

Implementasi Metode Otsu Thresholding untuk Segmentasi Citra Daun Sirih

Lestari Herti¹, Marissa Utami², Yovi Apridiansyah³, Yuza Reswan⁴

¹ hertilestari3@gmail.com, ² marissautami@umb.ac.id, ³ yoviapridiansyah@umb.ac.id, ⁴ yuza.reswan@umb.ac.id

Abstract— Betel (*Piper betle* L.) leaves are susceptible to diseases such as leaf spot, which can affect plant productivity. This study implements Otsu Thresholding for betel leaf image segmentation. The process includes image resizing, brightness adjustment, RGB-to-grayscale conversion, thresholding, and morphological opening and closing. Evaluation was performed using Mean Squared Error (MSE) and Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) on 101 images, comprising 53 spotted leaves and 48 healthy leaves. The results yielded an average threshold of 158.34, an average MSE of 6219.18, and an average PSNR of 10.28 dB. The method separated leaf objects from the background, although the relatively low PSNR indicates differences between the original grayscale images and binary segmentation results. These metrics evaluate image differences rather than diagnostic accuracy. The findings demonstrate the application of Otsu Thresholding for image segmentation as a preliminary step for further analysis of betel leaf conditions.

Intisari— Tanaman sirih (*Piper betle* L.) memiliki nilai ekonomi dan banyak dimanfaatkan dalam bidang kesehatan serta pengobatan tradisional. Penelitian ini mengimplementasikan metode Otsu Thresholding untuk segmentasi citra daun sirih melalui tahapan pra-pemrosesan, konversi citra RGB ke grayscale, penentuan nilai ambang, serta operasi morfologi opening dan closing. Pengujian dilakukan terhadap 101 citra, terdiri atas 53 citra daun bercak dan 48 citra daun sehat. Evaluasi menggunakan Mean Squared Error (MSE) dan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) menghasilkan rata-rata threshold sebesar 158,34, MSE sebesar 6219,18, dan PSNR sebesar 10,28 dB. Hasil visual menunjukkan bahwa metode ini dapat memisahkan objek daun dari latar belakang dan menonjolkan area bercak. Namun, nilai PSNR menunjukkan adanya perbedaan antara citra grayscale asli dan citra biner hasil segmentasi. MSE dan PSNR digunakan untuk mengevaluasi perbedaan citra, bukan untuk mengukur akurasi diagnosis penyakit. Dengan demikian, Otsu Thresholding dapat digunakan sebagai tahap awal dalam analisis citra daun sirih.

Kata Kunci— Otsu Thresholding, Segmentasi Citra, Daun Sirih, Pengolahan Citra Digital, Pertanian Presisi.

I. PENDAHULUAN

Tanaman sirih (*Piper betle* L.) merupakan tanaman tropis yang memiliki nilai ekonomi dan banyak dimanfaatkan dalam bidang kesehatan, kosmetik, serta pengobatan tradisional di Indonesia. Namun, produktivitas tanaman sirih dapat terganggu oleh berbagai penyakit daun, seperti bercak daun (leaf spot), embun jelaga (sooty mold), dan busuk daun (leaf blight) yang berkaitan dengan infeksi

jamur maupun bakteri. Serangan penyakit tersebut dapat menurunkan kualitas daun dan hasil panen sehingga diperlukan upaya identifikasi kondisi daun secara lebih objektif dan efisien [1].

Identifikasi penyakit daun menggunakan citra digital memerlukan proses segmentasi untuk memisahkan objek daun dari latar belakang serta menonjolkan bagian citra yang menjadi perhatian. Segmentasi merupakan tahapan penting dalam pengolahan citra karena hasilnya dapat memengaruhi proses ekstraksi fitur dan analisis pada tahap selanjutnya. Kesalahan dalam memisahkan objek dan latar belakang berpotensi mengurangi kualitas informasi yang diperoleh dari citra [2].

Berbagai metode segmentasi telah digunakan, antara lain K-Means Clustering, Fuzzy C-Means, Region Growing, dan Edge Detection. Setiap metode memiliki karakteristik dan keterbatasan tersendiri ketika diterapkan pada citra dengan variasi pencahayaan, gangguan (noise), serta warna dan tekstur daun yang tidak seragam [3]–[7]. Oleh karena itu, diperlukan metode yang dapat menentukan ambang intensitas secara otomatis untuk membantu memisahkan bagian citra berdasarkan distribusi intensitas piksel.

Salah satu metode yang dapat digunakan adalah Otsu Thresholding. Metode ini menentukan nilai ambang (threshold) secara otomatis melalui analisis histogram intensitas piksel dengan memaksimalkan varians antarkelas. Pendekatan tersebut memungkinkan citra grayscale diubah menjadi citra biner sehingga objek dan latar belakang dapat dipisahkan tanpa menentukan nilai ambang secara manual [8]. Penerapannya pada citra daun sirih perlu dikaji dengan mempertimbangkan variasi karakteristik citra dan kualitas hasil segmentasi.

Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan metode Otsu Thresholding untuk segmentasi citra daun sirih serta mengevaluasi hasilnya menggunakan Mean Squared Error (MSE) dan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR). Pengujian dilakukan terhadap 101 citra, yang terdiri atas 53 citra daun bercak dan 48 citra daun sehat. Kontribusi penelitian ini adalah penerapan Otsu Thresholding pada kumpulan citra daun sirih tersebut serta analisis kuantitatif hasil segmentasi berdasarkan nilai ambang, MSE, dan PSNR. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan analisis citra daun sirih pada tahap selanjutnya.

II. KAJIAN LITERATUR

A. Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan cabang ilmu komputer yang mempelajari teknik untuk memperoleh, memodifikasi, menganalisis, dan menafsirkan citra dalam bentuk digital. Citra digital dipandang sebagai fungsi dua dimensi $f(x,y)$ yang memetakan koordinat spasial ke nilai intensitas, yang kemudian diproses melalui sampling dan quantization [11].

B. Segmentasi Citra

Segmentasi citra adalah proses memisahkan citra menjadi beberapa region yang memiliki kemiripan intensitas, warna, atau tekstur, dengan tujuan mengekstraksi objek penting (region of interest) untuk dianalisis lebih lanjut [12]. Metode segmentasi dapat dikelompokkan menjadi thresholding-based, edge-based, dan region-based segmentation. Thresholding paling banyak digunakan karena kesederhanaan dan efisiensi komputasinya, namun variasi pencahayaan dan warna daun tetap menjadi tantangan sehingga dibutuhkan metode thresholding adaptif seperti Otsu Thresholding.

