

PEMODELAN *HYBRID RESIDUAL* LSTM-GRU UNTUK PREDIKSI PRODUKTIVITAS KELAPA SAWIT BERBASIS PERTANIAN PRESISI

ANDRI SURYADI



PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KOMPUTER
SEKOLAH SAINS DATA, MATEMATIKA, DAN INFORMATIKA
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.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa laporan akhir disertasi dengan judul “Pemodelan *Hybrid Residual* LSTM-GRU untuk Prediksi Produktivitas Kelapa Sawit Berbasis Pertanian Presisi” 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

Andri Suryadi
G6601221009

- 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

ANDRI SURYADI. Pemodelan *Hybrid Residual* LSTM-GRU untuk Prediksi Produktivitas Kelapa Sawit Berbasis Pertanian Presisi. Dibimbing oleh KUDANG BORO SEMINAR, ANNISA, dan SUDRADJAT.

Pertanian presisi adalah strategi manajemen yang memperhitungkan variabilitas temporal dan spasial untuk meningkatkan keberlanjutan produksi pertanian. Pertanian presisi sangat dibutuhkan untuk memprediksi produktivitas, monitoring, evaluasi, dan pengambilan keputusan pada spesifik lokasi kesesuaian lahan perkebunan. Setiap blok per kebun memiliki pola produktivitas, kondisi hara, dan respons terhadap faktor lingkungan yang berbeda, sehingga diperlukan model prediksi yang mampu menangkap hubungan temporal, multivariabel, dan spesifik lokasi.

Pada penelitian ini arsitektur dari algoritma yang dikembangkan mampu menyesuaikan dengan keragaman (variabilitas) setiap blok pada perkebunan kelapa sawit di KPPS Jonggol IPB dan sebagian perkebunan di PT X. Variabel yang digunakan sebagai variabel input meliputi curah hujan, umur tanaman, dan input baru yang belum pernah dilakukan pada penelitian sebelumnya yaitu status hara makro Nitrogen (N), Fosfor (P), Kalium (K). Pengujian beberapa model algoritma yaitu *Random Forest Regression*, *Extreme Gradient Boosting*, *Long Short-Term Memory (LSTM)*, dan *Gated Recurrent Unit (GRU)* pada studi awal menunjukkan bahwa model berbasis *deep learning* khususnya LSTM dan GRU lebih sesuai untuk data deret waktu produktivitas kelapa sawit dibandingkan model *machine learning*. Selanjutnya penelitian ini dikembangkan dengan menggunakan model *hybrid* LSTM-GRU yang mengombinasikan LSTM dan GRU.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa model *hybrid* LSTM-GRU menghasilkan kinerja lebih baik dibandingkan LSTM dan GRU tunggal. Pada KPPS Jonggol IPB, model *hybrid* LSTM-GRU menghasilkan rata-rata MAPE sebesar 31,88% dan RMSE sebesar 0,470 lebih baik dibandingkan LSTM dengan MAPE 60,23% dan GRU dengan MAPE 53,44%. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi LSTM dan GRU mampu meningkatkan kemampuan model dalam merepresentasikan pola produktivitas kelapa sawit yang bersifat temporal dan multivariabel.

Model *hybrid* LSTM-GRU ditambahkan *residual* agar dapat menangkap pola karakteristik keragaman berdasarkan spesifik lokasi yang lebih baik. *Residual* digunakan untuk mempelajari sisa kesalahan prediksi yang belum mampu ditangkap oleh model utama. Secara deskriptif, penambahan *residual* mampu menurunkan nilai MAPE dari 31,88% menjadi 29,49% atau peningkatan *correctness* dari 68,12% menjadi 70,51% sedangkan RMSE menurun dari 0,470 menjadi 0,445 walaupun secara uji Wilcoxon yang dilakukan pada KPPS Jonggol blok 1 s.d blok 5 belum signifikan. Pada PT X rata-rata MAPE menurun dari 36,71% menjadi 33,52% serta peningkatan *correctness* dari 63,29% menjadi 66,48% sedangkan RMSE menurun dari 0,790 menjadi 0,744.

