

SENSOR FUSION MENGGUNAKAN ACCELEROMETER RATE GYRO (ARG) UNTUK ESTIMASI SUDUT EULER PADA WAHANA TERBANG

Mochammad Ariyanto

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto SH, Tembalang, Semarang 50275 Indonesia, Telp/Fax: +62 24 7460059
E-mail: ari_janto5@yahoo.co.id

ABSTRAK

Pada sistem control wahana terbang tanpa awak (*Unmanned Aerial Vehicle*) gabungan sensor accelerometer dan gyroscope sering dipakai untuk mengestimasi sudut Euler seperti sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Dalam penelitian ini, akan didesain sebuah instrumen yang dapat digunakan untuk mengestimasi sudut Euler wahana terbang tanpa awak dengan menggunakan gabungan sensor accelerometer dan gyroscope yang menggunakan algoritme *sensor fusion* seperti *Accelerometer Rate Gyro* (ARG). Instrumen ini dapat mengukur dan mengestimasi kecepatan sudut putar, percepatan linear, serta sudut Euler wahana terbang tanpa awak. Pada estimasi sudut menggunakan sensor accelerometer, hasilnya akan cukup bagus jika sensor accelerometer dalam kondisi statis, namun jika dalam kondisi dinamik maka sensor accelerometer akan gagal untuk mengestimasi sudut karena berasal dari error ketika mengalami percepatan. Sedangkan jika menggunakan gyroscope, estimasi sudut akan bagus dalam kondisi dinamik, dan buruk jika dalam kondisi statik karena adanya error drift. Oleh karena itu perlu dilakukan *sensor fusion* antara accelerometer dan gyroscope. Pemodelan dan algoritme *sensor fusion* dilakukan dalam lingkungan MATLAB/Simulink, implementasinya dilakukan menggunakan *hardware in the loop simulation*. Evaluasi kinerja *sensor fusion* yang sudah dibuat akan dilakukan dengan menganalisa pada kondisi *steady state*. Dari hasil pengujian HILS didapatkan bahwa masih terdapat *noise* yang relatif kecil pada sudut Euler.

Kata kunci: *Accelerometer Rate Gyro* (ARG), *accelerometer*, *gyroscope*, *Sensor Fusion*, HILS

1. PENDAHULUAN

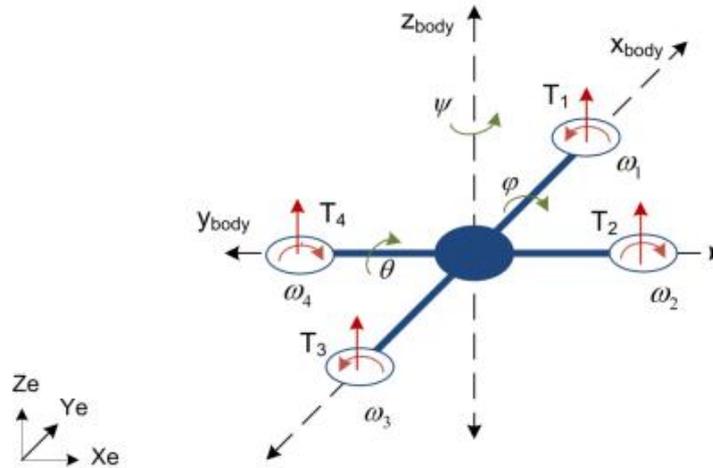
Estimasi sudut Euler dapat dilakukan dengan menggunakan sensor accelerometer, gyroscope, maupun gabungan antara accelerometer dan gyroscope. Estimasi sudut menggunakan sensor accelerometer cukup bagus jika sensor accelerometer dalam kondisi statis, namun pada kondisi dinamik sensor accelerometer akan gagal untuk mengestimasi sudut Euler karena berasal dari error ketika mengalami percepatan. Sedangkan jika menggunakan gyroscope, estimasi sudut akan bagus pada kondisi dinamik, dan buruk jika dalam kondisi statik karena adanya *drift error*. Oleh karena itu perlu dilakukan *sensor fusion* antara accelerometer dan gyroscope, yang dapat menggabungkan kelebihan dari masing-masing sensor, dalam artian *sensor fusion* tersebut akan mengestimasi dengan baik dalam keadaan statik maupun dinamik.