C. Metode Otsu Thresholding

Otsu Thresholding dikembangkan oleh Otsu (1979) dan termasuk kelompok global thresholding methods. Prinsip utamanya adalah menetapkan nilai ambang yang memaksimalkan varians antar kelas dan meminimalkan varians dalam kelas, sehingga objek dan latar belakang dapat dipisahkan dengan kontras tinggi [8]. Metode ini tidak memerlukan parameter manual, cepat dan efisien untuk citra dengan histogram bimodal, serta bekerja baik pada citra dengan kontras sedang hingga tinggi. Penelitian sebelumnya menunjukkan Otsu memberikan akurasi 94,6% pada dataset penyakit daun tomat, lebih tinggi dibanding Adaptive Gaussian Thresholding (89,1%) dan K-Means Clustering (91,3%) [13], serta memiliki kompleksitas komputasi rendah $O(n)$ sehingga cocok untuk sistem diagnosis berbasis perangkat mobile [14].

D. Daun Sirih sebagai Objek Penelitian

Daun sirih (*Piper betle* L.) mengandung senyawa fenol dan minyak atsiri yang bersifat antibakteri dan antifungal, sehingga kesehatan daun memengaruhi kualitas dan kandungan kimia daun yang dipanen [15]. Identifikasi penyakit secara manual oleh petani sering kurang akurat karena faktor subjektivitas, sehingga segmentasi citra menjadi penting untuk mendukung diagnosis yang objektif dan cepat.

E. Penelitian Terdahulu

Peneliti	Fokus	Temuan
Sharma dkk. [9]	Citra medis	Otsu: 85–100%
Femi & M. [10]	Daun sirih	Otsu: akurasi 97%
Zhang dkk. [13]	Daun tomat	Otsu > Gaussian & K-Means
Mohanty dkk. [16]	CNN, 38 penyakit	Akurasi 99,3%
Fitria dkk. [17]	Daun cabai, HSV	Akurasi 87,2%

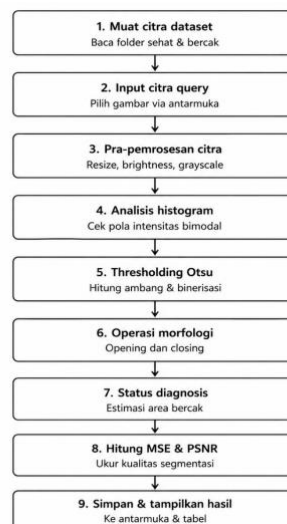
TABEL 1 RINGKASAN PENELITIAN TERDAHULU

Dari penelitian tersebut terlihat bahwa Otsu Thresholding telah banyak diterapkan pada berbagai domain citra biologis, namun penerapannya secara khusus pada citra daun sirih untuk mendukung diagnosis penyakit berbasis MSE dan PSNR masih memiliki ruang pengembangan. Penelitian ini mengisi ruang tersebut dengan menerapkan Otsu Thresholding pada dataset citra daun sirih yang diakuisisi langsung di lapangan.

III. METODE PENELITIAN

A. Tahapan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental yang diawali dengan studi literatur, dilanjutkan pengumpulan data citra, pra-pemrosesan, penerapan algoritma Otsu Thresholding, operasi morfologi, dan evaluasi hasil menggunakan MSE dan PSNR. Tahapan tersebut dipetakan pada sistem yang dilengkapi antarmuka grafis (GUI) agar pengujian dapat dilakukan secara sistematis.



Gbr. 1 Tahapan proses sistem diagnosis daun sirih berbasis Otsu Thresholding.

B. Pengumpulan Data

Data berupa citra daun sirih sehat dan citra daun bercak (leaf spot) diperoleh melalui akuisisi langsung menggunakan kamera ponsel beresolusi minimal 50 megapiksel, menghasilkan citra berukuran sekitar 1920×1080 piksel. Pengambilan dilakukan di wilayah Bengkulu Selatan dengan jarak pengambilan relatif konstan pada kondisi pencahayaan dalam dan luar ruangan, guna mengevaluasi kinerja pada variasi pencahayaan alami dan buatan. Total 101 citra digunakan sebagai data uji, terdiri atas 53 citra bercak daun dan 48 citra sehat, disimpan dalam format JPG/PNG [18].

C. Pra-pemrosesan Citra

Pra-pemrosesan meliputi resizing citra ke ukuran 512×512 piksel agar dimensi seragam, penyesuaian kecerahan untuk menstabilkan histogram, dan konversi RGB ke grayscale menggunakan persamaan iluminansi $I_{\text{gray}} = 0,299R + 0,587G + 0,114B$. Konversi grayscale merupakan langkah fundamental karena algoritma Otsu bekerja berdasarkan distribusi intensitas piksel pada satu kanal [19].

D. Analisis Histogram dan Thresholding Otsu

Setelah pra-pemrosesan, sistem menghitung distribusi intensitas piksel melalui histogram grayscale. Histogram yang bersifat bimodal menunjukkan citra cukup baik untuk diproses menggunakan Otsu Thresholding. Rumus dasar metode Otsu dituliskan pada (1).

$$\sigma^2 B(t) = \omega_1(t) \cdot \omega_2(t) \cdot [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2 \quad (1)$$

dengan $\omega_1(t)$ dan $\omega_2(t)$ adalah probabilitas kelas piksel di bawah dan di atas ambang t , sedangkan $\mu_1(t)$ dan $\mu_2(t)$ adalah nilai rata-rata intensitas tiap kelas. Ambang optimal t diperoleh ketika $\sigma^2 B(t)$ mencapai nilai maksimum. Citra grayscale kemudian dikonversi menjadi citra biner (hitam-putih) berdasarkan nilai ambang tersebut.

E. Operasi Morfologi

Citra biner hasil thresholding disempurnakan melalui operasi morfologi opening dan closing untuk menghilangkan noise kecil, menutup lubang pada objek, serta memperhalus batas area daun dan area bercak, sehingga hasil segmentasi lebih representatif terhadap kondisi nyata daun [20].

F. Evaluasi Kuantitatif

Evaluasi dilakukan menggunakan dua parameter, yaitu Mean Squared Error (MSE) pada (2) dan Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) pada (3).

$$MSE = (1/MN) \sum \sum [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad (2)$$

$$PSNR = 10 \log_{10}(MAX_I^2 / MSE) \quad (3)$$

M dan N adalah jumlah baris dan kolom piksel, $I(i,j)$ adalah nilai piksel citra grayscale asli, $K(i,j)$ adalah nilai piksel citra hasil segmentasi, dan MAX_I adalah nilai maksimum intensitas piksel (255 untuk citra 8-bit). Semakin kecil nilai MSE dan semakin tinggi nilai PSNR, semakin baik kualitas hasil segmentasi [11], [21].

