



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN  
KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER  
PADA MIKROKONTROLER AVR**

**SKRIPSI**

**DANIEL ARI WICAKSONO  
0405030222**

**FAKULTAS TEKNIK  
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN  
KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER  
PADA MIKROKONTROLER AVR**

**SKRIPSI**

**Diajukan Untuk Melengkapi Sebagian Persyaratan Menjadi Sarjana Teknik**

**DANIEL ARI WICAKSONO  
0405030222**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Daniel Ari Wicaksono**

**NPM : 04 05 03 0222**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 15 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Daniel Ari Wicaksono  
NPM : 0405030222  
Program Studi : Teknik Elektro  
Rancang Bangun Sistem Navigasi GPS/INS Dan  
Judul Skripsi : Kompas Digital Dengan Kalman filter Pada  
Mikrokontroler AVR

**Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia**

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Muis ST, M.Eng

Penguji : Ir. Wahidin Wahab MSc, PhD

Penguji : Prof. Drs. Benyamin Kusumoputro M.Eng., Dr.Eng.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 31 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Abdul Muis, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Kedua orang tua, keluarga saya, dan Karina Widyastuty Prasatya yang telah banyak memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (3) Nur Hidayat, Nando Kusmanto, Abe Dharmawan, dan sahabat-sahabat yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu.

Depok, 15 Desember 2009



Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS  
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Daniel Ari Wicaksono  
NPM : 0405030222  
Departemen : Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Rancang Bangun Sistem Navigasi GPS/INS dan Kompas Digital  
Dengan Kalman Filter Pada Mikrokontroler AVR

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 15 Desember 2009

Yang menyatakan,



( Daniel Ari Wicaksono )

## ABSTRAK

Nama : Daniel Ari Wicaksono  
Program studi : Teknik Elektro  
Judul : Rancang Bangun Sistem Navigasi GPS/INS dan Kompas Digital Dengan Kalman Filter Pada Mikrokontroler AVR

Rancang bangun sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital dengan Kalman Filter pada mikrokontroler akan mencoba memberikan keunggulan GPS yang mampu memberikan data posisi dan waktu di seluruh permukaan bumi dengan keunggulan INS yang memiliki keakurasian tinggi. Kalman Filter akan menggabungkan data GPS dan data *accelerometer* untuk mendapatkan data posisi, sedangkan untuk mendapatkan data sudut digunakan masukan dari *accelerometer* dan kecepatan putar *rate-gyroscope*. Kompas digital akan menyediakan data *yaw/heading*. Kalman Filter akan memberikan estimasi data posisi dan sudut yang akurat dengan mengeliminasi derau. Rancangan sistem navigasi yang diajukan mampu memberikan akurasi kurang dari  $1^0$  untuk penghitungan sudut dan 2 meter untuk penghitungan posisi.

Kata kunci :

Navigasi GPS/INS, GPS, *accelerometer*, *rate-gyroscope*, kompas digital, Kalman Filter

## ABSTRACT

Name : Daniel Ari Wicaksono  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : GPS/INS and Digital Compass Navigation System with Kalman Filter by using AVR Microcontroller

GPS/INS and Digital Compass Navigation System Design with Kalman Filter by using AVR Microcontroller would try to combine the advantage of GPS that could give time and position data anywhere on the earth with INS that have high accuracy in measurement. Kalman Filter will combine GPS data with accelerometer data to obtain position. Accelerometer data and angular speed from rate-gyroscope will be used to calculate tilt angle. Digital compass will provide yaw / heading data. Kalman Filter will provide estimation of position and tilt angle while eliminating noise. The navigation system could gave tilt angle accuracy less than  $1^{\circ}$  and less than 2 meters for position calculation.

Key Words:

GPS/Inertia Navigation System, gyroscope, accelerometer, digital compass, Kalman Filter

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penulisan .....	2
1.3 Pembatasan Masalah .....	2
1.4 Metode Penulisan.....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB 2 SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN</b>	
<b>    KALMAN FILTER.....</b>	<b>4</b>
2.1 Sistem Navigasi GPS.....	6
2.1.1 Sistem Koordinat .....	9
2.2 Sistem Navigasi Inersia .....	10
2.3 Kompas .....	12
2.3.1 Kompas Digital .....	13
2.4 Kalman Filter .....	14
2.5 Mikrokontroler AVR .....	15
<b>BAB3 PERANCANGAN PERANGKAT KERAS SISTEM NAVIGASI</b>	
<b>    GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER</b>	
<b>    PADA MIKROKONTROLER AVR.....</b>	<b>17</b>
3.1 VS-IX001 .....	18
3.1.1 MMA7260Q.....	18
3.1.2 ENC-03R.....	19
3.1.3 ADS 7828E .....	20
3.2 CMPS03 .....	20
3.3 EG-T10.....	23
3.4 Rangkaian Komunikasi Antarmuka I <sup>2</sup> C .....	23
<b>BAB4 PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK SISTEM NAVIGASI</b>	
<b>    GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER</b>	
<b>    PADA MIKROKONTROLER AVR.....</b>	<b>25</b>
4.1 Pengambilan Data Kompas Digital.....	26
4.2 Pengambilan Data IMU.....	27
4.3 Pengambilan Data GPS .....	28
4.4 Digital Filter .....	31
4.5 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut Kemiringan .....	32
4.6 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi .....	35
4.7 Koreksi Gravitasi .....	36

BAB5 ANALISA DATA KELUARAN SENSOR IMU, GPS, DAN KOMPAS DIGITAL .....	39
5.1 Analisa Data <i>Rate-Gyroscope</i> .....	39
5.2 Analisa Data Kompas Digital.....	41
5.3 Analisa Data <i>Accelerometer</i> .....	43
5.4 Analisa Data GPS.....	46
BAB6 DESAIN, ANALISA, DAN UJI COBA KALMAN FILTER PADA SISTEN NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL .....	50
6.1 Desain Kalman Filter pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital .....	50
6.1.1 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut .....	50
6.1.2 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi .....	56
6.2 Uji coba Kalman Filter pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital .....	61
6.2.1 Pengujian Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut.....	61
6.2.2 Pengujian Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi.....	62
6.3 Penentuan dan analisa pengaruh parameter R terhadap respons Kalman Filter .....	62
BAB7 KESIMPULAN .....	66
DAFTAR ACUAN .....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN.....	70

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Alamat register pada modul CMPS03 beserta fungsinya .....	27
Tabel 4.2	Format pesan NMEA 0183 RMC .....	30
Tabel 6.1	Pengaruh parameter R pada keluaran Kalman Filter untuk penghitungan sudut .....	55
Tabel 6.2	Pengaruh parameter R pada keluaran Kalman Filter untuk penghitungan posisi .....	60
Tabel 6.3	Hasil penghitungan sudut Kalman Filter.....	61



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Cara kerja sistem navigasi GPS/INS .....	6
Gambar 2.2	Orbit Satelit Navigasi di Bumi .....	7
Gambar 2.3	Penentuan lokasi dengan sinyal GPS.....	9
Gambar 2.4	Sistem Koordinat Bumi .....	10
Gambar 2.5	Pengukuran Percepatan Linear dan Orientasi oleh Sensor IMU .....	11
Gambar 2.6	Medan Magnet Bumi dan Kutub Bumi .....	12
Gambar 2.7	Sistem Minimum AVR ATmega16 dan ATmega32 .....	16
Gambar 3.1	Rangkaian Sistem .....	17
Gambar 3.2	VS-IX001.....	18
Gambar 3.3	Orientasi modul VS-IX001.....	18
Gambar 3.4	Pengukuran percepatan Linear .....	19
Gambar 3.5	Arah perputaran <i>rate-gyroscope</i> .....	19
Gambar 3.6	Konfigurasi Pin Modul CMPS03.....	20
Gambar 3.7	Arah Utara dari CMPS03.....	21
Gambar 3.8	Koneksi antar pin CMPS03 dengan I <sup>2</sup> C <i>interface</i> .....	23
Gambar 3.9	Modul GPS EG-T10 .....	23
Gambar 3.10	Rangkaian I <sup>2</sup> C .....	24
Gambar 4.1	Arsitektur Algoritma sistem Navigasi GPS/INS dan Kompas digital dengan Kalman Filter.....	25
Gambar 4.2	Ilustrasi mendapatkan sudut dari percepatan <i>accelerometer</i> .....	33
Gambar 5.1	Rancang Bangun sistem navigasi GPS/INS .....	39
Gambar 5.2	Drift pada Pembacaan sudut <i>Roll</i> oleh <i>Rate-gyroscope</i> .....	40
Gambar 5.3	Pembacaan sudut <i>Roll</i> oleh <i>Rate-gyroscope</i> .....	40
Gambar 5.4	Pembacaan sudut <i>yaw</i> oleh kompas digital .....	42
Gambar 5.5	Pembacaan sudut <i>yaw</i> terhadap sudut <i>roll</i> .....	42
Gambar 5.6	Pembacaan data posisi dari <i>accelerometer</i> .....	44
Gambar 5.7	Pembacaan data posisi dari <i>accelerometer</i> .....	44
Gambar 5.8	Pembacaan data posisi dari <i>accelerometer</i> setelah hasil penalaan .....	45
Gambar 5.9	Pembacaan data Latitude GPS.....	47
Gambar 5.10	Pembacaan data Longitude GPS.....	47
Gambar 5.11	Pemetaan pembacaan posisi GPS pada objek diam.....	48
Gambar 5.12	Pemetaan pembacaan posisi GPS pada objek bergerak.....	48
Gambar 6.1	Pembacaan sudut <i>roll</i> dengan R = 1 .....	52
Gambar 6.2	Pembacaan sudut <i>roll</i> dengan R = 5 .....	52
Gambar 6.3	Pembacaan sudut <i>roll</i> dengan R = 10 .....	53
Gambar 6.4	Pembacaan sudut <i>roll</i> dengan R = 100 .....	53
Gambar 6.5	Pembacaan sudut <i>roll</i> dengan R = 5 dan P = 10000.....	54
Gambar 6.6	Pembacaan posisi Y dengan R = 100 .....	57
Gambar 6.7	Pembacaan posisi Y dengan R = 500 .....	57
Gambar 6.8	Ilustrasi gangguan sinyal GPS saat sistem statis dengan R = 500.....	58
Gambar 6.9	Ilustrasi pembacaan posisi saat tidak mendapat sinyal GPS dengan R = 500.....	58
Gambar 6.10	Ilustrasi gangguan sinyal GPS saat sistem statis dengan R = 100.....	59
Gambar 6.11	Ilustrasi pembacaan posisi saat tidak mendapat sinyal GPS dengan R = 100.....	59

