

# DESAIN SENSOR MARG (*MAGNETIC, ANGULAR RATE, AND GRAVITY*) DENGAN METODE *NON-LINEAR COMPLEMENTARY FILTER* SEBAGAI NAVIGASI GERAK *QUADROTOR* TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS DIPONEGORO

Fergy Romadhany<sup>\*)</sup>, Aris Triwiyatno, and Budi Setiyono

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: [fergy.rds@gmail.com](mailto:fergy.rds@gmail.com)

## Abstrak

Complementary filter adalah metode yang dikenal mampu memperbaiki hasil keluaran sensor dengan menggunakan keluaran dari sensor lain sebagai korektor dan tidak terlalu berat dalam proses perhitungannya. Filter tersebut memungkinkan data dari accelerometer dan magnetometer digunakan untuk menghitung eror pengukuran dari gyroscope. Filter tersebut dapat diimplementasikan pada sensor MARG (IMU dan Magnetometer), karena selain terdapat kompensasi bias drift untuk gyroscope juga terdapat kompensasi gangguan magnetik pada magnetometer. Orientasi dari badan pesawat dalam penelitian ini digambarkan dalam bentuk Quaternion untuk mengatasi masalah gimbal lock yang kerap terjadi pada sudut Euler. Berdasarkan hasil penelitian filter tersebut memiliki tingkat akurasi yang baik; eror RMS yaw  $2.3039^\circ$ , eror RMS pitch  $0.4295^\circ$ , dan eror RMS roll  $0.4738^\circ$ .

*Kata kunci : Accelerometer, Gyroscope, Complementary Filter, Magnetometer, Quadrotor*

## Abstract

Complementary filter is a well known method that can fix the sensor's output using the output of another sensor as a corrector and not computationally expensive. The proposed filter allows accelerometer and magnetometer data to be used to compute the direction of the Gyroscope measurement error. The filter can be implemented to MARG sensor arrays, because incorporating not only Gyroscope bias drift compensation but also magnetic distortion compensation. The filter represents the orientation of a plane body using Quaternion to prevents the singularities problem (gimbal lock) associated with an Euler angle representation. Based on the result, the proposed filter achieves good levels of accuracy;  $2.3039^\circ$  of yaw RMS error,  $0.4295^\circ$  of pitch RMS error, and  $0.4738^\circ$  of roll RMS error.

*Key words : Accelerometer, Gyroscope, Complementary Filter, Magnetometer, Quadrotor*

## 1. Pendahuluan

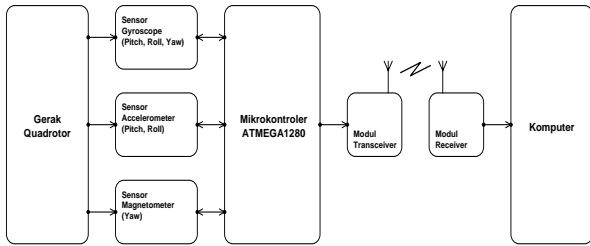
Salah satu bagian penting dalam mendapatkan performa terbang yang baik dari *quadrotor* adalah sistem tersebut mampu mendeteksi posisinya sendiri pada saat itu, dengan kata lain mampu memperoleh nilai estimasi yang baik dari *state vector*. Sebuah sensor MARG (*Magnetic, Angular Rate, and Gravity*) adalah IMU yang dilengkapi dengan *magnetometer*. Sistem MARG atau dikenal dengan nama *AHRS (Attitude and Heading Reference Systems)* mampu memberikan pengukuran orientasi lengkap yang berhubungan dengan arah gravitasi dan medan magnet bumi<sup>[4]</sup>. Keluaran dari sebuah *gyroscope* adalah kecepatan sudut, jika kondisi awalnya diketahui maka data tersebut dapat diintegrasikan terhadap waktu untuk mendapatkan nilai sudut dari sensor. Proses integral

dari pengukuran *gyroscope* akan menimbulkan eror dan akan terus terakumulasi selama pengukuran berlangsung. Berdasarkan hal tersebut *gyroscope* sendiri tidak mampu memberikan pengukuran orientasi yang absolut. *Accelerometer* dan *magnetometer* akan mengukur gaya tarik dan medan magnet bumi yang dapat dijadikan referensi orientasi yang absolut. Namun terdapat masalah lain yaitu adanya banyak *noise*, sebagai contoh percepatan dari gerakan akan mempengaruhi pengukuran percepatan gravitasi. Tugas dari sebuah filter orientasi adalah untuk menghitung estimasi tunggal melalui penggabungan data yang optimal dari *gyroscope*, *accelerometer*, dan *magnetometer*<sup>[4]</sup>. Penelitian ini berisi tentang desain sebuah filter orientasi yang mampu diimplementasikan pada MARG, dan tidak memerlukan proses perhitungan yang berat seperti Kalman filter, namun diharapkan

memiliki performa yang lebih baik. Dalam filter tersebut terdapat algoritma untuk mengkompensasi eror seperti bias *drift* pada *gyroscope* dan gangguan magnetik pada *magnetometer*. Filter yang dirancang tersebut akan menyuguhkan nilai orientasi dalam bentuk *quaternion*.

