

Seminar Tugas Akhir

Pemodelan Termal Semi-empiris Satelit LAPAN-A3 Menggunakan Metode Machine Learning

Ricky Sutardi 13617051

Dosen Pembimbing :
Dr. Eng. Ridanto Eko Poetro ST,M.Sc.
Dr. Robertus Heru Triharjanto, M.Sc.
Luqman Fathurrohlim ST, M.T.

8 Agustus 2022



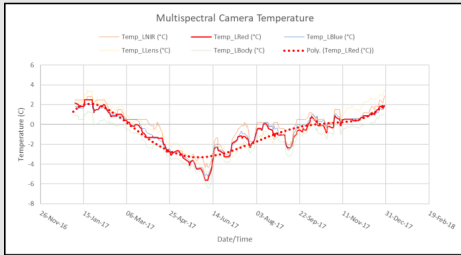
Garis Besar Presentasi

- 1 Bab 1 - Pendahuluan
- 2 Bab 2 - Tinjauan Pustaka
- 3 Bab 3 - Pembuatan Model Termal Satelit LAPAN-A3
- 4 Bab 4 - Hasil dan Analisis
- 5 Bab 5 - Kesimpulan dan Saran



Latar Belakang

Grafik suhu *multispectral imager* LAPAN-A3 sepanjang tahun 2017



- LAPAN-A3 adalah satelit hasil kerja sama antara Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) dengan Institut Pertanian Bogor (IPB) yang diluncurkan pada 2016 [1]
- Sistem kendali termal satelit LAPAN-A3 tidak mampu menjaga suhu *payload* utama *multispectral imager* di atas 0 °C sepanjang tahun [2]
- Operator LAPAN harus memberikan perintah manuver khusus secara periodik untuk menaikkan suhu *multispectral imager*
- Dibutuhkan sebuah model termal sederhana yang dapat memprediksi suhu sisi-sisi satelit agar permasalahan tidak terulang pada desain satelit LAPAN selanjutnya



Latar Belakang

- Pemodelan termal satelit konvensional membutuhkan perhitungan numerik yang kompleks [3] atau perangkat lunak komersial khusus [4]
- Metode *machine learning* sudah umum digunakan dalam analisis termal satelit karena dapat mengurangi kompleksitas dan jumlah perhitungan dalam pemodelan termal satelit [5][6][7]
- Akan dibuat sebuah model termal semi-empiris menggunakan metode regresi linear *machine learning* yang dapat memprediksi perubahan suhu sisi-sisi satelit LAPAN-A3
- Model termal LAPAN-A3 tersebut dilatih, diuji, dan dievaluasi berdasarkan data telemetri aktual satelit LAPAN-A3 pada periode observasi 19 dan 20 Mei 2018



Rumusan Masalah

- 1 Bagaimana pemodelan termal semi-empiris satelit LAPAN-A3 menggunakan metode *machine learning* dapat dilakukan?
- 2 Bagaimana perbandingan perubahan suhu sisi-sisi satelit hasil prediksi model termal satelit dengan data telemetri satelit?
- 3 Bagaimana performa model termal satelit yang dihasilkan?



Tujuan Penelitian

- 1 Melakukan penjabaran langkah-langkah untuk membuat model termal satelit *node* banyak secara semi-empiris menggunakan metode *machine learning*
- 2 Membuat model termal satelit yang dapat memprediksi perubahan suhu sisi-sisi satelit LAPAN-A3
- 3 Membandingkan perubahan suhu *node* satelit hasil prediksi model termal dengan data telemetri satelit
- 4 Menganalisis performa hasil prediksi dari model termal satelit yang telah dibuat