Efektivitas *residual* dipengaruhi oleh karakteristik data, pola temporal, efek jeda, dan variasi *residual* pada masing-masing blok. Selain aspek akurasi, penelitian ini juga menganalisis waktu komputasi. Analisis interpretabilitas dilakukan

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.

menggunakan *feature importance* untuk mengetahui variabel yang paling berpengaruh terhadap hasil prediksi pada setiap blok. Hasil analisis tingkat kepentingan fitur (*feature importance*) menunjukkan bahwa variabel dominan berbeda antar blok. *Feature importance* kemudian dikombinasikan dengan analisis jeda berbasis koefisien korelasi. Analisis jeda digunakan untuk mengetahui periode waktu sebelumnya yang memiliki hubungan paling kuat dengan produktivitas. Pada Jonggol Blok 1, hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa variabel memiliki hubungan paling kuat pada jeda 24 bulan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh curah hujan dan status hara terhadap produktivitas tidak selalu muncul pada bulan yang sama, tetapi dapat terjadi karena adanya jeda.

Secara keseluruhan, penelitian ini telah berhasil membangun model *hybrid residual* LSTM-GRU yang arsitektur dan parameternya sangat bergantung pada keragaman (*variability*) dan karakteristik kesesuaian lahan dengan menggunakan data status hara makro nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), curah hujan, dan umur tanaman kelapa sawit disertai dengan analisis jeda dan pengaruh variabel terhadap hasil prediksi produktivitas kelapa sawit.

Kata Kunci: *Hybrid residual* LSTM-GRU, Kelapa sawit, Pertanian presisi, PreciPalm, Produktivitas.

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

ANDRI SURYADI. Hybrid Residual LSTM-GRU Modeling for Predicting Oil Palm Productivity Based on Precision Agriculture. Dibimbing oleh KUDANG BORO SEMINAR, ANNISA, dan SUDRADJAT.

Precision agriculture is a management strategy that considers temporal and spatial variability to improve agricultural production sustainability. Precision agriculture is essential for predicting productivity, monitoring, evaluating, and making decisions on plantation land suitability. Each block per plantation has different productivity patterns, nutrient conditions, and responses to environmental factors; thus, a predictive model capable of capturing temporal, multivariable, and location-specific relationships is required.

In this study, the architecture of the developed algorithm is able to adapt to the diversity (variability) of each block in oil palm plantations in the Jonggol IPB KPPS and some plantations in PT X. The variables used as input variables include rainfall, plant age, and new inputs that have never been used in previous studies, namely the status of macronutrients Nitrogen (N), Phosphorus (P), Potassium (K). In the initial study, the testing of several algorithm models, namely, random forest regression, extreme gradient boosting, extreme gradient boosting, long short-term memory (LSTM), and gated recurrent unit (GRU), showed that deep learning-based models, especially LSTM and GRU, are more suitable for time series data of oil palm productivity than machine learning models.

This research was further developed using a hybrid LSTM-GRU model that combines LSTM and GRU. The results of this study indicate that the hybrid LSTM-GRU model outperforms LSTM and GRU alone. In the Jonggol IPB KPPS, the hybrid LSTM-GRU model produced an average MAPE of 31.88% and an RMSE of 0.470, which were better than those of LSTM with a MAPE of 60.23% and GRU with a MAPE of 53.44%. These results indicate that the combination of LSTM and GRU can improve the model's ability to represent temporal and multivariable OP productivity patterns. Furthermore, residuals were added to the hybrid LSTM-GRU model to better capture the diversity characteristic patterns based on specific locations. Residuals were used to study the remaining prediction errors that were not captured by the main model. Descriptively, the addition of residuals reduced the MAPE values from 31.88% to 29.49% or increased correctness from 68.12% to 70.51%, while RMSE decreased from 0.470 to 0.445, although the Wilcoxon test conducted on KPPS Jonggol blocks 1 to 5 was not significant. At PT X, the average MAPE decreased from 36.71% to 33.52% and the correctness increased from 63.29% to 66.48%, whereas the RMSE decreased from 0.790 to 0.744.

