

Pendeteksi Sikap pada Model Wahana Terbang menggunakan *Inertial Measurement Unit*

NANDANG TARYANA, DECY NATALIANA, ALFIE RIZKY ANANDA

Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Bandung

E-mail : nandang@itenas.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang aplikasi dari sensor gyroscope dan accelerometer yang merupakan komponen penyusun alat ukur inersial (inertial measurement unit) untuk mendeteksi sikap (attitude) pada wahana terbang tanpa awak. Sikap (attitude) memberikan 3 (tiga) informasi yaitu roll, pitch dan yaw. Penelitian ini bertujuan untuk melihat apakah alat pendeteksi sikap (attitude) sudah layak atau tidak digunakan pada wahana terbang yang akan dimodelkan yaitu dengan cara merancang sistem pengukuran/pendeteksi serta monitoring sikap (attitude) menggunakan software LabVIEW. Metode yang digunakan untuk mendeteksi kemiringan attitude merupakan penggabungan hasil pengukuran dari gyroscope dan accelerometer. Pengujian alat pendeteksi sikap dilakukan dengan cara mensimulasikan kinematika pergerakan wahana terbang. Berdasarkan hasil pengujian, alat pendeteksi sikap sudah layak digunakan pada wahana terbang Hal ini sesuai dengan simpangan rata – rata yang diperoleh dari hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (roll) sebesar $0,58^\circ$, rotasi pada sumbu y (pitch) sebesar $0,53^\circ$ dan rotasi pada sumbu z (yaw) sebesar $7,64^\circ$.

Kata Kunci : Gyroscope, Accelerometer, Inertial Measurement Unit, attitude

ABSTRACT

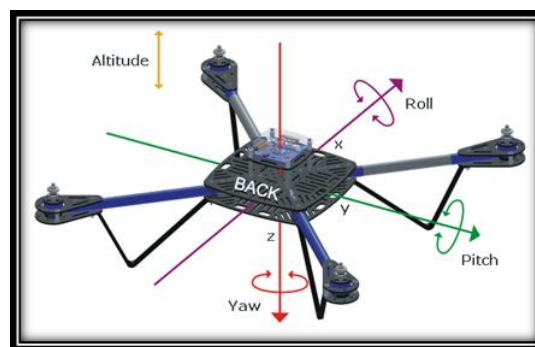
This journal elaborate the application of a gyroscope and accelerometer from an inertial measurement unit (IMU) for sensing attitude on an aircraft. Attitude give 3 (three) basic informations, that information are roll, pitch and yaw. The purpose of this journal is to analys if the attitude sensing device are suitable to be used on a model aircraft. This journal are designing measurement system and monitoring using software from LabVIEW. The method used to detect roll, pitch and yaw is combination from the measurement of gyroscope and accelerometer. The testing of the attitude sensing device by simulating the kinematics of an aircraft. The results shows that the attitude sensing device are qualified for sensing tilt angle for x-axis (roll) with standard deviation $0,58^\circ$, sensing tilt angle for y-axis (pitch) with standard deviation 0.53° and sensing tilt angle for z (axis) with standar deviation $7,64^\circ$.

Kata Kunci : Gyroscope, Accelerometer, Inertial Measurement Unit, attitude

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi khususnya di dunia penerbangan semakin pesat. Salah satu perkembangan di bidang tersebut adalah munculnya wahana terbang tanpa awak. Wahana terbang tersebut dikenal dengan istilah *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*. *Unmanned Aerial Vehicle* adalah suatu wahana terbang tanpa awak yang dapat terbang secara otomatis atau dapat dikendalikan dari jarak jauh.

Pengendalian otomatis dilakukan dengan metode *closed-loop* memerlukan umpan balik (*feed-back*). Umpan balik tersebut berupa informasi seperti kondisi, posisi, sikap (*attitude*) dan ketinggian yang didapat dari sensor – sensor yang ada pada wahana terbang. Tidak hanya berfungsi sebagai umpan balik (*feed-back*) informasi – informasi tersebut juga digunakan sebagai informasi pada sistem *monitoring* yang berfungsi untuk memantau dan mengendalikan wahana terbang dari jarak jauh. Pada penelitian ini membahas salah satu informasi yang digunakan sebagai umpan balik dan pada sistem *monitoring* pada wahana terbang. Informasi tersebut adalah sikap (*attitude*). Sikap (*attitude*) memberikan tiga informasi yaitu *roll*, *pitch* dan *yaw*. *Roll*, *pitch* dan *yaw* adalah suatu istilah pada wahana terbang untuk menginformasikan kemiringan sudut (*tilt-angle*) yang dialami wahana terbang.



Gambar 1. Roll, pitch dan yaw

Informasi *roll*, *pitch* dan *yaw* akan digunakan untuk menjaga posisi wahana untuk tetap terbang dalam posisi stabil secara otomatis. Posisi stabil adalah wahana terbang tidak condong ke kiri, ke kanan, ke depan atau ke belakang. Informasi tersebut juga berfungsi untuk mengarahkan wahana terbang ke arah yang diinginkan serta sebagai salah satu informasi pada sistem *monitoring* sehingga wahana terbang dapat dipantau dan dikendalikan dari jarak jauh.

Untuk mendapatkan informasi sikap (*attitude*) diperlukan suatu sensor. Sensor tersebut adalah *gyroscope*. *Gyroscope* adalah suatu sensor yang digunakan untuk mengukur kecepatan angular ($^{\circ}/s$) yang dialami oleh sensor. Kecepatan angular tersebut kemudian akan diproses menjadi informasi *roll*, *pitch* dan *yaw* yang akan menginformasikan *tilt-angle* pada wahana terbang. Hasil pengukuran menggunakan *gyroscope* diperoleh error di atas 5° , pada penelitian oleh M. Hasim dengan judul *Pendeteksi sudut menggunakan sensor gyroscope* disarankan untuk menggunakan metode pengkompensasian yang lain (**M. Hasim As'Ari, 2009**). Maka pada penelitian ini akan menggunakan *accelerometer* untuk mengkompensasi hasil pengukuran *gyroscope*. Hasil pengukuran *gyroscope* yang digabungkan dengan *accelerometer*, diharapkan memperoleh nilai *error* di bawah 5° . Dari hasil pengukuran akan ditarik kesimpulan apakah spesifikasi dan hasil pengukuran dari penggabungan *gyroscope* dan *accelerometer* telah dapat mengakomodasi spesifikasi dari wahana terbang yang dimodelkan.

Alat pendeteksi sikap (*attitude*) pada wahana terbang dirancang berdasarkan model wahana terbang kategori *rotary wing* dengan 4-motor penggerak (*quad-rotor*), sehingga spesifikasi dari alat pendeteksi sikap (*attitude*) harus dapat mengakomodasi aturan dari wahana terbang. Aturan dasar dari wahana terbang tersebut antara lain :

1. Wahana terbang (*quad-rotor*) dapat bergerak pada 3 sumbu. Sumbu tersebut adalah
 - a. Sumbu x (maju-mundur)
 - b. Sumbu y (kiri – kanan)
 - c. Sumbu z (naik – turun).
2. Kecepatan gerak pada wahana terbang diatur berdasarkan sudut kemiringan (*tilt angle*) pada arah gerak dengan 3 (tiga) kecepatan gerak. Kecepatan gerak tersebut adalah :
 - a. Gerak lambat 15°
 - b. Gerak cepat 30°
 - c. Gerak Sangat Cepat 45°

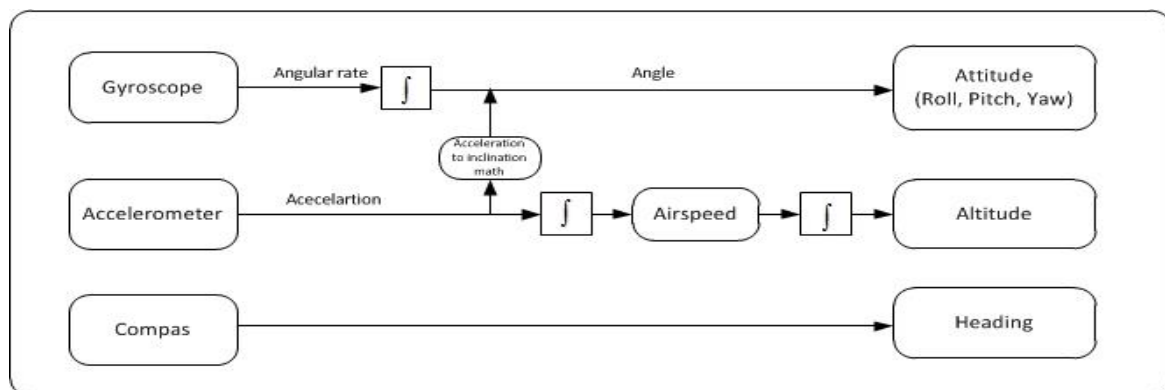
Berdasarkan pada latar belakang, maka tujuan penelitian penelitian ini adalah merancang sistem pengukuran dan *monitoring* untuk mengukur *roll*, *pitch* dan *yaw* pada wahana terbang dan menganalisis apakah sistem pengukuran dan *monitoring* ini sudah dapat mengakomodasi spesifikasi wahana terbang yang dimodelkan.

