



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

MODEL PREDIKSI TINGKAT KEPARAHAN PENYAKIT DAUN *PESTALOTIOPSIS* SP. PADA TANAMAN KARET BERBASIS INDEKS VEGETASI DAN *DEEP LEARNING*

SOLIKIN



PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Model Prediksi Tingkat Keparahan Penyakit Daun *Pestalotiopsis* sp. pada Tanaman Karet Berbasis Indeks Vegetasi dan *Deep Learning*” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Solikin
G6601201004



RINGKASAN

SOLIKIN. Model Prediksi Tingkat Keparahan Penyakit Daun *Pestalotiopsis* sp. pada Tanaman Karet Berbasis Indeks Vegetasi dan *Deep Learning*. Dibimbing oleh IMAS SUKAESIH SITANGGANG, LILIK BUDI PRASETYO, dan SRI NURDIATI.

Penyakit gugur daun yang berkaitan dengan *Pestalotiopsis* sp. merupakan kendala penting pada perkebunan karet karena menurunkan kualitas tajuk, mengganggu proses fotosintesis, dan berpotensi mengurangi produktivitas lateks. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model klasifikasi empat tingkat keparahan penyakit daun *Pestalotiopsis* sp. pada tanaman karet berbasis indeks vegetasi multivariat (*Multivariate Vegetation Indices*, MVIs) yang diekstraksi dari citra multispektral pesawat udara nirawak (*Unmanned Aerial Vehicle*, UAV). Data dikumpulkan di Pusat Penelitian Karet Sembawa, Sumatera Selatan, pada klon BPM 24, GT 1, dan RRIC 100. Dataset penelitian terdiri atas 144 titik GT berlabel dan 1760 titik kandidat tidak berlabel.

Tahapan penelitian mencakup prapemrosesan citra, penilaian tingkat keparahan penyakit, perhitungan indeks vegetasi, seleksi fitur menggunakan *Random Forest* (RF), penanganan ketidakseimbangan kelas dengan *Synthetic Minority Oversampling Technique* (SMOTE), pembangunan model *Convolutional Neural Network* satu dimensi (CNN 1-D), validasi silang lima lipatan, serta prediksi awal pada data tidak berlabel. Seleksi fitur menghasilkan lima variabel paling informatif, yaitu NDRE, LCI, CI, NDVI_NDRE_Interaction, dan GCI_Ratio. Kelima fitur tersebut merepresentasikan respons *red-edge*, kandungan klorofil, tingkat kehijauan tajuk, serta interaksi spektral yang berkaitan dengan perubahan fisiologis tanaman akibat serangan penyakit.

Model CNN 1-D memperoleh rata-rata akurasi validasi silang sebesar 82,22% dan rata-rata *F1-score* sebesar 0,8218. Penerapan model pada data tidak berlabel menghasilkan 105 prediksi berkepercayaan tinggi. Verifikasi lapangan terbatas menunjukkan bahwa 10 dari 16 sampel yang diperiksa sesuai dengan kondisi aktual. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi fitur spektral terpilih, penanganan ketidakseimbangan kelas, dan CNN 1-D dapat mendukung klasifikasi tingkat keparahan penyakit secara objektif, terukur, dan berbasis tingkat keyakinan.

Penelitian ini memberikan kontribusi representasional melalui penggunaan MVIs terpilih yang ringkas dan relevan secara fisiologis, kontribusi metodologis melalui integrasi RF, SMOTE, dan CNN 1-D, serta kontribusi praktis bagi pengembangan pemantauan kesehatan tanaman karet berbasis UAV. Meskipun demikian, generalisasi model masih terbatas oleh lokasi, waktu pengamatan, klon, sensor, dan jumlah data berlabel. Oleh karena itu, penerapan operasional yang lebih luas memerlukan validasi lintas lokasi, musim, klon, sensor, dan *dataset*. Validasi tersebut juga diperlukan untuk menilai kestabilan performa, kalibrasi probabilitas, sensitivitas terhadap variasi lingkungan, serta kemampuan model dalam mendukung prioritas inspeksi dan pengendalian penyakit pada skala perkebunan secara konsisten dalam praktik lapangan.

