

PENGEMBANGAN SISTEM REKOMENDASI PEMUPUKAN BERBASIS *EDGE COMPUTING* UNTUK PETANI SAWIT RAKYAT

AKHMAD FATIKHUDIN



**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- 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.



PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pengembangan Sistem Rekomendasi Pemupukan Berbasis *Edge computing* untuk Petani Sawit Rakyat” 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 tesis ini.

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

Bogor, Juli 2026

Akhmad Fatikhudin
F3501241031



RINGKASAN

AKHMAD FATIKHUDIN. Pengembangan Sistem Rekomendasi Pemupukan Berbasis *Edge Computing* untuk Petani Sawit Rakyat. Dibimbing oleh TAUFIK DJATNA dan MEIKA SYAHBANA RUSLI.

Kelapa sawit merupakan komoditas perkebunan strategis bagi perekonomian Indonesia, dan petani sawit rakyat mengelola sekitar 40% dari total luas perkebunan nasional. Meskipun demikian, produktivitas petani rakyat masih kurang dari 50% dibandingkan perkebunan besar. Salah satu penyebab utamanya adalah praktik pemupukan yang masih bersifat intuitif tanpa mempertimbangkan kondisi hara tanah aktual. Penerapan pertanian cerdas untuk mengatasi persoalan ini umumnya bertumpu pada komputasi awan yang membutuhkan koneksi internet stabil, sedangkan sebagian besar lahan sawit rakyat berada di wilayah tanpa sinyal seluler memadai. Kondisi tersebut menuntut pendekatan komputasi tepi (*edge computing*) yang mampu beroperasi secara lokal tanpa bergantung pada ketersediaan internet.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem rekomendasi pemupukan berbasis *edge computing* untuk petani sawit rakyat. Secara khusus, penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe perangkat pemantauan lahan (*IoT node*) sebagai media pengumpulan data, mengembangkan alur komunikasi data agar perangkat tetap beroperasi pada area dengan konektivitas internet terbatas, serta mengembangkan model *Fuzzy Inference System* (FIS) untuk mengubah pembacaan sensor menjadi rekomendasi pemupukan.

Prototipe *IoT node* dikembangkan menggunakan pendekatan *Model-Based Systems Engineering* (MBSE) melalui lima lapis arsitektur, mulai dari fungsional hingga realisasi prototipe. Perangkat tersusun atas mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, modul GPS Neo-6M, sensor tanah tujuh-dalam-satu, dan modul LoRa SX1276, dengan Raspberry Pi sebagai *edge server* lokal. Sistem dirancang dengan arsitektur tiga lapis (*edge-fog-cloud*) yang menempatkan pengambilan keputusan pada lapisan *fog* lokal. Komunikasi LoRa diuji pada skema satu node dan dua node dengan mengukur kekuatan sinyal (RSSI), waktu tunda (*delay*), dan rasio keberhasilan pengiriman paket (PDR), sedangkan akurasi sensor dievaluasi menggunakan galat persentase absolut rata-rata (MAPE). Model FIS dikembangkan dengan metode Mamdani dua lapis: Lapis A menentukan jenis dan dosis pupuk berdasarkan kadar N, P, K, dan pH, sedangkan Lapis B menentukan waktu aplikasi berdasarkan kelembapan tanah. Model diverifikasi melalui pengujian kondisi batas dan validasi lintas platform antara Python dan Scilab.

Hasil pengujian menunjukkan sensor suhu, kelembapan, pH, dan GPS bekerja dengan galat dalam ambang batas yang dapat ditoleransi (MAPE suhu 1,9%, kelembapan udara 2,14%, kelembapan tanah 1,83%, pH 0,27%, dan simpangan GPS 0,98 m), sedangkan sensor NPK terbukti responsif terhadap perubahan kondisi tanah meskipun akurasi absolutnya belum diverifikasi terhadap metode analisis laboratorium. Komunikasi LoRa terbukti andal dengan PDR di atas 90% hingga jangkauan 200 m dan mampu menangani pengiriman data dari dua node secara simultan tanpa konflik identitas. Model FIS berhasil menghasilkan rekomendasi jenis, dosis, dan waktu pemupukan; seluruh delapan skenario pengujian kondisi batas menghasilkan keluaran yang sesuai ekspektasi agronomi, dan verifikasi lintas platform mengonfirmasi konsistensi logika model dengan simpangan maksimum



hanya 0,0041 kg/pohon. Model FIS Lapis A juga ditanamkan pada firmware IoT node sehingga rekomendasi dosis dapat ditampilkan langsung melalui antarmuka web lokal node yang diakses petani via smartphone tanpa memerlukan koneksi internet.