Sistem pengukuran dan monitoring pada penelitian ini direalisasikan berdasarkan 3 (tiga) perangkat keras. Perangkat keras tersebut adalah Alat ukur inersial yang terdiri dari *accelerometer* dan *gyroscope*, mikrokontroler Arduino Mega ADK serta PC (*personal Computer*). Tampilan yang digunakan untuk menampilkan output dari sistem pengukuran/pendeteksi sikap (*attitude*) menggunakan program LabVIEW versi 2013.

2. METODOLOGI

2.1. Attitude and Heading Reference System

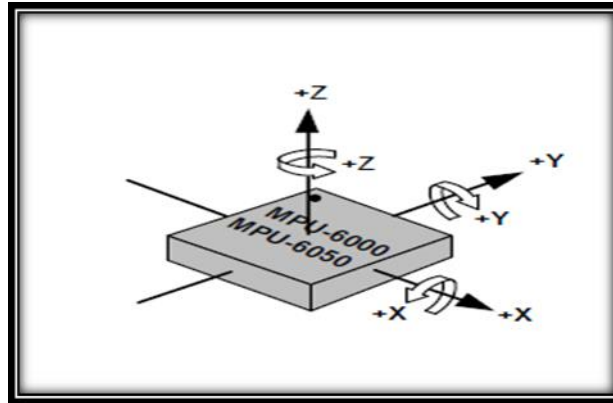
Attitude and Heading Reference System (AHRS) adalah suatu model sistem referensi navigasi yang digunakan pada bidang penerbangan. Sistem referensi ini digunakan sebagai alternatif untuk memperoleh 4 informasi dasar yaitu kecepatan (*airspeed*), sikap (*attitude*), ketinggian (*altitude*) dan arah terbang (*heading*). Dikatakan sebagai alternatif karena pada umumnya untuk memperoleh informasi dasar seperti yang telah disebutkan sebelumnya menggunakan sensor – sensor yang berbeda untuk tiap - tiap informasi tersebut. Seperti yang terlihat pada Gambar 2 dengan menggunakan 3 sensor yaitu *accelerometer*, *gyroscope* dan *compas* dapat diperoleh 4 informasi dasar melalui proses matematis.



Gambar 2. Attitude And Heading Reference System

2.2 Accelerometer sebagai Pendeteksi Kemiringan

Accelerometer dapat digunakan sebagai pendeteksi kemiringan sudut (*tilt-angle*) dengan melakukan perhitungan trigonometri. Perhitungan ini hanya dapat digunakan untuk menentukan kemiringan sudut (*tilt-angle*) pada sumbu (x) *roll* dan sumbu (y) *pitch*. Gambar 3 memperlihatkan sumbu - sumbu pada alat ukur inersial MPU-6050.



Gambar 3. Sumbu – sumbu pada alat ukur inersial MPU-6050

Untuk menghitung kemiringan sudut (*tilt-angle*) pada sumbu x (*roll*) dan sumbu y (*pitch*) pada accelerometer dengan 3-derajat kebebasan (3-DoF) dilakukan dengan menyederhanakan sistem koordinat 3-dimensi (x,y,z) menjadi 2-dimensi. Penyederhanaan 2-dimensi tersebut yaitu menyederhanakan vektor referensi dan vektor ukur. Pada persamaan (1) dan (2) A_x adalah hasil pengukuran *accelerometer* pada sumbu x, A_y adalah hasil pengukuran *accelerometer* pada sumbu y dan A_z adalah hasil pengukuran *accelerometer* pada sumbu z.

Roll adalah kemiringan sudut (*tilt-angle*) yang terjadi pada sumbu y relatif terhadap permukaan tanah/darat. Vektor referensi pada sudut *roll* adalah permukaan tanah yaitu *magnitude* dari vektor x dan vektor z sedangkan vektor ukur adalah vektor y, sehingga dengan penulisan sederhana dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Roll} (\theta) = \tan^{-1} \frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}} \quad (1)$$

Pitch adalah kemiringan sudut (*tilt-angle*) yang terjadi pada sumbu x relatif terhadap permukaan tanah/darat. Vektor referensi pada sudut *pitch* adalah permukaan tanah yaitu *magnitude* dari vektor y dan vektor z sedangkan vektor ukur adalah vektor x, sehingga dengan penulisan sederhana dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Pitch} (\theta) = \tan^{-1} \frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \quad (2)$$

Yaw tidak dapat ditentukan oleh *accelerometer* karena yaw tidak menggunakan titik referensi untuk melakukan pengukuran. Untuk mengukur kemiringan sudut (*tilt-angle*) *yaw* maka harus menggunakan *gyroscope* atau *compass*.

2.3 Gyroscope Sebagai Pendeteksi Kemiringan

Pembacaan kemiringan sudut (*tilt-angle*) dari *gyroscope* dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pengukuran *gyroscope*. $\omega(t)$ merupakan fungsi waktu dari hasil pembacaan *gyroscope* pada sumbu x (*roll*), sumbu y (*pitch*) dan sumbu z (*yaw*) yang memiliki satuan kecepatan sudut ($^{\circ}/s$). $\theta(t)$ merupakan fungsi waktu dari nilai kemiringan sudut (*tilt-angle*) sudut dari pembacaan *gyroscope* pada sumbu x (*roll*), sumbu y (*pitch*) dan sumbu z (*yaw*) yang memiliki satuan derajat ($^{\circ}$). Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\theta(t) = \int_{t-1}^t \omega(t) dt \quad (3)$$

$$\frac{d\theta(t)}{dt} = \omega(t) \quad (4)$$

Bentuk diskrit dari persamaan 4 dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\theta_{t+1} - \theta_t}{\Delta t} = \omega(t) \quad (5)$$

$$\theta_{t+1} = \omega_t \Delta t + \theta_t \quad (6)$$

2.4 Gambaran Umum Sistem

Berdasarkan aturan dasar dari wahana terbang (*quad-rotor*), maka dapat diturunkan spesifikasi dari alat pendeteksi sikap. Spesifikasi alat pendeteksi sikap tersebut sebagai berikut :

1. Alat pendeteksi sikap dapat mendeteksi pergeseran sudut pada sumbu gerak. Sumbu tersebut adalah :
 - a. Sumbu x (*roll*)
 - b. Sumbu y (*pitch*)
 - c. Sumbu z (*Yaw*)
2. Alat pendeteksi sikap harus dapat mengukur dan membedakan sudut kemiringan (*tilt angle*) pada sudut – sudut 0° , 15° , 30° dan 45° . Sehingga skala pengukuran adalah per 15° , tetapi untuk memperoleh hasil yang lebih baik maka skala pengukuran akan dilakukan per 5° .

Secara umum sistem yang dirancang memiliki 3 sub-sistem yaitu bagian input yang diwakilkan dengan blok sub-sistem alat ukur inersial, proses yang diwakilkan pada blok sub-sistem unit kendali dan output yang diwakilkan pada blok sub-sistem unit display.



Gambar 4. Blok diagram sistem secara umum

Sistem yang dirancang seperti yang terlihat pada Gambar 4 pada penelitian ini memiliki spesifikasi serta penjelasan singkat sebagai berikut :

a. Alat ukur inersial

Alat ukur inersial pada sistem adalah alat ukur inersial MPU-6050 dari *invensense*. Alat ukur inersial ini memiliki 2 jenis sensor yaitu *accelerometer* dan *gyroscope*. Alat ukur inersial tersebut berfungsi untuk membaca nilai akselerasi yang dialami oleh *accelerometer* dan nilai kecepatan putar sudut yang dialami oleh *gyroscope*.

b. Unit Kendali

Unit kendali pada sistem ini terdiri dari 2 buah mikrokontroler, yaitu ATmega2560 dan Atmega16U2. Fungsi – fungsi dari unit kendali pada sistem ini adalah sebagai berikut :

- Berfungsi untuk membaca hasil pengukuran dari sensor serta pengaturan sensor menggunakan protokol komunikasi I²C.
- Berfungsi sebagai pengolah perhitungan matematis yang digunakan untuk mengkonversi hasil pengukuran sensor *gyroscope* yang berupa kecepatan sudut (°/s) dan *accelerometer* yang berupa (a) menjadi nilai pergeseran sudut pada sumbu *longitudinal*, *lateral* dan *vertikal*.
- Berfungsi sebagai media pentransmision data hasil pengukuran yang telah diolah melalui protokol komunikasi serial (RS-232).