Kata kunci: CNN 1-D, indeks vegetasi multivariat, *Pestalotiopsis* sp., tanaman karet, UAV.

SUMMARY

SOLIKIN. Prediction Model for the *Severity Levels of Pestalotiopsis sp.* Leaf Disease in Rubber Plants Based on Vegetation Indices and *Deep Learning*. Supervised by IMAS SUKAESIH SITANGGANG, LILIK BUDI PRASETYO, and SRI NURDIATI.

Leaf fall disease associated with *Pestalotiopsis sp.* is an important constraint in rubber plantations because it reduces canopy quality, disrupts photosynthesis, and may decrease latex productivity. This study aimed to develop a four-level classification model for the *severity of Pestalotiopsis sp.* leaf disease in rubber plants using multivariate vegetation indices derived from multispectral *Unmanned Aerial Vehicle* imagery. Data were collected at the Sembawa Rubber Research Centre, South Sumatra, from the BPM 24, GT 1, and RRIC 100 clones. The dataset comprised 144 labelled ground-truth points and 1760 unlabelled candidate points.

The research workflow included image preprocessing, disease-severity assessment, vegetation-index calculation, feature selection using *Random Forest*, class-imbalance handling using the *Synthetic Minority Oversampling Technique*, development of a one-dimensional *Convolutional Neural Network*, five-fold cross-validation, and preliminary prediction on unlabelled data. Feature selection identified five variables as the most informative: NDRE, LCI, CI, NDVI_NDRE_Interaction, and GCI_Ratio. These variables represented *red-edge* response, chlorophyll content, canopy greenness, and spectral interactions associated with physiological changes caused by disease infection.

The CNN 1-D model achieved a mean cross-validation accuracy of 82.22% and a mean *F1-score* of 0.8218. Application of the model to the unlabelled data produced 105 high-*confidence* predictions. Limited field verification showed that 10 of the 16 examined samples agreed with actual field conditions. These results indicate that the combination of selected spectral features, class-imbalance handling, and CNN 1-D can support objective, measurable, and *confidence*-based classification of disease *severity*.

This study contributes representationally through the use of a compact set of physiologically relevant multivariate vegetation indices, methodologically through the integration of *Random Forest*, SMOTE, and CNN 1-D, and practically through the development of UAV-based rubber-plant health monitoring. Nevertheless, model generalisation remains limited by the study location, observation periods, clones, sensor, and the number of labelled samples. Therefore, broader operational implementation requires validation across locations, seasons, clones, sensors, and datasets. Such validation is also needed to evaluate performance stability, probability calibration, sensitivity to environmental variability, and the model's ability to support consistent prioritisation of field inspection and disease management at plantation scale under diverse operational conditions before routine deployment in large commercial rubber plantations.

Keywords: CNN 1-D, multivariate vegetation indices, *Pestalotiopsis sp.*, rubber plant, UAV.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



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

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



MODEL PREDIKSI TINGKAT KEPARAHAN PENYAKIT DAUN *PESTALOTIOPSIS* SP. PADA TANAMAN KARET BERBASIS INDEKS VEGETASI DAN *DEEP LEARNING*

SOLIKIN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Komputer

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Aziz Kustiyo, S.Si, M.Kom.
- 2 Dr. Tri Rapani Febbiyanti, S.P., M.Si.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Aziz Kustiyo, S.Si, M.Kom.
- 2 Dr. Tri Rapani Febbiyanti, S.P., M.Si.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Perpustakaan IPB University

Judul Disertasi: Model Prediksi Tingkat Keparahan Penyakit Daun *Pestalotiopsis* sp. pada Tanaman Karet Berbasis Indeks Vegetasi dan *Deep Learning*.