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Sistem navigasi GPS sudah mulai marak digunakan untuk berbagai aplikasi, baik di bidang robotika, transportasi darat-udara-laut, hingga sistem pelacakan barang. Akan tetapi, sistem navigasi GPS rentan terhadap gangguan derau dan *multipath* saat digunakan pada daerah urban, Tidak hanya itu, untuk dapat bekerja dengan baik, sistem navigasi GPS harus mendapatkan sinyal dari satelit, sehingga tidak dapat diaplikasikan pada lingkungan yang memiliki kondisi yang tidak terbuka dan banyak gangguan. Akan tetapi hal tersebut terkompensasi dengan kemampuan memberikan data posisi yang cukup akurat (3-12 meter) selama mendapatkan sinyal. Sistem navigasi inersia (INS) merupakan sistem navigasi *deadreckoning*. Sistem INS tidak membutuhkan sinyal dari luar untuk dapat memberikan sistem navigasi dengan bantuan *accelerometer* dan *rate-gyroscope* sebagai *Inertial Measurement Unit* (IMU). Sistem INS memiliki tingkat keakuratan yang jauh lebih tinggi, namun memiliki kelemahan pada tingkat derau yang tinggi, membuat data posisi dan kemiringan yang diberikan tidak akurat untuk jangka waktu yang lama.

Untuk itu, diperlukan suatu sistem yang mampu menggabungkan kehandalan GPS dengan keakuratan dan kemampuan INS yang dapat memberikan navigasi pada lingkungan yang tertutup. Kalman Filter dapat digunakan untuk menggabungkan data *accelerometer*, *rate-gyroscope*, dan GPS untuk mendapatkan data posisi dan kemiringan yang akurat, tetapi tidak membutuhkan algoritma dan peralatan yang rumit. Sistem GPS/INS juga akan ditambah dengan kompas *digital* untuk memberikan arah *heading* pada sistem yang digunakan.

Skripsi ini akan membahas mengenai perancangan dan pembuatan suatu sistem navigasi GPS/INS dengan menggunakan Kalman Filter untuk mendapatkan suatu sistem yang memiliki tingkat keakuratan yang tinggi namun dapat diaplikasikan pada *low-cost* AVR mikrokontroler yang dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti transportasi, robotika, dan wahana otomatis.

## 1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan utama dari penulisan skripsi ini adalah untuk merancang dan membuat sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital dengan biaya rendah, mempunyai presisi yang tinggi, menggunakan mikrokontroler sebagai pengolah data dan PC sebagai penyaji data.

## 1.3 Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah pada skripsi ini difokuskan pada pengujian Kalman Filter untuk mendapatkan data *roll* dan *pitch* serta mendapatkan sudut *yaw* dari kompas digital yang akurat dan juga data posisi pada sumbu koordinat X dan Y dengan menggunakan Kalman Filter dalam resolusi meter dengan menggunakan bahasa pemrograman C pada mikrokontroler AVR ATmega16 dan ATmega32.

## 1.4 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penyusunan skripsi ini meliputi:

1. Pendekatan tinjauan pustaka, yaitu dengan melakukan studi literatur dari buku-buku pustaka, atau *manual book* serta *reference book* dari suatu perangkat yang digunakan.
2. Pendekatan diskusi dengan pembimbing skripsi ataupun teman-teman yang berkaitan dengan topik bahasan skripsi.
3. Perancangan perangkat keras dan perangkat lunak.
4. Pengujicobaan dan pengambilan data.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Untuk mempermudah penulisan dan agar pembahasan yang disajikan lebih sistematis, maka laporan ini dibagi ke dalam lima bab. Isi masing – masing bab diuraikan secara singkat dibawah ini :

### BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan tentang latar belakang masalah, tujuan, batasan masalah, metode penulisan, dan sistematika penulisan seminar.

**BAB 2 LANDASAN TEORI**

Pada bab ini menjelaskan tentang dasar teori dari sistem navigasi GPS/INS, kompas digital, mikrokontroler AVR dan Kalman Filter.

**BAB 3 PERANCANGAN SISTEM NAVIGASI GPS/INS DENGAN KOMPAS DIGITAL**

Bab ini menjelaskan segala sesuatu yang digunakan dalam merancang dan membangun sistem navigasi GPS/INS dengan bantuan kompas digital, dari sisi perangkat keras dan perangkat lunak.

**BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA**

Bab ini berisikan mengenai pengujian dari sistem navigasi GPS/INS dengan bantuan kompas digital yang telah dibangun, meliputi pengujian Kalman Filter dan keakuratan data yang didapatkan beserta analisisnya.

**BAB 5 KESIMPULAN**

Bab terakhir ini berisikan pernyataan singkat dan tepat yang dijabarkan dari hasil studi literatur atau landasan teori dari penyusunan skripsi.

## **BAB 2**

### **SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER**

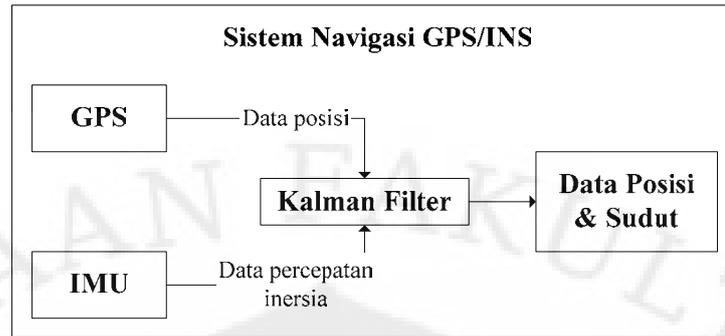
Pada bulan Juli 2009, Nando Kusmanto telah mencoba memberikan gambaran mengenai INS melalui skripsi yang berjudul “*Rancang Bangun Sisten Navigasi Inersia Dengan Kalman Filter Pada Mikrokontroler AVR*” Rancang bangun INS yang digunakan pada skripsi ini berbeda dengan apa yang telah dirancang oleh Nando Kusmanto tersebut. Perbedaan yang mendasar adalah parameter-parameter yang dipergunakan. Dalam skripsinya, Nando Kusmanto mempergunakan parameter yang sudah kerap digunakan pada konfigurasi Kalman Filter untuk aplikasi *autopilot*, sedangkan pada skripsi ini parameter Kalman Filter ditetapkan dari hasil percobaan. Melalui hasil percobaan, didapatkan kondisi dan perilaku sinyal keluaran sensor yang digunakan. Tidak ada sensor yang identik satu sama lain, mengakibatkan parameter yang digunakan Kalman Filter tidak sama satu sistem dengan yang lainnya. Perbedaan parameter yang paling mencolok adalah parameter derau, baik derau keluaran sensor, maupun derau keluaran proses Kalman Filter. Selain itu, skripsi ini merupakan pengembangan skripsi Nando Kusmanto sebelumnya, dengan menambahkan GPS dan Kompas digital.

Dalam bidang robotika, penentuan posisi wahana robot menjadi salah satu permasalahan yang terus menerus diperbincangkan dan dikembangkan teknologinya. Rancang bangun sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital pada mikrokontroler AVR ini diharapkan dapat menjadi salah satu teknologi yang dapat diterapkan. Mikrokontroler AVR digunakan sebagai pusat pemrosesan data dipilih karena mikrokontroler ini terkenal handal dan mudah didapatkan di pasaran dengan harga yang terjangkau, membuat rancang bangun sistem navigasi ini dapat diterapkan dengan mudah untuk berbagai aplikasi wahana robot, bahkan untuk aplikasi *low-cost* sekalipun. Digunakannya bahasa pemrograman C juga akan membantu sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang dirancang ini mudah untuk dikembangkan dan diaplikasikan pada wahana robot lainnya.

