

MODEL DETEKSI DAN PREDIKSI ANOMALI PADA DATA TELEMETRI SATELIT MIKRO MENGGUNAKAN PENDEKATAN *HYBRID*

RIZKI PERMALA



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



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Model Deteksi dan Prediksi Anomali pada Data Telemetry Satelit Mikro Menggunakan Pendekatan *Hybrid*” 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 2026

Rizki Permala
G6601231002



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Perpustakaan IPB University

RINGKASAN

RIZKI PERMALA. Model Deteksi dan Prediksi Anomali pada Data Telemetry Satelit Mikro Menggunakan Pendekatan *Hybrid*. Dibimbing oleh IMAS SUKAESIH SITANGGANG, HENDRA RAHMAWAN, dan WAHYUDI HASBI.

Data telemetry merupakan data *feedback* dari satelit yang dikirim secara kontinu atau berdasarkan permintaan (*telecommand*) dari stasiun bumi. Data ini berisi deret waktu hasil pengukuran sensor pada subsistem *payload* dan *bus* satelit, mencakup parameter waktu, tegangan, temperatur, arus, dan sikap satelit terhadap Bumi. Sehingga, data telemetry menjadi kunci pemantauan, pengendalian, dan analisis kondisi kesehatan satelit selama di orbit maupun setelah misi.

Melalui data telemetry, operator dapat mengidentifikasi kondisi abnormal seperti kegagalan daya, sikap satelit yang menyimpang, atau suhu subsistem yang tidak normal. Kondisi abnormal tersebut dapat disebabkan oleh radiasi, perubahan suhu, penuaan elektronik, korsleting, maupun pengaruh lingkungan antariksa. Deteksi anomali yang tepat waktu berperan penting dalam memastikan operasi satelit yang aman dan mendukung keberhasilan misi. Diagnosis yang akurat juga membantu memperpanjang umur satelit.

Penelitian ini memiliki tiga tujuan. Pertama, membuat model ansambel statistika berbasis *voting* untuk menduga suatu nilai atribut sebagai *outlier* atau bukan. Kedua, membuat model *rule mining* (Apriori-Close) yang mampu menjelaskan atribut penyebab anomali sekaligus mendeskripsikan jenis anomali yang muncul. Ketiga, membuat model *deep learning* (MOBO-LSTM) untuk memprediksi nilai rata-rata suatu atribut telemetry pada satu jendela waktu. Penelitian menggunakan data telemetry satelit LAPAN-A2 periode 1 Januari 2016 hingga 31 Desember 2024. Deteksi anomali dilakukan dengan mempertimbangkan hubungan antar parameter (multivariat) saat anomali terjadi.

Kebaruan penelitian ini bertumpu pada dua pilar. Pilar pertama adalah pemanfaatan *dataset* telemetry LAPAN-A2, satu-satunya satelit mikro aktif berorbit LEO ekuatorial. *Dataset* ini dianalisis melalui skenario akumulatif bertahap. Proses ini dimulai dari *dataset* tahun pertama (DS1). Selanjutnya, DS1 secara bertahap ditambahkan dengan *dataset* pada tahun-tahun berikutnya. Penambahan data dilakukan secara berurutan hingga mencapai *dataset* kesembilan (DS9). DS9 merupakan akumulasi lengkap dari data periode 2016 hingga 2024. Analisis akumulatif ini bertujuan untuk memantau stabilitas sistem dalam jangka panjang. Selain itu, analisis ini juga bertujuan untuk mengamati pola *outlier* secara kumulatif seiring bertambahnya waktu. Skenario ini sekaligus menangani tantangan data *multi-batch* berupa ketidakseimbangan antar atribut, *batch* kosong, dan distribusi tidak normal. Pilar kedua adalah pengusulan *pipeline* hierarkis yang mengintegrasikan ansambel statistika, *rule mining*, dan MOBO-LSTM dengan deteksi *outlier* sebagai fondasi. Hanya *true positive outlier* yang lolos validasi label pakar yang diteruskan antar-tahap, sehingga aturan diagnostik dan prediksi yang dihasilkan lebih andal. Keterpaduan ini ditopang oleh tiga komponen: *rule mining* interpretatif yang mengungkap atribut penyebab dan jenis anomali, optimasi tiga objektif MOBO-NSGA-II yang menghasilkan *Pareto front*, serta validasi ganda yang meningkatkan kepercayaan deteksi.