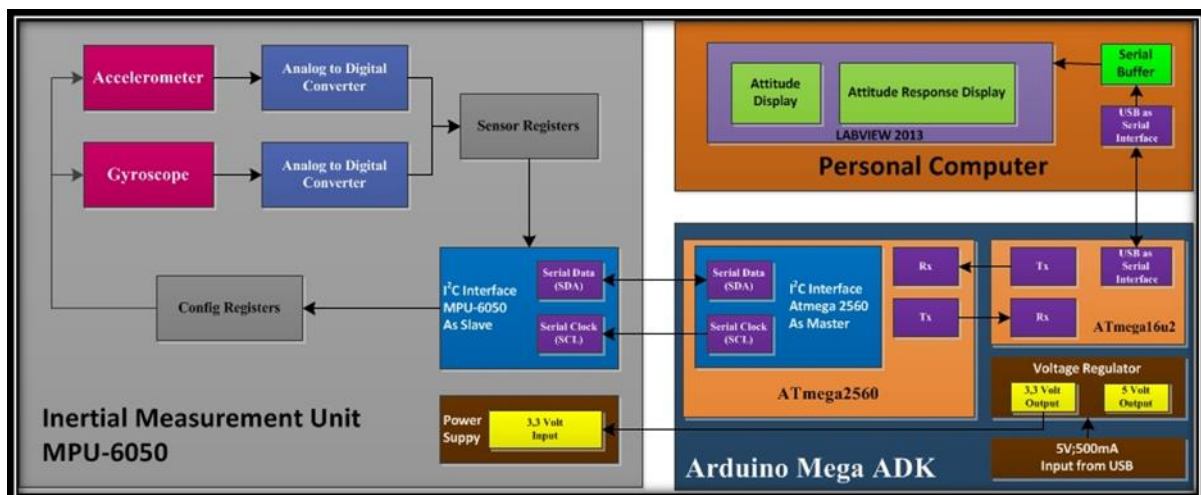
c. Unit Display

Personal computer digunakan sebagai *display* dari hasil pengukuran oleh sensor – sensor pada alat ukur inersial yang telah diolah pada mikrokontroler dengan menggunakan program LabVIEW versi 2013. *Personal computer* yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut :

- PC menggunakan sistem operasi windows 7 32-bit
- Program yang digunakan sebagai display adalah LabVIEW versi 2013.

2.5 Perancangan Perangkat Keras

Pada penelitian ini sistem dirancang menggunakan 3 (tiga) perangkat keras yaitu alat ukur inersial MPU-6050, Mikrokontroler Arduino Mega ADK dan *Personal Computer* seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Blok Perangkat Keras

Pemaparan lebih lanjut mengenai perancangan perangkat keras adalah sebagai berikut :

a. Alat Ukur Inersial MPU-6050

Alat ukur inersial MPU-6050 dari *invensense* adalah alat ukur inersial yang terdiri dari *accelerometer* dan *gyroscope*. Alat ukur ini menggunakan catu daya sebesar 3,3 Volt DC. Catu daya tersebut diperoleh dari catu daya yang disediakan oleh Mikrokontroler Arduino Mega ADK. Protokol komunikasi yang digunakan untuk membaca hasil pengukuran dari sensor – sensor serta pengaturan konfigurasi sensor – sensor pada alat ukur inersial menggunakan portokol komunikasi I²C.

Sensor – sensor pada alat ukur inersial MPU-6050 dapat dikonfigurasi. Konfigurasi – konfigurasi tersebut antara lain mengatur kecepatan cuplik (*sampling rate*) dan skala penuh pengukuran sensor (*full scale range*). Pengaturan tersebut dilakukan dengan cara mengubah nilai *register* pada alamat – alamat tertentu.

Setelah melakukan pengaturan pada *config register* mengenai parameter – parameter sensor maka spesifikasi akhir dari sensor adalah sebagai berikut :

- i. *Accelerometer*
 - waktu cuplik (*sampling rate*) sebesar 1 kHz.
 - Skala penuh pengukuran sensor (*full scale range*) sebesar $\pm 2g$ (m/s^2).
- ii. *Gyroscope*
 - Waktu cuplik (*sampling rate*) sebesar 8 kHz.
 - Skala penuh pengukuran sensor (*full scale range*) sebesar ± 250 °/s.

b. Mikrokontroler Arduino Mega ADK

Mikrokontroler Arduino Mega ADK adalah suatu mikrokontroler berbasis Atmega2560. Atmega2560 adalah mikrontroler dengan arsitektur 8-bit RISC AVR. Mikrokontoler Arduino mega ADK memiliki *software intergrated development enviroment* (IDE) khusus yang digunakan untuk memprogram mikrokontoler menggunakan bahasa pemrograman C / C++.

c. *Personal Computer*

Personal computer digunakan sebagai *display* hasil pengukuran dari sensor – sensor pada sistem. Komunikasi yang digunakan antara mikrokontroler dengan PC menggunakan komunikasi serial RS-232. Spesifikasi dari PC tersebut adalah sebagai berikut :

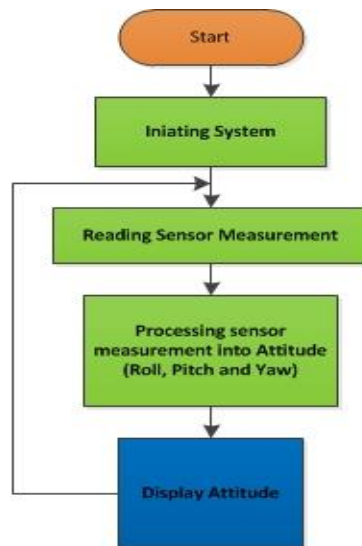
- i. Processor Intel Core i3 2,73 Ghz
- ii. RAM DDR3 1GB
- iii. Operating System Windows 7 32-bit
- iv. LabVIEW 2013 32-bit

2.6 Perancangan Perangkat Lunak

Pada sistem ini perancangan perangkat lunak dilakukan pada unit display yaitu *personal computer* dan unit kontrol yaitu mikrokontroler. Perancangan perangkat lunak pada personal computer menggunakan aplikasi LabView 2013 yang akan digunakan sebagai display dari hasil pengukuran. Perancangan perangkat lunak pada mikrokontroler menggunakan bahasa pemrograman C++ menggunakan aplikasi IDE (*Integrated development enviroment*) dari Arduino. Diagram alur dari proses - proses tersebut dapat dilihat pada Gambar 6.

Secara umum terdapat 4 (empat) proses komputasi yang dilakukan pada sistem ini. Proses – proses tersebut adalah :

1. *initiating system* melakukan inisiasi protokol komunikasi, konfigurasi sensor dan menentukan faktor kalibrasi.
2. *Reading sensor measurement* adalah membaca data hasil pengukuran *gyroscope* dan *accelerometer*.
3. *Processing sensor measurement into attitude* adalah melakukan perhitungan matematis untuk mendapatkan informasi *attitude* (*Roll, pitch* dan *yaw*).
4. *Display attitude* adalah menampilkan informasi *attitude* (*Roll, pitch* dan *yaw*) pada *personal computer*.

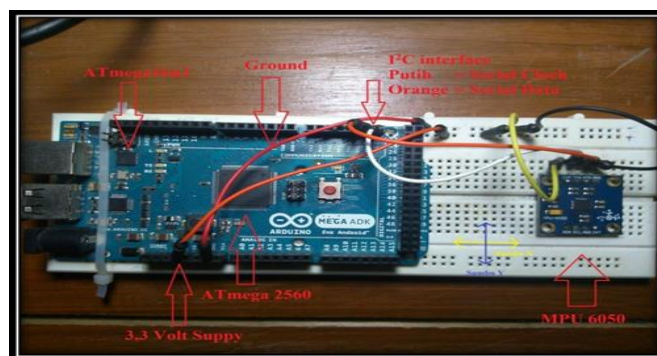


Gambar 6. Flowchart program secara umum

Proses yang pertama hingga proses yang ketiga terjadi di dalam mikrokontroler Arduino Mega ADK (ATmega 2560) sedangkan proses yang ke-empat terjadi pada *personal computer*.

2.7 Realisasi perangkat keras

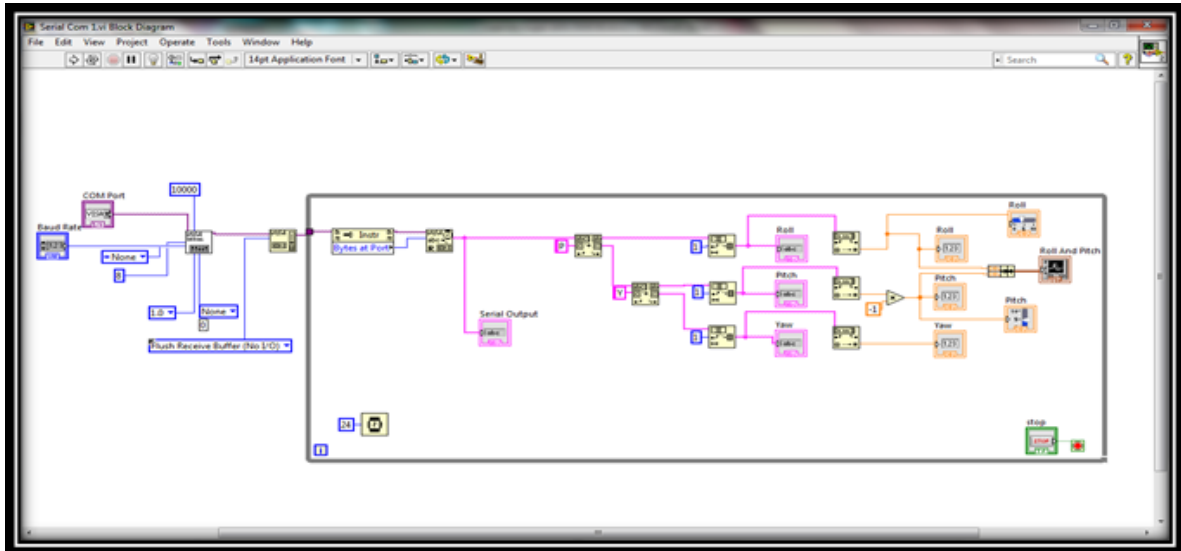
Realisasi perangkat keras dilakukan di atas *project board*. Hubungan antara mikrokontroler Arduino Mega ADK dilakukan dengan menggunakan *jumper*. Realisasi perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 7. Alat ukur inersial MPU-6050 terletak pada ujung kanan *project board* seperti yang terlihat pada Gambar 7. Sedangkan mikrokontroler Arduino Mega ADK terletak di sebelah kiri *project board*. Sumbu X terletak paralel dengan *project board* dan sumbu Y terletak bersilangan dengan *project board* seperti yang terlihat pada Gambar 3.4. Sedangkan sumbu Z terletak paralel dengan arah pengambilan Gambar 7 (*vertical* terhadap *project board*).