Sistem navigasi GPS telah banyak diaplikasikan pada berbagai bidang seperti transportasi, pemetaan, dan wahana otomatis. Keunggulan yang diberikan sistem navigasi GPS adalah kemampuannya untuk memberikan data mengenai waktu dan posisi pada seluruh permukaan bumi. Akan tetapi, sistem navigasi GPS memiliki keterbatasan, yaitu hanya dapat bekerja bila dapat menerima sinyal satelit dengan baik untuk dapat memberikan data waktu dan posisi yang akurat. Pada kenyataannya, penerimaan sinyal satelit tidak selalu baik akibat banyak gangguan, baik gangguan yang berasal dari alam maupun gangguan yang berasal dari peralatan elektronik lainnya.

Dalam dunia robotika, telah dikenal sistem navigasi inersia (INS) yang mampu memberikan data posisi suatu wahana robot dengan memperhitungkan percepatan inersia yang dialami wahana tersebut. INS merupakan sistem yang lebih sederhana dan murah bila dibandingkan GPS. Cara kerja INS yang memperhitungkan percepatan inersia wahana robot membutuhkan sensor *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang diletakkan pada wahana tersebut. Data percepatan yang didapatkan langsung pada sistem wahana robot membuat INS tidak tergantung pada informasi dari luar dan kondisi lingkungan sekitar. Sistem yang disebut dengan *dead reckoning system* ini menjadi keunggulan utama INS karena dapat dipergunakan pada kondisi ekstrim sekalipun. Kelebihan lain INS adalah mampu untuk memberikan data posisi dengan tingkat keakurasian yang lebih baik, namun rentan terhadap derau dan akumulasi kesalahan.

Skripsi ini akan berusaha menggabungkan keunggulan GPS dan INS untuk dapat memberikan data posisi yang akurat pada berbagai kondisi lingkungan di permukaan bumi. Kalman Filter digunakan untuk mendapatkan data posisi yang lebih akurat setelah membandingkan data posisi yang didapat dari sistem navigasi GPS dengan INS. Kalman Filter juga berfungsi untuk mereduksi derau untuk mendapatkan hasil penghitungan yang baik. Apabila sistem navigasi GPS/INS (hasil penggabungan sistem navigasi GPS dan INS) dijabarkan dalam diagram, maka dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.1 Cara kerja sistem navigasi GPS/INS

Berdasarkan gambar 2.1 di atas, tampak bahwa sistem navigasi GPS/INS yang akan dijabarkan pada skripsi ini membutuhkan data posisi dari GPS dan data percepatan inersia yang diberikan oleh IMU yang akan dibandingkan dengan Kalman Filter. Kalman Filter akan memperhitungkan derau sistem dan mengeliminasi untuk mendapatkan data posisi dan sudut akhir yang lebih akurat.

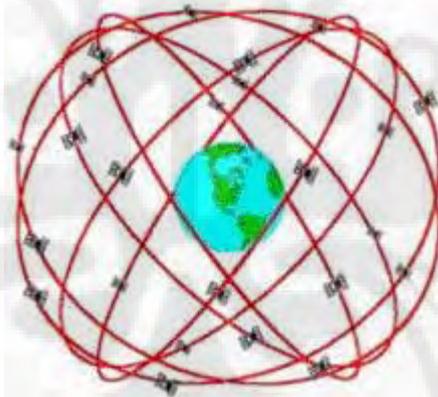
## 2.1 Sistem Navigasi GPS

Navigasi satelit adalah sebuah cara dalam Global Navigation Satellite System (GNSS) untuk mendapatkan data lokasi dan waktu yang tepat dimanapun di bumi. Hingga tahun 2009, Global Positioning System (GPS) yang dikembangkan dan dioperasikan oleh Departemen Pertahanan Amerika Serikat merupakan satu-satunya sistem GNSS yang berfungsi sepenuhnya. GPS, yang sebenarnya diberi nama Navigation System with Timing And Ranging Global Positioning System (NAVSTAR-GPS) diperuntukkan agar dapat dipergunakan baik untuk kalangan militer maupun kalangan sipil. Sinyal GPS terdapat 2 (dua) jenis, yaitu Precise Positioning Service (PPS) yang hanya tersedia bagi kalangan pemerintahan yang mempunyai akses dan Standard Positioning Service (SPS) yang dapat diakses kalangan sipil secara gratis asalkan memiliki perangkat penerima sinyal GPS (GPS Receiver).

Satelit navigasi pertama kali diorbitkan tanggal 22 Februari 1978 dan direncanakan untuk mengorbitkan hingga 32 satelit yang akan beroperasi pada ketinggian 20.180 km di atas permukaan laut di 6 jalur orbit yang berbeda. Orbit

yang ditentukan memiliki sudut inklinasi sebesar  $55^{\circ}$  terhadap garis Ekuator, memastikan setidaknya terdapat 4 buah satelit yang berada dalam jaringan komunikasi pada setiap titik di permukaan bumi. <sup>[1]</sup>

Satelit navigasi tersebut bertugas untuk menerima dan menyimpan data yang ditransmisikan oleh stasiun-stasiun pengendali, menyimpan dan menjaga informasi waktu berketelitian tinggi (ditentukan dengan jam atomik di satelit), dan memancarkan sinyal dan informasi secara kontinu ke perangkat penerima (receiver) pada pengguna. Bagian pengendali pada bumi berfungsi untuk mengendalikan satelit dari bumi baik untuk mengecek kesehatan satelit, penentuan dan prediksi orbit dan waktu, sinkronisasi waktu antar satelit, dan mengirimkan data ke satelit. Sedangkan bagian penerima bertugas menerima data dari satelit dan memprosesnya untuk menentukan posisi (posisi tiga dimensi yaitu koordinat di bumi dan ketinggian), arah, jarak dan waktu yang diperlukan oleh pengguna.



Gambar 2.2 Orbit Satelit Navigasi di Bumi

Sumber: <http://www.mikron123.com/index.php/Aplikasi-GPS/Teori-Dasar-GPS.html>

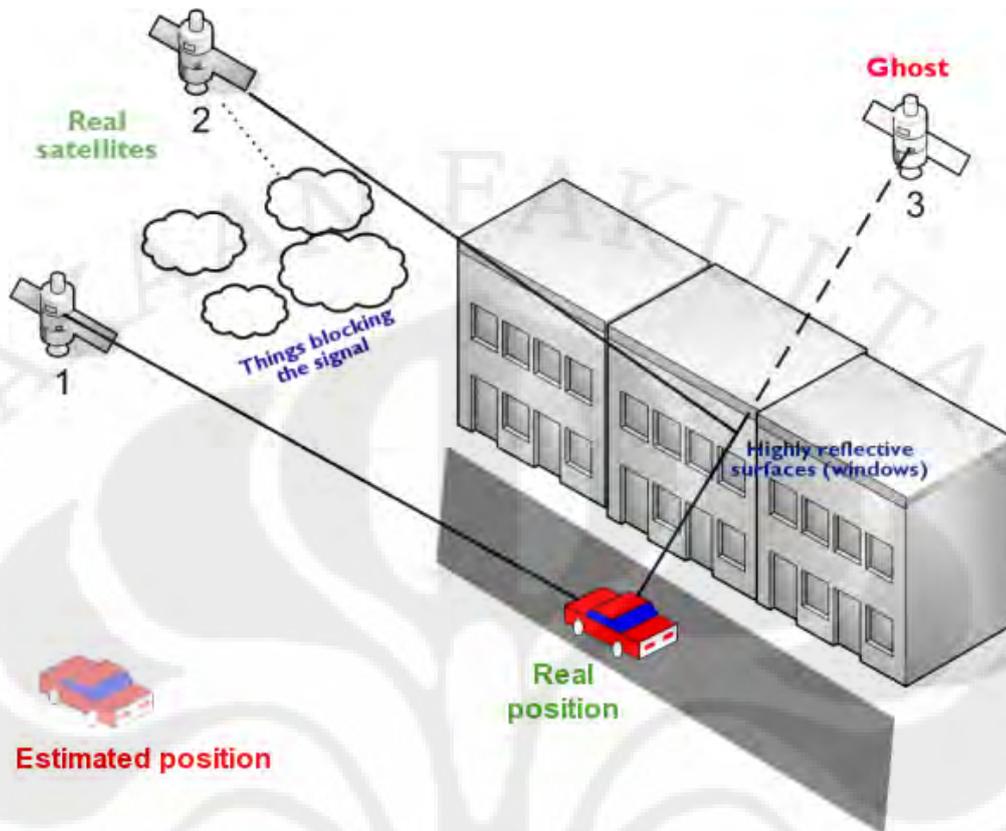
Pada dasarnya penentuan posisi dengan GPS adalah pengukuran jarak secara bersama – sama ke beberapa satelit sekaligus. Untuk menentukan koordinat suatu titik di bumi, receiver setidaknya membutuhkan 4 satelit yang dapat ditangkap sinyalnya dengan baik. Setiap satelit GPS memancarkan sinyal-sinyal gelombang mikro. GPS Receiver menggunakan sinyal satelit yang diterima untuk melakukan triangulasi posisi dengan cara mengukur lama perjalanan waktu sinyal

dikirimkan dari satelit, kemudian mengalikannya dengan kecepatan cahaya untuk menentukan secara tepat berapa jauh dirinya dari satelit.