Sebagian besar dari estimasi sudut Euler menggunakan *sensor fusion* merupakan *complementary filter* dan Kalman Filter. *Complementary Filter* dibahas pada literatur [1], [2], [3]. *Complementary filter* digunakan untuk menggabungkan informasi keadaan/*state* dan turunan dari *state*. Quaternion berbasis *complementary filter* paling sesuai untuk pengukuran inersia dengan sensor biaya rendah dan mikroprosesor dengan kecepatan terbatas [4]. *Complementary filter* memiliki kelemahan, ketika frekuensi cut-off merupakan frekuensi relatif tinggi, sudut estimasi konvergen pada kondisi *steady state*, tetapi tidak bagus jika mengalami dinamika yang cepat [3]. Extended Kalman Filtering (EKF) telah dipelajari untuk estimasi sudut Euler, namun EKF secara komputasi membutuhkan perhitungan yang kompleks dan sulit untuk diimplementasikan [3]. Gross dkk [5]) telah mengembangkan algoritma *Global Positioning System* /sistem navigasi inersia (GPS /INS) menggunakan EKF dan Unscented Kalman filter (UKF). Kedua EKF dan UKF memiliki model matematis yang kompleks. Pada referensi [6] telah mengembangkan *complementary filter* yang diterapkan pada wahana terbang sayap tetap/*fixed wing*.

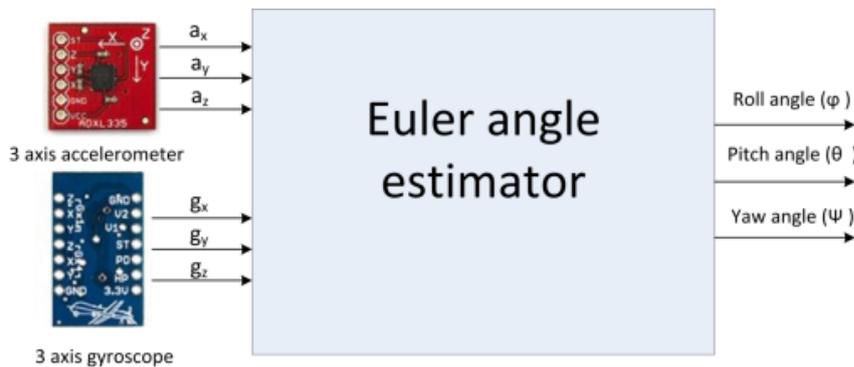
Dalam penelitian ini, IMU yang terdiri dari 3-axis accelerometer dan 3-axis gyroscope. Accelerometer digunakan untuk mengukur percepatan tiga dimensi dalam koordinat body, percepatan mlongitudinal (ax), akselerasi lateral (ay), dan percepatan vertikal (az). Sedangkan gyroscope digunakan untuk mengukur kecepatan sudut pada sumbu x (gx), kecepatan sudut di sumbu y (gy), dan kecepatan sudut di z-axis (gz). Estimasi sudut Euler dihitung dengan menggunakan algoritma *sensor fusion* yang diusulkan oleh [7]. Algoritma filter Accelerometer Rate Gyro (ARG) menggunakan quaternions untuk memperkirakan sudut Euler. Dalam penelitian ini akan dikembangkan *fusion sensor algorithm* dengan menggunakan ARG. Algoritme *sensor fusion* tersebut cukup mudah dikembangkan karena hanya berisikan sensor 3 aksis accelerometer dan 3 aksis gyroscope. Selain itu algoritme tersebut tidak membutuhkan pemodelan matematika yang cukup rumit dan kompleks.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini, pemodelan sensor *fusion* menggunakan *accelerometer* dan *gyroscope* dilakukan dalam lingkungan MATLAB/Simulink. Untuk koordinat sudut Euler pada wahana terbang dan *sensor fusion* dapat dilihat pada gambar 1. Pada *sensor fusion algorithm*, hasil keluaran adalah estimasi sudut roll, pitch, dan yaw, seperti yang terlihat pada Gambar 2.



Gambar 1. Koordinat wahana terbang quadrotor



Gambar 2. Sensor fusion

Salah satu cara untuk mewakili sudut adalah dengan menggunakan quaternions. Quaternions telah dirancang oleh William Rowan Hamilton pada tahun 1843. Quaternion merupakan empat buah angka didefinisikan sebagai vektor yang ditulis dalam persamaan (1).

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k \tag{1}$$

dimana:

- q adalah besarnya vektor quaternion
- q₀ adalah besarnya nilai riil quaternion
- q₁, q₂ dan q₃ adalah nilai imajiner quaternion.

Norm pengukuran 3 aksis accelerometer dapat dihitung sebagai berikut

$$\text{norm} = \sqrt{(a_x a_x + a_y a_y + a_z a_z)} \tag{2}$$

$$a_x = \frac{a_x}{\text{norm}}$$

$$a_y = \frac{a_y}{\text{norm}}$$

$$a_z = \frac{a_z}{\text{norm}}$$

dimana:

- a_x adalah percepatan dari arah sensor *accelerometer* pada sumbu x koordinat body
- a_y adalah percepatan dari arah sensor *accelerometer* pada sumbu y koordinat body
- a_z adalah percepatan dari arah sensor *accelerometer* pada sumbu z koordinat body

Medan dari arah gravitasi (v_x , v_y , dan v_z) dapat diestimasi menggunakan quaternion dalam persamaan sebagai berikut

$$\begin{aligned} v_x &= 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ v_y &= 2(q_0q_1 + q_2q_3) \\ v_z &= q_0q_0 - q_1q_1 - q_2q_2 + q_3q_3 \end{aligned} \tag{3}$$

