



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



PERANCANGAN SISTEM DETEKSI DAN SPK GANODERMA SAWIT BERBASIS CITRA TERMAL MENGUNAKAN HYBRID CNN-TRANSFORMER

SKRIPSI

MUHAMMAD ARIFANDI PRASETYO

2207411015

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA DAN
KOMPUTER**

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



**PERANCANGAN SISTEM DETEKSI DAN SPK
GANODERMA SAWIT BERBASIS CITRA TERMAL
MENGUNAKAN HYBRID CNN-TRANSFORMER**

SKRIPSI

**Dibuat untuk Melengkapi Syarat-Syarat yang Diperlukan untuk
Memperoleh Diploma Empat Politeknik**

MUHAMMAD ARIFANDI PRASETYO

2207411015

PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA

**JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA DAN
KOMPUTER**

POLITEKNIK NEGERI JAKARTA

2026



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Arifandi Prasetyo
NIM : 2207411015
Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika dan komputer/T.Informatika
Judul skripsi : Perancangan sistem deteksi dan spk ganoderma sawit berbasis Citra thermal menggunakan hybrid CNN -Transformer

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa skripsi ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bebas dari peniruan terhadap karya dari orang lain. Kutipan pendapat dan tulisan orang lain ditunjuk sesuai dengan cara-cara penulisan karya ilmiah yang berlaku.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa dalam skripsi ini terkandung ciri-ciri plagiat dan bentuk-bentuk peniruan lain yang dianggap melanggar peraturan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Depok, 17 Juli 2026

Yang membuat pernyataan

Muhammad Arifandi Prasetyo
2207411015

LEMBAR PENGESAHAN



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Jurusan TIK Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin dari Jurusan TIK Politeknik Negeri Jakarta

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi diajukan oleh:

Nama : Muhammad Arifandi Prasetyo

NIM : 2207411015

Program Studi : D4 Teknik Informatika

Judul Skripsi : PERANCANGAN SISTEM DETEKSI DAN SPK GANODERMA SAWIT BERBASIS CITRA TERMAL MENGGUNAKAN HYBRID CNN-TRANSFORMER

Telah diuji oleh tim penguji dalam Sidang Skripsi pada hari Rabu, Tanggal Satu, Bulan Juli, Tahun dua ribu dua puluh enam dan dinyatakan **LULUS**.

Disahkan oleh

Pembimbing I : Dr. Prihatin Oktivasari, S.Si, M.Si.

Penguji I : Mera Kartika Delimayanti, S.Si., M.T., Ph.D.

Penguji II : Euis Oktavianti, S.Si., M.T.I.

Penguji III : Fajar Septian, M.Kom.

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Mengetahui:

Jurusan Teknik Informatika dan Komputer

Ketua



Dr. Anita Hidayati, S.Kom., M.Kom.

NIP. 197908032003122003



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul "Perancangan Sistem Deteksi dan SPK Ganoderma Sawit Berbasis Citra Termal Menggunakan Hybrid CNN-Transformer". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Jurusan Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Negeri Jakarta. Penulis menyadari bahwa kelancaran penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Syamsurizal, S.E., M.M. , Selaku Direktur Politeknik Negeri Jakarta
2. Ibu Dr. Anita Hidayati, S.Kom., M.Kom., selaku Ketua Jurusan Teknik Informatika dan Komputer.
3. Ibu Euis Oktavianti, S.Si., M.TI., selaku Kepala Program Studi Teknik Informatika
4. Ibu Dr. Prihatin Oktivasari, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
5. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Jurusan Teknik Informatika dan Komputer yang telah memberikan ilmu pengetahuan yang bermanfaat selama penulis menempuh pendidikan
6. Pimpinan dan Staf PT Bakrie Sawit Unggul, selaku mitra industri yang telah memberikan izin penelitian, memfasilitasi proses pengambilan data, serta memberikan bimbingan teknis yang sangat membantu kelancaran penyusunan skripsi ini.
7. Kedua orang tua dan keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, motivasi, serta dukungan baik moril maupun materil yang tak terhingga

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna karena keterbatasan ilmu dan pengalaman.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Depok, 17 Juli 2026

Yang membuat pernyataan

Muhammad Arifandi Prasetyo
2207411015





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Politeknik Negeri Jakarta, saya bertanda

tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Arifandi Prasetyo

NIM : 2207411015

Jurusan/Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer / Teknik Informatika

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Politeknik Negeri Jakarta Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PERANCANGAN SISTEM DETEKSI DAN SPK GANODERMA SAWIT
BERBASIS CITRA TERMAL MENGGUNAKAN HYBRID
CNN-TRANSFORMER**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Politeknik Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalih mediahan/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Depok, Juni 2026
Yang Menyatakan

(Muhammad Arifandi Prasetyo)

2207411015



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

PERANCANGAN SISTEM DETEKSI DAN SPK GANODERMA SAWIT BERBASIS CITRA TERMAL MENGGUNAKAN HYBRID CNN-TRANSFORMER

ABSTRAK

*Perkebunan kelapa sawit merupakan sektor esensial bagi perekonomian global, namun keberlangsungannya sangat terancam oleh penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) akibat jamur *Ganoderma boninense*. Infeksi patogen ini diproyeksikan mampu menimbulkan kerugian ekonomi hingga melampaui USD 250 juta per tahun serta menekan produksi hingga 50-80% pada area terdampak. Keterlambatan mitigasi umumnya terjadi akibat fase awal penyakit yang bersifat asimtomatik (tanpa gejala visual). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem deteksi dini non-destruktif yang terintegrasi dengan Sistem Pendukung Keputusan (SPK) agronomi. Pendekatan yang diusulkan bertumpu pada ekstraksi anomali suhu batang kelapa sawit dari citra termal menggunakan pemodelan arsitektur Hybrid Convolutional Neural Network (CNN) dan Vision Transformer (ViT). Untuk menanggulangi ketidakseimbangan distribusi data kelas penyakit di lapangan, metode penyeimbangan Random OverSampling (ROS) diimplementasikan pada fase pra-pemrosesan. Hasil pengujian membuktikan bahwa model Hybrid CNN-Transformer mampu mengklasifikasikan 5 tingkatan keparahan (SEHAT, Scoring 1, Scoring 2, Scoring 3, dan Scoring 4) dengan tingkat akurasi global sebesar 72.66%. Luaran prediksi kecerdasan buatan tersebut diintegrasikan sebagai input bagi algoritma Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis Fuzzy Mamdani guna merumuskan otomasi rekomendasi taktis, pembuatan parit isolasi, aplikasi biofungisida *Trichoderma sp.*, hingga instruksi eradikasi fisik. Sebagai kesimpulan, inovasi komputasional ini menetapkan tonggak sejarah (milestone) penting dalam transisi pengawasan patologi tanaman; mengubah paradigma deteksi visual konvensional menjadi diagnosis termal presisi yang memungkinkan intervensi pencegahan dieksekusi jauh sebelum patogen menghasilkan kerusakan permanen.*

Kata kunci: citra termal, *Ganoderma boninense*, hybrid CNN-Transformer, kelapa sawit, sistem pendukung keputusan.



DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	3
LEMBAR PENGESAHAN.....	4
KATA PENGANTAR.....	5
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	7
ABSTRAK.....	8
DAFTAR ISI.....	9
DAFTAR GAMBAR.....	11
LAMPIRAN.....	1
BAB I.....	2
PENDAHULUAN.....	2
1.1 Latar Belakang.....	2
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	5
BAB II.....	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu.....	7
2.2 Deteksi Ganoderma Berbasis Citra Termal.....	10
2.3 Algoritma Hybrid CNN-Transformer.....	11
2.4 Sistem Pendukung Keputusan dan Logika Fuzzy Mamdani.....	11
2.5 Taktik Pengendalian Penyakit Ganoderma boninense.....	13
BAB III.....	14
METODE PENELITIAN.....	14
3.1 Rancangan dan Pendekatan Penelitian.....	14
3.2 Sumber Data dan Instrumen Penelitian.....	16
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	16
3.4 Tahapan Penelitian.....	17
3.5 Perancangan Sistem.....	19
3.5.1 Perancangan Kebutuhan Fungsional.....	19
3.5.2 Arsitektur Umum.....	22
3.5.3 Perancangan Sistem Pendukung Keputusan (SPK).....	23
3.6 Teknik Analisis dan Pengujian Data.....	27
3.6.1 Pengujian Model AI.....	27
3.6.2 Pengujian Sistem Terintegrasi.....	28
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	29
4.1 Implementasi Akuisisi dan Pra-Pemrosesan Data Citra Termal.....	29
4.2 Karakteristik Komposisi dan Distribusi Dataset.....	30

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.2.1 Pra-Pemrosesan Data: Resizing dan Normalisasi.....	31
4.3 Implementasi Arsitektur Model Hybrid CNN-Transformer.....	32
4.4 Implementasi Arsitektur Sistem Terintegrasi Modular.....	34
4.5 Implementasi Logika Sistem Pendukung Keputusan (SPK).....	35
4.6 Skenario Uji Coba Pelatihan Model (Hyperparameter Tuning).....	36
4.6.1 Evaluasi Matriks Konfusi (Confusion Matrix).....	37
4.6.2 Analisis Metrik Klasifikasi.....	38
4.6.3 Uji Stabilitas Model dengan K-Fold Cross Validation.....	39
4.7 Pengujian Fungsionalitas Sistem Terintegrasi.....	41
4.8 Analisis Komparatif dan Seleksi Integrasi Model.....	43
KESIMPULAN DAN SARAN.....	45
5.1 Kesimpulan.....	45
5.2 Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	50
Lampiran.....	51
Lampiran 1: Matriks Pengujian User Acceptance Testing (UAT).....	51
Lampiran 2 : Dokumentasi Akuisisi Data Lapangan.....	52
Lampiran 3: Surat Keterangan Penelitian / Dokumen Mitra.....	53

**POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA**



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Kebutuhan Pengguna (User Requirements).....	16
Gambar 3.2 Tahapan penelitian.....	17
Gambar 3.3 Use Case Diagram Sistem Web Monitoring dan Deteksi Ganoderma.....	20
Gambar 4.1 Perbandingan Karakteristik Gejala Visual Citra Konvensional (RGB) dan Pendaran Radiasi Peta Panas Citra Termal pada Pangkal Batang Kelapa Sawit.....	30
Gambar 4.2 Diagram Alur Integrasi Perangkat Keras Kamera Termal dengan Aplikasi Web Modular.....	35
Gambar 4.3 Log pelatihan model.....	37
Gambar 4.4 Akurasi Prediksi pada Confusion Matrix Model Hybrid CNN-Transformer.....	38
Gambar 4.5 Visualisasi Antarmuka Hasil Deteksi Kelas Keparahan dan Keluaran Rekomendasi SPK pada Aplikasi Web.....	42



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu.....	8
Tabel 3.1 Matriks Rule Base Fuzzy Mamdani.....	24
Tabel 3.2 Keterangan dan Rekomendasi Tindakan Kategori Output SPK.....	26
Tabel 4.1 Matriks Distribusi Akhir Dataset Pemodelan AI.....	31
Tabel 4.2 Laporan Hasil Evaluasi Metrik Klasifikasi Model Hybrid CNN-Transformer..	39
Tabel 4.3 Hasil F1-Macro pada Pengujian 5-Fold Cross Validation.....	40
Tabel 4.4 Laporan Evaluasi Klasifikasi Akumulatif (5-Fold Cross Validation).....	40
Tabel 4.5 Matriks Hasil Pengujian Black Box Testing Sistem Terintegrasi.....	42





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

LAMPIRAN

Lampiran 1: Matriks Pengujian User Acceptance Testing (UAT)	40
Lampiran 2 : Dokumentasi Akuisisi Data Lapangan	41
Lampiran 3: Surat Keterangan Penelitian / Dokumen Mitra	42





Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kelapa sawit merupakan komoditas perkebunan paling strategis yang berkontribusi secara masif terhadap ketahanan pangan dan perekonomian global, dengan Indonesia dan Malaysia sebagai produsen utama yang menyumbang lebih dari 80% pasokan dunia. Namun, keberlangsungan industri bernilai tinggi ini menghadapi ancaman biologis yang sangat destruktif berupa penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) yang disebabkan oleh cendawan patogen *Ganoderma boninense*

Epidemi *Ganoderma* di kawasan Asia Tenggara telah mencapai taraf yang sangat mengkhawatirkan. Laporan terbaru dari Judijanto (2026) menegaskan bahwa penyakit ini memicu kerugian ekonomi tahunan yang melampaui USD 250 juta di seluruh Indonesia dan Malaysia. Tingkat eskalasi kerusakan ini dikonfirmasi oleh kajian Palm Oil Agribusiness Strategic Policy Institute (PASPI, 2025), yang mencatat bahwa tingkat infeksi BPB di sentra produksi utama seperti Sumatera telah meroket hingga kisaran 39% hingga 52%. Lonjakan infeksi ini secara langsung menyebabkan kematian massal tanaman kelapa sawit dan memicu penurunan produksi Tandan Buah Segar (TBS) yang sangat ekstrem. Jika laju epidemi ini tidak ditekan, industri kelapa sawit nasional diproyeksikan dapat menanggung kerugian kehilangan kesempatan (*opportunity loss*) hingga mencapai Rp 110 Triliun setiap tahunnya.

Kendala terbesar dalam penanganan epidemi ini terletak pada ketidakmampuan indera manusia untuk mendeteksi infeksi pada fase awal. Patogen ini bersifat asimtomatik; di mana gejala visual konvensional seperti pembusukan pangkal, pelepah yang menguning, atau pembentukan badan buah (*basidiocarp*) baru akan muncul ke permukaan ketika tingkat kerusakan jaringan internal telah mencapai fase kritis. Pada titik ini, intervensi agronomi (kuratif) sering kali sudah terlambat dan tidak lagi efektif untuk menyelamatkan tanaman dari kematian.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Untuk mengatasi kesenjangan deteksi tersebut, teknologi penginderaan termal hadir sebagai alternatif pengujian non-destruktif yang terbukti mutakhir. Kerusakan pembuluh xilem akibat penetrasi miselium *Ganoderma* akan menghambat laju transpirasi air, yang secara termodinamika memicu anomali peningkatan suhu pada permukaan batang yang terinfeksi sebelum gejala visual muncul. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pengembangan arsitektur kecerdasan buatan, *Hybrid Convolutional Neural Network* (CNN) dan *Vision Transformer* (ViT), untuk mengekstraksi dan mengklasifikasi peta panas termal batang kelapa sawit secara presisi.

Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berhenti pada tahap klasifikasi citra semata, luaran probabilitas dari model *Deep Learning* dalam penelitian ini diintegrasikan langsung ke dalam Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis aturan (*Rule-Based Reasoning*). Integrasi ini dirancang untuk mengotomatisasi rekomendasi penanganan mulai dari tindakan kuratif pemberian biofungisida hingga instruksi eradikasi fisik dan manajemen vektor, sehingga pihak manajemen perkebunan dapat mengeksekusi langkah mitigasi secara cepat, akurat, dan memutus mata rantai penyebaran *Ganoderma* sedini mungkin.

Sebagai langkah komprehensif, penelitian ini merupakan bagian dari payung riset kolaboratif. Dalam pelaksanaannya, pengembangan kecerdasan buatan dilakukan untuk menemukan arsitektur komputasional yang paling optimal. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan arsitektur tingkat lanjut menggunakan Hybrid CNN-Transformer yang terintegrasi dengan logika SPK. Model dengan performa klasifikasi tertinggi akan dipilih untuk diimplementasikan secara final ke dalam backend aplikasi web pemantauan terintegrasi.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang arsitektur model Hybrid CNN-Transformer untuk mendeteksi penyakit Ganoderma pada citra termal dengan akurasi yang lebih tinggi dibanding metode konvensional?
2. Bagaimana membangun Sistem Pendukung Keputusan (SPK) yang menerjemahkan hasil prediksi model Deep Learning menjadi rekomendasi operasional konkret?
3. Bagaimana mengintegrasikan model deteksi dan logika SPK ke dalam dashboard berbasis web untuk visualisasi sebaran penyakit?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan dapat diselesaikan sesuai target, diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Fokus pada deteksi penyakit *Basal Stem Rot* (Ganoderma) pada tanaman kelapa sawit fase menghasilkan (tanaman dewasa), di mana gejala anomali suhu pada pangkal batang lebih signifikan.
2. Sumber Data: Data sekunder untuk pelatihan awal dan data primer menggunakan kamera termal untuk validasi.
3. Klasifikasi output AI dibatasi pada 5 kelas tingkat infeksi termal: SEHAT, Scoring 1, Scoring 2, Scoring 3, dan Scoring 4
4. Integrasi model ke dalam antarmuka aplikasi *web* dasbor didasarkan pada hasil uji komparatif antara arsitektur *Hybrid* CNN-Transformer (pada penelitian ini) dengan arsitektur CNN ResNet50 (pada studi pendamping). Model dengan evaluasi metrik terbaik akan digunakan sebagai *inference engine* tunggal pada sistem web yang digunakan bersama



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan model deteksi Ganoderma yang andal menggunakan arsitektur Hybrid CNN-Transformer.
2. Mengembangkan SPK yang memberikan rekomendasi tindakan otomatis berdasarkan tingkat keparahan penyakit.
3. Menyediakan dashboard visual untuk memantau sebaran Ganoderma di perkebunan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Bagi Industri: Solusi teknologi presisi untuk deteksi dini guna meminimalisir kerugian ekonomi.
2. Bagi Akademisi: Menambah referensi ilmiah terkait penerapan arsitektur modern pada citra termal pertanian.

1.6 Sistematika Penulisan

Laporan proposal penelitian ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

- **BAB I PENDAHULUAN:** Berisi latar belakang urgensi penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, serta sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA:** Membahas landasan teori terkait penyakit *Ganoderma*, Citra Termal, algoritma *Hybrid CNN-Transformer*, Sistem Pendukung Keputusan (SPK), serta sintesis penelitian terdahulu (*State of the Art*).
- **BAB III METODE PENELITIAN:** Menjelaskan alur rancangan penelitian, metode pengumpulan data, tahapan *preprocessing*, arsitektur model AI, perancangan sistem dan logika SPK, serta rencana pengujian sistem.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN: Menguraikan hasil pengolahan data citra termal, implementasi model *Hybrid CNN-Transformer*, hasil integrasi Sistem Pendukung Keputusan (SPK) ke dalam *dashboard*, serta analisis evaluasi dari pengujian performa sistem.
- BAB V PENUTUP: Menyajikan kesimpulan akhir dari hasil penelitian yang menjawab rumusan masalah, beserta saran-saran yang membangun untuk pengembangan sistem di masa mendatang.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Evolusi teknologi deteksi penyakit *Basal Stem Rot* (BSR) pada kelapa sawit telah bergerak secara signifikan dari pengamatan manual menuju pemanfaatan sensor canggih dan kecerdasan buatan. Kwang et al. (2025) mengembangkan pendekatan deteksi menggunakan citra hiperspektral yang diklasifikasikan dengan algoritma *Machine Learning*. Meskipun analisis spektrum yang dihasilkan sangat mendalam, metode ini terkendala oleh biaya investasi sensor yang sangat tinggi dan komputasi yang berat. Sementara itu, Wahyuni et al. (2024) memanfaatkan teknologi *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dengan kamera multispektral untuk pemetaan area luas. Namun, kelemahan utama metode ini adalah ketergantungannya pada gejala visual tajuk daun yang sering kali baru terlihat ketika fase infeksi sudah terlambat.

Pendekatan lain pada skala proksimal dikembangkan oleh Tan et al. (2023) menggunakan spektroskopi untuk mendeteksi biomarker kimiawi pada batang. Meskipun akurat, metode berbasis titik (*point-based*) ini dinilai lambat dan kurang efisien untuk pemantauan massal secara *real-time*. Terobosan deteksi dini mulai dieksplorasi oleh Husin et al. (2025) yang memanfaatkan citra termal untuk menangkap anomali suhu akibat infeksi asimtomatis. Akan tetapi, studi tersebut masih terbatas pada analisis statistik korelasi fitur dan belum diimplementasikan ke dalam purwarupa sistem kecerdasan buatan yang utuh.

Pengembangan metode komputasi untuk klasifikasi *Ganoderma* juga telah dikaji secara ekstensif oleh Haw et al. (2023) yang mengevaluasi performa berbagai algoritma *Machine Learning*, serta Kurniawan et al. (2023) yang merancang deteksi penyakit menggunakan metode *Artificial Neural Network* (ANN). Meskipun pendekatan jaringan saraf konvensional tersebut mampu melakukan pengenalan pola secara otomatis, model-model tersebut masih memiliki keterbatasan dalam memahami konteks spasial global dan rentan mengalami

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

penurunan akurasi ketika dihadapkan pada citra termal yang memiliki intensitas gangguan (*noise*) lingkungan yang tinggi.

Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, teridentifikasi kesenjangan penelitian (*research gap*) yang signifikan. Mayoritas penelitian masih berfokus pada deteksi visual spektrum konvensional, dan model kecerdasan buatan yang digunakan belum memiliki mekanisme atensi untuk membedakan fitur patologis dari gangguan latar belakang. Penelitian ini hadir untuk menyempurnakan batasan tersebut dengan merancang arsitektur tingkat lanjut, yaitu *Hybrid CNN-Transformer*, yang andal dalam ekstraksi fitur lokal sekaligus tajam dalam atensi global pada citra termal. Selain itu, penelitian ini menjembatani celah hilirisasi teknologi dengan mengintegrasikan hasil prediksi AI ke dalam Sistem Pendukung Keputusan (SPK) agronomi. Seluruh ringkasan pemetaan penelitian terdahulu tersebut dirangkum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Pendekatan Utama (Metode)	Data Input	Fokus Penelitian	Kelebihan	Kekurangan / Celah Riset (<i>Gap</i>)
1	Kwang et.al. (2025)	<i>Hyperspectral Imaging</i> + SVM, Random Forest	Citra Hiperspektral	Analisis spektrum cahaya untuk klasifikasi penyakit.	Analisis spektral sangat detail dan sensitif.	Biaya sensor sangat mahal, komputasi berat, dan belum ada integrasi sistem SPK.
2	Wahyuni et al. (2024)	UAV (<i>Drone</i>) + SVM	Citra Multispektral (RGB & NIR)	Pemetaan indeks vegetasi area luas.	Mampu memetakan area luas dengan akurasi klasifikasi tinggi (93.55%).	Sangat bergantung pada gejala visual daun (fase lanjut), kurang efektif

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

						untuk deteksi dini internal.
3	Tan et al. (2023)	<i>NIR Spectroscopy + Machine Learning</i>	Data Spektrum Titik (<i>Point-based</i>)	Deteksi biomarker kimiawi (ergosterol).	Sangat akurat mendeteksi perubahan kimiawi batang.	Proses akuisisi data lambat (manual per titik pohon), tidak efisien untuk monitoring massal.
4	Özden (2026)	<i>Hybrid CNN-Vision Transformer (ViT)</i>	Citra Visual (RGB)	Evaluasi komparatif arsitektur <i>deep learning</i> untuk <i>Agricultural Decision Support Systems (ADSS)</i> berbasis akurasi dan efisiensi komputasi	Model <i>Hybrid ConvNet-ViT</i> mencatatkan keseimbangan terbaik dengan akurasi 99,29% dan F1-Score 99,18%, sekaligus membuktikan bahwa pendekatan <i>hybrid</i> lebih efisien dari pure ViT untuk implementasi <i>edge device</i>	Seluruh eksperimen dilakukan pada dataset tunggal berkategori terkontrol (laboratorium); belum dievaluasi pada citra kondisi lapangan nyata dan belum mengintegrasikan modalitas sensor termal untuk deteksi fase asimtomatis.
5	Husin et al. (2025)	<i>Analisis Statistik Korelasi Fitur</i>	Citra Termal	Eksplorasi korelasi anomali suhu batang sawit.	Menemukan korelasi signifikan anomali suhu asimtomatis.	Terbatas pada analisis statistik; belum diwujudkan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

						menjadi sistem deteksi AI otomatis.
6	Khalil et al. (2026)	<i>Hybrid CNN-Vis ion Transformer)</i>	Citra Visual RGB	Klasifikasi penyakit tanaman multi-kelas menggunakan arsitektur <i>hybrid</i> yang mengintegrasikan ekstraksi fitur lokal CNN dan pemodelan konteks global Transformer	Mencatatkan akurasi klasifikasi tertinggi sebesar 98,13%, membuktikan bahwa arsitektur <i>hybrid</i> secara signifikan mengungguli CNN murni maupun ViT mandiri dalam mendeteksi pola penyakit yang kompleks	Menggunakan data citra RGB spektrum visual yang bergantung pada gejala fisik yang sudah tampak secara kasat mata; belum dievaluasi pada data citra termal asimtomatis dan belum diintegrasikan ke dalam antarmuka sistem aplikasi yang utuh

2.2 Deteksi Ganoderma Berbasis Citra Termal

Penyakit *Basal Stem Rot* (BSR) atau Busuk Pangkal Batang disebabkan oleh jamur *Ganoderma boninense* yang membusukkan jaringan internal xilem kelapa sawit. Pembusukan ini mengganggu transportasi air dan nutrisi dari akar menuju tajuk, yang berdampak langsung pada terganggunya aktivitas metabolisme dan transpirasi tanaman. Gangguan fisiologis ini memicu perubahan distribusi termodinamika pada batang yang tidak terlihat oleh mata visual, namun memancarkan anomali suhu yang dapat ditangkap menggunakan teknologi pencitraan termal (*thermal imaging*). Pemanfaatan citra inframerah gelombang panjang ini memungkinkan deteksi dini pada fase asimtomatis, menjadikannya

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

indikator krusial jauh sebelum kerusakan fisik atau gejala pada daun terlihat secara kasat mata (Husin et al., 2025).

2.3 Algoritma Hybrid CNN-Transformer

Citra termal yang didapat di lapangan biasanya tercampur dengan gangguan atau kebisingan dari lingkungan sekitar, sehingga diperlukan metode pengolahan data yang pintar untuk memisahkan informasi suhu yang benar-benar penting. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan arsitektur pembelajaran mendalam terbaru yang menggabungkan keunggulan dua metode (*Hybrid*) (Özden, 2026) :

- Convolutional Neural Network (CNN): Bertindak sebagai ekstraktor fitur (*feature extractor*). Lapisan arsitektur seperti ResNet atau EfficientNet digunakan untuk memproses citra mentah guna memproduksi *feature map* yang merepresentasikan informasi spasial lokal, seperti batas tepi objek dan gradasi pola suhu yang spesifik pada kulit batang. (Khalil et al., 2026)
- Vision Transformer (ViT): Mengambil alih peran klasifikasi dari lapisan *dense* tradisional. *Feature map* yang dihasilkan oleh CNN dipecah menjadi urutan *patch* dan dimasukkan ke dalam blok *Transformer*. Lapisan ini menggunakan mekanisme *Self-Attention* untuk mempelajari hubungan global antar piksel (misalnya, korelasi pola panas di pangkal batang dengan area sekitarnya). Pendekatan ini memungkinkan model memberikan "bobot perhatian" hanya pada area yang paling relevan untuk diagnosis penyakit, meningkatkan akurasi secara presisi pada kasus yang ambigu. (Özden, 2026)

2.4 Sistem Pendukung Keputusan dan Logika Fuzzy Mamdani

Sistem Pendukung Keputusan (SPK) pada bidang pertanian bertujuan untuk membantu penyelesaian masalah penanganan penyakit dengan mengklasifikasikan tingkat keparahan berdasarkan fitur-fitur pengamatan yang diamati pada tanaman terinfeksi (Kosasih et al., 2023). Metode Fuzzy Mamdani sangat ideal digunakan karena mampu memproses data dengan fleksibilitas tinggi serta menangani ketidakpastian yang sering muncul dalam pengamatan kondisi biologis di lapangan. Proses pengambilan keputusan pada metode ini terdiri atas tiga tahapan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

utama, yaitu fuzzifikasi, inferensi berbasis aturan (rule base), dan defuzzifikasi (Laga et al., 2025).