Dengan mengunci minimum 3 sinyal dari satelit yang berbeda, maka GPS *Receiver* dapat menghitung posisi tetap sebuah titik yaitu koordinat posisi lintang dan bujur (Latitude & Longitude). Penguncian sinyal satelit yang ke-4 membuat pesawat penerima GPS dapat menghitung posisi ketinggian titik tersebut terhadap muka laut (Altitude).

Permasalahan muncul apabila GPS digunakan pada lingkungan yang tidak ideal. Penghitungan posisi GPS yang dilakukan melalui proses penangkapan sinyal satelit GPS dan melakukan kalkulasi data atomic clock membutuhkan line-of-sight yang terbebas dari gangguan untuk mendapatkan data posisi yang akurat. Kenyataan yang ada, kondisi seperti itu sangat sulit untuk didapatkan. Meskipun data GPS dapat diperoleh, namun tingkat presisinya masih dikatakan kurang, yaitu sekitar 3 meter hingga 12 meter untuk GPS komersial<sup>[2]</sup>. Penyebab dari rendahnya akurasi penghitungan data posisi GPS ini dapat disebabkan oleh adanya derau atau *noise*. Interferensi dan atenuasi sinyal GPS dapat terjadi pada saat cuaca buruk. Kumpulan awan yang cukup tebal, petir, dan banyaknya partikel di atmosfer dapat mengganggu penerimaan sinyal, penurunan nilai *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan dapat menyebabkan kesalahan komputasi data posisi.

Pada aplikasi di daerah perkotaan, permasalahan lain yang mungkin muncul adalah permasalahan *multipath* (lihat gambar2.3). *Multipath* dapat dijelaskan sebagai suatu kesalahan yang terjadi pada saat sinyal GPS yang dipantulkan oleh permukaan yang reflektif diterima sebagai data yang valid, padahal sinyal tersebut bukan sinyal yang sebenarnya. Penangkapan sinyal hasil pantulan tersebut mengakibatkan munculnya satelit bayangan yang dijadikan acuan pada penghitungan posisi. Akibatnya posisi yang diterima menjadi tidak akurat.

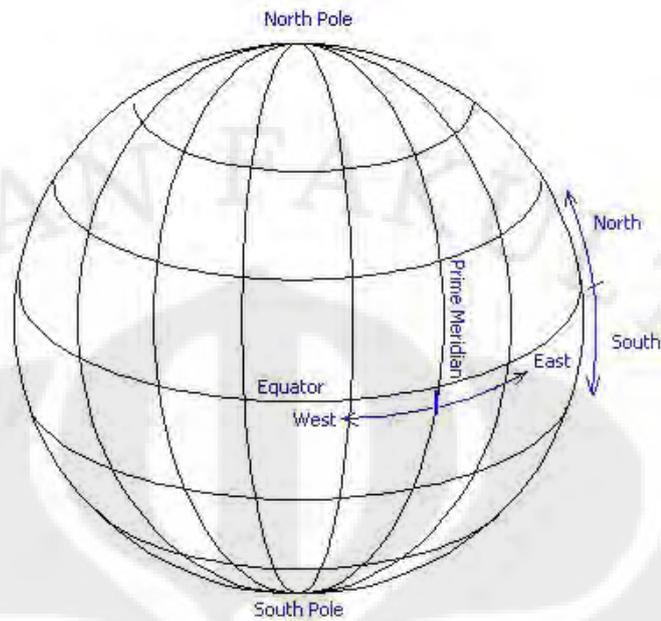


Gambar 2.3 Penentuan lokasi dengan sinyal GPS

Sumber: <http://julien.cayzac.name/code/gps/>

### 2.1.1 Sistem Koordinat

Dalam navigasi GPS, digunakan koordinat Geografi, yang mengukur bumi dalam lintang dan bujur yang dinyatakan dalam besaran derajat decimal (Ddd) dan derajat menit (mmmm). Seperti yang dapat kita lihat pada gambar 2.4, koordinat bumi dibagi menjadi dua, yaitu garis lintang (Latitude) dan garis bujur (Longitude). Garis lintang menjadikan garis ekuator (khatulistiwa) sebagai titik nol derajat dan memagi bumi sebesar  $90^0$  ke arah utara dan  $90^0$  ke arah selatan. Sedangkan garis bujur membagi bumi menjadi  $180^0$  ke arah timur dan  $180^0$  ke arah barat dengan Greenwich sebagai titik nol derajat.



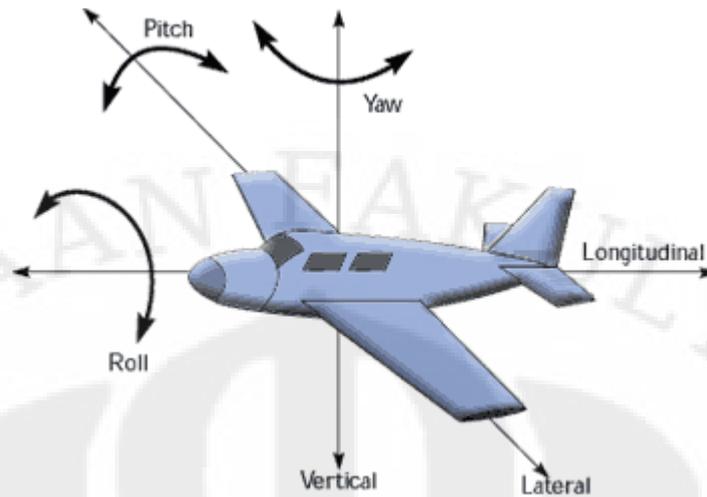
Gambar 2.4 Sistem koordinat bumi

Sumber: <http://www.astro.ufl.edu/~oliver/ast3722/lectures/CoordsNtime/TerrestrialSystem.jpg>

## 2.2 Sistem Navigasi Inersia

Sistem navigasi inersia merupakan sistem yang telah banyak digunakan dalam sistem navigasi karena biayanya yang murah, praktis, dan dapat bekerja tanpa dipengaruhi oleh keadaan lingkungan (*dead reckoning system*). Pada sistem navigasi GPS, sistem navigasi akan mengalami masalah ketika GPS tidak mendapatkan data karena derau yang sangat besar akibat terhalang benda (di dalam ruang), keadaan atmosfer, hujan, dan lain-lain. Hal ini tidak terjadi pada sistem navigasi inersia.

Sistem navigasi inersia bekerja dengan memanfaatkan *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang biasa digunakan untuk mengukur percepatan linear (percepatan sumbu  $x, y$ , dan  $z$ ) dan kecepatan putar (*roll, pitch*, dan *yaw*) seperti yang digambarkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pengukuran percepatan linear dan orientasi oleh sensor IMU

Sumber: <http://quest.arc.nasa.gov/aero/virtual/demo/aeronautics/tutorial/motion.html>

Prinsip dasar dari sistem navigasi inersia adalah dengan mengintegrasikan percepatan linear dan kecepatan putar yang didapatkan dari IMU, sehingga didapatkan data posisi dan kemiringan. Posisi dan kemiringan yang didapatkan dari sistem navigasi inersia ini relatif terhadap kondisi awal (posisi dan kemiringan awal). Untuk mendapatkan data posisi diperlukan data mengenai percepatan linear yang diambil dari *accelerometer*, maka dapat digunakan penghitungan sebagai berikut :

$$v = \int a \, dt \quad (2.1)$$

$$s = \int v \, dt \quad (2.2)$$

dengan  $a$  adalah percepatan linear,  $v$  adalah kecepatan linear, dan  $s$  adalah jarak atau posisi.

