

**IMPLEMENTASI MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION
UNTUK EKTRAKSI TULANG DAUN (LEAF VEIN) DARI
CITRA DAUN**

SKRIPSI

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Kelulusan
Jenjang Strata Satu Pada program Studi Teknik Informatika**

Oleh
Muhamad Fadhili
2255201141



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH BENGKULU
2026**

LEMBAR PERSETUJUAN

IMPLEMENTASI MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION UNTUK EKTRAKSI TULANG DAUN (LEAF VEIN) DARI CITRA DAUN

Oleh
Muhamad Fadhili
2255201141

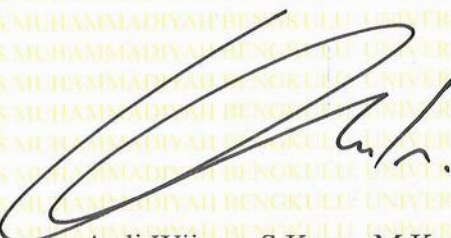
Tugas Akhir ini Telah Diterima dan Disahkan
untuk Memenuhi Persyaratan Mencapai Gelar
SARJANA KOMPUTER (S.Kom)

Pada
PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH BENGKULU

Bengkulu, 9 Juli 2026
Disetujui oleh

Ketua Program Studi,

Dosen Pembimbing,



Ardi Wijaya, S.Kom., M.Kom
NP.198805112014081181



Gunawan., S.Kom., M.Kom
NIDN. 0203078903

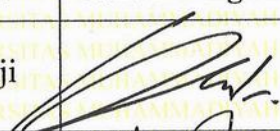
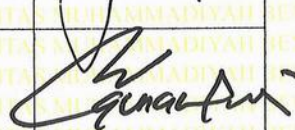
LEMBAR PERSETUJUAN HASIL REVISI

**IMPLEMENTASI MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION
UNTUK EKTRAKSI TULANG DAUN (LEAF VEIN) DARI
CITRA DAUN**

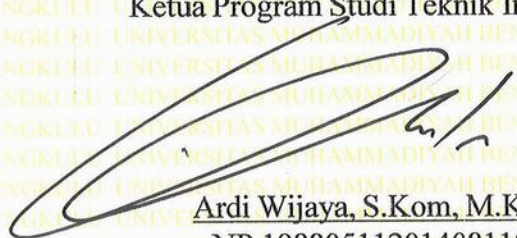
Oleh
Muhamad Fadhili
2255201141

Telah Melakukan Revisi Sesuai dengan Perubahan
dan Perbaikan yang Diminta Pada Saat Sidang Tugas Akhir

Bengkulu, 28 Juli 2026
Menyetujui

No	Nama Dosen	Keterangan	Tanda Tangan
1	Ardi Wijaya, S.Kom., M.Kom	Ketua Penguji	
2	Yovi Apridiansyah.,S.Kom., M.Kom	Penguji 1	
3	Gunawan.,S.Kom., M.Kom	Penguji 2	

Mengetahui
Ketua Program Studi Teknik Informatika


Ardi Wijaya, S.Kom, M.Kom
NP.198805112014081181

LEMBAR PENGESAHAN

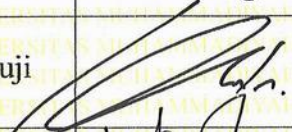
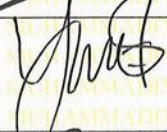
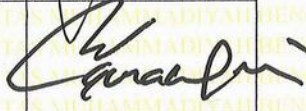
IMPLEMENTASI MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION UNTUK EKTRAKSI TULANG DAUN (LEAF VEIN) DARI CITRA DAUN

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Kelulusan
Jenjang Strata pada Program Studi Teknik Informatika

Oleh
Muhamad Fadhili
2255201141

Bengkulu, 28 Juli 2026

No	Nama Dosen	Keterangan	Tanda Tangan
1	Ardi Wijaya, S.Kom., M.Kom	Ketua Penguji	
2	Yovi Apridiansyah.,S.Kom., M.Kom	Penguji 1	
3	Gunawan.,S.Kom., M.Kom	Penguji 2	

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik



R.G Guntur Alam, M.Kom., Ph. D
NP.197301012000041040

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

- 1) Naskah Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Universitas Muhammadiyah Bengkulu maupun perguruan tinggi lainnya.
- 2) Skripsi ini murni merupakan karya penelitian saya sendiri dan tidak menjiplak karya pihak lain. Dalam hal ada bantuan atau arahan dari pihak lain maka telah saya sebutkan identitas dan jenis bantuannya di dalam lembar ucapan terima kasih.
- 3) Seandainya ada karya pihak lain yang ternyata memiliki kemiripan dengan karya saya ini, maka hal ini adalah di luar pengetahuan saya dan terjadi tanpa kesengajaan dari pihak saya.

Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terbukti adanya kebohongan dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai norma yang berlaku di Universitas Muhammadiyah Bengkulu.

Bengkulu, 28 Juli 2026
Yang membuat pernyataan



Muhamad Fadhili
NPM. 2255201141

MOTTO

"Diam dalam proses, bersinar dalam hasil"

"Jangan pernah menyerah sebelum mencoba, karena hasil tidak akan
mengkhianati usaha"

“Terlambat bukan berarti gagal, cepat bukan berarti hebat. Terlambat bukan
menjadi alasan untuk menyerah, setiap orang memiliki proses yang berbeda.
Percaya proses itu yang paling penting, karna allah telah mempersiapkan hal baik
di balik kata proses yang kamu anggap rumit”

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, yang telah memberi saya kekuatan, kesehatan, dan kesabaran untuk menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini saya persembahkan kepada :

1. Terima kasih yang tak terhingga saya sampaikan kepada Ayah dan Ibu saya, yang telah menjadi pilar kehidupan saya dan memberikan dukungan tanpa henti. Doa dan kasih sayang kalian menjadi sumber inspirasi dalam perjalanan ini.
2. Kepada Kakak saya (Joni Safrianto), Abang saya (Rechi Irawan), dan Ayuk Saya (Ayu Lestari) beserta ipar saya (Ayuk Dina, Mba Ratu, dan dang Edo) terima kasih untuk setiap dukungan, semangat, motivasi dan doa-doa yang selalu kalian berikan. Kehadiran kalian menjadi salah satu alasan terbesar saya untuk terus berjuang dan tidak menyerah dalam menyelesaikan pendidikan ini. Semoga pencapaian ini bisa menjadi contoh dan motivasi Adikmu ini agar terus belajar, bermimpi besar, dan meraih cita-cita yang diinginkan.
3. Kepada Dosen Pembimbing Bapak Gunawan S.Kom, M.Kom, Terima kasih atas bimbingan, arahan, dan kesabaran yang diberikan selama proses penulisan skripsi ini. Saya beruntung memiliki pembimbing seperti Bapak yang selalu membimbing dan memberikan wawasan yang berharga.
4. Kepada Bapak Yovi Apridiansyah S.Kom, M.Kom, Terima kasih atas bimbingan, kesabaran, arahan, dan ilmu yang telah diberikan selama proses penyusunan skripsi ini.

5. Rekan-rekan “Gwencana” terima kasih telah menemani dan membantu berjuang dalam proses panjang kita selama ini, terima kasih juga telah mencurahkan seluruh dukungan dan motivasi terhadap satu sama lain.
6. Seseorang yang selalu menemani, terima kasi atas segala dorongan, semangat, dan kepercayaan serta sudah mau meluangkan waktu, memberi dukungan kepada saya.
7. Serta semua pihak yang tak mampu penulis sebutkan seluruhnya, semoga Allah SWT membalas kebaikan hamba-hambanya.
8. Dan tak kala pentingnya skripsi ini saya persembahkan kepada diri saya sendiri yaitu Muhamad Fadhili, terima kasih atas setiap langkah yang ditempuh, atas keberanian untuk terus melangkah meski sering merasa lelah dan ragu. Terima kasih telah bertahan, belajar, dan tumbuh dari setiap proses yang tidak selalu mudah.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



1. Identitas Pribadi

Nama : Muhamad Fadhili
TTL : Bengkulu Selatan, 30 Juni 2004
Agama : Islam
Anak Ke : Empat
Alamat : Jl. Gama 1
Kelurahan : Pasar Baru
Kecamatan : Kota Manna
Kabupaten: Bengkulu Selatan
Provinsi : Bengkulu

2. Nama Orang Tua

Nama Ayah : Marsayuti
Pekerjaan : Pensiunan
Nama Ibu : Nazar yani
Pekerjaan : Ibu Rumah Tangga