- fuzzifikasi, yaitu proses mengonversi nilai masukan yang bersifat tegas (crisp input) ke dalam derajat keanggotaan pada suatu himpunan fuzzy. Pada tahap ini, setiap variabel input dipetakan ke dalam beberapa kategori linguistik menggunakan fungsi keanggotaan (membership function), sehingga satu nilai numerik dapat memiliki derajat keanggotaan pada lebih dari satu himpunan sekaligus. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk mengakomodasi kondisi yang sifatnya transisi atau tidak dapat dipisahkan secara mutlak antara satu kategori dengan kategori lainnya, sebagaimana kondisi gejala penyakit tanaman yang berkembang secara bertahap dan tidak selalu memiliki batas yang jelas (Aprilia et al., 2021).
- inferensi atau evaluasi aturan (rule base), yaitu proses mengevaluasi seluruh kombinasi nilai keanggotaan yang dihasilkan dari tahap fuzzifikasi terhadap sekumpulan aturan logis berbentuk IF-THEN yang telah disusun sebelumnya. Pada metode Mamdani, evaluasi antar variabel input dalam satu aturan umumnya menggunakan operator logika AND yang direpresentasikan melalui operasi minimum (min), sedangkan apabila terdapat lebih dari satu aturan yang aktif secara bersamaan, hasil dari aturan-aturan tersebut akan digabungkan menggunakan operasi maksimum (max) untuk membentuk satu area fuzzy gabungan (Kosasih et al., 2023). Basis aturan inilah yang berperan sebagai representasi pengetahuan pakar di dalam sistem, sehingga validitasnya sangat bergantung pada seberapa kuat rujukan keilmuan yang mendasarinya.
- defuzzifikasi, yaitu proses mengubah kembali area fuzzy gabungan hasil tahap inferensi menjadi satu nilai tunggal yang tegas (crisp output) agar dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan akhir. Salah satu metode defuzzifikasi yang paling umum digunakan pada Fuzzy Mamdani adalah metode Centroid atau pemusatan area, yaitu dengan menghitung titik pusat massa dari luasan kurva keanggotaan hasil agregasi. Metode ini dipilih karena mampu mempertimbangkan kontribusi dari seluruh aturan yang aktif secara



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

proporsional, bukan hanya mengacu pada nilai puncak tertinggi saja, sehingga hasil akhir yang diperoleh lebih representatif terhadap keseluruhan kondisi yang dievaluasi oleh sistem (Laga et al., 2025).

- Melalui ketiga tahapan tersebut, Fuzzy Mamdani mampu mengubah data masukan yang bersifat tidak pasti dan bertingkat menjadi satu keputusan akhir yang tegas dan dapat langsung ditindaklanjuti oleh pengguna, sehingga metode ini dinilai sangat sesuai untuk diterapkan pada permasalahan klasifikasi tingkat keparahan penyakit tanaman yang kompleks dan multifaktor.

2.5 Taktik Pengendalian Penyakit *Ganoderma boninense*

Pengendalian penyakit akibat *Ganoderma boninense* pada perkebunan kelapa sawit membutuhkan pendekatan berjenjang berdasarkan tingkat keparahannya. Pada fase deteksi dini atau gejala ringan, tindakan paling efektif adalah intervensi preventif melalui agen hayati (biokontrol) seperti *Trichoderma* spp. guna menekan pertumbuhan patogen sebelum merusak jaringan (Siddiqui et al., 2021; Amrutha Lakshmi et al., 2025). Ketika infeksi memasuki fase menengah dan mulai menyebabkan gangguan penyerapan air, intervensi fisik berupa sanitasi piringan, pembuatan parit isolasi (trenching), serta penimbunan tanah (mounding) diwajibkan untuk memutus kontak akar (Khoo & Chong, 2023; PASPI Monitor, 2025). Pada tingkat keparahan tinggi di mana pembusukan batang telah terjadi, tindakan sanitasi total atau eradikasi (penebangan dan pembongkaran tunggul) merupakan asas mutlak yang tidak dapat ditawar (non-negotiable) untuk memusnahkan sumber inokulum di area perkebunan (Judijanto, 2025).



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Rancangan dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian terapan (*applied research*) yang bertujuan untuk menghasilkan solusi teknis berupa prototipe sistem deteksi dini dan Sistem Pendukung Keputusan (SPK) penyakit *Ganoderma* pada kelapa sawit. Pendekatan penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif, di mana evaluasi kinerja sistem didasarkan pada pengukuran data numerik yang objektif, meliputi parameter akurasi (*Mean Average Precision*), presisi, *recall*, dan kecepatan komputasi (*Frame Per Second*).

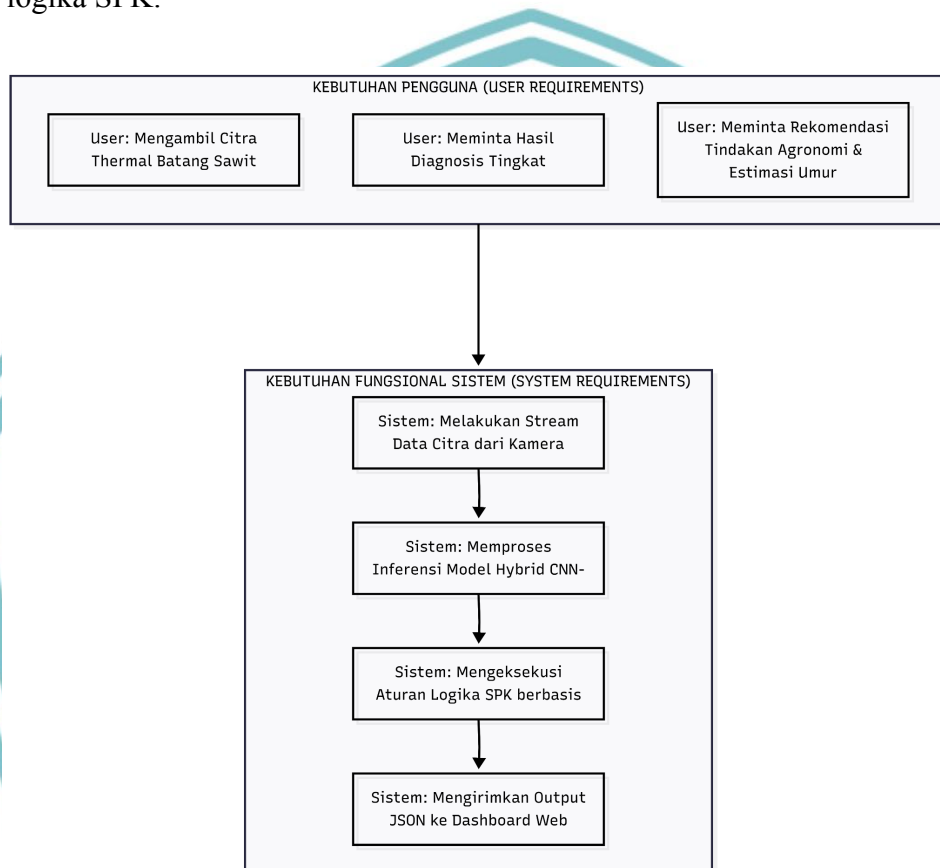
Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan dua metode utama dalam pelaksanaannya, yaitu:

1. Metode Eksperimental (*Experimental Research*) Metode ini diterapkan pada tahap pengembangan model kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*). Eksperimen dilakukan untuk melatih dan menguji arsitektur Hybrid CNN-Transformer (RT-DETR). Fokus utama tahap ini adalah melakukan *tuning hyperparameter* dan augmentasi data guna memperoleh konfigurasi model yang paling optimal dalam mendeteksi objek penyakit *Ganoderma* pada citra termal yang memiliki *noise* tinggi.
2. Metode ini digunakan sebagai kerangka kerja pengembangan perangkat lunak (*software engineering*) untuk mengintegrasikan model AI ke dalam sistem yang utuh. Tahapan ini mengikuti alur *Waterfall* yang sistematis, dengan rincian fase sebagai berikut:

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Analisis Kebutuhan (*Requirement Analysis*): Tahap pengumpulan dan spesifikasi kebutuhan fungsional sistem, mencakup identifikasi parameter suhu dari citra termal kelapa sawit dan pengumpulan basis aturan agronomi (*knowledge base*) yang akan diimplementasikan ke dalam logika SPK.



Gambar 3.1 Diagram Kebutuhan Pengguna (*User Requirements*)

- Perancangan Sistem (*System Design*): Tahap merancang arsitektur model *Hybrid CNN-Transformer* untuk klasifikasi, merancang skema alur data (*backend API*), serta menyusun pohon keputusan (IF-THEN) untuk rekomendasi SPK
- Implementasi (*Implementation*): Tahap penerjemahan desain ke dalam baris kode pemrograman (*coding*). Pada fase ini dilakukan pra-pemrosesan citra, pelatihan model AI menggunakan Python, serta pembangunan antarmuka *dashboard* berbasis *web*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Pengujian (*Testing*): Tahap verifikasi keandalan sistem. Model AI diuji secara kuantitatif menggunakan *Confusion Matrix*, sementara fungsionalitas antarmuka dan keluaran rekomendasi dievaluasi menggunakan *Black Box Testing* guna memastikan sistem berjalan sesuai kebutuhan pengguna
- Pemeliharaan (*Maintenance*): Tahap penyesuaian sistem di masa mendatang, termasuk skenario pembaruan bobot model (*retraining*) jika terdapat penambahan dataset citra termal baru dari lapangan.

3.2 Sumber Data dan Instrumen Penelitian

Sumber data menggunakan Data Primer (citra termal lapangan yang diambil pada bulan Mei untuk validasi). Populasi penelitian adalah pohon kelapa sawit fase dewasa, dengan sampel citra dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* mewakili kelas sehat hingga infeksi berat. Instrumen penelitian meliputi perangkat keras utama berupa Laptop Workstation dan Modul Kamera Termal yang terhubung mikrokontroler.

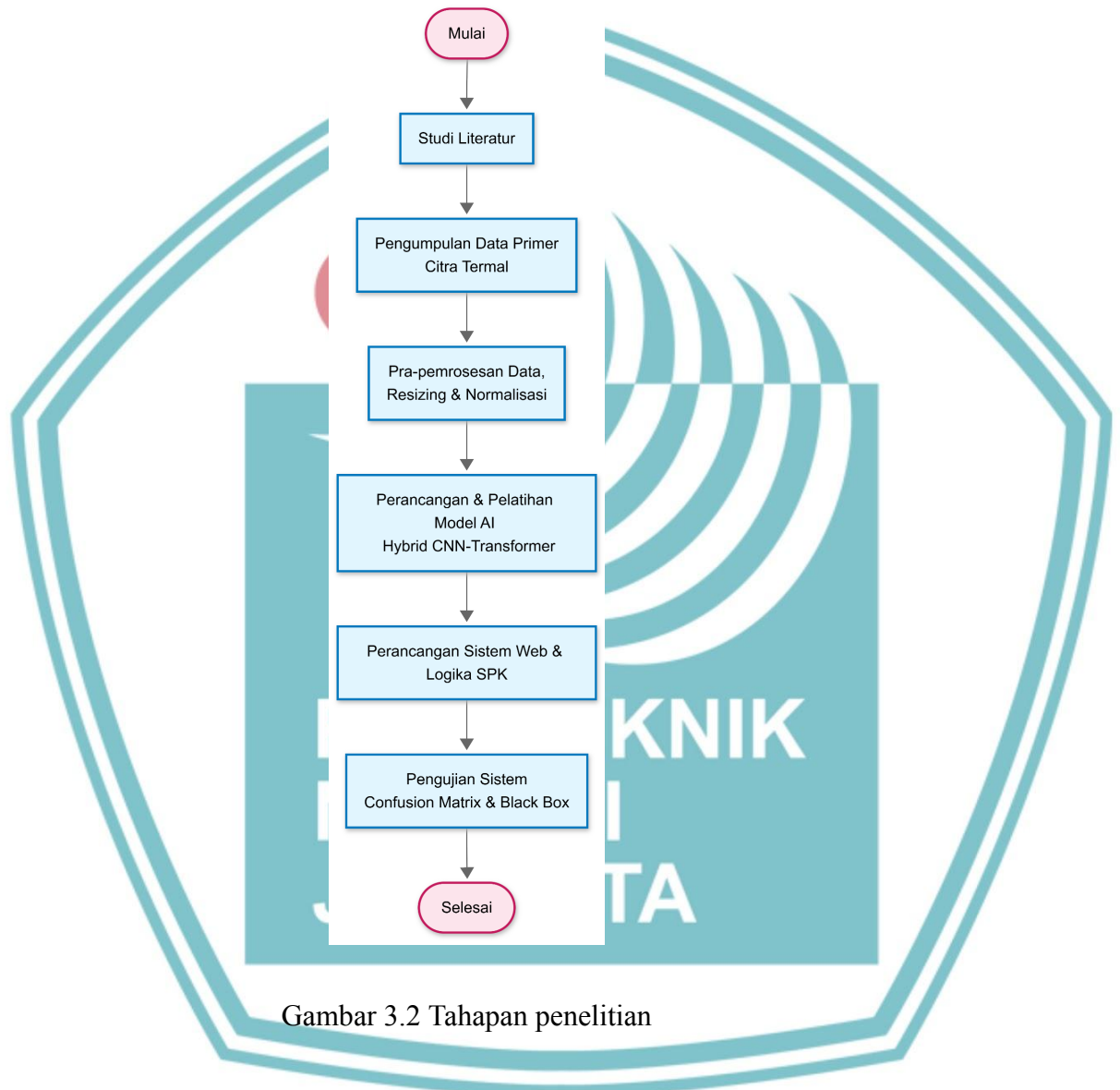
3.3 Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data yang digunakan adalah:

1. Observasi Berbasis Sensor termal: Pengambilan data citra termal secara langsung di lapangan untuk menangkap anomali suhu pada pangkal batang sawit.
2. Studi Dokumentasi: Pengumpulan dataset sekunder serta landasan teori dari jurnal ilmiah, buku, dan dokumentasi teknis terkait.

3.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis mulai dari identifikasi masalah hingga pengujian sistem, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.2 Tahapan penelitian

Rincian tahapan penelitian adalah sebagai berikut:

- Studi Literatur: Mengkaji literatur terkini dan jurnal ilmiah terkait karakteristik biologis penyakit *Ganoderma* pada citra termal, prinsip kerja *Deep Learning* dalam deteksi objek, serta arsitektur *Hybrid CNN-Transformer* dan pengembangan sistem berbasis *web*



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumpulkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Pengumpulan Data Primer Citra Termal: Melakukan akuisisi data lapangan berupa citra termal kelapa sawit. Tahap ini mencakup proses anotasi data (*labeling*) berupa pemberian label kategori kelas (Sehat, Peringatan, atau Kritis) pada setiap sampel citra termal sebagai *ground truth* (kebenaran aktual) untuk pelatihan model klasifikasi
- Pra-pemrosesan Data, Resizing & Normalisasi: Merupakan tahapan krusial untuk menyiapkan citra mentah agar sesuai dengan spesifikasi komputasi AI. Tahap ini meliputi penyeragaman dimensi resolusi citra (*resizing*) menjadi ukuran standar 224x224 piksel, serta normalisasi nilai intensitas piksel. Normalisasi dilakukan menggunakan metode Min-Max untuk menekan rentang piksel citra termal menjadi skala konstan [0,1] guna menghindari inefisiensi kalkulasi gradien saat proses *training* berlangsung. Kalkulasi normalisasi merujuk pada Persamaan 3.1

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

- Perancangan Model AI (*Model Development*) Membangun dan melatih arsitektur Hybrid CNN-Transformer. Pada tahap ini, *backbone* CNN digunakan untuk mengekstraksi fitur visual spasial, yang kemudian diproses oleh blok *Transformer* dengan mekanisme *Self-Attention* untuk mendeteksi lokasi dan klasifikasi penyakit secara presisi.
- Perancangan Sistem & SPK Merancang arsitektur perangkat lunak yang meliputi desain *database*, pengembangan *backend* API untuk integrasi model AI, penyusunan logika Sistem Pendukung Keputusan (SPK) untuk menentukan status keparahan, serta pembangunan antarmuka *dashboard* web yang interaktif.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Pengujian dan Analisis (*Testing & Analysis*): Melakukan evaluasi kinerja model klasifikasi AI menggunakan matriks konfusi (*Confusion Matrix*) untuk mendapatkan metrik Akurasi, Presisi, *Recall*, dan F1-Score, serta melakukan pengujian fungsionalitas antarmuka sistem menggunakan metode *Black Box Testing* untuk memastikan algoritma berjalan secara utuh sesuai kebutuhan pengguna.