Nama : Solikin
NIM : G6601201004

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si, M.Kom.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc.



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Ir. Sri Nurdianti, M.Sc.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom.
NIP 197501301998022001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 196607021993021001



Tanggal Ujian:
30 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak November 2021 sampai April 2026 ini ialah “Model Prediksi Tingkat Keparahan Penyakit Daun *Pestalotiopsis* sp. pada Tanaman Karet Berbasis Indeks Vegetasi dan *Deep Learning*”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Ibu Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom., Bapak Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc., dan Ibu Prof. Dr. Ir. Sri Nurdianti, M.Sc., yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan masukan sehingga disertasi ini dapat diselesaikan. Di samping itu, penghargaan dan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Yeni Herdiyeni, S.Si., M.Kom., yang telah memberikan bimbingan dan arahan.
2. Ibu Dr. Eng. Annisa, S.Kom., M.Kom., yang telah memberikan bimbingan dan arahan.
3. Ibu Dr. Tri Rapani Febbiyanti, S.P., M.Si., dari Pusat Penelitian Karet Sembawa, Banyuasin, Sumatera Selatan, yang telah memberikan izin penelitian.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc., beserta pimpinan dan jajaran Sekolah Pascasarjana IPB.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom., beserta pimpinan dan jajaran Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika (SSMI) IPB.
6. Bapak Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom., M.Kom., beserta pimpinan dan jajaran Departemen Ilmu Komputer; Ibu Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Doktor Ilmu Komputer; Bapak Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom., M.T., selaku Sekretaris Program Studi Doktor Ilmu Komputer; Ibu Nining; serta seluruh staf yang telah membantu kelancaran studi.
7. Bapak Prof. Dr. Ir. Ernan Rustiadi, M.Agr., selaku Kepala LPPM IPB, yang telah membantu pendanaan pengambilan data penelitian melalui Skema Hibah Riset Mandiri Dosen Program Riset Keilmuan Lingkar Kampus IPB, serta Ibu Prof. Dr. Yeni Herdiyeni, S.Si., M.Kom., selaku Ketua Periset.
8. Bapak Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc., beserta Laboratorium Analisis Lingkungan dan Pemodelan Spasial, Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata (KSHE), Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB.
9. Bapak Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Sc., selaku Kepala Divisi Analisis Lingkungan dan *Geospatial Modelling*, Departemen Konservasi Sumberdaya Hutan dan Ekowisata (KSHE) IPB; Bapak Arif Kurnia Wijayanto, S.Kom., M.Sc., Ph.D.; Ibu Irene Carolina Famayanti, S.E.; serta Rian Reftian Nurochmat, S.Kom., yang telah membantu penyediaan dan penggunaan peralatan berupa *drone* dan kamera *fisheye*, beserta kelengkapan lainnya, serta turut membantu pengambilan data penelitian di Pusat Penelitian Karet Sembawa, Banyuasin, Sumatera Selatan.



