

SEGMENTASI KUANTITATIF GEJALA PENYAKIT *XANTHOMONAS* PADA BIBIT *EUCALYPTUS PELLITA* BERBASIS *DEEP LEARNING* DENGAN *DYNAMIC LOSS*

TEGAR ALAMI NASUTION



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

@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.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Segmentasi Kuantitatif Gejala Penyakit *Xanthomonas* pada Bibit *Eucalyptus pellita* Berbasis *Deep Learning* dengan *Dynamic Loss*” 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, Juni 2026

Tegar Alami Nasution
G6601202011

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

RINGKASAN

TEGAR ALAMI NASUTION. SEGMENTASI KUANTITATIF GEJALA PENYAKIT *Xanthomonas* PADA BIBIT *Eucalyptus pellita* BERBASIS *DEEP LEARNING* DENGAN *DYNAMIC LOSS*. Dibimbing oleh YENI HERDIYENI, WISNU ANANTA KUSUMA, BUDI TIAHJONO, dan ISKANDAR ZULKARNAEN SIREGAR.

Eucalyptus pellita menjadi salah satu spesies utama pada Hutan Tanaman Industri (HTI) di Indonesia karena pertumbuhannya cepat, adaptasi ekologinya luas, dan bernilai ekonomi tinggi sebagai bahan baku industri *pulp* dan kertas. Namun, pada fase pembibitan, bibit *E. pellita* rentan mengalami hawar daun bakteri. Tim *Plant Protection* mengidentifikasi gejala lapang tersebut sebagai gejala yang konsisten dengan serangan *Xanthomonas* sp. Gejala ini dapat menurunkan kualitas bibit, mengganggu pertumbuhan, dan menimbulkan kerugian operasional. Pemantauan di area pembibitan sebagian besar masih dilakukan secara manual, sehingga memerlukan waktu, tenaga, dan biaya yang besar. Kondisi ini menegaskan perlunya sistem pemantauan berbasis *computer vision* dan *deep learning* yang mampu bekerja pada lingkungan *nursery* terbuka dengan variasi pencahayaan, latar belakang kompleks, dan tumpang tindih daun.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan model segmentasi daun bibit *E. pellita*, merancang model segmentasi area nekrosis gejala *Xanthomonas* pada kondisi ketidakseimbangan piksel ekstrem, serta membangun indikator keparahan berbasis rasio luas nekrosis terhadap luas daun pada tingkat *tray*. Penelitian mengembangkan alur kerja pemantauan berbasis segmentasi dua tahap yang diikuti kuantifikasi keparahan berbasis rasio piksel. Tahap pertama menggunakan *Modified U-Net* dengan *encoder* ResNet-50 pralatih dan regularisasi L2 untuk menghasilkan masker daun sebagai area acuan pengukuran. Tahap kedua menggunakan *Attention U-Net* berbasis *encoder* ResNet-50 untuk segmentasi area nekrosis.

Kontribusi metodologis penelitian ini adalah penyesuaian *Dynamic Area-aware Tversky Loss* (DTL) pada alur kerja segmentasi berbasis *deep learning* untuk mendeteksi lesi nekrosis kecil. DTL dikalibrasi dengan $\alpha = 0,7$, $\beta = 0,3$, $\lambda = 602$, $t = 0,00083$, dan $\varepsilon = 1 \times 10^{-7}$; rasio r dihitung secara dinamis dari masker acuan setiap citra. Tahap ketiga membentuk indikator keparahan turunan pada tingkat *tray*. Citra diperoleh di pembibitan terbuka PT XYZ, Riau, menggunakan sistem akuisisi berbasis *Internet of Things* dengan kamera RGB 1080p pada *boom sprayer* yang terhubung ke *mini PC* Intel NUC sebagai unit komputasi tepi.

