

# PENINGKATAN KETELITIAN PENGUKURAN DATA PERCEPATAN ROKET KENDALI DENGAN MENGGUNAKAN IMU MULTISENSOR

Wahyudi <sup>\*</sup>), Adhi Susanto <sup>\*\*</sup>), Sasongko Pramono H <sup>\*\*</sup>), and Wahyu Widada <sup>\*\*\*</sup>)

<sup>\*)</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jln. Prof. Soedarto, SH Tembalang Semarang

<sup>\*\*\*)</sup>Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jln. Grafika no 2, Yogyakarta

<sup>\*\*\*</sup>Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jln. Raya Lapan, Rumpin, Bogor

*Email : wahyuditinom@elektro.undip.ac.id*

## Abstrak

Komponen utama Inertial Measurement Unit (IMU) yang digunakan untuk mengukur kecepatan sudut putaran roket dan percepatan gerak roket adalah giroskop dan akselerometer. Roket kendali mempunyai jangkauan pengukuran percepatan yang lebar, yang disebabkan oleh adanya daya dorong booster dan daya dorong sustainer. Daya dorong booster digunakan roket untuk mencapai ketinggian dan kecepatan tertentu, sedangkan daya dorong sustainer dipakai pada saat roket dikendalikan. Jika IMU hanya menggunakan satu akselerometer dengan jangkauan percepatan yang disebabkan oleh daya booster, maka pada saat mengukur percepatan yang disebabkan oleh daya sustainer akan memberikan pengukuran yang kurang teliti. Jika IMU hanya menggunakan akselerometer dengan jangkauan percepatan yang disebabkan oleh daya sustainer, maka IMU akan memberikan pengukuran yang teliti tetapi sebagian percepatan, yaitu yang disebabkan oleh daya booster akan hilang karena percepatan tersebut di luar jangkauan pengukurannya. Permasalahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan multisensor pada perancangan sensor IMU serta algoritme untuk memilih data sensor IMU, sehingga diperoleh IMU dengan jangkauan lebar dan ketelitian tinggi. Simulasi hasil perancangan dilakukan dengan menggunakan data gerak roket. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sensor IMU hasil perancangan mempunyai jangkauan pengukuran lebar, yaitu pada semua percepatan gerak roket dan dapat meningkatkan ketelitian pengukuran percepatan gerak roket, yaitu hingga 98,64%.

*Kata kunci: multisensor; ketelitian; IMU; algoritme*

## Abstract

The main components of the Inertial Measurement Unit (IMU) which is used to measure the angular rate and acceleration of rocket are a gyroscope and an accelerometer. Guided rocket has a wide measurement range of acceleration, which is caused by the thrust of booster and sustainer. The thrust of the booster used to reach certain heights and speeds, while the sustainer used to control guidance rocket during moving. If the IMU uses just an accelerometer with a wide range, so when measuring the acceleration caused by the sustainer will provide measurements of the less scrupulous. If the IMU only uses accelerometer with a high sensitivity, so the IMU can't measure all of acceleration which is caused by the booster power. These problems can be overcome by using the design of IMU with multi-sensor and algorithms to choose the IMU sensor data, thus obtained IMU with a wide range and high accuracy. Simulation result of the design is done using data of tracking rocket. The simulation results showed that the IMU sensor have wide measurement range and can improve the measurement accuracy of acceleration of the rocket up to 98.64%.