## 2. Metode

### 2.1 Perancangan Perangkat Keras (Hardware)



Gambar 1 Diagram blok perancangan perangkat keras

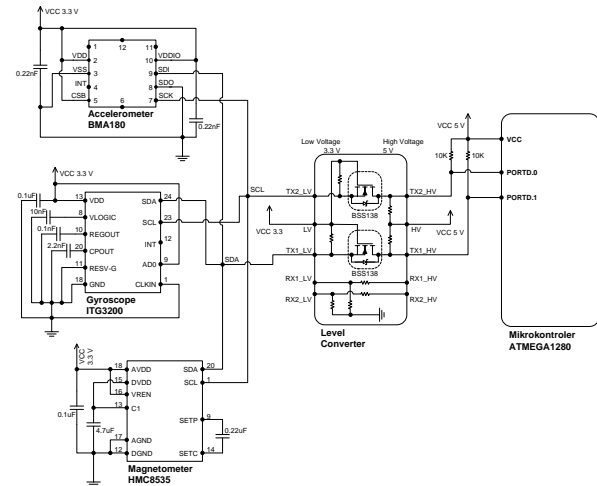
Tiga bentuk gerak quadrotor yang menjadi perhatian pada sistem navigasi ini adalah pitch, roll, dan yaw. Ketiga sudut tersebut akan dideteksi oleh modul MARG yang terdiri dari gyroscope, accelerometer, dan magnetometer. Fungsi dari masing-masing blok adalah sebagai berikut:

1. Gyroscope. Sensor ini bertugas untuk mendeteksi kecepatan sudut yang terjadi pada sumbu x (roll), y (pitch), dan z (yaw) pada badan quadrotor. Kecepatan sudut tersebut nantinya akan di-integral-kan terhadap waktu untuk mendapatkan posisi sudut dari badan quadrotor.
2. Accelerometer. Sensor ini bertugas untuk mendeteksi arah vektor besar gravitasi bumi terhadap badan quadrotor. Nilai gravitasi tersebut dapat diubah menjadi posisi sudut roll dan pitch menggunakan rumus trigonometri sederhana. Nilai pitch dan roll tersebut digunakan untuk mengoreksi nilai sudut pitch dan roll dari gyroscope.
3. Magnetometer. Sensor ini dibutuhkan untuk melengkapi kekurangan dari sensor accelerometer, yaitu tidak mampu mendeteksi sudut yaw. Magnetometer bertugas untuk mendeteksi arah vektor besar medan magnet utara bumi terhadap badan quadrotor. Nilai medan magnet utara tersebut dapat diubah menjadi posisi sudut yaw menggunakan rumus trigonometri sederhana. Nilai yaw tersebut digunakan untuk mengoreksi nilai sudut yaw dari gyroscope.
4. Mikrokontroler pada perancangan ini digunakan untuk mengolah data yang diperoleh dari modul MARG dengan tujuan mendapatkan nilai posisi sudut pitch, roll, dan yaw yang baik. Algoritma yang digunakan adalah *non-linear complementary filter*. Dalam mikrokontroler juga terdapat algoritma kalibrasi sensor dan kompensasi eror dari masing-masing sensor.
5. Modul wireless digunakan untuk mengirimkan nilai data sensor yang sudah diolah oleh mikrokontroler kemudian dikirimkan ke komputer untuk ditampilkan.

Data ditampilkan pada komputer untuk memudahkan dalam melakukan pengamatan terhadap hasil keluaran algoritma yang digunakan pada penelitian ini.

Jalur komunikasi yang digunakan antara modul MARG dengan mikrokontroler adalah jalur I<sup>2</sup>C, sedangkan untuk komunikasi antara mikrokontroler dengan modul wireless menggunakan komunikasi serial Tx dan Rx.