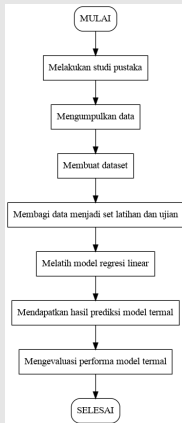


Batasan Penelitian

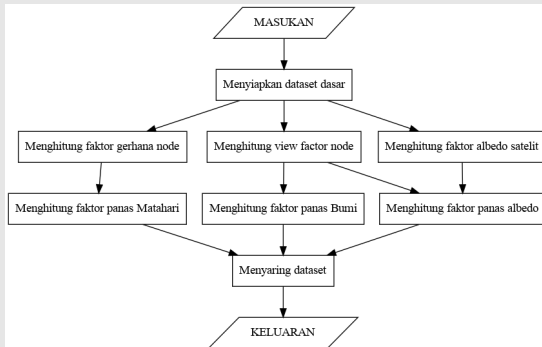
- 1 Pemodelan termal satelit LAPAN-A3 dilakukan untuk periode observasi 19 dan 20 Mei 2018
- 2 Selama periode observasi, satelit dianggap tidak mengalami perubahan massa dan karakteristik termal
- 3 Satelit LAPAN-A3 dianggap berbentuk balok dan dibagi menjadi 7 *node* mewakili 6 sisi satelit dan plat tengah satelit dengan aturan konversi sumbu menjadi nomor *node* sebagai berikut : $X+ = 1$, $X- = 2$, $Y+ = 3$, $Y- = 4$, $Z+ = 5$, $Z- = 6$, serta plat tengah = 7



Metodologi penelitian



Algoritma pembuatan dataset



Kode sumber pemrograman karya tulis dapat diakses di <https://github.com/sutricky/a3thermalmodel>



Sistematika Penulisan

1 Bab 1 Pendahuluan

Bab ini membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan penelitian, metodologi karya tulis, dan sistematika penulisan.

2 Bab 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas dasar teori yang digunakan dalam rangka pengerjaan karya tulis ini.

3 Bab 3 Pembuatan Model Termal Satelit LAPAN-A3

Bab ini menjabarkan langkah-langkah untuk membuat model termal semi-empiris satelit LAPAN-A3 dengan menggunakan metode *machine learning*.

4 Bab 4 Hasil dan Analisis

Bab ini berisi hasil prediksi suhu sisi-sisi satelit LAPAN-A3 serta analisis performa model termal satelit LAPAN-A3 yang dihasilkan dari bab sebelumnya.

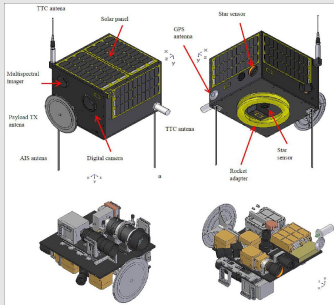
5 Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian selanjutnya.



Satelit LAPAN-A3

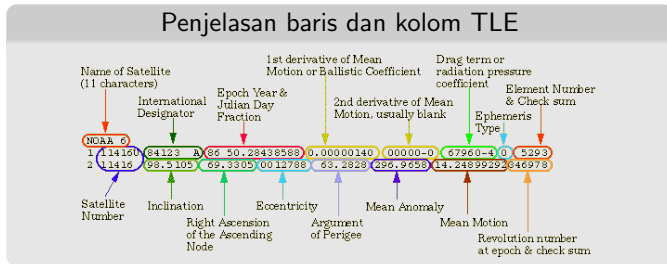
Desain LAPAN-A3



- Memiliki misi utama berupa observasi Bumi untuk ketahanan pangan Indonesia
- Membawa 4 *payload* : *multispectral imager*, *digital space camera*, *automatic identification system*, dan *experimental thermal imager* [8]
- Memiliki orbit lingkaran *sun-synchronous* dengan ketinggian 515 km dan inklinasi 97.5°
- Menggunakan 5 panel surya yang tersebar di 4 sisi satelit sebagai sumber energi
- Ke-enam sisi satelit dilengkapi sensor untuk mendeteksi arah sinar Matahari

Two-line Element

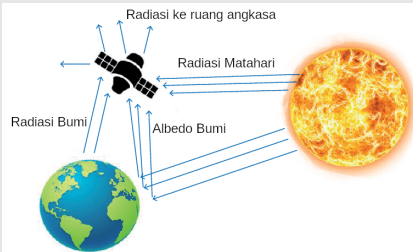
- Format data untuk mendeskripsikan parameter orbit objek ruang angkasa
- Dirilis ke publik secara berkala oleh *United States Space Command* (USSPACECOM)
- Digunakan untuk mensimulasikan orbit satelit sehingga vektor posisi dan kecepatan satelit pada suatu waktu dapat dihitung



