

MODEL DETEKSI INTRUSI *IOT-DRONE TRAJECTORY* BERBASIS *DEEP LEARNING* UNTUK PERTANIAN PRESISI DI PERKEBUNAN TEH

EDDY PRASETYO NUGROHO



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@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 “Model Deteksi Intrusi *IoT-Drone Trajectory* Berbasis *Deep Learning* untuk Pertanian Presisi di Perkebunan Teh” 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, Juli 2025

Eddy Prasetyo Nugroho
G661190141

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.

RINGKASAN

EDDY PRASETYO NUGROHO. Model Deteksi Intrusi *IoT-Drone Trajectory* Berbasis *Deep Learning* untuk Pertanian Presisi di Perkebunan Teh. Dibimbing oleh TAUFIK DJATNA, IMAS SUKAESIH SITANGGANG dan IRMAN HERMADI.

Internet of things (IoT) berintegrasi dengan *unmanned aerial vehicle* (UAV) atau drone dengan tugas dalam pemantauan jarak jauh atau *remote sensing* untuk *precision agriculture* (PA) pada area rural seperti perkebunan teh sangat penting untuk mendapatkan hasil yang optimal. Namun, karakteristik area rural menghadirkan tantangan luar biasa untuk transmisi data, khususnya dalam menjaga komunikasi yang efektif antara drone dan *ground control station* (GCS). Teknologi *long range* (LoRa), yang terkenal karena kemampuan komunikasi IoT, digunakan untuk membatasi paket data drone ke GCS, mengintegrasikan hasil komputasi citra drone dan informasi dari *drone on-board sensor*. Oleh karena itu penelitian ini bertujuan untuk melakukan *edge computing* drone dalam menentukan kelayakan panen area kebun teh. Inovasi yang diusulkan adalah pemanfaatan *machine learning* dalam proses *computer vision* dari citra drone dengan klasifikasi berdasarkan tingkat *green leaf index* (GLI) menggunakan algoritma *artificial neural network* (ANN) untuk proses *edge computing* sehingga drone menjadi cerdas. Tujuan penelitian ini membentuk *metadata payload* drone berbasis LoRa dengan mengintegrasikan hasil *edge computing* drone tersebut dengan data *on-board sensor* dari drone. Proses integrasi *metadata payload* drone ini menjadi bagian dari proses akuisisi data pada *IoT-drone trajectory planning* untuk pemantauan terhadap kelayakan pemetikan pada area rural perkebunan teh. Model *IoT-drone trajectory planning* ini menjadi peran penting dalam implementasi PA dalam mengatasi keterbatasan sumber daya drone seperti *bandwidth*, energi baterai dan karakteristik area rural kebun teh yang luas. Model tersebut bertujuan untuk mendapatkan optimalisasi konsumsi energi baterai drone, *throughput* dari transmisi data dan pemantauan lokasi drone dalam melakukan tugas sehingga mendapatkan jalur terpendek dan efisien bagi drone dengan pendekatan *traveling salesman problem* (TSP) menggunakan algoritma *simulated annealing* (SA). Di sisi lain, keterbatasan drone dalam komunikasi dengan GCS dalam jaringan LoRa di area perkebunan teh yang luas menjadi potensi kerentanan mendapatkan gangguan *cyber security*. Untuk itu solusi yang diusulkan dalam penelitian ini adalah model deteksi intrusi (IDS) terhadap informasi *IoT-drone trajectory* untuk memonitor komunikasi jaringan LoRa antara drone dan GCS. Pendekatan *deep learning-convolutional neural network* (CNN) digunakan untuk mendeteksi anomali trafik jaringan berdasarkan informasi sinyal radio SDR (*software-defined radio*). IDS ini mampu mengklasifikasikan berbagai jenis serangan seperti *Denial of service* (DoS), *Jamming*, *Replay attack*, dan trafik Normal. Hasil penelitian ini diantaranya kinerja model *Sequential ANN* mampu membuat Drone dapat memprediksi dari citra drone, klasifikasi kelayakan pemetikan pada area kebun teh berakurasi 75%. Paket *metadata payload* drone yang sesuai kebutuhan PA perkebunan teh terbentuk dengan berhasil mengintegrasikan hasil klasifikasi *edge computing* drone dan data *on-board sensor* berbasis LoRa dengan ukuran 160 *byte*. Paket *metadata payload* drone ini melalui jaringan LoRa berhasil dikirim oleh Drone ke GCS rata-rata 46