Hasil segmentasi daun menunjukkan bahwa *Modified U-Net* memberikan kinerja terbaik dan paling stabil pada seluruh kondisi pencahayaan. Median *Dice* mencapai 0,872 pada kondisi mendung, 0,841 pada kondisi cerah, dan 0,854 pada kondisi terik. Median *IoU* masing-masing adalah 0,773, 0,725, dan 0,745. Uji Kruskal–Wallis pada metrik per citra menunjukkan bahwa perbedaan kinerja antarkondisi pencahayaan tidak signifikan untuk *Modified U-Net* ($H = 4,012$; $p = 0,1345$; $\varepsilon^2 = 0,008$), yang menunjukkan bahwa model cukup stabil terhadap variasi iluminasi alami. Dibandingkan SegNet dan DeepLabv3+, *Modified U-Net* juga menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara *Precision* dan *Recall*, sehingga

masker daun dapat digunakan sebagai dasar normalisasi area pada tahap estimasi keparahan.

Pada segmentasi nekrosis, konfigurasi terbaik diperoleh pada model A2, yaitu *Attention* U-Net dengan DTL. Pada data uji, model ini mencapai median *Dice* 0,812, *IoU* 0,680, *Precision* 0,788, dan *Recall* 0,838. Kinerja tersebut lebih baik daripada *baseline* A1 yang menggunakan *Tversky loss* standar dengan median *Dice* 0,714 dan *IoU* 0,548. Uji Wilcoxon *signed-rank* berpasangan dengan koreksi Holm menunjukkan bahwa peningkatan A1 ke A2 signifikan secara statistik dengan Δ median *Dice* sebesar 0,098, $p < 0,0001$, dan ukuran efek besar $r = 0,904$. Hasil ini menunjukkan bahwa pada konfigurasi model dan *dataset* penelitian ini, DTL efektif menurunkan negatif palsu pada lesi mikro tanpa meningkatkan positif palsu secara berlebihan. Peningkatan juga terlihat pada pasangan model tanpa *attention*; pada data uji penelitian ini, selisih peningkatan terbesar diperoleh pada konfigurasi yang menggabungkan DTL dan *attention gate*.

Integrasi hasil segmentasi daun dan segmentasi nekrosis menghasilkan indikator keparahan berbasis rasio piksel yang konsisten secara komputasional dan dapat diaudit sebagai indikator turunan berbasis citra. Pada tingkat *tray*, keparahan dihitung sebagai rasio luas nekrosis terhadap luas daun. Untuk kebutuhan operasional, kamera dipicu otomatis melalui skrip Python sesuai interval akuisisi. Citra disimpan secara lokal. Setelah satu lintasan selesai, *mini PC* menjalankan inferensi untuk menghitung *severity_tray* pada *tray* sampel dan mengirimkan hasilnya melalui koneksi internet ke dasbor, sehingga alur akuisisi–inferensi–pelaporan berlangsung tanpa pemindahan berkas manual. Dengan kecepatan *boom sprayer* terukur $0,1308 \text{ m s}^{-1}$, interval pemicu akuisisi yang sesuai adalah 7,83 detik, dengan estimasi waktu operasional sekitar 55 menit per jalur. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan menyediakan kerangka pemantauan operasional berbasis *edge-to-cloud* yang terotomasi, konsisten, dan terukur di lingkungan HTI. Validasi berpasangan dilakukan pada *tray* yang sama di tiga baris *sampling* dalam satu jalur dan menghasilkan 238 pasangan valid. Estimasi sistem menunjukkan kesesuaian yang kuat dengan penilaian pengawas, dengan koefisien korelasi intrakelas AI–manual 0,79, Spearman ρ 0,84, galat absolut rerata 0,25 poin persentase, kesesuaian kategori tepat 71,8%, dan kesesuaian dalam toleransi satu tingkat 100,0%.