*Keywords: multi-sensor; accuracy; IMU; algorithm*

## 1. Pendahuluan

IMU yang terdiri atas akselerometer dan giroskop merupakan instrumen yang digunakan untuk mengetahui

percepatan dan kecepatan sudut roket ketika terbang. Data percepatan dan kecepatan sudut dari IMU dalam 3 sumbu menghasilkan data 6 derajat kebebasan yang digunakan untuk menentukan keberadaan roket pada saat

dikendalikan. Roket kendali mempunyai 2 tipe sistem pendorong roket, yaitu *booster* dan *sustainer* [1]. *Booster* digunakan untuk menggerakkan roket untuk mencapai kecepatan dan ketinggian tertentu, sedangkan *sustainer* berfungsi untuk gerak roket pada saat dikendalikan. Jangkauan percepatan gerak roket yang disebabkan oleh penggerak *booster* lebih besar daripada penggerak *sustainer*. Pengukuran percepatan gerak roket dapat dilakukan dengan sebuah sensor dengan jangkauan yang lebar, tetapi akan menghasilkan pengukuran yang kurang teliti, karena suatu sensor yang mempunyai jangkauan pengukuran yang lebar akan mempunyai ketelitian yang rendah. Sebaliknya, jika dipilih sensor dengan ketelitian tinggi, maka tidak akan mampu mengukur semua jangkauan pengukuran percepatan gerak roket. Suatu sensor dengan jangkauan yang lebar biasanya mempunyai sensitivitas rendah, sedangkan suatu sensor yang mempunyai sensitivitas tinggi biasanya mempunyai jangkauan pengukuran yang sempit. Hasil pengukuran sensor IMU yang kurang teliti akan menyebabkan roket sulit untuk dikendalikan.

IMU merupakan komponen utama dalam sistem navigasi, dimana untuk mendapatkan data posisi, kecepatan, dan ketinggian suatu benda diperlukan sensor akselerometer dan giroskop [2]. Ada dua cara dalam merancang IMU yang terdiri dari enam derajat kebebasan [3]. Cara pertama terdiri dari tiga sensor akselerometer dan tiga sensor giroskop. Cara kedua hanya menggunakan sensor akselerometer saja, sehingga cara ini juga disebut sebagai IMU tanpa giroskop (*gyro-free* IMU). Cara pertama dengan melakukan integral sekali terhadap data keluaran giroskop untuk mendapatkan data rotasi dan melakukan integral dua kali terhadap data keluaran akselerometer untuk mendapatkan data posisi. Pada cara kedua, untuk mendapatkan data rotasi dan posisi diperlukan integral sekali atau dua kali terhadap data keluaran akselerometer, tergantung dari konfigurasi yang digunakan, misalnya menggunakan sembilan sensor akselerometer [4]. Penelitian IMU yang digunakan untuk mengetahui posisi sistem navigasi telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya sebagai sistem monitoring kendaraan [5], sistem navigasi pesawat terbang [6], sistem navigasi helikopter [7], sistem navigasi kendaraan di dalam air [8], menentukan posisi robot [9], dan untuk peluncuran roket [10][11]. Ada beberapa penelitian dasar yang menjelaskan bagaimana suatu IMU dibuat, diantaranya adalah perancangan sistem akuisisi data dan sistem pemrosesan pada IMU [12], perancangan filter pada sensor akselerometer dan sensor giroskop [13]-[16], dan buku teks tentang roket kendali dan sistem kontrol [1].

Data kecepatan dan posisi diperoleh dengan melakukan proses integral dari data keluaran sensor akselerometer, sehingga jika sinyal tidak benar-benar bersih dari *noise* maka akan menyebabkan kesalahan yang semakin membesar dengan adanya proses integral, demikian juga untuk data sudut yang diperoleh dengan mengintegrasikan

keluaran sensor giroskop. Selain dengan menggunakan filter secara elektronik, *noise* dari sinyal sensor dapat dihilangkan dengan menggunakan filter digital seperti dengan filter eksponensial dan FIR [14], filter Kalman [5][16]. Ketidakakuratan data juga disebabkan sistem kalibrasi yang kurang baik, kalibrasi sering berubah, sehingga diperlukan sistem kalibrasi yang lebih handal. Penelitian tentang metode kalibrasi terhadap sensor IMU diantaranya adalah dengan melakukan kalibrasi terhadap IMU [17], dengan melakukan kompensasi terhadap drift sensor giroskop [18], dengan melakukan kalibrasi terhadap sensor giroskop [19],[8], dan dengan melakukan kalibrasi terhadap koefisien *error* pada sensor akselerometer [4]. Data percepatan yang tidak dapat terbaca karena percepatan yang berada di luar jangkauan sensor, dapat diatasi dengan memperluas jangkauan sensor dengan menggunakan perancangan sistem IMU tanpa giroskop (*gyro free*) [4] atau dengan menggunakan sistem multigain [13], sehingga seluruh data percepatan yang ada dapat terukur dengan baik.

