

Sistem 3D Monitoring Lintasan Roket Menggunakan Sensor IMU dan Kalman Filter

Ahmad Fahriannur^{*)1}, Cahyaning Nur Karimah²

^{1,2}Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Jember

^{*)}Corresponding author, ahmad_fahriannur@polije.ac.id

Abstrak	INFO.
<p>Kompetisi Muatan Roket Indonesai Merupakan ajang kompetisi yang diselenggarakan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Sensor Inertial Measurement Unit (IMU) ditempatkan kedalam muatan roket yang berfungsi untuk mendeteksi akselerasi dan kemiringan roket. Ketika roket diluncurkan, muatan berisi sensor dan perangkat kontrol mengirimkan data melalui gelombang radio secara <i>real time</i> ke <i>ground control station</i> (GCS) sebagai penerima untuk pengolahan data sensor. Penelitian ini membahas mengenai penerapan sensor IMU sebagai estimasi jarak peluncuran roket menggunakan metoda integral ganda, yang lintasan pegerakannya tergambar dalam bentuk grafik koordinat 3D. Kalman filter digunakan untuk mengurangi derau/<i>noise</i> pada sensor IMU supaya estimasi jarak terukur nya menjadi lebih akurat. Roket diluncurkan dilepas pantai menghadap ke arah laut dengan sudut elevasi 75°. Hasil pengujian menunjukkan lintasan roket pada kordinat (x,y,z) berhasil ditampilkan dengan koordinat awal (0,0,0) ke koordinat (414, 0, 891). Pengukuran estimasi jarak didapatkan bahwa ketinggian roket terukur sebesar ± 891 meter dan jarak horizontal dari tempat peluncuran adalah sebesar ± 414 meter.</p>	<p>Info. Artikel: No. 406 Received. June, 09, 2023 Revised. July, 13, 2023 Accepted. July, 19, 2023 Page. 397 - 403</p> <p>Kata kunci: ✓ IMU ✓ Lintasan ✓ Roket ✓ Kalman Filter ✓ Integral</p>
<p>Abstract</p> <p><i>Indonesian Rocket Payload Competition is a competition organized by Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). The Inertial Measurement Unit (IMU) sensor is placed into the rocket payload which functions to detect the acceleration and tilt of the rocket. When the rocket is launched, the payload containing sensors and control devices transmitted data via radio waves in real time to the ground control station (GCS) as a receiver for sensor data processing. This study discusses the application of the IMU sensor as an estimate of the distance of a rocket launch using the double integral method, the trajectory of which is depicted in the form of a 3D coordinate graph. The Kalman filter is used to reduce noise on the IMU sensor so that the estimation of the measured distance becomes more accurate. The rocket is launched offshore facing the sea at an elevation angle of 75o. The test results show that the rocket trajectory at coordinates (x,y,z) is successfully displayed from the initial coordinates (0,0,0) to coordinates (414, 0, 891). The estimated distance measurement found that the measured height of the rocket was + 891 meters and the horizontal distance from the launch site was + 414 meters</i></p>	

PENDAHULUAN

Kompetisi Muatan Roket Indonesai Merupakan ajang kompetisi yang diselenggarakan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN). Roket berukuran Panjang 1230 lebar 76 mm yang disediakan oleh LAPAN yang didalamnya terdapat muatan diluncurkan menghadap ke laut dengan sudut elevasi yang telah ditentukan [1]. Sensor IMU (Inertial Measurement Unit) merupakan salah satu sensor yang ditempatkan ke muatan roket yang didalamnya terdapat sensor percepatan / akselerasi untuk mendeteksi besar percepatan gravitasi dan percepatan gerak Obyek serta kemiringan obyek.