Kata kunci: keparahan penyakit, lesi mikro, segmentasi semantik, *Xanthomonas*

SUMMARY

TEGAR ALAMI NASUTION. DEEP LEARNING-BASED QUANTITATIVE SEGMENTATION OF *Xanthomonas* DISEASE SYMPTOMS IN *Eucalyptus pellita* SEEDLINGS WITH DYNAMIC LOSS. Supervised by YENI HERDIYENI, WISNU ANANTA KUSUMA, BUDI TIAHJONO, and ISKANDAR ZULKARNAEN SIREGAR.

Eucalyptus pellita is one of the main species in industrial plantation forests (HTI) in Indonesia because of its rapid growth, broad ecological adaptation, and high economic value as raw material for the pulp and paper industry. However, during the nursery stage, *E. pellita* seedlings are susceptible to bacterial leaf blight. The Plant Protection team identified the observed field symptoms as being consistent with *Xanthomonas* sp. infection. These symptoms may reduce seedling quality, disrupt growth, and cause operational losses. Monitoring in nursery areas is still largely conducted manually, requiring substantial time, labor, and cost. This condition emphasizes the need for a computer vision- and deep learning-based monitoring system capable of operating in open nursery environments with varying illumination, complex backgrounds, and overlapping leaves.

The objectives of this study were to develop a leaf segmentation model for *E. pellita* seedlings, design a necrotic area segmentation model for *Xanthomonas* symptoms under extreme pixel imbalance, and construct a severity indicator based on the ratio of necrotic area to leaf area at the tray level. To achieve these objectives, this study developed a monitoring pipeline based on two-stage segmentation followed by pixel-ratio-based severity quantification. The first stage included leaf segmentation using Modified U-Net with a pretrained ResNet-50 encoder and L2 regularization to generate leaf masks as the reference area for measurement. The second stage included necrotic area segmentation using Attention U-Net with a ResNet-50 encoder. The methodological contribution of this study was the adaptation of Dynamic Area-aware Tversky Loss in a deep learning-based segmentation pipeline to detect small necrotic lesions of *Xanthomonas* symptoms in *E. pellita* seedlings in an open nursery environment. In this study, DTL was used and calibrated to strengthen learning on images with a very small necrotic ratio so that the model became more sensitive to microlesions. DTL used $\alpha = 0.7$ to weight false negatives, $\beta = 0.3$ to weight false positives, $\lambda = 602$ as the linear amplification coefficient, $t = 0.00083$ as the small-lesion activation threshold, and $\varepsilon = 1 \times 10^{-7}$ as the numerical stabilizing constant. The ratio r was dynamically calculated for each image based on the ground truth mask. The third stage included the development of a derived tray-level severity indicator for operational monitoring needs. All images were acquired in the open nursery area of PT XYZ, Riau, using an Internet of Things-based acquisition system with a 1080p RGB camera mounted on a boom sprayer and directly connected to an Intel NUC mini PC as the edge computing unit.

The leaf segmentation results showed that Modified U-Net produced the best and most stable performance across all illumination conditions. The median Dice reached 0.872 under cloudy conditions, 0.841 under sunny conditions, and 0.854 under high-intensity sunlight conditions. The corresponding median IoU values were 0.773, 0.725, and 0.745. The Kruskal–Wallis test on per-image metrics

showed that performance differences among illumination conditions were not significant for Modified U-Net ($H = 4.012$; $p = 0.1345$; $\epsilon^2 = 0.008$), indicating that the model was sufficiently stable against natural illumination variation. Compared with SegNet and DeepLabv3+, Modified U-Net also showed a better balance between Precision and Recall, so the leaf mask could be used as the basis for area normalization in the severity estimation stage.

For necrosis segmentation, the best configuration was obtained by model A2, namely Attention U-Net with DTL. On the test data, this model achieved a median Dice of 0.812, IoU of 0.680, Precision of 0.788, and Recall of 0.838. This performance was better than the A1 baseline using standard Tversky loss, which achieved a median Dice of 0.714 and IoU of 0.548. The paired Wilcoxon signed-rank test with Holm correction showed that the improvement from A1 to A2 was statistically significant, with a median Dice increase of 0.098, $p < 0.0001$, and a large effect size of $r = 0.904$. These results indicate that, under the model configuration and dataset used in this study, DTL effectively reduced false negatives in microlesions without excessively increasing false positives. The improvement effect was also observed in the pair without attention, but the largest improvement occurred when DTL was combined with the attention gate.

