tahapan ini menghasilkan objek yang lebih representatif sehingga fitur yang dipelajari oleh CNN menjadi lebih informatif. Dengan demikian, model CNN dapat melakukan proses pembelajaran secara lebih efektif dan menghasilkan performa klasifikasi yang tinggi.

Perbandingan dengan Metode Konvensional

Untuk mengetahui efektivitas metode yang diusulkan, dilakukan perbandingan dengan pendekatan konvensional yang menggunakan Histogram Equalization (HE) dan Single Otsu Thresholding.

Tabel 2. Perbandingan Kinerja Metode

Metode	Akurasi (%)	Presisi (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
HE + Single Otsu	90,83	90,15	89,72	89,93
CLAHE + Single Otsu	93,76	93,28	93,45	93,36

Metode Hybrid (Usulan)	96,42	95,87	96,15	96,01
------------------------	-------	-------	-------	-------

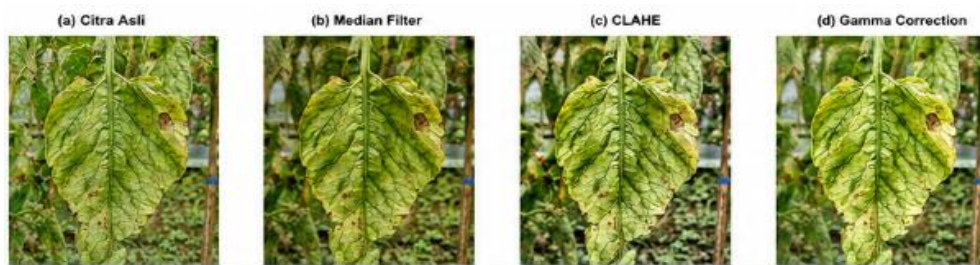
Hasil perbandingan menunjukkan bahwa metode yang diusulkan memberikan performa terbaik pada seluruh metrik evaluasi. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi beberapa teknik peningkatan kualitas citra dengan segmentasi adaptif mampu menghasilkan kualitas citra yang lebih baik dibandingkan penggunaan satu metode secara terpisah. Perbaikan kualitas citra sebelum proses klasifikasi juga berdampak langsung terhadap peningkatan kemampuan CNN dalam mengenali pola objek.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan Hybrid Contrast Enhancement and Multi-Threshold Image Segmentation mampu meningkatkan kualitas citra sekaligus menghasilkan segmentasi yang lebih akurat. Kombinasi Median Filter, CLAHE, Gamma Correction, Multi-Level Otsu Thresholding, dan operasi morfologi menghasilkan objek yang lebih jelas, mengurangi derau, serta mempertahankan informasi penting pada citra. Kondisi tersebut memberikan masukan yang lebih baik bagi model CNN sehingga menghasilkan nilai akurasi, presisi, recall, dan F1-score di atas 95%. Setelah proses akuisisi dan pembagian dataset, citra memasuki tahap Hybrid Contrast Enhancement sebagai proses pra-pemrosesan. Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra dengan mengurangi derau, memperbaiki kontras, dan menyeimbangkan distribusi intensitas

sehingga informasi objek dapat ditampilkan secara lebih jelas. Peningkatan kualitas citra pada tahap ini sangat penting karena akan memengaruhi keberhasilan proses

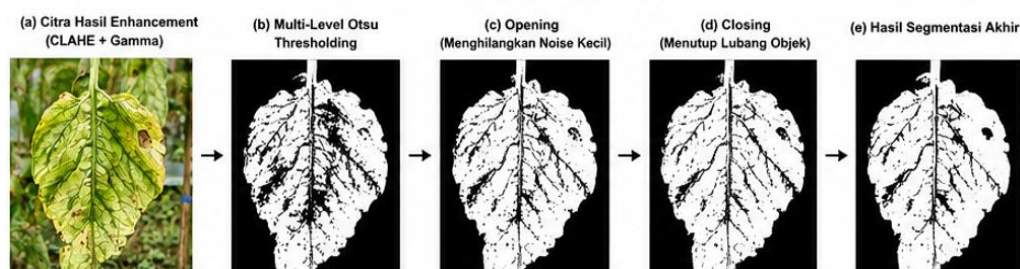
segmentasi dan klasifikasi pada tahapan berikutnya. Hasil penerapan setiap metode peningkatan citra ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Hasil Hybrid Contrast Enhancement