Beberapa penelitian terkait dengan penerapan IMU diantaranya adalah Erwani menerapkan sensor IMU pada kendaraan bermotor untuk mengetahui kemiringan kendaraan saat berbelok dengan menggunakan metode *Least Square* [2]. Kalman filter digunakan oleh Sandi untuk mereduksi derau /

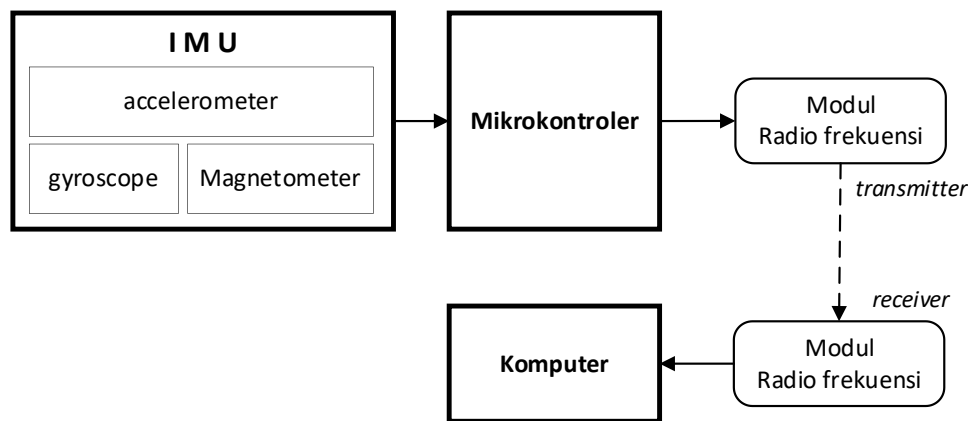
noise pada sensor IMU yang diterapkan untuk mendeteksi *attitude* obyek berupa sudut orientasi *pitch*, *roll*, dan *yaw* [3]. Roma dan Wahyu mengolah data *accelerometer* pada sensor IMU untuk direduksi derau / *noise* nya menggunakan Kalman filter. Data yang telah difilter kemudian di integralkan sebanyak 2 kali untuk diperoleh estimasi jarak terukur[4]. Penelitian ini difokuskan pada tingkat ketelitian pembacaan estimasi jarak sensor Ketika bergerak dan berhenti dengan mengoptimalkan pemodelan pada Kalman filter [5-8]. Mudaris [9] menerapkan sensor IMU pada Kompetisi Muatan Roket Indonesia yang digunakan untuk mengukur kecepatan, percepatan, dan arah roket ketika peluncuran.

Roket dihadapkan ke atas dengan sudut elevasi 75° kemudian meluncur dengan ketinggian maksimal ± 500 meter [10]. Pada ketinggian tersebut, sangat sulit dilihat dengan mata mengenai pergerakan roket ketika peluncuran, apakah melaju lurus atau terdapat pembelokan sedikit. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur jarak roket secara *real time* dalam koordinat 3D. Sehingga dapat tergambar dengan jelas performa lintasan roket selama peluncuran. Sistem yang dibangun menerapkan sensor IMU sebagai estimasi jarak peluncuran roket menggunakan metode integral ganda, yang lintasan pegerakannya tergambar dalam bentuk grafik koordinat 3D. Kalman filter digunakan untuk mengurangi derau/*noise* pada sensor IMU supaya estimasi jarak terukurnya menjadi lebih akurat.

METODE PENELITIAN

Perancangan Hardware

Sistem yang dibangun menggunakan sensor IMU (Inertial Measurement Unit) yang didalamnya terdapat *accelerometer*, *gyroscope*, dan *magnetometer*. Ketiga sensor tersebut dihubungkan dengan mikrokontroler modul Arduino Mega untuk dilakukan pengolahan data. Namun dalam penelitian ini yang digunakan hanya *accelerometer* sebagai sensor percepatan dengan tipe ADXL345 [11] untuk monitoring lintasan roket secara *real time* dimana data diterima oleh Ground Control Station melalui Gelombang radio [12][13]. Sepasang modul radio frekuensi XB-Pro 900HP [14][15] yang masing-masing berfungsi sebagai Transmitter dan Receiver dihubungkan ke mikrokontroler untuk mengirimkan hasil pengolahan data melalui gelombang radio menuju ke komputer seperti yang ditunjukkan dalam gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