3. Riwayat Pendidikan

TK Negeri Pembina Bengkulu Selatan	: 2009–2010
SD Negeri 22 Bengkulu Selatan	: 2010–2016
SMP Negeri 4 Bengkulu Selatan	: 2016–2019
SMA Negeri 2 Bengkulu Selatan	: 2019–2022
Universitas Muhammadiyah Bengkulu	: 2022–2026

ABSTRAK

IMPLEMENTASI MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION UNTUK EKTRAKSI TULANG DAUN (LEAF VEIN) DARI CITRA DAUN

Nama : Muhamad Fadhili

NPM 2255201141

Pembimbing : Gunawan., S.Kom., M.Kom

Penelitian ini mengimplementasikan metode *Morphological Skeletonization* untuk mengekstraksi struktur tulang daun dari citra daun mangga (*Mangifera indica*) secara otomatis. Sistem yang dibangun menggunakan *pipeline* pemrosesan citra yang mencakup segmentasi daun berbasis HSV, pra-pemrosesan dengan Bilateral Filter, peningkatan kontras vena menggunakan *Black-Hat Transform* dua skala dan *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (CLAHE), binerisasi menggunakan metode Otsu dan *Adaptive Thresholding*, operasi morfologi *opening* dan *closing*, serta skeletonisasi menggunakan algoritma *iterative thinning* dari pustaka scikit-image. Evaluasi kinerja dilakukan secara kuantitatif menggunakan metrik *Mean Squared Error* (MSE) pada dua tahap, yaitu MSE Binerisasi dan MSE Skeleton. Pengujian dilakukan terhadap dataset yang terdiri dari 150 citra daun mangga dalam format JPG yang dikumpulkan menggunakan kamera smartphone dengan kondisi pengambilan yang terstandarisasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mencapai akurasi Skeleton rata-rata sebesar 94,47% dengan standar deviasi 1,06%, akurasi Binary rata-rata sebesar 61,28%, dan akurasi Global rata-rata sebesar 77,87%. Nilai rata-rata MSE Binerisasi sebesar 25179,25 dan MSE Skeleton sebesar 3599,02 mengkonfirmasi bahwa sistem mampu mengekstraksi kerangka tulang daun secara konsisten dan akurat pada seluruh dataset. Fitur struktural skeleton yang diekstraksi meliputi panjang, jumlah titik percabangan, konektivitas, dan densitas yang merepresentasikan karakteristik morfologi jaringan venasi daun secara kuantitatif. Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan morfologi matematika menawarkan solusi yang efisien, transparan, dan dapat diinterpretasi untuk tugas ekstraksi tulang daun dibandingkan pendekatan berbasis *deep learning* yang memerlukan sumber daya komputasi besar.

Kata Kunci: *Morphological Skeletonization*, Ekstraksi Tulang Daun, *Leaf Vein*, *Black-Hat Transform*, CLAHE, *Iterative Thinning*, *Mean Squared Error*, Daun Mangga

ABSTRACT

IMPLEMENTATION OF MORPHOLOGICAL SKELETONIZATION FOR LEAF VEIN EXTRACTION FROM LEAF IMAGES

Name : Muhamad Fadhili
NPM 2255201141
Advisor : Gunawan., S.Kom., M.Kom

This study implements the Morphological Skeletonization method to automatically extract leaf vein structures from mango leaf (*Mangifera indica*) images. The developed system utilizes an image processing pipeline that includes HSV-based leaf segmentation, preprocessing with Bilateral Filter, vein contrast enhancement using dual-scale Black-Hat Transform and Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), binarization using Otsu and Adaptive Thresholding methods, morphological opening and closing operations, and skeletonization using the iterative thinning algorithm from the scikit-image library. Performance evaluation was conducted quantitatively using Mean Squared Error (MSE) metrics at two stages, namely Binarization MSE and Skeleton MSE. Testing was performed on a dataset consisting of 150 mango leaf images in JPG format collected using a smartphone camera under standardized acquisition conditions. The results show that the system achieves an average Skeleton accuracy of 94.47% with a standard deviation of 1.06%, an average Binary accuracy of 61.28%, and an average Global accuracy of 77.87%. The average Binarization MSE of 25179.25 and Skeleton MSE of 3599.02 confirm that the system is capable of extracting leaf vein skeletons consistently and accurately across the entire dataset. The extracted skeleton structural features include length, number of branch points, connectivity, and density, which quantitatively represent the morphological characteristics of the leaf venation network. This study demonstrates that the mathematical morphology approach offers an efficient, transparent, and interpretable solution for leaf vein extraction tasks compared to deep learning-based approaches that require large computational resources.