Novel dkk. mensimulasikan sistem pengendalian roket dengan masukan data *attitude* dari IMU untuk menggerakkan aktuator [20]. Masukan dari sistem navigasi berupa data dari GPS, sensor kecepatan, sensor ketinggian, dan IMU. Jiang dkk. melakukan simulasi pengendalian roket dengan menggunakan data *attitude* yang diestimasi dengan menggunakan *Fiber Brag Grating* (FBG) Data *attitude* dari IMU digunakan untuk menggerakkan aktuator [21]. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan ketelitian pembacaan data percepatan sensor dengan menggunakan beberapa sensor dan algoritme pemilihan data sensor.

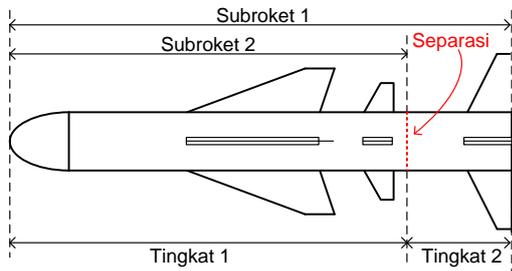
## 2. Metode

### 2.1. Alat dan Bahan

Roket kendali merupakan roket yang dapat dikendalikan untuk menuju suatu sasaran yang diinginkan dengan menggunakan hukum kendali tertentu. Pengendalian roket ada 2 cara, yaitu pengendalian secara pasif dengan cara menentukan lintasan roket sebelum diterbangkan dan pengendalian secara aktif dengan hanya memasukkan tujuan yang hendak dicapai, baik sudut, posisi, atau yang lainnya. Roket kendali mempunyai 2 jenis daya dorong yang diaktifkan secara berurutan, yaitu *booster* yang digunakan untuk menggerakkan roket sampai pada ketinggian dan kecepatan tertentu dan *sustainer* yang digunakan untuk mempertahankan gerak roket pada saat dikendalikan. *Booster* roket kendali umumnya menggunakan jenis roket berpropelan *solid*, sedangkan untuk *sustainer* biasanya berjenis *end-burning* atau *turbojet*. Daya dorong *sustainer* lebih kecil jika dibandingkan dengan daya dorong pada *booster*, tetapi mempunyai waktu penyalaan yang lebih lama, sehingga roket lebih mudah dikendalikan.

Gambar 1 memperlihatkan konfigurasi roket kendali. Roket ini merupakan roket *multi-stage* (bertingkat jamak),

yang mempunyai propelan bertipe *solid booster* pada tingkat pertamanya dan *solid-end-burning sustainer* pada tingkat kedua [22].

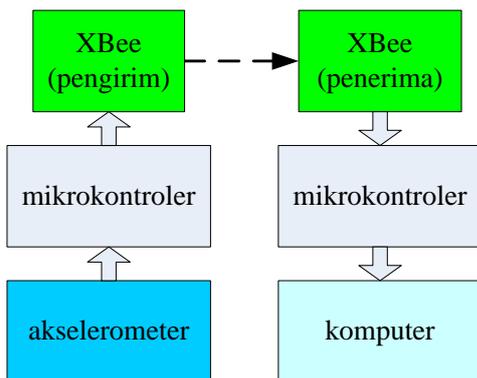


Gambar 1. Konfigurasi roket kendali.