10. Bapak Prof. Zainal Arifin Hasibuan, Ph.D., Ibu Prof. Dr. Ir. Dwiza Riana, S.Si., M.M., M.Kom., IPU, ASEAN Eng., dan Bapak Prof. Kridanto Surendro, Ph.D., yang telah memberikan rekomendasi studi.
11. Bapak Ir. Luthvi Rachman Ervianto, M.M., beserta pimpinan dan jajaran Yayasan Kemakmuran dan Kesejahteraan Anak Bangsa (YKKAB), serta Bapak Assoc. Prof. Dr. Indra Muis, S.S., M.M., selaku Rektor Universitas Bina Insani, beserta para wakil rektor, dekan, ketua program studi, dosen, dan seluruh jajaran yang telah memberikan dukungan bagi kelancaran studi doktoral.
12. Para sahabat, Bapak Assoc. Prof. Dr. Dadang Sudrajat, S.Si., M.Kom., Ibu Dr. Hanny Hikmayanti Handayani, S.Kom., M.Kom., Bapak Jamaludin Indra, S.Kom., M.Kom., Bapak Rudi Kurniawan, S.Kom., M.T., Bapak Khaerul Anam, M.Kom., dan Bapak Yudhistira Arie Wijaya, M.Kom., yang telah membantu penyelesaian studi.
13. Para sahabat yang tidak henti-hentinya memberikan dukungan, khususnya Kang Dr. Muhammad Rafi Muttaqin, M.Kom., Teh Fitroh, Kang Dr. Tegar Alam NST., seluruh sahabat Angkatan 3 Tahun 2020 Program Studi Doktor Ilmu Komputer IPB, Teh Anna, Kang Agung, Teh Dr. Arie Qur'ania, Teh Dr. Sri Dianing Asri, dan Teh Adriana.
14. Bapak Prof. Dr. Ir. Richardus Eko Indrajit, M.Sc., M.B.A., M.Phil., M.A., selaku Pembina Asosiasi Pendidikan Tinggi Informatika dan Komputer (APTIKOM); Bapak Prof. Dr. rer. nat. Achmad Benny Mutiara Q.N., S.Kom., selaku Ketua Umum; Bapak Prof. Husni Teja Sukmana, Ph.D., selaku Sekretaris Jenderal; Bapak Prof. Prihandoko, M.IT., Ph.D., selaku Wakil Sekretaris Jenderal; Bapak Prof. Dr. Ir. Wendi Usino, M.M., M.Sc., Ph.D.; Bapak Prof. Dr. Ir. Mochamad Wahyudi, M.Kom., M.M., M.Pd., IPU, ASEAN Eng., selaku Bendahara Umum; para pengurus DPP APTIKOM; para Ketua APTIKOM Provinsi se-Indonesia; serta seluruh keluarga besar APTIKOM yang senantiasa memberikan semangat dan dukungan bagi penyelesaian studi.
15. Secara khusus, ungkapan terima kasih disampaikan kepada Ayahanda tercinta Wastam bin Nurkad (Alm.), Ibunda tercinta Sairah binti Rasjad (Almh.), Kakak tercinta Daskim dan Sutinah, serta seluruh keluarga. Terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada istri dan anak-anak tercinta, Erni Rukhimah, Aris Pratama Putra, S.T., M.Kom., Dalilah Dwianita Putri, S.E., M.B.A., dan Salsabila Triahnaf Putri, S.A.P., atas dukungan, doa, kasih sayang, dan pengertian yang diberikan selama penyelesaian studi.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan. Penulis berharap karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi pihak yang membutuhkan serta berkontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Solikin
G6601201004



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xix
GLOSARIUM	xx
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	5
1.5 Ruang Lingkup	5
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	6
1.7 Kerangka Penulisan	6
1.8 Kerangka Pemikiran Penelitian	7
II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Citra Multispektral <i>Drone</i>	11
2.2 Indeks Vegetasi	12
2.2.1 NDVI	16
2.2.2 MCARI	17
2.2.3 CI	19
2.2.4 LCI	20
2.2.5 NDRE	22
2.2.6 GCI	23
2.2.7 <i>GCI_Ratio</i>	25
2.2.8 <i>MCARI_CI_Ratio</i>	27
2.2.9 <i>NDVI_NDRE_Interaction</i>	30
2.3 Indeks Vegetasi Multivariat	32
2.4 Tanaman dan Perkebunan Karet	34
2.5 Gejala Penyakit Gugur Daun <i>Pestalotiopsis</i> sp. Tanaman Karet	35
2.6 Tingkat Keparahan <i>Pestalotiopsis</i> sp.	37
2.7 Jaringan Saraf Konvolusional	39
2.8 Random Forest	41
2.9 Seleksi Fitur	43
2.10 Penelitian Terdahulu yang Relevan	46
III METODE	53
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	53
3.2 Alat dan Bahan	54
3.3 Tahapan Penelitian	55
3.3.1 Pengumpulan dan Prapemrosesan Data	57
3.3.2 Pelabelan dan Penambahan Data	67
3.3.3 Perhitungan Indeks Vegetasi	71
3.3.4 Pemilihan Fitur Menggunakan <i>Random Forest</i>	73
3.3.5 Pembagian Data Latih, Validasi, dan Uji	75
3.3.6 Analisis Data Eksploratori	78
3.3.7 Penanganan Ketidakseimbangan Kelas dengan SMOTE	79
3.3.8 Penentuan Tingkat Keparahan Penyakit dengan CNN 1-D	82