3.5 Perancangan Sistem

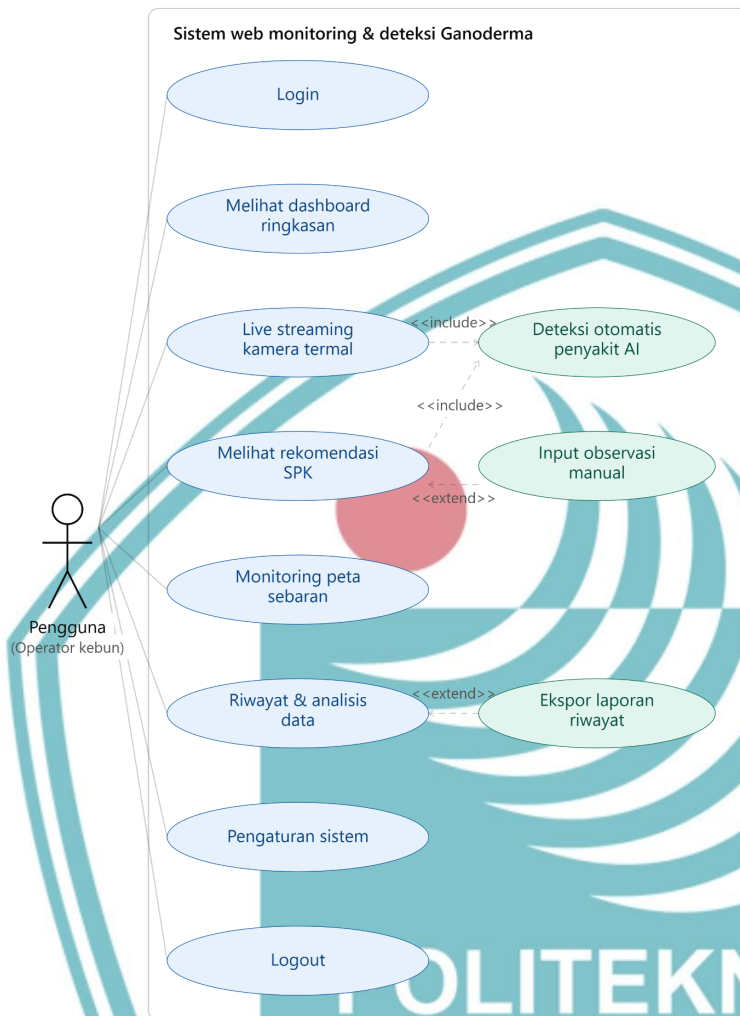
3.5.1 Perancangan Kebutuhan Fungsional

Kebutuhan fungsional sistem digambarkan menggunakan *Use Case Diagram* untuk mendeskripsikan interaksi antara pengguna dan sistem secara keseluruhan. Diagram ini bertujuan untuk memetakan seluruh fungsionalitas yang dapat diakses oleh pengguna sebelum masuk ke tahap perancangan arsitektur teknis sistem, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.3

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3.3 Use Case Diagram Sistem Web Monitoring dan Deteksi Ganoderma

Berdasarkan Gambar 3.3, sistem ini melibatkan satu aktor, yaitu Pengguna (Operator Kebun), yang berperan sebagai pihak yang berinteraksi langsung dengan seluruh fungsionalitas sistem. Aktor tersebut memiliki delapan *use case* utama, yaitu:

1. Login: proses autentikasi pengguna sebelum dapat mengakses sistem.
2. Melihat Dashboard Ringkasan: menampilkan ringkasan status kondisi kebun secara keseluruhan.
3. Live Streaming Kamera Termal: menampilkan umpan (*feed*) kamera termal secara *real-time*.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4. Melihat Rekomendasi SPK: menampilkan hasil keputusan Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis Logika *Fuzzy Mamdani*.
5. Monitoring Peta Sebaran: menampilkan lokasi persebaran pohon kelapa sawit yang terindikasi *Ganoderma* pada peta.
6. Riwayat & Analisis Data: menampilkan histori hasil deteksi dari waktu ke waktu.
7. Pengaturan Sistem: mengatur konfigurasi umum aplikasi.
8. Logout: mengakhiri sesi penggunaan sistem.

Selain kedelapan use case utama tersebut, terdapat dua use case pendukung yang saling berelasi melalui include dan extend:

- A. Deteksi Otomatis Penyakit AI berelasi *include* terhadap *use case* Live Streaming Kamera Termal dan Melihat Rekomendasi SPK. Relasi *include* digunakan karena proses deteksi oleh model AI bersifat wajib dieksekusi setiap kali streaming berlangsung, dan hasil deteksinya juga menjadi masukan wajib bagi perhitungan rekomendasi SPK.
- B. Input Observasi Manual berelasi *extend* terhadap *use case* Melihat Rekomendasi SPK. Relasi *extend* digunakan karena penambahan data observasi kondisi batang dan daun bersifat opsional, sehingga rekomendasi SPK tetap dapat dihasilkan meskipun tanpa masukan tambahan ini.
- C. Ekspor Laporan Riwayat berelasi *extend* terhadap *use case* Riwayat & Analisis Data, karena fitur ekspor laporan bersifat tambahan dan tidak wajib dilakukan setiap kali pengguna mengakses riwayat data.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3.5.2 Arsitektur Umum

Sistem Sistem dirancang menggunakan arsitektur *Client Server*. Sisi klien (Web Dashboard) mengirimkan citra ke server. Server memproses citra menggunakan model AI dan mengembalikan hasil diagnosa serta rekomendasi ke klien.

- **Input Citra & Pra-Pemrosesan:** Sistem menerima masukan citra termal yang diunggah melalui antarmuka pengguna. Citra mentah tersebut langsung dieksekusi oleh modul *Pre-Processing*, di mana matriks gambar diubah ukurannya (*resizing*) menjadi dimensi standar 224x224 piksel dan nilainya dikalibrasi menggunakan metode *Min-Max Normalization* ke dalam rentang skala [0,1].
- **CNN Backbone (*Feature Extractor*):** Bagian ini berfungsi sebagai "mata" sistem. Menggunakan arsitektur CNN (seperti ResNet) untuk mengekstraksi fitur visual spasial dari citra termal pada berbagai skala resolusi (*multi-scale features*). Backbone ini bertugas menangkap pola dasar seperti tepi, tekstur batang, dan gradasi suhu.
- **Hybrid Encoder & Transformer Decoder** Bagian ini berfungsi sebagai "otak" sistem. Fitur yang dihasilkan oleh CNN diproses menggunakan blok Transformer dengan mekanisme Efficient Hybrid Encoder. Mekanisme *Self-Attention* digunakan untuk memahami konteks global hubungan antar piksel dan membedakan *noise*. Proses kalkulasi bobot perhatian (*attention weight*) dirumuskan dalam Persamaan 3.2:

$$Attention(Q, K, V) = softmax\left(\frac{QK^T}{\sqrt{D_k}}\right)V$$

- **Klasifikasi Probabilistik (*Softmax Output*):** Lapisan klasifikasi akhir memproses fitur yang telah disaring *Transformer* dan memproduksi probabilitas prediksi kelas secara spesifik: Sehat, Peringatan (Sedang), atau Kritis (Berat)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Eksekusi Logika Fuzzy Mamdani & Luaran Akhir: Keputusan kelas dari model AI tidak dibiarkan mentah, melainkan langsung ditangkap sebagai salah satu variabel masukan oleh mesin inferensi Sistem Pendukung Keputusan berbasis Fuzzy Mamdani. Melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi basis aturan (rule base), dan defuzzifikasi Centroid, sistem menghasilkan nilai prioritas penanganan yang diterjemahkan menjadi paket informasi terpadu berisi diagnosis dan rekomendasi teknis penanganan (Tindakan Agronomi), yang kemudian diproyeksikan secara visual kepada pengguna di antarmuka aplikasi.

3.5.3 Perancangan Sistem Pendukung Keputusan (SPK)

Sistem menggunakan metode Logika Fuzzy Mamdani untuk menerjemahkan luaran tingkat keparahan dari model AI dan hasil observasi visual menjadi tindakan operasional kebun. Pendekatan ini mengubah sistem dari sekadar alat pendeteksi menjadi instrumen kalkulasi mitigasi yang komprehensif. Proses pengambilan keputusan ini dibagi menjadi tiga tahapan utama:

- Perancangan Fuzzifikasi Variabel Pemodelan Fuzzy Mamdani pada penelitian ini menerapkan arsitektur *Multiple Input Single Output* (MISO) untuk mengakomodasi kompleksitas fitur biologis lahan yang tidak pasti (Laga et al., 2025). Tahap fuzzifikasi memetakan tiga *crisp input* ke dalam derajat keanggotaan. Variabel pertama adalah Hasil Deteksi AI dengan himpunan Sehat, Scoring 1, Scoring 2, Scoring 3, dan Scoring 4. Variabel observasi pengguna terdiri dari Kondisi Daun (himpunan: Normal, Layu, Kuncup) dan Kondisi Batang (himpunan: Aman, Retak, Membusuk). Penggabungan variabel sensor internal mesin dan observasi fisik eksternal ini berfungsi untuk menjembatani bahasa mesin yang serba presisi dengan pengamatan manusia yang cenderung tidak presisi di lapangan (Aprilia et al., 2021). Variabel *output* merupakan Prioritas Penanganan berskala 0 hingga 100 yang terbagi menjadi himpunan Rendah, Sedang, dan Tinggi.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Sintesis Basis Aturan (Rule Base) : Setelah semua data input diubah ke bentuk fuzzy, langkah berikutnya adalah menentukan aturan yang menghubungkan input tersebut dengan rekomendasi penanganan. Aturan ini disusun dalam bentuk JIKA ... MAKA ...(IF-THEN),misalnya,jika hasil deteksi AI menunjukkan Scoring 2, batang retak, dan daun layu, maka sistem akan merekomendasikan Pengendalian Intensif. Total ada 45 aturan yang digunakan, dan semuanya tidak dibuat sembarangan atau berdasarkan tebakan pribadi, melainkan disusun mengikuti panduan dari jurnal-jurnal agronomi kelapa sawit yang sudah teruji (Kosasih et al., 2023). Sebagai gambaran sederhana, semakin parah kondisi yang terdeteksi baik dari sisi AI (skor internal) maupun dari sisi fisik tanaman (batang dan daun), maka rekomendasi yang keluar juga akan semakin tegas. Contohnya, sistem hanya akan mengeluarkan perintah "Eradikasi" (penebangan) apabila AI mendeteksi tingkat keparahan tertinggi (Scoring 4) atau ketika kondisi batang memang sudah terbukti membusuk. Aturan ini sejalan dengan panduan penanganan Ganoderma yang menegaskan bahwa langkah tegas diperlukan agar penyakit tidak menyebar ke pohon lain di sekitarnya (Judijanto, 2025; Khoo & Chong, 2023). Rincian lengkap ke-45 aturan tersebut disajikan pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Matriks *Rule Base* Fuzzy Mamdani

Aturan	Hasil AI	Kondisi Batang	Kondisi Daun	Output/keputusan
R1	Sehat	Aman	Normal	Monitoring
R2	Sehat	Aman	Layu	Monitoring
R3	Sehat	Aman	Kuncup	Monitoring
R4	Sehat	Retak	Normal	Monitoring
R5	Sehat	Retak	Layu	Monitoring
R6	Sehat	Retak	Kuncup	Monitoring
R7	Sehat	Membusuk	Normal	Pengendalian Intensif
R8	Sehat	Membusuk	Layu	Pengendalian Intensif
R9	Sehat	Membusuk	Kuncup	Pengendalian Intensif
R10	Scoring 1	Aman	Normal	Monitoring
R11	Scoring 1	Aman	Layu	Monitoring



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

R12	Scoring 1	Aman	Kuncup	Monitoring
R13	Scoring 1	Retak	Normal	Pengendalian Intensif
R14	Scoring 1	Retak	Layu	Pengendalian Intensif
R15	Scoring 1	Retak	Kuncup	Pengendalian Intensif
R16	Scoring 1	Membusuk	Normal	Pengendalian Intensif
R17	Scoring 1	Membusuk	Layu	Pengendalian Intensif
R18	Scoring 1	Membusuk	Kuncup	Pengendalian Intensif
R19	Scoring 2	Aman	Normal	Pengendalian Intensif
R20	Scoring 2	Aman	Layu	Pengendalian Intensif
R21	Scoring 2	Aman	Kuncup	Pengendalian Intensif
R22	Scoring 2	Retak	Normal	Pengendalian Intensif
R23	Scoring 2	Retak	Layu	Pengendalian Intensif
R24	Scoring 2	Retak	Kuncup	Pengendalian Intensif
R25	Scoring 2	Membusuk	Normal	Eradikasi
R26	Scoring 2	Membusuk	Layu	Eradikasi
R27	Scoring 2	Membusuk	Kuncup	Eradikasi
R28	Scoring 3	Aman	Normal	Pengendalian Intensif
R29	Scoring 3	Aman	Layu	Pengendalian Intensif
R30	Scoring 3	Aman	Kuncup	Pengendalian Intensif
R31	Scoring 3	Retak	Normal	Pengendalian Intensif
R32	Scoring 3	Retak	Layu	Pengendalian Intensif
R33	Scoring 3	Retak	Kuncup	Pengendalian Intensif
R34	Scoring 3	Membusuk	Normal	Eradikasi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

R35	Scoring 3	Membusuk	Layu	Eradikasi
R36	Scoring 3	Membusuk	Kuncup	Eradikasi
R37	Scoring 4	Aman	Normal	Eradikasi
R38	Scoring 4	Aman	Layu	Eradikasi
R39	Scoring 4	Aman	Kuncup	Eradikasi
R40	Scoring 4	Retak	Normal	Eradikasi
R41	Scoring 4	Retak	Layu	Eradikasi
R42	Scoring 4	Retak	Kuncup	Eradikasi
R43	Scoring 4	Membusuk	Normal	Eradikasi
R44	Scoring 4	Membusuk	Layu	Eradikasi
R45	Scoring 4	Membusuk	Kuncup	Eradikasi

- Tahap terakhir dari proses Fuzzy Mamdani adalah defuzzifikasi, yaitu proses mengubah kembali hasil gabungan dari seluruh aturan yang aktif menjadi satu nilai tunggal yang tegas (crisp) agar dapat dipahami dan ditindaklanjuti oleh pengguna (Laga et al., 2025). Penelitian ini menggunakan metode Centroid (titik pusat area), yaitu metode defuzzifikasi yang paling umum digunakan pada Fuzzy Mamdani karena mampu mempertimbangkan seluruh area hasil agregasi aturan, bukan hanya nilai puncaknya saja. Nilai crisp yang dihasilkan berada pada rentang 0 hingga 100, yang kemudian dipetakan ke dalam tiga himpunan Prioritas Penanganan: Rendah (0–35), Sedang (30–70), dan Tinggi (65–100). Nilai akhir inilah yang menjadi dasar bagi sistem untuk menampilkan satu rekomendasi tunggal pada antarmuka pengguna, sehingga petani atau praktisi di lapangan tidak perlu memahami proses perhitungan fuzzy yang kompleks di baliknya, cukup membaca satu instruksi tindakan yang jelas dan langsung dapat dieksekusi (Khoo & Chong, 2023).