Subroket 1, yang terdiri atas roket tingkat 1 dan tingkat 2, merupakan roket yang utuh pada saat diluncurkan dengan *booster* terpasang, sedang subroket 2 merupakan roket tanpa *booster* yang merupakan bagian roket yang akan dikendalikan menuju sasaran. Pada saat separasi, roket tingkat 2 akan terlepas dan jatuh lebih awal.

## 2.2. Perancangan perangkat keras

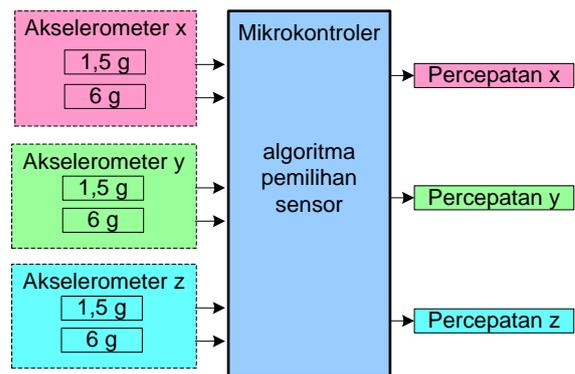
Komponen utama pada perancangan IMU terdiri atas 6 sensor akselerometer, 2 mikrokontroler, 2 XBee, dan komputer. Diagram blok perancangan perangkat keras IMU diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok perancangan perangkat keras sensor IMU.

Sensor akselerometer digunakan untuk mendeteksi percepatan linear pada sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. Mikrokontroler digunakan untuk mengubah data analog dari sensor menjadi data digital dengan menggunakan ADC internal, mengolah data sensor akselerometer untuk mendapatkan percepatan pada ketiga sumbu, serta komputer digunakan untuk menampilkan hasil pengolahan data sensor. Xbee-Pro digunakan untuk mengirimkan dan menerima data secara nirkabel.

Berdasarkan gerak roket, percepatan roket pada ketiga sumbu dapat dipasang sensor akselerometer dengan 2 tingkat percepatan yaitu 1,5 g dan 6 g. Hubungan sensor akselerometer dengan mikrokontroler diperlihatkan pada Gambar 3. *Port A* pada mikrokontroler Xmega128A1 difungsikan sebagai ADC 12 bit dan digunakan untuk mengubah tegangan analog keluaran sensor akselerometer sensor giroskop menjadi data digital. ADC mempunyai tegangan referensi yang terpisah dan diberi tegangan referensi dari luar, sehingga pada *port A0* diberi tegangan referensi sebesar 3,3V. ADC dioperasikan dengan menggunakan mode yang sama yaitu mode *unsign*, sehingga tegangan keluaran sensor akselerometer dan sensor giroskop direpresentasikan dalam besaran ADC yang bernilai antara 0 sampai dengan 4095.

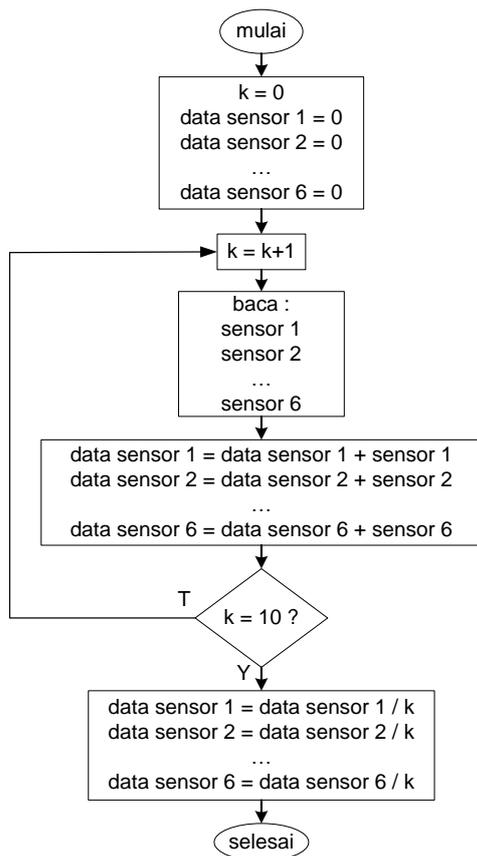


Gambar 3. Hubungan antara sensor dan mikrokontroler.