Temuan utama penelitian ini adalah keberhasilan mengintegrasikan akuisisi data sensor, komunikasi mandiri-internet, dan model rekomendasi cerdas dalam satu sistem *offline-first*. Keterbatasan jangkauan LoRa pada radius 200 m diantisipasi melalui strategi pemanfaatan IoT node secara mobile dengan pola pemindaian sekuensial, yang memungkinkan satu paket perangkat melayani area efektif hingga 5,68 Ha per posisi *gateway*. Sistem yang dikembangkan mendukung transformasi pemupukan sawit rakyat dari pendekatan intuitif menuju pemupukan presisi berbasis data yang tetap berfungsi tanpa jaringan internet. Penyempurnaan lebih lanjut diperlukan melalui validasi pakar agronomi terhadap model rekomendasi, verifikasi akurasi absolut sensor NPK terhadap analisis laboratorium, serta pengujian komunikasi pada area bervegetasi rapat untuk penerapan pada lahan yang lebih luas.

Kata kunci: *Edge computing, Fuzzy Inference System, LoRa, pemupukan presisi, sawit rakyat.*



SUMMARY

AKHMAD FATIKHUDIN. Development of an *Edge* Computing-Based Fertilizer Recommendation System for Independent Oil Palm Smallholders. Supervised by TAUFIK DJATNA and MEIKA SYAHBANA RUSLI.

Oil palm is a strategic plantation commodity for the Indonesian economy, and smallholder oil palm farmers manage approximately 40% of the total national plantation area. Nevertheless, the productivity of smallholder farmers remains below 50% compared to large-scale plantations. One of the primary causes is fertilization practices that are still intuitive in nature, without accounting for actual soil nutrient conditions. The implementation of smart farming to address this issue generally relies on cloud computing, which requires a stable internet connection, whereas most smallholder oil palm lands are located in areas without adequate cellular signal. This condition necessitates an edge computing approach capable of operating locally without depending on internet availability.

This research aims to develop a fertilization recommendation system based on edge computing for smallholder oil palm farmers. Specifically, this research aims to develop a field monitoring device prototype (IoT node) as a data collection medium, to develop a data communication workflow so that the device remains operational in areas with limited internet connectivity, and to develop a Fuzzy Inference System (FIS) model to convert sensor readings into fertilization recommendations.

The IoT node prototype was developed using a Model-Based Systems Engineering (MBSE) approach through five architectural layers, ranging from functional to prototype realization. The device consists of an ESP32 microcontroller, a DHT22 sensor, a Neo-6M GPS module, a seven-in-one soil sensor, and an SX1276 LoRa module, with a Raspberry Pi serving as the local edge server. The system was designed with a three-layer architecture (edge–fog–cloud) that places decision-making at the local fog layer. LoRa communication was tested under single-node and dual-node schemes by measuring signal strength (RSSI), latency (delay), and packet delivery ratio (PDR), while sensor accuracy was evaluated using mean absolute percentage error (MAPE). The FIS model was developed using a two-layer Mamdani method: Layer A determines the type and dosage of fertilizer based on N, P, K, and pH levels, while Layer B determines the application timing based on soil moisture. The model was verified through boundary condition testing and cross-platform validation between Python and Scilab.

Test results indicate that the temperature, humidity, pH, and GPS sensors operate within tolerable error thresholds (temperature MAPE 1.9%, air humidity 2.14%, soil moisture 1.83%, pH 0.27%, and GPS deviation 0.98 m), while the NPK sensor proved responsive to changes in soil conditions, although its absolute accuracy has not been verified against laboratory analysis methods. LoRa communication proved reliable with a PDR above 90% at ranges up to 200 m and was capable of handling simultaneous data transmission from two nodes without identity conflicts. The FIS model successfully generated recommendations for fertilizer type, dosage, and timing; all eight boundary condition test scenarios produced outputs consistent with agronomic expectations, and cross-platform

@Hak cipta 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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



verification confirmed the consistency of the model logic with a maximum deviation of only 0.0041 kg/tree. The FIS Layer A model was also embedded in the IoT node firmware, enabling dosage recommendations to be displayed directly through the node's local web interface, accessible by farmers via smartphone without requiring an internet connection.