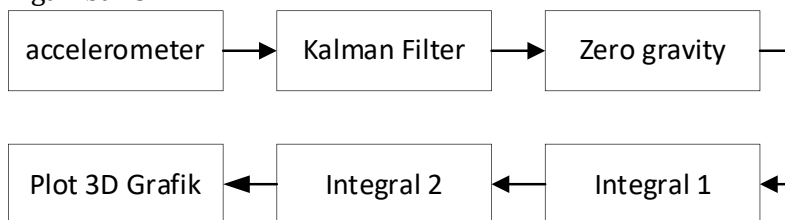
Sistem elektrik seperti yang ditunjukkan Gambar 1, di suplai oleh baterai jenis *Lithium Polimer* dan diletakkan didalam tabung berbahan akrilik dengan ukuran diameter 10 cm dengan tinggi tabung 20 cm yang disebut sebagai *payload* / muatan roket seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Bentuk fisik payload / muatan roket

Perancangan Software

Accelerometer ADXL345, diolah datanya menggunakan Arduino Mega menjadi percepatan dengan satuan m/s² untuk sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z, kemudian data dikirimkan melalui gelombang radio ke komputer. Pada computer dilakukan pengolahan data lebih lanjut seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.



Gambar 3. Diagram blok pengolahan data

Data percepatan yang diterima computer masih terdapat banyak derau. Oleh karena itu diperlukan filter untuk mengurangi derau yang ditimbulkan. Kalman filter [16-18] dalam perancangan ini dipilih untuk mengurangi derau yang ditimbulkan sensor percepatan yang perhitungannya ditunjukkan dalam persamaan 1 sampai persamaan 5.

Perhitungan *Kalman Gain*

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \tag{1}$$

Perbarui nilai z_k

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \tag{2}$$

Perbarui nilai *error covariance*

$$P_k = (1 - K_k H) P_k^- \tag{3}$$

Prediksi kondisi

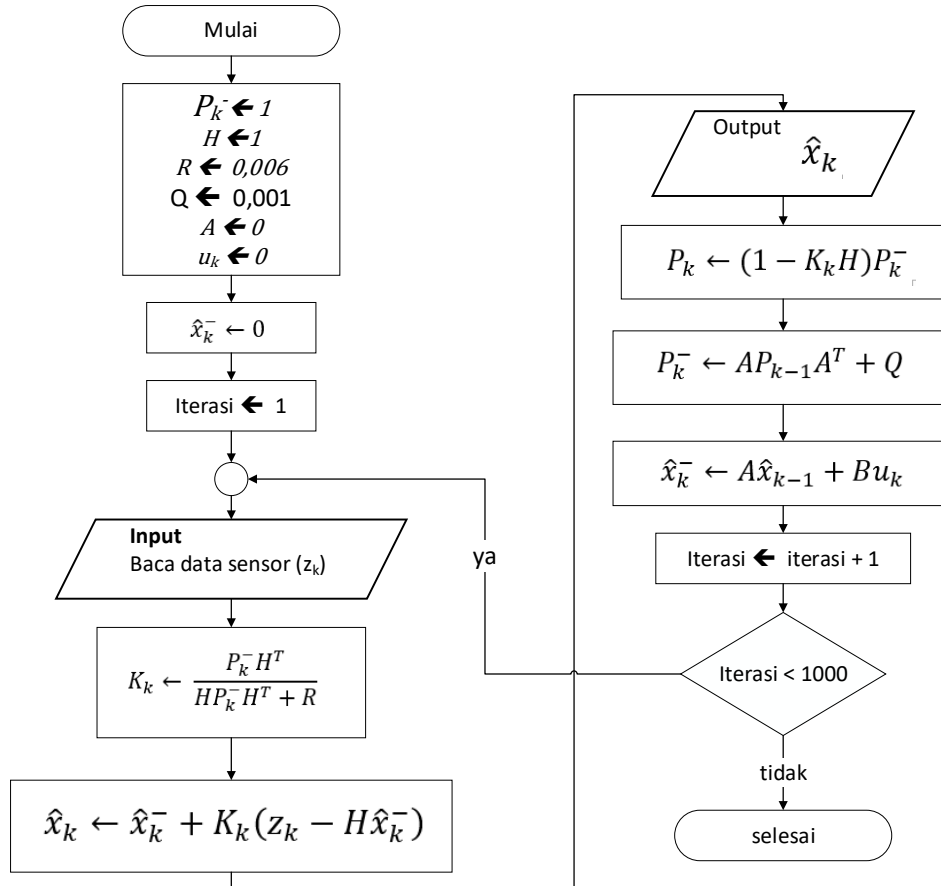
$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + B u_k \tag{4}$$