The effectiveness of residuals is influenced by data characteristics, temporal patterns, lag effects, and residual variations in each block. In addition to the accuracy aspect, computation time was analyzed. Interpretability analysis was conducted using feature importance to determine the variables in each block that most influenced the prediction results. The feature importance analysis results showed that the dominant variables differed between blocks. Feature importance was then combined with a correlation coefficient-based lag analysis. Lag analysis is used to determine the previous period with the strongest relationship with productivity. In Jonggol Block 1, the results of the analysis show that several

variables have the strongest relationship at a 24-month lag. This indicates that the effects of rainfall and nutrient status on productivity do not always appear in the same month but can occur due to lags.

Overall, the main contribution of this study is to build a residual LSTM-GRU hybrid model whose architecture and parameters are highly dependent on the variability and characteristics of the land suitability using macronutrient status data of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), rainfall, and oil palm plant age accompanied by a lag analysis and the influence of variables on the predicted results of oil palm productivity.

Keywords: Hybrid LSTM-GRU residual, Oil palm, Precision agriculture, PreciPalm, Productivity.

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 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.

PEMODELAN *HYBRID RESIDUAL* LSTM-GRU UNTUK PREDIKSI PRODUKTIVITAS KELAPA SAWIT BERBASIS PERTANIAN PRESISI

ANDRI SURYADI

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

1. Dr. Eng Heru Sukoco, S.Si, M.T.
2. Dr. Ir. Dadang Kurnia, M.M.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Dr. Eng Heru Sukoco, S.Si, M.T.
2. Dr. Ir. Dadang Kurnia, M.M.

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 : *Pemodelan Hybrid Residual LSTM-GRU untuk Prediksi Produktivitas Kelapa Sawit Berbasis Pertanian Presisi*

Nama : Andri Suryadi

NIM : G6601221009

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Kudang Boro Seminar, M.Sc.

Pembimbing 2:

Dr. Eng. Annisa, S.Kom., M.Kom.

Pembimbing 3:

Dr. Ir. Sudradjat, M.S.



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 199301 1 001

Tanggal Ujian:

28 Juli 2026

Tanggal Lulus:

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.

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 21 Februari 2022 sampai bulan Agustus 2026 dengan judul “Pemodelan *Hybrid LSTM-GRU residual* untuk Prediksi Produktivitas Kelapa Sawit Berbasis Pertanian Presisi”. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan, dan penghargaan yang tinggi diberikan kepada:

1. Para dosen pembimbing yang terdiri atas Prof. Dr. Ir. Kudang Boro Seminar, M. Sc., Dr. Eng. Annisa, S.Kom., M.Kom., Prof. Dr. Ir. Sudradjat, M.S. yang telah memberikan waktu, pengalaman, bimbingan dan arahan kepada Penulis selama penyusunan disertasi ini. Semoga Allah SWT membalas kebaikan Bapak-Bapak semua, aamiin.
2. Para penguji luar komisi Bapak Dr. Eng Heru Sukoco, S.Si, M.T. dan Bapak Dr. Ir. Dadang Kurnia, M.M. yang telah memberikan masukan dan saran yang sangat berguna serta Bapak Prof. Dr. Anang Kurnia, S.Si., M.Si. yang telah berkenan menjadi moderator pada sidang tertutup.
3. Ketua Program Studi S3 Ilmu Komputer Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom, Sekretaris Program Studi S3 Ilmu Komputer Dr. Hendra Rahmawan, S.Komp., M.T., serta Ibu Nining Rohaniah yang dengan sabar telah membantu mempermudah proses administrasi selama studi.
4. Para dosen pada Program Studi Ilmu Komputer Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika yang telah memberikan ilmunya pada saat perkuliahan.
5. Segenap Pimpinan dan rekan-rekan dosen institusi tempat Penulis berkarya, Kampus Universitas Terbuka, Fakultas Sains dan Teknologi. Semoga dukungan dan doa yang selalu diberikan ke Penulis memberikan keberkahan kepada kita semua.
6. Bapak dan Ibu tercinta Dedi Pribadi dan Imas Surya Hartini yang telah mendidik penulis sejak kecil hingga saat ini. Istri tercinta Septin Saputri, dan anak-anak penyemangat papih. Kakak Kiya, Teteh Nabila, Aa Faiq, dan Dede Syafa yang telah kebersamaan dengan sabar selama Penulis menyelesaikan studi S3 di IPB University. Adik tercinta Mega Safitri dan Gemi Febrian yang telah memberikan dukungan selama studi ini. Semoga kasih sayang dan kesabaran selama ini mendapat keberkahan dari Allah SWT.
7. Keluarga besar Putu Kuning, keluarga besar Malangbong, Ibu Sumawarni (Alm), Bapak Harjono (Alm), rekan-rekan komunitas olah raga, rekan-rekan satu bimbingan, rekan Dosen Millennial UT, rekan-rekan seperjuangan mahasiswa Ilkom IPB khususnya Angkatan V yang tidak dapat Penulis sebutkan satu persatu.