3.3.9	Penyetelan Hiperparameter	84
3.3.10	Skenario Percobaan	89
3.3.11	Model Evaluasi dan Hasil Prediksi	90
IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	96
4.1	Hasil Pengumpulan Data dan Pra-Pemrosesan Data	96
4.1.1	Pengumpulan Data	96
4.1.2	Alat dan Bahan	97
4.1.3	Distribusi Spasial dan Pola Tingkat Keparahan	99
4.1.4	Distribusi Tingkat Keparahan dan Pembagian Data	103
4.2	Perhitungan Indeks Vegetasi	104
4.3	Pemilihan Fitur	110
4.4	Analisis Data Eksploratori	113
4.4.1	Stabilitas, Generalisasi, dan Ketangguhan Model RF	116
4.4.2	Kontribusi Fitur dan Generalisasi Model	118
4.4.3	Penanganan Ketidakseimbangan Kelas dengan SMOTE	121
4.4.4	Optimasi dan Implikasinya terhadap Klasifikasi Tingkat Keparahan Penyakit	122
4.5	Penentuan Tingkat Keparahan Penyakit	124
4.6	Penyetelan Hiperparameter CNN 1-D	126
4.7	Model Evaluasi CNN 1-D dan Hasil Prediksi Tingkat Keparahan	134
4.7.1	Evaluasi Kinerja Model melalui Validasi Silang	136
4.7.2	Analisis Probabilitas Kelas, Prediksi, dan Tingkat Keyakinan	140
4.7.3	Analisis Kalibrasi Probabilitas CNN 1-D	141
4.7.4	Perbandingan Kinerja dan Kalibrasi CNN 1-D Tanpa HPT dan dengan HPT	142
4.7.5	Konsistensi Interpretasi Antar-Skenario Evaluasi	143
4.7.6	Hasil Prediksi Data Tidak Berlabel dan Interpretasinya	144
4.8	Perbandingan Kinerja RF, CNN dan Studi Terdahulu	153
4.8.1	Perbandingan Kinerja RF-HPT dan CNN 1-D HPT	153
4.8.2	Perbandingan dengan Studi Terdahulu	155
4.9	Implikasi Ilmiah, Metodologis, dan Praktis	157
4.9.1	Implikasi Ilmiah	157
4.9.2	Implikasi Metodologis	158
4.9.3	Implikasi Praktis	159
4.10	Keterbatasan Penelitian	160
V	SIMPULAN DAN SARAN	163
5.1	Simpulan	163
5.2	Saran	164
	DAFTAR PUSTAKA	166
	LAMPIRAN	177
	RIWAYAT HIDUP	184