Prediksi error

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q \tag{5}$$

Pada persamaan 2, variabel z_k adalah data input dari sensor percepatan dan variable \hat{x}_k adalah output hasil filter yang akan diolah ke tahap selanjutnya. Untuk variable-variabel yang lain pada persamaan 1 samapai

persamaan 5 akan dijelaskan alurnya dalam flowchart yang ditunjukkan dalam gambar 4. Pengambilan data sensor dilakukan dalam waktu sampling 0,01 detik dengan iterasi sebanyak 1000. Jika iterasi belum mencapai 1000, maka system akan terus bekerja. Jika iterasi telah mencapai 1000, maka system akan berhenti.

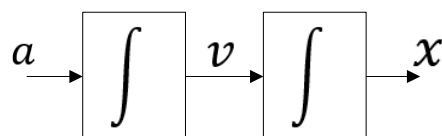


Gambar 4. Flowchart alur kerja Kalman filter

Accelerometer merupakan sensor percepatan yang mengukur percepatan, baik percepatan gerak maupun percepatan gravitasi bumi. Jadi, ketika sensor tersebut diam, telah terukur percepatan gravitasinya untuk sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Karena yang diinginkan adalah nilai percepatan ketika sensor bergerak, diperlukan proses yang disebut *zero gravity*, yaitu menghilangkan nilai percepatan gravitasi bumi. Hal ini dilakukan dengan cara nilai percepatan ketika sensor diam dikurangi dengan nilai itu sendiri. Sehingga ketika sensor diam, nilai percepatannya sama dengan nol.

Selanjutnya, untuk mengubah data percepatan (a) menjadi data posisi (x) diperlukan proses integral sebanyak 2 kali seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 6 dan blok diagram pada gambar 5.

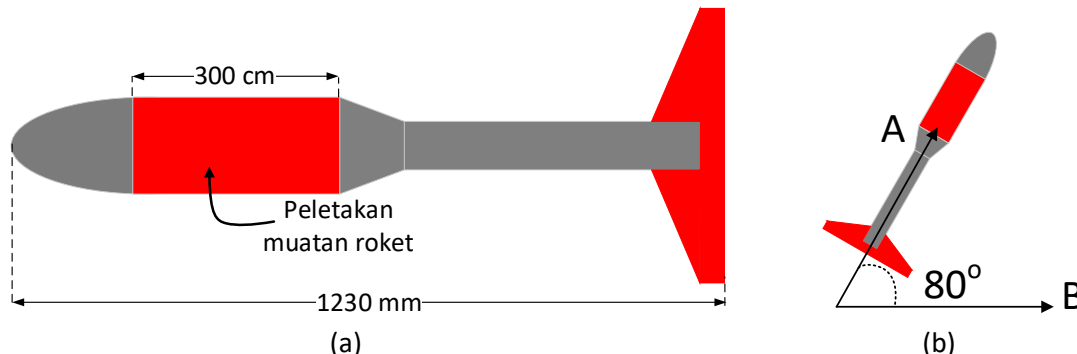
$$x = \iint a \, dt \, dt \tag{6}$$



Gambar 5. Diagram blok integral ganda

Penempatan posisi *payload*

Payload / muatan roket yang terdiri dari perangkat kontrol dan sensor, dimasukkan ke dalam roket berbahan PVC dengan ukuran Panjang keseluruhan 1230 mm, dan 300 mm untuk ruang penempatan muatan roket seperti yang ditunjukkan dalam gambar 6.