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.

paket setiap penerbangan secara *real time* untuk mendukung pembentukan *IoT-drone trajectory*. Sesuai kebutuhan PA pada perkebunan teh, *IoT-drone trajectory planning* memberikan kontribusi optimal terhadap hubungan antara *throughput*, daya drone, dan konsumsi energi *payload* terhadap persentase keberhasilan prediksi kelayakan pemetikan oleh drone pada rata-rata *altitude* 16,41 meter selama durasi 8,35 menit waktu penerbangan drone. Transmisi data drone yang optimal menghasilkan *throughput* rata-rata 17,31 byte/s dengan daya optimal 522,82 watt dan konsumsi energi dari *drone payload* 57,72 watt-hour (Wh). Khusus pada parameter *location trajectory* menghasilkan graf baru dengan nilai rute terpendek yang optimal hasil dari pendekatan TSP dengan algoritma *Simulated Annealing*. Manfaat dari *IoT-drone trajectory planning* ini, pertimbangan penggunaan drone terhadap keterbatasan sumber daya terkait energi baterai, *bandwidth* dan efisiensi terhadap prioritas lokasi kelayakan pemetikan area kebun teh lebih teridentifikasi dengan rute terpendek oleh para pemetik. Terkait dengan kinerja model IDS *IoT-drone trajectory* berbasis CNN berhasil mengklasifikasi kategori intrusi terhadap trafik sinyal radio jaringan LoRa dengan status *Normal*, *Jamming*, *DoS*, *Replay attack* menghasilkan akurasi 98,7%. Penelitian terkait IDS *IoT-drone trajectory* bertujuan untuk meningkatkan keamanan sistem IoT-drone dalam jaringan komunikasi di area rural pertanian khususnya perkebunan teh. Kebaruan dari penelitian ini mencakup pengembangan sistem terintegrasi yang memanfaatkan algoritma ANN pada *edge device drone* untuk klasifikasi citra secara lokal dan pembentukan paket metadata *payload* berbasis LoRa sehingga mendapatkan efisiensi komunikasi, pembangunan model *IoT-drone trajectory planning* yang optimal berdasarkan hasil klasifikasi tersebut dan keterbatasan sumber daya drone, dan pengembangan model IDS *IoT-drone trajectory* berbasis CNN yang inovatif untuk mendeteksi anomali pada sinyal radio SDR dalam jaringan LoRa sehingga terpantau status trafik transmisi data di lingkungan pertanian presisi pada perkebunan teh.

Kata kunci: *deep learning, edge computing, IoT-drone trajectory, intrusion detection system, long range*

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.

SUMMARY

EDDY PRASETYO NUGROHO. Intrusion Detection Model of IoT-Drone Trajectory Deep Learning-based for Precision Agriculture in Tea Plantation. Supervised by TAUFIK DJATNA, IMAS SUKAESIH SITANGGANG and IRMAN HERMADI.