Keywords: Morphological Skeletonization, Leaf Vein Extraction, Black-Hat Transform, CLAHE, Iterative Thinning, Mean Squared Error, Mango Leaf.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan judul " Implementasi Morphological Skeletonization Untuk Ekstraksi Tulang Daun (Leaf Vein) Dari Citra Daun". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer di Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu. Penulis juga mengucapkan terima kasih sebesar besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan selama proses penelitian hingga penulisan skripsi selesai kepada :

1. Bapak Dr. Susiyanto, M. Si., selaku Rektor Universitas Muhammadiyah
2. Bapak RG Guntur Alam, M.Kom, Ph.D, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Bengkulu.
3. Bapak Ardi Wijaya, S. Kom., M. Kom., selaku Ketua Program Studi Fakultas Teknik Informatika Universitas Muhammadiyah Bengkulu.
4. Bapak Gunawan., S. Kom., M. Kom., Terima kasih atas bimbingan, arahan, dan kesabaran yang luar biasa selama proses penyusunan skripsi ini
5. Bapak Yovi Apridiansyah S.Kom, M.Kom., Terima kasih atas bimbingan, dan arahan yang diberikan selama ini.

6. Ayah, Ibu, Kakak, Abang, Ayuk dan semua pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam penyusunan skripsi ini.

Walaikumsalam Warahmatullahi Wabarakatuh

Bengkulu, 9 Juli 2026

Penulis
Muhamad Fadhili
NPM. 2255201141

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN HASIL REVISI.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
SURAT PERNYATAAN.....	v
MOTTO.....	vi
PERSEMBAHAN.....	vii
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	ix
ABSTRAK.....	x
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Pertanyaan Penelitian.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Kerangka Kerja Penelitian (<i>Research Framework</i>)	4
BAB II.....	12
TINJAUAN LITERATUR.....	12
2.1 Penelitian Terkait.....	12
2.2 Pengolahan Citra Digital	16
2.3 Citra Daun dan Karakteristik Tulang Daun	17
2.4 Segmentasi Citra	19
2.4.1 Segmentasi Berbasis Warna (HSV)	19
2.4.2 Thresholding Otsu.....	20
2.4.3 Adaptive Thresholding.....	20
2.5 Morfologi Matematika.....	21

2.5.1	Operasi Dasar Morfologi	21
2.6	Morphological Skeletonization	22
2.6.1	Konsep Dasar Skeletonisasi	22
2.6.2	Iterative Thinning	23
2.6.3	Fitur Struktural Skeleton.....	23
2.7	Mean Squared Error (MSE)	24
2.8	Phyton	25
BAB III		28
ANALISIS MASALAH DAN PERANCANGAN PROGRAM.....		28
3.1	Analisis Masalah	28
3.2	Metode Pelaksanaan	31
3.3	Perancangan Program.....	39
BAB IV		42
IMPLEMETASI DAN UJI COBA.....		42
4.1	Implementasi.....	42
4.1.1	Persiapan Dataset Citra	42
4.1.2	Tahap Segmentasi Citra Daun	46
4.1.3	Pra Pemrosesan	47
4.1.4	Tahap Peningkatan Kontras dan Binerisasi Vena	47
4.1.5	Tahap Operasi Morfologi Dasar	48
4.1.6	Tahap Morphological Skeletonization	49
4.1.7	Tahap Ekstraksi Fitur Struktural Skeleton	50
4.1.8	Tahap Evaluasi Kinerja Menggunakan MSE.....	50
4.2	Uji Coba	51
4.2.1	Uji Coba Citra Tunggal.....	51
4.2.2	Proses Uji Keseluruhan	55
BAB V		69
KESIMPULAN DAN SARAN		69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		73

DAFTAR TABEL

Tabel 1.4 Tabel Framwork Penelitian	5
Tabel 4.1 Tabel Hasil Pengujian	56
Tabel 4.2 Tabel Hasil Evaluasi	62