The primary finding of this research is the successful integration of sensor data acquisition, internet-independent communication, and an intelligent recommendation model within a single offline-first system. The limited LoRa range of 200 m is addressed through a mobile IoT node utilization strategy with a sequential scanning pattern, enabling a single device package to serve an effective area of up to 5.68 hectares per gateway position. The developed system supports the transformation of smallholder oil palm fertilization from an intuitive approach toward data-driven precision fertilization that remains functional without an internet connection. Further refinement is required through agronomic expert validation of the recommendation model, absolute accuracy verification of the NPK sensor against laboratory analysis, and communication testing in densely vegetated areas for application across larger land areas.

Keywords: Edge Computing, Fuzzy Inference System, Precision Fertilizer, LoRa, Oil Palm Smallholder.



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.

PENGEMBANGAN SISTEM REKOMENDASI PEMUPUKAN BERBASIS *EDGE COMPUTING* UNTUK PETANI SAWIT RAKYAT

AKHMAD FATIKHUDIN

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Teknik pada
Program Studi Teknik Industri Pertanian

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
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.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1 Dr.Eng. Heru Sukoco, S.Si., M.T.



Judul Tesis : Pengembangan Sistem Rekomendasi Pemupukan Berbasis *Edge Computing* untuk Petani Sawit Rakyat
Nama : Akhmad Fatikhudin
NIM : F3501241031

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr.Eng. Ir. Taufik Djatna M.Si.

Pembimbing 2:

Dr. Ir. Meika Syahbana Rusli, M.Sc.Agr.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr.Ing. Ir. Suprihatin

NIP. 19631221 199003 1 002

Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi :

Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M. Agr

NIP. 19610502 198603 1 002

Tanggal Ujian:
17 Juli 2026

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 bulan April 2025 sampai bulan Juni 2026 ini ialah berjudul “Pengembangan Sistem Rekomendasi Pemupukan Berbasis *Edge Computing* untuk Petani Sawit Rakyat”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Eng. Ir. Taufik Djatna M.Si. dan Dr. Ir. Meika Syahbana Rusli, M.Sc.Agr. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada moderator seminar, dan penguji luar komisi pembimbing. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada keluarga terutama ayah dan ibu yang tak henti-henti mengirimkan doa agar ilmu yang didapat dari penelitian ini bisa menjadi jalan keberkahan. Keluarga besar yang tak pernah luput memberikan berbagai macam bentuk support. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada teman-teman pascasarjana TIP, bapak/ibu dan rekan-rekan sepembimbingan tim HPC, serta rekan-rekan pascasarjana lainnya yang sempat bertukar pikiran melalui Forum Mahasiswa Pascasarjana Kabinet Resilien yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya. Tak lupa pula teman-teman S1 TIN 57, terutama yang masih di Bogor di masa penyusunan tesis, saling memberi motivasi dan semangat.

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

Bogor, Juli 2026

Akhmad Fatikhudin



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
GLOSARIUM	xvi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Petani Sawit Rakyat	5
2.2 Pertanian Presisi	6
2.3 <i>Edge Computing</i>	7
2.4 Komunikasi LoRa (<i>Long Range</i>)	9
2.5 <i>Fuzzy Inference System</i>	10
2.6 Posisi Kebaruan Penelitian	11
III METODE	14
3.1 Kerangka Berpikir	14
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	15
3.3 Tahapan Penelitian	15
3.4 Pengembangan Prototipe <i>Iot node</i>	16
3.5 Pengembangan Metode Komunikasi LoRa	16
3.6 Pengembangan Model <i>Fuzzy Inference System</i>	19
3.7 Analisis data	22
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Analisis Proses Bisnis Pemupukan Sawit	25
4.2 Pemodelan Arsitektur Sistem Rekomendasi Pemupukan	27
4.3 Pengembangan Prototipe <i>Iot node</i>	30
4.4 Pengembangan Model <i>Fuzzy Inference System</i>	37
4.5 Analisis Lapisan Komputasi	43
4.6 Rancangan Implementasi Perangkat	47
4.7 Keunggulan dan Kekurangan Riset	53
V SIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Simpulan	55
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	63