### 2.2 Perancangan Modul MARG

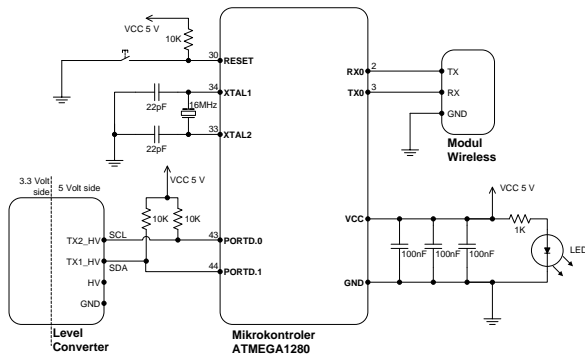


Gambar 2 Diagram perancangan modul MARG

Gambar 2 menunjukkan bahwa modul MARG terhubung dengan PORTD.0 (pin SCL) dan PORTD.1 (pin SDA) pada mikrokontroler melalui *level converter*. *Level converter* digunakan untuk menjembatani tegangan 5 volt dari mikrokontroler dengan tegangan 3,3 volt pada pin-pin modul MARG, sehingga dua komponen tersebut dapat saling berkomunikasi.

### 2.3 Perancangan Mikrokontroler ATMEGA1280

Mikrokontroler ATMEGA1280 digunakan sebagai pusat pemrosesan data. Data tersebut diproses oleh mikrokontroler untuk mendapatkan nilai sudut orientasi dari badan *quadrotor*. Ketiga sensor tersebut mengirimkan data kepada mikrokontroler melalui antar muka I<sup>2</sup>C.

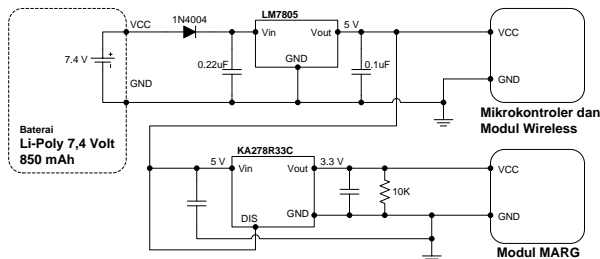


Gambar 3 Diagram blok perancangan mikrokontroler

Data yang sudah melalui *level converter* masuk ke mikrokontroler melalui PORTD.0 dan PORTD.1 yang berfungsi sebagai SCL dan SDA. Data kemudian diproses dan dikirim ke modul *wireless* melalui PORTE.0 (Rx) dan PORTE.1 (Tx).

## 2.4 Perancangan Catu Daya

Sistem ini menggunakan dua rangkaian regulator, yaitu regulator 5 volt 7805T dan regulator 3,3 volt KA278R33C. Sumber tegangan yang digunakan adalah baterai *lithium-polymer* dua sel (7,4 volt) 850 mAh.

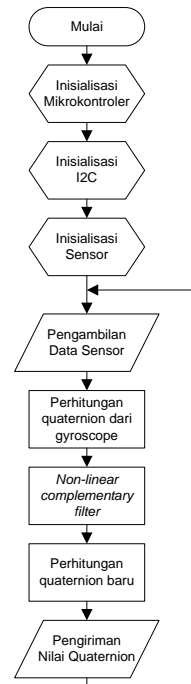


Gambar 4 Diagram blok perancangan catu daya

## 2.5 Perancangan Perangkat Lunak

Pemrograman mikrokontroler ATMEGA1280 dilakukan dengan menggunakan bahasa C. Kompiler yang digunakan adalah *CodevisionAVR* versi 2.04.4a. Secara umum perancangan perangkat lunak pada penelitian ini terdiri atas:

- Inisialisasi pada mikrokontroler.
- Perancangan sub-rutin komunikasi I<sup>2</sup>C.
- Inisialisasi sensor-sensor pada modul MARG.
- Perancangan pengambilan data sensor melalui I<sup>2</sup>C.
- Perancangan perhitungan *quaternion* dari *gyroscope*.
- Perancangan program *non-linear complementary filter*



Gambar 5 Diagram alir pemrograman

## 2.6 Inisialisasi pada Mikrokontroler

Pada penelitian ini register yang diatur hanyalah USART, sedangkan pada register lain seperti PORT dan *interrupt timer* tidak dilakukan pengaturan karena pada perancangan ini proses *input* dan *output* (modul MARG) sepenuhnya menggunakan I<sup>2</sup>C. Pengaturan USART dilakukan dengan mencentang pilihan *Transmitter* dan memilih *Baud Rate* sebesar 19200. *Communication Parameters* yang dipilih adalah 8 Data, 1 Stop, No Parity dan mode yang digunakan adalah *Asynchronous*.