Internet of things (IoT) integrated with unmanned aerial vehicle (UAV) or drone with remote sensing tasks for precision agriculture (PA) in rural areas such as tea plantations is very important to obtain optimal results. However, the characteristics of rural areas present extraordinary challenges for data transmission, especially in maintaining effective communication between drone and ground control station (GCS). long range (LoRa) technology, which is known for its IoT communication capabilities, is used to limit drone data packets to GCS, integrating the results of drone image computation and information from drone onboard sensors. Therefore, this study aims to conduct drone edge computing in determining the feasibility of harvesting tea plantation areas. The proposed innovation is the use of machine learning in the computer vision process of drone images with classification based on the green leaf index (GLI) level using the artificial neural network (ANN) algorithm so that the drone becomes intelligent. The purpose of this study is also to form LoRa-based drone *payload* metadata by integrating the results of drone edge computing with on-board sensor data from the drone. The process of integrating drone *payload* metadata is part of the data acquisition process in IoT-drone trajectory planning to monitor the feasibility of picking in rural tea plantation areas. This IoT-drone trajectory planning model plays an important role in the implementation of PA in overcoming the limitations of drone resources such as bandwidth, battery energy and the characteristics of large rural tea plantation areas. The model aims to optimize drone battery energy consumption, data transmission throughput and drone location monitoring in carrying out tasks so as to obtain the shortest and most efficient path for drones with the traveling salesman problem (TSP) approach using the simulated annealing algorithm. On the other hand, the limitations of drones in communicating with GCS in the LoRa network in the large tea plantation area are a potential vulnerability to cybersecurity disruption. For this reason, the solution proposed in this study is an intrusion detection model (IDS) for IoT-drone trajectory information to monitor LoRa network communication between drones and GCS. The deep learning-convolutional neural network (CNN) approach is used to detect network traffic anomalies based on SDR (software-defined radio) radio signal information. This IDS is able to classify various types of attacks such as Denial of service (DoS), Jamming, Replay attack, and Normal traffic. The results of this study include the performance of the sequential ANN model which is able to make drones predict from drone images, classification of picking feasibility in tea plantation areas with 75% accuracy. The drone payload metadata package that meets the needs of the tea plantation PA is formed by successfully integrating the results of drone edge computing classification and LoRa-based on-board sensor data with a size of 160 bytes. This drone *payload* metadata package via the LoRa network was successfully sent by the Drone to the GCS with an average of 46 packages per flight in real time to support the formation of the IoT-drone trajectory. According to the needs of PA on tea plantations, IoT-

drone trajectory planning provides an optimal contribution to the relationship between throughput, drone power, and payload energy consumption to the percentage of success in predicting picking feasibility by drones at an average altitude of 16.41 meters during a duration of 8.35 minutes of drone flight time. Optimal drone data transmission produces an average *throughput* of 17.31 bytes/s with an optimal power of 522.82 W and energy consumption from the drone *payload* of 57.72 Wh. Specifically, the location trajectory parameter produces a new graph with the optimal shortest route value resulting from the TSP approach with the simulated annealing algorithm. The benefits of this IoT-drone trajectory planning, consideration of drone use against resource limitations related to battery energy, bandwidth and efficiency towards the priority of the location of the feasibility of picking tea plantation areas are more identified with the shortest route by the pickers. Related to the performance of the CNN-based IoT-drone trajectory IDS model, it successfully classifies the intrusion category against LoRa network radio signal traffic with Normal, Jamming, DoS, Replay attack statuses resulting in 98.7% accuracy. The novelty of this research includes the development of an integrated system that utilizes the ANN algorithm on the drone edge device for local image classification and the formation of LoRa-based payload metadata packages to achieve communication efficiency, the development of an optimal IoT-drone trajectory planning model based on the classification results and the limitations of drone resources, and the development of an innovative CNN-based IoT-drone trajectory IDS model to detect anomalies in SDR radio signals in the LoRa network so that the status of data transmission traffic in the precision agriculture environment on tea plantations can be monitored.

Keywords: deep learning, edge computing, IoT-drone trajectory. intrusion detection system, long range

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

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 2025
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.

MODEL DETEKSI INTRUSI *IOT-DRONE TRAJECTORY* BERBASIS *DEEP LEARNING* UNTUK PERTANIAN PRESISI DI PERKEBUNAN TEH

EDDY PRASETYO NUGROHO

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
2025**



@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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Medria Kusuma Dewi Hardhienata, S.Komp., Ph.D.
- 2 Dr. Slamet Widodo, S.T.P., M.Sc.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Medria Kusuma Dewi Hardhienata, S.Komp., Ph.D.
- 2 Prof. Dr. Munir, M.IT.

Judul Disertasi: Model Deteksi Intrusi *IoT-Drone Trajectory* Berbasis *Deep Learning* untuk Pertanian Presisi di Perkebunan Teh

Nama : Eddy Prasetyo Nugroho
NIM : G661190141

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Eng. Ir. Taufik Djatna, M.Si.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom.