DAFTAR TABEL

1	Perbandingan <i>cloud computing</i> , <i>fog computing</i> , dan <i>edge computing</i>	8
2	Posisi kebaruan penelitian terhadap literatur terdahulu	13
3	Struktur dan ukuran paket data sensor yang dikirim melalui lora	17
4	Rentang level sinyal RSSI	24
5	Pemetaan tujuan penelitian terhadap metrik dan kriteria keberhasilan	24
6	Tabulasi komponen penyusun arsitektur konseptual	30
7	Spesifikasi kebutuhan perangkat <i>Iot node</i>	31
8	Hasil pengujian akurasi sensor terhadap alat ukur referensi	33
9	Hasil pengujian komunikasi LoRa <i>single node</i> pada berbagai jarak	36
10	Log data pengujian komunikasi multi node berbasis Node_ID	37
11	Variabel input dan output model	38
12	Parameter fungsi keanggotaan masukan dan keluaran model FIS	38
13	Hasil pemangkasan basis aturan menjadi 30 aturan efektif	39
14	Logika penentuan dosis berdasarkan kadar hara dan pH	39
15	Hasil verifikasi model FIS melalui boundary test	42
16	Perbandingan perhitungan rekomendasi pemupukan python dengan sci-lab	43

DAFTAR GAMBAR

1	Struktur umum <i>Fuzzy Inference System</i> metode Mamdani	10
2	Peta tematik (<i>thematic map</i>) Scopus 2020–2025: klaster <i>edge computing</i> pada literatur kelapa sawit	12
3	Peta tematik (<i>thematic map</i>) Scopus 2020–2025: klaster <i>edge computing</i> pada literatur pertanian umum	12
4	Kerangka berpikir penelitian	14
5	Diagram alir tahapan penelitian	15
6	Lima lapis pengembangan prototipe <i>Iot node</i> berbasis MBSE	16
7	Ilustrasi tabrakan pengiriman data protokol ALOHA (dimodifikasi dari Zhong et al. (2022) <i>Wireless Communications and Mobile Computing</i> 2022: 1 – 14)	18
8	Ilustrasi penerapan <i>offset</i> pengiriman data (dimodifikasi dari Piyare et al. (2018) <i>Sensors</i> 2018: 1 – 22)	18
9	Tahapan pemodelan <i>fuzzy inference system</i>	19
10	Arsitektur model rekomendasi pemupukan	20
11	Proses bisnis pemupukan sawit rakyat dan titik kritisnya	26
12	Diagram <i>use case</i> sistem rekomendasi pemupukan	27
13	<i>Block definition diagram</i> arsitektur konseptual sistem	28
14	<i>Internal block diagram</i> aliran data antar komponen arsitektur logikal sistem	29
15	Diagram rangkaian <i>Iot node</i> sensor	31
16	Prototipe sensor node sistem pemantauan lahan sawit rakyat	32

17	Hasil regresi linear sensor suhu udara (A) dan pada sensor kelembaban udara (B)	34
18	Hasil regresi linear sensor kelembaban tanah (A) dan pada sensor pH tanah (B)	35
19	Fungsi keanggotaan variabel masukan dan keluaran model FIS	39
20	Alur Keputusan waktu (tren kelembaban tanah)	41
21	Arsitektur keterhubungan lapisan <i>edge</i> , <i>fog</i> , dan <i>cloud</i>	44
22	Tampilan pengguna. (A) Pengguna menghubungkan ke wifi lokal. (B) Pemantauan kondisi terkini node. (C) Rekomendasi terkini di area node	45
23	Tampilan Pemantauan <i>iot node</i> pada <i>server</i> lokal	46
24	Tampilan riwayat pemantauan tiap node	46
25	Tampilan rekomendasi pemupukan <i>server</i> lokal pada setiap node	46
26	Tampilan awal multi lahan <i>server cloud</i>	47
27	Tampilan pemantauan node per lahan pada <i>cloud server</i>	47
28	Pola tanam sawit 9x9 (Dimodifikasi dari Sasongko (2017))	49
29	Ilustrasi jangkauan gateway <i>server</i> lokal	49
30	Lima tahap skenario pemindaian kondisi blok lahan	50
31	Dashboard awal pemetaan lahan sawit tahap <i>geofencing</i>	50
32	Dashboard rekomendasi urutan peletakan sensor	50
33	Dashboard pemantauan peletakan sensor pada titik rekomendasi	51
34	Dashboard hasil pembacaan sensor dan rekomendasi pemupukan pada setiap titik peletakan sensor	52
35	Dashboard rincian pembacaan pada setiap titik peletakan sensor di lahan	52