Error adalah jumlah *cross product* antara arah referensi dari medan gravitasi (v_x , v_y , dan v_z) dan arah yang diukur oleh sensor *accelerometer* (a_x , a_y , and a_z)

$$\begin{aligned} e_x &= v_y a_z - v_z a_y \\ e_y &= v_z a_x - v_x a_z \\ e_z &= v_x a_y - v_y a_x \end{aligned} \tag{4}$$

Pengukuran estimasi luran *gyroscope* yang disesuaikan dapat dihitung dengan rumus berikut ini

$$\begin{aligned} g_{adjx} &= g_x + Kp e_x + Ki \int e_x dt \\ g_{adjy} &= g_y + Kp e_y + Ki \int e_y dt \\ g_{adjz} &= g_z + Kp e_z + Ki \int e_z dt \end{aligned} \tag{5}$$

dimana:

- g_{adjx} adalah nilai dari sensor *gyroscope* yang sudah disesuaikan untuk sumbu x
- g_{adjy} adalah nilai dari sensor *gyroscope* yang sudah disesuaikan untuk sumbu y
- g_{adjz} adalah nilai dari sensor *gyroscope* yang sudah disesuaikan untuk sumbu z
- g_x adalah nilai yang terukur dari sensor *gyroscope* untuk sumbu x
- g_y adalah nilai yang terukur dari sensor *gyroscope* untuk sumbu y
- g_z adalah nilai yang terukur dari sensor *gyroscope* untuk sumbu z

Konversi dari sudut Euler ke dalam bedaran quaternion yang sesuai ditulis dalam persamaan (6). Persamaan ini digunakan untuk mengubah kondisi awal sudut Euler ke besaran quaternion yang sesuai.

$$\begin{aligned} q_0 &= c(\varphi/2)c(\theta/2)c(\psi/2) + s(\varphi/2)s(\theta/2)s(\psi/2) \\ q_1 &= -c(\varphi/2)s(\theta/2)s(\psi/2) + c(\varphi/2)c(\theta/2)s(\psi/2) \\ q_2 &= c(\varphi/2)s(\theta/2)c(\psi/2) + s(\varphi/2)s(\theta/2)s(\psi/2) \\ q_3 &= c(\varphi/2)c(\theta/2)s(\psi/2) - s(\varphi/2)s(\theta/2)c(\psi/2) \end{aligned} \tag{6}$$

Pada akhirnya, James Diebel, [8] memberikan hubungan antara besaran quaternion dengan waktu dan kecepatan putar *body* sebagai berikut

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{1}{2} q \cdot p(\Omega) \\ \dot{q} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_0 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \\ \dot{q} &= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

dimana $\omega_x = g_{adjx}$, $\omega_y = g_{adjy}$, $\omega_z = g_{adjz}$. norm dari quaternion adalah

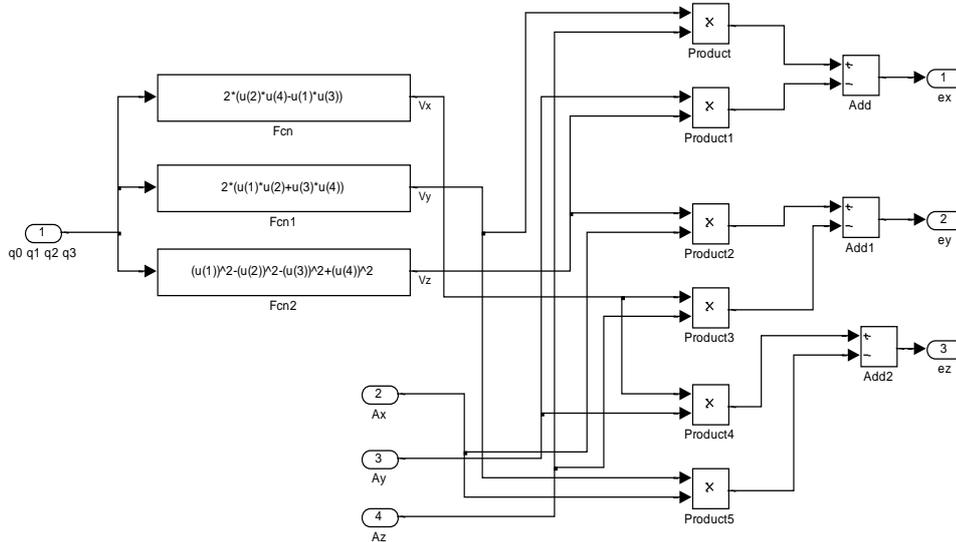
$$\begin{aligned} norm &= \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2} \\ q_0 &= \frac{q_0}{norm} \\ q_1 &= \frac{q_1}{norm} \\ q_2 &= \frac{q_2}{norm} \\ q_3 &= \frac{q_3}{norm} \end{aligned} \tag{8}$$