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

DAFTAR TABEL

1	Panjang gelombang band multispektral <i>drone</i> (Li <i>et al.</i> 2024)	13
2	Ringkasan indeks vegetasi	13
3	Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan	47
4	Ringkasan data penelitian	55
5	Indikasi representasi data akuisisi data multispektral UAV	60
6	Kriteria penilaian tingkat keparahan penyakit GDK oleh <i>Pestalotiopsis</i> sp. berdasarkan <i>Score Index</i>	63
7	Fitur spektral yang digunakan pada ekstraksi fitur	65
8	Distribusi 144 data GT berdasarkan periode pengambilan dan klon	67
9	Rekapitulasi data GT berdasarkan klon	67
10	Distribusi 1760 titik kandidat prediksi berbasis <i>grid</i>	68
11	Kriteria seleksi pseudo-label berdasarkan tingkat keyakinan prediksi	68
12	Rancangan model RF untuk seleksi fitur	73
13	Distribusi data GT dan titik kandidat berdasarkan periode, region dan klon	76
14	Rekapitulasi data berdasarkan klon dan periode pengambilan	76
15	Komposisi data latih dan data uji sebelum SMOTE	76
16	Skema data latih, validasi, dan uji	77
17	Prinsip penerapan SMOTE pada pemodelan RF dan CNN 1-D	80
18	Perbandingan data latih sebelum dan sesudah SMOTE	81
19	Rancangan arsitektur CNN 1-D	83
20	Parameter yang disetel pada CNN 1-D	89
21	Skenario percobaan penelitian	89
22	Ringkasan hasil pengumpulan data	97
23	Ringkasan alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian	98
24	Distribusi kelas tingkat keparahan <i>Pestalotiopsis</i> sp. dan pembagian data pelatihan-pengujian yang terstratifikasi	103
25	Ringkasan komposisi <i>dataset</i> pada tahap CNN 1-D	104
26	Identitas sampel citra pada lima sampel klon BPM 24 pengambilan pertama	107
27	Perhitungan manual NDRE dan LCI pada lima sampel klon BPM 24 pengambilan pertama	107
28	Ringkasan rata-rata indeks vegetasi utama berdasarkan kelas keparahan penyakit	108
29	Ringkasan rata-rata indeks vegetasi turunan berdasarkan kelas keparahan penyakit	109
30	Ringkasan hasil seleksi fitur awal berbasis RF.	111
31	Ringkasan hasil evaluasi model	117
32	Ringkasan kinerja RF pada berbagai skenario evaluasi	123
33	Evaluasi kinerja model CNN 1-D	125
34	Parameter CNN 1-D hasil penyetulan	127
35	Perbandingan kinerja model CNN 1-D sebelum dan sesudah HPT pada validasi silang	133
36	Perbandingan akurasi <i>fold</i> terbaik CNN 1-D sebelum dan setelah HPT	135

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

37	Performa CNN 1-D sebelum HPT berdasarkan matriks konfusi	136
38	Performa CNN 1-D setelah HPT berdasarkan matriks konfusi	136
39	Ringkasan hasil validasi silang lima lipatan CNN 1-D.	137
40	Visualisasi hasil prediksi tingkat keparahan penyakit	138
41	Perbandingan kinerja validasi silang CNN 1-D tanpa HPT dan dengan HPT	141
42	Hasil penerapan Persamaan (43) pada 50 sampel analisis probabilitas	141
43	Perbandingan tingkat keyakinan berdasarkan Persamaan (44).	141
44	Kalibrasi tingkat keyakinan prediksi CNN 1-D tanpa HPT	142
45	Kalibrasi tingkat keyakinan prediksi CNN 1-D engan HPT	142
46	Perbandingan kinerja dan kalibrasi probabilitas CNN 1-D tanpa HPT dan dengan HPT	143
47	Perbedaan fungsi hasil evaluasi model CNN 1-D	144
48	Ringkasan hasil prediksi data tidak berlabel berdasarkan tingkat keparahan	144
49	Ringkasan hasil prediksi berkepercayaan tinggi	145
50	Perbandingan kinerja RF-HPT dan CNN 1-D HPT berdasarkan beberapa skenario evaluasi	153
51	Perbandingan penelitian ini dengan studi terdahulu yang relevan	155