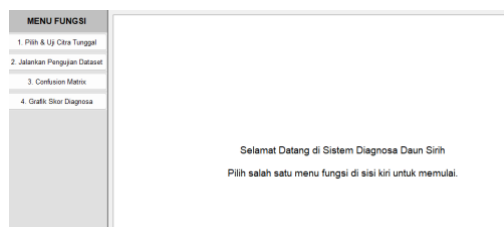
G. Perancangan Antarmuka dan Pengujian

Sistem dilengkapi antarmuka grafis dengan empat menu fungsi, yaitu uji citra tunggal, pengujian dataset, confusion matrix, dan grafik skor diagnosa. Pengujian dilakukan dengan membandingkan status diagnosis sistem terhadap label ground truth (folder kelas sehat dan kelas bercak) pada setiap citra uji, dianalisis berdasarkan nilai threshold, MSE, dan PSNR.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

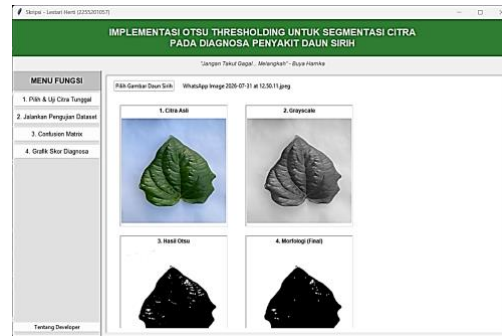
A. Hasil Implementasi Sistem

Implementasi menghasilkan sistem diagnosis berbasis GUI yang menyediakan empat menu fungsi utama pada satu tampilan, yaitu Pilih & Uji Citra Tunggal, Jalankan Pengujian Dataset, Confusion Matrix, dan Grafik Skor Diagnosa.



Gbr. 2 Tampilan utama sistem diagnosa daun sirih.

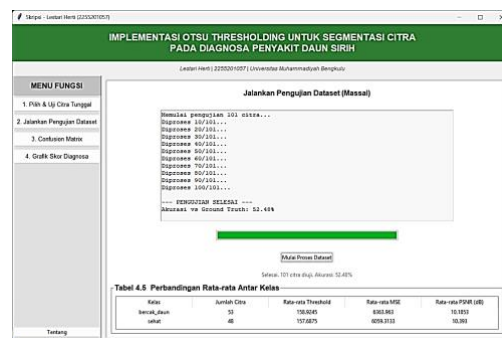
Pada menu uji citra tunggal, pengguna memilih satu berkas citra melalui tombol Pilih Gambar Daun Sirih, kemudian sistem menampilkan empat panel hasil pengolahan, yaitu citra asli, grayscale, hasil Otsu, dan hasil morfologi.



Gbr. 3 Hasil segmentasi bertahap pada uji citra tunggal.

B. Hasil Pengujian Dataset

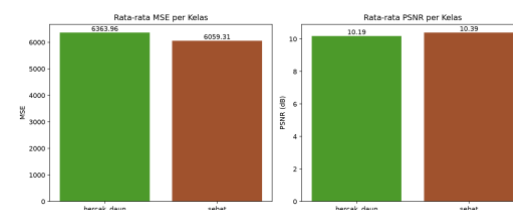
Pengujian batch dijalankan terhadap seluruh 101 citra. Sistem menampilkan progres pemrosesan serta rekap rata-rata threshold, MSE, dan PSNR per kelas setelah pengujian selesai.



Gbr. 4 Hasil pengujian dataset (101 citra) dan rekap rata-rata evaluasi per kelas.

TABEL II REKAP RATA-RATA THRESHOLD, MSE, DAN PSNR PER KELAS

Kelas	N	Threshold	MSE	PSNR (dB)
Bercak Daun	53	158,92	6363,96	10,19
Sehat	48	157,69	6059,31	10,39
Keseluruhan	101	158,34	6219,18	10,28



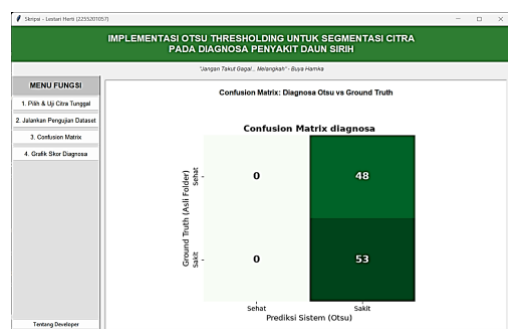
Gbr. 5 Grafik perbandingan rata-rata MSE dan PSNR antar kelas.

Rata-rata MSE pada citra bercak daun (6363,96) sedikit lebih tinggi dibanding citra sehat (6059,31), sedangkan rata-rata PSNR pada citra sehat (10,39 dB) sedikit lebih tinggi dibanding citra bercak daun (10,19 dB). Nilai threshold yang dihasilkan cukup stabil, dengan rata-rata 158,92 pada bercak daun dan 157,69 pada citra sehat, menunjukkan bahwa

algoritma Otsu konsisten dalam menentukan ambang pada kedua kelas citra.

C. Evaluasi Confusion Matrix

Confusion matrix disusun dengan membandingkan status diagnosis hasil segmentasi Otsu terhadap label ground truth pada folder kelas sehat dan kelas bercak, ditampilkan dalam bentuk peta panas untuk menggambarkan sebaran hasil klasifikasi pada setiap kategori.



Gbr. 6 Confusion matrix hasil pengujian batch terhadap 101 citra.

TABEL III SKALA PENILAIAN METRIK MSE DAN PSNR

Metrik	Baik	Kurang Baik
MSE	< 5000	≥ 5000
PSNR (dB)	≥ 20	< 20

E. Pembahasan

Hasil pengujian terhadap 101 citra memperoleh rata-rata MSE sebesar 6219,18 dan rata-rata PSNR sebesar 10,28 dB. Nilai PSNR yang diperoleh berada di bawah ambang 30 dB yang umumnya dianggap sebagai kualitas baik [21]. Hal ini terjadi karena MSE dihitung dengan membandingkan citra grayscale asli (rentang intensitas 0–255) dengan citra biner hasil segmentasi (nilai piksel hanya 0 atau 255), sehingga selisih intensitas menjadi besar secara numerik meskipun secara visual segmentasi tetap berhasil.

Secara visual, metode Otsu Thresholding berhasil memisahkan objek daun dari latar belakang serta menonjolkan area bercak penyakit dengan batas yang cukup jelas pada citra sehat maupun citra bercak daun, sejalan dengan penelitian yang menerapkan metode thresholding pada segmentasi citra daun padi dan memperoleh akurasi 73,3% dalam mengidentifikasi area daun terinfeksi [22]. Dengan demikian, Otsu Thresholding tetap layak

digunakan sebagai metode segmentasi dasar pada diagnosa penyakit tanaman, meskipun interpretasi kuantitatif PSNR-nya rendah.