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Tabel 3.2 Keterangan dan Rekomendasi Tindakan Kategori Output SPK

No	Kategori Output SPK	Rentang Nilai Defuzzifikasi (Skala Prioritas)	Rekomendasi Tindakan Operasional
1	Monitoring	0 – 35 (Rendah)	Lanjutkan jadwal pemeliharaan dan pemupukan rutin. Tidak diperlukan tindakan intervensi khusus.
2	Pengendalian Intensif	30 – 70 (Sedang)	Buat parit isolasi berukuran 4x4 m mengelilingi pohon dan aplikasikan fungisida kimia atau agen hayati Trichoderma pada area perakaran.
3	Eradikasi	65 – 100 (Tinggi)	Lakukan eradikasi segera: penumbangan pohon dan pencacahan bonggol (chipping) untuk memutus rantai penularan spora ke pohon lain.

3.6 Teknik Analisis dan Pengujian Data

3.6.1 Pengujian Model AI

Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan Confusion Matrix. Metrik yang diukur meliputi:

1. Presisi (Precision): Mengukur ketepatan sistem dalam memprediksi kelas positif (seberapa akurat tebakan sistem terhadap pohon sakit).

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

2. Sensitivitas (Recall): Mengukur kemampuan sistem mendeteksi seluruh sampel positif yang ada di lapangan (menghindari pohon sakit yang tidak terdeteksi).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Selain evaluasi metrik secara mandiri, penelitian ini juga mengimplementasikan skenario uji banding (*benchmarking*) kolaboratif. Kinerja dari arsitektur *Hybrid CNN-Transformer* akan dibandingkan secara langsung (*head-to-head*) dengan model CNN ResNet50 dari studi pendamping menggunakan *dataset* uji yang identik. Skenario komparasi ini berfungsi sebagai gerbang penyeleksian (*deployment criteria*) di mana hanya arsitektur dengan akurasi tertinggi dan presisi terbaik yang akan lolos untuk diintegrasikan secara operasional ke dalam modul *backend* aplikasi *web* dan Sistem Pendukung Keputusan (SPK). Selain evaluasi pada skema pembagian data 70:15:15, dilakukan juga pengujian tambahan menggunakan metode *5-Fold Cross Validation* untuk memastikan konsistensi performa model tidak bergantung pada satu skema pembagian data saja.

3.6.2 Pengujian Sistem Terintegrasi

Pengujian arsitektur perangkat lunak dilakukan menggunakan metode *Black Box Testing*. Pengujian ini berfokus murni pada validasi fungsionalitas eksternal aliran *input-output* sistem (seperti modul penerimaan unggahan citra termal, kecepatan respon inferensi AI, dan proyeksi visual keluaran rekomendasi SPK) guna memastikan platform berjalan stabil dan akurat sesuai dengan spesifikasi kebutuhan pengguna.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

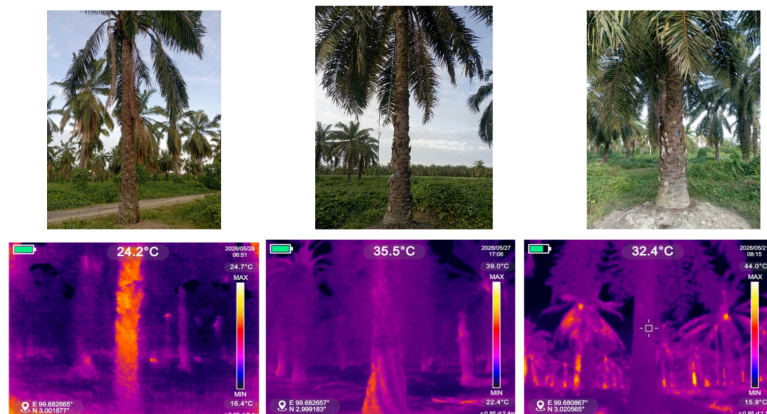
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Akuisisi dan Pra-Pemrosesan Data Citra Termal

Tahap awal dalam operasional sistem deteksi ini difokuskan pada akuisisi dan penyiapan data masukan berupa citra inframerah termal. Penyakit Busuk Pangkal Batang (BPB) yang disebabkan oleh infeksi jamur *Ganoderma boninense* pada fase awal (tidak menampilkan gejala kerusakan fisik eksternal secara kasat mata pada struktur visual tanaman). Oleh karena itu, sistem ini menggunakan pemindaian inframerah gelombang panjang untuk menangkap anomali pelepasan radiasi panas pada kulit batang kelapa sawit yang dipicu oleh kerusakan jaringan internal pembuluh xilem.

Untuk memvalidasi fungsionalitas dari sensor inframerah, dilakukan pengujian komparatif secara visual antara tangkapan kamera optik konvensional (RGB) dan kamera termal pada objek pohon yang sama di lapangan. Representasi visual dari perbandingan karakteristik data tersebut disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Perbandingan Karakteristik Gejala Visual Citra Konvensional (RGB) dan Pendaran Radiasi Peta Panas Citra Termal pada Pangkal Batang Kelapa Sawit

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan visualisasi pada Gambar 4.1, area pangkal batang yang secara visual optik (RGB) tampak sehat dan utuh ternyata menunjukkan anomali akumulasi suhu tinggi ketika dipindai menggunakan sensor termal. Sebelum matriks data termal tersebut diumpankan ke dalam model kecerdasan buatan, sistem mengeksekusi tahapan pra-pemrosesan data (*data preprocessing*). Dimensi citra diseragamkan (*resizing*) menjadi resolusi standar komputasi 224 x 224 piksel. Untuk menjaga stabilitas proses komputasi selama pelatihan, nilai intensitas piksel dinormalisasi ke dalam rentang skala [0,1] menggunakan algoritma pecahan Min-Max, mengacu pada rumusan matematis Persamaan 3.1 di Bab III

4.2 Karakteristik Komposisi dan Distribusi Dataset

Kemampuan generalisasi arsitektur Deep Learning sangat bergantung pada volume, kualitas, serta distribusi sebaran sampel data latih. Rincian karakteristik komposisi dataset citra termal yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Matriks Distribusi Akhir Dataset Pemodelan AI

Domain Citra	Kelas Target	Data Latih	Data Validasi	Data Uji	Total Sampel	Rasio Partisi
Klasifikasi Citra (Potongan)	Sehat	416	89	90	595	70:15:15
Klasifikasi Citra (Potongan)	Scoring 1	105	22	24	151	
Klasifikasi Citra (Potongan)	Scoring 2	226	48	49	323	
Klasifikasi Citra (Potongan)	Scoring 3	223	47	49	319	
Klasifikasi Citra (Potongan)	Scoring 4	303	64	66	433	

Tabel 4.1 menyajikan detail komposisi dataset yang digunakan dalam penelitian ini, dengan total 1.821 citra termal yang telah diproses menjadi potongan (cropped). Dataset ini terbagi ke dalam lima kelas target, yaitu Sehat dan empat tingkat keparahan Scoring 1 hingga Scoring 4. Seluruh data dipartisi

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

menggunakan rasio standar untuk porsi data latih, validasi, dan data uji, guna memastikan model mendapatkan paparan yang cukup selama proses pembelajaran serta dievaluasi secara objektif. Secara rinci, kelas Sehat memiliki jumlah sampel terbanyak yakni 595 citra (416 latih, 89 validasi, 90 uji). Untuk kategori infeksi, Scoring 1 memiliki 151 sampel (105 latih, 22 validasi, 24 uji) Scoring 2 terdiri dari 323 sampel (226 latih, 48 validasi, 49 uji) Scoring 3 memiliki 319 sampel (223 latih, 47 validasi, 49 uji) dan Scoring 4 dengan 433 sampel (303 latih, 64 validasi, 66 uji). Distribusi ini memastikan bahwa model memiliki basis pengetahuan yang kuat pada setiap tingkat keparahan, memungkinkan sistem untuk mengenali karakteristik anomali termal secara presisi, mulai dari kondisi normal hingga fase kerusakan jaringan internal yang paling kritis.

4.2.1 Pra-Pemrosesan Data: *Resizing* dan Normalisasi

Sebelum keseluruhan dataset citra termal diumpankan ke dalam arsitektur model kecerdasan buatan untuk proses pelatihan, seluruh data masukan harus melewati serangkaian tahapan pra-pemrosesan yang terstruktur. Tujuan utama dari tahap ini adalah untuk menyeragamkan format dan skala data sehingga proses komputasi pelatihan model berlangsung secara stabil, efisien, dan menghasilkan konvergensi yang optimal.

- *Resizing*

Citra termal yang diakuisisi dari kamera inframerah memiliki resolusi yang bervariasi tergantung pada spesifikasi sensor dan jarak pengambilan gambar di lapangan. Agar seluruh citra dalam dataset dapat diproses secara seragam oleh lapisan konvolusi pertama arsitektur *Hybrid CNN-Transformer*, seluruh citra diseragamkan dimensinya menjadi resolusi standar 224 x 224 piksel menggunakan interpolasi bilinear. Ukuran 224 x 224 piksel dipilih karena merupakan dimension masukan standar yang kompatibel dengan arsitektur *backbone* CNN yang telah dilatih menggunakan dataset ImageNet, sekaligus menjaga keseimbangan antara kerapatan informasi spasial dan beban komputasi selama fase pelatihan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

- Normalisasi

Setelah penyeragaman dimensi, nilai intensitas piksel pada setiap citra termal dinormalisasi menggunakan metode *Min-Max Normalization*. Metode ini mentransformasikan setiap nilai piksel ke dalam rentang skala kontinu [0, 1] secara linear. Tujuan normalisasi adalah untuk menstabilkan kalkulasi gradien selama proses pelatihan model, mencegah dominasi fitur dengan skala nilai yang lebih besar, serta mempercepat konvergensi model menuju titik optimal. Pada implementasi riil pengolahan matriks citra termal penelitian ini, ekstraksi data pada salah satu titik piksel objek mencatat nilai intensitas asli $X=180$. Melalui pemindaian nilai ekstrim pada matriks citra tersebut, diperoleh nilai intensitas minimum $X_{min}=30$ dan nilai intensitas maksimum $X_{max}=255$. Berdasarkan parameter numerik tersebut, kalkulasi normalisasi dieksekusi secara langsung melalui prosedur berikut:

$$X_{norm} = \frac{180 - 30}{255 - 30} = \frac{150}{225} = 0,667$$

Hasil kalkulasi tersebut menunjukkan bahwa nilai intensitas asli sebesar 180 berhasil ditransformasikan secara linear menjadi nilai skalar 0,667 di dalam rentang skala konstan [0, 1]. Transformasi skalar ini diterapkan secara konsisten dan identik pada seluruh elemen piksel dari semua 1.500 citra dalam dataset, sehingga seluruh data masukan memiliki distribusi nilai yang homogen sebelum diproses oleh lapisan konvolusi pertama arsitektur *Hybrid CNN-Transformer*.