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.

Deteksi anomali menggunakan *adaptive weighted statistical ensembles* yang mengintegrasikan lima *base detector*, yaitu Filter Hampel, IQR, *Modified Z-score*, *Z-score*, dan ABSD. Kelima detektor digabungkan melalui *strategi pembobotan adaptif* menggunakan *Dynamic Weighted Majority (DWM)*. Evaluasi dilakukan pada sembilan *dataset* akumulatif (DS1–DS9) dengan total 1,28 juta observasi. Hasilnya, DWM mencapai kinerja tertinggi (F1 0,890; PR-AUC 0,934; FPR 0,0018) dan mengungguli *hard voting* dengan reduksi FPR hampir 12 kali lipat. Unggul dari *entropy-based weighting* (F1 0,833) yang menawarkan stabilitas antar-*dataset* tanpa parameter manual. Sebaliknya, *Isolation Forest* dan *Random Forest* tertinggal substansial akibat *imbalance* ekstrem (1,5%). Secara operasional, DWM mengoptimalkan cakupan deteksi, sedangkan entropi mengoptimalkan keandalan keputusan.

Identifikasi pola dan jenis anomali menggunakan *rule mining* berbasis *closed frequent itemsets* (Apriori-Close). Kombinasi metrik yang digunakan meliputi *minSupp* 0,1%, *minConf* 0,9, *lift*, *leverage*, dan *conviction*. Pendekatan ini mereduksi redundansi aturan dan mengungkap pola tersembunyi antar subsistem daya. Analisis juga mengidentifikasi korelasi kuat antar baterai (VBatt1–VBatt3) serta ketergantungan terarah antara U_UMPB dan VBatt. Skenario akumulatif turut mengungkap *Temporal Drift* berupa pergeseran *antecedent* dominan dari I_Solar (DS1) ke jalur *fuse* (DS2–DS6) hingga *main power bus* U_UMPB (DS7–DS9). Kedua pendekatan secara independen menunjuk VBatt dan U_UMPB sebagai indikator kunci anomali. Konvergensi ini berfungsi sebagai validasi silang metodologis.

Prediksi telemetri menggunakan LSTM yang dioptimasi melalui *Multi-Objective Bayesian Optimization* (MOBO) berbasis NSGA-II. Optimasi dilakukan secara simultan terhadap akurasi (MAE, R^2) dan efisiensi waktu pelatihan. MOBO-LSTM mencapai kinerja terbaik dengan MAE terbaik 2,821 dan R^2 mencapai 0,941. Seluruh *baseline* (GRU, TCN, XGBoost, Transformer) hanya mencapai MAE 7,674–9,895 dan R^2 maksimum 0,673. Bahkan solusi Pareto LSTM dengan akurasi terendah masih mengungguli performa terbaik seluruh *baseline*. Temuan ini menegaskan bahwa kesesuaian mekanisme *gating* LSTM dengan karakteristik temporal data lebih menentukan daripada kompleksitas arsitektur. Kerangka kerja MOBO-LSTM lebih efisien karena 51 *trial* menghasilkan 8 solusi Pareto, jauh lebih hemat dibandingkan *baseline* yang memerlukan 100–150 *trial*. Analisis *Pareto front* mengungkap pedoman praktis berupa dominasi *optimizer* Adam, fungsi aktivasi *non-saturating smooth* (ELU, SELU, tanh) pada 88% solusi, dan arsitektur *single-layer* [128 unit] sebagai keseimbangan akurasi-efisiensi terbaik. Korelasi Spearman memvalidasi desain *multi-objective*. MAE dan R^2 berkorelasi negatif kuat ($\rho = -0,969$), sedangkan waktu pelatihan independen terhadap keduanya. Korelasi Spearman membuktikan bahwa efisiensi komputasi dan akurasi merupakan dua dimensi terpisah.