## 2.7 Inisialisasi Sensor pada Modul MARG

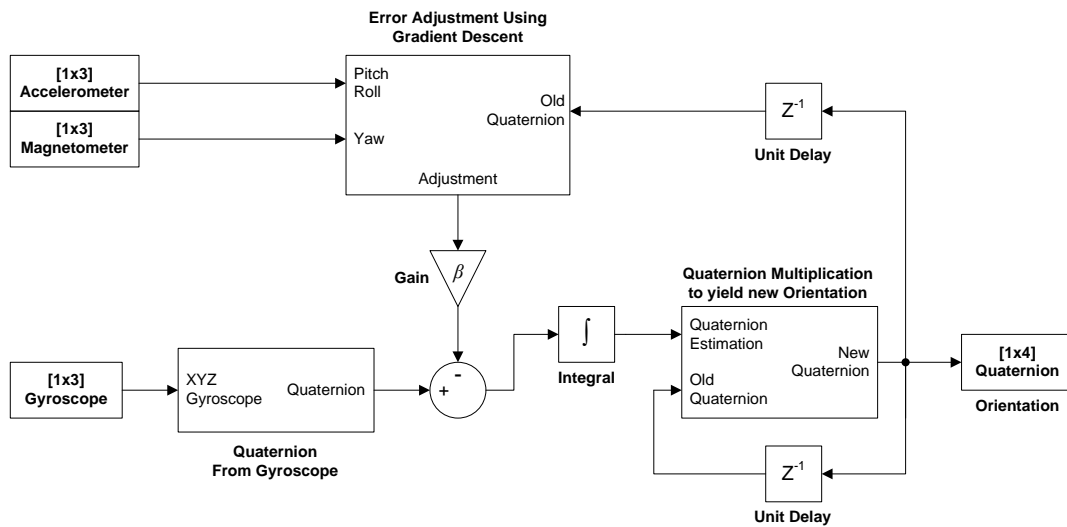
Pada program inisialisasi sensor sebelumnya perlu mengetahui alamat masing-masing sensor.

```
// Sensor Address
#define Acc_add 0x80 // alamat accelerometer 80h
#define Gyro_add 0xD2 // alamat gyroscope D2h
#define Mag_add 0x3C // alamat magnetometer 3Ch
```

Sensor *gyroscope* diatur agar memiliki frekuensi cuplik sebesar 1kHz dan *Low-pass filter* 10Hz dengan memberikan nilai 1Dh ke dalam register 16h. Pengaturan *internal clock from Xgyro* diberikan berdasarkan rekomendasi dari manufaktur sensor. Mode *continuous* 10Hz pada *magnetometer* artinya *magnetometer* terus mengambil data dengan frekuensi 10Hz. Pengaturan yang dilakukan pada *accelerometer* adalah mengaktifkan *eeprom write* agar dapat menulis atau memasukkan nilai ke dalam register sensor. Pengaturan selanjutnya adalah pemilihan mode *low noise, low-pass filter* dengan frekuensi 10Hz, dan jangkauan pengukuran sebesar +-2g

## 2.8 Perancangan Program Non-Linear Complementary Filter

Gagasan utama dari cara kerja metode non-linear complementary filter adalah menjadikan sensor magnetometer dan accelerometer sebagai korektor dengan menggunakan algoritma gradient descent sebagai optimasi. Hal yang harus dilakukan pada perancangan program non-linear complementary filter adalah menentukan variabel  $\Delta t$  yaitu waktu cuplik dan variabel  $\beta$  yaitu variabel untuk menentukan besarnya proses koreksi yang diberikan pada pengukuran gyroscope.



Gambar 6 Diagram blok non-linear complementary filter

Langkah selanjutnya adalah menggunakan persamaan (1) dan (2) sebagai fungsi objektif untuk dimasukkan ke dalam persamaan (3) dan (4). Lalu menggunakan persamaan (5) untuk mendapatkan *quaternion* orientasi yang telah dikoreksi. Dalam langkah kerjanya perlu dilakukan normalisasi untuk membatasi dan menjaga agar besar sebuah vektor tetap sama dengan satu.

$$f_{acc}(\vec{q}, \vec{d}_{acc}, \vec{s}_{acc}) = \begin{bmatrix} 2(q_2q_4 - q_1q_3) - a_x \\ 2(q_1q_2 + q_3q_4) - a_y \\ 2(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2) - a_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$f_{mag}(\vec{q}, \vec{d}_{mag}, \vec{s}_{mag}) = \begin{bmatrix} 2b_x(0.5 - q_3^2 - q_4^2) + 2b_z(q_2q_4 - q_1q_3) - m_x \\ 2b_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2b_z(q_1q_2 + q_3q_4) - m_y \\ 2b_x(q_1q_3 + q_2q_4) + 2b_z(0.5 - q_2^2 - q_3^2) - m_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$u_i = \frac{-\nabla f(x_{i-1})}{\|\nabla f(x_{i-1})\|} \quad (3)$$

$$\nabla f(x_i) = J(x_i)^T f(x_i) \quad (4)$$

$$x_i = x_{i-1} + \lambda u_i, \quad i = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Dimana  $u_i$  adalah arah laju konvergensi saat iterasi ke- $i$  dan  $J(x_i)$  adalah Jacobian matriks dari  $f(x_i)$ <sup>[12]</sup>. Variabel  $a_x$ ,  $a_y$ , dan  $a_z$  pada persamaan (1) merupakan data dari sensor accelerometer pada masing-masing sumbu

pengukuran, sedangkan variabel  $m_x$ ,  $m_y$ , dan  $m_z$  pada persamaan (2) merupakan data dari sensor magnetometer pada masing-masing sumbu pengukuran.