4.3 Implementasi Arsitektur Model Hybrid CNN-Transformer

Hasil akhir dari tahapan penerjemahan rancangan Bab III ke dalam baris kode pemrograman Python adalah terbentuknya sebuah *inference engine* utuh berbasis arsitektur *Hybrid CNN-Transformer*. Konstruksi model *hybrid* ini secara riil berhasil menggabungkan karakteristik konvolusi dan mekanisme atensi global ke dalam satu kesatuan alur komputasi di dalam memori lokal sistem. Hasil dari implementasi arsitektur ini dijabarkan melalui tahapan sekuensial berikut:

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

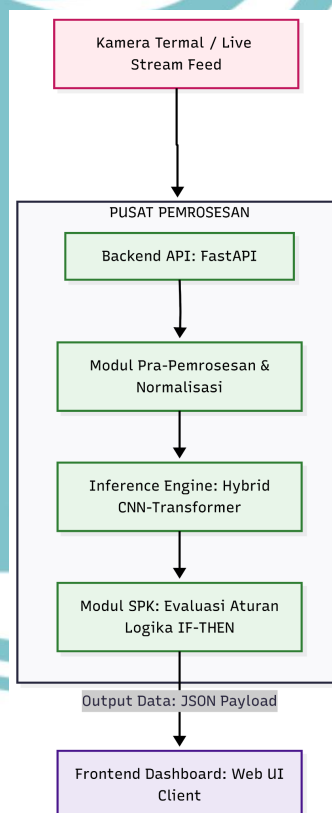
- sistem web mengaktifkan modul konvolusi (*backbone CNN*) pada arsitektur *hybrid* setelah menerima pasokan matriks citra termal yang telah dilokalisasi oleh model tahap pertama. Lapisan konvolusi ini secara riil sukses mengekstraksi peta fitur spasial tingkat rendah (*low-level spatial features*). Hasil luaran dari proses *backbone* ini adalah terekstraksinya karakteristik fisik objek secara detail, meliputi batas tepi geometris tanaman, struktur tekstur kulit batang kelapa sawit, serta pola gradasi perubahan suhu mikro pada area perakaran.
- hasil dari peta fitur spasial tersebut secara otomatis dialirkan ke dalam komponen *Efficient Hybrid Encoder* berbasis *Vision Transformer* (ViT). Hasil pemrograman pada blok *transformer* ini sukses mengeksekusi mekanisme *Self-Attention* secara optimal. Hasil nyata dari mekanisme ini adalah model mampu secara mandiri memetakan korelasi jarak jauh antar piksel suhu. Implementasi ini berhasil memecahkan batasan model konvensional dengan cara memblokir faktor gangguan (*noise*) pendaran suhu lingkungan sekitar seperti radiasi panas permukaan tanah atau vegetasi gulma yang ikut terekam dan secara otonom memusatkan bobot perhatian (*attention weight*) hanya pada anomali distribusi suhu patologis akibat infeksi jamur *Ganoderma boninense*.
- hasil akhir dari integrasi seluruh lapisan arsitektur *hybrid* ini dikunci oleh lapisan *dense* dengan fungsi aktivasi *Softmax Output*. Lapisan ini secara nyata berhasil menerjemahkan hasil penyaringan fitur global menjadi luaran klasifikasi probabilistik. Hasil dari arsitektur yang telah terkompilasi ini adalah sebuah model tunggal yang secara instan mampu memproses aliran data citra termal untuk menghasilkan nilai persentase probabilitas, serta mengelompokkan status tingkat keparahan patologis tanaman secara presisi ke dalam 5 kelas luaran, yaitu kelas Sehat, Scoring 1, Scoring 2, Scoring 3, dan Scoring 4

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.4 Implementasi Arsitektur Sistem Terintegrasi Modular

Sistem ini dibangun menggunakan Arsitektur Terintegrasi Berbasis Modular Lokal (*Local Modular Integrated Architecture*), dimana modul pemrosesan *backend engine* (yang berisi *inference engine* model AI dan algoritma SPK) ditanamkan secara langsung sebagai satu kesatuan paket modular di dalam struktur direktori aplikasi *web*. Pendekatan modular lokal ini dipilih untuk mengeliminasi latensi transmisi jaringan (*network overhead latency*) yang umumnya terjadi pada arsitektur terpisah berbasis *HTTP API request*. Aliran data citra termal dari kamera dipanggil secara langsung di dalam memori lokal aplikasi (*local in-memory invocation*) untuk mempercepat pemrosesan dasbor monitoring. Alur integrasi terprogram antara perangkat keras kamera termal dengan arsitektur folder aplikasi web disajikan secara skematis pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram Alur Integrasi Perangkat Keras Kamera Termal dengan Aplikasi Web Modular

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4.5 Implementasi Logika Sistem Pendukung Keputusan (SPK)

Nilai persentase probabilitas numerik hasil keluaran arsitektur *Hybrid* CNN-Transformer ditangkap secara terprogram oleh modul fungsi lokal Sistem Pendukung Keputusan (SPK) bersama dengan dua variabel observasi visual, yaitu kondisi batang dan kondisi daun. Modul SPK dieksekusi menggunakan pendekatan *Fuzzy Mamdani*, yaitu melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi 45 basis aturan (rule base), dan defuzzifikasi Centroid, untuk mentransformasikan hasil diagnosis menjadi instruksi tindakan operasional agronomi yang memiliki nilai ekonomi perkebunan.

Berdasarkan basis 45 aturan *Fuzzy Mamdani* yang diimplementasikan pada kode program, hasil defuzzifikasi Centroid memetakan nilai prioritas penanganan (skala 0-100) ke dalam tiga kategori keputusan utama secara otomatis, sebagaimana telah dirinci pada Tabel 3.2:

1. Kategori Monitoring: Ketika nilai defuzzifikasi jatuh pada rentang 0-35 (Rendah) umumnya terjadi apabila model AI mendeteksi kondisi Sehat dan observasi visual batang serta daun masih normal fungsi SPK menerbitkan luaran instruksi untuk melanjutkan jadwal perawatan rutin, pembersihan piringan, serta pemupukan standar blok tanpa intervensi fisik khusus.
2. Kategori Pengendalian Intensif: Ketika nilai defuzzifikasi jatuh pada rentang 30-70 (Sedang) dipicu misalnya oleh kombinasi skor infeksi menengah (Scoring 1 hingga 3) dengan kondisi batang retak atau daun mulai layu algoritma SPK secara otomatis membangkitkan rekomendasi tindakan kuratif berupa instruksi penggalian parit isolasi berdimensi 4x4 meter mengelilingi pohon untuk memutus kontak akar, aplikasi fungisida organik allicin (formulasi EC 2%), serta inokulasi agen hayati berupa biofungisida *Trichoderma sp.* pada pangkal batang.
3. Kategori Eradikasi: Ketika nilai defuzzifikasi jatuh pada rentang 65-100 (Tinggi) dipicu apabila model AI mendeteksi skor infeksi tertinggi (Scoring 4) atau kondisi batang telah dikonfirmasi membusuk SPK secara

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

tegas mengeluarkan perintah protokol eradikasi wajib; meliputi penumbangan fisik tanaman, pencacahan tunggul dan akar secara total (*chipping*) untuk mematikan viabilitas miselium, serta sterilisasi disinfektan pada alat panen (dodos/egrek) guna menghentikan penularan spora sekunder antar blok perkebunan.

4.6 Skenario Uji Coba Pelatihan Model (*Hyperparameter Tuning*)

```

Epoch [001/100] | Train Loss: 1.0234 | Train Acc: 54.23% | Val Loss: 0.6597 | Val Acc: 73.70% | Val F1-Macro: 0.6492
★ (Update) Model terbaik disimpan! (F1-Macro naik menjadi: 0.6492)
Epoch [002/100] | Train Loss: 0.6776 | Train Acc: 70.82% | Val Loss: 0.6784 | Val Acc: 72.22% | Val F1-Macro: 0.6447
Epoch [003/100] | Train Loss: 0.5555 | Train Acc: 76.78% | Val Loss: 0.7201 | Val Acc: 78.52% | Val F1-Macro: 0.6602
★ (Update) Model terbaik disimpan! (F1-Macro naik menjadi: 0.6602)
Epoch [004/100] | Train Loss: 0.4890 | Train Acc: 78.70% | Val Loss: 0.6806 | Val Acc: 71.48% | Val F1-Macro: 0.6231
Epoch [005/100] | Train Loss: 0.3686 | Train Acc: 85.00% | Val Loss: 0.8417 | Val Acc: 75.19% | Val F1-Macro: 0.6208
Epoch [006/100] | Train Loss: 0.3197 | Train Acc: 86.88% | Val Loss: 0.8674 | Val Acc: 73.33% | Val F1-Macro: 0.6537
Epoch [007/100] | Train Loss: 0.2419 | Train Acc: 91.06% | Val Loss: 0.8751 | Val Acc: 72.22% | Val F1-Macro: 0.6308
Epoch [008/100] | Train Loss: 0.2170 | Train Acc: 91.68% | Val Loss: 0.9390 | Val Acc: 72.59% | Val F1-Macro: 0.6519
Epoch [009/100] | Train Loss: 0.2059 | Train Acc: 91.68% | Val Loss: 0.9993 | Val Acc: 71.85% | Val F1-Macro: 0.6027
Epoch [010/100] | Train Loss: 0.1779 | Train Acc: 93.32% | Val Loss: 1.0142 | Val Acc: 71.85% | Val F1-Macro: 0.6210
Epoch [011/100] | Train Loss: 0.1439 | Train Acc: 94.33% | Val Loss: 1.0445 | Val Acc: 71.85% | Val F1-Macro: 0.6197

● EARLY STOPPING AKTIF! Val F1-Macro tidak menembus rekor selama 8 epoch.

[INFO] Memuat Checkpoint Terbaik (F1-Macro Tertinggi) untuk Evaluasi Test Set...

■ LAPORAN EVALUASI AKHIR (TEST SET):
  precision    recall  f1-score   support

   SEHAT       0.9540       0.9222       0.9379         90
 Scoring 1       0.3333       0.0417       0.0741         24
 Scoring 2       0.5256       0.8367       0.6457         49
 Scoring 3       0.5510       0.5510       0.5510         49
 Scoring 4       0.8197       0.7576       0.7874         66

 accuracy              0.7266         278
 macro avg       0.6367       0.6218       0.5992         278
 weighted avg       0.7220       0.7266       0.7079         278

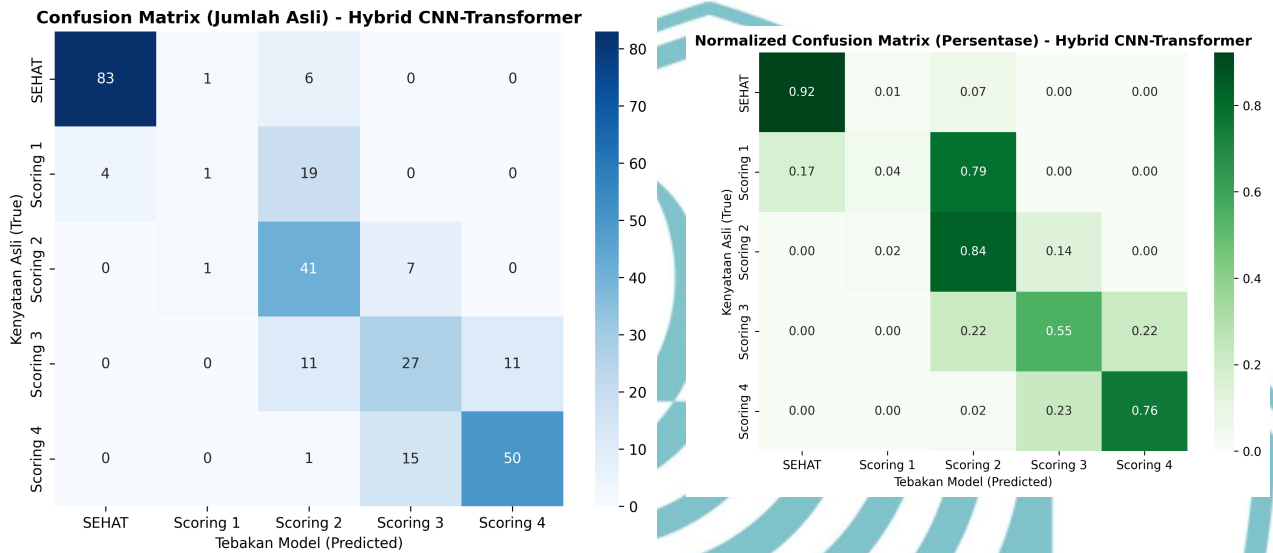
```

Gambar 4.3 Log pelatihan model

Berdasarkan log hasil pelatihan, model dievaluasi untuk menemukan titik optimal yang meminimalkan loss dan memaksimalkan F1-Score tanpa mengalami overfitting. Hasil evaluasi checkpoint membuktikan bahwa model mencapai performa terbaik (Best Model) pada iterasi Epoch 3. Pada iterasi tersebut, model berhasil mengunci nilai Validation Macro F1 sebesar 0.6602 dan Validation Loss sebesar 0.7201. Bobot (weights) dari iterasi inilah yang kemudian diekstrak sebagai mesin inferensi (inference engine) final.

4.6.1 Evaluasi Matriks Konfusi (Confusion Matrix)

Pengujian daya pisah klasifikasi sistem dilakukan dengan memetakan jumlah ketepatan prediksi model terhadap data aktual lapangan (ground truth) di dalam matriks konfusi, menggunakan 278 sampel citra uji.



Gambar 4.4 Akurasi Prediksi pada *Confusion Matrix* Model *Hybrid CNN-Transformer*

Berdasarkan pemetaan *Confusion Matrix* pada 278 citra uji, performa pengenalan sistem menunjukkan variasi kemampuan yang spesifik pada setiap tingkat keparahan :

- Kelas SEHAT: Model menunjukkan keandalan tertinggi dengan sukses menebak secara akurat sebanyak 83 dari total 90 sampel citra (Akurasi kelas 92%). Hal ini sangat krusial untuk mencegah alarm palsu di lapangan.
- Kelas Scoring 1 & 2: Kelas awal penyakit merupakan area tersulit untuk dipisahkan (*hard-to-distinguish*). Dari 24 sampel kelas Scoring 1, model hanya berhasil menebak 1 sampel dengan benar (4%), di mana mayoritas (19 sampel) salah diklasifikasikan sebagai Scoring 2. Namun, pada kelas Scoring 2, model sangat akurat dengan menebak 41 dari 49 sampel (84%).
- Kelas Scoring 3 & 4: Pada fase kerusakan kritis, model menunjukkan performa yang solid. Model memprediksi 27 sampel Scoring 3 dengan benar (55%), dan menebak 50 dari 66 sampel Scoring 4 secara akurat (76%),

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

membuktikan bahwa anomali termal pada tingkat infeksi lanjut sangat mudah diekstraksi oleh arsitektur *Hybrid*.

4.6.2 Analisis Metrik Klasifikasi

Sejalan dengan pembacaan matriks konfusi, perhitungan evaluasi analitik diturunkan secara komprehensif pada laporan klasifikasi (*Classification Report*). Akumulasi kalkulasi dari parameter Akurasi, Presisi (*Precision*), Sensitivitas (*Recall*), dan F1-Score ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Laporan Hasil Evaluasi Metrik Klasifikasi Model Hybrid CNN-Transformer

Kelas Tingkat Keparahan	Presisi (<i>Precision</i>)	Sensitivitas (<i>Recall</i>)	F1-Score	Total Sampel Uji (<i>Support</i>)
Sehat	0.9540	0.9222	0.9379	24
Scoring 1	0.3333	0.0417	0.0741	90
Scoring 2	0.5256	0.8367	0.6457	49
Scoring 3	0.5510	0.5510	0.5510	49
Scoring 4	0.8197	0.7576	0.7874	66
Akurasi Global (Accuracy)	-	-	0.7266 (72.66%)	278
Rata-Rata Makro (Macro Avg)	0.6367	0.6218	0.5992	278
Rata-Rata Tertimbang (Weighted Avg)	0.7220	0.7266	0.7079	278

Berdasarkan data kuantitatif pada Tabel 4.2, sistem Hybrid CNN-Transformer ini mencapai Akurasi Global sebesar 72.66%. Keandalan model sangat memuaskan pada pendeteksian tanaman sehat (F1-Score 0.93) dan infeksi sangat berat/Scoring

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

4 (F1-Score 0.78). Penurunan nilai secara spesifik terjadi pada kelas *Scoring 1* akibat tingkat kemiripan anomali termal yang identik dengan fase *Scoring 2*. Secara keseluruhan, nilai *Weighted Average F1-Score* sebesar 0.70 membuktikan bahwa arsitektur sistem telah berhasil mengatasi gangguan lingkungan (*noise*) citra termal dengan baik.