Sedangkan untuk mendapatkan data posisi sudut kemiringan, maka data kecepatan sudut yang diperoleh dari *rate-gyroscope* akan diolah menurut persamaan (2.3).

$$\theta = \int \omega \, dt \quad (2.3)$$

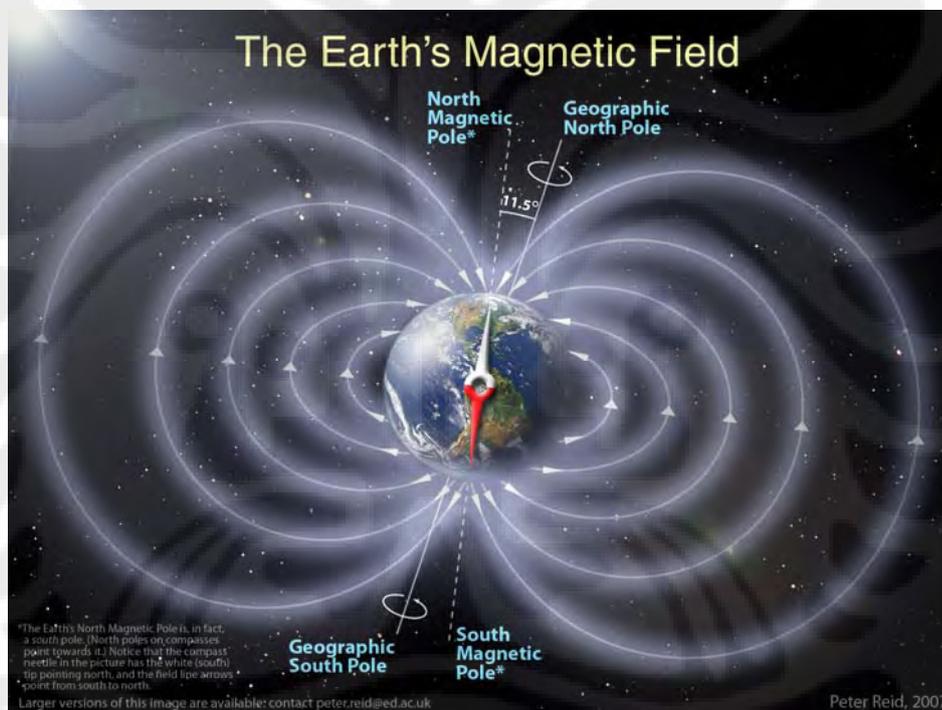
dengan  $\omega$  adalah kecepatan putar dan  $\theta$  adalah sudut.

Kekurangan utama dari sistem navigasi inersia adalah sistem mengalami akumulasi kesalahan. Kesalahan kecil pada pengukuran percepatan dan kecepatan

putar akan menyebabkan kesalahan yang semakin berkembang pada komponen penghitungan berikutnya.

### 2.3 Kompas

Kompas telah menjadi bagian yang tidak dapat terlepas dari penaklukan dunia lewat penjelajahan dunia maritim. Sejak lama kompas telah menjadi alat bantu navigasi bagi para pelaut agar dapat menentukan rute perjalanan yang aman, efisien, daripada saat manusia masih bergantung pada posisi bintang untuk menentukan arah.



Gambar 2.6 Medan Magnet Bumi dan Kutub Bumi

Sumber : <http://anshsmagnetism.wordpress.com/basic-concepts/>

Pada dasarnya, suatu benda yang memiliki sifat magnetik dan dapat bergerak bebas dapat dikatakan sebagai kompas. Umumnya, kompas terdiri dari sebuah jarum penunjuk magnetik yang dapat bergerak bebas pada suatu poros. Pergerakan jarum penunjuk itu akan menyelaraskan medan magnet yang terdapat pada jarum dengan medan magnet bumi, sehingga kita dapat dengan mudah mendapatkan informasi arah dengan menggunakan kutub utara magnet bumi

sebagai acuan. Akan tetapi, yang perlu diingat di sini adalah, yang ditunjuk oleh kompas adalah arah Utara medan magnet bumi, bukan Utara bumi yang sebenarnya. Gambar 2.6 telah dapat menggambarkan kondisi medan magnetic bumi yang sebenarnya. Tampak bahwa *True North* atau *Geographic North Pole* yang merupakan kutub Utara bumi yang sebenarnya tidak berhimpitan posisinya dengan kutub Utara medan magnet bumi (*North Magnetic Pole* atau *Magnetic North*).

### 2.3.1 Kompas Digital

Dalam perkembangan teknologi telah ditemukan sebuah kompas digital, dimana sensor medan magnet bumi telah menggantikan posisi jarum penunjuk magnetic yang digunakan pada kompas magnetik. Sensor magnetik ini bekerja berdasarkan prinsip Efek Hall. Secara singkat, Efek Hall dapat dijelaskan sebagai berikut.

Apabila suatu medan magnet melewati suatu batang metal atau lapisan film metal yang dialiri arus listrik, medan magnet tersebut akan mendorong elektron menuju ke salah satu sisi sepanjang lintasan medan magnet tersebut. Peristiwa ini menyebabkan jumlah elektron di salah satu sisi film lebih banyak dibandingkan sisi yang lainnya, sehingga kita dapat mengukur beda tegangan di kedua sisi film metal tersebut. Besar tegangan yang terukur disebut sebagai tegangan Hall yang besarnya proporsional dengan besar arus yang mengalir pada film. Besarnya tegangan Hall juga proporsional dengan kuat medan magnet yang memotong film.

Penjelasan mengenai Efek Hall di atas sangatlah sederhana. Kondisi di atas terjadi ketika medan magnet memotong tegak lurus terhadap permukaan film. Apabila medan magnet tidak memotong tegak lurus film, maka yang berpengaruh adalah komponen-komponen medan magnet yang berpotongan tegak lurus terhadap permukaan film. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal, maka dapat digunakan 2 (dua) atau lebih sensor. Rasio tegangan Hall di kedua sensor tersebut dapat digunakan untuk merekonstruksi arah dan kuat medan magnet dengan penghitungan vektor.

## 2.4 Kalman Filter

Pada tahun 1960, R.E. Kalman mempublikasikan *paper* yang menjelaskan suatu solusi rekursif untuk permasalahan filter data linear yang bersifat diskrit. Kalman filter adalah suatu persamaan matematis yang menghasilkan suatu perhitungan rata-rata rekursif yang efisien untuk mengestimasi suatu *state* atau keadaan dari sebuah proses yang bertujuan untuk mengurangi rata-rata error yang terjadi. Kalman filter adalah suatu estimator rekursif, dengan kata lain, hanya dibutuhkan keadaan hasil estimasi dari pewaktuan sebelumnya dan hasil pengukuran saat ini untuk dapat menghitung estimasi keadaan saat ini.

Kalman Filter sangat kuat untuk beberapa aspek, misalnya dapat melakukan estimasi keadaan suatu proses pada waktu sebelum, saat ini, dan saat yang akan datang. Kalman filter juga dapat digunakan bahkan pada saat kondisi sebenarnya dari suatu sistem yang dimodelkan tidak diketahui. Sejak saat itu, Kalman filter menjadi pokok pembahasan yang ekstensif dan banyak digunakan untuk aplikasi, khususnya sistem *autonomous* atau bantuan navigasi. Pada sistem navigasi ini, Kalman Filter yang digunakan adalah Kalman Filter diskrit yang akan mengestimasi proses dan memberikan umpanbalik dalam bentuk pengukuran derau.

Kalman filter mempunyai dua fasa utama, yaitu Prediksi dan Update. Fasa prediksi menggunakan hasil estimasi keadaan dari pewaktuan sebelumnya untuk menghasilkan suatu estimasi keadaan pada pewaktuan saat ini. Pada fasa Update, informasi hasil pengukuran pada saat pewaktuan sebelumnya digunakan untuk memberikan hasil prediksi untuk pewaktuan saat ini. Kedua fasa ini akan dijalankan secara berulang.

### Prediksi

$$\text{Keadaan terprediksi} \quad \hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (2.4)$$

$$\text{Error kovarian terprediksi} \quad P_k = P_{k-1}A^T + Q \quad (2.5)$$

### Update

$$\text{Error} \quad \tilde{y}_k = z_k - H\hat{x}_k \quad (2.6)$$

$$\text{Optimal Kalman Gain} \quad K_k = P_k H^T (HP_k H^T + R)^{-1} \quad (2.7)$$

$$\text{Estimasi Keadaan ter-update} \quad \hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k \tilde{y}_k \quad (2.8)$$

$$\text{Estimasi error kovarian ter-update} \quad P_k = (I - KH_k) P_{k-1} \quad (2.9)$$

Dalam penggunaannya, proses penghitungan Kalman Filter membutuhkan kondisi inisialisasi dari variable  $P_0$  dan  $\hat{x}_0$  yang biasanya didapatkan dengan memperkirakan kondisi sistem pada saat awal. Hanya saja, penentuan nilai  $P_0$  tidak boleh bernilai 0 (nol) (Welch & Bishop, 2006). Apabila  $P_0 = 0$ , maka sistem akan selalu mempercayai bahwa  $\hat{x}_k = \hat{x}_0$  dan sistem tidak akan berjalan sesuai dengan kondisi sebenarnya.