The integration of leaf segmentation and necrosis segmentation produced a pixel-ratio-based severity indicator that was computationally consistent and auditable as an image-derived indicator. At the tray level, severity was calculated as the ratio of necrotic area to leaf area. For operational monitoring, a Python script automatically triggered the camera at a predefined acquisition interval, and the images were stored locally. After each pass, the mini PC performed inference and calculated *severity_tray* for each sampled tray as the ratio of necrotic pixels to leaf pixels. The values were then sent through an internet connection to the dashboard so that the acquisition–inference–reporting workflow proceeded without manual file transfer. With a measured boom speed of 0.1308 m s^{-1} , the appropriate acquisition trigger interval was 7.83 seconds, with an estimated operational time of approximately 55 minutes per line. These results show that the developed system provides an automated, consistent, and measurable edge-to-cloud operational monitoring framework in the HTI environment. Paired validation on the same trays, conducted across three sampling rows along one lane, comprising 238 valid pairs, showed strong agreement between system estimates and supervisor assessments, both in percentage scores and operational categories, with AI–manual intraclass correlation coefficient = 0.79, Spearman $\rho = 0.84$, mean absolute error = 0.25 percentage points, exact category agreement = 71.8%, and agreement within one-level tolerance = 100%.

Keywords: disease severity, micro-lesion, semantic segmentation, *Xanthomonas*

© 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 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 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.

SEGMENTASI KUANTITATIF GEJALA PENYAKIT *XANTHOMONAS* PADA BIBIT *EUCALYPTUS PELLITA* BERBASIS *DEEP LEARNING* DENGAN *DYNAMIC LOSS*

TEGAR ALAMI NASUTION

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

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Neo Endra Lelana, S.Si., M.Si.
- 2 Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Neo Endra Lelana, S.Si., M.Si.
- 2 Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si.



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.

Judul Disertasi : Segmentasi Kuantitatif Gejala Penyakit *Xanthomonas* pada Bibit *Eucalyptus pellita* Berbasis *Deep Learning* dengan *Dynamic Loss*

Nama : Tegar Alami Nasution
NIM : G6601202011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Yeni Herdiyeni, S.Si., M.Kom.

Pembimbing 2:

Prof. Dr.Eng. Wisnu Ananta Kusuma, S.T., M.T.

Pembimbing 3:

Dr. Ir. H. Budi Tjahjono, M.Agr.

Pembimbing 4:

Prof. Dr. Ir. Iskandar Zulkarnaen Siregar, M.For.Sc.,
IPU, ASEAN Eng.

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:
18 Mei 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis haturkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, yang dengan limpahan rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya telah menjadi cahaya penuntun di sepanjang perjalanan penyusunan karya ilmiah ini, hingga akhirnya dapat diselesaikan dengan baik. Penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juli 2023 sampai Mei 2026 ini mengangkat tema segmentasi kuantitatif gejala penyakit *Xanthomonas* pada bibit *Eucalyptus pellita*, dengan judul “Segmentasi Kuantitatif Gejala Penyakit *Xanthomonas* pada Bibit *Eucalyptus pellita* Berbasis *Deep Learning* dengan *Dynamic Loss*”. Penelitian dilaksanakan di area pembibitan terbuka PT XYZ, Provinsi Riau.