Akhirnya, Sudut Euler yang diestimasi dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini

$$\begin{aligned} \varphi &= \text{atan2}(2(q_0q_1 + q_2q_3), 1 - 2(q_1q_1 + q_2q_2)) \\ \theta &= \text{asin}(2(q_0q_2 - q_1q_3)) \\ \psi &= \text{atan2}(2(q_0q_3 + q_1q_2), 1 - 2(q_2q_2 + q_3q_3)) \end{aligned} \tag{9}$$

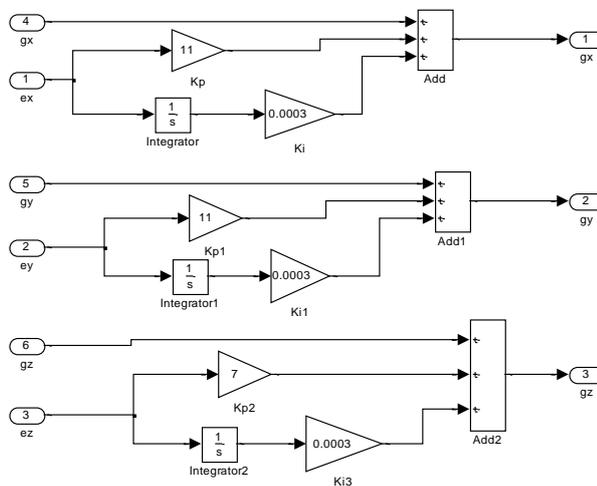
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan (2) dapat dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan seperti pada gambar 3.



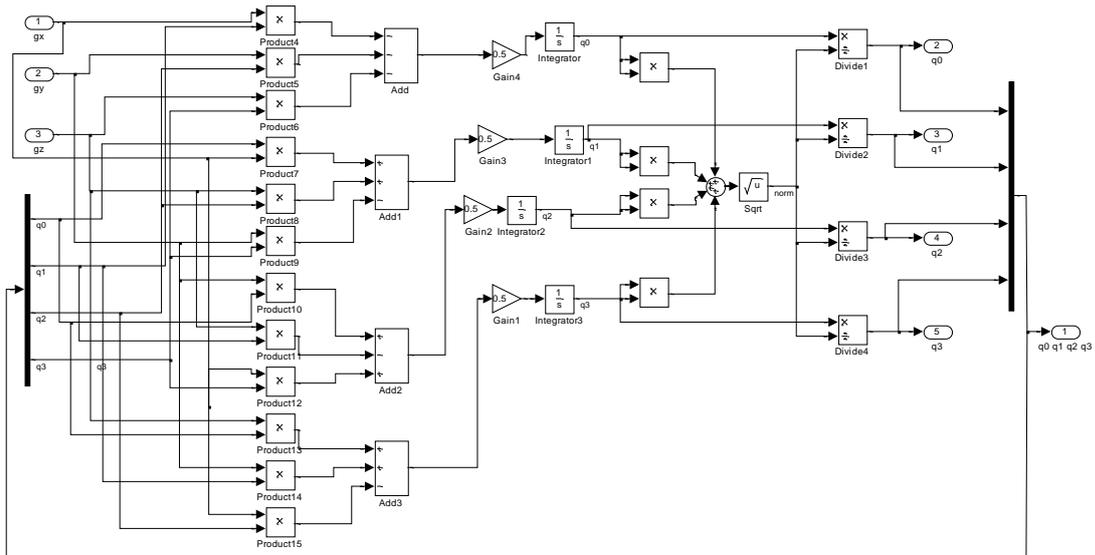
Gambar 3. Estimasi arah gravitasi untuk sumbu x, y dan z

Sedangkan persamaan (5) di atas dapat dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan pada gambar 4.



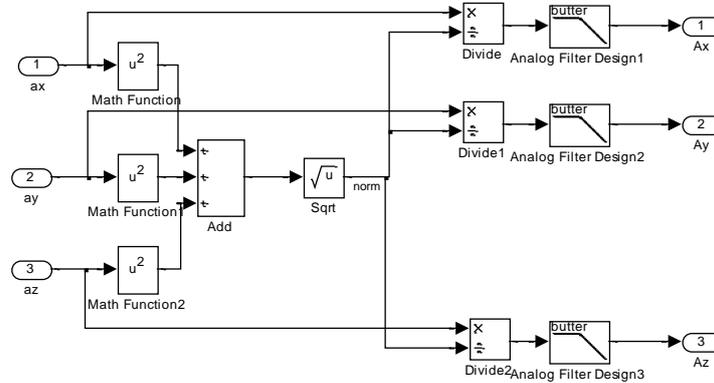
Gambar 4. Gyroscope adjusted untuk sumbu x, y dan z

Persamaan (6) dan (7) di atas dapat dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan pada gambar 5.