Kelebihan sistem terletak pada kemampuannya menentukan nilai ambang secara otomatis tanpa parameter manual, proses yang cepat dan sederhana untuk citra dengan histogram bimodal, serta kemampuan memisahkan objek daun dari latar belakang dengan cukup jelas. Kekurangan sistem meliputi nilai PSNR yang masih rendah akibat perbandingan citra biner dengan citra grayscale, sensitivitas terhadap noise dan variasi pencahayaan pada citra dengan histogram tidak bimodal, serta belum tersedianya tahap ekstraksi fitur dan klasifikasi untuk diagnosis akhir.

D. Analisis karakteristik data citra.

Dataset penelitian terdiri atas 101 citra daun sirih, yaitu 53 citra dengan gejala bercak daun dan 48 citra daun sehat. Komposisi tersebut menunjukkan bahwa jumlah citra pada kedua kelompok relatif berdekatan, meskipun tidak sepenuhnya seimbang. Perbedaan jumlah ini perlu diperhatikan ketika membaca hasil agregat karena rata-rata keseluruhan dipengaruhi oleh jumlah citra pada setiap kelas. Oleh sebab itu, hasil per kelas tetap disajikan agar karakteristik pemrosesan pada daun bercak dan daun sehat dapat diamati secara terpisah.

Penggunaan citra yang dikumpulkan secara langsung memberikan konteks yang sesuai dengan objek penelitian, tetapi karakteristik citra tetap dipengaruhi oleh proses pengambilan gambar. Intensitas cahaya, arah datang cahaya, bayangan, jarak kamera, sudut pengambilan, dan kondisi permukaan daun dapat mengubah distribusi intensitas piksel. Perubahan tersebut relevan bagi Otsu Thresholding karena nilai ambang ditentukan dari histogram citra, bukan dari pengetahuan semantik mengenai bagian daun yang sehat atau terinfeksi.

Dalam penelitian ini, label sehat dan bercak digunakan sebagai label kelompok data untuk membandingkan hasil pengujian. Label tersebut tidak dengan sendirinya menjadi bukti bahwa setiap piksel bercak telah tersegmentasi secara tepat. Perbedaan ini penting karena segmentasi bekerja pada tingkat piksel, sedangkan label folder bekerja pada tingkat citra. Evaluasi yang mengukur

ketepatan batas area bercak memerlukan anotasi piksel atau mask acuan yang disiapkan secara independen. Dengan demikian, analisis pada penelitian ini lebih tepat dipahami sebagai evaluasi hasil pemrosesan citra dan perbandingan metrik, bukan sebagai pengukuran akurasi diagnosis klinis tanaman.

F. Pengaruh pra-pemrosesan terhadap segmentasi.

Tahap pra-pemrosesan menyeragamkan ukuran citra menjadi 512×512 piksel, melakukan penyesuaian kecerahan, dan mengubah citra RGB menjadi grayscale. Penyeragaman dimensi membantu sistem menjalankan proses yang konsisten pada seluruh citra dan memudahkan perbandingan hasil. Selain itu, penggunaan ukuran yang seragam dapat mengurangi variasi beban komputasi antar citra. Namun, resizing juga dapat mengubah detail berukuran kecil, terutama bercak yang hanya menempati sedikit piksel. Karena itu, pemilihan ukuran citra merupakan kompromi antara biaya komputasi dan kemampuan mempertahankan detail visual.

Konversi grayscale mengubah informasi tiga kanal warna menjadi satu nilai intensitas. Persamaan iluminansi yang digunakan adalah $I_{\text{gray}} = 0,299R + 0,587G + 0,114B$. Proses ini menyederhanakan representasi citra sehingga histogram dapat dianalisis berdasarkan intensitas tunggal. Akan tetapi, pengubahan ke grayscale juga mengurangi informasi perbedaan warna. Apabila warna bercak dan jaringan daun memiliki intensitas yang hampir sama, keduanya dapat sulit dipisahkan hanya dengan ambang intensitas. Hal ini menjadi salah satu batasan pendekatan thresholding global pada citra biologis yang memiliki variasi warna dan tekstur.

Penyesuaian kecerahan dimaksudkan untuk membantu menstabilkan distribusi intensitas sebelum ambang dihitung. Meskipun demikian, penyesuaian tersebut perlu diterapkan secara konsisten. Jika penguatan kecerahan terlalu besar, piksel pada area terang dapat mengalami saturasi; jika terlalu kecil, perbedaan antara daun dan latar belakang mungkin tetap rendah. Oleh karena itu, hasil segmentasi tidak hanya dipengaruhi oleh

algoritma Otsu, tetapi juga oleh karakteristik citra masukan dan rangkaian pra-pemrosesan yang mendahuluinya.

G. Interpretasi nilai ambang Otsu.

Nilai threshold rata-rata keseluruhan sebesar 158,34 menunjukkan bahwa sistem memilih ambang berdasarkan distribusi intensitas pada citra yang diuji. Pada kelompok bercak daun, nilai rata-rata threshold sebesar 158,92, sedangkan pada kelompok daun sehat sebesar 157,69. Selisih kedua nilai tersebut relatif kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa rata-rata ambang yang diperoleh pada dua kelompok memiliki kedekatan numerik, tetapi tidak membuktikan bahwa karakteristik piksel kedua kelompok identik.

Otsu Thresholding mengevaluasi kandidat ambang dengan membagi piksel menjadi dua kelas intensitas, kemudian memilih ambang yang memaksimalkan varians antarkelas. Secara konseptual, metode ini bekerja baik ketika distribusi intensitas memungkinkan pemisahan dua kelompok yang cukup jelas. Namun, histogram citra daun tidak selalu membentuk dua puncak yang terpisah. Daun, bercak, urat daun, bayangan, dan latar belakang dapat menghasilkan distribusi intensitas yang saling tumpang tindih. Dalam kondisi tersebut, ambang optimal secara matematis belum tentu sama dengan batas objek yang diinginkan secara semantik.

Nilai threshold yang berdekatan antara kelas bercak dan sehat juga tidak dapat dipakai sebagai indikator tunggal untuk menentukan kondisi penyakit. Ambang merupakan parameter pemisahan intensitas, bukan skor penyakit. Untuk menyatakan bahwa suatu citra termasuk sehat atau berpenyakit, sistem memerlukan aturan klasifikasi atau model yang dievaluasi terpisah. Oleh karena itu, istilah diagnosis pada antarmuka penelitian ini perlu ditafsirkan sebagai alur demonstrasi pengolahan citra, sedangkan klaim klasifikasi penyakit akhir harus didukung oleh pengujian yang sesuai.

H. Peran operasi morfologi.

Setelah thresholding, citra biner diproses menggunakan operasi morfologi opening dan closing. Opening secara umum menggabungkan erosi dan dilasi sehingga komponen kecil yang tidak

sesuai dengan struktur objek dapat dikurangi. Closing menggabungkan dilasi dan erosi untuk membantu menutup celah kecil atau lubang pada objek. Kedua operasi tersebut dapat memperbaiki keteraturan mask biner, terutama ketika hasil thresholding mengandung titik-titik terisolasi atau celah pada area yang seharusnya tersambung.