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

Bogor, Agustus 2026

Andri Suryadi

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
DAFTAR ISTILAH	x
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian	7
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	7
1.6 Kebaruan Penelitian	7
1.7 Sistematika penulisan	8
II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Kelapa sawit	9
2.2 Sistem pendugaan unsur nutrisi makro pada kelapa sawit	13
2.3 Riset produktivitas kelapa sawit	14
2.4 <i>Machine learning dan Deep learning</i>	15
2.5 <i>Hybrid LSTM-GRU</i>	24
2.6 <i>Residual</i>	27
2.7 Analisis Interpretabilitas	28
2.8 Peran efek jeda dalam evaluasi spesifik lokasi	29
2.9 Ketidakpastian prediksi	30
2.10 Pertanian Presisi	31
2.11 Pencarian arsitektur dan parameter (<i>hyperparameter tuning</i>)	32
III METODE PENELITIAN	34
3.1 Waktu dan Lokasi penelitian	34
3.2 Alat dan bahan	36
3.3 Tahapan penelitian	37
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	59
4.1 Deskripsi dan Karakteristik Data Penelitian	59
4.2 Analisis curah hujan, hubungan antar variabel, dan karakteristik data	63
4.3 Hasil Studi Awal Model Pembandingan	67
4.4 Hasil Model <i>Hybrid LSTM-GRU</i>	69
4.5 Peningkatan kinerja <i>Hybrid LSTM-GRU</i> dengan <i>residual</i>	76
4.6 Analisis Interpretabilitas Model	79
4.7 Analisis kompleksitas model <i>hybrid residual LSTM-GRU</i>	81
4.8 Prediksi Produktivitas Kelapa Sawit dan Validasi Tahun 2025	87
4.9 Implikasi hasil prediksi berbasis <i>explainable artificial intelligence</i>	92
4.10 Arsitektur adaptif <i>hybrid residual LSTM-GRU</i>	95
4.11 Generalisasi model <i>hybrid residual LSTM-GRU</i>	95
4.12 Batasan generalisasi model <i>hybrid residual LSTM-GRU</i>	96
4.13 Adaptasi model <i>hybrid residual LSTM-GRU</i>	97



4.14	Ketahanan model (<i>Robustness</i>)	97
4.15	Kontribusi penelitian	98
4.16	Keterbatasan penelitian	98
4.17	Roadmap implementasi model	99
4.18	Potensi integrasi dengan berbagai sumber data.	100