Terima kasih penulis sampaikan kepada para pembimbing, Ibu Prof. Yeni Herdiyeni, S.Si., M.Kom., Bapak Prof. Dr.Eng. Wisnu Ananta Kusuma, S.T., M.T., Bapak Dr. Ir. H. Budi Tjahjono, M.Agr., dan Bapak Prof. Dr. Ir. Iskandar Zulkarnaen Siregar, M.For.Sc., IPU, ASEAN Eng., yang telah memberikan bimbingan, arahan, keteladanan akademik, serta berbagai saran berharga selama proses penelitian dan penyusunan disertasi ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada penguji luar komisi pembimbing pada ujian tertutup, Bapak Dr. Neo Endra Lelana, S.Si., M.Si. dan Bapak Dr. Toto Haryanto, S.Kom., M.Si., atas telaah, masukan, dan saran yang sangat berarti bagi penyempurnaan penelitian ini.

Terima kasih penulis sampaikan kepada PT XYZ yang telah memberikan dukungan dana penelitian, fasilitas, dan kesempatan pelaksanaan penelitian di area pembibitan. Secara khusus, penulis menyampaikan terima kasih kepada R&D PT XYZ, khususnya unit Data Science & Management, Plant Protection, Nursery MPP, dan Admin, atas dukungan data, fasilitas lapangan, validasi gejala, serta bantuan teknis selama penelitian berlangsung.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Budi Tjahjono Award yang telah memberikan dukungan dana awal perkuliahan sehingga penulis dapat memulai studi doctoral dengan lebih baik.

Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada pimpinan Sekolah Pascasarjana, Ketua Program Studi Doktor Ilmu Komputer, staf pengajar, serta tenaga kependidikan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika Institut Pertanian Bogor atas layanan akademik, administrasi, dan dukungan kelembagaan selama penulis menempuh studi.

Terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada Ayahanda Yoserizal Nasution dan Ibunda Syofia Lubis, kakak Yuli Dharmayanti dan Maysa Dewi, abang Brian Yames, serta istri dan anak tercinta, atas do'a, kesabaran, dukungan, dan pengertian yang senantiasa menguatkan penulis selama menyelesaikan studi.

Penulis juga berterima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Ilmu Komputer IPB, khususnya angkatan 2020, serta para sahabat yang telah memberikan dukungan dan ruang diskusi selama studi dan penyusunan disertasi. Terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang membantu pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Bogor, Juni 2026

Tegar Alami Nasution

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan Penelitian	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Genus <i>Xanthomonas</i> sebagai Patogen Tumbuhan	8
2.2 Penyakit Hawar Daun <i>Xanthomonas</i> pada <i>Eucalyptus</i>	9
2.3 Tingkat Keparahan Serangan <i>Xanthomonas</i>	10
2.4 Teknik Segmentasi Citra Digital dalam Deteksi Penyakit Tanaman	10
2.5 U-Net untuk Segmentasi Semantik Gejala Penyakit Tanaman	11
2.6 Attention U-Net sebagai Varian U-Net untuk Area Kecil	12
2.7 Metode Evaluasi Segmentasi dan Kuantifikasi Gejala	12
2.8 Metrik <i>Overlap</i> (<i>Dice</i> dan <i>IoU</i>)	13
2.9 <i>Precision</i> , <i>Recall</i> , dan Analisis Kesalahan FP/FN	14
2.10 Uji Signifikansi dan Ukuran Efek	15
III METODE	16
3.1 Kerangka Penelitian	16
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	16
3.3 Tahapan Penelitian	16
3.4 Pembangunan Infrastruktur IoT	18
3.5 Blok 1 Segmentasi Daun	18
3.6 Blok 2 Segmentasi Nekrosis	26
3.7 Blok 3 Estimasi Tingkat Keparahan Gejala	38
3.8 Lingkungan Pengembangan	40
IV PENGEMBANGAN MODEL SEGMENTASI DAUN DENGAN MODIFIED U-NET	42
4.1 Pendahuluan	42
4.2 Hasil Kuantitatif Kinerja Model pada Variasi Pencahayaan	42
4.3 Uji Beda Statistik Antarkondisi Pencahayaan	45
4.4 Analisis Kesalahan dan Evaluasi Kualitatif	46
4.5 Simpulan	49
V SEGMENTASI AREA NEKROSIS PADA DAUN DENGAN MODIFIED ATTENTION U-NET	51
5.1 Pendahuluan	51
5.2 Hasil Kuantitatif dan Analisis Kompromi <i>Precision-Recall</i>	51
5.3 Hasil Uji Statistik dan Ukuran Efek Perbandingan Konfigurasi	53
5.4 Analisis Kesalahan dan Evaluasi Kualitatif pada Lesi Mikro	54
5.5 Simpulan	55