Efek morfologi bergantung pada bentuk dan ukuran elemen struktur yang digunakan. Elemen yang terlalu kecil mungkin tidak menghilangkan gangguan yang berarti, sedangkan elemen yang terlalu besar berpotensi menghapus bercak kecil atau menyatukan area yang semestinya terpisah. Karena bercak penyakit dapat memiliki ukuran dan bentuk yang beragam, parameter morfologi perlu dipilih dengan mempertimbangkan detail yang hendak dipertahankan. Penelitian ini melaporkan penggunaan opening dan closing sebagai tahap penyempurnaan, sehingga pengujian lanjutan dapat membandingkan hasil sebelum dan sesudah morfologi secara lebih terperinci.

Penting pula untuk membedakan keberhasilan memperhalus mask dengan keberhasilan mengenali penyakit. Operasi morfologi memperbaiki bentuk komponen pada citra biner, tetapi tidak menambahkan informasi biologis baru. Apabila thresholding sejak awal salah memisahkan bagian daun, morfologi tidak selalu dapat mengoreksi kesalahan tersebut. Dengan demikian, tahapan morfologi berperan sebagai pemrosesan pascasegmentasi dan bukan sebagai pengganti validasi terhadap area penyakit.

L. Analisis hasil MSE dan PSNR.

Pengujian menghasilkan rata-rata MSE sebesar 6.363,96 pada citra bercak daun dan 6.059,31 pada citra sehat. Rata-rata PSNR masing-masing kelompok adalah 10,19 dB dan 10,39 dB. Secara keseluruhan, MSE mencapai 6.219,18 dan PSNR sebesar 10,28 dB. Arah perubahan kedua metrik konsisten: kelompok dengan MSE lebih tinggi memiliki PSNR lebih rendah. Hubungan tersebut memang diharapkan karena PSNR dihitung dari MSE dengan nilai maksimum intensitas citra 8-bit sebesar 255.

MSE menghitung rata-rata kuadrat selisih intensitas antara dua citra. Dalam pengujian ini, citra

grayscale asli dibandingkan dengan citra hasil segmentasi biner. Karena citra grayscale dapat memiliki nilai intensitas di sepanjang rentang 0–255, sedangkan citra biner hanya menggunakan dua nilai, perbedaan numerik dapat menjadi besar. Akibatnya, MSE dan PSNR yang diperoleh mencerminkan perbedaan representasi intensitas antara kedua citra tersebut. Nilai ini tidak secara langsung menyatakan berapa banyak piksel bercak yang berhasil dikenali dengan benar.

Penggunaan MSE dan PSNR masih berguna untuk menggambarkan selisih numerik antara citra masukan dan keluaran, tetapi interpretasinya harus sesuai dengan tujuan evaluasi. Jika target evaluasi adalah kesesuaian batas segmentasi, diperlukan citra acuan yang telah diberi anotasi pada tingkat piksel. Dice Coefficient dan Jaccard Index atau Intersection over Union (IoU) dapat digunakan untuk membandingkan mask hasil sistem dengan mask acuan. Metrik tersebut akan menunjukkan tingkat tumpang tindih area, sehingga lebih dekat dengan pertanyaan apakah bagian yang tersegmentasi sesuai dengan area target.

Nilai PSNR sebesar 10,28 dB tidak seharusnya ditafsirkan sebagai bukti bahwa segmentasi secara visual gagal. Nilai rendah tersebut dapat muncul karena perbandingan dilakukan antara dua bentuk representasi yang berbeda, yakni grayscale dan biner. Sebaliknya, penilaian visual saja juga tidak cukup untuk menyatakan segmentasi akurat. Kombinasi evaluasi visual, metrik berbasis mask acuan, dan pengujian pada variasi citra akan memberikan gambaran yang lebih kuat tentang kualitas segmentasi.

J. Keterbatasan dan implikasi pengujian.

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang perlu dipertimbangkan ketika hasilnya diterapkan di luar kumpulan citra pengujian. Pertama, jumlah data yang digunakan adalah 101 citra, sehingga variasi kondisi daun dan lingkungan yang terwakili masih terbatas. Kedua, Otsu merupakan metode thresholding global yang mengandalkan distribusi intensitas keseluruhan citra. Metode ini dapat mengalami kesulitan ketika pencahayaan tidak merata atau intensitas area daun, bercak, dan latar belakang saling tumpang tindih.

Ketiga, MSE dan PSNR yang dilaporkan membandingkan citra grayscale dengan hasil biner. Oleh karena itu, kedua metrik tersebut belum cukup untuk menyimpulkan akurasi pemisahan area bercak. Keempat, segmentasi merupakan salah satu tahap dalam sistem diagnosis, bukan keseluruhan proses diagnosis. Penentuan jenis penyakit membutuhkan tahapan lanjutan seperti ekstraksi fitur, pembentukan aturan keputusan, atau klasifikasi terlatih yang diuji menggunakan label referensi. Batasan ini perlu disampaikan agar manfaat sistem tidak dinyatakan melebihi bukti eksperimen yang tersedia.

Walaupun demikian, implementasi ini memberikan dasar untuk menguji pipeline pengolahan citra secara sistematis. Sistem menggabungkan pemilihan citra tunggal, pengujian dataset, tampilan ringkasan hasil, dan visualisasi evaluasi. Susunan tersebut memudahkan pengguna menelusuri alur dari citra masukan menuju hasil grayscale, thresholding, serta morfologi. Dalam konteks pengembangan berikutnya, antarmuka ini dapat dipertahankan sambil memperbaiki rancangan evaluasi dan menambahkan tahap klasifikasi yang terpisah.

K. Rekomendasi pengembangan sistem.

Pengembangan berikutnya sebaiknya dimulai dari penyusunan ground truth. Sejumlah citra dapat diberi anotasi mask oleh penilai, kemudian hasil anotasi diperiksa kembali agar konsisten. Mask acuan tersebut memungkinkan pengukuran Dice dan IoU, serta penghitungan precision dan recall pada tingkat piksel. Jika tujuan akhir adalah klasifikasi citra sehat dan bercak, data juga perlu dipisahkan secara jelas untuk pelatihan, validasi, dan pengujian agar performa tidak dinilai pada data yang digunakan untuk membangun model.

Variasi data dapat ditingkatkan melalui pengambilan citra pada kondisi pencahayaan, latar belakang, jarak, dan sudut yang berbeda. Namun, penambahan variasi perlu disertai pencatatan kondisi akuisisi supaya sumber kesalahan dapat dianalisis. Pengujian juga dapat membandingkan Otsu global dengan metode adaptif atau pendekatan berbasis warna, dengan menggunakan data dan metrik evaluasi yang sama. Perbandingan yang adil

perlu mempertahankan prosedur pra-pemrosesan dan aturan evaluasi agar perbedaan hasil terutama berasal dari metode segmentasi yang diuji.