V	SIMPULAN DAN SARAN	101
5.1	Simpulan	101
5.2	Saran	102

DAFTAR PUSTAKA	103
----------------	-----

LAMPIRAN	113
----------	-----

RIWAYAT HIDUP	146
---------------	-----

DAFTAR TABEL

1	Produksi, luas area, produktivitas kelapa sawit dari tahun 2017 s.d 2023	9
2	Rangkuman penelitian terkait produktivitas kelapa sawit	16
3	Perbedaan Pertanian presisi	32
4	RandomizeSearchCV	33
5	Contoh Praproses data Produktivitas Jonggol IPB tahun 2019	41
6	Data umur tanaman	42
7	Rangkuman dataset yang digunakan	43
8	Distribusi hasil pencarian artikel	48
9	Distribusi algoritma	48
10	Pemilihan baseline algoritma	49
11	<i>Hyperparameter tuning</i> studi awal	50
12	Konfigurasi <i>hyperparameter tuning</i>	52
13	Nilai <i>hyperparameter tuning residual</i>	52
14	Kandungan unsur hara N,P,K di KPPS Jonggol IPB (2015-2024)	59
15	Kandungan unsur hara N,P,K di PT X (2019-2024)	60
16	Analisis jeda seluruh blok KPPS Jonggol IPB dan Riau	65
17	Karakteristik lahan KPPS Jonggol IPB	66
18	Karakteristik lahan PT X Riau	67
19	Proses <i>tuning</i> arsitektur dan parameter	70
20	Hasil arsitektur dan parameter terbaik KPPS Jonggol IPB	70
21	Hubungan karakteristik lahan dengan arsitektur dan parameter model	71
22	Hasil pemodelan <i>hybrid</i> LSTM-GRU, LSTM, dan GRU	73
23	Rangkuman hasil kinerja model <i>hybrid</i> LSTM-GRU	75
24	Hasil <i>tuning</i> arsitektur dan parameter	77
25	Perbandingan model <i>hybrid</i> LSTM-GRU dengan residual	78
26	Hasil uji signifikansi Wilcoxon	79
27	Hasil perhitungan <i>feature importance</i> .	80
28	Ringkasan kinerja dan waktu komputasi model	81
29	Ringkasan jumlah parameter hasil model	82
30	Ringkasan waktu inferensi model	84
31	Ringkasan rata-rata waktu kenaikan model	84
32	Rangkuman perhitungan jumlah parameter dan waktu komputasi	85
33	Hasil perhitungan <i>confidence interval</i> KPPS Jonggol	85
34	Ringkasan perubahan <i>margin error</i> KPPS Jonggol	86
35	Perbandingan prediksi hasil <i>hybrid</i> LSTM-GRU dengan <i>residual</i>	88
36	Hasil prediksi produktivitas 12 bulan	89
37	Hasil prediksi produktivitas tahunan KPPS Jonggol IPB blok 1	90
38	Perbandingan data prediksi dan validasi KPPS Jonggol tahun 2025	92
39	Rangkuman hasil monitoring dan evaluasi pada seluruh blok	93
40	Penyesuaian arsitektur <i>hybrid residual</i> LSTM-GRU	95

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 GAMBAR

1	Keragaman status hara N, P, K di perkebunan di PT X Provinsi Riau	3
2	Sistematika penulisan	8
3	Stasiun <i>Automatic Weather Station</i> (AWS) IPB	11
4	Grafik hubungan umur tanaman dan produksi kelapa sawit	12
5	Alur kerja PreciPalm yang digunakan sebagai input ke model prediksi	14
6	Perbedaan AI, ML, dan DL	18
7	Konsep <i>deep learning</i>	19
8	Arsitektur LSTM	20
9	Arsitektur GRU	22
10	Arsitektur <i>hybrid</i> LSTM-GRU sesuai dengan keragaman karakteristik spesifik lokasi	25
11	Arsitektur <i>hybrid residual</i> LSTM-GRU	27
12	Lokasi penelitian KPPS Jonggol IPB	34
13	Jenis tanah KPPS Jonggol IPB	34
14	Ketinggian KPPS Jonggol IPB	35
15	Kemiringan KPPS Jonggol IPB	35
16	Lokasi penelitian PT X Provinsi Riau	36
17	Tahapan penelitian	38
18	Denah informasi peta kebun KPPS Jonggol dan Riau	39
19	Hasil praproses peta kebun KPPS Jonggol dan Riau	40
20	Hasil praproses data laporan KPPS Jonggol dan Riau	40
21	Hasil dari perhitungan unsur hara makro	42
22	Hasil perhitungan numerik unsur hara makro	43
23	Contoh <i>dataset</i> yang digunakan	44
24	<i>Scaling fitur</i>	45
25	Tahapan studi awal	47
26	Tahapan <i>systematic literature review</i> (SLR)	48
27	Tahapan pemodelan perbandingan algoritma	51
28	Tahapan membangun model terbaik	53
29	Tahapan <i>hybrid residual</i> LSTM-GRU	54
30	Implikasi pertanian presisi	58
31	Kandungan rata-rata (<i>mean</i>) unsur hara pada KPPS Jonggol IPB	60
32	Kandungan rata-rata unsur hara pada PT X	61
33	Variabilitas unsur hara KPPS Jonggol IPB	61
34	Variabilitas unsur hara PT X	62
35	Curah hujan tahunan KPPS Jonggol IPB (2014-2024)	63
36	Curah hujan tahunan PT X (2019-2024)	64
37	Hasil dari perbandingan algoritma pada studi awal	68
38	Alur pencarian parameter dengan <i>random search</i>	69
39	Visualisasi hasil pemodelan <i>hybrid residual</i> LSTM-GRU	87
40	Prediksi 12 bulan KPPS Jonggol IPB	89
41	Prediksi 12 bulan Perkebunan PT X	90
42	Prediksi tahunan blok 1 KPPS Jonggol IPB	91
43	Roadmap pengembangan implementasi model	99