Gambar 7. Realisasi Perangkat Keras

2.8 Realisasi perangkat Lunak

Realisasi perangkat lunak dilakukan pada *software* LabVIEW versi 2013. *Software* LabVIEW 2013 berfungsi untuk menampilkan hasil pengukuran dari alat ukur inersial. Pada gambar 8 dapat dilihat tampilan dari sistem pengukuran dan *monitoring* alat pendeteksi sikap (*attitude*). Pemrograman LabVIEW dilakukan dengan mengkonfigurasi block - block yang merepresentasikan suatu fungsi.



Gambar 8. Blok Program LabVIEW

Hasil pengukuran yang berupa *pitch*, *roll* dan *yaw* disajikan dalam 3 (tiga) format data seperti yang terlihat pada Gambar 9. Format pertama adalah indikator yang menyajikan data *roll*, *pitch* dan *yaw*. Format kedua adalah grafik digunakan untuk melihat respon dari pengukuran *roll* dan *pitch*. Format ketiga disajikan dalam bentuk *bar*, *vertical bar* menyajikan data *pitch* dan *horizontal bar* menyajikan data *roll*. Informasi yang ditampilkan pada *software* LabVIEW memiliki satuan derajat ($^{\circ}$).



Gambar 9. LabVIEW Display

Pengaturan program dilakukan dengan mengatur nilai baud rate sebesar 19200 dan pengaturan port komunikasi serial sebelum menjalankan program ini. Pengisian baud rate dilakukan secara manual pada kolom Baud Rate dan port komunikasi dengan membuka *combo box* pada kolom COMM Port.

3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

3.1 Metode Pengujian

Pengujian dari alat pendeteksi sikap (*attitude*) menggunakan alat ukur inersial dilakukan dengan cara menyimulasikan kinematika dari pergerakan wahana terbang. Kinematika pergerakan tersebut adalah rotasi pada sumbu x (*roll*), rotasi pada sumbu y (*pitch*) dan rotasi pada sumbu z (*yaw*). Rotasi pada tiap sumbu dilakukan searah dengan jarum jam (sumbu positif) dan berlawanan dengan arah jarum jam (sumbu negatif). Rotasi pada tiap – tiap sumbu diukur dalam satuan derajat ($^{\circ}$).

Nilai pengukuran rotasi dimulai dari 0° hingga 70° . Nilai tersebut dipilih untuk mensimulasikan kinematika wahana terbang tanpa awak kategori *rotary wing* dengan 4-rotor penggerak (*quad-rotor*). Pengukuran dilakukan sebanyak 5 (lima) kali yang dilakukan secara berulang pada tiap – tiap sumbu rotasi. Skala pengukuran rotasi adalah sebesar 5° dan 10° . Pengaturan rotasi dari 0° hingga 70° dilakukan secara *manual* dengan cara menyimulasikan alat pendeteksi sikap terhadap nilai kemiringan yang diukur menggunakan busur derajat.

Pengukuran dilakukan menggunakan dua alat simulasi yang berbeda. Penjelasan mengenai alat tersebut adalah sebagai berikut :

a. Alat penyimulasi rotasi sumbu x (*roll*) dan sumbu y (*pitch*)

Kinematika pergerakan yang dapat disimulasikan pada alat ini adalah rotasi pada sumbu x (*roll*) dan sumbu y (*pitch*). Alat simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 10. Pengukuran rotasi sumbu x (*roll*) dan sumbu y (*pitch*) dilakukan pada bidang yang datar. Pengukuran yang dilakukan pada bidang yang datar agar tidak terjadi pergeseran sumbu ukur akibat adanya kemiringan pada bidang ukur. Untuk memastikan bahwa bidang ukur merupakan bidang datar maka digunakan *waterpass*. Apabila indikator pada *waterpass* menunjukkan kemiringan pada bidang ukur maka dilakukan koreksi dengan mengeser busur derajat (papan putih) hingga indikator pada *waterpass* menunjukkan kondisi datar.



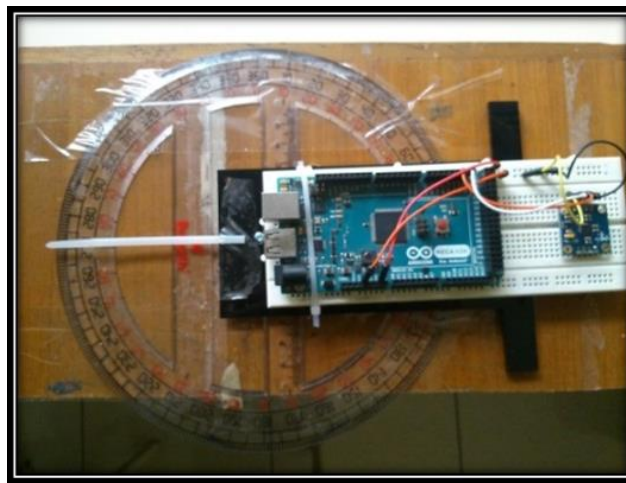
Gambar 10. Alat simulasi *roll* dan *pitch*

Apabila indikator pada *waterpass* telah menunjukkan posisi datar maka pengukuran dapat mulai dilakukan. Pengukuran dilakukan dengan mengeser posisi dari alat ukur inersial searah jarum jam dan berlawanan arah jarum jam. Pergeseran searah jarum jam untuk mendapatkan nilai rotasi pada sumbu positif dan pergeseran berlawanan dengan arah jarum jam untuk mendapatkan nilai rotasi pada sumbu negatif. Kedua pergeseran tersebut dimulai dari 0° hingga 70° dengan skala 5° dan 10° . Dilakukan pengulangan

pengukuran sebanyak 5 (lima) kali pada tiap sumbu rotasi. Pembacaan nilai yang terukur dilakukan melalui *software* LabVIEW pada *personal computer*. Nilai yang terukur kemudian akan dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Nilai sebenarnya diperoleh dari pengukuran menggunakan busur derajat.

b. Alat penyimulasi rotasi sumbu z (*yaw*)

Kinematika pergerakan yang dapat disimulasikan pada alat ini adalah rotasi pada sumbu z (*yaw*). Alat simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 11. Pada alat simulasi yang terlihat pada Gambar 11 pengukuran dilakukan dengan menggeser posisi dari alat ukur inersial searah jarum jam dan berlawanan jarum jam. Pergeseran searah jarum jam untuk mendapatkan nilai rotasi pada sumbu positif dan pergeseran berlawanan dengan arah jarum jam untuk mendapatkan nilai rotasi pada sumbu negatif.



Gambar 11. Alat simulasi *yaw*

Kedua pergeseran tersebut dimulai dari 0° hingga 70° dengan skala 5° dan 10°. Dilakukan pengulangan pengukuran sebanyak 5 (lima) kali pada tiap sumbu rotasi. Pembacaan nilai yang terukur dilakukan melalui *software* LabVIEW pada *personal computer*. Nilai yang terukur kemudian akan dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Nilai sebenarnya diperoleh dari pengukuran menggunakan busur derajat.

3.2 Hasil Pengujian

Hasil pengujian dari alat pendeteksi sikap (*attitude*) menggunakan alat ukur inersial akan disajikan dalam 3 (tiga) kategori. Kategori tersebut adalah rotasi pada sumbu x (*roll*), sumbu y (*pitch*) dan sumbu z (*yaw*). Pada tiap kategori akan dibagi menjadi 2 kategori berdasarkan arah pergerakannya. Arah pergerakan tersebut adalah rotasi searah jarum jam (rotasi pada sumbu positif) dan berlawanan dengan arah jarum jam (rotasi pada sumbu negatif). Pengujian dilakukan berulang sebanyak 5 (lima) kali pengulangan. Tujuan dari pengulangan untuk mendapatkan nilai rata - rata yang terbaik untuk digunakan mencari nilai simpangan rata - rata (standard deviasi). Persamaan yang digunakan untuk mencari standard deviasi adalah persamaan 7.

$$\pm \Delta x = \sqrt{\frac{(\sum x_i - \sum x)^2}{n-1}} \quad (7)$$

Simpangan rata – rata (standar deviasi) adalah suatu simpangan / *error* yang terukur oleh alat pendeteksi sikap. Simpangan / *error* tersebut merepresentasikan nilai akurasi suatu sensor. Sehingga semakin kecil nilai simpangan rata - rata maka semakin dekat hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya sehingga semakin akurat hasil pengukuran yang terukur. Sebaliknya, semakin besar nilai simpangan rata - rata maka semakin tidak akurat hasil pengukuran yang terukur.