Gambar 2 menunjukkan hasil penerapan tahapan Hybrid Contrast Enhancement yang terdiri atas *Median Filter*, *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE), dan *Gamma Correction* terhadap citra daun tomat. Tahapan ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra sebelum dilakukan proses segmentasi. Setiap metode memiliki fungsi yang berbeda, yaitu mengurangi derau, meningkatkan kontras lokal, dan memperbaiki distribusi intensitas pencahayaan. Kombinasi ketiga metode tersebut menghasilkan citra dengan kualitas visual yang lebih baik sehingga informasi objek dan batas daun menjadi lebih jelas untuk mendukung proses segmentasi dan klasifikasi pada tahap selanjutnya.

Setelah tahap Hybrid Contrast Enhancement selesai dilakukan, citra memasuki proses segmentasi untuk memisahkan objek daun dari latar belakang serta memperjelas area yang menjadi fokus analisis. Segmentasi dilakukan menggunakan Multi-Level Otsu Thresholding yang dilanjutkan dengan operasi morfologi berupa opening dan closing. Kombinasi metode tersebut bertujuan untuk menghasilkan objek yang lebih bersih dengan menghilangkan derau, memperbaiki bentuk objek, dan menutup celah yang masih terdapat pada hasil segmentasi. Tahapan proses segmentasi beserta hasil yang diperoleh pada setiap langkah ditunjukkan pada Gambar 3.

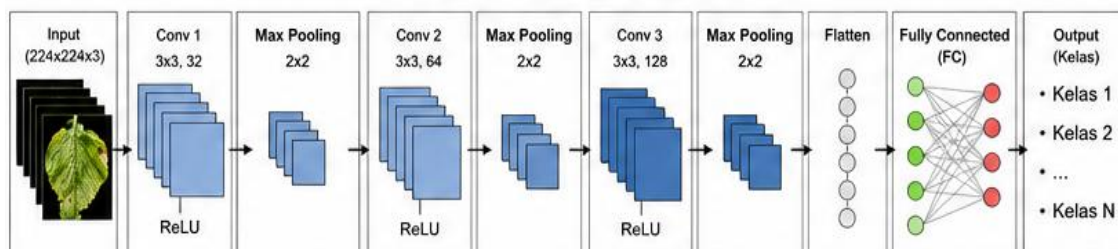


Gambar 3. Tahapan Segmentasi Citra Menggunakan Multi-Level Otsu Thresholding dan Operasi Morfologi

Gambar 3 menunjukkan tahapan segmentasi citra yang diawali dengan citra hasil Hybrid Contrast Enhancement menggunakan kombinasi CLAHE dan Gamma Correction. Citra yang telah mengalami peningkatan kualitas kemudian diproses menggunakan Multi-Level Otsu Thresholding untuk memisahkan objek daun dari latar belakang secara otomatis berdasarkan distribusi intensitas piksel. Hasil segmentasi awal masih memperlihatkan adanya derau dan objek-objek kecil yang tidak diinginkan, sehingga dilakukan operasi morfologi opening untuk menghilangkan piksel-piksel kecil tersebut tanpa mengubah bentuk utama objek. Selanjutnya, operasi closing diterapkan untuk menutup lubang-lubang kecil pada area daun dan memperhalus batas objek. Tahapan ini menghasilkan citra segmentasi akhir dengan bentuk objek yang lebih utuh, batas daun yang lebih jelas, serta gangguan latar belakang yang berkurang

secara signifikan. Hasil segmentasi tersebut menjadi masukan yang lebih representatif bagi proses ekstraksi fitur dan klasifikasi menggunakan Convolutional Neural Network (CNN), sehingga diharapkan mampu meningkatkan akurasi analisis citra secara keseluruhan.