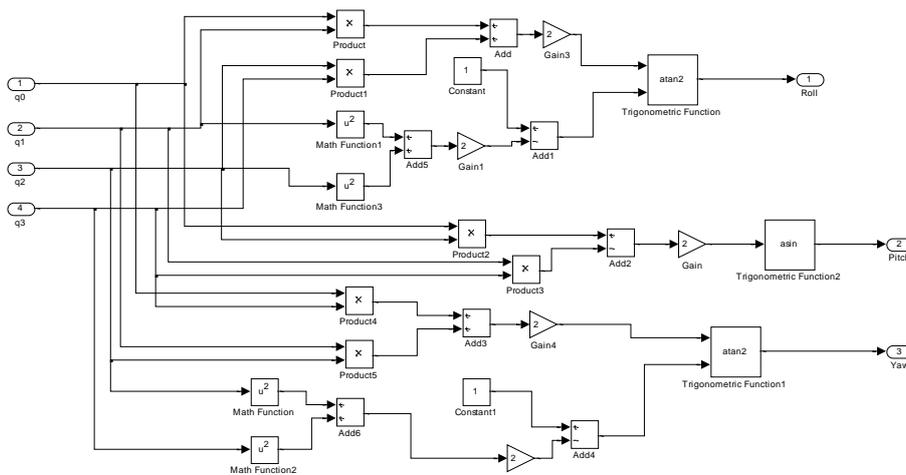
Gambar 5. Pemetaan sudut euler dengan *quaternion* untuk sumbu x, y dan z

Persamaan (8) dapat dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan pada Gambar 6.



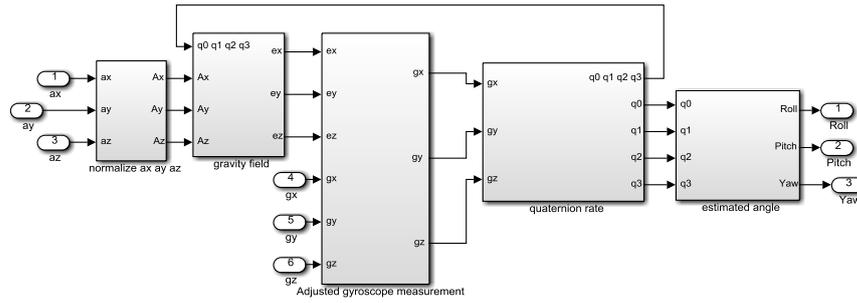
Gambar 6. Normalisasi *quaternion* untuk sumbu x, y dan z

Persamaan (9) dapat dimodelkan dengan menggunakan *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan pada Gambar 7.



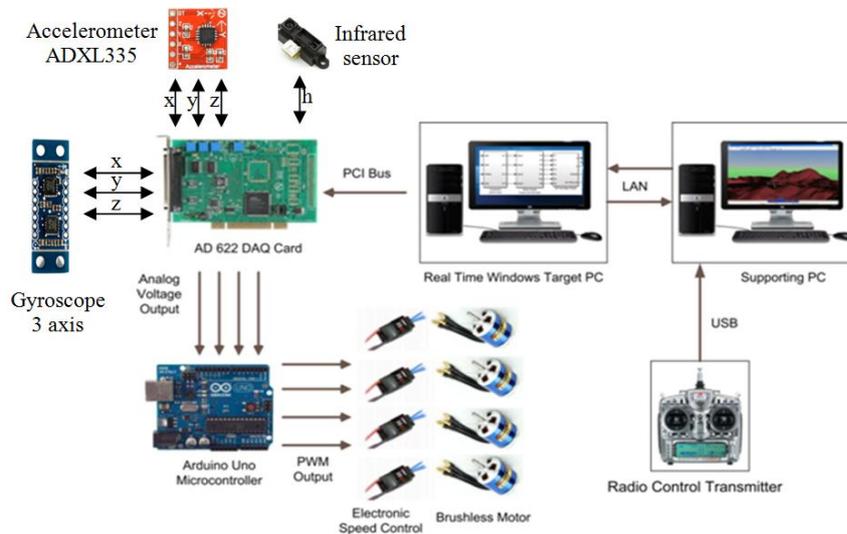
Gambar 7. Perkiraan sudut Euler untuk sumbu x, y dan z

Setelah semua perhitungan dan rumus diperoleh, maka gabungan algoritma sensor diimplementasikan kedalam *MATLAB/Simulink* yang ditunjukkan pada Gambar 8.