Kata kunci: deteksi anomali, LAPAN-A2, LSTM, optimasi multi-objektif, telemetri satelit

SUMMARY

RIZKI PERMALA. Anomaly Detection and Prediction Model for Micro-Satellite Telemetry Data Using a Hybrid Approach. Supervised by IMAS SUKAESIH SITANGGANG, HENDRA RAHMAWAN, and WAHYUDI HASBI.

Telemetry data is feedback from satellites sent continuously or upon request (telecommand) from ground stations. This data contains a time series of sensor measurements on the satellite's payload and bus subsystems, including time, voltage, temperature, current, and attitude parameters relative to Earth. Therefore, telemetry data is key to monitoring, controlling, and analyzing satellite health during and after a mission.

Through telemetry data, operators can identify abnormal conditions such as power failures, deviated satellite attitudes, or abnormal subsystem temperatures. These abnormal conditions can be caused by radiation, temperature changes, electronic aging, short circuits, or the influence of the space environment. Timely anomaly detection plays a critical role in ensuring safe satellite operations and supporting mission success. Accurate diagnosis also helps extend the satellite's lifespan.

This research has three objectives. First, to create a voting-based statistical ensemble model to predict whether an attribute value is an outlier. Second, to create a rule mining model (Apriori-Close) capable of explaining the attributes that cause anomalies and describing the types of anomalies that occur. Third, a deep learning model (MOBO-LSTM) was created to predict the average value of a telemetry attribute over a single time window. The study used LAPAN-A2 satellite telemetry data from January 1, 2016, to December 31, 2024. Anomaly detection was performed by considering the relationships between parameters (multivariate) when anomalies occurred.

The novelty of this research rests on two pillars. The first pillar is the utilization of the LAPAN-A2 telemetry dataset, the only active microsatellite in equatorial LEO orbit. This dataset was analyzed using a stepwise accumulative scenario. This process begins with the first year's dataset (DS1). DS1 is then gradually supplemented with datasets from subsequent years. Data additions were carried out sequentially until reaching the ninth dataset (DS9). DS9 represents the complete accumulation of data from 2016 to 2024. This accumulative analysis aims to monitor the long-term stability of the system. Furthermore, it also aims to observe cumulative outlier patterns over time. This scenario also addresses the challenges of multi-batch data, such as imbalance between attributes, empty batches, and non-normal distributions. The second pillar is the proposal of a hierarchical pipeline that integrates statistical ensembles, rule mining, and MOBO-LSTM, with outlier detection as a foundation. Only true positive outliers that pass expert label validation are passed between stages, resulting in more reliable diagnostic and predictive rules. This integration is supported by three components: interpretive rule mining that reveals the causal attributes and types of anomalies, MOBO-NSGA-II three-objective optimization that generates a Pareto front, and double validation that increases detection confidence.

Anomaly detection uses adaptive weighted statistical ensembles that integrate five base detectors: the Hampel Filter, IQR, Modified Z-score, Z-score, and ABSD.



The five detectors are combined through an adaptive weighting strategy using Dynamic Weighted Majority (DWM). Evaluations were conducted on nine cumulative datasets (DS1–DS9) with a total of 1.28 million observations. DWM achieved the highest performance (F1 0.890; PR-AUC 0.934; FPR 0.0018) and outperformed hard voting with a nearly 12-fold reduction in FPR. Outperforms entropy-based weighting (F1 0.833), offering stability across datasets without manual parameters. In contrast, Isolation Forest and Random Forest lag substantially due to extreme imbalance (1.5%). Operationally, DWM optimizes detection coverage, while entropy optimizes decision reliability.

Anomaly patterns and types are identified using closed frequent itemset-based rule mining (Apriori-Close). The combination of metrics used includes minSupp 0.1%, minConf 0.9, lift, leverage, and conviction. This approach reduces rule redundancy and uncovers hidden patterns between power subsystems. The analysis also identifies a strong correlation between batteries (VBatt1–VBatt3) and a directional dependency between U_UMPB and VBatt. The accumulative scenario also reveals a Temporal Drift in the form of a shift in the dominant antecedent from I_Solar (DS1) to the fuse path (DS2–DS6) to the main power bus U_UMPB (DS7–DS9). Both approaches independently identify VBatt and U_UMPB as key indicators of anomalies. This convergence serves as methodological cross-validation.