## 2.5 Mikrokontroler AVR

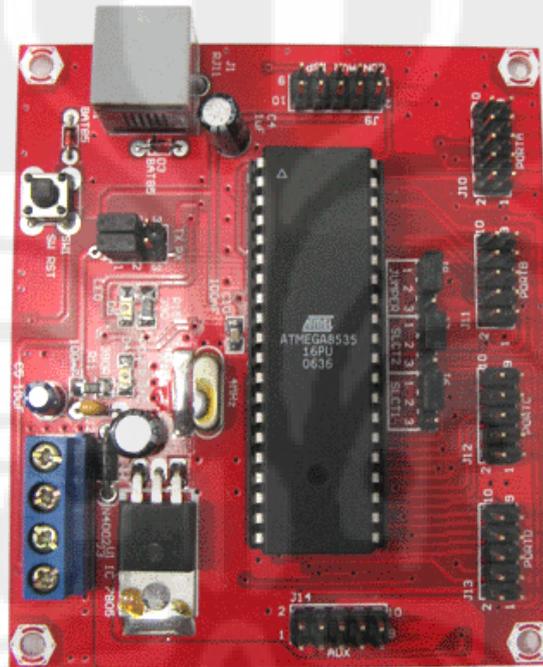
AVR merupakan seri mikrokontroler CMOS 8-bit buatan Atmel, berbasis arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) yang ditingkatkan. Hampir semua instruksi dieksekusi dalam satu siklus *clock*. AVR mempunyai 32 *register general-purpose*, *timer/counter* fleksibel dengan mode *compare*, *interrupt* internal dan eksternal, serial UART, *programmable Watchdog Timer*, *two-wire* (I<sup>2</sup>C), ADC, PWM internal dan mode *power saving*. AVR juga mempunyai *In-System Programmable Flash on-chip* dalam sistem menggunakan hubungan serial SPI. ATmega16 dan 32 adalah mikrokontroler CMOS 8-bit daya-rendah berbasis arsitektur RISC yang ditingkatkan. Mikrokontroler tersebut mempunyai *throughput* mendekati 1 MIPS per MHz untuk mengoptimasi konsumsi daya terhadap kecepatan proses.

Pemilihan Mikrokontroler AVR ATmega16 dan ATmega 32 ini disebabkan karena harga mikrokontroler ini yang cukup murah, mudah untuk didapatkan di pasaran, handal, dan mempunyai kemampuan untuk berkomunikasi dengan berbagai antarmuka seperti I<sup>2</sup>C, USART, dan SPI.

Perancangan sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital pada skripsi ini menggunakan DT-AVR Low Cost Micro System buatan Innovative Electronics. Sistem minimum ini digunakan agar lebih praktis dalam menyuplai daya, memprogram mikrokontroler dan merangkai jalur komunikasi dari dan ke mikrokontroler. Pada sistem minimum mikrokontroler ini sudah terdapat header

untuk kabel serial dan *voltage regulator*. Selain itu, sistem minimum ini juga menyediakan rangkaian *clock* eksternal (kristal) sebesar 11.0592 MHz, tombol untuk reset dan interrupt, yang akan sangat berguna dalam penggunaannya.

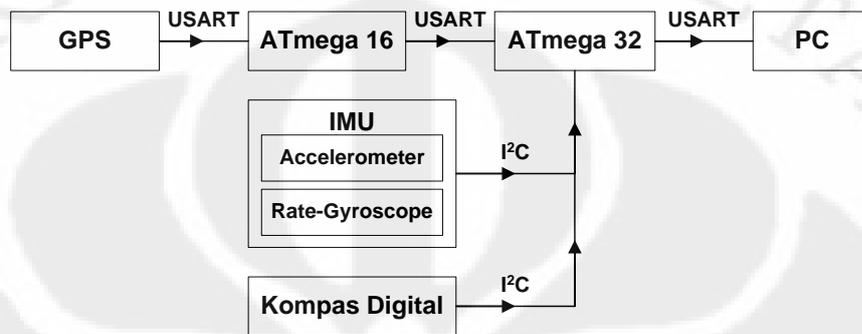
Dalam sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital pada skripsi ini, semua sumber daya perangkat yang digunakan, berasal dari sistem minimum AVR yang terhubung dengan adaptor (AC-DC converter) 9v. Oleh karena adanya *voltage regulator* pada sistem minimum ini, maka tegangan masukan ke mikrokontroler dan tegangan keluarannya adalah 5v.



Gambar 2.7 Sistem minimum AVR ATmega16 & ATmega32

### BAB 3

#### PERANCANGAN PERANGKAT KERAS SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER PADA MIKROKONTROLER AVR



Gambar 3.1 Rangkaian Sistem

Gambar 3.1 menunjukkan rangkaian sistem navigasi GPS yang dibantu oleh navigasi inersia yang digunakan dalam skripsi ini. Komunikasi antara IMU dan kompas digital dengan mikrokontroler menggunakan antarmuka I<sup>2</sup>C. Sedangkan komunikasi antara GPS Receiver dengan mikrokontroler menggunakan komunikasi USART (serial). Mikrokontroler berfungsi dalam pengambilan data dari sensor dan mengolahnya sehingga didapatkan data mengenai posisi dari GPS dan IMU. ATmega 16 berfungsi sebagai *slave* yang akan terus memproses data GPS dan mengambil data Latitude dan Longitude yang akan dipergunakan dalam pengolahan Kalman Filter. Data Latitude dan Longitude tersebut akan diumpun ke ATmega 32 yang berfungsi sebagai *master* dan akan mengolahnya. *Master* juga berfungsi untuk mengambil data dari IMU dan kompas digital melalui antarmuka I<sup>2</sup>C.

Rangkaian perangkat keras yang digunakan dalam membangun sistem navigasi inersia dapat dilihat dari gambar 3.1. Rangkaian perangkat keras ini disusun dengan menggunakan perangkat keras sebagai berikut:

- Modul VS-IX001 sebagai IMU
- Modul CMPS03 sebagai kompas digital
- Modul EG-T10 sebagai GPS Receiver
- Perangkat keras rangkaian komunikasi antarmuka I<sup>2</sup>C

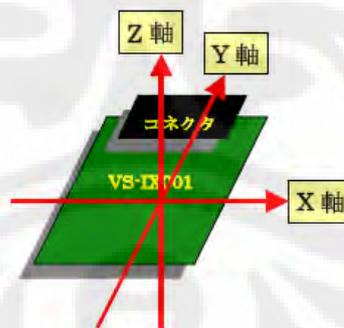
### 3.1 VS-IX001

VS-IX001 merupakan sensor IMU yang terdiri dari 3 *accelerometer* untuk mengukur percepatan linear sumbu x, y dan z dan 2 *rate-gyroscope* untuk mengukur kecepatan putar *roll* dan *pitch*. Data yang diambil berupa data analog yang dikonversi oleh ADC menjadi data digital dan kemudian diambil melalui antarmuka I2C. Keluaran dan masukan dari modul VS-IX001 menggunakan 2x5 pin konektor. Fungsi dari masing-masing pin, adalah :

- Pin 5 sebagai SCL
- Pin 6 sebagai SDA
- Pin 8 sebagai Vdc (5 volt)
- Pin 10 sebagai *Ground*



Gambar 3.2 VS-IX001



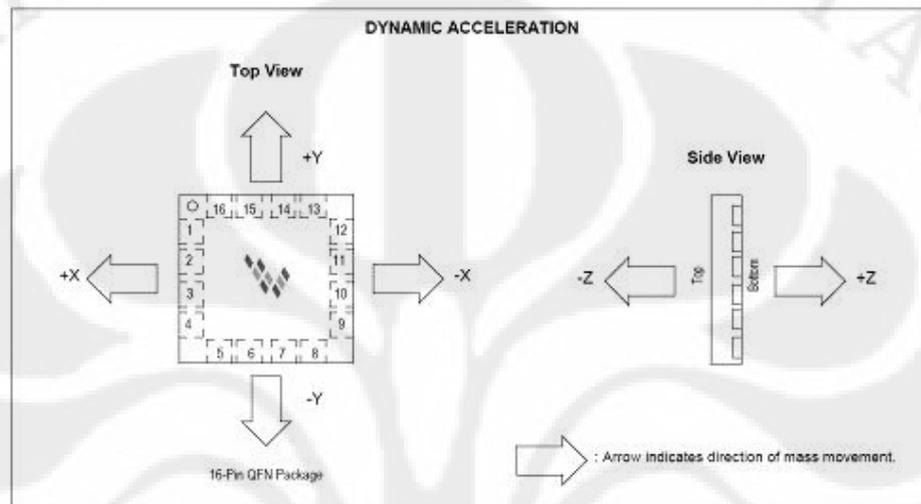
Gambar 3.3 Orientasi modul VS-IX001

Sumber : Datasheet VS-IX001

#### 3.1.1 MMA7260Q

MMA7260Q merupakan *accelerometer* dengan sensitifitas yang dapat diatur untuk mendapatkan data percepatan sumbu X, Y dan Z. Keluaran dari IC

berupa data analog yaitu tegangan. Tegangan keluaran menunjukkan besarnya penambahan tegangan keluaran tiap penambahan percepatan sebesar 1g dan pengurangan tegangan keluaran tiap penambahan percepatan sebesar 1g ke arah sebaliknya. Pada kondisi statis, keluaran tegangan adalah 1,65 volt. IC ini memiliki *internal sampling frequency* sebesar 11 KHz.

