

REKOMENDASI MISI SATELIT LAPAN-IPB BERBASIS PREDIKSI TEGANGAN MENGGUNAKAN *HYBRID DEEP LEARNING* DAN KLASIFIKASI *RANDOM FOREST*

NURROCHMAN FERDIANSYAH



**PROGRAM MAGISTER 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 LAPORAN AKHIR DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Rekomendasi Misi Satelit LAPAN-IPB Berbasis Prediksi Tegangan Menggunakan *Hybrid Deep Learning* dan Klasifikasi *Random Forest*” 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 tesis ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Nurrochman Ferdiansyah
M0503241009



RINGKASAN

NURROCHMAN FERDIANSYAH. Rekomendasi Misi Satelit LAPAN-IPB Berbasis Prediksi Tegangan Menggunakan *Hybrid Deep Learning* dan Klasifikasi *Random Forest*. Dibimbing oleh IMAS SUKAESIH SITANGGANG, MUSHTHOFA dan MOHAMMAD MUKHAYADI.

Data telemetri satelit berisi informasi kondisi muatan dan seluruh subsistem yang terdapat pada satelit. Salah satu faktor penentu misi operasi satelit adalah ketersediaan energi pada baterai, komponen utama penyedia energi saat panel surya tidak menerima sinar matahari. Jika catu energi berhenti dan tidak dapat dipulihkan dalam waktu singkat, kegagalan misi dapat terjadi. Saat ini kelayakan misi satelit LAPAN-IPB dinilai secara manual oleh operator stasiun bumi berdasarkan pengalaman yang terakumulasi. Pendekatan tersebut tidak reproduktibel dan tidak terdokumentasi, sehingga operator yang berbeda dapat menghasilkan keputusan yang berbeda untuk kondisi baterai yang sama. Penjadwalan misi juga belum mempertimbangkan ketersediaan energi baterai yang dihitung menggunakan model tertentu, sehingga kemungkinan kegagalan misi akibat kekurangan energi masih terbuka. Penelitian ini membangun kerangka kerja rekomendasi misi berbasis data yang terdiri atas tiga komponen. Komponen pertama adalah prediksi tegangan baterai menggunakan kombinasi *Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with exogenous variables* (SARIMAX) dengan algoritma *deep learning*, yaitu *Long Short-Term Memory* (LSTM), *Bidirectional LSTM* (BiLSTM), dan *Gated Recurrent Unit* (GRU); tegangan diprediksi oleh SARIMAX, residualnya dimodelkan oleh algoritma *deep learning*, dan kedua hasil dijumlahkan menjadi prediksi final. Komponen kedua adalah karakterisasi profil energi setiap konfigurasi misi menggunakan label misi terkoreksi fisis dan klasifikasi *Random Forest*, yang menjadi dasar penurunan ambang batas energi setiap kelas misi melalui pagar atas Tukey. Komponen ketiga adalah mesin rekomendasi yang membandingkan prediksi tegangan terhadap ambang batas tersebut, lalu mengurutkan misi yang layak berdasarkan margin energi. Hasil pengujian menunjukkan model *hybrid* SARIMAX-LSTM memberikan kinerja prediksi terbaik dengan R^2 sebesar 0,8544, MAE sebesar 0,1042 V, dan MAPE sebesar 0,7604%. Model klasifikasi *Random Forest* pada 20 kelas misi mencapai akurasi 0,8178 dan *F1-weighted* 0,8163 berdasarkan validasi silang *StratifiedKFold* lima lipatan. Ambang batas energi yang diturunkan dari struktur pohon *Random Forest* konsisten dengan ambang batas statistik pada seluruh 20 kelas misi (selisih maksimum 0,0843 V, di bawah toleransi 0,10 V yang setara dengan MAE prediksi), sehingga mesin rekomendasi dapat memberikan keputusan kelayakan misi yang reproduktibel dan terdokumentasi.

Kata kunci: baterai, *deep learning*, mikro satelit, *random forest*, SARIMAX



SUMMARY

NURROCHMAN FERDIANSYAH. Mission Recommendation for LAPAN-IPB Satellite Based on Voltage Prediction Using Hybrid Deep Learning and Random Forest Classification. Supervised by IMAS SUKAESIH SITANGGANG, MUSHTHOFA and MOHAMMAD MUKHAYADI.