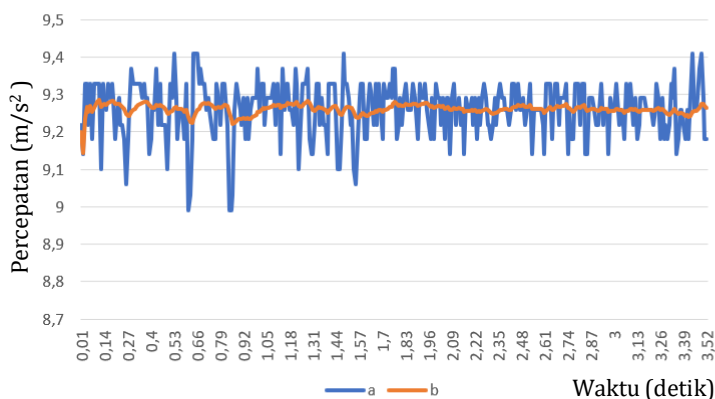


Gambar 6. Bentuk roket peluncur (a) posisi peletakan muatan roket, (b) sudut peluncuran roket

Roket yang sudah berisi *payload* diposisikan siap meluncur menghadap ke laut dengan kemiringan sudut elevasi sebesar 75° seperti yang ditunjukkan dalam gambar 7. *Payload* pada kondisi aktif selama didalam roket dan terus-menerus mengirimkan informasi data melalui gelombang radio ke komputer penerima data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

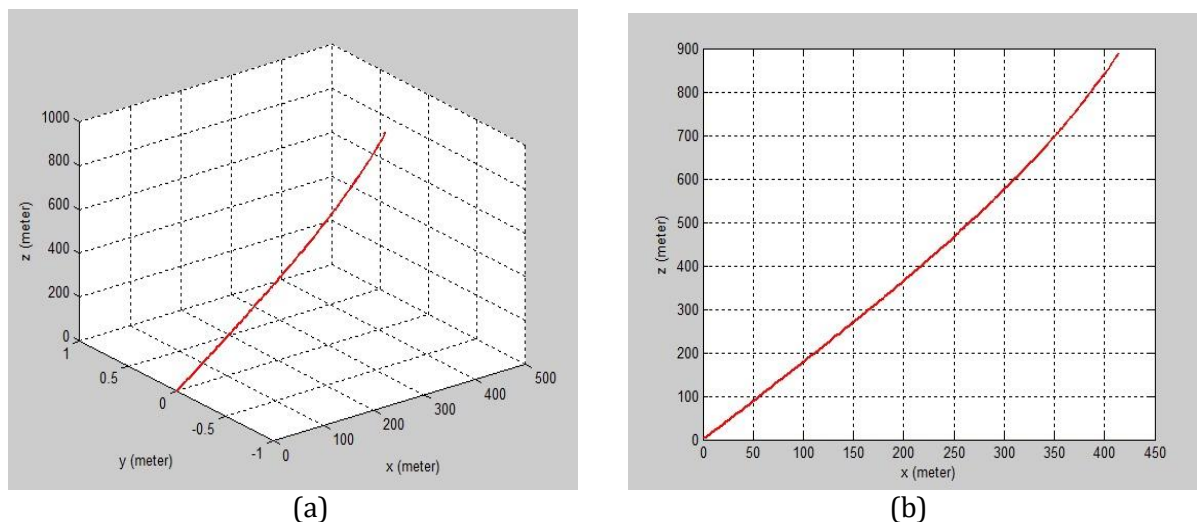
Ketika persiapan peluncuran roket, komputer menerima data percepatan dari sensor IMU pada kondisi diam dalam tiga koordinat sumbu kartesian yaitu sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Data mentah sensor diterima oleh komputer kemudian di hilangkan *noise* nya menggunakan *Kalman Filter*. Gambar 7 menunjukkan hasil pengambilan data percepatan kondisi roket diam pada sumbu-z. Data sensor pada garis “a” warna biru seharusnya berbentuk lurus saat sensor kondisi diam, tetapi yang terjadi data bergerak naik turun dikarenakan adanya *noise* pada perangkat sensor. Sedangkan garis “b” warna kuning menunjukkan data sensor setelah dikurangi *noise* nya menggunakan *Kalman Filter*, terlihat lebih stabil mendekati bentuk lurus. Setelah melalui tahap ini, dilakukan proses *zero gravity* sampai ke proses plot 3D sesuai tahapan yang telah dijelaskan sebelumnya pada gambar 3.