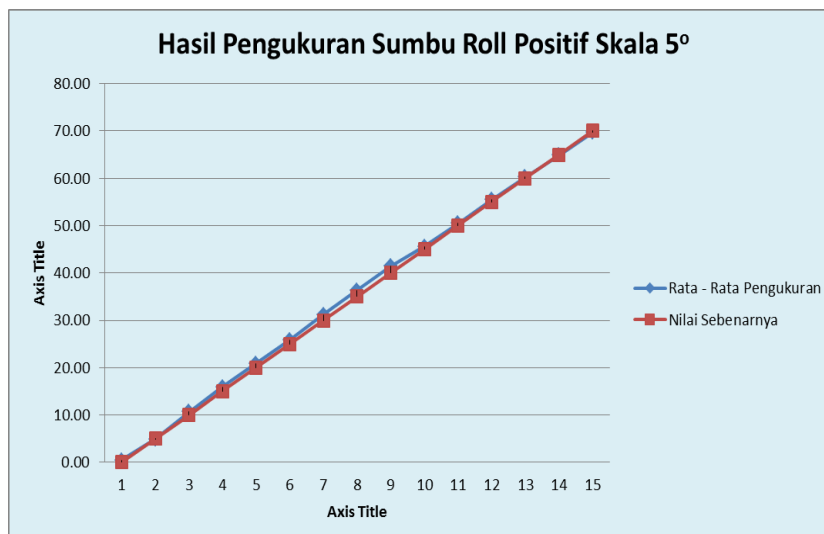
a. Rotasi pada sumbu x (*roll*)

Rotasi pada sumbu x (*roll*) searah jarum jam merupakan rotasi pada sumbu positif atau pergerakan wahana terbang adalah miring ke arah kanan. Sedangkan rotasi pada sumbu x (*roll*) berlawanan dengan jarum jam merupakan rotasi pada sumbu negatif atau pergerakan wahana terbang adalah miring ke arah kiri. Data hasil pengukuran rotasi adalah sebagai berikut :

a.1 Rotasi pada sumbu x (*roll*) positif

Tabel 1. Tabel rotasi pada sumbu x (*roll*) positif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.5	0.6	0.7	0.2	0.4	0.48	0.19
2	5	4.8	4.7	5.1	5.4	4.6	4.92	0.33
3	10	10.8	10	10.8	10.9	10.7	10.64	0.36
4	15	16.6	15.9	15.8	16.5	14.8	15.92	0.72
5	20	20.5	21.1	21.9	21.3	19.6	20.88	0.87
6	25	25.8	25.9	26.5	26.4	24.6	25.84	0.76
7	30	31.9	30.9	31.5	31.5	30.3	31.22	0.63
8	35	36.8	36.8	36.2	36.4	35.7	36.38	0.46
9	40	42.3	41.7	41.4	41.9	39.7	41.40	1.00
10	45	45.9	46.3	45.9	45.7	44.2	45.60	0.81
11	50	50.5	50.7	50.8	50.2	50.1	50.46	0.30
12	55	55.7	55.6	56.4	54.7	54.7	55.42	0.73
13	60	60.5	60.4	61.2	59.9	59.5	60.30	0.64
14	65	65.3	64.9	65.5	64.1	64.4	64.84	0.59
15	70	70.4	69.8	69.8	68.9	69.4	69.66	0.55
Simpangan Rata - Rata								0.60

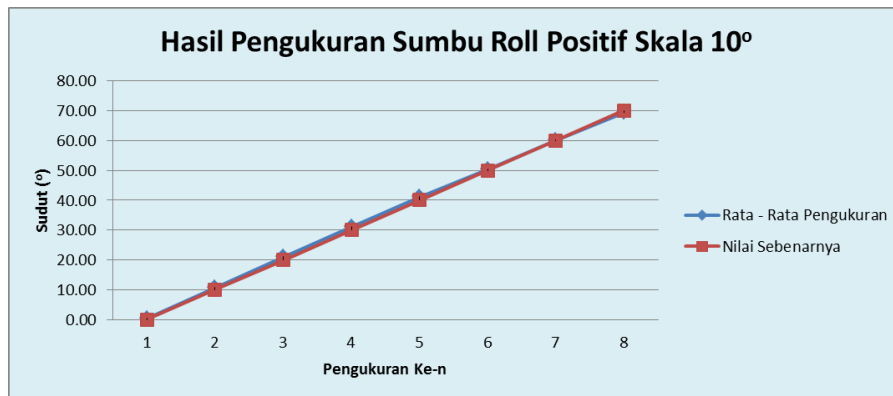


Gambar 12. Grafik rotasi pada sumbu x (*roll*) positif skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) positif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,60° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 40° dengan simpangan sebesar 1°.

Tabel 2. Tabel rotasi pada sumbu x (*roll*) positif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.2	0.3	0.4	0.2	0.7	0.36	0.21
2	10	10.9	10.7	11.2	10.9	10.2	10.78	0.37
3	20	20.9	21.6	21.5	20.9	20.5	21.08	0.46
4	30	31.2	31.7	31.4	31.2	30.4	31.18	0.48
5	40	41.9	41.5	41.1	41.2	40.4	41.22	0.55
6	50	51.2	50.9	50.6	50	49.5	50.44	0.69
7	60	60.6	60.4	60.3	59.9	59.5	60.14	0.44
8	70	70.3	69.7	69.3	69	68.6	69.38	0.65
Simpangan Rata - Rata								0.48



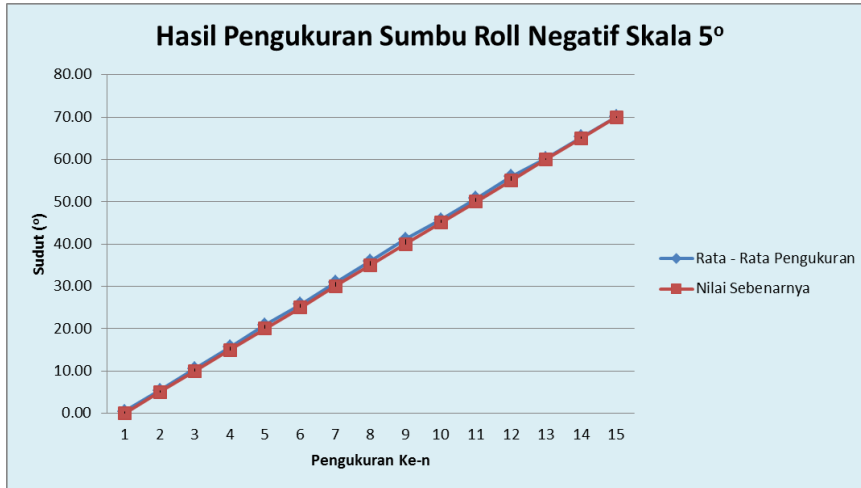
Gambar 13. Grafik rotasi pada sumbu x (*roll*) positif skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) positif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,48° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 13 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 50° dengan simpangan sebesar 0,69°.

A.2 Rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif

Tabel 3. Tabel rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.46	0.09
2	5	5.3	5.7	6.3	5.2	4.7	5.44	0.60
3	10	11.3	11.4	10.3	10.4	9.3	10.54	0.86
4	15	16.6	16.3	15.3	15.8	14.2	15.64	0.94
5	20	21.3	21.7	20.1	21.2	20.2	20.90	0.71
6	25	26.1	26.2	25.3	26.2	25.1	25.78	0.54
7	30	31.2	31.3	30.4	31.2	30.3	30.88	0.49
8	35	36.3	36.8	35.4	36.3	35.1	35.98	0.70
9	40	40.7	41.7	40.8	41.7	40.6	41.10	0.55
10	45	46.1	47.1	44.9	45.4	45.1	45.72	0.90
11	50	50.7	51.9	49.7	51.2	50.1	50.72	0.87
12	55	55.3	55.8	55.7	56.3	56.7	55.96	0.55
13	60	60.3	60.3	60.2	61.1	59.4	60.26	0.60
14	65	65.2	65.2	64.8	65.3	65.8	65.26	0.36
15	70	69.8	70.8	69.6	69.7	70.2	70.02	0.49
Simpangan Rata - Rata								0.62

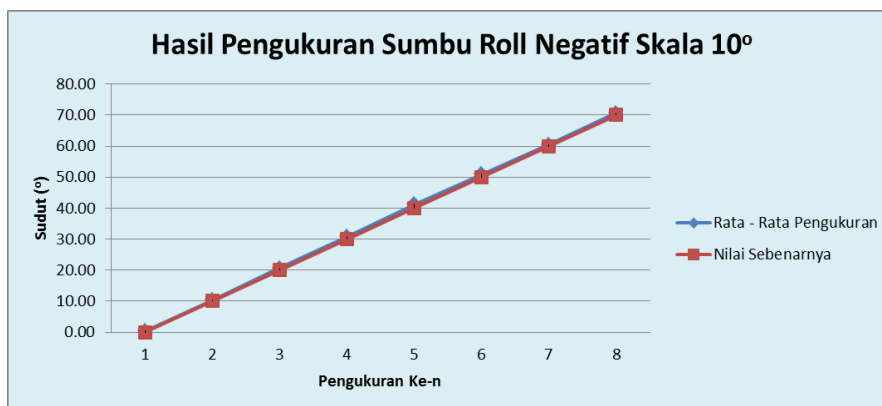


Gambar 14. Grafik rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif Skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,62° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 14 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 15° dengan simpangan sebesar 0,94°.