Pemodelan Termal Satelit

Sumber perpindahan panas satelit

- Internal : konduksi, konveksi, dan radiasi antar komponen satelit
- Eksternal : radiasi dari Matahari, radiasi dari Bumi, albedo dari Bumi, dan radiasi ke ruang angkasa



Sumber perpindahan panas eksternal satelit yang mengorbit Bumi [9]

- Pemodelan termal satelit bertujuan untuk memodelkan karakteristik termal satelit
- Dilakukan dengan menyelesaikan persamaan keseimbangan termal satelit lewat analisis perpindahan panas satelit
- Model termal satelit semi-empiris menggunakan asumsi, pendekatan, dan generalisasi untuk menyederhanakan perhitungan teoretis sesuai hasil observasi pada satelit
- Satelit dimodelkan lewat titik analisis diskrit (*node*) yang diasumsikan memiliki suhu dan karakteristik termal yang sama
- Persamaan keseimbangan termal satelit LAPAN-A3 dilinearisasi menjadi persamaan laju perubahan suhu *node* satelit
- Persamaan laju perubahan suhu *node* satelit diselesaikan menggunakan metode regresi linear *machine learning*



Pemodelan Termal Satelit

Persamaan termal satelit LAPAN-A3

Persamaan laju perubahan suhu *node i* pada model satelit LAPAN-A3 dengan *N* node yang sudah memperhitungkan sumber-sumber perpindahan panas dan interaksi dengan *node-node* lain *j* [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta T_i}{\Delta t} = & \frac{c_S}{C_i l_0} I_i(t) F_{e,i}(t) \\ & + \frac{c_a}{C_i} F_{i,E}(t) F_a(t) \\ & + \frac{c_E}{C_i} F_{i,E}(t) T_i(t)^4 \\ & - \frac{\left(\sum_{j=1, j \neq i}^N \sigma R_{ij} + c_{env} \right)}{C_i} T_i(t)^4 \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{G_{ij}}{C_i} (T_j(t) - T_i(t)) \\ & + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \frac{\sigma R_{ij}}{C_i} T_j(t)^4 \\ & + \frac{\dot{Q}_{dis,i}}{C_i} \end{aligned} \quad (1)$$

Keterangan

- ΔT_i Perubahan suhu *node i*
- Δt_i Selang waktu
- C_i Kapasitas termal *node i*
- c_S Koefisien suku panas akibat Matahari
- I_i Arus sensor Matahari *node i*
- l_0 Arus maksimum sensor Matahari satelit
- $F_{e,i}$ Faktor gerhana *node i*
- c_a Koefisien suku panas akibat albedo
- $F_{i,E}$ Nilai *view factor* dari *node i* ke Bumi
- F_a Faktor albedo satelit
- c_E Koefisien suku panas akibat Bumi
- T_i, T_j Suhu *node*
- σ Konstanta Stefan-Boltzmann
- R_{ij} Koefisien kopling radiasi antara *node i* dan *node j*
- c_{env} Koefisien suku disipasi ke lingkungan ruang angkasa
- G_{ij} Koefisien kopling konduksi antara *node i* dan *node j*
- $\dot{Q}_{dis,i}$ Laju masukan panas akibat disipasi elektrik *node i*



Persamaan Termal Satelit LAPAN-A3

- Pemodelan termal konvensional mengharuskan perhitungan semua variabel pada ruas kanan Persamaan (1)
- Dengan regresi linear, variabel yang masih harus dicari hanya variabel yang berubah terhadap waktu (diberi tanda (t) pada Persamaan (1))

View factor *node* satelit ke Bumi

- Nilai *view factor* merupakan proporsi radiasi dari suatu permukaan yang diterima oleh permukaan lain
- Karena satelit dianggap berbentuk balok dan jauh lebih kecil dibandingkan Bumi, *view factor node* satelit ke Bumi didekati dengan *view factor* plat persegi panjang ke bola

Faktor gerhana *node* satelit

Bernilai 1 jika *node* menerima sinar Matahari dan 0 jika tidak

Faktor albedo satelit

$$F_a = \left(\frac{1 + \cos \phi}{2} \right)^2 \left[1 - \left(\frac{\phi}{\phi_{es}} \right)^2 \right] F_e \quad (2)$$