Telemetry prediction using LSTM optimized through Multi-Objective Bayesian Optimization (MOBO) based on NSGA-II. Optimization was performed simultaneously on accuracy (MAE, R^2) and training time efficiency. MOBO-LSTM achieved the best performance with the best MAE of 2.821 and R^2 reaching 0.941. All baselines (GRU, TCN, XGBoost, Transformer) only achieved MAE 7.674–9.895 and maximum R^2 of 0.673. Even the Pareto LSTM solution with the lowest accuracy still outperformed the best performance of all baselines. This finding confirms that the suitability of the LSTM gating mechanism to the temporal characteristics of the data is more important than architectural complexity. The MOBO-LSTM framework is more efficient because 51 trials produce 8 Pareto solutions, much more efficient than the baselines that require 100–150 trials. Pareto front analysis revealed practical guidelines in the form of the Adam optimizer dominating, smooth non-saturating activation functions (ELU, SELU, tanh) in 88% of the solutions, and a single-layer architecture (128 units) as the best accuracy-efficiency balance. Spearman correlation validated the multi-objective design. MAE and R^2 were strongly negatively correlated ($\rho = -0.969$), while training time was independent of both. Spearman correlation proved that computational efficiency and accuracy are two separate dimensions.

Keywords: anomaly detection, LAPAN-A2, LSTM, multi-objective optimization, satellite telemetry



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

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

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

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

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



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

MODEL DETEKSI DAN PREDIKSI ANOMALI PADA DATA TELEMETRI SATELIT MIKRO MENGGUNAKAN PENDEKATAN *HYBRID*

RIZKI PERMALA

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 Dilindungi Undang-undang

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom, M.Kom
- 2 Dr.-Ing. Mohammad Mukhayadi, S.T., M.Kom

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom, M.Kom
- 2 Dr.-Ing. Mohammad Mukhayadi, S.T., M.Kom



Judul Disertasi : Model Deteksi dan Prediksi Anomali pada Data Telemetri
Satelit Mikro Menggunakan Pendekatan *Hybrid*

Nama : Rizki Permala

NIM : G6601231002

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si, M.Kom

Pembimbing 2:

Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom, M.T

Pembimbing 3:

Dr.-Ing. Ir. Wahyudi Hasbi, S.Si, M.Kom



Diketahui oleh

Ketua Program Studi Ilmu Komputer:

Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si, M.Kom

NIP 197501301998022001

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:

Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si, M.Kom

NIP. 196607021993021001

Tanggal Ujian:

17 Juli 2026

Tanggal Lulus:



@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.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Penelitian yang telah dilaksanakan sejak bulan Januari 2024 berjudul “Model Deteksi dan Prediksi Anomali pada Data Telemetry Satelit Mikro Menggunakan Pendekatan *Hybrid*”. Terima kasih penulis ucapkan kepada:

1. Keluarga besar Bapak Djono Sumitro (Alm.) dan Ibu Nurdjasni Zein yang telah mendidik, mendo'akan, dan memotivasi penulis untuk senantiasa melakukan segala sesuatu yang terbaik.
2. Ketua dan Sekretaris Program Studi Doktor Ilmu Komputer IPB beserta segenap Dosen dan Tenaga Pendidik Departemen Ilmu Komputer, SSMI IPB, atas ilmu, pelayanan, dan dukungan selama studi.
3. Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S. Si, M.Kom., Dr. Hendra Rahmawan, S.Kom, M.T., dan Dr.-Ing. Ir. Wahyudi Hasbi, S.Si, M.Kom. selaku komisi pembimbing yang telah dengan sabar membimbing, memberikan waktu, kesempatan, saran, dan arahan kepada penulis selama penyusunan disertasi. Semoga Allah SWT membalas kebaikan komisi pembimbing dengan banyak keberkahan.
4. Dr. Sony Hartono Wijaya, S.Kom, M.Kom selaku penguji 1 luar komisi, Dr.-Ing. Mohammad Mukhayadi, S.T., M.Kom selaku penguji 2 luar komisi, dan Hari Agung Adrianto S.Kom., M.Si., Ph.D selaku penguji dari program studi pada ujian tertutup yang telah memberikan banyak saran dan perbaikan pada penelitian ini.
5. Istri tercinta, Yogi Hardyaningtyas, dan anak-anak Kami, Kinanti Athaya Rizki dan Kautsarrazky Ghazi yang telah dengan sabar mendampingi, mendukung, menjadi sumber kekuatan, dan mendo'akan penulis selama menyelesaikan studi S3 di IPB. Semoga kasih sayang dan kesabaran yang telah diberikan mendapatkan keberkahan dari Allah SWT.
6. Teman-teman S3 Ilmu Komputer khususnya angkatan 2023 yang telah berjuang bersama dan memberikan dukungan selama studi.
7. Terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas beasiswa *degree by research* yang diberikan dan operator satelit LAPAN-A2 di Pusat Riset Teknologi Satelit (PRTS) atas dedikasinya menjaga LAPAN-A2 tetap sehat di orbit.
8. Semua pihak yang telah mendukung penyelesaian penelitian ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. Semoga segala bantuan dan dukungan yang telah diberikan mendapatkan balasan kebaikan yang berlipat dari Allah SWT.

Penulis berharap hasil penelitian dan disertasi ini dapat memberikan manfaat yang luas dan berkontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Rizki Permala



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	8
1.3 Tujuan	8
1.4 Manfaat	9
1.5 Ruang Lingkup	9
1.6 Kebaruan	9
II TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1 Satelit LAPAN-A2	11
2.2 Data Telemetry Satelit	12
2.3 Anomali pada Data Telemetry Satelit	13
2.4 Deteksi Anomali pada Data Telemetry Satelit	15
2.5 Metode Ansambel dengan Pendekatan Statistik	16
2.6 <i>Dynamic Weighted Majority</i>	18
2.7 <i>Binning</i> dengan Freedman-Diaconis Rule	19
2.8 <i>Association Rule Mining</i> dengan Apriori-Close	20
2.9 Reduksi <i>Batch</i>	23
2.10 Imputasi Data	23
2.11 <i>RobustScaler</i> untuk Normalisasi Data	23
2.12 <i>Long Short Term Memory</i>	24
2.13 <i>Multi-objective Bayesian Optimization</i>	27
2.14 Metrik Evaluasi	28
III METODE	30
3.1 Tahapan Penelitian	30
3.2 Lingkungan Pengembangan	39
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Deteksi <i>Outlier</i> dengan Ansambel Statistika	42
4.2 Deteksi <i>Outlier</i> dengan <i>Rule Mining</i> (Apriori-Close)	51
4.3 Prediksi Nilai Telemetry Sistem Daya dengan MOBO-LSTM	60
4.4 Analisis Fenomena <i>Temporal Drift</i> dan Validasi Fisik Sistem	74
4.5 Implikasi Operasional	75
V SIMPULAN DAN SARAN	78
5.1 Simpulan	78
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	81
LAMPIRAN	91
RIWAYAT HIDUP	113