Setelah segmentasi tervalidasi, fitur tekstur seperti Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) dapat dievaluasi sebagai representasi tambahan untuk membedakan karakteristik permukaan daun. Fitur tersebut dapat dipadukan dengan algoritma klasifikasi, misalnya K-Nearest Neighbor atau Support Vector Machine, tetapi pemilihan model perlu didasarkan pada ukuran data, kompleksitas, dan hasil pengujian, bukan asumsi bahwa metode yang lebih kompleks selalu lebih baik. Untuk dataset yang terbatas, model sederhana dengan validasi yang benar dapat menjadi titik awal yang lebih mudah dianalisis.

Terakhir, pengembangan aplikasi untuk penggunaan lapangan perlu menempatkan kemudahan penggunaan dan kejelasan hasil sebagai prioritas. Antarmuka sebaiknya membedakan keluaran segmentasi dari kesimpulan diagnosis, menampilkan kualitas atau keterbatasan citra masukan, serta menyediakan peringatan ketika hasil tidak meyakinkan. Dengan demikian, sistem dapat diposisikan sebagai alat bantu analisis awal dan bukan pengganti pemeriksaan ahli tanaman. Rangkaian pengembangan tersebut akan membuat klaim manfaat sistem lebih terukur dan dapat diuji ulang.

L. Konsistensi prosedur eksperimen.

Pengujian yang dapat direplikasi memerlukan urutan pemrosesan yang sama untuk setiap citra. Dalam penelitian ini, urutan tersebut dimulai dari pemuatan berkas, penyeragaman dimensi, penyesuaian kecerahan, konversi grayscale, perhitungan histogram, penentuan threshold, operasi morfologi, dan penghitungan metrik. Jika urutan atau parameter berubah antar citra, perbedaan hasil tidak lagi dapat dikaitkan hanya dengan karakteristik data. Karena itu, implementasi sebaiknya menjaga konfigurasi pemrosesan tetap konsisten dan mencatat nilai ambang serta hasil evaluasi untuk setiap berkas.

Pencatatan hasil per citra juga diperlukan untuk menelusuri nilai ekstrem yang mungkin memengaruhi rata-rata. Dua dataset dengan nilai

rata-rata yang sama dapat memiliki sebaran hasil yang berbeda. Sebagian citra mungkin tersegmentasi dengan baik, sedangkan citra lainnya memiliki kesalahan yang besar. Pelaporan nilai rata-rata sebaiknya dilengkapi nilai minimum, maksimum, simpangan baku, atau distribusi nilai apabila data tersebut tersedia. Analisis sebaran membantu menilai kestabilan metode dan mengidentifikasi kondisi citra yang perlu diperiksa lebih lanjut.

Selain konsistensi algoritma, konsistensi pengelolaan dataset juga penting. Berkas duplikat, citra yang rusak, atau citra yang memiliki nama serupa dapat memengaruhi penghitungan jumlah data dan interpretasi hasil. Pemeriksaan dataset sebelum eksperimen perlu memastikan bahwa setiap berkas dapat dibaca, kelompok kelas ditentukan secara jelas, dan hasil pemrosesan yang disimpan berasal dari citra yang benar. Langkah ini tidak mengubah metode Otsu, tetapi meningkatkan keterlacakan proses eksperimen.

M. Pertimbangan efisiensi komputasi.

Otsu Thresholding relatif sederhana karena proses utamanya menggunakan histogram intensitas dan evaluasi kandidat ambang. Untuk citra grayscale 8-bit, histogram memiliki rentang intensitas terbatas sehingga perhitungan ambang dapat dilakukan tanpa operasi yang terlalu mahal. Karakteristik tersebut menjadikan Otsu sesuai sebagai tahap awal pada sistem pengolahan citra yang memerlukan proses sederhana. Namun, waktu proses keseluruhan tetap dipengaruhi oleh pembacaan berkas, resizing, konversi warna, operasi morfologi, dan penyimpanan hasil.

Penyeragaman citra menjadi 512×512 piksel merupakan keputusan yang berkaitan dengan efisiensi sekaligus kualitas. Resolusi yang lebih tinggi dapat mempertahankan detail kecil, tetapi meningkatkan kebutuhan memori dan waktu pemrosesan. Resolusi yang lebih rendah mempercepat pemrosesan, namun dapat menghilangkan struktur kecil yang penting. Dengan demikian, pemilihan resolusi ideal sebaiknya diuji melalui eksperimen pembandingan yang melaporkan waktu proses serta kualitas segmentasi, bukan hanya berdasarkan pertimbangan kecepatan.

Untuk pengujian dataset, pemrosesan secara berurutan juga membantu menjaga kebutuhan memori tetap terkendali karena sistem tidak harus memuat seluruh citra resolusi penuh secara bersamaan. Antarmuka dapat menampilkan progres dan ringkasan setelah proses selesai, sebagaimana dirancang dalam sistem ini. Jika jumlah data meningkat, sistem perlu menyediakan penanganan kesalahan untuk berkas yang gagal dibaca sehingga satu citra bermasalah tidak menghentikan seluruh pengujian. Aspek ini menjadi bagian dari keandalan aplikasi, meskipun tidak secara langsung menentukan ketepatan ambang Otsu.

O. Validitas interpretasi dan batas klaim.

Validitas kesimpulan harus mengikuti jenis bukti yang dikumpulkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Otsu Thresholding dapat diterapkan pada citra daun sirih dan menghasilkan keluaran segmentasi yang dapat diamati. Rata-rata threshold, MSE, dan PSNR memberikan deskripsi numerik tentang proses tersebut. Akan tetapi, belum tersedianya evaluasi mask berbasis anotasi piksel berarti hasil ini belum dapat digunakan untuk menyatakan tingkat ketepatan segmentasi bercak secara langsung. Pernyataan tersebut bukan berarti metode tidak bermanfaat, melainkan menetapkan batas kesimpulan yang didukung oleh eksperimen. Istilah diagnosis juga perlu digunakan secara hati-hati. Segmentasi memisahkan bagian citra berdasarkan ciri intensitas, sedangkan diagnosis mengaitkan bukti visual dengan kategori kondisi tanaman. Sistem yang hanya melakukan thresholding belum tentu dapat membedakan bercak penyakit dari bayangan, kotoran, atau variasi alami pada daun. Agar dapat disebut sebagai sistem diagnosis yang tervalidasi, diperlukan mekanisme klasifikasi yang jelas, data label rujukan, serta pelaporan hasil seperti confusion matrix, precision, recall, dan F1-score. Pelaporan tersebut perlu dibedakan dari metrik perbedaan citra seperti MSE dan PSNR.