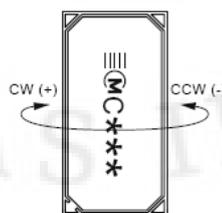


Gambar 3.4 Pengukuran percepatan linear

Sumber : Datasheet MMA7260Q

### 3.1.2 ENC-03R

Rate-gyroscope yang digunakan untuk mengukur kecepatan angular menggunakan Murata ENC-03R yang memiliki karakteristik respons 50Hz dan memiliki kecepatan putar maksimum  $\pm 300$  deg/sec dengan sensitifitas 0,67 mv.deg/sec. Keluaran ENC-03R terhubung dengan rangkaian *low-pass filter* yang berfungsi mengurangi noise dan *high-pass filter* yang berfungsi mengurangi efek perubahan tegangan keluaran akibat suhu.



Gambar 3.5 Arah perputaran *rate-gyroscope*

Sumber: Datasheet Murata ENC-03R, telah diolah kembali

### 3.1.3 ADS 7828E

ADS 7828E memiliki resolusi 12 bit, 8 *channel input sampling Analog to Digital Converter* dengan  $I^2C^{tm}$  *interface*. ADS 7828E mengubah data analog dari *accelerometer* dan *rate-gyroscope* menjadi data digital. Dengan kuantisasi tegangan dalam 12 bit, keluarannya dapat dihitung dengan persamaan:

$$ADC = \frac{v_{in} \times 2^{12}}{v_{ref}} \quad (3.1)$$

Dimana ADC adalah keluaran data digital,  $V_{in}$  adalah tegangan input dan  $V_{ref}$  adalah tegangan referensi

### 3.2 CMPS03

Dalam perancangan sistem ini, digunakan CMPS03 Magnetic Compass buatan Devantech, Ltd. Modul kompas digital ini bertujuan untuk menghasilkan suatu susunan angka unik yang dapat merepresentasikan informasi arah robot menghadap. Modul CMPS03 mempergunakan 2 buah sensor medan magnet Phillips KMZ51 yang cukup sensitif untuk mendeteksi medan magnet bumi. Keluaran dari kedua sensor ini lantas akan dipergunakan untuk data yang dikalkulasikan dan menghasilkan informasi arah komponen horizontal medan magnet bumi. Modul CMPS03 memerlukan tegangan DC 5V dan mengomsumsi 15mA pada saat beroperasi.



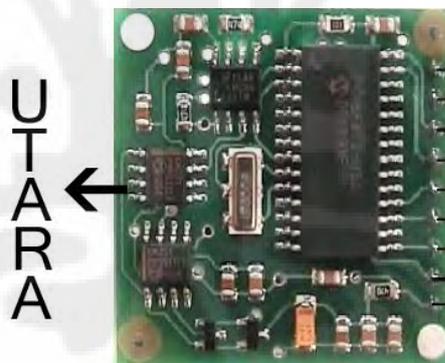
Gambar 3.6 Modul CMPS03

Pembacaan modul CMPS03 memerlukan proses kalibrasi agar memberikan hasil pembacaan yang akurat. Proses kalibrasi ini dilakukan agar sudut inklinasi yang tersimpan dalam EEPROM modul CMPS03 telah sesuai dengan sudut inklinasi di tempat dipergunakannya modul ini. Sebagai informasi, pada kondisi awal, modul CMPS03 ini telah dikalibrasi dengan sudut inklinasi 67°. Kalibrasi modul dapat dilakukan melalui 2 cara :

✓ Metode I<sup>2</sup>C

Untuk melakukan kalibrasi menggunakan antarmuka I<sup>2</sup>C, kita hanya perlu menuliskan 255 (0xFF) pada register 15 untuk setiap arah mata angin utama, yaitu Utara, Timur, Selatan, dan Barat. Nilai 255 akan dihapus dengan sendirinya saat proses kalibrasi selesai. Sebagai contoh, berikut adalah langkah – langkah melakukan kalibrasi.

1. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Utara. Tulis 255 pada register 15.



Gambar 3.7 Arah Utara dari CMPS03

2. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Timur. Tulis 255 pada register 15.
3. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Selatan. Tulis 255 pada register 15.
4. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Barat. Tulis 255 pada register 15.

Urutan kalibrasi tersebut tidaklah mutlak, hanya saja kita perlu melakukan kalibrasi untuk empat arah mata angin utama tersebut.

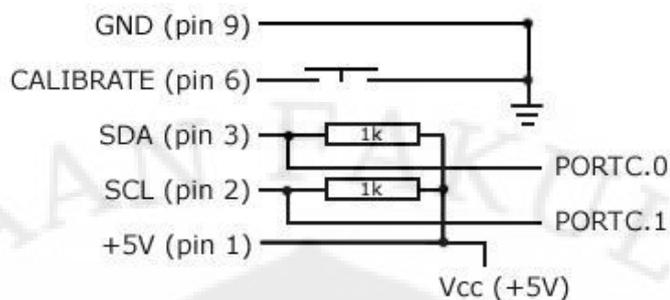
✓ Metode pin

Pin 6 (lihat gambar 3.8) digunakan untuk melakukan kalibrasi kompas. Input kalibrasi (pin 6) mempunyai resistor *pull-up* di dalamnya dan dapat dibiarkan tidak terhubung bila tidak digunakan. Untuk melakukan kalibrasi, kita hanya butuh memberikan input LOW lalu HIGH lagi untuk setiap arah mata angin utama yaitu Utara, Timur, Selatan, dan Barat. Pemberian input LOW dan HIGH dapat dilakukan dengan menghubungkan pin 6 ke *ground* (0 volt) yang dapat dilakukan dengan bantuan *tactile switch*. Sama halnya dengan kalibrasi dengan metode I<sup>2</sup>C, kalibrasi ini dapat dilakukan dengan urutan :

1. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Utara. Tekan *switch* satu kali saja.
2. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Timur. Tekan *switch* satu kali saja.
3. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Selatan. Tekan *switch* satu kali saja.
4. Atur modul kompas sejajar dengan permukaan bumi, dan arahkan menuju Barat. Tekan *switch* satu kali saja.

Salah satu proses kalibrasi tersebut hanya perlu dilakukan satu kali saja untuk setiap tempat dengan sudut inklinasi yang sama. Hasil kalibrasi akan disimpan pada EEPROM, sehingga akan terus tersimpan meskipun modul dinonaktifkan lalu diaktifkan kembali.

Berikut adalah koneksi antar pin yang dapat digunakan pada modul CMPS03 apabila menggunakan metode antarmuka I<sup>2</sup>C untuk pengambilan data:



Gambar 3.8 Koneksi antar pin CMPS03 dengan antarmuka I<sup>2</sup>C

### 3.3 EG-T10

Perancangan sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital ini menggunakan modul GPS EG-T10 dengan *chipset* Leadtek LR980ST/LR9540 sebagai penerima sinyal GPS. Modul ini mendukung protokol standar *National Marine Electronics Association* NMEA 0813 (GGA, GGL, GSA, GSV, VTG dan RMC) dan komunikasi serial asinkronus *Full Duplex* RS-232 dengan data kode ASCII. Sistem GPS akan memperbaharui data posisi setiap 1 detik sekali ( 1 Hz).



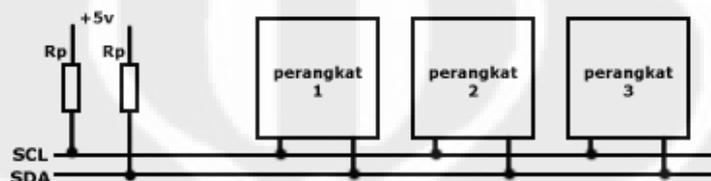
Gambar 3.9 Modul GPS EG-T10

### 3.4 Rangkaian Komunikasi Antarmuka I<sup>2</sup>C

Pada rancangan sistem navigasi GPS dan inersia ini, digunakan komunikasi I<sup>2</sup>C *interface* sebagai jalur komunikasi antara modul IMU, kompas digital, dan mikroprosesor. I<sup>2</sup>C *interface* hanya membutuhkan dua jalur komunikasi, yaitu jalur *Serial Data* (SDA) dan *Serial Clock* (SCL). SDA merupakan jalur yang digunakan untuk mentransfer data, sedangkan jalur SCL berfungsi sebagai jalur

sinkronisasi pewaktuan sehingga tidak ada data yang bertabrakan dalam proses transfer data antara mikrokontroler dengan divais-divais yang lain.

Beberapa perangkat dapat terhubung ke dalam jalur I<sup>2</sup>C yang sama dimana SCL dan SDA terhubung ke semua perangkat tersebut, hanya ada satu perangkat yang mengontrol SCL yaitu perangkat *master*. Jalur dari SCL dan SDA ini terhubung dengan *pull-up resistor* yang besar resistansinya tidak menjadi masalah (1K, 1.8K, 4.7K, 10K, 47K atau nilai diantara kisaran angka tersebut).