Keterangan

F_a Faktor albedo satelit

ϕ Posisi sudut satelit

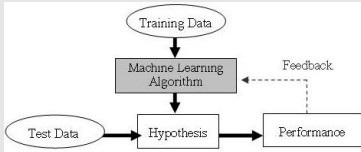
ϕ_{es} Posisi sudut satelit saat memasuki fase gerhana

F_e Faktor gerhana satelit; bernilai 0 jika satelit dalam fase gerhana dan 1 jika tidak



Machine Learning

Cara kerja metode *machine learning*



- 1 Dataset dibagi menjadi set latihan dan ujian
- 2 Dataset latihan dijadikan data masukan algoritma *machine learning*
- 3 Algoritma *machine learning* akan membuat hipotesis berupa model yang menjelaskan hubungan antar data masukan
- 4 Hipotesis diterapkan pada set ujian untuk mendapatkan keluaran hasil
- 5 Hasil keluaran model dievaluasi dan dijadikan umpan balik

- Bidang yang mempelajari metode dan algoritma komputer yang dapat menggunakan data untuk meningkatkan performa dalam mengerjakan serangkaian tugas secara otomatis [11]
- Algoritma *machine learning* mampu mempelajari sendiri karakteristik permasalahan yang harus diselesaikan dari kumpulan data yang diberikan
- Umum digunakan pada permasalahan yang melibatkan data dalam jumlah banyak



Aplikasi *machine learning* dalam pemodelan termal satelit

- Metode *machine learning* digunakan untuk membuat model regresi linear persamaan termal satelit LAPAN-A3
- Model *machine learning* dilatih dengan data masukan parameter satelit dan data keluaran laju perubahan suhu *node*
- Algoritma *machine learning* akan mencari koefisien suku-suku persamaan laju perubahan suhu *node* yang dapat memetakan data masukan ke data keluaran
- Model termal yang dihasilkan kemudian digunakan untuk memprediksi suhu *node-node* satelit

Evaluasi performa model *machine learning*

- 1 Skor koefisien determinasi (R^2) [12]
 - Mengukur akurasi model dalam memprediksi tren data observasi
 - Bernilai maksimum 1
 - Semakin tinggi, semakin dekat tren hasil prediksi model dengan data observasi
 - Menunjukkan proporsi variasi nilai data observasi yang dapat diprediksi model
- 2 Nilai *root mean-square error* (RMSE) [13]
 - Mengukur akurasi model dalam memprediksi nilai data observasi
 - Selalu bernilai positif
 - Semakin rendah, semakin dekat hasil prediksi model dengan nilai data observasi
 - Bergantung pada skala dan jumlah dataset model



Perangkat Lunak

Pemrograman dilakukan dalam bahasa Python dan modul yang digunakan adalah sebagai berikut :

- 1 Pandas
- 2 Numpy
- 3 Matplotlib
- 4 Scikit-learn
- 5 Skyfield
- 6 Scipy



Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan berupa data telemetri aktual LAPAN-A3 dan data TLE. Data telemetri dikumpulkan dari data internal LAPAN dan data TLE dikumpulkan dari situs Celestrak.

Contoh data telemetri satelit LAPAN-A3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Date & Time	Date	Time	Duration (Second)	Delta	T_X+	T_X-	T_Y+	T_Y-	T_Z+	T_Z-	T_Mid	CSS_XP
2	5/19/2018 0:00	19/05/2018	0:00:20	0		12.25	1.01	-3.39	20.07	5.9	0.52	7.36	222.52
3	5/19/2018 0:02	19/05/2018	0:02:20	120	120	12.74	0.52	-1.43	22.02	5.9	0.52	7.85	221.04
4	5/19/2018 0:04	19/05/2018	0:04:19	240	120	12.74	0.52	-3.39	20.07	5.9	0.52	7.36	0
5	5/19/2018 0:06	19/05/2018	0:06:20	360	120	11.76	0.52	-3.39	18.12	5.41	0.52	7.36	0
6	5/19/2018 0:08	19/05/2018	0:08:19	480	120	10.3	0.52	-3.39	14.21	4.92	0.52	7.36	0
7	5/19/2018 0:10	19/05/2018	0:10:19	600	120	9.32	0.52	-3.39	12.25	4.43	0.52	7.36	0
8	5/19/2018 0:12	19/05/2018	0:12:20	720	120	8.34	0.52	-3.39	10.3	3.94	0.03	7.36	0