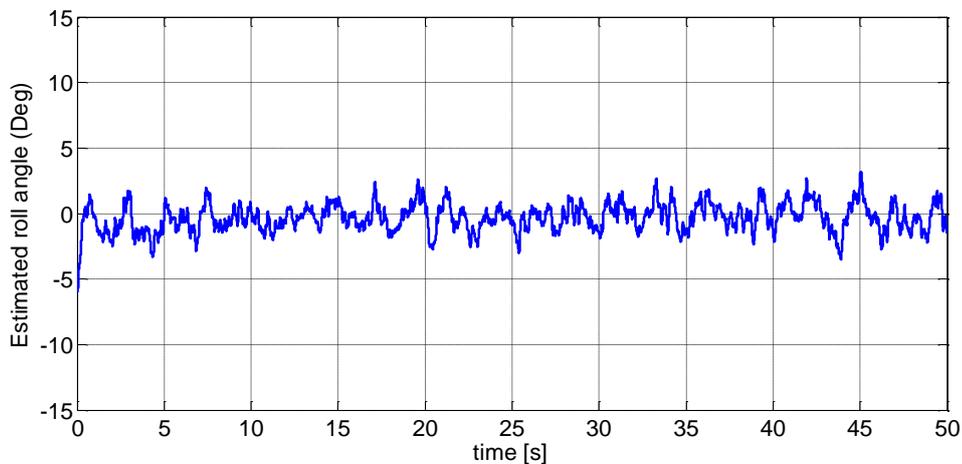
Gambar 8. Accelerometer rate dangyroscope adjusted dengan metode quarternion

Selanjutnya setelah pengembangan matematika algoritme ARG, model tersebut diimplementasikan pada *hardware in the loop simulation* (HILS) seperti yang ditunjukkan pada gambar 9. Sensor accelerometer dan gyroscope dibaca oleh AD 622 Data Acquisition (DAQ) Card. Program ARG ditanamkan kedalam DAQ Card oleh MATLAB\Simulink menggunakan Real Time Windows Target (RTWT) toolbox pada host PC komputer. Kemudian hasil estimasi sudut Euler akan disimulasikan secara 3D view menggunakan Virtual Reality.

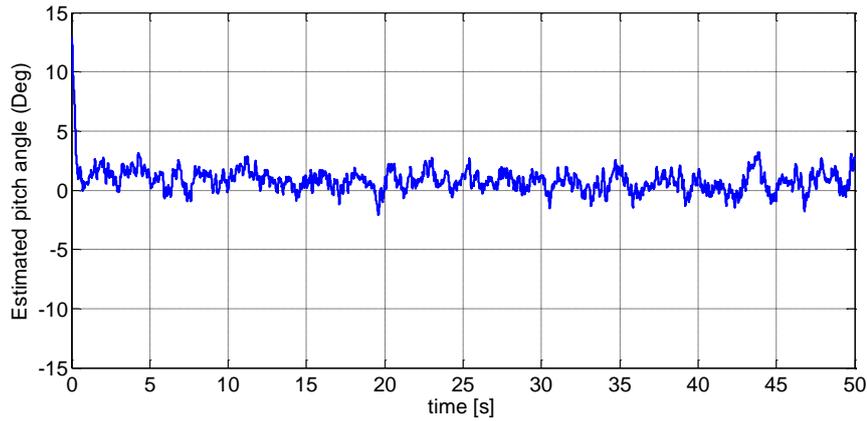


Gambar 9. Hardware in the loop simulation

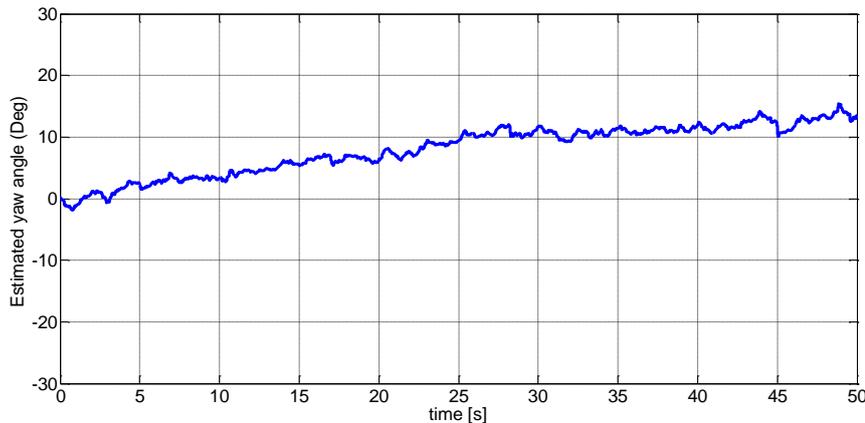
Dari model gabungan sensor yang diimplementasikan ke dalam HILS, dapat diperoleh grafik estimasi pembacaan sudut *roll*, *pitch* dan *yaw* yang ditunjukkan pada Gambar 10, 11, dan 12.