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gambar Citra Daun	18
Gambar 3.1 Proses Tahap Pelaksanaan Eksperimen	32
Gambar 3.2 Flowchart Sistem	38
Gambar 3.3 Perancangan Arsitektur	40
Gambar 4.1 Dataset Citra Daun Mangga.....	44
Gambar 4.2 Uji Coba Tunggal.....	52
Gambar 4.3 Proses Uji Keseluruhan	55
Gambar 4.4 Grafik MSE.....	64

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Identifikasi tumbuhan merupakan salah satu kebutuhan mendasar dalam bidang botani, pertanian, dan ekologi. Seiring dengan perkembangan teknologi pengolahan citra digital, pendekatan berbasis komputer mulai banyak dimanfaatkan untuk mendukung proses identifikasi tanaman secara otomatis. Daun menjadi objek yang paling sering digunakan dalam penelitian ini karena mudah diperoleh dan memiliki karakteristik morfologi yang kaya, seperti bentuk, warna, tekstur, dan pola tulang daun (*leaf vein*). Di antara berbagai fitur tersebut, pola tulang daun dikenal sebagai fitur yang sangat diskriminatif karena strukturnya bersifat unik untuk setiap spesies tumbuhan dan relatif stabil meskipun kondisi pencahayaan atau sudut pengambilan gambar sering berubah-ubah (Setiyono *et al.*, 2023).

Sejumlah penelitian terdahulu telah mencoba mengatasi permasalahan ekstraksi fitur daun menggunakan berbagai pendekatan. Beberapa di antaranya memanfaatkan teknik *thresholding*, seperti metode Otsu, untuk segmentasi citra daun. Namun, metode ini masih memiliki kelemahan signifikan ketika dihadapkan pada variasi kondisi alamiah, seperti perubahan intensitas cahaya dan latar belakang yang heterogen (Gusti Tri Ananda, Pardosi and Maysari Br Sembiring, 2024). Pendekatan lain menggunakan *deep learning* berbasis *Convolutional Neural Network* (CNN) untuk klasifikasi tumbuhan. Meskipun akurasinya tinggi, metode CNN tidak mengekstraksi struktur tulang daun secara eksplisit sehingga

bersifat *black box* dan kurang *interpretable*, padahal pola venasi daun merupakan fitur morfologis kunci dalam taksonomi tumbuhan (Rizki Ramadhani, Nilogiri and A'yun, 2022). Selain itu, metode berbasis *deep learning* membutuhkan dataset yang besar dan sumber daya komputasi yang tinggi, sementara pendekatan *thresholding* konvensional masih rentan terhadap *noise* dan perubahan kontras citra. Di sisi lain, pendekatan morfologi matematika belum banyak dieksplorasi secara mendalam, khususnya untuk tugas ekstraksi kerangka tulang daun, padahal metode ini menawarkan representasi struktural yang kompak dan efisien secara komputasi (Yovi Apridiansyah, Rozali Toyib and Ardi Wijaya, 2022). Sehingga pada penelitian ini untuk mengisi celah tersebut mengimplementasikan *morphological skeletonization* untuk mengekstraksi tulang daun dari citra daun, sehingga menghasilkan representasi kerangka (*skeleton*) yang mempertahankan topologi percabangan asli daun.

Morphological skeletonization merupakan teknik dalam morfologi matematika yang bekerja dengan cara mereduksi objek biner menjadi representasi kerangka satu piksel (*single pixel width skeleton*) sambil mempertahankan topologi dan konektivitas struktur aslinya (Lapendy *et al.*, 2024). Teknik ini sangat relevan untuk diterapkan pada citra tulang daun karena struktur venasi secara alami menyerupai jaringan bercabang yang dapat direpresentasikan dalam bentuk kerangka tipis. Berbeda dengan metode berbasis pembelajaran mesin, *skeletonization* tidak memerlukan tahap pelatihan dan dapat bekerja langsung pada citra biner hasil segmentasi, sehingga prosesnya lebih ringan dan dapat diterapkan pada sistem dengan keterbatasan sumber daya (Andriana *et al.*, 2026).