Pada penggunaan praktis, hasil segmentasi sebaiknya ditampilkan sebagai informasi pendukung yang perlu diperiksa oleh pengguna. Sistem tidak seharusnya memberi kepastian mengenai jenis penyakit hanya berdasarkan nilai

threshold. Penerapan yang lebih bertanggung jawab adalah menjadikan keluaran sebagai tahap awal untuk menyoroti area yang perlu diperiksa, kemudian melakukan verifikasi dengan pengetahuan agronomi atau metode klasifikasi yang telah diuji. Pembatasan klaim ini meningkatkan transparansi dan memudahkan penelitian lanjutan membangun evaluasi yang lebih kuat.

N. Sintesis temuan penelitian.

Secara keseluruhan, eksperimen menunjukkan bahwa metode Otsu dapat diintegrasikan ke dalam alur pengolahan citra daun sirih dengan proses yang terdiri atas pra-pemrosesan, penentuan ambang otomatis, dan penyempurnaan morfologi. Rata-rata threshold pada kelompok bercak dan sehat yang relatif berdekatan memperlihatkan bahwa nilai ambang perlu dipahami sebagai hasil distribusi intensitas citra, bukan sebagai penentu langsung kategori penyakit. Karena itu, hasil segmentasi harus ditafsirkan bersama kondisi citra dan tujuan penggunaan sistem.

Perbandingan MSE dan PSNR antar kelompok memperlihatkan perbedaan numerik yang relatif terbatas, dengan MSE lebih tinggi pada kelompok bercak dan PSNR sedikit lebih tinggi pada kelompok sehat. Perbedaan ini dapat menjadi catatan deskriptif, tetapi tidak membuktikan bahwa satu kelompok tersegmentasi lebih akurat daripada kelompok lain. Untuk membuat perbandingan kualitas yang lebih kuat, penelitian selanjutnya perlu menggunakan mask acuan dan metrik tumpang tindih area. Evaluasi juga perlu melaporkan hasil per citra agar variasi kinerja tidak tertutupi oleh nilai rata-rata.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada implementasi alur segmentasi dan pengujian pada 101 citra daun sirih, disertai tampilan antarmuka yang memudahkan pengamatan hasil. Keterbatasan metrik dan jumlah variasi data memberikan arah pengembangan yang konkret: memperluas dataset, menyiapkan anotasi acuan, membandingkan metode segmentasi, dan menambahkan klasifikasi setelah tahap segmentasi tervalidasi. Dengan pendekatan bertahap tersebut, pengembangan sistem dapat didasarkan pada bukti eksperimen dan bukan sekadar penambahan kompleksitas metode.

P. Arah validasi pada penelitian lanjutan.

Validasi lanjutan sebaiknya menetapkan pertanyaan evaluasi sebelum memilih metrik. Jika yang ingin dinilai adalah kemampuan memisahkan objek daun dari latar belakang, mask acuan dapat menandai kontur daun secara keseluruhan. Jika fokusnya adalah area bercak, anotasi harus secara khusus menandai piksel yang dianggap sebagai gejala. Kedua tujuan tersebut berbeda dan dapat menghasilkan nilai evaluasi yang berbeda pula. Menentukan target evaluasi terlebih dahulu menghindari kesimpulan yang tidak sesuai dengan keluaran algoritma.

Prosedur anotasi juga perlu menjelaskan siapa yang membuat mask, pedoman apa yang digunakan, dan bagaimana perbedaan penilaian diselesaikan. Bercak pada daun dapat memiliki batas yang tidak tegas sehingga anotasi mungkin mengandung unsur subjektif. Penggunaan lebih dari satu penilai atau pemeriksaan ulang pada sebagian sampel dapat membantu mengidentifikasi ketidakpastian tersebut. Setelah mask acuan ditetapkan, citra uji yang sama dapat digunakan untuk membandingkan Otsu, thresholding adaptif, atau metode segmentasi lain dengan prosedur evaluasi yang seragam.

Selain metrik agregat, pelaporan contoh keberhasilan dan kegagalan penting untuk menjelaskan alasan hasil numerik. Citra dengan pencahayaan tidak merata, latar belakang kompleks, atau bercak berukuran kecil dapat dianalisis sebagai kasus khusus. Uraian tersebut membantu menghubungkan hasil eksperimen dengan kondisi yang menyebabkan metode bekerja baik atau kurang baik. Dengan cara ini, penelitian lanjutan tidak hanya menyajikan angka performa, tetapi juga menjelaskan kapan metode layak digunakan dan kapan diperlukan pendekatan tambahan.

Q. Rancangan pengujian yang lebih terukur.

Rancangan pengujian yang lebih terukur dapat membedakan tiga sasaran, yaitu kualitas pemisahan objek, kualitas pemisahan area bercak, dan kemampuan mengelompokkan kondisi daun. Sasaran pertama menilai apakah bentuk daun terpisah dari latar belakang. Sasaran kedua menilai apakah area gejala yang menjadi perhatian sesuai

dengan anotasi. Sasaran ketiga menilai apakah citra dapat ditempatkan pada kelas sehat atau bercak secara benar. Ketiganya berkaitan, tetapi tidak saling menggantikan. Segmentasi objek daun yang baik belum tentu berarti bercak tersegmentasi dengan baik, dan hasil segmentasi yang baik belum otomatis menghasilkan klasifikasi penyakit yang benar.

Untuk menilai pemisahan objek, pengujian dapat menggunakan mask daun sebagai referensi dan menghitung tumpang tindih antara mask sistem dengan mask acuan. Untuk area bercak, anotasi khusus diperlukan karena bercak hanya menempati bagian tertentu dari daun. Setelah tersedia mask acuan, nilai Dice dan IoU dapat dihitung untuk setiap citra, lalu dirangkum menurut kelas. Jika diperlukan, hasil juga dapat dianalisis berdasarkan kondisi pencahayaan atau karakteristik citra. Pengelompokan ini akan membantu menunjukkan apakah metode mengalami penurunan performa pada kondisi tertentu.

Jika penelitian berlanjut ke klasifikasi, pembagian data harus mencegah kebocoran informasi antara data pelatihan dan data pengujian. Citra yang berasal dari daun yang sama atau pengambilan berurutan yang sangat mirip sebaiknya tidak tersebar secara tidak terkontrol ke kelompok berbeda. Jika tidak, hasil pengujian dapat terlihat lebih baik karena model menghadapi citra yang sangat mirip dengan data yang sudah dikenal. Pelaporan jumlah data pada setiap kelompok dan prosedur pembagian data akan meningkatkan transparansi dan memungkinkan penelitian diulang. Pengujian pembandingan juga perlu menetapkan kondisi yang sama untuk seluruh metode. Resolusi citra, dataset, anotasi acuan, dan metrik sebaiknya dipertahankan, sedangkan metode segmentasi menjadi variabel yang dibandingkan. Dengan rancangan tersebut, hasil tidak hanya menunjukkan bahwa suatu metode menghasilkan keluaran, tetapi juga memberikan dasar yang lebih adil untuk menilai kelebihan dan kekurangannya. Jika metode tambahan memerlukan parameter, parameter tersebut perlu ditentukan pada data pengembangan, bukan dipilih setelah melihat hasil akhir pada data uji.