## 3. Hasil dan Analisa

### 3.1 Pengujian Sudut Pitch

Sudut-sudut yang diuji pada pengujian *pitch* adalah sudut 0°, 20°, 40°, 60°, dan 80°. Hasil pengujian sudut *pitch* beserta nilai RMSE masing-masing sudut pengujian dapat dilihat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1 Nilai rata-rata dan RMSE pengujian sudut pitch

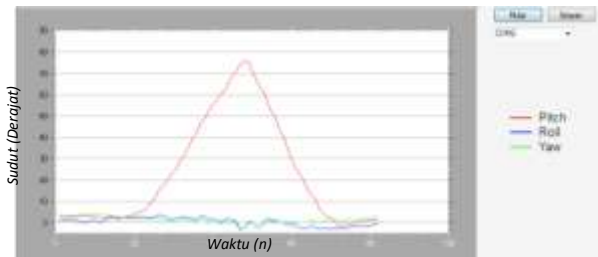
Sudut Pengujian Pitch	Pengujian ke-n				Rata-rata RMSE
	1	2	3	4	
0°	-0.1058	-0.1403	-0.1308	-0.1449	0.1617
20°	20.8936	21.0476	20.8964	21.0682	1.0051
40°	40.2317	40.1906	40.1749	40.2102	0.3380
60°	60.2652	60.3152	60.2296	60.1081	0.3410
80°	80.0286	80.1869	80.0082	79.9817	0.3019

Dari hasil pada tabel 1 maka dapat digambarkan grafik pengujian seperti pada Gambar 7. Grafik tersebut membandingkan antara nilai hasil pengujian (garis biru) dengan grafik idealnya (garis merah). Hasil keluaran pitch dari modul sudah dapat dikatakan baik karena grafik pengujian berhimpit dengan grafik ideal. Deviasi terbesar adalah pada sudut  $20^\circ$  dengan nilai RMSE sebesar  $1.0051^\circ$ .



Gambar 7 Grafik pengujian sudut orientasi pitch

Pengujian sudut *pitch* yang kedua adalah pengujian independensi masing-masing sudut orientasi. Pengujian ini dilakukan dengan memutar sudut orientasi yang sedang diuji dan mempertahankan kedua sudut orientasi lainnya.



Gambar 8 Grafik pengujian independensi sudut pitch

Gambar 8 menunjukkan bahwa sudut pitch sudah memiliki independensi yang baik. Gangguan yang terjadi pada sudut roll dan yaw pada gambar 8 ditimbulkan oleh getaran tangan pada saat pengujian.

### 3.2 Pengujian Sudut Roll

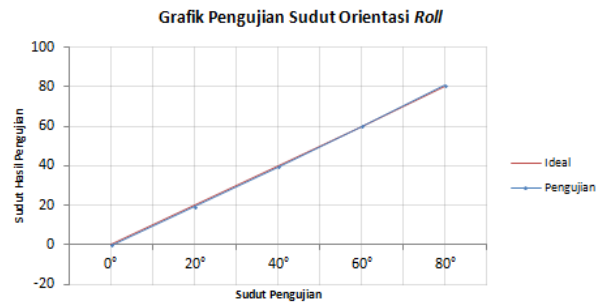
Sudut-sudut yang diuji pada pengujian *roll* adalah sudut  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $80^\circ$ . Hasil pengujian sudut *roll* beserta nilai RMSE masing-masing sudut pengujian dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2 Nilai rata-rata dan RMSE pengujian sudut roll

Sudut Pengujian Roll	Pengujian ke-n				Rata-rata RMSE
	1	2	3	4	
$0^\circ$	-0.1923	-0.1487	-0.1396	-0.1624	0.2448
$20^\circ$	19.3233	19.3133	19.3026	19.2232	0.7542

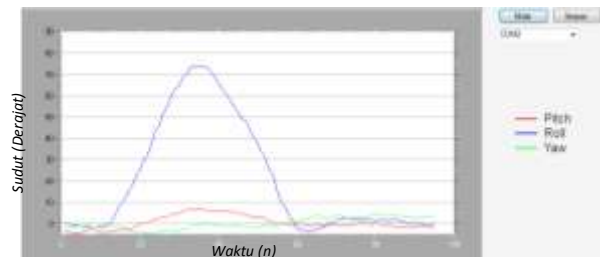
$40^\circ$	39.3850	39.3845	39.4410	39.5579	0.5901
$60^\circ$	60.0106	59.8582	59.9570	60.0232	0.1859
$80^\circ$	80.5109	80.4255	80.6557	80.6293	0.5938

Dari hasil pada tabel 2 maka dapat digambarkan grafik pengujian seperti pada Gambar 9. Hasil keluaran roll dari modul sudah dapat dikatakan baik karena grafik pengujian berhimpit dengan grafik ideal. Deviasi terbesar adalah pada sudut  $20^\circ$  dengan nilai RMSE sebesar  $0.7542^\circ$ .