Contoh data TLE satelit LAPAN-A3

```
1 41603U 16040E 18139.10094921 .00000217 00000-0 13416-4 0 9992
2 41603 97.4137 201.1487 0013112 349.7192 99.9115 15.19557321105664
```



Pembuatan Dataset

Pembuatan dataset terbagi menjadi 3 tahapan besar :

- 1 Persiapan dataset dasar
- 2 Perhitungan faktor termal satelit
- 3 Penyaringan dataset

1. Persiapan dataset dasar

Mengubah data mentah yang sudah dikumpulkan (data telemetri dan TLE) menjadi bentuk dan satuan yang dibutuhkan

2. Perhitungan faktor termal satelit

Menghitung variabel-variabel yang belum diketahui pada Persamaan (1)

3. Penyaringan dataset

Menyaring dataset berdasarkan kriteria :

- 1 Selang waktu antar pengamatan maksimal 120 s
- 2 Skor standar suhu *node* satelit memiliki rentang -3 sampai dengan 3
- 3 Skor standar laju perubahan suhu *node* satelit berkisar dari -3 sampai dengan 3

Skor standar [14]

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

Keterangan :

- z Skor standar data
- x Nilai data
- μ Rata-rata dataset
- σ Standar deviasi dataset



Pelatihan dan Pengujian Model

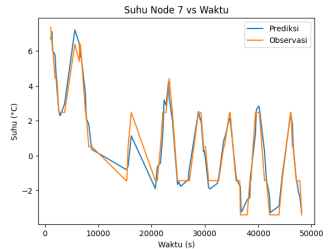
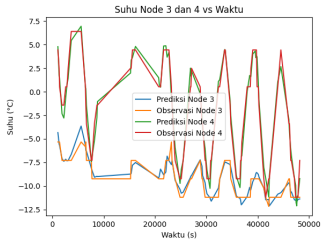
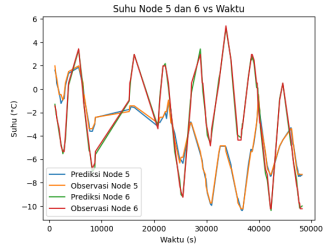
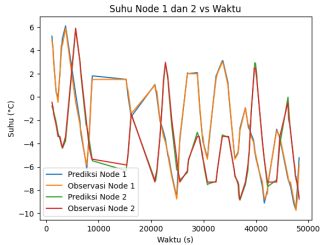
- Dataset dibagi menjadi set latihan dan ujian
- Set latihan digunakan untuk melatih model menyelesaikan Persamaan (1)
- Set ujian digunakan untuk menghasilkan prediksi suhu *node* satelit
- Persentase jumlah set latihan dibanding set ujian adalah 70%:30%

Detail jumlah dataset model *machine learning*

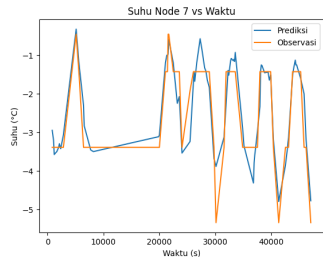
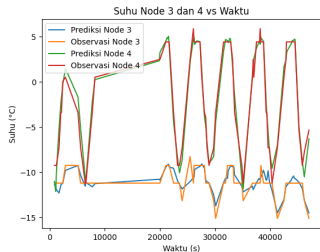
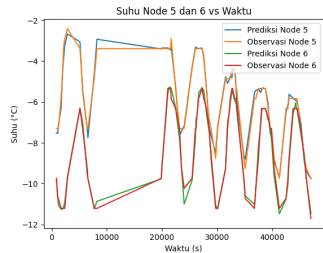
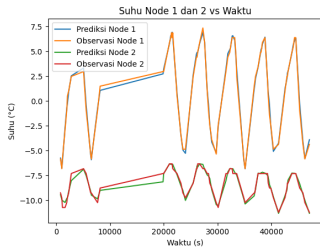
Tanggal	Dataset	
	Set latihan	Set ujian
19 Mei 2018	201	87
20 Mei 2018	180	78