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 LAMPIRAN

1	Tahapan penelitian	114
2	Data curah hujan bulanan KPPS Jonggol IPB dan PT X Riau	117
3	Umur tanaman KPPS Jonggol IPB dan PT X Riau	118
4	Visualisasi hasil pemodelan seluruh blok	119
5	Perbandingan data aktual dan prediksi tahunan	126
6	Data curah hujan bulanan KPPS Jonggol IPB	130
7	Pencarian arsitektur dan parameter tuning <i>hybrid</i> LSTM-GRU	131
8	Hasil pencarian parameter tuning parameter residual	135
9	Perhitungan uji signifikansi Wilcoxon	136
10	Perhitungan menentukan <i>feature importance</i>	139
11	Perhitungan menentukan jumlah parameter	142
12	Perhitungan confidence interval	144
13	Menghitung efek jeda	145

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 ISTILAH

Analisis jeda (<i>lag analysis</i>)	: Analisis untuk mengetahui selang waktu antara perubahan variabel prediktor dan munculnya pengaruh terhadap produktivitas kelapa sawit.
<i>Batch size</i>	: Jumlah sekuens data yang diproses model dalam satu kali pembaruan bobot.
Bobot (<i>weight</i>)	: Nilai parameter yang dipelajari model untuk menentukan besarnya pengaruh masukan terhadap keluaran.
<i>Confidence interval</i>	: Rentang nilai yang digunakan untuk menunjukkan tingkat ketidakpastian suatu estimasi pada tingkat kepercayaan tertentu.
Curah hujan	: Jumlah presipitasi yang diterima suatu wilayah pada periode tertentu dan digunakan sebagai salah satu variabel prediktor.
<i>Dense layer</i>	: Lapisan jaringan saraf yang menghubungkan seluruh unit dari lapisan sebelumnya untuk menghasilkan keluaran prediksi.
<i>Early stopping</i>	: Mekanisme penghentian pelatihan ketika kinerja model pada data validasi tidak lagi mengalami perbaikan.
<i>Epoch</i>	: Satu siklus lengkap pemrosesan seluruh data latih oleh model.
Efek jeda (<i>lag effect</i>)	: Pengaruh suatu variabel yang baru terlihat pada produktivitas setelah beberapa periode waktu.
<i>Feature importance</i>	: Ukuran yang menunjukkan tingkat kepentingan setiap variabel prediktor terhadap kinerja prediksi model.
GRU (<i>Gated Recurrent Unit</i>)	: Jenis jaringan saraf berulang yang menggunakan <i>update gate</i> dan <i>reset gate</i> untuk mempelajari pola temporal.
Hara makro	: Unsur hara yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah relatif besar; dalam penelitian ini meliputi nitrogen, fosfor, dan kalium.
<i>Hidden layer</i>	: Lapisan di antara masukan dan keluaran yang berfungsi mempelajari representasi atau pola dalam data.
Hiperparameter	: Konfigurasi model yang ditentukan sebelum pelatihan, seperti jumlah lapisan, jumlah unit, <i>learning rate</i> , <i>batch size</i> , <i>epoch</i> , dan <i>time step</i> .
Hybrid LSTM–GRU	: Arsitektur yang menggabungkan lapisan LSTM dan GRU untuk mempelajari pola temporal jangka panjang dan jangka pendek.
Korelasi	: Ukuran arah dan kekuatan hubungan antara nilai aktual dan nilai hasil prediksi.
<i>Learning rate</i>	: Besarnya langkah perubahan bobot model pada setiap proses optimasi.