DAFTAR LAMPIRAN

1	Data hasil uji sensor suhu (DHT11)	64
2	Data hasil uji sensor kelembaban udara (DHT11)	65
3	Data hasil uji sensor kelembaban tanah (7 in 1 <i>soil sensor</i>)	66
4	Data hasil uji sensor pH tanah (7 in 1 <i>soil sensor</i>)	67
5	Data hasil uji sensor GPS (Neo-6M)	68
6	Data hasil uji respon sensor NPK (7 in 1 <i>soil sensor</i>)	69
7	<i>Pseudocode</i> struktur paket LoRa	70
8	<i>Pseudocode</i> alur utama IoT node (TX)	70
9	<i>Pseudocode</i> pembacaan sensor tanah (modbus RTU)	71
10	<i>Pseudocode</i> pengiriman paket LoRa	71
11	<i>Pseudocode</i> <i>wifi access point</i> dan antarmuka web lokal	72
12	<i>Pseudocode</i> inferensi FIS	73
13	<i>Pseudocode</i> gateway (RX): penerimaan dan <i>dispatch</i> paket	74
14	Prototipe awal <i>iot node sensor</i> pemantauan lahan sawit	75
15	Dokumentasi pengujian <i>IoT Node</i> di lahan sawit IPB Dramaga	76
16	Tampilan pengguna petani lapang terhubung <i>iot node</i> terdekat via Wi-Fi	77
17	Tampilan pengguna pemantau lahan via <i>server</i> lokal memantau beberapa <i>iot node</i> dalam satu lahan	78

18	Tampilan pengguna pemantau lahan via server <i>cloud</i> memantau beberapa lahan	80
19	Tampilan fitur pemetaan dan rekomendasi penempatan <i>iot node sensor</i> di lahan	83





GLOSARIUM

Istilah	Deskripsi
Arsitektur fisik	Lapis MBSE yang menetapkan spesifikasi perangkat keras dan pengawatan (<i>wiring</i>) antar komponen <i>Iot node</i> .
Arsitektur fungsional	Lapis MBSE yang mendefinisikan kebutuhan pengguna dan interaksinya dengan sistem melalui diagram <i>use case</i> .
Arsitektur konseptual	Lapis MBSE yang menggambarkan blok penyusun sistem beserta hierarkinya melalui <i>block definition diagram</i> .
Arsitektur logikal	Lapis MBSE yang merinci aliran data antar komponen melalui <i>internal block diagram</i> .
Basis aturan (<i>rule base</i>)	Kumpulan aturan IF-THEN yang menghubungkan kondisi masukan dengan keputusan pada <i>Fuzzy Inference System</i> .
Blankspot Area	Wilayah yang tidak memiliki cakupan sinyal seluler atau internet yang memadai.
Block Definition Diagram (BDD)	Diagram SysML yang menampilkan blok penyusun sistem beserta hierarki dan komposisinya.
Boundary test	Pengujian model pada kondisi masukan ekstrem untuk memverifikasi konsistensi logika keluaran.
Centroid	Metode defuzzifikasi yang mengambil titik berat area hasil agregasi sebagai nilai keluaran tegas.
Cloud computing	Paradigma komputasi yang memusatkan pemrosesan dan penyimpanan data pada <i>server</i> awan yang diakses melalui internet.
Defuzzifikasi	Tahap FIS yang mengubah hasil inferensi <i>fuzzy</i> menjadi nilai tegas (<i>crisp</i>).
DHT22	Sensor yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembapan udara.
Dosis pemupukan	Jumlah pupuk (Urea, SP-36, dan KCl) yang direkomendasikan untuk diberikan per pohon.
Edge computing	Paradigma komputasi yang memindahkan pemrosesan data ke tepi jaringan, dekat dengan sumber data di lapang.
ESP32	Mikrokontroler berdaya rendah yang menjadi pusat kendali <i>Iot node</i> .
Fog computing	Lapisan komputasi perantara antara <i>edge</i> dan <i>cloud</i> yang menjalankan pemrosesan utama secara lokal.
Fungsi keanggotaan (<i>membership function</i>)	Fungsi yang menyatakan derajat keanggotaan suatu nilai terhadap suatu himpunan <i>fuzzy</i> .
Fuzzifikasi	Tahap FIS yang mengubah nilai tegas menjadi derajat keanggotaan variabel linguistik.
Fuzzy Inference System (FIS)	Sistem penalaran yang memetakan masukan menjadi keluaran menggunakan logika <i>fuzzy</i> .
Gateway (LoRa gateway)	Perangkat penerima yang menjembatani komunikasi LoRa dari node menuju <i>edge server</i> .
GPIO	Antarmuka pin masukan/keluaran serbaguna pada mikrokontroler.