DAFTAR TABEL

1	Deteksi anomali telemetri satelit dengan pendekatan statistik	3
2	Deteksi anomali telemetri satelit dengan aturan asosiasi	5
3	Penelitian prediksi nilai telemetri satelit yang memanfaatkan arsitektur LSTM	6
4	Karakteristik data telemetri satelit	12
5	Tipe-tipe anomali berdasarkan karakteristiknya	13
6	Deteksi anomali pada data telemetri satelit	15
7	Atribut <i>dataset</i> penelitian	34
8	Contoh statistik deskriptif data telemetri	34
9	Distribusi <i>skewness</i> atribut	34
10	Distribusi <i>kurtosis</i> atribut	35
11	Strategi pemisahan data berdasarkan kronologi	38
12	<i>Hyperparameter</i> dari model <i>baseline</i>	39
13	Ilustrasi jendela waktu dan tahapan penelitian	41
14	Perbandingan distribusi <i>dataset</i> dan algoritma deteksi <i>outlier</i>	44
15	Hasil deteksi <i>outlier</i> dengan <i>hard voting</i>	44
16	Hasil deteksi <i>outlier</i> dengan <i>Dynamic Weighted Majority</i>	47
17	Hasil deteksi <i>outlier</i> dengan <i>Entropy-Based Weighting</i>	47
18	Hasil deteksi <i>outlier</i> dengan <i>Isolation Forest</i>	50
19	Hasil deteksi <i>outlier</i> dengan <i>Random Forest</i>	50
20	Perbandingan 10 atribut dengan jumlah <i>outlier</i> terbanyak	51
21	Contoh <i>itemsets</i> di DS9	51
22	Frekuensi minimum untuk tiap <i>dataset</i>	52
23	Kombinasi aturan tertinggi tiap <i>dataset</i>	53
24	Perbandingan LSTM dengan model dasar	62
25	<i>Hyperparameter</i> terbaik untuk tiap skenario model	63
26	<i>Hyperparameter</i> terbaik untuk tiap skenario model (<i>lanjutan</i>)	64
27	Perbandingan MAE antar fitur dan model	66
28	Perbandingan R^2 antar fitur dan model	67
29	Perbandingan MAPE antar fitur dan model	67
30	Perbandingan RMSE antar fitur dan model	67
31	Perbandingan skenario <i>single-objective</i> dengan MOBO-NSGA-II	69
32	Analisis efisiensi arsitektur	71
33	Matriks kinerja <i>optimizer</i>	71
34	<i>Trade-off</i> kinerja fungsi aktivasi	72
35	Matriks korelasi Spearman	73



DAFTAR GAMBAR

1	Satelit LAPAN-A2	11
2	Contoh anomali berdasarkan karakteristiknya	14
3	Struktur sel LSTM	25
4	Diagram alir penelitian	30
5	Ilustrasi lintasan satelit LAPAN-A2 1×24 jam	31
6	Panel kendali dan telemetri satelit LAPAN-A2	32
7	Contoh data telemetri satelit LAPAN-A2	32
8	Praproses bersama tujuan 1, 2, dan 3	33
9	Diagram alir tujuan penelitian 1 dan 2	36
10	Diagram alir tujuan penelitian 3	37
11	Perbandingan komposisi atribut terasosiasi anomali pada <i>dataset</i> akumulatif DS1-DS9 hasil Apriori-Close.	55
12	Contoh anomali <i>point</i> pada U_UMPB	57
13	Contoh anomali <i>point</i> pada Fuse1_4	58
14	Contoh anomali kolektif pada atribut tegangan	58
15	Contoh anomali kolektif pada atribut baterai	59
16	Contoh anomali kontekstual pada atribut baterai DS1	59
17	Contoh anomali kontekstual pada atribut baterai DS2	60
18	Contoh perbandingan metrik antara nilai aktual-prediksi pada fitur IBatt1(MOBO-LSTM)	68
19	Contoh perbandingan metrik antara nilai aktual-prediksi pada fitur VBatt3 (MOBO-LSTM)	69
20	<i>Pipeline</i> tiga tahapan penelitian dan pengguna	76

DAFTAR LAMPIRAN

1	<i>Pseudocode Dynamic Weighted Majority</i> (DWM)	92
2	<i>Pseudocode</i> algoritma MOBO-NSGA-II (Tiga Objektif)	93
3	Statistik deskriptif <i>dataset</i>	96
4	Contoh <i>dataset</i> sebagai <i>input</i> LSTM dan <i>baseline</i>	99
5	Tabulasi lengkap <i>true positive outlier</i> oleh ansambel statistika berbasis <i>dynamic weighted majority voting</i>	100
6	Hasil Apriori-Close untuk seluruh <i>dataset</i>	102
7	Hasil <i>tuning</i> MOBO-LSTM	111



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University
— Bogor Indonesia —

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Perpustakaan IPB University