4.6.3 Uji Stabilitas Model dengan K-Fold Cross Validation

Untuk memastikan performa model Hybrid CNN-Transformer tidak hanya bergantung pada satu skema pembagian data (70:15:15), dilakukan pengujian tambahan menggunakan metode 5-Fold Cross Validation. Pada setiap fold, model dilatih ulang dan dievaluasi menggunakan metrik F1-Macro, dengan mekanisme early stopping untuk mencegah overfitting. Hasil pengujian pada tiap fold disajikan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil F1-Macro pada Pengujian 5-Fold Cross Validation

Fold	Epoch Berhenti (Early Stopping)	F1-Macro Terbaik
Fold 1	12	0,6884
Fold 2	10	0,6470
Fold 3	25	0,5988
Fold 4	16	0,6703
Fold 5	14	0,6189
Rata-rata	—	0,6447

Berdasarkan Tabel 4.3, rata-rata F1-Macro dari kelima *fold* adalah 0,6447, dengan performa terbaik pada Fold 1 (0,6884) dan terendah pada Fold 3 (0,5988). Variasi ini menunjukkan bahwa performa model relatif stabil di seluruh *fold*, meskipun tetap ditemukan sensitivitas terhadap komposisi data pelatihan pada *fold* tertentu. Laporan evaluasi klasifikasi akumulatif dari kelima *fold* disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Laporan Evaluasi Klasifikasi Akumulatif (5-Fold Cross Validation)

Kelas	Precision	Recall	F1-Score	Support
Sehat	0,9505	0,9361	0,9433	595
Scoring 1	0,2857	0,3709	0,3228	151
Scoring 2	0,5606	0,5015	0,5294	323
Scoring 3	0,6358	0,6019	0,6184	319
Scoring 4	0,8103	0,8383	0,8241	433
Akurasi	-	-	0,7304	1821
Macro avg	0,6486	0,6498	0,6476	1821
Weighted avg	0,7377	0,7304	0,7331	1821

Hasil pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa kelas Sehat dan Scoring 4 memiliki performa klasifikasi paling baik (F1-Score di atas 0,82), sedangkan kelas Scoring 1 menjadi kelas dengan performa paling rendah (F1-Score 0,3228). Rendahnya performa pada Scoring 1 mengindikasikan kesulitan model dalam membedakan gejala awal infeksi *Ganoderma* dari kondisi sehat, kemungkinan disebabkan oleh kemiripan karakteristik visual pada tahap infeksi dini serta jumlah sampel yang relatif terbatas (*support* = 151) dibandingkan kelas lain.

Meskipun akurasi rata-rata pada pengujian *5-Fold Cross Validation* (73,04%) tampak sedikit lebih tinggi dibandingkan akurasi model final pada skema *hold-out* 70:15:15 (72,66%), kedua nilai ini tidak dapat dibandingkan secara langsung. Akurasi 72,66% dihasilkan dari satu model final yang diuji terhadap *test set* independen yang sama sekali tidak dilibatkan dalam proses pelatihan maupun *tuning*, sehingga mencerminkan kemampuan generalisasi model secara jujur. Sementara itu, akurasi 73,04% merupakan rata-rata dari lima model berbeda yang dilatih ulang pada tiap *fold* dan dievaluasi terhadap *validation fold* masing-masing. Dengan demikian, hasil *5-Fold Cross Validation* ini berfungsi sebagai validasi tambahan yang memperkuat bukti bahwa performa model bersifat

Hak Cipta :

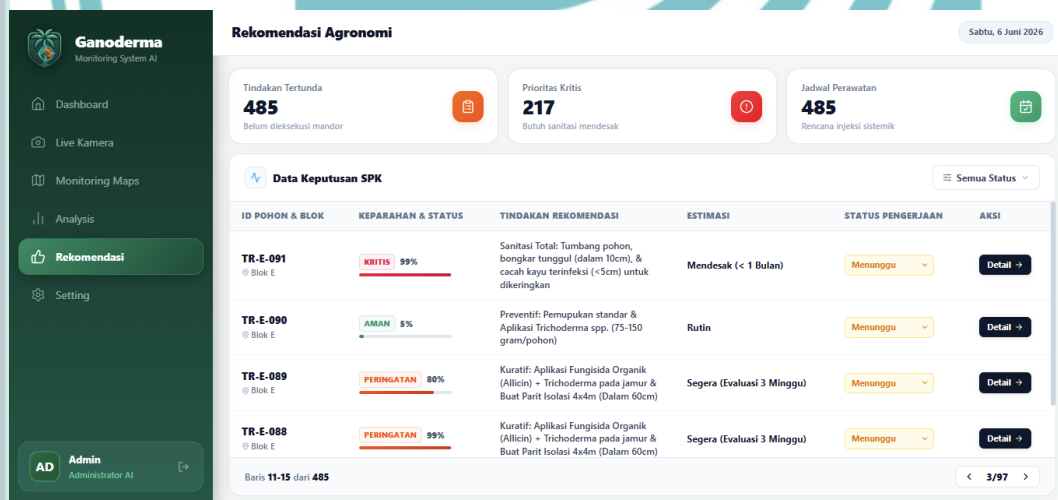
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian , penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

konsisten dan tidak bergantung pada satu konfigurasi pembagian data tertentu, bukan untuk menggantikan hasil evaluasi utama pada model final.

4.7 Pengujian Fungsionalitas Sistem Terintegrasi

Pengujian fungsionalitas menggunakan metode *Black Box Testing* bertujuan untuk memvalidasi setiap fungsi masukan (*input*) dan keluaran (*output*) pada sistem terintegrasi berbasis modular lokal ini. Pengujian difokuskan pada pemenuhan spesifikasi fungsional perangkat lunak tanpa meninjau struktur internal kode program. Skenario pengujian dirancang berdasarkan alur operasional pengguna, dimulai dari tahap pemrosesan antarmuka, pengunggahan citra, hingga penayangan hasil keputusan tindakan oleh modul SPK.

Tampilan antarmuka dasbor web saat memproses unggahan citra termal dan mengeksekusi aturan logika SPK ditampilkan pada Gambar 4.5



Gambar 4.5 Visualisasi Antarmuka Hasil Deteksi Kelas Keparahan dan Keluaran Rekomendasi SPK pada Aplikasi Web

Untuk membuktikan pemenuhan fungsionalitas tersebut secara empiris, rincian skenario pengujian beserta hasil aktual evaluasi *Black Box Testing* dijabarkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Matriks Hasil Pengujian *Black Box Testing* Sistem Terintegrasi

No	Skenario Pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil pengujian	Status
1	Pengguna mengakses dan membuka tautan halaman utama dasbor pemantauan melalui peramban web.	Sistem menampilkan halaman dasbor utama secara utuh beserta menu navigasi secara responsif	Halaman utama dasbor terpopulasi dengan benar tanpa ada komponen antarmuka yang terputus	Berhasil
2	Pengguna memilih dan mengunggah berkas citra termal batang kelapa sawit (.jpg/.png).	Sistem menerima berkas, menampilkan pratinjau citra, dan mengaktifkan tombol analisis otomatis.	Berkas citra berhasil diunggah ke memori lokal sistem dan pratinjau citra muncul di area kerja	Berhasil
3	Modul pra-pemrosesan lokal memanggil citra yang telah diunggah untuk dieksekusi.	Citra secara otomatis diubah ukurannya (<i>resize</i>) menjadi 224x224 piksel dan nilai piksel dinormalisasi ke skala [0,1].	Dimensi matriks gambar berubah menjadi 224x224 piksel dan intensitas warna terkalibrasi di memori internal.	Berhasil
4	<i>Inference engine</i> memproses matriks citra termal menggunakan model <i>Hybrid CNN-Transformer</i> .	Sistem menampilkan hasil klasifikasi kelas penyakit beserta tingkat probabilitas persentasenya secara akurat.	Hasil diagnosa kelas (Sehat/Peringatan/Kritis) dan nilai persentase probabilitas muncul pada layar dasbor secara instan.	Berhasil

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

5	Modul SPK menangkap label prediksi kelas dari model AI untuk memproses aturan logika.	Sistem mengeksekusi aturan kondisional IF-THEN dan mengeluarkan teks instruksi tindakan agronomi serta estimasi sisa waktu produktif.	Teks rekomendasi operasional kebun (tindakan kuratif/eradikasi) muncul secara otomatis di panel informasi dasbor tanpa <i>error</i> .	Berhasil
---	---	---	---	----------

Berdasarkan matriks hasil pengujian pada Tabel 4.5, sistem terintegrasi menunjukkan pemenuhan seluruh parameter fungsi tanpa ditemukan adanya kegagalan operasional (*error*). Ketika citra termal diunggah ke dalam sistem, modul lokal berhasil melakukan normalisasi matriks data, mengeksekusi inferensi arsitektur *Hybrid*, dan memunculkan hasil prediksi kelas tingkat keparahan beserta nilai probabilitasnya pada layar dasbor secara instan.

4.8 Analisis Komparatif dan Seleksi Integrasi Model

Evaluasi terhadap model Hybrid CNN-Transformer yang diusulkan menunjukkan tingkat ketahanan yang signifikan dalam menghadapi variasi gangguan data di lapangan. Berbeda dengan pendekatan komputasional konvensional yang seringkali mengalami penurunan performa drastis akibat gangguan latar belakang (*noise*) pada citra termal, arsitektur ini membuktikan keandalannya dalam mempertahankan konsistensi klasifikasi pada kondisi data yang kompleks.

Pencapaian krusial dari model ini terletak pada kemampuannya mengatasi batasan komputasional pada area transisi, khususnya pada kelas Peringatan. Area ini secara historis merupakan tantangan besar bagi metode deteksi dini karena karakteristik anomali termalnya yang samar dan berhimpitan dengan kelas lain. Melalui integrasi mekanisme atensi, sistem mampu melakukan isolasi fitur patologis secara lebih presisi dibandingkan metode-metode sebelumnya.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Implementasi arsitektur Hybrid CNN-Transformer sukses memecahkan dilema antara detail fitur lokal dan konteks global. Kehadiran lapisan Transformer memberikan kemampuan penalaran konteks yang lebih luas, sehingga model secara cerdas mampu memblokir noise lingkungan. Berdasarkan hasil evaluasi yang mencatatkan akurasi global sebesar 72.66% serta stabilitasnya dalam membedakan fase asimtomatik, model ini secara resmi ditetapkan sebagai mesin inferensi utama untuk mendukung logika Sistem Pendukung Keputusan (SPK) dalam aplikasi web monitoring.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian kuantitatif terhadap purwarupa sistem deteksi penyakit *Ganoderma* berbasis citra termal yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Keberhasilan Arsitektur *Hybrid* dan Seleksi Integrasi: Arsitektur kecerdasan buatan *Hybrid CNN-Transformer* telah berhasil diimplementasikan secara optimal untuk memproses dataset citra termal asimtomatis secara berimbang dengan mencapai tingkat akurasi global sebesar 72%. Melalui skenario uji banding kolaboratif, mekanisme *Self-Attention* pada *Transformer Encoder* terbukti secara signifikan mengungguli performa arsitektur konvolusi murni (CNN ResNet50) dari studi pendamping dalam membedakan anomali suhu patologis dari *noise* lingkungan. Keunggulan komparatif dengan capaian akurasi global 72% ini menjadikan arsitektur *Hybrid CNN-Transformer* terpilih sebagai mesin inferensi (*inference engine*) final yang secara resmi diintegrasikan ke dalam antarmuka aplikasi web
2. Sistem sukses mengatasi kelemahan model konvensional dengan cara mengintegrasikan klasifikasi tersebut ke dalam mesin inferensi Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berlogika Fuzzy Mamdani. Evaluasi terhadap 45 basis aturan (*rule base*) terbukti mampu mengubah hasil probabilitas algoritma dan observasi fisik menjadi luaran rekomendasi taktis seperti instruksi aplikasi biofungisida untuk fase ringan, atau eradikasi untuk fase kritis secara otomatis melalui dasbor web, sehingga sangat membantu manajemen perkebunan kelapa sawit dalam mempercepat eksekusi mitigasi patogen secara akurat di lapangan.

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

3. Dashboard Visual Pemantauan Sebaran Penelitian ini telah berhasil membangun dan menyediakan platform *dashboard web* visual yang interaktif untuk memantau sebaran penyakit *Ganoderma* di area perkebunan. Dashboard ini sukses mentransformasikan luaran nilai probabilitas model AI secara akurat ke dalam mesin inferensi SPK sehingga menghasilkan diagnosis yang andal serta berhasil meminimalkan risiko kemunculan alarm palsu (*false positive*) dalam operasional perkebunan. Melalui panel visual hasil analisis pada aplikasi web ini, pihak manajemen perkebunan dapat memantau titik koordinat pohon, tingkat keparahan infeksi secara spasial, serta peta sebaran penyakit di setiap blok perkebunan secara langsung guna mengeksekusi tindakan mitigasi agronomi secara cepat dan tepat sasaran.