Berdasarkan uraian di atas, terdapat kebutuhan nyata untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi metode *morphological skeletonization* secara khusus sebagai pendekatan ekstraksi tulang daun dari citra daun. Penelitian ini dirancang untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan membangun sistem yang mampu mengekstraksi kerangka tulang daun secara otomatis menggunakan operasi morfologi, termasuk tahapan *preprocessing*, binarisasi, serta penerapan algoritma *skeletonization*. Hasil ekstraksi diharapkan dapat menjadi representasi fitur yang andal untuk mendukung proses identifikasi secara otomatis. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada pengembangan sistem pengenalan bentuk tulang daun berbasis citra yang lebih efisien dan akurat.

1.2 Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana implementasi metode *Morphological Skeletonization* dapat mengekstraksi struktur tulang daun (*leaf vein*) dari citra daun secara akurat?
2. Bagaimana pengaruh metode binerisasi *Otsu Thresholding* dan *Adaptive Thresholding* terhadap kualitas hasil ekstraksi tulang daun yang diukur menggunakan nilai *Mean Squared Error* (MSE)?
3. Bagaimana kinerja sistem dalam memproses dataset gambar daun secara keseluruhan total data 150 daun mangga ditinjau dari konsistensi nilai MSE binerisasi dan MSE skeleton antar gambar?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mengimplementasikan metode *Morphological Skeletonization* untuk mengekstraksi struktur tulang daun (*leaf vein*) dari citra daun

digital menggunakan pendekatan *Black-Hat Transform*, *CLAHE*, dan *iterative thinning*.

2. Membandingkan kinerja dua metode binerisasi, yaitu *Otsu Thresholding* dan *Adaptive Thresholding*, dalam proses ekstraksi tulang daun berdasarkan nilai *Mean Squared Error* (MSE) sebagai metrik evaluasi kuantitatif.
3. Mengevaluasi performa sistem secara kuantitatif menggunakan nilai MSE binerisasi dan MSE skeleton pada dataset citra daun, serta menyajikan hasil analisis melalui visualisasi grafik distribusi dan tabel komparasi.

1.4 Kerangka Kerja Penelitian (*Research Framework*)

Penelitian ini dirancang menggunakan kerangka kerja (*framework*) yang terstruktur dan sistematis guna memastikan setiap tahapan proses berjalan secara terarah dan dapat direproduksi. Framework penelitian disusun berdasarkan alur pengolahan citra digital yang mencakup seluruh proses mulai dari akuisisi data hingga evaluasi hasil akhir. Setiap tahapan saling berkaitan dan menghasilkan keluaran yang menjadi masukan bagi tahapan berikutnya, sehingga membentuk sebuah *pipeline* pemrosesan yang kohesif. Secara keseluruhan, framework penelitian ini terdiri dari sembilan tahapan utama yang dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1. Framework Penelitian

No	Tahapan Proses	Deskripsi Kegiatan	Input	Output
1	Mulai	Tahap awal pelaksanaan penelitian	-	Proses penelitian dimulai
2	Akuisisi Citra Daun	Pengambilan citra daun langsung menggunakan kamera dengan latar belakang putih seragam dan pencahayaan konsisten	Daun sampel	Dataset citra daun (JPG)
3	Pra-pemrosesan Citra	Resize ke 512×512 piksel, segmentasi daun otomatis berbasis HSV, konversi BGR ke grayscale, penghilangan noise dengan Bilateral Filter untuk menjaga tepi tulang daun	Dataset citra daun	Citra grayscale yang telah di-denoise
4	Peningkatan Kontras & Binerisasi	Penerapan Black-Hat Transform dua skala untuk menangkap struktur vena gelap, peningkatan kontras dengan CLAHE, lalu binerisasi menggunakan metode Otsu atau Adaptive Thresholding	Citra grayscale	Citra biner tulang daun
5	Operasi Morfologi Dasar	Penerapan <i>opening</i> dengan kernel elips 2×2 untuk menghilangkan noise titik terisolasi, dan <i>closing</i> dengan kernel 3×3 untuk	Citra biner	Citra biner yang telah diperbaiki