Pembimbing 3:
Irman Hermadi, S.Kom., M.S., Ph.D.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom.
NIP 19750130 199802 2 001



Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:
Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP 19660702 199302 1 001



Tanggal Ujian:
21 Maret 2025

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Alhamdulillah Rabbl 'Alaamiin. Segala puji bagi Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Penelitian disertasi ini berjudul “Model Deteksi Intrusi *IoT-Drone Trajectory* Berbasis *Deep Learning* untuk *Precision Agriculture* Perkebunan Teh” telah dilaksanakan sejak bulan Mei 2020 hingga bulan November 2024.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan, dan penghargaan yang tinggi diberikan kepada:

1. Para dosen pembimbing yang terdiri atas Prof. Dr. Eng. Ir. Taufik Djatna, M.Si., Prof. Dr. Imas S.Sitanggang, S.Si., M.Kom., dan Irman Hermadi, S.Kom., M.S., Ph.D. yang telah memberikan waktu, pengalaman, bimbingan dan arahan kepada Penulis selama penelitian disertasi ini. Semoga Allah SWT membalas kebaikan Bapak/Ibu semua, Aamiin.
2. Ketua dan Sekretaris Program Studi S3 Ilmu Komputer, dan Pimpinan Sekolah Sains Data, Matematika dan Informatika, IPB University beserta segenap dosen dan karyawan Departemen Ilmu Komputer, FMIPA, IPB University.
3. Para narasumber dan pakar mitra dari PPTK Gambung dan PTPN 1 Regional 2 Rancabali, Ciwedey Kab. Bandung yang telah banyak memberikan masukan dan tanggapan selama diskusi maupun selama penelitian.
4. Bapak, Alm H. S. Mardjono dan Ibunda tercinta Hj. Sri Sulastri yang telah mendidik penulis sejak kecil hingga saat ini serta Bapak mertua H. Drs. Lili Sukmana, M.M. dan Ibu Titin Rochaeti dengan dukungan morilnya. Istri tercinta Rini Nuraini sukmana, dan jundi-jundi penyemangat Bapak, Abdullah Tsaqif Cakrawibowo, Ahmad Syarif Akbar Widyadana, dan Muhammad Syauqi Andhika Suwardana, keluarga besar Semarang dan Bandung yang telah kebersamai dengan sabar selama Penulis menyelesaikan studi S3 di IPB. Semoga kasih sayang dan kesabaran selama ini mendapat keberkahan dari Allah SWT.
5. Rekan-rekan seperjuangan mahasiswa Ilmu Komputer IPB University, mas Irawan Afrianto, Ruhul Amin dan mahasiswa satu bimbingan di bawah komisi pembimbing yang tidak dapat Penulis sebutkan satu persatu. Semoga segala bantuan dan dukungan dari rekan-rekan sekalian diberi balasan yang setimpal oleh Allah SWT, dan diberi kemudahan untuk menyelesaikan studi ini.
6. Tim riset yaitu Agus Mulyana, Sopian Alviana, Muhammad Nur Yasin, Muhammad Ramadhan, Muhammad Izzatul Haq, dan Satria Ramadhani yang dari IPB University ataupun UPI.
7. Segenap Pimpinan dan rekan-rekan dosen institusi tempat Penulis berkarya, Ilmu Komputer, FPMIPA, UPI. Semoga dukungan dan doa yang selalu diberikan ke Penulis memberikan keberkahan kepada kita semua.
8. Segenap rekan dan handai taulan yang tidak bisa disebut satu per satu

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan. *Aamiin YRA*

Bogor, Juli 2025

Eddy Prasetyo Nugroho

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	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR ISTILAH	xvii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan	6
1.4 Manfaat	6
1.5 Hipotesis	7
1.6 Kebaruan	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Konsep <i>Internet of Things</i> (IoT) dan <i>Unmanned Aerial Vehicles</i> (UAV) atau Drone	8
2.2 <i>Precision Agriculture</i> (PA)	10
2.3 <i>UAV/ Drone Computing</i>	13
2.4 Pengolahan Citra dan <i>Computer Vision</i>	13
2.5 <i>Machine Learning</i> dan <i>Deep Learning</i>	17
2.6 <i>Drone Trajectory Planning</i>	24
2.7 Teknologi <i>Long Range</i> (LoRa)	29
2.8 <i>Software-Defined Radio</i> (SDR) dan <i>Digital Signal Processing</i> (DSP)	31
2.9 <i>Intrusion Detection System</i> (IDS)	32
2.10 IDS pada perangkat IoT dan Drone	35
2.11 Pendekatan <i>Machine Learning</i> pada IDS-IoT	38
2.12 <i>State of the art</i> Penelitian	40
III METODE	42
3.1 Tahapan Penelitian	42
3.2 Proses Pembentukan Metadata <i>Drone Payload</i>	43
3.3 Proses Pembentukan <i>IoT-drone Trajectory Planning</i>	43
3.4 Proses Sistem Deteksi Intrusi <i>IoT-drone Trajectory</i> berdasarkan Anomali berbasis <i>Deep Learning</i>	44
3.5 Waktu dan Tempat Penelitian	44
3.6 Alat dan Bahan	44
IV PEMBENTUKAN METADATA <i>IOT-DRONE PAYLOAD</i> DENGAN <i>EDGE COMPUTING</i> CITRA KEBUN TEH BERBASIS LORA PADA AREA RURAL	49
4.1 Arsitektur Sistem	49
4.2 Arsitektur Sistem Jaringan IoT-drone dan GCS berbasis LoRa	51
4.3 Arsitektur komunikasi <i>OpenMV Camera-Drone</i> dan GCS via LoRa	52
4.4 Pembentukan <i>Metadata Payload</i> IoT-drone	55
4.5 Proses <i>Edge Computing</i> Data Citra Drone Berbasis <i>Machine Learning</i>	58