Sensor akselerometer dilengkapi dengan rangkaian filter LPF analog orde satu yang terdiri atas komponen resistor dan kapasitor. Filter tersebut digunakan untuk menghilangkan derau keluaran sensor. Filter pada akselerometer menggunakan resistor sebesar 32 k  $\Omega$  dan kapasitor 3,3 nF, sehingga frekuensi *cutoff* sebesar 1507 Hz. Mikrokontroler mengirimkan data sensor akselerometer pada ketiga sumbu ke komputer dilakukan secara serial. Tidak semua pin pada modul Xbee-Pro digunakan. Pin yang digunakan dalam berkomunikasi dengan mikrokontroler ada 4, yaitu DOUT, DIN, CTS, dan RTS, sedang pin lain yang digunakan adalah pin untuk catu tegangan.

## 2.3. Perancangan perangkat lunak

Filter digital digunakan untuk mengurangi adanya derau yang diakibatkan oleh bahan sensor, yaitu derau mekanis dan derau listrik pada sensor. Filter yang digunakan adalah *moving average* dengan jumlah data 10. Pengambilan data yang terlalu banyak akan menyebabkan informasi isyarat hilang, sedangkan pengambilan data yang terlalu sedikit akan menyebabkan informasi tidak akurat. Pengambilan data yang terlalu banyak juga menyebabkan penambahan waktu tunda antara data yang satu dengan data berikutnya. Diagram alir *moving average* diperlihatkan pada Gambar 4.

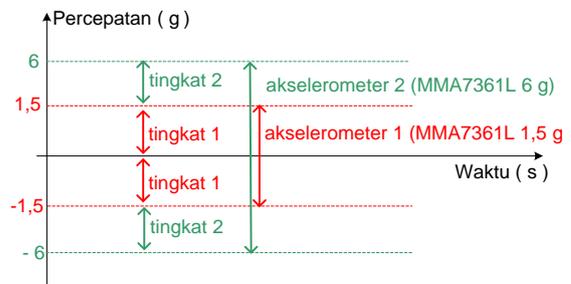


Gambar 4. Diagram alir filter moving average pada data sensor.

Filter *moving average* digunakan untuk menentukan nilai *offset* dan sensitive sensor. Nilai *offset* sensor merupakan nilai tegangan atau nilai ADC sensor pada saat tidak diberi eksitasi dari luar. Pada saat tidak ada eksitasi dari luar, tegangan keluaran akselerometer bernilai sekitar separuh dari tegangan catu pada sensor, yang disebut sebagai tegangan *offset*. Penentuan nilai *offset* dilakukan dengan mencari rata-rata dari sejumlah data tertentu pada saat sensor dalam keadaan diam, yaitu pada saat akselerometer tidak mendapat percepatan dari luar. Perhitungan nilai *offset* akselerometer dilakukan sekali sebelum sensor IMU digunakan. Perhitungan nilai *offset* akselerometer dapat dilakukan pada saat sensor membentuk sudut  $90^\circ$  atau  $-90^\circ$  dari arah vertikal, yaitu pada saat tidak ada pengaruh percepatan gravitasi bumi. Pengambilan data dilakukan setelah keluaran sensor berada pada nilai *offset*, karena pada saat sensor diberi catu tegangan, keluaran sensor akan mengalami transien menuju nilai *offset*. Nilai *offset* digunakan untuk menentukan data percepatan keluaran. Kesalahan dalam menentukan nilai *offset* akan berpengaruh dalam perhitungan nilai percepatan. Sensitivitas sensor merupakan kepekaan sensor menerima eksitasi dari luar.