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.

Istilah	Deskripsi
GPS Neo-6M	Modul penerima sinyal satelit untuk menentukan koordinat geografis node.
Haversine	Metode perhitungan jarak antara dua koordinat geografis pada permukaan bola.
Internal Block Diagram (IBD)	Diagram SysML yang menggambarkan aliran data dan koneksi antar komponen internal sistem.
Internet of Things (IoT)	Jaringan perangkat fisik yang saling terhubung dan bertukar data.
Iot node	Perangkat pada lapisan <i>edge</i> yang bertugas mengakuisisi dan mengirimkan data lahan secara <i>real-time</i> .
ISM band	Pita frekuensi radio bebas lisensi yang digunakan oleh teknologi LoRa.
Kalibrasi	Penyesuaian pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi untuk mengoreksi galat sistematis.
LoRa (Long Range)	Teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh berdaya rendah pada pita frekuensi bebas lisensi.
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> ; kelas jaringan nirkabel berjangkauan luas dan berdaya rendah.
Mamdani	Metode inferensi <i>fuzzy</i> yang menekankan keterbacaan dan kemiripan dengan penalaran manusia.
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i> ; metrik galat rata-rata yang dinyatakan dalam persentase.
MBSE	<i>Model-Based Systems Engineering</i> ; pendekatan rekayasa sistem yang menjadikan model sebagai artefak utama.
Multi-node	Skema komunikasi yang melibatkan lebih dari satu node secara bersamaan.
Node_ID	Pengenal unik tiap node untuk membedakan sumber data pada komunikasi <i>multi-node</i> .
NPK	Unsur hara utama tanaman, yaitu nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K).
Packet Delivery Ratio (PDR)	Rasio jumlah paket yang berhasil diterima terhadap total paket yang dikirim.
Pertanian presisi (<i>Precision Agriculture</i>)	Pengelolaan pertanian berbasis data untuk pemberian input yang tepat jumlah, tempat, dan waktu. Petani yang mengelola kebun kelapa sawit secara mandiri maupun melalui skema kemitraan dengan perusahaan perkebunan. Kelompok ini mencakup petani sawit swadaya dan petani sawit plasma.
Petani sawit rakyat	
Prototipe	Realisasi fisik awal perangkat hasil integrasi seluruh komponen <i>Iot node</i> .
Raspberry Pi	Komputer papan tunggal yang berperan sebagai <i>edge/fog server</i> .
Real-time	Pemrosesan atau penyajian data secara langsung mendekati waktu nyata.
RS485	Standar komunikasi serial yang menghubungkan sensor tanah ke mikrokontroler.



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.

Istilah	Deskripsi
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i> ; indikator kekuatan sinyal yang diterima.
Sensor tanah 7-in-1	Sensor terpadu yang mengukur N, P, K, pH, kelembapan, suhu, dan konduktivitas listrik tanah.
Server node	Server lokal (Raspberry Pi) yang menerima, menyimpan, dan mengolah data dari <i>Iot node</i> .
Smart farming	Penerapan teknologi digital dan data pada kegiatan budidaya pertanian.
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> ; antarmuka komunikasi serial antara mikrokontroler dan modul LoRa.
Spreading Factor	Parameter LoRa yang mengatur keseimbangan antara jangkauan dan laju data.
SysML	<i>Systems Modeling Language</i> ; bahasa pemodelan sistem yang digunakan dalam MBSE.
Thematic map	Peta tematik bibliometrik yang memetakan perkembangan tema penelitian pada suatu bidang.
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> ; antarmuka komunikasi serial, misalnya untuk modul GPS.
Use case diagram	Diagram yang menggambarkan interaksi aktor dengan fungsi-fungsi yang disediakan sistem.
Variabel linguistik	Variabel yang nilainya dinyatakan dalam istilah bahasa (misalnya rendah, sedang, tinggi) pada logika <i>fuzzy</i> .
Wireless Sensor Network (WSN)	Jaringan sensor nirkabel yang mengumpulkan dan mengirimkan data lingkungan.