4.6	Komparasi dengan Penelitian lain	62
V	MODEL <i>IOT-DRONE TRAJECTORY PLANNING</i> BERBASIS LORA PADA AREA RURAL PERKEBUNAN TEH	64
5.1	Arsitektur <i>IoT-drone trajectory</i>	64
5.2	Data telemetri sebagai dataset <i>IoT-drone trajectory</i>	65
5.3	Metode <i>IoT-drone Trajectory Planning</i>	66
5.4	Eksperimen dan Pengujian	71
5.5	Analisa Hasil Pengujian	80
5.6	Komparasi dan Celah Penelitian	84
VI	MODEL IDS <i>IOT-DRONE TRAJECTORY</i> BERBASIS <i>DEEP LEARNING</i>	85
6.1	Arsitektur Sistem IDS IoT-drone Berbasis CNN pada Jaringan LoRa	86
6.2	Pembentukan Dataset Sinyal Digital dengan SDR berbasis LoRa	92
6.3	Pemodelan <i>Deep Learning</i> -CNN-PSD untuk Sinyal Digital	102
6.4	Implementasi Model dan Analisa Pengujian	108
6.5	Celah Penelitian	111
VII	SIMPULAN DAN SARAN	114
7.1	Simpulan	114
7.2	Saran	115
	DAFTAR PUSTAKA	117
	LAMPIRAN	125
	RIWAYAT HIDUP	178

DAFTAR TABEL

2.1	Nilai SF LoRa	31
2.2	Peta penelitian	40
3.1	Spesifikasi <i>agriculture drone</i>	45
3.2	Spesifikasi detail <i>agriculture drone</i>	46
3.3	Spesifikasi <i>data link communication</i>	46
3.4	Spesifikasi <i>ground control station (GCS)</i>	47
3.5	Spesifikasi detail <i>drone payload 2.0</i> berbasis LoRa	47
3.6	Spesifikasi komponen perangkat <i>attacker</i>	48
4.1	Ringkasan data telemetri hasil transformasi data drone-GCS	58
4.2	Hasil <i>training, testing</i> dan evaluasi model ANN	60
4.3	Celah penelitian terhadap pembentukan <i>metadata payload drone</i>	63
5.1	Simulasi algoritma SA pada TSP penerbangan drone	73
5.2	Hasil statistik performa algoritma SA pada TSP penerbangan drone	74
5.3	Hasil statistik performa algoritma SA pada TSP keseluruhan skenario	77
5.4	Hasil analisa <i>IoT-drone trajectory</i> berbasis LoRa	81
5.5	Celah penelitian <i>IoT-drone trajectory planning</i>	84
6.1	Perbandingan aspek serangan terhadap jenis intrusi	89
6.2	Hasil <i>training</i> dan <i>testing</i> model IDS CNN usulan	104
6.3	<i>Classification report</i> model IDS usulan	106
6.4	Komparasi model ML/DL pada IDS UAV/drone	107
6.5	Hasil pengujian model IDS	110
6.6	Celah penelitian model IDS IoT-drone usulan	113