Gambar 9 Grafik pengujian sudut orientasi roll

Pengujian sudut *roll* yang kedua adalah pengujian independensi masing-masing sudut orientasi. Pengujian ini dilakukan dengan memutar sudut orientasi yang sedang diuji dan mempertahankan kedua sudut orientasi lainnya.



Gambar 10 Grafik pengujian independensi sudut roll

Gambar 10 menunjukkan terdapat sedikit gangguan pada sudut pitch dikarenakan bentuk quadrotor yang kurang ortogonal antara sumbu x dan y, sehingga ketika quadrotor diputar pada sumbu x, modul juga mendeteksi sedikit perubahan pada sudut pitch.

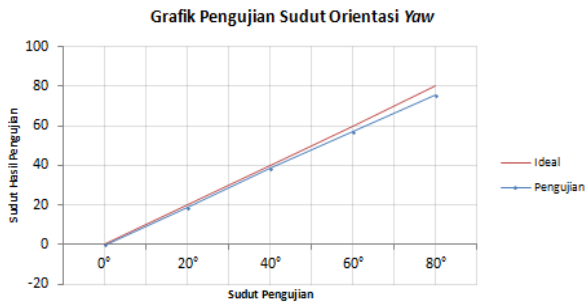
### 3.3 Pengujian Sudut Yaw

Sudut-sudut yang diuji pada pengujian *yaw* adalah sudut  $0^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $80^\circ$ . Hasil pengujian sudut *yaw* beserta nilai RMSE masing-masing sudut pengujian dapat dilihat pada tabel 3 berikut.

Tabel 3 Nilai Rata-rata dan RMSE pengujian sudut yaw

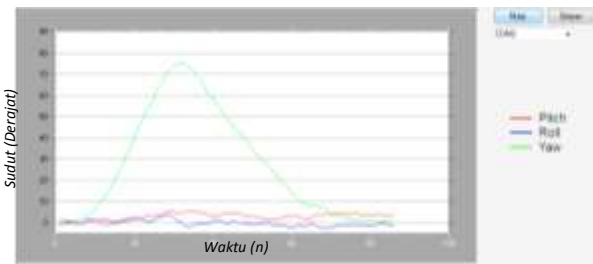
Sudut Pengujian Yaw	Pengujian ke-n				RMSE
	1	2	3	4	
0°	-0.2519	-0.2634	-0.1970	-0.2610	0.3446
20°	18.6039	18.4702	18.5819	18.7010	1.4403
40°	38.3383	38.3751	38.3684	38.3356	1.6740
60°	56.9230	56.7043	56.7234	56.6039	3.2775
80°	75.1958	75.3138	75.2341	75.1787	4.7831

Dari hasil pada tabel 3 maka dapat digambarkan grafik pengujian seperti pada Gambar 11. Hasil keluaran yaw dari modul semakin menjauh dari grafik ideal, hal ini dikarenakan terdapat gangguan *soft-iron* yang menyebabkan nilai pengukuran bergeser dengan nilai yang berbeda pada masing-masing kuadran.



Gambar 11 Grafik pengujian sudut orientasi yaw

Pengujian sudut *yaw* yang kedua adalah pengujian independensi masing-masing sudut orientasi. Pengujian ini dilakukan dengan memutar sudut orientasi yang sedang diuji dan mempertahankan kedua sudut orientasi lainnya.



Gambar 12 Grafik pengujian independensi sudut yaw

Gambar 12 menunjukkan bahwa sudut yaw sudah memiliki independensi yang baik. Gangguan yang terjadi pada sudut roll dan yaw pada gambar 12 ditimbulkan oleh getaran tangan pada saat pengujian.