Nilai sensitivitas sensor sangat diperlukan dalam melakukan kalibrasi. Semua sensor yang digunakan dalam perancangan dikalibrasi dengan menggunakan simulator ST-3176-TC-10. Sensitivitas akselerometer dan giroskop dipengaruhi oleh catu tegangan yang diberikan padanya dan karakteristik masing-masing sensor, sehingga setiap sensor harus dikalibrasi [7].

Roket kendali membutuhkan data inersia yang cepat, sehingga algoritme pemilih data sensor harus memerlukan waktu sesingkat mungkin. Pemilihan data sensor dilakukan dengan mendahulukan sensor yang mempunyai sensitivitas. Data sensor yang diambil adalah data sensor berada pada jangkauan sensor dengan sensitivitas yang lebih tinggi, jika tidak ada, maka data akan diambil dari sensor yang mempunyai sensitivitas dibawahnya. Tingkat sensor percepatan diperlihatkan pada Gambar 5. Tingkat sensor percepatan pada ketiga sumbu adalah 2 tingkat, masing-masing sensor digunakan untuk mengukur percepatan positif maupun percepatan negatif. Akselerometer 1 mempunyai sensitivitas yang lebih tinggi dan jangkauan yang lebih sempit jika dibandingkan dengan akselerometer 2.

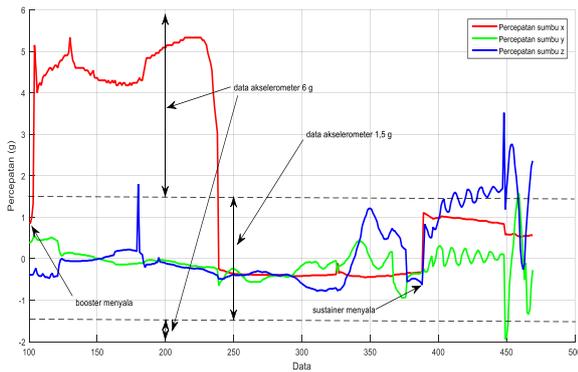


Gambar 5. Tingkat sensor percepatan.

Algoritme Pemilih Data Sensor (PDS) dilakukan oleh mikrokontroler dengan cara memilih data sensor yang mempunyai sensitivitas lebih tinggi. Mikrokontroler membaca data percepatan dari MMA7361L 1,5 g dan MMA7361L 6 g. Jika data percepatan sensor MMA7361L 1,5 g lebih besar atau sama dengan -1,5 g dan lebih kecil atau sama dengan 1,5 g, maka data percepatan diambil dari sensor MMA7361L 1,5 g. Jika data percepatan sensor MMA7361L 1,5 g lebih besar dari 1,5 g, atau kurang dari -1,5 g, maka data percepatan diambil dari sensor MMA7361L 6 g.

### 3. Hasil dan Analisis

Analisis terhadap penggunaan algoritme PDS dilakukan dengan menggunakan data percepatan gerak roket yang dihasilkan oleh sensor IMU. Data percepatan merepresentasikan gerak translasi roket pada sumbu x, y, dan z. Pada Gambar 6 diperlihatkan penggunaan algoritme PDS pada data percepatan gerak roket.



**Gambar 6. Percepatan gerak roket dengan menggunakan algoritme PDS.**

Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran jika hanya menggunakan satu sensor 6 g dibandingkan dengan penggunaan multisensor 1,5 g dan 6 g pada semua sumbu. Saat *booster* menyala sampai data terakhir, terdapat 369 data uji terbang roket. Data percepatan pada sumbu x yang dapat diperoleh dengan akselerometer 6 g adalah 243 data, sedangkan data yang dapat diperoleh dengan menggunakan akselerometer 1,5 g sebanyak 235 data. Ini berarti bahwa ketelitian data uji terbang roket yang dapat ditingkatkan dengan akselerometer 1,5 g adalah  $(235:369) \times 100\% = 63,69\%$ . Semua data percepatan roket pada sumbu y dapat diperoleh dengan menggunakan akselerometer 6 g, sedangkan data percepatan roket yang dapat diperoleh dengan akselerometer 1,5 g adalah 364 data. Ketelitian data uji terbang roket pada sumbu y yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan akselerometer 1,5 g adalah  $(364:369) \times 100\% = 98,64\%$ . Semua data percepatan roket pada sumbu z dapat diperoleh dengan menggunakan akselerometer 6 g, sedangkan data percepatan roket yang dapat diperoleh dengan menggunakan akselerometer 1,5 g adalah 325 data. Ketelitian data uji terbang roket pada sumbu z yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan akselerometer 1,5 g adalah  $(325:369) \times 100\% = 88,07\%$ .