Gambar 10. Estimasi sudut roll



Gambar 11. Estimasi sudut *pitch*

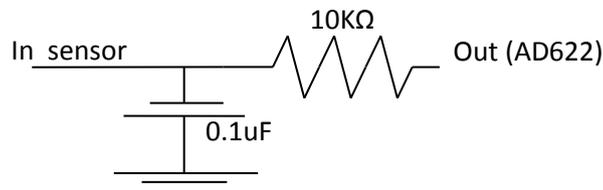


Gambar 12. Estimasi sudut *yaw*

Pada Gambar 10 dan 11, dapat dilihat bahwa terdapat *noise* yang mengakibatkan pembacaan sudut *pitch* bersosilasi sekitar ± 3 derajat. Sedangkan pada gambar 12 terdapat *drift error* sebesar 15 derajat dalam waktu 50 detik.

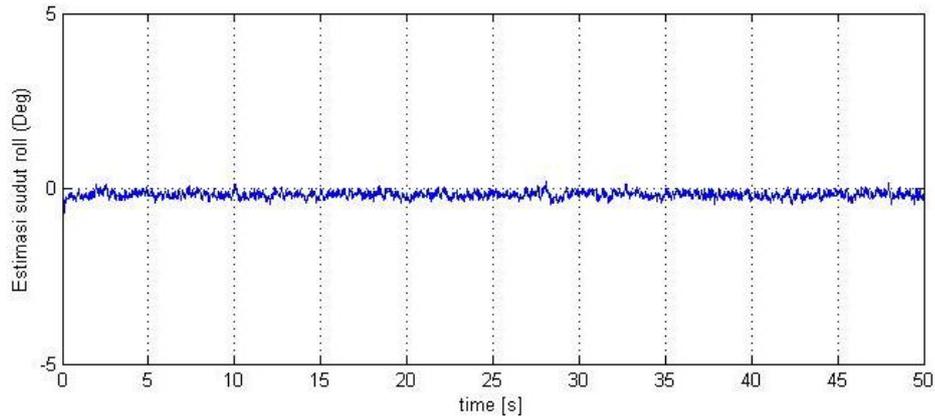
Dari hasil estimasi sudut Euler di atas untuk sudut *roll*, *pitch* dan *yaw* terdapat *error* pembacaan sudut yang diakibatkan oleh *noise*. Untuk itu perlu ditambahkan rangkaian filter yang dapat mengurangi *noise* yang ada sehingga pembacaan sudut *roll*, *pitch* dan *yaw* dapat lebih akurat. Maka dalam HILS dilakukan beberapa langkah untuk mengurangi besarnya *noise* yaitu dengan:

- Menambah aluminium foil pada *connector cable* yang menghubungkan AD622 DAQ dengan sensor accelerometer dan gyroscope.
- Menambah rangkaian filter yang berupa rangkaian elektronik yaitu kombinasi resistor dan kapasitor yang di *couple* ke ground seperti yang ditunjukkan pada gambar 13 [9]
- Menambahkan *grounding* pada PC Host dan PC target
- Mengganti catu daya sensor dengan menggunakan *output* tegangan luar sebesar 5 volt *Arduino Board*.

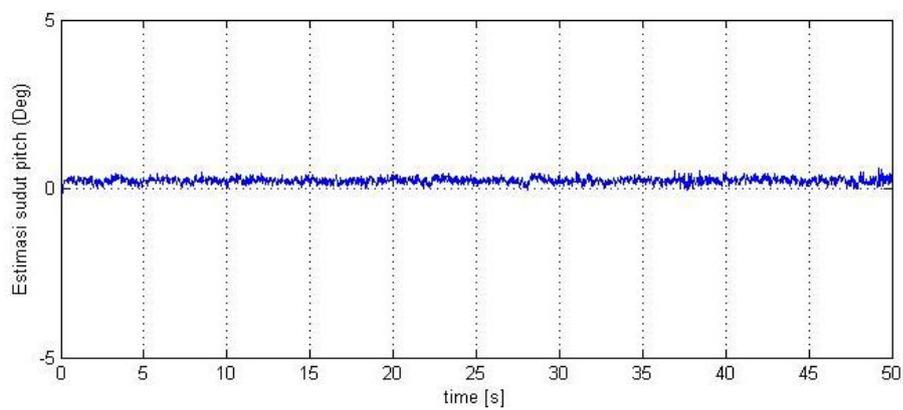


Gambar 13. Rangkaian filter

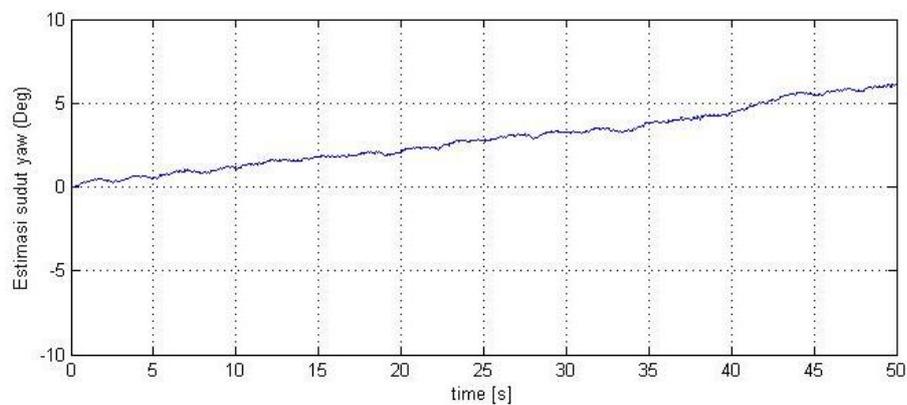
Dari beberapa langkah yang telah dilakukan di atas kemudian, kemudian dilakukan pengujian estimasi sudut Euler menggunakan HILS. Hasil pengujian HILS menunjukkan bahwa rangkain filter dapat mengurangi *noise* sehingga estimasi sudut Euler untuk *roll*, *pitch* dan *yaw* menjadi lebih akurat seperti ditunjukkan pada Gambar 14, 15 dan 16.