No	Tahapan Proses	Deskripsi Kegiatan	Input	Output
		menyambungkan garis vena yang hampir terhubung		
6	Morphological Skeletonization	Iterative thinning menggunakan erosi morfologi berulang hingga tersisa kerangka setebal satu piksel	Citra biner	Kerangka tulang daun (skeleton)
7	Ekstraksi Fitur Kerangka	Perhitungan panjang total kerangka, jumlah titik percabangan (<i>branch points</i>), jumlah komponen konektivitas, dan densitas kerangka	Kerangka tulang daun	Data fitur numerik
8	Evaluasi Kinerja	Perhitungan MSE Binerisasi (grayscale vs. citra vena yang ditingkatkan) dan MSE Skeleton (citra morfologi vs. skeleton) sebagai metrik evaluasi kuantitatif	Citra hasil tiap tahap	Nilai MSE Binerisasi & MSE Skeleton
9	Analisis & Visualisasi	Penyajian hasil dalam tabel komparasi, grafik batang MSE, scatter plot, dan histogram distribusi MSE antar gambar dataset	Data MSE & fitur	Grafik dan tabel hasil
10	Selesai	Tahap akhir proses penelitian	Hasil evaluasi	

Mulai merupakan tahap awal pelaksanaan seluruh rangkaian penelitian.

Pada tahap ini dilakukan persiapan umum meliputi studi literatur, penentuan ruang lingkup penelitian, serta penyiapan perangkat keras dan perangkat lunak yang

dibutuhkan, yaitu kamera untuk akuisisi citra, komputer, serta pustaka Python seperti OpenCV, scikit-image, dan NumPy. Tahap kedua, Tahap akuisisi merupakan proses pengumpulan data citra daun yang akan digunakan sebagai dataset penelitian. Pengambilan gambar dilakukan secara langsung menggunakan kamera dengan kondisi yang dikendalikan, yaitu latar belakang putih yang seragam dan pencahayaan yang konsisten. Standardisasi kondisi pengambilan gambar ini bertujuan untuk meminimalkan variasi yang tidak relevan seperti bayangan dan pantulan cahaya, sehingga kualitas citra yang diperoleh lebih seragam dan memudahkan proses segmentasi pada tahap berikutnya. Dataset yang dikumpulkan mendukung format citra JPG, PNG, BMP, dan TIFF. Tahap ketiga, Pra-pemrosesan merupakan tahapan krusial yang bertujuan menyiapkan citra agar siap diolah pada tahapan selanjutnya. Pertama, seluruh citra diresize ke resolusi seragam 512×512 piksel untuk memastikan konsistensi dimensi data. Selanjutnya dilakukan segmentasi daun otomatis berbasis ruang warna HSV untuk memisahkan area daun dari latar belakang, di mana area di luar daun diisi dengan nilai rata-rata intensitas daun agar tidak memengaruhi proses *thresholding*. Citra kemudian dikonversi dari BGR ke *grayscale*, lalu dilakukan penghilangan *noise* menggunakan Bilateral Filter dengan parameter $d=9$, $\sigma_{\text{Color}}=75$, dan $\sigma_{\text{Space}}=75$. Pemilihan Bilateral Filter didasarkan pada kemampuannya mempertahankan tepi struktur tulang daun sekaligus meredam *noise*, berbeda dari Gaussian atau median filter yang cenderung memperhalus tepi secara tidak selektif.

Tahap keempat yaitu peningkatan kontras dan binerisasi. Tahapan ini merupakan inti dari proses ekstraksi tulang daun sebelum skeletonisasi dilakukan. Proses diawali dengan Black-Hat Transform pada dua skala kernel, yaitu kernel besar (25×25) untuk menangkap vena utama dan kernel kecil (9×9) untuk menangkap vena halus, kemudian kedua hasil digabungkan dengan pembobotan 0,6 dan 0,4. Black-Hat Transform dipilih karena secara matematis mampu menonjolkan struktur yang lebih gelap dari sekitarnya, yang sesuai dengan karakteristik tulang daun yang berwarna lebih gelap dibanding permukaan daun. Hasil Black-Hat kemudian ditingkatkan kontrasnya menggunakan CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) dengan clipLimit=4.0 dan tileGridSize=(8,8). Tahap akhir adalah binerisasi yang dapat dilakukan dengan dua metode yang dapat dipilih, yaitu Otsu Thresholding yang menentukan nilai ambang secara otomatis berdasarkan histogram global citra, atau Adaptive Thresholding yang menentukan nilai ambang secara lokal per blok piksel dengan ukuran blok 21 dan konstanta koreksi -5.