5.2 Saran

Meskipun purwarupa sistem ini telah berfungsi dengan sangat baik dan memenuhi tujuan penelitian, terdapat beberapa ruang pengembangan untuk menyempurnakan penelitian di masa mendatang. Adapun saran teknis yang dapat diberikan untuk peneliti selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Pengayaan Variasi Parameter Lingkungan: Untuk meningkatkan keandalan generalisasi model *Hybrid* CNN-Transformer di berbagai topografi perkebunan, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan akuisisi tambahan data citra termal pada berbagai variasi kondisi cuaca (musim hujan dan kemarau), fluktuasi intensitas cahaya matahari, serta perbedaan jenis tanah (gambut dan mineral) yang dapat mempengaruhi pancaran radiasi inframerah dari pangkal batang.
2. Pengembangan ke Aplikasi *Mobile Native* Lapangan: Sistem yang saat ini berjalan pada platform *web dashboard* disarankan untuk dikembangkan lebih lanjut ke dalam arsitektur aplikasi *mobile native* (misalnya berbasis Android menggunakan Kotlin dan Jetpack Compose). Hal ini bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas dan portabilitas petugas agronomi di lapangan saat melakukan inspeksi pohon kelapa sawit secara langsung dari pohon ke pohon tanpa perlu membawa perangkat komputer (*laptop*)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR PUSTAKA

- Amrutha Lakshmi, M., Indrajaya, M., Singh, U. B., Subanna, A. R. N. S., Challa, G. K., Mawar, R., & Dauda, W. P. (2025) 'Bioprospecting and mechanistic insights of *Trichoderma* spp. for suppression of *Ganoderma*-induced basal stem rot in oil palm', *Frontiers in Nutrition*, 12, 1582047.
- Baharim, M. S. A., Adnan, N. A., Anuar, M. I., Laurence, A. L., & Samat, A. A. (2024) 'Relationship analysis between *Ganoderma boninense*-derived Basal Stem Rot disease severity with multiple leaf physiology parameters', *Journal of Plant Pathology*.
- Baharim, M. S. A., Adnan, N. A., Izzuddin, M. A., Laurence, A. L., Karsimen, M. K., & Arof, H. (2024) 'Modelling water use efficiency (WUE) for estimating the severity of *Ganoderma boninense*-derived basal stem rot disease in oil palm', *Journal of Plant Pathology*.
- Chan, Y. K., Koo, V. C., Zahisham, M. Z. A., Lim, K. M., Connie, T., Lim, C. S., ... & Abidin, H. (2022) 'Design and development of a drone based hyperspectral imaging system', *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 4200-4203.
- Hashim, I. C., Shariff, A. R. M., Bejo, S. K., Muharam, F. M., & Ahmad, K. (2021) 'Classification of non-infected and infected with basal stem rot disease using thermal images and imbalanced data approach', *Agronomy*, 11(12), p. 2373.
- Haw, Y. H., Zhao, Z., Hum, Y. C., Chuah, J. H., Voon, W., Khairunniza-Bejo, S., ... & Lai, K. W. (2023) 'Detection of *Ganoderma Boninense* Diseases of Palm Oil Trees Using Machine Learning', *2023 IEEE 13th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, pp. 228-232.
- Husin, N. A., Baktiar, N. A. H. M., Tagang, V. U., Khairunniza-Bejo, S., & Yusuf, M. F. M. (2025) 'Ganoderma BSR Disease Detection using Machine Learning with UAV Imagery of Oil Palm Features, Thermal and Visible Spectral Indices', *SSRN Preprint*.
- Husin, N. A., Khairunniza-Bejo, S., Abdullah, A. F., Kassim, M. S., Ahmad, D., & Aziz, M. H. (2020) 'Classification of basal stem rot disease in oil palm plantations using terrestrial laser scanning data and machine learning', *Agronomy*, 10(11), p. 1624.
- Johari, S. N., Bejo, S. K., Lajis, G. A., DaimDai, L. D., Keat, N. B., Ci, Y. Y., & Ithnin, N. (2021) 'Detecting BSR-infected oil palm seedlings using thermal



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

imaging technique', *Basrah Journal of Agricultural Sciences*, 34, pp. 73-80.

Judijanto, L. (2026) 'Addressing Ganoderma disease in oil palm plantations: A review of effective management strategies and implementation challenges', *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 3(2), pp. 76–97.

Khalil, H. M., Elrefaiy, A., Elbaz, M., & Elsonbaty, A. A. (2026) 'Enhanced paddy leaf disease detection using novel dual metaheuristic loss functions in generative adversarial networks with identity block preservation for thermal image augmentation', *Scientific Reports*.

Khoo, Y. W., & Chong, K. P. (2023) 'Ganoderma boninense: general characteristics of pathogenicity and methods of control', *Frontiers in Plant Science*, 14, 1156869.

Kurihara, J., Koo, V. C., Guey, C. W., Lee, Y. P., & Abidin, H. (2022) 'Early detection of basal stem rot disease in oil palm tree using unmanned aerial vehicle-based hyperspectral imaging', *Remote Sensing*, 14(3), p. 799.

Kwang, C. S., Abdul Razak, S. F., Yogarayan, S., Adli Zahisham, M. Z., Tam, T. H., Anuar Mohd Noor, M. K., & Abidin, H. (2025) 'Ganoderma disease in oil palm trees using hyperspectral imaging and machine learning', *Journal of Human, Earth, and Future*, 6(1), pp. 67–83.

Lai, V., Yusoff, N. Y. M., Ahmed, A. N., Huang, Y. F., Boo, K. B. W., & El-Shafie, A. (2024) 'The benefits and perspectives of the palm oil industry in Malaysia', *Environment, Development and Sustainability*.

Mimboro, P., Soeparno, H., Soewito, B., & Budiharto, W. (2023) 'Prediction of Oil Palm Conditions Using Deep Learning Based on the Visible Atmospherically Resistant Index on UAV Imagery', *2023 International Conference on Informatics Engineering, Science & Technology (INCITEST)*, pp. 1-7.

Özden, C. (2026) 'Vision Transformer and CNN-Based Models for Image Analysis of Plant Diseases: An Approach for Agricultural Decision Support Systems', *ISPEC Journal of Agricultural Sciences*.

PASPI Monitor (2025) 'Inovasi pengendalian Ganoderma pada perkebunan sawit', *Journal Analysis of Palm Oil Strategic Issues*, 5(01).

Siddiqui, Y., Surendran, A., Paterson, R. R. M., Ali, A., & Ahmad, K. (2021) 'Current strategies and perspectives in detection and control of basal stem



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

rot of oil palm', *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(5), pp. 2840–2849.

Wahyuni, M., Sabrina, T., Mukhlis, & Santoso, H. (2024) 'Using machine learning in detecting Ganoderma disease in oil palm plants', *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12(16s), pp. 145–155.



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Muhammad Arifandi Prasetyo

Muhammad Arifandi Prasetyo dilahirkan di Jakarta pada tanggal 22 Februari 2003. Penulis merupakan anak ke 2 dari pasangan Bapak Edi Bagio dan Ibu Rika Wahyu. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Depok Jaya 2 pada tahun 2016, melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 5 Depok hingga lulus pada tahun 2019, dan menyelesaikan pendidikan menengah kejuruan di SMK

Budi Utomo pada tahun 2022. Pada tahun 2022, penulis melanjutkan pendidikan Diploma IV (Sarjana Terapan) di Program Studi Teknik Informatika, Jurusan Teknik Informatika dan Komputer, Politeknik Negeri Jakarta (PNJ). Selama masa perkuliahan, penulis aktif mendalami pengembangan antarmuka visual terpadu, dengan fokus teknis pada Desain UI/UX serta *Frontend Web Development*, yang dikombinasikan dengan pemahaman fundamental di bidang *Artificial Intelligence* (AI).

Sebagai salah satu syarat kelulusan untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Komputer (S.Tr.Kom.), penulis menyelesaikan skripsi tugas akhir yang berjudul "Perancangan Sistem Deteksi dan SPK Ganoderma Sawit Berbasis Citra Termal Menggunakan Hybrid CNN-Transformer" di bawah bimbingan Dosen Pembimbing Ibu Dr. Prihatin Oktivasari, S.Si., M.Si.

Lampiran

Lampiran 1: Matriks Pengujian User Acceptance Testing (UAT)

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

GANODETECT DASHBOARD MONITORING
User Requirement Verification & Acceptance Testing (UAT) Sign-Off

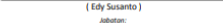
INFORMASI PROYEK & PENGUJIAN

Judul Penelitian	Deteksi Dini Penyakit Ganoderma pada Kelapa Sawit
Mahasiswa / Pengembang	Visca Chaerunnisa Bachri (NIM: 2207411007)
Mahasiswa / Pengembang	Muhammad Arifandi Prasetyo (NIM: 2207411015)
Mitra Validator / Stakeholder	Tim Hama dan Penyakit Tanaman (HPT) Perkebunan
Hari / Tanggal Pengujian	09 Juni 2026
Status Sistem	Siap Diuji (Two-Stage Pipeline Terintegrasi)

RINGKASAN HASIL DEMO SISTEM

Kriteria Evaluasi	Rumus / Sumber Data	Jumlah	Persentase Kepatuhan
Total Kebutuhan Fungsional (User Requirements)	Total baris fungsional matriks	11	100
Kebutuhan Terpenuhi & Lolos Uji (PASS)	Jumlah Status 'PASS' di lembar matriks	11	100
Kebutuhan Gagal / Perbaikan (FAIL)	Jumlah Status 'FAIL' di lembar matriks	0	-
Tingkat Keselapan Aplikasi Akhir (%)	Rasio PASS / Total Kebutuhan	1	100,0%

LEMBAR PERSETUJUAN & SIGN-OFF
Dengan menandatangani dokumen ini, seluruh tim utama dalam rancang bangun sistem dinyatakan telah didemonstrasikan secara langsung dan divalidasi fungsinya sesuai dengan kesepakatan kebutuhan pengguna.

Phak Penguji / Validator Lapangan	Mahasiswa / Pengembang Aplikasi	Mahasiswa / Pengembang Aplikasi
		
(Edy Susanto)	(Visca Chaerunnisa Bachri)	(Muhammad Arifandi Prasetyo)
Adapun:	NIM: 2207411007	NIM: 2207411015

MATRIKS DATA USER REQUIREMENT & CHECKLIST UAT
Gunakan lembar kerja ini untuk melakukan checklist 'PASS' atau 'FAIL' saat mendemonstrasikan sistem di depan validator.

ID Kebutuhan	Modul / Fitur Utama	Kriteria Fungsional Kebutuhan	Skenario Demo & Validasi Lapangan	Status UAT	Catatan Masukan Pembimbing / Mitra
		(Latitude/Longitude).	tersimpan otomatis ke dalam log sistem.		
REQ-003	2. Mapping View	Memetakan posisi koordinat spasial geospasial kelapa sawit secara digital menggunakan penanda (marker).	Membuka menu peta interaktif web, memeriksa sebaran lokasi seluruh pohon di area perkebunan terestrial yang ditarik dari database.	PASS	-
REQ-004	2. Mapping View	Menerapkan pewarnaan marker yang konsisten sebagai indikator kriteria tingkat kesehatan tanaman kelapa sawit.	Memastikan marker berwarna Hijau untuk tanaman kondisi Sehat, warna kuning untuk status Peringatan, dan warna Merah untuk kondisi Kritis/Berat.	PASS	-
REQ-005	2. Mapping View	Menampilkan panel detail drawer interaktif berisi informasi rata-rata suhu dan tingkat keparahan saat marker diklik.	Meneklik salah satu marker di peta (misal objek TR-B-024) dan memvalidasi munculnya info ID pohon, suhu (32.5°C), dan keparahan (99%).	PASS	-
REQ-006	3. Dashboard Analitik	Menampilkan pusat informasi eksekutif (executive summary) berupa akumulasi data statistik populasi total pohon.	Memeriksa kesesuaian angka pada kartu statistik dashboard overview utama (peta makro total pohon dipantau).	PASS	-
REQ-007	3. Dashboard Analitik	Visualisasi grafik sebaran dinamika tingkat kesehatan kelapa sawit lintas musim per blok kerja perkebunan.	Memastikan komponen grafik batang (Bar Chart) merender distribusi jumlah pohon sehat vs terinfeksi dari Blok A hingga Blok E tanpa lag.	PASS	-
REQ-008	3. Dashboard Analitik	Visualisasi grafik garis tren pemindaian harian/bulanan untuk pengawasan berkala manajemen perkebunan.	Memvalidasi grafik garis (Line Chart) menampilkan data fluktuasi kronologis riwayat pemindaian berkala secara dinamis.	PASS	-
REQ-009	4. Sistem Rekomendasi	Mengeksekusi aturan pengambilan keputusan kondisional (Rule-Based Reasoning (IF-THEN)) dari output model kecerdasan buatan.	Sistem otomatis menangkap label dari model AI (Sehat/Peringatan/Kritis) untuk diproses ke mesin aturan penanganan agronomi.	PASS	-
REQ-010	4. Sistem Rekomendasi	Menerbitkan kalkulasi estimasi sisa umur waktu produktif kelapa sawit untuk analisis biaya-manafaat operasional.	Memastikan sisa umur produktif muncul (misal: rentang +- 12 bulan untuk kelas Peringatan, atau < 2 bulan untuk kelas Kritis/Berat).	PASS	-
REQ-011	4. Sistem Rekomendasi	Menghasilkan teks instruksi otomatis rekomendasi tindakan teknis agronomi kuratif atau eradikasi fisik di layar.	Memvalidasi rekomendasi muncul secara otomatis di panel drawers (misal: instruksi aplikasi Trichoderma sp. atau protokol penumbangan/chipping).	PASS	-

Lampiran 2 : Dokumentasi Akuisisi Data Lapangan

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta





© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Lampiran 3: Surat Keterangan Penelitian / Dokumen Mitra



Nomor : 179/BSU/HRD-JPM/IV/2026
Lampiran : -
Perihal : Jawaban Penerimaan Magang

Kepada Yth.
Bapak Ir Haolia Rahman, Ph. D
Kepala Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
Politeknik Negeri Jakarta
di-
Jakarta

Dengan hormat,

Menindaklanjuti surat permohonan pengambilan data lapangan Nomor 158/DST/PL3.14/B/PT.00.0/2026 dari Fakultas Teknik Informatika dan Komputer Politeknik Negeri Jakarta, bersama ini kami sampaikan bahwa PT Bakrie Sawit Unggul menyetujui dan menerima mahasiswa untuk melaksanakan kegiatan penelitian, dengan data sebagai berikut:

Nama : Visca Chaerunnisa Bachri
NIM : 2207411007
Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Jakarta

Nama : Muhammad Arifandi Prasetyo
NIM : 2207411015
Program Studi : Teknik Informatika dan Komputer
Perguruan Tinggi : Politeknik Negeri Jakarta

Demikian surat jawaban penerimaan magang ini kami sampaikan. Atas perhatian dan kerja samanya, kami ucapkan terima kasih.

Kisaran, 20 April 2026
Hormat kami,


Ukur Kami Surtapati
Direktur Operasional

PT Bakrie Sawit Unggul
GO
PT Bakrie Sawit Unggul Plastik T&B
Bakrie Tower 17th Floor
Jl. J.R. Rumeau Sudi
Jakarta 12956, Indonesia
Telp. +62-21 2994 1386-87

Office Admin
Jl. Arah Sudi Babel No. 41 Kencana
Kebayoran Baru 12120
Jakarta Selatan, Indonesia
Telp. +62-21 2994 1386-87