Hasil Pemodelan Termal Satelit LAPAN-A3 - 19 Mei 2018

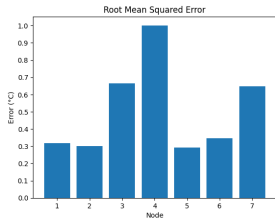
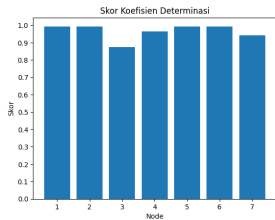


Hasil Pemodelan Termal Satelit LAPAN-A3 - 20 Mei 2018

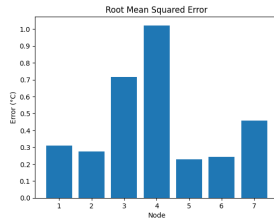
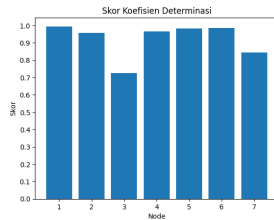


Hasil Pemodelan Termal Satelit LAPAN-A3

19 Mei 2018



20 Mei 2018

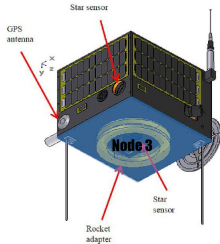


Hasil Pemodelan Termal Satelit LAPAN-A3

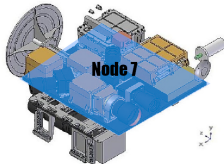
- Secara kualitatif, model termal dapat menangkap tren dan nilai perubahan suhu *node-node* satelit selama periode observasi
- Secara kuantitatif, 5 dari 7 *node* satelit menghasilkan skor R^2 lebih besar dari 0.95 dan 6 dari 7 *node* memiliki nilai RMSE lebih kecil dari 1 °C pada kedua periode observasi
- Artinya, model termal dapat memprediksi lebih dari 95% tren perubahan suhu pada 5 *node* dan memiliki rata-rata deviasi standar kesalahan prediksi suhu di bawah 1 °C untuk 6 *node*
- Skor R^2 paling rendah dimiliki *node* 3 dan disusul oleh *node* 7 untuk kedua periode observasi
- Nilai RMSE maksimum dimiliki *node* 4 dengan nilai 1 °C untuk kedua periode observasi



Analisis Penyebab Ketidakakuratan Model Termal



Gambar: Ilustrasi letak *node 3*



Gambar: Ilustrasi letak *node 7*

Kapasitas termal rata-rata *node*

- *Node* dari komponen dengan material berbeda akan memiliki rentang nilai kapasitas termal *node* yang besar
- Rentang kapasitas termal besar dapat menyebabkan perbedaan perubahan suhu antar komponen-komponen
- Terdapat *rocket adapter* dan *separation ring* pada *node 3* sedangkan *node 7* mencakup banyak komponen elektronik satelit

Asumsi bentuk satelit

- Satelit diasumsikan berbentuk balok sehingga *node-node* dianggap bentuk plat persegi panjang
- Ada komponen satelit yang tidak berbentuk persegi panjang seperti antenna dan kamera



Analisis Penyebab Ketidakakuratan Model Termal

Pengaruh perubahan suhu *node* lain

- Persamaan laju perubahan suhu *node* pada Persamaan (1) menunjukkan bahwa perubahan suatu *node* juga dipengaruhi perubahan suhu *node-node* lain
- Diperlukan analisis lebih lanjut untuk menentukan variabel dominan yang mungkin menyumbang *error* besar pada Persamaan (1)
- Jika ditemukan bahwa perubahan suhu *node* 4 didominasi oleh perubahan suhu *node* 3 dan 7, penjelasan sebelumnya dapat dipakai
- Sebaliknya, jika berbeda, hasil analisis dapat digunakan untuk melihat suku mana yang harus dihitung lebih akurat



Kesimpulan

- Langkah-langkah pemodelan termal semi-empiris satelit menggunakan metode *machine learning* sudah didapatkan
- Algoritma pemodelan termal yang dapat memprediksi suhu sisi-sisi satelit LAPAN-A3 sudah berhasil diimplementasikan
- Secara umum, model termal LAPAN-A3 dapat memprediksi tren dan nilai perubahan suhu sisi-sisi satelit
- Untuk kedua periode observasi, prediksi 5 dari 7 *node* satelit menghasilkan skor R^2 lebih besar dari 0.95 dan 6 dari 7 *node* satelit menghasilkan nilai RMSE lebih kecil dari 1 °C.