Gambar 7. Hasil filter data

Roket berisi *payload* diluncurkan dengan gaya dorong 30 kgf atau setara dengan 294,199 Newton. Jika berat *payload* adalah 1 kg dan berat roket adalah 4,6 kg, maka percepatan maksimal yang dihasilkan ketika roket meluncur adalah sebesar 52,5 m/s². Nilai percepatan tersebut masih masuk kedalam rentang pengukuran sensor IMU yang digunakan dalam sistem ini. Sistem didalam *payload*

terus mengirimkan data ke komputer penerima, sehingga akan terbentuk plot grafik seperti yang ditunjukkan dalam gambar 8.



Gambar 8. Bentuk lintasan roket (a) grafik 3D (b) grafik 2D tampak samping

Hasil pergerakan roket saat peluncuran, tergambar lintasannya dalam bentuk grafik 3D seperti yang ditunjukkan dalam gambar 9(a). Jika grafik diputar terhadap sumbu z, maka akan tampak plot grafik 2D seperti yang ditunjukkan dalam gambar 9(b). Pada gambar tersebut, dapat dianalisis bahwa roket bergerak tidak sepenuhnya membentuk garis lurus, tetapi ada sedikit lengkungan. Posisi awal roket berada pada koordinat (x,y,z) yaitu $(0,0,0)$, kemudian meluncur hingga mencapai pada koordinat (x,y,z) yaitu $(414, 0, 891)$. *Sampling* waktu pengambilan data adalah 0,04 detik, sehingga roket mencapai pada koordinat $(414, 0, 891)$ pada detik ke 8,99.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian yang telah dilakukan oleh Fahriannur dan Alex [4]. Fahriannur, membangun system monitoring lintasan muatan roket dalam bentuk koordinat 3D yang diperoleh dengan cara menggerakkan muatan roket menggunakan tangan pada bentangan tali sepanjang ± 2 meter yang dikondisikan miring.

KESIMPULAN

Pergerakan peluncuran roket berhasil termonitor dalam bentuk lintasan koordinat 3D dengan menggunakan Sensor IMU yang didalamnya terdapat Algoritma Integral sebagai estimasi jarak dan Kalman Filter untuk mengurangi *noise*. Posisi awal roket berada pada $(0,0,0)$ dan meluncur ke koordinat $(414, 0, 891)$ dalam waktu 8,99 detik. Untuk pengembangan selanjutnya diperlukan pengukuran jarak lintasan untuk pendaratan roket dengan mengkombinasikan sensor gyroscope dan GPS sehingga performa roket dapat termonitor lebih jelas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) yang telah memfasilitasi roket dan tempat uji coba sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Buku Panduan Komurindo-Kombat. (2018). Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).
- [2] E.M. Sartika, A. Gany, V. Yuvens. "Implementasi Sensor IMU untuk mengetahui Sudut Elevasi Kendaraan menggunakan Metode Least Square". ELKOMNIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik

- Telekomunikasi, & Teknik Elektronika. Vol. 8. No. 2. Pp. 301 - 312. 2020. Doi: <https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i2.301>
- [3] B.Y. Sandi, F. Kurniawan, L. Sandi. 2020. "Estimasi sudut Orientasi Rigid Body Dengan Menggunakan Sensor Inertial Measurement Unit (IMU) dan Magnetometer". Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Kedirgantaraan. Vo. 6. Pp. 283 - 294. 2020. Doi : <http://dx.doi.org/10.28989/senatik.v6i0.425>
- [4] Fahriannur, A., & Zain, A. T. "Implementasi 3-Axis Accelerometer Untuk Monitoring Lintasan Gerak Laju Roket". Jurnal Teknik Terapan, 1(1), 20-23. 2022. DOI: <https://doi.org/10.25047/jteta.v1i1.3>
- [5] M. A.R. Wicaksono, F. Kurniawan, L. Roma. "Kalman Filter untuk mengurangi Derau Sensor Accelerometer pada IMU Guna Estimasi Jarak". AVITEC. Vol. 2. No. 2. Pp. 145-159. 2020. Doi: <http://dx.doi.org/10.28989/avitec.v2i2.752>
- [6] R.I. Alfian, A. Ma'arif, Sunardi. "Noise reduction in the accelerometer and gyroscope sensor with the Kalman Filter Algorithm". Journal of Robotics and Control. Vol. 2. No. 3. Pp. 179 - 189. 2021. DOI: 10.18196/jrc.2375
- [7] W.S. Putra. "Implementasi Algoritma 2 Step Kalman Filter Untuk Mengurangi Noise Pada Estimasi Data Accelerometer". Jurnal Sains Komputer & Informatika. Vol. 3 No. 1. Pp. 142-151. 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.30645/j-sakti.v3i1.108>
- [8] Wahyudi. "Peningkatan Ketelitian Pengukuran Data Percepatan Roket Kendali Dengan Menggunakan IMU Multisensor". Transmisi. 2017. Vol.19 No.1.
- [9] Mudarris, Satria G.Z. "Implementasi Sensor Inertial Measurement Unit (IMU) untuk Monitoring Perilaku Roket". AVITEC, Vol. 2, No. 1. Hal. 55-64. 2020. Doi: <http://dx.doi.org/10.28989/avitec.v2i1.610>
- [10] "Buku Panduan KOMURINDO - KOMBAT 2020 - 2021". Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional 2019.
- [11] Aisandi, E. Dodi. "Tampilan Data Muatan Roket Secara Real Time Display of Rocket Payload Data in Real Time". Seminar Nasional Iptek Penerbangan dan Antariksa XXXIII. Pp. 158 - 165. 2019. DOI:10.30536/p.siptekgan.2019.v23.16
- [12] Gumilar, Gigih, H.H. Rachmat. "Sistem Pendeteksi Jatuh Wireless Berbasis Sensor Accelerometer." TELKA - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol. Pp. 132 - 141. 2018. DOI: <https://doi.org/10.15575/telka.v4n2.132-141>
- [13] Feriadi, Indra, F. Aswin, MI. Nugraha. "Analisis Sistem Pengukuran Getaran MEMS Accelerometer ADXL345". Manutech : Jurnal Teknologi Manufaktur. Vol. 9 No. 2. Pp. 63-67. 2019. DOI: <https://doi.org/10.33504/manutech.v9i02.48>
- [14] R. G. Putra, D.E. J. Sudirman, H. N.K. Ningrum, N. A. Hidayatullah. "Studi Jarak Jangkauan X-Bee Pro S3b 900 untuk Aplikasi Node Wireless Sensor Network pada Daerah Gunung Api Berbasis Received Signal Strength Indicator (RSSI)". Jurnal TELKA Vol. 5 No. 2. Pp 93-102. 2019. <https://doi.org/10.15575/telka.v5n2.93-102>
- [15] Calvo, Isidro. J.M. Gil Garcia. "Design and Performance of a XBee 900 MHz Acquisition System Aimed at Industrial Applications". Applied Science MDPI. Vol. 11. Pp 1 - 23. 2021. DOI:10.3390/app11178174
- [16] C. Urrea, R. Agramonte, "Kalman Filter: Historical Overview and Review of Its Use in Robotics 60 Years after Its Creation", Journal of Sensors, vol. 2021, Article ID 9674015, 21 pages. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9674015>
- [17] Rossi, Yarra. Dkk. "Kalman Filter-Based Fusion of Collocated Acceleration, GNSS and Rotation Data for 6C Motion Tracking". Sensors. Vol. 21. No. 4. 2021. <https://doi.org/10.3390/s21041543>
- [18] F. Jayanti, T. Triwiyanto, T. Rahmawati, and A. A. Ahmed, "Implementation of Gyro Accelerometer Sensor for Measuring Respiration Rate Based on Inhale and Exhale Using Kalman Filter", Jurnal Teknokes, vol. 15, no. 4, pp. 236-241, Dec. 2022. DOI: <https://doi.org/10.35882/teknokes.v15i4.479>