DAFTAR GAMBAR

2.1	Komponen <i>hardware drone</i>	9
2.2	Sistem komponen UAV	9
2.3	<i>UAV computing</i>	13
2.4	Elemen sistem pengolahan citra	14
2.5	Proses <i>computer vision system</i>	15
2.6	Pendekatan <i>machine learning</i> yang umum.	18
2.7	<i>Deep learning</i> bagian dari <i>machine learning</i>	18
2.8	Arsitektur <i>deep learning</i>	19
2.9	Bagian-bagian <i>neuron</i> sederhana manusia	20
2.10	Arsitektur dasar <i>artificial neuron</i>	21
2.11	Aplikasi dari arsitektur dasar ANN pada <i>UAV path planning</i>	22
2.12	Klasifikasi ANN	22
2.13	Arsitektur CNN	23
2.14	Diagram alir modul <i>trajectory planning</i>	26
2.15	Komponen UAV/ Drone	27
2.16	Komponen fungsional sistem UAV	27
2.17	<i>LoRaWAN OSI reference</i>	29
2.18	Komponen <i>intrusion detection system (IDS)</i>	33

2.19	Kategori IDS	34
2.20	<i>Drone security attack</i>	38
2.21	Implementasi algoritma-algoritma <i>machine learning</i> pada IDS-IoT	39
3.1	Diagram alir keseluruhan sistem	42
3.2	Arsitektur fungsional dari sistem terintegrasi IDS <i>IoT-drone trajectory</i> pada komunikasi drone-GCS via LoRa	42
3.3	Proses integrasi <i>payload</i> dengan <i>edge computing</i> data citra drone	43
3.4	Model klasifikasi layak petik dengan GLI dan ANN	43
3.5	Proses pembentukan <i>trajectory planning</i>	43
3.6	Fase-fase pada model deteksi intrusi <i>IoT-drone</i> berbasis <i>deep learning</i>	44
3.7	Perangkat <i>agriculture drone</i> dan modul <i>Drone payload</i> yang dirakit	45
3.8	Perangkat drone <i>OpenMV camera</i> dan modul GCS	46
3.9	Perangkat modul <i>LoRa-drone payload</i> dengan OpenMV camera	47
3.10	Perangkat modul <i>attacker</i> yang dibangun	48
4.1	Diagram arsitektur sistem IDS <i>IoT-drone trajectory</i>	49
4.2	Arsitektur logika jaringan komunikasi <i>IoT-drone</i> dan GCS berbasis LoRa	50
4.3	Arsitektur fisik modul <i>payload</i> LoRa-drone	51
4.4	Arsitektur jaringan drone-GCS berbasis LoRa	51
4.5	<i>Data frame</i> LoRa (Swain <i>et al.</i> 2021)	52
4.6	Arsitektur komunikasi <i>Agriculture drone</i> - GCS dengan LoRa	53
4.7	Komponen fisik OpenMV-MCU ESP32-GCS dengan LoRa	54
4.8	Transformasi data drone - GCS via LoRa	55
4.9	Proses integrasi data <i>drone payload</i> berbasis LoRa (Nugroho <i>et al.</i> 2023)	56
4.10	Pembentukan paket <i>data frame drone payload</i>	56
4.11	<i>Pseudocode</i> proses pembentukan paket data <i>drone payload</i>	57
4.12	Format metadata dari paket data <i>drone payload</i>	57
4.13	<i>Vegetation index</i> GLI dengan <i>colored map</i>	58
4.14	Visualisasi dataset dengan perhitungan GLI pada setiap citra drone	59
4.15	Definisi data <i>training</i> dan <i>testing</i> bagian model	59
4.16	Pembangunan model dan training model dalam kode Python	60
4.17	<i>Confusion matrix</i> dari prediksi model yang didapatkan	61
4.18	Proses konversi model klasifikasi ANN ke OpenMV-drone	62
5.1	Arsitektur fungsional dari jaringan komunikasi drone-GCS via LoRa	65
5.2	Sampel data telemetri sebagai dataset <i>IoT-drone trajectory</i>	65
5.3	Tampilan GCS saat menampilkan informasi <i>IoT-drone trajectory</i>	66
5.4	Algoritma perhitungan jarak dengan metode <i>haversine</i>	68
5.5	Algoritma <i>simulated annealing</i> dalam pendekatan TSP dalam pencarian jalur terpendek	70
5.6	<i>IoT-drone trajectory</i> : a) <i>Tracking location drone</i> . b) <i>Energy</i> : voltase dan waktu	72
5.7	Visualisasi <i>location trajectory</i> sebelum dilakukan simulasi algoritma <i>simulated annealing</i> -TSP	75
5.8	Visualisasi <i>IoT-drone trajectory</i> pada GCS sebelum simulasi algoritma <i>simulated annealing</i> -TSP	75
5.9	Visualisasi <i>location trajectory</i> setelah simulasi algoritma <i>simulated annealing</i> -TSP	76
5.10	Visualisasi <i>location trajectory</i> setelah simulasi algoritma <i>Simulated Annealing</i> -TSP	76

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.