Tabel 4. Tabel rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.4	0.5	0.5	0.2	0.4	0.40	0.12
2	10	11.5	9.5	10.8	10.3	9.7	10.36	0.82
3	20	20.3	20.4	21.1	20.9	20.4	20.62	0.36
4	30	30.6	29.7	31.8	31.7	29.7	30.70	1.03
5	40	41.7	41.2	41.3	41.8	40.1	41.22	0.68
6	50	50.7	51.3	51.2	51.4	50.1	50.94	0.54
7	60	61.1	59.6	60.8	61.5	59.7	60.54	0.85
8	70	71.2	70.3	70.4	71.6	69.8	70.66	0.73
Simpangan Rata - Rata								0.64



Gambar 15. Grafik rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif Skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) negatif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,64° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa hasil

pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 30° dengan simpangan sebesar 1,03°.

Data hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) positif dan sumbu negatif diperoleh Hasil pengukuran yang sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar 0,58°. Hasil pengukuran ini adalah gabungan hasil pengukuran dari *gyroscope* dan *accelerometer*

Dapat disimpulkan Alat pendeteksi sikap (*attitude*) bisa digunakan untuk mendeteksi rotasi sumbu x (*roll*) pada wahana terbang. Hal tersebut berdasarkan pada analisis bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar 0,58° derajat. Sehingga alat ini mampu untuk membedakan sudut 0°, 15°, 30° dan 45°.

b. Rotasi pada sumbu y (*pitch*)

Rotasi pada sumbu y (*pitch*) searah jarum jam merupakan rotasi pada sumbu positif atau pergerakan wahana terbang adalah menekik ke atas. Sedangkan rotasi pada sumbu x (*roll*) berlawanan dengan jarum jam merupakan rotasi pada sumbu negatif atau pergerakan wahana terbang adalah menekik ke bawah. Data hasil pengukuran rotasi adalah sebagai berikut :

b.1 Rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif

Tabel 5. Tabel rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.6	0.7	0.7	0.7	0.3	0.60	0.17
2	5	5.2	5.2	5.7	5.2	4.3	5.12	0.51
3	10	10.7	10.8	10.7	10.3	10.6	10.62	0.19
4	15	16.4	15.8	15.9	15.8	15.7	15.92	0.28
5	20	20.9	21.5	21	21.1	20.4	20.98	0.40
6	25	26.7	26.3	25.4	26.5	25.3	26.04	0.65
7	30	31.8	31.7	31.3	30.9	30.1	31.16	0.69
8	35	36.6	37.2	37.2	36.8	35.8	36.72	0.58
9	40	42.4	41.9	42.2	42.2	40.4	41.82	0.81
10	45	46.6	47.2	46.7	47.3	44.7	46.50	1.05
11	50	51.7	52.7	51.8	52.1	49.8	51.62	1.09
12	55	56.5	57.6	56.8	57.8	54.3	56.60	1.39
13	60	62.5	61.2	61.9	61.1	59.2	61.18	1.24
14	65	67.8	67.8	67.3	67.4	64.8	67.02	1.26
15	70	72.6	73.1	72.2	72.2	69.4	71.90	1.45
Simpangan Rata - Rata								0.78

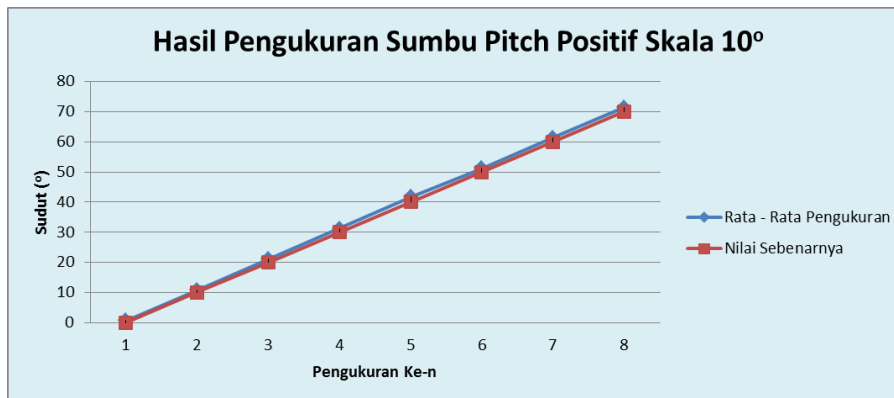


Gambar 16. Grafik rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,78° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 16 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 15° dengan simpangan sebesar 1,45°.

Tabel 6. Tabel rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.68	0.04
2	10	10.5	11.2	10.7	10.9	10.3	10.72	0.35
3	20	21.1	21.4	21.2	20.8	20.5	21	0.35
4	30	31.5	31.7	31.9	30.9	30.3	31.26	0.65
5	40	41.9	42.2	42.2	41.8	40.3	41.68	0.79
6	50	51.6	51.9	51.6	51.3	49.7	51.22	0.88
7	60	61.8	62.7	62.1	61.3	59.5	61.48	1.22
8	70	72.1	72.2	71.8	71.2	70.1	71.48	0.86
Simpangan Rata - Rata								0.64



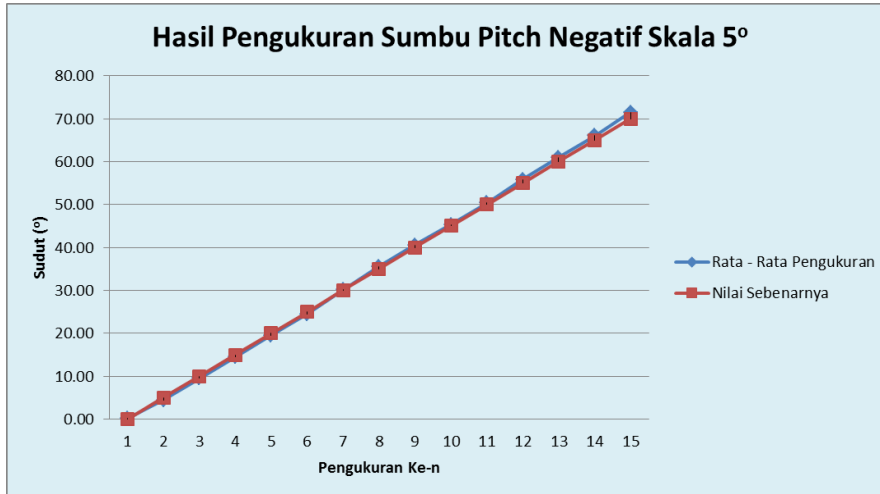
Gambar 17. Grafik rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,64° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 17 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 60° dengan simpangan sebesar 1,22°.

B.2 Rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif

Tabel 7. Tabel rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.4	0.18	0.13
2	5	4.4	4.3	4.4	4.3	5.1	4.50	0.34
3	10	9	9.2	9.4	9.7	10.4	9.54	0.55
4	15	13.8	15.3	14.2	14.2	14.9	14.48	0.61
5	20	19.2	19.5	19.9	19.5	19.7	19.56	0.26
6	25	24.3	24.4	24.9	24.6	24.4	24.52	0.24
7	30	29.7	29.6	30.8	29.9	30.6	30.12	0.54
8	35	35.2	35.4	35.2	36.5	35.5	35.56	0.54
9	40	40.4	40.4	40.9	40.9	40.3	40.58	0.29
10	45	45.3	45.3	45.1	45.6	45.2	45.30	0.19
11	50	50.1	50.3	50.6	50.4	50.4	50.36	0.18
12	55	56.1	55.6	55.6	56.3	55.7	55.86	0.32
13	60	60.8	61.2	60.9	60.7	61.1	60.94	0.21
14	65	66.3	66.2	66.1	65.9	65.7	66.04	0.24
15	70	72.2	71.7	71.4	71.3	70.8	71.48	0.52
Simpangan Rata - Rata								0.34

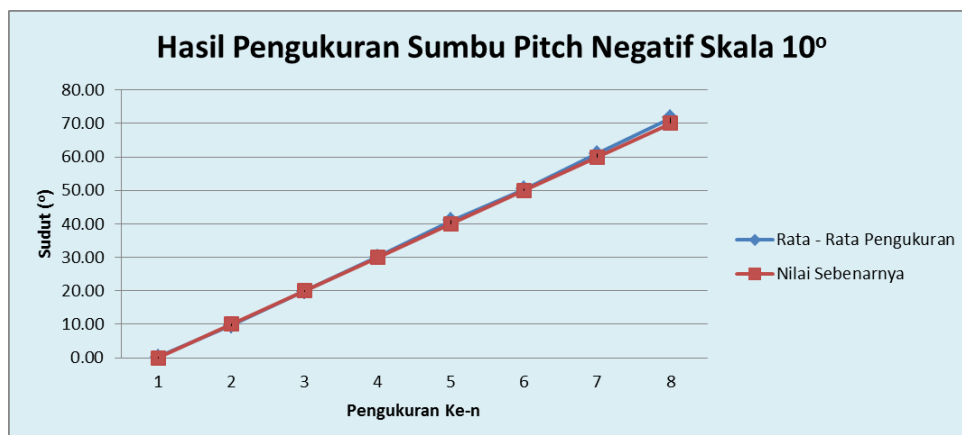


Gambar 18. Grafik rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,34° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 18 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 15° dengan simpangan sebesar 0,61°.