Satellite telemetry data contain information on the condition of the payload and every subsystem on board. One of the factors that determines whether a satellite mission can be carried out is the energy available in the battery, the main component that supplies power when the solar panels receive no sunlight. If the power supply stops and cannot be restored quickly, the mission may fail. At present, mission feasibility for the LAPAN-IPB satellite is judged manually by ground station operators based on accumulated experience. This practice is neither reproducible nor documented, so different operators may reach different decisions under the same battery condition. Mission scheduling also does not yet account for battery energy availability estimated through any particular model, which leaves room for mission failure caused by insufficient energy. This study develops a data-driven mission recommendation framework with three components. The first is battery voltage prediction that combines Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average with eXogenous variables (SARIMAX) and deep learning algorithms, namely Long Short-Term Memory (LSTM), Bidirectional LSTM (BiLSTM), and Gated Recurrent Unit (GRU); SARIMAX predicts the voltage, a deep learning model captures the residuals, and the two outputs are summed to produce the final prediction. The second component characterizes the energy profile of each mission configuration using physically corrected mission labels and Random Forest classification, from which a per-class energy threshold is derived through the Tukey upper fence. The third component is a recommendation engine that compares the predicted voltage against these thresholds and ranks feasible missions by their energy margin. Testing shows that the hybrid SARIMAX-LSTM model gives the best predictive performance, with an R^2 of 0.8544, an MAE of 0.1042 V, and a MAPE of 0.7604%. The Random Forest classifier reaches an accuracy of 0.8178 and a weighted F1 of 0.8163 across 20 mission classes under five-fold StratifiedKFold cross-validation. The energy thresholds derived from the Random Forest tree structure agree with the statistical thresholds for all 20 mission classes, with a maximum difference of 0.0843 V, below the 0.10 V tolerance that matches the prediction MAE. The recommendation engine can therefore produce mission feasibility decisions that are reproducible and documented.

Keywords: battery, deep learning, micro satellite, random forest, SARIMAX



@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.



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.

REKOMENDASI MISI SATELIT LAPAN-IPB BERBASIS PREDIKSI TEGANGAN MENGGUNAKAN *HYBRID DEEP LEARNING* DAN KLASIFIKASI *RANDOM FOREST*

NURROCHMAN FERDIANSYAH

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister Komputer
pada
Program Magister Ilmu Komputer

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



@Hak cipta milik IPB University

IPBUniversity



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:
Dr. Medria Kusuma Dewi Hardhienata, S.Komp



@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.



Hak cipta milik IPB University

IPB University

Judul Proposal : Rekomendasi Misi Satelit LAPAN-IPB Berbasis Prediksi
Tegangan Menggunakan *Hybrid Deep Learning* dan

Klasifikasi

Random Forest

Nama : Nurrochman Ferdiansyah

NIM : M0503241009

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

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

Pembimbing 2:

Dr. Mushthofa, S.Kom., M.Sc.

Pembimbing 3:

Dr. -Ing. Mohammad Mukhayadi, S.T., M.Kom.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Toto Haryanto S.Kom., M.Si.
NIP. 198211172014041001

Dekan Sekolah Sains Data, Matematika, dan Informatika:

Prof. Dr. Ir. Agus Buono, M.Si., M.Kom.
NIP. 196607021993021001

Tanggal Ujian:

15 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.



@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 ke hadirat Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Penelitian ini mengangkat tema pemanfaatan data telemetri satelit, dengan judul "Rekomendasi Misi Berbasis Data Untuk Satelit LAPAN-IPB Menggunakan Prediksi Tegangan *Hybrid Deep Learning* dan Klasifikasi *Random Forest*". Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama proses penyusunan karya ilmiah ini. Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada:

1. Kedua orang tua penulis, almarhum Bapak Sulaeman Sahir dan almarhumah Ibu Rubaeah. Meskipun keduanya tidak sempat menyaksikan penyelesaian karya ini, doa, didikan, dan teladan yang beliau tanamkan senantiasa menjadi bekal penulis dalam setiap langkah. Semasa hidupnya, Ibu sangat ingin melihat anaknya menyelesaikan pendidikan magister, dan keinginan beliau itulah yang menjadi motivasi terbesar penulis untuk menuntaskan studi ini.
2. Ibu Prof. Dr. Imas Sukaesih Sitanggang, S.Si., M.Kom. selaku ketua komisi pembimbing, Bapak Dr. Mushthofa, S.Kom., M.Sc. selaku pembimbing kedua, dan Bapak Dr.-Ing. Mohammad Mukhayadi, S.T., M.Kom., selaku pembimbing dari BRIN yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan ilmu yang sangat berharga, serta kesabaran dan keikhlasan dalam membimbing penulis selama proses penelitian hingga penyusunan karya ilmiah ini.
3. Istri tercinta, Ratu Nabilla Putri Irnawan, atas kesabaran, pengertian, dan dukungan yang tidak pernah putus selama penulis menempuh pendidikan ini, serta ketiga buah hati penulis, Raden Naufal Artanabel Ferdiansyah, Raden Noor Asshauqi Ferdiansyah, dan Raden Malik Ibrahim Ferdiansyah, yang menjadi sumber semangat terbesar bagi penulis.
4. Seluruh dosen dan staf Departemen Ilmu Komputer IPB atas ilmu, bantuan, dan kerja samanya selama perkuliahan, serta rekan-rekan di Pusat Riset Teknologi Satelit BRIN dukungan dalam menyelesaikan penelitian ini.
5. Bapak mertua Raden Herry Irnawan dan Ibu mertua Ernie Yudiawati atas doa, dukungan, dan perhatian yang tiada henti kepada penulis dan keluarga.
6. Kakak penulis, Rochaniah, yang selalu memberikan semangat dan doa dalam setiap tahapan studi penulis.
7. Rekan-rekan Program Magister Ilmu Komputer IPB serta semua pihak yang telah membantu dan mendukung penyelesaian karya ilmiah ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Diharapkan karya ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang memerlukannya serta berkontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan.