Perancangan sensor IMU dengan menggunakan mikrokontroler XMega128A1, dengan menggunakan tegangan referensi ADC sebesar 3,3 V, sedangkan resolusi ADC adalah 12 bit, sehingga kesetaraan nilai LSB ADC dengan tegangan adalah :

$$LSB \approx \frac{3300}{4095}$$

$$LSB \approx 0,806mV$$

Akselerometer 1,5 g mempunyai sensitivitas 800 mV/g, sehingga kesetaraan nilai LSB ADC dengan percepatan pada akselerometer 1,5 g adalah :

$$LSB \approx \frac{0,806}{800}$$

$$LSB \approx 0,001008g$$

Kesetaraan nilai LSB ADC dengan percepatan pada akselerometer 6 g adalah 0,003913 g. Peningkatan ketelitian hasil pengukuran percepatan gerak roket dengan menggunakan IMU multi sensor diperlihatkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Peningkatan ketelitian data percepatan roket.**

Sumbu	Peningkatan ketelitian (%)	Ketelitian	
		Satu sensor	Multi sensor
x	63,69	0,003913 g	0,001008 g
	36,31	0,003913 g	0,003913 g
y	98,64	0,003913 g	0,001008 g
	1,36	0,003913 g	0,003913 g
z	88,07	0,003913 g	0,001008 g
	11,93	0,003913 g	0,003913 g

Dari Tabel 1 terlihat bahwa penggunaan IMU dengan multi sensor dapat meningkatkan ketelitian pengukuran data percepatan roket pada ketiga sumbu.

#### 4. Kesimpulan

1. IMU Multisensor untuk roket kendali terdiri atas akselerometer 1,5 g dan akselerometer 6 g yang dipasang pada masing-masing sumbu.
2. Pemilihan data sensor dilakukan dengan algoritme PDS yang memberikan prioritas pada sensor dengan sensitivitas yang lebih tinggi.
3. Rata-rata peningkatan ketelitian pengukuran data percepatan roket adalah 83,47%.
4. Ketelitian pengukuran data percepatan dapat ditingkatkan dari 0,003913 g menjadi 0,001008 g.

#### Referensi

- [1]. Siouris, Gerge M., 2004, "Missile Guidance and Control System" Springer-verlag New York
- [2]. Walchko, Kelvin J., Nechyba, Michael C., Schwartz, Eric, and Arroyo, Antonio., 2003, "Embedded Low Cost Inertial Navigation System" University of Florida, Gainesville, The Florida Conference on Recent Advances in Robotics
- [3]. Chen, Tsung-Lin., 2008, "Design and Analysis of Fault-Tolerant Coplanar Gyro-Free Inertial Measurement Unit", Department of Mechanical Engineering, National Chiao Tung University, Journal of Microelectromechanical System IEEE Xplore
- [4]. Shu-zhi, Mu., Xiong-zhu, Bu., Yong-xin, Li., 2006, "Optimization Design and Calibration of Installation Error Coefficients for Gyroscope-Free Strapdown Inertial Measurement Unit", School of Mechanical Engineering, Najing University, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation
- [5]. Batista, Pedro., Carlos Silvestre, Paulo Oliveira, and Bruno Carneira, 2011, "Accelerometer Calibration and Dynamic Bias and Gravity Estimation: Analysis, Design, and Experimental Evaluation ", IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 19, No. 5, pp. 1128 - 1137.