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.

LSTM (Long Short-Term Memory)	: Jaringan saraf berulang yang menggunakan <i>input gate</i> , <i>forget gate</i> , dan <i>output gate</i> untuk mempelajari ketergantungan temporal jangka panjang.
MAPE (Mean Absolute Percentage Error)	: Rata-rata persentase kesalahan absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi; nilai yang lebih kecil menunjukkan prediksi yang lebih akurat.
Normalisasi	: Proses mengubah skala data ke rentang tertentu agar perbedaan skala antarvariabel tidak mendominasi pelatihan model.
Optimizer	: Algoritma yang digunakan untuk memperbarui bobot model guna meminimalkan nilai kesalahan, seperti Adam, RMSprop, dan SGD.
Pemodelan residual	: Pemodelan kesalahan yang tersisa dari model utama untuk memperbaiki hasil prediksi akhir.
Pertanian presisi	: Pendekatan pengelolaan tanaman berdasarkan keragaman kondisi lokasi dan data untuk mendukung keputusan yang lebih tepat.
PFI (Permutation Feature Importance)	: Metode pengukuran kepentingan variabel dengan mengacak nilai satu variabel dan mengamati perubahan kinerja model.
Produktivitas kelapa sawit	: Jumlah tandan buah segar yang dihasilkan per satuan luas dan periode waktu, dinyatakan dalam ton per hektare.
Random search	: Metode pencarian hiperparameter dengan mengambil kombinasi konfigurasi secara acak dari ruang pencarian yang telah ditentukan.
Residual	: Selisih antara nilai produktivitas aktual dan nilai yang diprediksi oleh model utama.
RMSE (Root Mean Squared Error)	: Akar rata-rata kuadrat kesalahan prediksi yang memberikan penalti lebih besar terhadap kesalahan berukuran besar.
Sekuens	: Susunan data berdasarkan urutan waktu yang digunakan sebagai masukan model LSTM dan GRU.
Site-specific management	: Pengelolaan tanaman yang disesuaikan dengan karakteristik dan keragaman setiap lokasi atau blok perkebunan.
Sliding window	: Teknik pembentukan sekuens dengan menggeser jendela waktu secara bertahap pada data deret waktu.
Tandan Buah Segar (TBS)	: Buah kelapa sawit yang dipanen dan digunakan sebagai dasar pengukuran produksi maupun produktivitas.
Time series	: Data yang dikumpulkan secara berurutan berdasarkan periode waktu tertentu.

<i>Time step</i>	: Panjang periode historis yang digunakan model sebagai masukan untuk memprediksi produktivitas periode berikutnya.
Transformasi data	: Penerapan hasil normalisasi yang diperoleh dari data latih kepada data validasi, data uji, atau data eksternal.
Uji Wilcoxon	: Uji statistik nonparametrik untuk menilai perbedaan berpasangan antara kinerja model hybrid dan hybrid residual.
Unit LSTM/GRU	: Jumlah unit tersembunyi pada lapisan LSTM atau GRU yang menentukan kapasitas model dalam mempelajari pola data.
Validasi eksternal	: Pengujian model menggunakan data dari periode di luar data pengembangan; dalam penelitian ini menggunakan data tahun 2025.
Validasi internal	: Evaluasi model menggunakan bagian data historis yang dipisahkan secara kronologis selama tahap pengembangan model.
Variabel prediktor	: Variabel masukan yang digunakan untuk memprediksi produktivitas, yaitu curah hujan, N, P, K, dan umur tanaman.
Variabel target	: Variabel yang diprediksi oleh model, yaitu produktivitas TBS kelapa sawit.