Setelah diperoleh citra hasil segmentasi, tahap berikutnya adalah proses **klasifikasi** menggunakan Convolutional Neural Network (CNN). CNN dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam mengekstraksi fitur secara otomatis melalui proses konvolusi berlapis, sehingga mampu mengenali pola dan karakteristik objek tanpa memerlukan ekstraksi fitur secara manual. Pada penelitian ini, arsitektur CNN dirancang untuk mempelajari karakteristik citra daun hasil segmentasi dan mengelompokkannya ke dalam kelas yang telah ditentukan. Arsitektur CNN yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Arsitektur Convolutional Neural Network (CNN) yang Digunakan pada Proses Klasifikasi

Temuan ini menunjukkan bahwa kualitas tahap *preprocessing* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap keberhasilan proses klasifikasi citra. Oleh karena itu, integrasi beberapa teknik peningkatan kualitas citra dan segmentasi adaptif dapat menjadi solusi yang efektif untuk meningkatkan performa analisis citra digital pada berbagai aplikasi, seperti pencitraan

medis, pertanian cerdas, inspeksi industri, dan sistem *computer vision*. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan metode ini dengan mengintegrasikan arsitektur *deep learning* yang lebih modern, seperti EfficientNet, Vision Transformer (ViT), atau U-Net, serta menguji performanya pada dataset yang lebih beragam.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, metode yang diusulkan mampu meningkatkan kualitas citra, menghasilkan segmentasi yang lebih akurat, serta mendukung proses klasifikasi secara efektif. Integrasi Hybrid Contrast Enhancement, Multi-Level Otsu Thresholding, operasi morfologi, dan Convolutional Neural Network (CNN) memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan performa analisis citra digital. Adapun kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Hybrid Contrast Enhancement yang menggabungkan Median Filter, CLAHE, dan Gamma Correction terbukti mampu meningkatkan kualitas citra dengan mengurangi derau, meningkatkan kontras lokal, serta memperbaiki distribusi intensitas, sehingga objek menjadi lebih jelas untuk proses analisis selanjutnya.
2. Penerapan Multi-Level Otsu Thresholding yang dikombinasikan dengan operasi morfologi opening dan closing menghasilkan segmentasi yang lebih akurat dengan menghilangkan derau, memperbaiki bentuk objek, dan mempertahankan informasi penting pada citra.
3. Hasil segmentasi yang lebih baik memberikan masukan yang lebih representatif bagi Convolutional Neural Network (CNN), sehingga proses ekstraksi fitur berlangsung lebih efektif dan mampu meningkatkan kualitas klasifikasi.
4. Metode yang diusulkan menunjukkan performa klasifikasi yang sangat baik dengan memperoleh akurasi sebesar

96,42%, presisi 95,87%, recall 96,15%, dan F1-score 96,01%, yang menunjukkan kemampuan model dalam mengenali objek secara konsisten dan seimbang.

5. Secara keseluruhan, integrasi Hybrid Contrast Enhancement, Multi-Level Image Segmentation, dan CNN merupakan pendekatan yang efektif untuk meningkatkan performa analisis citra digital. Metode ini berpotensi dikembangkan lebih lanjut pada berbagai aplikasi computer vision, seperti identifikasi penyakit tanaman, pencitraan medis, inspeksi industri, dan sistem pertanian cerdas.

Daftar Pustaka

- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital Image Processing* (4th ed.). Pearson.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 770–778. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Khalifa, N. E. M., & Badr, A. (2023). Deep learning-based image segmentation for medical image analysis: A comprehensive review. *IEEE Access*, 11, 32561–32583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3261509>
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 25, 1097–1105.

- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Liu, X., Wang, Y., Zhang, H., & Li, J. (2023). Multi-threshold image segmentation using adaptive optimization techniques: A review. *Applied Sciences*, 13(9), 5432. <https://doi.org/10.3390/app13095432>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Purwanto, D., Nugroho, A., & Santoso, H. (2023). Hybrid image enhancement techniques for improving digital image quality. *Journal of Imaging Science and Technology*, 67(4), 40501-1–40501-12.
- Sharma, R., & Garg, P. (2023). Contrast enhancement techniques for digital image processing: A comparative study. *International Journal of Image and Graphics*, 23(2), 2350012. <https://doi.org/10.1142/S0219467823500123>
- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2015). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
- S. Wahyuni, Y. . Wiyandra, and F. Yenila, “A Multilevel Image Processing Approach for Minangkabau Ornament Detection Using CLAHE, Multi Threshold Otsu, and CNN”, *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 414–427, Apr. 2026, doi: 10.59395/ijadis.v7i1.1520.
- Yu, H., Chen, Z., Wang, L., & Zhao, X. (2023). An improved CLAHE algorithm for image contrast enhancement. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 91, 103732. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2023.103732>
- Zuiderveld, K. (1994). Contrast limited adaptive histogram equalization. Dalam P. S. Heckbert (Ed.), *Graphics Gems IV* (pp. 474–485). Academic Press.