- 1 Menambah jumlah *node* yang dimodelkan sehingga karakteristik termal satelit dapat termodelkan lebih menyeluruh
- 2 Mengubah asumsi yang digunakan pada *node* satelit untuk memodelkan perilaku *node* satelit lebih akurat
- 3 Melakukan analisis lebih lanjut untuk menghitung kontribusi tiap suku dalam persamaan termal satelit
- 4 Memperpanjang durasi periode observasi sehingga masukan data yang dapat digunakan juga bertambah
- 5 Menggunakan data dari periode observasi saat satelit melakukan maneuver agar model termal dapat mengakomodasi efek perubahan sikap satelit lebih baik



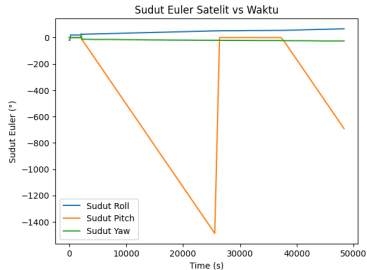
Daftar Pustaka

- [1] W. Hasbi and S. Suhermanto, "Development of LAPAN-A3 / IPB Satellite an Experimental Remote Sensing Microsatellite," in *34th Asian Conference on Remote Sensing 2013*. Curran Associates, Inc.
- [2] A. Z. Ribah, S. Utama, and P. R. Hakim, "Maneuver Strategy for Increasing Multispectral Imager Temperature on LAPAN A3/IPB Microsatellite," in *2019 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*. IEEE, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8914339/>
- [3] T. K. Das, "A Simple Thermal Design Procedure for Micro- and Nano- satellites with Deployable Solar Array Panel," p. 20.
- [4] A. Boudjemai, R. Hocine, and M. N. Sweeting, "Thermal analysis of the Alsat-1 satellite battery pack sub assembly into the honeycomb panel," in *2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*. IEEE, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7233011/>
- [5] J. Junior, A. Ambrosio, and F. Sousa, "Real-Time Cubesat Thermal Simulation using Artificial Neural Networks," vol. 8, no. 2. [Online]. Available: <http://epacis.net/jcis/10.6062jcis.2017.08.02.0126.php>
- [6] E. Escobar, M. Diaz, and J. C. Zagal, "Evolutionary design of a satellite thermal control system: Real experiments for a CubeSat mission," vol. 105, pp. 490–500. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116303167>
- [7] Y. Xiong, L. Guo, D. Tian, Y. Zhang, and C. Liu, "Intelligent Optimization Strategy Based on Statistical Machine Learning for Spacecraft Thermal Design," vol. 8, pp. 204268–204282. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9250429/>
- [8] R. Hartono, P. Hakim, A. Syafrudin, M. Dawami, and W. Hasbi, "Performance of thermal imager on LAPAN-A3/IPB satellite compare with thermal band Landsat imager," vol. 284, no. 1, p. 012043. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/284/1/012043>
- [9] H. S. Abdelkhalek, I. Ziedan, and M. Amal, "Simulation and Prediction for a Satellite Temperature Sensors Based on Artificial Neural Network," p. e3718. [Online]. Available: <http://www.scielo.br/pdf/jatm/v11/2175-9146-jatm-11-e3719.pdf>
- [10] I. Martínez, *Spacecraft Thermal Control Modelling and Testing*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio - Universidad Politécnica de Madrid. [Online]. Available: <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidorotc3/Spacecraft%20Thermal%20Modelling%20and%20Testing.pdf>
- [11] T. M. Mitchell, *Machine Learning*, ser. McGraw-Hill Series in Computer Science. McGraw-Hill.
- [12] Gupta, *Introduction to Machine Learning in the Cloud with Python*. Springer International Publishing. [Online]. Available: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-030-71270-9>
- [13] A. Zheng, "Evaluating Machine Learning Models," p. 58.
- [14] L. Massaron and A. Boschetti, "Regression Analysis with Python," p. 416.



Appendix A - Grafik Sikap Satelit LAPAN-A3 vs Waktu

19 Mei 2018



20 Mei 2018