- [6]. Elkaim, GH., M. Lizzaraga, 2008, "Comparison of Low-cost GPS/INS for Autonomus Vehicle Application, IEEE
- [7]. Wang, Jiandong. Liu, Yunhui., Fan, Weihong., 2006, "Design and Calibration for a Smart Inertial Measurement Unit for Autonomous Helicopters Using MEMS Sensors", National University of Defense Technology Changsha, Hunan, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation
- [8]. Kapaldo, Aaron J, 2005,"Gyroscope Calibration and Dead Reckoning for an Autonomous Underwater Vehicle", Masters Thesis Virginia Polytechnic.
- [9]. Zunaidi, Ibrahim, Norihiko Kot., 2006, "Positioning System for 4-Wheel Mobile Robot : Encoder, Gyro and Accelerometer Data Fusion with Error Model Methode, International Journal of natural Science Chiang Mai University
- [10]. Bekkeng, Jan K., "Calibration of Novel MEMS Inertian Reference Unit", 2009, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No. 6, pp. 1967 – 1974.
- [11]. Gamble, Allan E. and Jenkins, Philip N., 2001, "Low Cost Guidance for the Multiple Launch Rocket System (MLRS) Altillery Rocket", US Army Aviation and Missile Command, IEEE AES Systems
- [12]. Kang, C. and Z. Su, 2008, Design of Data Acquisition and Processing System for IMU, *Proceedings of International Symposium on Intelligent Technology Application Workshop*, pages 586 – 588.
- [13]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "Design and Application of The Exponential Filter on Ratation Estimation Using The Anguler Rate Sensor (Gyroscope)", The 3<sup>rd</sup> Asian Physics Symposium (APS 2009), ISBN : 978-979-98010-5-0, Department of Physics, Institut Teknologi Bandung.
- [14]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "A Comparison between Exponential Filter and FIR Filter on Accelerometer Data Acquisition", The Quality in Research (QIR 2009), ISBN : 978-979-98010-5-0, Department of Electrical, University of Indonesia.
- [15]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "Perancangan Filter Analog dan Filter Digital pada Sensor Accelerometer untuk Mengukur Jarak", Seminar Nasional Universitas Budi Luhur (SNUBL 09), ISBN : 97897893863078, Universitas Budi Luhur Jakarta.
- [16]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2009, "Simulasi Filter Kalman untuk Estimasi Sudut dengan Meggunakan Sensor Gyroscope", Jurnal Teknik, ISSN : 0852-1697, Universitas Diponegoro Semarang.
- [17]. Skog, Isaac, Peter Handel, 2006, "Calibration for a MEMS IMU", XVII Imeko World Congress, Rio de Janeiro, brazil
- [18]. Arnaudov, Rumen., Angelov, Yasen., 2005, "Improvement in the Method for Bias Drift Compensation in Micromechanical Gyroscopes", Faculty of Communications Technologies, Technical University of Sofia, Radioengineering Journal
- [19]. Wahyudi, Adhi Susanto, Sasongko Pramono Hadi, Wahyu Widada, 2012, "Metode Kalibrasi Sensor Rate-Gyroscope untuk IMU Roket " Jurnal Teknologi Dirgantara, Vol. 10 No.2.
- [20]. Novel, A., Trilaksono, B.R., and Sasongko, R.A., 2013, "Guided Rocket Navigation design and implementation on Hardware in Loop Simulation," *Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2013 3rd International Conference on* , vol., no., pp.249,254, 7-8 Nov. 2013
- [21]. Jiang H., Van der Veek, B., Dolk, V., Kirk, D., and Gutierrez, H., 2014, "Modal estimation by FBG for flexible structures attitude control," *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on* , vol.50, no.4, pp.2642,2653, October 2014
- [22]. Sasongko, R.A., Y.I. Jenie, dan R.E. Poetro, 2011, Analisis Lintas Terbang Roket Multi-stage RKN200, *Jurnal Teknologi Dirgantara*, 9(2), 132 - 146.