Tabel 8. Tabel rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0.1	0.2	0.1	0.2	0.7	0.26	0.25
2	10	9.3	10.3	9.8	9.2	9.7	9.66	0.44
3	20	19.6	20	19.7	19.4	20.4	19.82	0.39
4	30	29.6	30.3	30.3	29.8	30.4	30.08	0.36
5	40	40.8	41.3	41	41.1	40.8	41.00	0.21
6	50	50.5	50.9	50.7	50.2	49.4	50.34	0.59
7	60	61.1	61.2	61.1	61.1	60.3	60.96	0.37
8	70	71.7	71.2	71.7	72	71.8	71.68	0.29
Simpangan Rata - Rata								0.36



Gambar 19. Grafik rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu y (*pitch*) negatif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 0,36° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 19 dapat dilihat bahwa

hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 50° dengan simpangan sebesar 0,59°.

Data hasil pengukuran rotasi pada sumbu y (*pitch*) positif dan sumbu negatif diperoleh Hasil pengukuran yang sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar 0,53°. Hasil pengukuran ini adalah gabungan hasil pengukuran dari *gyroscope* dan *accelerometer*. Dapat disimpulkan Alat pendeteksi sikap (*attitude*) bisa digunakan untuk mendeteksi rotasi sumbu y (*pitch*) pada wahana terbang. Hal tersebut berdasarkan pada analisis bahwa hasil pengukuran sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar 0,53° derajat. Sehingga alat ini mampu untuk membedakan sudut 0°, 15°, 30° dan 45°.

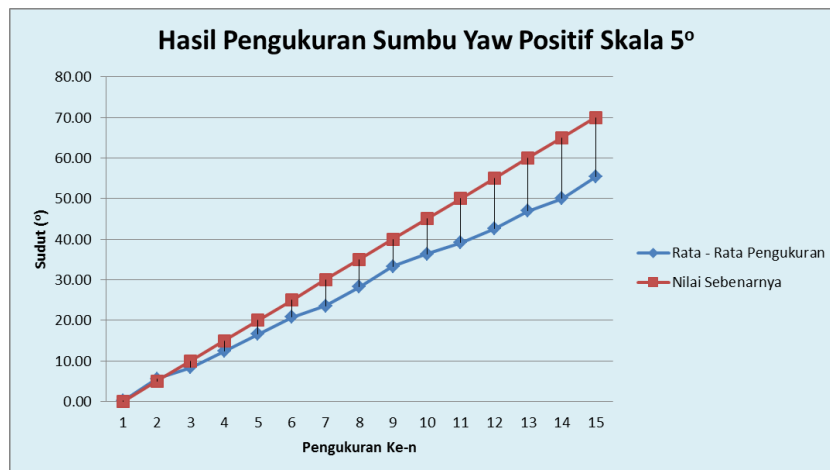
c. Rotasi pada sumbu z (*yaw*)

Rotasi pada sumbu z (*yaw*) searah jarum jam merupakan rotasi pada sumbu positif. Sedangkan rotasi pada sumbu x (*roll*) berlawanan dengan jarum jam merupakan rotasi pada sumbu negatif. Data hasil pengukuran rotasi adalah sebagai berikut :

c.1 Rotasi pada sumbu z (*yaw*) positif

Tabel 9. Tabel rotasi pada sumbu z (*yaw*) positif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0	0	0.7	0	0	0.14	0.31
2	5	8.26	2.6	6.8	5.3	5.2	5.63	2.11
3	10	11.12	1.7	9.7	10.1	9.1	8.34	3.79
4	15	14.6	8.2	13.7	7.8	17.6	12.38	4.25
5	20	20.3	10.8	13.1	12.1	26.6	16.58	6.70
6	25	25.2	10.41	17.9	16.5	33.8	20.76	8.99
7	30	30.9	11	21.7	17.7	36.6	23.58	10.24
8	35	31.7	15.9	26.1	25.5	42.1	28.26	9.60
9	40	41.7	20.3	29.6	28.2	46.5	33.26	10.65
10	45	44.9	20	35.3	29.7	51.8	36.34	12.49
11	50	53	23.3	28.9	36.3	54.1	39.12	13.96
12	55	56.4	26.5	32.3	38.7	58.9	42.56	14.46
13	60	61	28.6	36.3	44.8	64.1	46.96	15.38
14	65	57.4	33.5	44.9	47.1	66.9	49.96	12.72
15	70	61.3	36.3	53.9	52	73.4	55.38	13.58
Simpangan Rata - Rata								9.28

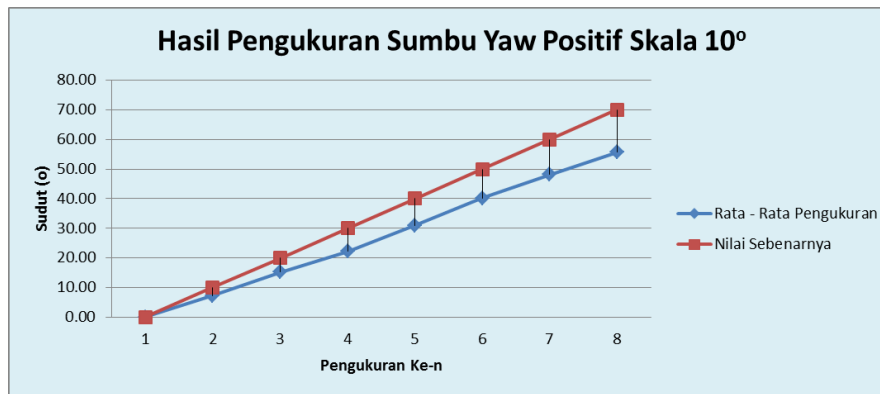


Gambar 20. Grafik rotasi pada sumbu z (*yaw*) positif skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (γ_w) positif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 9,28° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 20 dapat dilihat bahwa hasil cenderung menjauhi nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 55° dengan simpangan sebesar 14,46°.

Tabel 10. Tabel rotasi pada sumbu z (γ_w) positif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Positif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0	0	0	0.1	0	0.02	0.04
2	10	10.3	10.3	3.2	5.1	7.4	7.26	3.15
3	20	16.5	13.54	12.1	16.35	17.8	15.26	2.35
4	30	21.6	21.7	14.1	26.4	26.9	22.14	5.15
5	40	27.4	30	25	36.9	35.7	31.00	5.17
6	50	36.4	40.24	33.6	43.1	47.5	40.17	5.47
7	60	41.4	49.1	39.3	53.4	57.3	48.10	7.68
8	70	50.6	48.1	49.5	62.4	67.9	55.70	8.89
Simpangan Rata - Rata								4.74



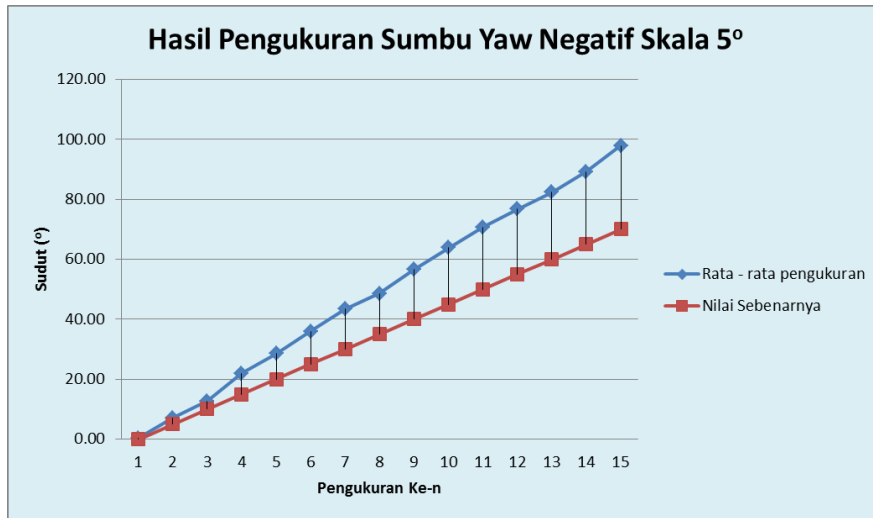
Gambar 21. Grafik rotasi pada sumbu z (γ_w) positif skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (γ_w) positif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 4,74° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 21 dapat dilihat bahwa hasil cenderung menjauhi nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 70° dengan simpangan sebesar 8,89°.

c.2 Rotasi pada sumbu z (γ_w) negatif

Tabel 11. Tabel rotasi pada sumbu z (γ_w) negatif skala pengukuran 5°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 5° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	0	0	0.4	1.4	0	0.36	0.61
2	5	6.6	2.3	7.3	8.8	10.6	7.12	3.10
3	10	11.1	7.1	10	15.2	20.4	12.76	5.17
4	15	17.1	13.2	27.4	26	26.4	22.02	6.44
5	20	16.5	20.2	45.1	30.9	30.2	28.58	11.15
6	25	24.7	27	54.5	38.1	35.5	35.96	11.79
7	30	31.1	37.1	63.1	46.3	39.4	43.40	12.28
8	35	35.9	40.5	69	53.4	44.5	48.66	13.07
9	40	44.6	47.5	78.1	62.9	50.1	56.64	13.88
10	45	55.9	53.4	82.8	72.31	54.9	63.86	13.07
11	50	60.4	64.8	83.1	85	60.6	70.78	12.26
12	55	67.7	69.7	88.64	92.6	65.3	76.79	12.80
13	60	71.5	77.1	96.6	97.7	69.1	82.40	13.78
14	65	77.2	82.6	108	109	69.7	89.30	18.12
15	70	87.1	89.1	117.9	122.8	73.1	98.00	21.38
Simpangan Rata - Rata								11.26