### 3.4 RMSE Rata-rata Pengujian Sudut

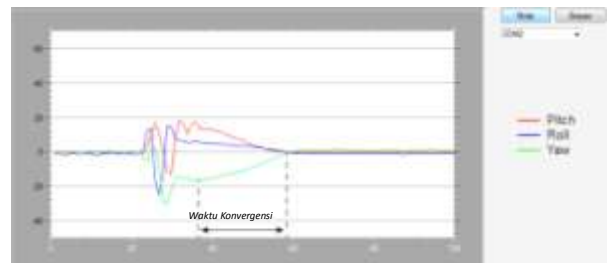
Tabel 4 RMSE rata-rata dari hasil pengujian modul MARG

	Yaw ( $\psi$ )	Pitch ( $\theta$ )	Roll ( $\phi$ )
$RMS_{Error} 0^\circ$	0.3446°	0.1617°	0.2448°
$RMS_{Error} 20^\circ$	1.4403°	1.0051°	0.7542°
$RMS_{Error} 40^\circ$	1.6740°	0.3380°	0.5901°
$RMS_{Error} 60^\circ$	3.2775°	0.3410°	0.1859°
$RMS_{Error} 80^\circ$	4.7831°	0.3019°	0.5938°
<b>Rata-rata</b>	<b>2.3039°</b>	<b>0.4295°</b>	<b>0.4738°</b>

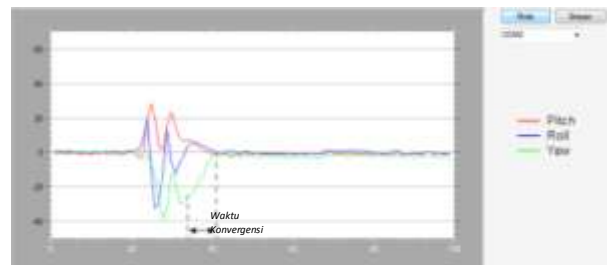
Nilai eror yang besar pada yaw disebabkan oleh karakteristik pengukuran magnetometer yang memiliki banyak noise. Penelitian-penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa eror yaw lebih besar dibandingkan eror pitch dan roll<sup>[4][19][20]</sup>. Offset yang besar pada yaw, khususnya pada sudut mendekati 90 derajat, disebabkan filter ini belum memiliki algoritma untuk mengatasi gangguan *soft-iron* pada magnetometer.

### 3.5 Pengujian dan Analisa Respon Filter

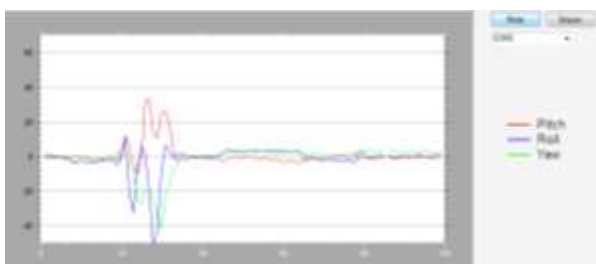
Kemampuan filter dalam mengatasi eror drift integral dipengaruhi oleh besarnya gain  $\beta$ . Pada sub-bab ini hanya ditampilkan tiga buah grafik pengujian yaitu variasi nilai  $\beta$  0.1, 0.5, dan 1.0.



Gambar 13 Respon filter dengan  $\beta = 0.1$



Gambar 14 Respon filter dengan  $\beta = 0.5$



Gambar 15 Respon filter dengan  $\beta = 1.0$

Pada gambar 13 terlihat algoritma membutuhkan waktu untuk mengatasi drift integral yang terbentuk setelah quadrotor diberi guncangan. Pada gambar 14, waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi drift integral semakin cepat, hanya saja grafik terlihat lebih banyak mengandung noise dibandingkan dengan gambar 13. Pada variasi nilai gain terakhir yaitu 1.0, terlihat waktu yang dibutuhkan untuk mengatasi drift integral bisa dikatakan hilang. Namun noise yang dikandung jauh lebih besar dibandingkan pada nilai-nilai gain sebelumnya. Respon tersebut terjadi karena ketika nilai gain yang diberikan kecil, maka pengaruh yang diberikan oleh *accelerometer* dan *magnetometer* terhadap pengukuran juga semakin kecil, sebaliknya semakin besar nilai gain yang diberikan, maka pengaruh *accelerometer* dan *magnetometer* terhadap pengukuran semakin besar. Berdasarkan hal itu maka keluaran modul ketika diberi nilai gain yang besar akan rentan terhadap getaran, tetapi pengaruh drift yang ditimbulkan oleh *gyroscope* semakin kecil. Ketika nilai gain yang diberikan kecil maka pengaruh drift integral dari *gyroscope* menjadi besar, namun keluaran modul tidak rentan terhadap getaran. Noise yang diberikan pada saat diberikan nilai gain besar (khususnya pada saat tidak ada gangguan eksternal) juga disebabkan oleh karakteristik dari metode optimasi *Gradient-Descent* yang digunakan dalam penelitian ini. *Gradient-descent* cenderung memiliki grafik yang *zig-zag*<sup>[21]</sup> sehingga dapat menimbulkan keluaran yang menyerupai *noise* dalam respon filter. *Gradient-descent* juga memiliki respon yang lambat untuk bisa konvergen<sup>[21]</sup>, sehingga ketika gain yang diberikan kecil, kemampuan untuk mengatasi drift integral dari *gyroscope* juga berkurang.