DAFTAR GAMBAR

1	Gejala bercak daun dari lapangan berbentuk bulat tidak beraturan berwarna cokelat dengan pinggiran bercak lebih gelap (a), gejala pada daun yang diinokulasi <i>Pestalotiopsis</i> sp. pada klon RRIC 100 (b), PB 260 (c), BPM 24 (d), GT 1 (e), dan daun pada perlakuan kontrol (f). (Kusdiana <i>et al.</i> 2020)	2
2	Daun karet terserang <i>Pestalotiopsis</i> sp. dengan gejala klorosis dan bercak nekrotik multipel (a) serta kondisi tajuk pohon karet yang menipis di Pusat Penelitian Karet Sembawa (b). (Bua <i>et al.</i> 2022)	2
3	Kerangka pemikiran penelitian	8
4	Respons pemantulan dan penyerapan cahaya dari tanaman yang sehat (hijau) dan tanaman yang sakit (ungu) (Iqbal dan Herdiyeni 2023)	14
5	Alur metodologis evaluasi VIs berbasis UAV RGB dan multispektral. (Panthakkan <i>et al.</i> 2025)	15
6	Perbandingan gejala hasil inokulasi <i>Pestalotiopsis</i> sp. dengan gejala alami di lapangan: gejala awal pada daun hijau (A), bercak nekrotik yang ditandai lingkaran pada daun hijau (B), dan perkembangan gejala lanjut berupa klorosis berwarna oranye dengan bercak nekrotik multipel (C) (Febbiyanti dan Fairuzah 2020)	36
7	Bercak pada permukaan atas daun dari lapangan (I) dan bercak pada permukaan atas daun yang diinokulasi <i>Pestalotiopsis</i> sp. (II), pada klon RRIC 100 (a), PB 260 (b), BPM 24 (c), dan GT 1 (d) (Kusdiana <i>et al.</i> 2020).	37
8	Struktur model CNN. Li <i>et al.</i> (2025)	40

9	Tahapan penelitian	56
10	Skema indikasi yang direpresentasikan oleh akuisisi data multispektral UAV	59
11	Tingkat keparahan penyakit GDK oleh <i>Pestalotiopsis</i> sp. yaitu <i>resistant</i> (L0), <i>light infection</i> (L1), <i>moderate infection</i> (L2), <i>severe infection</i> (L3), dan <i>very severe</i> (L4) (Febbiyanti dan Fairuzah 2020)	62
12	Skema alur ekstraksi fitur spektral	66
13	Skema pelabelan dan penambahan data berlabel pada penelitian	69
14	Ilustrasi alur seleksi fitur RF	74
15	Ilustrasi tahapan EDA: distribusi fitur pada setiap kelas (a), hubungan antarfitur melalui diagram pencar (b), pola antarkelas (c), dan komposisi kelas (d) (Hullman dan Gelman 2021)	79
16	Ilustrasi arsitektur CNN 1-D	83
17	Peta lokasi pengambilan data di Pusat Penelitian Karet Sembawa (Herdiyeni <i>et al.</i> 2024)	96
18	Alat pengumpulan data dengan menggunakan dua alat (a) <i>drone</i> dan (b) kamera <i>fisheyes</i>	98
19	Distribusi kelas tingkat keparahan penyakit <i>Pestalotiopsis</i> sp. (L1–L4) dalam kumpulan data yang diberi label	99
20	Data baru menggunakan metode RF untuk pengumpulan data ke-1 (a) BPM-24 (b) GT 1 dan (c) RRIC 100.	100
21	Data baru yang diperoleh melalui pengambilan data RF tahap ke-2 (a) BPM-24 dan (b) GT 1	102
22	Diagram pencar hubungan NDRE dan LCI pada 1904 data hasil prapemrosesan dengan pengelompokan kelas berdasarkan rentang nilai indeks	105
23	Visualisasi rata-rata NDVI, NDRE, dan LCI berdasarkan kelas keparahan penyakit	109
24	<i>Feature importance</i> awal untuk seleksi fitur menggunakan RF	110
25	Distribusi nilai NDRE pada setiap tingkat keparahan penyakit <i>Pestalotiopsis</i> sp.	111
26	Distribusi nilai GCI_Ratio pada setiap tingkat keparahan penyakit <i>Pestalotiopsis</i> sp.	112
27	<i>Heatmap</i> korelasi antarvariabel dan pair plot distribusi	114
28	Hubungan antarfitur	114
29	Visualisasi ringkas performa model	118
30	RF <i>feature importance</i> : (a) sebelum HPT dan (b) sesudah HPT	118
31	Kurva pembelajaran yang menggambarkan hubungan antara kinerja dan ukuran data pelatihan: (a) sebelum HPT dan (b) setelah HPT	120
32	Distribusi tingkat keparahan: (a) sebelum SMOTE (b) setelah SMOTE	121
33	Analisis optimasi ambang batas RF: (a) sebelum HPT dan (b) setelah HPT	123
34	Arsitektur CNN 1-D	124
35	Perbandingan akurasi validasi terbaik (a) dan loss validasi terbaik (b) pada seluruh <i>fold</i> setelah penyesuaian hiperparameter	127