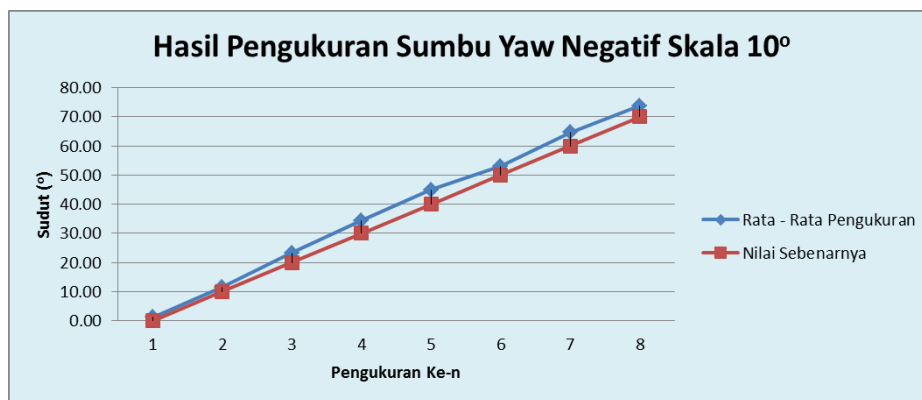


Gambar 22. Grafik rotasi pada sumbu z (*yaw*) negatif skala pengukuran 5°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (*yaw*) negatif pada skala 5° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 11,26° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 22 dapat dilihat bahwa hasil cenderung menjauhi nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 70° dengan simpangan sebesar 21,38°.

Tabel 12. Tabel rotasi pada sumbu z (*yaw*) negatif skala pengukuran 10°

No	Nilai Sebenarnya	Hasil Pengukuran Skala Pengukur 10° Sumbu Negatif						
		Pengukuran Ke-n					Rata Rata	
		Ke-1	ke-2	ke-3	Ke-4	Ke-5	Pengukuran	simpangan
1	0	1.7	1.5	1.6	0.7	0.2	1.14	0.66
2	10	14.5	9.1	14.7	12.4	7.1	11.56	3.36
3	20	26	22.5	25	25.2	17.7	23.28	3.38
4	30	36.7	36.4	39.5	31.5	27.6	34.34	4.74
5	40	49.9	48.3	50.7	41.2	34.9	45.00	6.78
6	50	62.3	53.3	53.8	50.9	45.1	53.08	6.20
7	60	73.9	64.5	66.7	66.4	51.8	64.66	8.03
8	70	82.8	76.1	79.3	71.5	59.3	73.80	9.11
Simpangan Rata - Rata								5.28



Gambar 23. Grafik rotasi pada sumbu z (*yaw*) negatif skala pengukuran 10°

Hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (*yaw*) negatif pada skala 10° diperoleh simpangan rata – rata sebesar 5,28° terhadap nilai sebenarnya. Pada Gambar 23 dapat dilihat bahwa

hasil cenderung menjauhi nilai sebenarnya dengan simpangan terbesar pada pengukuran 70° dengan simpangan sebesar $9,11^\circ$.

Data hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (*yaw*) positif dan sumbu negatif diperoleh Hasil pengukuran yang sudah mendekati nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar $7,64^\circ$ hasil pengukuran ini adalah hasil pengukuran menggunakan *gyroscope*.

Dapat disimpulkan Alat pendeteksi sikap (*attitude*) belum layak digunakan untuk mendeteksi rotasi sumbu z (*yaw*) pada wahana terbang. Hal tersebut berdasarkan pada analisis bahwa hasil pengukuran cenderung menjauhi nilai sebenarnya dengan simpangan rata – rata sebesar $7,64^\circ$. Sehingga alat ini tidak mampu untuk membedakan sudut 0° , 15° , 30° dan 45° .

Dikatakan tidak mampu adalah batas bawah dan batas atas dari pengukuran sensor pada skala 15° dibandingkan dengan simpangan rata – rata saling berpotongan. Pada pengukuran 30° hasil pengukuran dapat menunjukkan nilai antara $22,36^\circ$ - $37,64^\circ$ sedangkan hasil pengukuran 15° dapat menunjukkan hasil antara $7,36$ - $22,64$ dan hasil pengukuran 30° dapat menunjukkan nilai antara $37,36^\circ$ – $52,64^\circ$. Dari kemungkinan hasil pengukuran yang saling berpotongan maka alat pendeteksi sikap (*attitude*) dianggap tidak memenuhi spesifikasi untuk digunakan mengukur rotasi sumbu z (*yaw*) pada wahana terbang.

Pengujian sensor tidak dilakukan dengan menambahkan pengaruh vibrasi yang disebabkan oleh putaran motor pada wahana terbang. Secara teori vibrasi mempengaruhi hasil pengukuran khususnya accelerometer tetapi sebesar apa pengaruh vibrasi tersebut terhadap pengukuran masih memerlukan pengkajian lebih lanjut.

Secara keseluruhan dapat disimpulkan bahwa alat pendeteksi sikap (*attitude*) sudah dapat digunakan untuk mendeteksi rotasi pada sumbu x (*roll*) dan y (*pitch*) pada wahana terbang. Untuk mendeteksi rotasi pada sumbu z (*yaw*) tidak disarankan untuk menggunakan hasil pengukuran alat ini dikarenakan simpangan yang terlalu besar ($7,64^\circ$) sehingga tidak memenuhi spesifikasi dari wahana terbang.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1 Kesimpulan

Dari hasil pengukuran dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Simpangan rata – rata hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) sebesar $0,58^\circ$ dan rotasi pada sumbu y (*pitch*) sebesar $0,53^\circ$ sudah memenuhi spesifikasi dari alat pendeteksi sikap, sehingga alat ini layak digunakan untuk mengukur rotasi pada sumbu x (*roll*) dan sumbu y (*pitch*) pada wahana terbang. Hal ini berdasarkan pada kemampuan dari alat pendeteksi sikap (*attitude*) dapat membedakan 0° , 15° , 30° dan 45° .
2. Hasil pengukuran *gyroscope* dan *accelerometer* yang digabungkan memiliki nilai simpangan rata – rata yang lebih kecil dibandingkan dengan pengukuran menggunakan *gyroscope* saja. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) sebesar $0,58^\circ$ dan sumbu y (*pitch*) sebesar $0,53^\circ$ dibandingkan dengan hasil pengukuran rotasi pada sumbu z (*yaw*) sebesar $7,64^\circ$.
3. Secara keseluruhan alat pendeteksi sikap (*attitude*) sudah layak digunakan pada wahana terbang, Hal ini sesuai dengan simpangan rata – rata yang diperoleh dari hasil pengukuran rotasi pada sumbu x (*roll*) sebesar $0,58^\circ$, rotasi pada sumbu y (*pitch*) sebesar $0,53^\circ$ dan rotasi pada sumbu z (*yaw*) sebesar $7,64^\circ$.

4.2 Saran

Adapun saran untuk pengembangan lebih lanjut sebagai berikut :

1. Pada pengujian alat dibatasi pada gerak rotasi, sehingga pengaruh gerak translasi dan vibrasi yang diakibatkan oleh perputaran motor pada wahana terbang. Sebesar apa pengaruh gerak translasi dan gerak rotasi masih memerlukan pengkajian lebih lanjut.
2. Diperlukan suatu alat/sistem untuk mengkompensasi pengukuran rotasi pada sumbu z (*yaw*).
3. Pengembangan sistem *wireless* antara mikrokontroler dengan *personal computer*. Sehingga dapat digunakan sebagai sistem *monitoring* pada wahana terbang.

DAFTAR RUJUKAN

- Emmanuel, Dave. (2012). *Perancangan dan implementasi alat bantu sistem navigasi menggunakan modul navigasi berbasis sistem operasi android*. Bandung: Institut Teknologi Nasional.
- Hendri Maja Saputra, Zainal Abidi dan Estiko Rijanto. (2013). *Imu application in measurement of vehicle position and orientation for controlling a pan-tilt mechanism*. Bandung: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.
- M. Hasim As'ari, Wahyudi dan Iwan Setiawan. (2009). *Pendeteksi sudut menggunakan sensor gyroscope*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Asep Mubarak, Wahyudi, dan Iwan Setiawan. (2009). *Pendeteksi Rotasi Menggunakan Gyroscope Berbasis Mikrokontroler ATmega8535*. Semarang: Universitas Indonesia
- Christopher J. Fisker. (2010). *Using an Accelerometer for Inclination Sensing*. Norwood: One Technology Way.
- Tuck, Kimberly. (2007). *Tilt Sensing Using Linear Accelerometers*. Tempe: Freescale Semiconductor.
- Pedley, Mark. (2013). *Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer*. Tempe: Freescale Semiconductor.
- Jhon P. Bentley. (2005). *Principles of Measurement Systems*. England: Pearson.
- Colton, Shane. (2007). *The Balance Filter*. USA: Massachusetts Institute of Technology.