Tahap kelima, yaitu operasi morfologi dasar. Setelah binerisasi, citra biner masih mengandung artefak berupa titik-titik noise terisolasi dan celah kecil pada struktur vena. Untuk mengatasinya, diterapkan dua operasi morfologi secara berurutan. Pertama, operasi opening menggunakan structuring element elips berukuran 2×2 piksel untuk menghilangkan titik noise terisolasi yang berukuran sangat kecil tanpa merusak struktur vena. Kedua, operasi closing menggunakan structuring element persegi 3×3 piksel untuk menyambungkan garis vena yang

hampir terhubung namun terputus akibat proses binerisasi, sehingga kontinuitas struktur tulang daun tetap terjaga sebelum memasuki proses skeletonisasi.

Tahap keenam yaitu, *morphological skeletonization*. Tahap skeletonisasi merupakan inti dari penelitian ini. Citra biner yang telah dibersihkan pada tahap sebelumnya diproses menggunakan algoritma iterative thinning melalui fungsi *skeletonize* dari pustaka *scikit-image*. Algoritma ini bekerja dengan cara mengikis piksel-piksel tepi objek secara berulang melalui operasi erosi morfologi, namun dengan syarat bahwa piksel yang dihapus tidak boleh memutus konektivitas struktur. Proses iterasi dihentikan ketika tidak ada lagi piksel yang dapat dihapus tanpa merusak topologi, sehingga tersisa representasi kerangka dengan ketebalan satu piksel (*single pixel width skeleton*) yang mempertahankan topologi dan pola percabangan asli struktur tulang daun.

Tahap ketujuh yaitu, ekstraksi fitur kerangka. Setelah kerangka tulang daun diperoleh, dilakukan ekstraksi fitur numerik untuk merepresentasikan karakteristik struktural skeleton secara kuantitatif. Terdapat empat fitur yang diekstraksi: (1) panjang skeleton (*length*), yaitu total jumlah piksel aktif pada kerangka yang merepresentasikan panjang keseluruhan jaringan tulang daun; (2) jumlah titik percabangan (*branch points*), yaitu jumlah piksel yang memiliki lebih dari dua piksel tetangga aktif dalam lingkungan 8-konektivitas, yang menunjukkan kompleksitas jaringan vena; (3) konektivitas (*connectivity*), yaitu jumlah komponen terhubung yang dihitung menggunakan algoritma *connected components*, yang menunjukkan keutuhan jaringan skeleton; dan (4) densitas

(density), yaitu rasio piksel skeleton terhadap total piksel citra yang menggambarkan kerapatan jaringan tulang daun relatif terhadap ukuran citra.

Tahap kedelapan yaitu, Evaluasi Kinerja. Evaluasi kinerja dilakukan secara kuantitatif menggunakan metrik Mean Squared Error (MSE) yang dihitung pada dua pasang citra. Pertama, MSE Binerisasi dihitung antara citra grayscale hasil denoising dengan citra vena yang telah ditingkatkan (enhanced vein) menggunakan Black-Hat dan CLAHE, yang mengukur seberapa besar perubahan intensitas yang dihasilkan oleh proses peningkatan kontras. Kedua, MSE Skeleton dihitung antara citra biner hasil operasi morfologi dasar dengan citra hasil skeletonisasi, yang mengukur seberapa banyak piksel yang dieliminasi selama proses penipisan kerangka. Kedua nilai MSE ini digunakan sebagai indikator kuantitatif kualitas dan konsistensi proses ekstraksi tulang daun pada setiap citra dalam dataset.

Tahap kesembilan yaitu, Analisis, Visualisasi, dan Selesai. Pada tahap akhir, seluruh hasil pemrosesan dan nilai MSE dari setiap citra dalam dataset disajikan secara komprehensif dalam bentuk tabel komparasi yang memuat fitur-fitur struktural skeleton, grafik batang MSE per gambar, scatter plot hubungan antara MSE Binerisasi dan MSE Skeleton, serta histogram distribusi nilai MSE untuk seluruh dataset. Analisis dilakukan terhadap nilai rata-rata, nilai maksimum, dan nilai minimum dari kedua metrik MSE untuk menilai konsistensi kinerja sistem secara keseluruhan. Selain itu, hasil pemrosesan citra tunggal dapat disimpan dalam format gambar gabungan yang memvisualisasikan seluruh tahapan dari citra asli hingga skeleton, sedangkan data fitur dan MSE untuk

seluruh dataset dapat diekspor ke format CSV untuk keperluan analisis lebih lanjut. Setelah seluruh proses ini selesai, penelitian dinyatakan tuntas.