36	Perbandingan kinerja model pada seluruh lipatan validasi silang: (a) tren akurasi validasi pada semua lipatan dan (b) tren loss validasi pada semua lipatan	128
37	<i>Training history</i> model CNN 1-D setelah penyesuaian hiperparameter: (a) <i>Fold 1</i> , (b) <i>Fold 2</i> , (c) <i>Fold 3</i> , (d) <i>Fold 4</i> , dan (e) <i>Fold 5</i>	132
38	Matriks konfusi CNN 1-D tanpa HPT	134
39	Matriks konfusi CNN 1-D setelah HPT	135
40	Contoh tingkat keparahan <i>Severity</i> L1.	138
41	Contoh tingkat keparahan <i>Severity</i> L2.	139
42	Contoh tingkat keparahan <i>Severity</i> L3	139
43	Contoh tingkat keparahan <i>Severity</i> L4	140
44	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L1 dan <i>confidence</i> 83,1%	146
45	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L1 dan <i>confidence</i> 74,5%	147
46	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L2 dan <i>confidence</i> 68,1%	147
47	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L1 dan <i>confidence</i> 84,4%	148
48	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L3 dan <i>confidence</i> 99,6%	148
49	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L4 dan <i>confidence</i> 98,3%	148
50	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L4 dan <i>confidence</i> 65,7%	149
51	Contoh Grad-CAM pada sampel kanopi dengan prediksi L4 dan <i>confidence</i> 93,5%	149
52	Rata-rata kepentingan fitur pada seluruh sampel berdasarkan analisis Grad-CAM <i>feature importance</i>	150
53	Variasi kepentingan fitur antarsampel berdasarkan <i>Heatmap</i> analisis Grad-CAM <i>feature importance</i>	151
54	Distribusi kepentingan fitur menurut kelas prediksi berdasarkan analisis Grad-CAM <i>feature importance</i>	152
55	Korelasi antara nilai fitur dan tingkat kepentingannya berdasarkan analisis Grad-CAM <i>feature importance</i>	152
56	Perbandingan kinerja RF-HPT dan CNN 1-D HPT: (a) akurasi pada beberapa skenario evaluasi; (b) indikator kinerja tambahan	154



DAFTAR LAMPIRAN

1	Hasil segmentasi citra karet dan gulma pengambilan pertama dengan klon (a) BPM 24, (b) GT 1, (c) RRIC 100 (Iqbal dan Herdiyeni 2023)	172
2	Hasil segmentasi citra karet dan gulma pengambilan kedua pada klon (a) BPM 24, (b) GT 1 (Iqbal dan Herdiyeni 2023)	173
3	Contoh data titik koordinat	174
4	Contoh data <i>ground truth</i> (GT) 144 titik	175
5	Contoh data 1760 titik tidak berlabel	175
6	Contoh 1904 data hasil pra-pemrosesan (144 GT dan 1760)	177
7	Tabel hasil ekstraksi fitur NDRE dan LCI (Iqbal dan Herdiyeni 2023)	177