Bogor, Agustus 2026

Nurrochman Ferdiansyah



@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	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Misi Operasi Satelit LAPAN- IPB	5
2.2 Sistem Catu Daya Pada Satelit LAPAN-IPB	6
2.3 Analisis Data <i>Time Series</i>	7
2.4 <i>Deep Learning</i>	13
2.5 Penelitian Terkait	16
2.6 <i>Long Short-Term Memory (LSTM)</i>	23
2.7 <i>Bidirectional Long Short Term Memory (Bi-LSTM)</i>	25
2.8 <i>Gate Recurrent Unit</i>	27
2.9 <i>Random Forest</i>	28
2.10 Optimasi <i>Hyperparameter</i> dengan Optuna	31
2.11 Pagar Tukey (Tukey's <i>Fence</i>)	32
2.12 <i>Pseudo-Replication</i> dalam Klasifikasi Deret Waktu	33
III METODE	34
3.1 Data Penelitian	34
3.2 Tahapan Penelitian	35
3.3 Model Prediksi <i>Hybrid SARIMAX-Deep Learning</i>	38
3.4 Pembuatan Label Misi	41
3.5 Sistem Rekomendasi Misi	48
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Praproses Data dan Pembuatan Label	49
4.2 Prediksi Tegangan Baterai	52
4.3 Klasifikasi Misi	57
4.4 Validasi Ambang Batas	58
4.5 Sistem Rekomendasi Misi	60
V SIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Simpulan	62
5.2 Saran	62
DAFTAR PUSTAKA	64
RIWAYAT HIDUP	70

DAFTAR TABEL

1	Kelebihan dan kekurangan metode berbasis model dan berbasis data	16
2	Ringkasan penelitian terkait sebelumnya	17
3	Atribut <i>dataset</i>	34
4	Fitur masukan <i>random forest</i> , alasan pemilihan, dan <i>gini importance</i>	45
5	Ruang pencarian <i>hyperparameter random forest</i> (optuna tpe, 50 trial)	45
6	Komposisi pass berdasarkan jumlah konfigurasi misi yang berbeda	49
7	Ringkasan <i>dataset</i> pada kedua <i>pipeline</i> analisis	51
8	Performa prediksi tegangan baterai pada data uji	52
9	Validasi silang stratifiedkfold 5-fold <i>random forest</i>	57
10	Ambang batas atas tukey tiap kelas dari data <i>pass-label</i>	58
11	Validasi ambang batas: statistik vs <i>leaf-node</i>	59

DAFTAR GAMBAR

1	Orbit satelit LAPAN-A3/LAPAN-IPB	5
2	Satelit LAPAN-IPB	6
3	Sistem catu daya satelit LAPAN-IPB	7
4	Perbandingan bentuk grafik komponen <i>time series</i>	9
5	Taksonomi AI	14
6	Tinjauan skematik model <i>deep learning</i>	15
7	Orbit satelit LEO	19
8	Struktur LSTM	23
9	<i>Random forest</i> untuk menentukan <i>window size</i>	25
10	Struktur Bi-LSTM	26
11	Metodologi prediksi tegangan dengan BiLSTM	27
12	Struktur GRU	27
13	Seleksi fitur pada parameter yang tersedia	28
14	Visualisasi <i>leaf-node</i> pada <i>decision tree</i>	30
15	<i>Pseudo-replication</i> dalam klasifikasi deret waktu	33
16	Tahapan penelitian	35
17	Susunan hierarki <i>fuse</i> dan <i>switch</i>	42
18	<i>Switch register</i> yang dikoreksi secara fisis	43
19	Agregasi <i>pass-label</i>	44
20	Distribusi kelas <i>pass-label</i>	50
21	Rata-rata tegangan perbulan	52
22	Hasil dekomposisi data tegangan	53
23	Prediksi v_{batt} terhadap nilai aktual pada data uji. (a) SARIMAX; (b) LSTM; (c) <i>Hybrid</i> SARIMAX-LSTM	56
24	Konsistensi ambang batas: statistik vs <i>leaf-node</i> rf	60
25	Skenario rekomendasi misi	61