Gambar 14. Estimasi sudut *roll* setelah melalui rangkain filter



Gambar 15. Estimasi sudut *pitch* setelah melalui rangkain filter



Gambar 16. Estimasi sudut *yaw* setelah melalui rangkain filter

Pada Gambar 14, dan 15 dapat dilihat bahwa setelah dilakukan filterisasi dan beberapa perlakuan maka *noise* yang mengakibatkan pembacaan sudut *roll* beresilasi dapat berkurang hanya sekitar $\pm 0,2$ derajat. Pada gambar 16 dapat dilihat bahwa *noise* yang mengakibatkan pembacaan sudut *yaw* mengalami *drift error* sekitar 15 derajat dalam waktu 50 detik berkurang menjadi sekitar 6 derajat. Pada gambar 17 merupakan hasil pengujian data akuisisi sudut estimasi sudut Euler dan ketinggian quadrotor. Sensor fusion tersebut terdapat dalam host computer, sedangkan hasil animasi gerak quadrotor terdapat pada supporting komputer.



Gambar 17. Pengujian sensor fusion yang diimplementasikan dalam HIL dan virtual reality

4. KESIMPULAN

Pada estimasi sudut *roll* dan *pitch* sebelum diberikan rangkaian filter resistor dan kapasitor, terdapat *noise* yang dapat mengakibatkan pembacaan estimasi sudut *roll* dan *pitch* beresilasi disekitar ± 3 derajat. Setelah dilakukan filterisasi dan beberapa perlakuan maka *noise* yang mengakibatkan pembacaan sudut *roll* beresilasi dari ± 3 derajat dapat berkurang hingga menjadi sekitar $\pm 0,2$ derajat. Sebelum diberikan rangkain filter resistor dan kapasitor, terdapat *noise* yang mengakibatkan estimasi pembacaan sudut *yaw* mengalami *drift error* sekitar 15 derajat dalam waktu 50 detik. Setelah dilakukan filterisasi dan beberapa perlakuan *noise* yang mengakibatkan estimasi pembacaan sudut *yaw* mengalami *drift error* sekitar 15 derajat dalam waktu 50 detik berkurang menjadi sekitar 6 derajat dalam waktu 50 detik. Dari hasil pengujian didapatkan bahwa *sensor fusion ARG* dapat menggabungkan kekurangan sensor accelerometer dan sensor gyroscope.

5. REFERENSI

- [1] Collinson, R.P.G. (1996). Introduction to Avionics. Chapman & Hall. London. UK.
- [2] Lai, Y. C., Jan S. S., and Hsiao F. B. (2010). Development of a Low-Cost Attitude and Heading Reference System Using a Three-Axis Rotating Platform. Journal of Sensors, 10, 2472-2491
- [3] Yoo, T. S., Hong S. K., Yoon H. M., and Park S. (2011). Gain-Scheduled Complementary Filter Design for a MEMS Based Attitude and Heading Reference System. Journal of Sensors, 11, 3816-3830.
- [4] Fux, S. (2008). Development of a planar low cost Inertial Measurement Unit for UAVs and MAVs. Master Thesis. ETH Zurich.
- [5] Gross, J. N., Gu Y., Rhudy M. B., Gururajan S., Marcello R. N. (2012). Flight-Test Evaluation of Sensor Fusion Algorithms for Attitude Estimation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 48, 2128-2139.
- [6] Mark Euston, Paul Coote, Robert Mahony, Jonghyuk Kim and Tarek Hamel., 2008. A complementary filter for attitude estimation of a fixed-wing UAV, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS 2008.
- [7] Madgwick, S, Harrison, A., and VaidyanathanR. (2011). Estimation of IMU and MARG Orientation Using a Gradient Descent Algorithm. In IEEE International Conference on Re-habilitation Robotics (ICORR), ICORR '11, 1-7.
- [8] Diebel, J. (2006). "Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors". Stanford University, Stanford, California 94301-9010.
- [9] Güçlü, A. (2012). Attitude and Altitude Control of an Outdoor Quadrotor. Master Thesis, Atilim University.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Pembinaan dan Pemula, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.