#### 4. Kesimpulan

Filter *non-linear complementary* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki error RMS pada *yaw* sebesar  $2.3039^\circ$ , pada *pitch* sebesar  $0.4295^\circ$ , dan pada *roll* sebesar  $0.4738^\circ$ . Nilai gain  $\beta$  terbaik berdasarkan hasil pengujian pada modul MARG ini adalah sebesar 0.2. Nilai tersebut mampu memberikan respon filter yang cukup cepat dengan noise yang tidak terlalu besar. Nilai  $\beta$  yang besar akan mempercepat respon filter namun juga akan memberikan banyak noise terhadap keluaran sensor.

#### Referensi

- [1]. A. F. Sorensen, *Autonomous Control of a Miniature Quadrotor Following Fast Trajectories*, Control Engineering Master's Thesis, Aalborg University, Denmark, 2010.
- [2]. T. S. Yoo, S. K. Hong, H. M. Yoon, dan S. Park, *Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System*, Dept. of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul, 2011.
- [3]. M. Euston, P. Coote, R. Mahony, J. Kim, dan T. Hamel, *A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV*, Dept. of Engineering, Australian National University, Australia, 2008.
- [4]. S. O. H. Madgwick, *An Efficient Orientation Filter for Inertial and Inertial/Magnetic Sensor Arrays*, 2010.
- [5]. T. Bresciani, *Modelling, Identification and Control of a Quadrotor Helicopter*, Master's Thesis, Dept. of Automatic Control, Lund University, Swedia, 2008.
- [6]. R. Mukundan, *Quaternions: From Classical Mechanics to Computer Graphics, and Beyond*, dalam *Proc. of the 7th Asian Technology Conference in Mathematics*, Malaysia, 2002.
- [7]. J. B. Kuipers, *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality*, Princeton University Press, 1999.
- [8]. D. Eberly, *Quaternion Algebra and Calculus*, <http://www.geometrictools.com/Documentation/Quaternions.pdf>, Juli 2011.
- [9]. InvenSense Inc., *ITG-3200 Product Specification (Revision 1.4)*, California, 2010.
- [10]. NOAA/NGDC dan CIRES, *US/UK World Magnetic Model – Epoch 2010.0: Main Field Inclination (I)*, [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010\\_I\\_MERC.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/data/WMM2010/WMM2010_I_MERC.pdf), Juli 2011.
- [11]. S. Colton, *The Balance Filter: A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform*, <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>, Juni 2011.
- [12]. J. A. Snyman, *Practical Mathematical Optimization: An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms*, Springer, Massachusetts, February 2005, (ISBN 0-387-24348-8).
- [13]. Bosch Sensortec GmbH, *Data Sheet: BMA180 Digital, Triaxial Acceleration Sensor*, Germany, 2009.
- [14]. Honeywell International Inc., *HMC5843 3-Axis Digital Compass IC*, Minnesota, 2009.
- [15]. S. Kwanmuang, L. Ojeda, dan J. Borenstein, *Magnetometer-enhanced Personal Locator for Tunnels and GPS-denied Outdoor Environments*, dalam *Proc. of the SPIE Defense, Security + Sensing: Unmanned Systems Technology XIII; Conference DS117: Unmanned, Robotic and Layered Systems*, Orlando, April 25-29, 2011.
- [16]. Atmel Corporation, *8-bit Atmel Microcontroller with 64K/128K/256K Bytes In-System Programmable Flash*, California, 2012.
- [17]. Sudjadi, *Teori dan Aplikasi Mikrokontroler: Aplikasi pada Mikrokontroler AT89C51*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2005.
- [18]. ShenZhen YiShi Electronic Technology Development Co., Ltd., *YS-1020UB Manual*, China.
- [19]. D. Jurman, M. Jankovec, R. Kamnik, M. Topic, *Calibration and Data Fusion Solution for the Miniature*

*Attitude and Heading Reference System*, dalam *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 138, Mei 2007.

- [20]. A. M. Sabatini, *Quaternion-Based Extended Kalman Filter for Determining Orientation by Inertial and Magnetic Sensing*, dalam *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, Juli 2006.
- [21]. N. N. Schraudolph, J. Yu, S. Gunter, *A Stochastic Quasi-Newton for Online Convex Optimization*, dalam *Proc. 11th International Conference Artificial Intelligence and Statistics*, Puerto Rico, 2007.