Dengan pengaturan ini, pengembangan sistem dapat dilakukan secara bertahap dan efisien. Tahap pertama memvalidasi segmentasi terhadap anotasi; tahap kedua menguji fitur yang relevan; tahap ketiga menguji klasifikasi dengan pembagian data yang benar; dan tahap terakhir mengevaluasi kemudahan penggunaan antarmuka. Urutan ini membantu mengisolasi sumber kesalahan. Jika hasil klasifikasi belum baik, peneliti dapat mengetahui apakah masalah berasal dari segmentasi, representasi fitur, keterbatasan data, atau model klasifikasi, sehingga revisi berikutnya menjadi lebih terarah.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini mengimplementasikan metode Otsu Thresholding untuk segmentasi citra pada diagnosa penyakit daun sirih. Sistem menentukan nilai ambang optimal secara otomatis berdasarkan distribusi intensitas piksel tanpa parameter manual, kemudian dilanjutkan dengan operasi morfologi opening dan closing untuk menghilangkan noise dan memperhalus batas objek. Metode ini mampu memisahkan objek daun dari latar belakang serta menonjolkan area bercak penyakit dengan batas yang cukup jelas, baik pada citra sehat maupun citra bercak daun.

Evaluasi kuantitatif terhadap 101 citra (53 citra bercak daun dan 48 citra sehat) menghasilkan rata-rata MSE sebesar 6219,18 dan rata-rata PSNR sebesar 10,28 dB, dengan nilai threshold yang cukup stabil (rata-rata 158,92 pada bercak daun dan 157,69 pada citra sehat). Nilai PSNR yang diperoleh masih rendah karena metrik dihitung dengan membandingkan citra biner hasil segmentasi terhadap citra grayscale asli, namun secara visual metode Otsu Thresholding tetap mampu menghasilkan segmentasi yang baik dan konsisten sehingga layak digunakan sebagai metode segmentasi dasar dalam diagnosa penyakit daun sirih.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan metrik evaluasi yang lebih representatif seperti Dice Coefficient atau Jaccard Index, memperluas jumlah dan variasi data citra, mengombinasikan Otsu Thresholding dengan ekstraksi fitur (misalnya GLCM) dan algoritma klasifikasi, serta mengembangkan sistem menjadi aplikasi GUI atau mobile agar dapat digunakan langsung oleh petani dan praktisi pertanian.

BIOGRAFI PENULIS

Lestari Herti merupakan mahasiswa Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu. Bidang penelitian yang ditekuni meliputi pengolahan citra digital, segmentasi citra, dan penerapan visi komputer untuk diagnosis penyakit tanaman.

REFERENSI

- [1] S. Setiawan dan R. Lestari, "Karakteristik Penyakit Daun pada Tanaman Sirih Akibat Infeksi Jamur dan Bakteri," *Jurnal Agroteknologi*, 2023.
- [2] A. Hamdani dkk., "Segmentasi Citra sebagai Tahap Kritis dalam Sistem Diagnosis Penyakit Tanaman Berbasis Citra," *Jurnal Ilmu Komputer*, 2022.
- [3] M. Yudistira dan A. Andika, "Analisis Perbandingan Segmentasi Citra Menggunakan Metode K-Means dan Fuzzy C-Means," 2023.
- [4] Sianturi, "Segmentasi Citra USG Hati Menggunakan Fuzzy C-Means," 2015.
- [5] D. Divya dan M. Thilagu, "Region Growing based K-Means Clustering and Optimal Weight Prior-Attention Residual Learning for Segmentation and Classification of COVID-19 CT Images," 2024.
- [6] E. Akbari Sekehravani, E. Babulak, dan M. Masoodi, "Implementing Canny Edge Detection Algorithm for Noisy Image," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 9, no. 4, hlm. 1404–1410, 2020.
- [7] A. K. Dey, M. Sharma, dan M. R. Meshram, "Image Processing Based Leaf Rot Disease Detection of Betel Vine (Piper Betle L.)," *Procedia Computer Science*, vol. 85, hlm. 748–754, 2016.
- [16] S. Mohanty, D. Hughes, dan M. Salathé, "Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection," *Frontiers in Plant Science*, vol. 7, 2016.
- [17] Fitria dkk., "Identifikasi Penyakit Daun Cabai Menggunakan HSV Color Segmentation," 2022.
- [18] A. Herijanto dkk., "Standarisasi Akuisisi Citra untuk Analisis Penyakit Tanaman," 2023.
- [19] M. Sezgin dan B. Sankur, "Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 13, no. 1, hlm. 146–165, 2004.
- [20] N. Sibiya dan M. Sumbwanyambe, "A Computational Procedure for the Recognition and Classification of Maize Leaf Diseases Out of Healthy Leaves Using Morphological Operations," 2019.
- [21] Q. Huynh-Thu dan M. Ghanbari, "Scope of Validity of PSNR in Image/Video Quality Assessment," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 13, hlm. 800–801, 2008.
- [22] Ndamung dkk., "Penerapan Metode Thresholding pada Segmentasi Citra Daun Padi untuk Identifikasi Area Terinfeksi Penyakit," 2023.
- [8] Meshram dkk., "Otsu Thresholding for Automatic Image Segmentation: A Review," 2016.
- [9] M. Sharma dkk., "Application of Otsu Thresholding for Medical Image Segmentation," 2016.
- [10] Femi David dan Manapakkam Anandan Mukunthan, "Betel Leaf Diseases Classification using Machine Learning Algorithm: A Feasible Approach," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 40, no. 1, hlm. 74–86, 2024.
- [11] R. C. Gonzalez dan R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 4th ed. Pearson, 2018.
- [12] S. Sahu dkk., "A Survey on Image Segmentation Techniques," 2022.
- [13] Zhang dkk., "Comparative Study of Otsu, Adaptive Gaussian Thresholding, and K-Means Clustering for Tomato Leaf Disease Segmentation," 2021.
- [14] A. Kumar dan S. Patil, "Computational Complexity Analysis of Thresholding Methods for Mobile-based Plant Disease Diagnosis," 2021.
- [15] Dutta dkk., "Phenolic and Essential Oil Content of Piper betle L. Leaves: Antibacterial and Antifungal Properties," 2020.