VI	TAHAPAN ESTIMASI TINGKAT KEPARAHAN GEJALA <i>Xanthomonas</i>	
	PADA BIBIT <i>Eucalyptus pellita</i>	56
6.1	Pendahuluan	56
6.2	Metode Estimasi Tingkat Keparahan	56
6.3	Implementasi Komputasi dan Keluaran Sistem	61
6.4	Simpulan	65
VII	PEMBAHASAN UMUM	66
7.1	Sisi Model dan Integrasi Sistem	66
7.2	Potensi Pengembangan Model ke Depan	67
7.3	Keterbatasan Model dan Tantangan Teknis	68
VIII	SIMPULAN DAN SARAN	70
8.1	Simpulan	70
8.2	Saran	70
	DAFTAR PUSTAKA	72
	RIWAYAT HIDUP	78



DAFTAR TABEL

1	Penelitian terdahulu	3
2	Spesies <i>Xanthomonas</i> dan inangnya	9
3	Konfigurasi arsitektur segmentasi daun	23
4	Distribusi data nekrosis	27
5	Sensitivitas α dan β	30
6	Konfigurasi <i>Dynamic Area-aware Tversky Loss</i> pada penelitian ini	32
7	Peta literatur <i>Dynamic Area-aware Tversky Loss</i>	33
8	Perbandingan fungsi <i>loss</i>	35
9	Konfigurasi model segmentasi nekrosis	37
10	Kinerja segmentasi daun	42
11	Uji Kruskal–Wallis <i>Dice</i>	45
12	Kinerja segmentasi nekrosis	52
13	Uji Wilcoxon <i>Dice</i>	53
14	Konfigurasi <i>sampling tray</i>	58
15	Kategori <i>severity_tray</i>	60
16	Cakupan validasi AI–manual	62
17	Evaluasi numerik AI–manual	62
18	Matriks kategori AI–manual	63
19	Struktur keluaran sistem	64

DAFTAR GAMBAR

1	Morfologi <i>Xanthomonas</i> : (a) skema struktur sel dan (b) koloni pada kultur	8
2	Gejala <i>Xanthomonas</i> pada daun <i>E. pellita</i>	10
3	Skala keparahan <i>Xanthomonas</i> untuk pengawas <i>nursery</i>	10
4	Arsitektur U-Net	11
5	Kerangka penelitian	16
6	Diagram alir penelitian	17
7	Anotasi masker daun	19
8	Contoh <i>dataset</i> pelatihan	20
9	Arsitektur <i>Modified U-Net</i>	23
10	Anotasi masker nekrosis	26
11	Arsitektur XANDTL-Net dan panel perhitungan DTL	31
12	Perbandingan median <i>Dice</i> model segmentasi daun	44
13	Perbandingan segmentasi daun pada kondisi mendung	47
14	Perbandingan segmentasi daun pada kondisi cerah	47
15	Perbandingan segmentasi daun pada kondisi terik	48
16	Perbandingan <i>Dice</i> , <i>IoU</i> , <i>Precision</i> , dan <i>Recall</i>	52
17	Segmentasi nekrosis model A1 pada lesi mikro	54
18	Segmentasi nekrosis model A2 pada lesi mikro	55
19	Skema <i>grid tray nursery</i>	57
20	Visualisasi keluaran sistem	65