5.11	<i>IoT-drone trajectory</i> terkait konsumsi energi baterai terhadap ketinggian penerbangan drone dan waktu	78
5.12	Serial monitor data telemetri GCS terkait konsumsi daya baterai	79
5.13	Data telemetri GCS dalam bentuk file excel pada penerbangan drone ke-2 19 Nopember 2023	80
5.14	Salah satu hasil dari algoritma <i>simulated annealing</i> -TSP untuk jarak terdekat dari pemetik berdasarkan tanda lokasi dari <i>location trajectory</i>	82
5.15	Hasil <i>throughput</i> dari transmisi data dan konsumsi energi baterai dari <i>IoT-drone trajectory</i>	82
6.1	IDS <i>IoT-drone trajectory</i> berbasis <i>Deep Learning</i> usulan	86
6.2	Arsitektur sistem IDS <i>IoT-drone trajectory</i> berbasis CNN pada jaringan LoRa	87
6.3	Arsitektur fisik IDS <i>IoT-drone trajectory</i> pada jaringan LoRa	87
6.4	Sinyal komunikasi radio pada SDR	89
6.5	Arsitektur fisik <i>attacker</i> /penetrasi SDR-drone	90
6.6	Rangkaian sistem <i>attacker</i> SDR-drone	91
6.7	Algoritma <i>drone attacker</i>	92
6.8	Diagram alir model IDS <i>IoT-drone trajectory</i> berbasis SDR via LoRa	93
6.9	Penerimaan sinyal radio dengan perangkat RTL-SDR	94
6.10	Perhitungan PSD pada Python	94
6.11	<i>Data sampling</i> PSD dalam domain frekuensi	94
6.12	Format file <i>data sampling</i> PSD sesuai kategori klasifikasi dalam csv	95
6.13	Dataset hasil PSD yang ditransmisi setiap 15 detik durasi <i>sampling</i>	96
6.14	Visualisasi trafik dataset sinyal PSD dalam Matplotlib	96
6.15	Status Normal dari trafik sinyal data radio SDR dan Matplotlib	97
6.16	Status DoS dari trafik sinyal data radio SDR dan Matplotlib	97
6.17	Status <i>Jamming</i> dari trafik sinyal data radio SDR dan Matplotlib	98
6.18	Status <i>Replay attack</i> dari trafik sinyal data radio SDR dan Matplotlib	98
6.19	Pivot dataset sinyal radio hasil PSD	99
6.20	Pivot dataset sinyal radio-PSD dengan label klasifikasi	100
6.21	Hasil <i>reshaping</i> hasil fungsi PSD dari dataset	100
6.22	<i>Heatmap</i> sinyal data radio PSD dari dataset	101
6.23	<i>Heatmap</i> sinyal radio PSD dari dataset sesuai kelompok status trafik	101
6.24	Hasil normalisasi dan <i>one-hot encoding</i> sinyal radio-PSD dari dataset	102
6.25	Arsitektur model CNN sinyal radio-PSD usulan	103
6.26	Model CNN sinyal radio-PSD usulan dalam Python	104
6.27	Tren konsistensi nilai akurasi dan <i>loss</i> pada hasil <i>training</i> dan <i>validation</i> model CNN-PSD usulan	105
6.28	<i>Classification report</i> setiap kategori serangan pada model CNN sinyal digital radio PSD	106
6.29	<i>Confusion matrix</i> pada evaluasi model CNN-PSD usulan	107
6.30	Pola konsistensi pada hasil <i>training loss</i> dan <i>validation loss</i> algoritma berbasis <i>neural network</i>	108
6.31	Visualisasi sistem pemantauan IDS pada GCS	109
6.32	Visualisasi hasil klasifikasi <i>IDS IoT-drone trajectory</i> berbasis CNN	110
6.33	<i>Confusion matrix</i> implementasi IDS <i>IoT-drone trajectory</i> dengan model CNN-PSD usulan	112

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.

DAFTAR LAMPIRAN

1	<i>Timeline</i> pengujian	126
2	Format data pengiriman <i>payload</i> drone	127
3	Hasil pengujian data telemetri dan model deteksi siap petik daun teh	128
4	Tampilan GCS dan data telemetri yang diterima	129
5	Hasil program <i>traveling salesman problem</i> (TSP)	139
6	Analisa data <i>drone trajectory</i> terhadap konsumsi energi baterai	144
7	Analisa data <i>drone trajectory</i> terhadap <i>throughput</i> dan persentase prediksi kelayakan petik kebun teh 19 November 2023	151
8	Analisa data <i>drone trajectory</i> terhadap <i>throughput</i> dan persentase prediksi kelayakan petik kebun teh 9-10 Mei 2024	158
9	Hasil pengambilan dataset <i>intrusion detection system</i>	166
10	Data hasil pengujian 25-26 Mei 2024	168
11	Data hasil pengujian 7-8 Juni 2024	171
12	Data hasil pengujian 6 Juli 2024	173
13	Data hasil pengujian 10 Agustus 2024	174

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.

DAFTAR ISTILAH

I

Intrusi (Intrusion) : Sering disebut dengan juga Serangan merupakan tindakan tidak sah atau tidak diizinkan yang bertujuan untuk mengakses, mengganggu, mengontrol, merusak atau memanipulasi sistem, jaringan, data atau infrastruktur teknologi informasi. Intrusi ini dapat berupa *cyber attack*, penyerangan jaringan, peretasan, atau pelanggaran keamanan. Teknik serangan dapat berupa *Brute Force* (Serangan kekuatan brutal), *Spoofing* (Pemalsuan identitas), *Sniffing* (Pengintaian Data), *Hijacking* (Perebutan Kontrol). Jenis serangan diantaranya seperti DoS, *Man-in-the-Middle*, *Jamming*, *Replay Attack*.

M

Metadata : Informasi terstruktur yang mendeskripsikan, menjelaskan, menemukan, atau setidaknya menjadikan suatu informasi lain yang mudah untuk ditemukan kembali, digunakan, atau dikelola. Metadata sering disebut sebagai data tentang data atau informasi tentang informasi. Metadata juga merupakan kumpulan data yang menjelaskan, menggambarkan, dan memberikan konteks tentang data lain, seperti karakteristik, struktur, dan hubungan data tersebut. Fungsi metadata diantaranya untuk membantu pengelolaan data, memudahkan analisis dan visualisasi data. Adapun metadata drone dapat dikatakan kumpulan data yang menjelaskan, menggambarkan, dan memberikan konteks tentang data yang dikumpulkan dan dikirimkan oleh drone, termasuk informasi tentang pengoperasian, transmisi, keamanan, dan kondisi drone.

P

Payload : Payload adalah inti dari pesan atau informasi yang ingin dikirimkan dari paket data. Payload merupakan bagian dari paket data yang dapat berupa teks, gambar, audio, atau jenis data digital lainnya. Struktur paket data dapat terdiri dari *Header*, *Payload* dan *Trailer*. Struktur paket data ini dibentuk dengan dasar suatu batasan protokol. Bila disandarkan pada protokol *Long Range* (LoRa), maka struktur paket data yang dikirimkan berdasarkan data frame dari protokol LoRa yang dapat berukuran *255 byte*.

T

Trajectory : Padanan dengan *path* atau Lintasan adalah jalur dari objek dengan massa dalam gerakan mengikuti ruang sebagai fungsi waktu. Gerakan sebuah objek dapat dipengaruhi oleh gravitasi ditentukan sepenuhnya oleh percepatan gravitasi, kecepatan peluncurannya, dan sudut peluncuran asalkan gesekan udara dapat diabaikan. Biasanya terkait dengan objek lintasan *projectile* seperti roket, drone, pesawat terbang. Namun dapat digunakan dalam konteks yang berbeda dalam perjalanan

pengaruh dari perubahan dari gerakan objek seperti konsumsi energi atau daya, *throughput* dan lainnya

@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.