Gambar 3.10 Rangkaian I<sup>2</sup>C

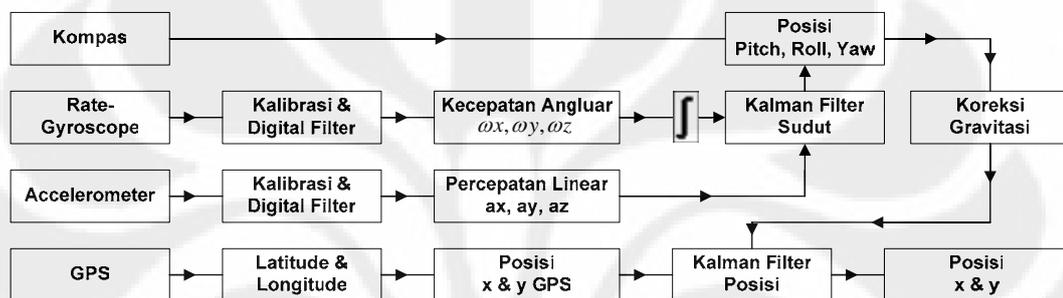
Dengan adanya *pull-up* disini, jalur SCL dan SDA menjadi *open drain*, yang maksudnya adalah perangkat hanya perlu memberikan output 0 (LOW) untuk membuat jalur menjadi LOW, dan dengan membiarkannya *pull-up resistor* sudah membuatnya HIGH. Umumnya dalam I<sup>2</sup>C terdapat satu perangkat yang berperan menjadi *master* sementara satu atau beberapa perangkat lainnya berdungsi sebagai *slave*. Dalam jalur I<sup>2</sup>C, hanya perangkat *master* yang dapat mengontrol jalur SCL yang berarti transfer data harus diinisialisasi terlebih dahulu oleh perangkat *master* melalui serangkaian pulsa *clock*. Tugas perangkat *slave* hanya merespon apa yang diminta *master*. *Slave* dapat memberi data ke *master* dan menerima data dari *master* setelah *server* melakukan inisialisasi. *Master* dapat terhubung dengan banyak *slave*, dan cara membedakan *slave* tersebut adalah dengan menggunakan pengalamatan, dimana setiap perangkat *slave* itu mempunyai alamat yang unik. Dalam perancangan sistem navigasi GPS dan inersia ini, ATmega32 akan berperan sebagai *master*, sedangkan modul IMU VS-IX001 dan modul kompas CMPS03 sebagai *slave*.

Mikrokontroler ATmega16 maupun ATmega32 memiliki jalur komunikasi antarmuka I<sup>2</sup>C yang dapat digunakan melalui Port C. Pin SDA pada divais *slave* akan dihubungkan dengan pin C.0 pada mikrokontroler sebagai divais *master*, sedangkan pin SCL akan dihubungkan dengan pin C.1.

## BAB 4

### PERANCANGAN PERANGKAT LUNAK SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL DENGAN KALMAN FILTER PADA MIKROKONTROLER AVR

Algoritma perangkat lunak yang digunakan dalam skripsi ini, dapat dilihat pada gambar 4.1



Gambar 4.1 Arsitektur algoritma sistem navigasi GPS/INS dan Kompas digital dengan Kalman Filter

Pertama-tama, mikrokontroler slave akan melakukan pengambilan data secara serial untuk data GPS. Data GPS akan diolah pada mikrokontroler slave untuk mendapatkan posisi latitude dan longitude, lalu akan diumpungkan kembali ke mikrokontroler master untuk diolah. Mikrokontroler master akan menerima data GPS berupa latitude dan longitude untuk diolah dengan Kalman Filter bersama dengan data IMU dan kompas digital yang diambil dengan antarmuka I<sup>2</sup>C. Setelah data diterima mikrokontroler master, maka dilakukan algoritma *digital filter* untuk data *accelerometer*, *rate-gyroscope*, dan kompas digital. Penggunaan digital filter ini bertujuan untuk mengeliminasi derau.

Data kecepatan angular akan diintegrasikan, lalu kemudian digabungkan dengan data percepatan *accelerometer* yang akan digunakan dalam menghitung sudut kemiringan secara akurat melalui Kalman Filter. Hasil keluaran Kalman filter berupa sudut kemiringan *pitch* dan *roll*. Adapun *heading* / *yaw* tidak dapat dihitung dari data yang ada, akan tetapi akan dikompensasi dengan data kompas digital yang digunakan. Data-data sudut kemiringan (*pitch* dan *roll*) akan

digunakan untuk menghitung koreksi gravitasi. Koreksi gravitasi menjadi hal yang penting, sebab percepatan linear yang dihitung oleh *accelerometer* dapat turut memperhitungkan gaya gravitasi bumi yang akan mempengaruhi keakurasian penghitungan. Keluaran koreksi gravitasi yang berupa percepatan linear sumbu X dan Y digunakan untuk penghitungan Kalman Filter untuk mendapatkan posisi yang lebih akurat dari perhitungan posisi yang didapat oleh GPS. Untuk dapat lebih memahami rancangan algoritma yang digunakan pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang diajukan skripsi ini, dapat melihat diagram alir yang tersedia pada bagian lampiran.

Pada skripsi ini hanya akan diukur posisi X (*longitude*) dan Y (*latitude*) saja, sebab data *altitude* (posisi Z / ketinggian) dari GPS didapat berdasarkan beda ketinggian dengan permukaan laut, sehingga tidak menggambarkan kondisi nyata pada tahap pengujian alat. Akan tetapi, pengujian akurasi posisi GPS terhadap dua sumbu saja sudah cukup untuk menunjukkan kinerja Kalman Filter yang digunakan.

#### 4.1 Pengambilan Data Kompas Digital

Ada dua cara untuk mendapatkan informasi arah dari modul kompas digital ini yaitu dengan membaca sinyal PWM (Pulse Width Modulation) pada pin 4 atau dengan membaca data melalui antarmuka I<sup>2</sup>C pada pin 2 dan 3.

Pembacaan modul CMPS03 pada rancangan sistem kali ini menggunakan antarmuka I<sup>2</sup>C seperti yang digunakan pada pembacaan modul IMU. Penggunaan komunikasi I<sup>2</sup>C dipilih untuk menghemat penggunaan memory pada saat pemrograman. Agar dapat berkomunikasi dengan I<sup>2</sup>C, hal pertama yang harus dilakukan adalah dengan mengirimkan *start bit* dengan mengakses alamat register 0xC0 yang merupakan alamat register dari CMPS03, dilanjutkan dengan mengakses alamat register selanjutnya.

Register 1 akan memberikan data 0 – 255 untuk sebuah lingkaran penuh. Apabila dibutuhkan resolusi yang lebih tinggi, maka dapat mengakses register 2 dan 3 yang akan memberikan data *integer* sebesar 16 *bit* yang akan memberikan range 0° – 359.9° untuk pembacaan satu lingkaran penuh. Register 4 hingga 11 digunakan sebagai pengujian modul internal. Register 12 dan 13 tidak digunakan,

sementara register 14 tidak didefinisikan. Untuk kepentingan kalibrasi, maka register 15 dapat diakses dengan memberikan nilai 255 untuk memulai proses kalibrasi.

Tabel 4.1 Alamat register pada modul CMPS03 beserta fungsinya

Register	Fungsi
0	Nomor revisi <i>software</i> CMPS03
1	Pembacaan data kompas ( <i>compass bearing</i> ) dalam 1 <i>byte</i> . Nilainya memiliki range 0 – 255 untuk 360°
2, 3	Pembacaan data kompas dalam 1 <i>word</i> . Rangnya 0 – 3599 untuk 360°. Register 2 untuk data 8 <i>bit</i> teratas (1 <i>byte</i> pertama). Dan register 3 untuk 8 <i>bit</i> terendah hingga LSB.
4, 5	Internal test - Beda sinyal sensor 1 sebanyak 16 <i>bit</i> (bertipe <i>signed word</i> )
6, 7	Internal test - Beda sinyal sensor 2 sebanyak 16 <i>bit</i> (bertipe <i>signed word</i> )
8, 9	Internal test - Nilai kalibrasi 1 sebanyak 16 <i>bit</i> (bertipe <i>signed word</i> )
10, 11	Internal test - Nilai kalibrasi 2 sebanyak 16 <i>bit</i> (bertipe <i>signed word</i> )
12	Tidak digunakan
13	Tidak digunakan
14	Tanda untuk selesainya kalibrasi. Nilainya 0 saat mode kalibrasi dan tidak terkalibrasi, selain itu nilainya 255.
15	Perintah kalibrasi – Beri nilai 255 untuk melakukan kalibrasi.

#### 4.2 Pengambilan Data IMU

Pembacaan modul IMU VS-IX001 pada rancangan sistem kali ini menggunakan antarmuka I<sup>2</sup>C seperti yang digunakan pada pembacaan modul Kompas digital. Penggunaan komunikasi I<sup>2</sup>C dipilih untuk menghemat penggunaan memory pada saat pemrograman. Agar dapat berkomunikasi dengan

I<sup>2</sup>C, hal pertama yang harus dilakukan adalah dengan mengirimkan *start bit* dengan mengakses alamat register 0x90 yang merupakan alamat register dari VS-IX001, dilanjutkan dengan mengakses alamat register selanjutnya.

Data keluaran IMU merupakan hasil keluaran ADC ADS 7828E yang mengubah data analog keluaran sensor *accelerometer* dan *rate-gyroscope*. Setiap sensor mempunyai alamat register masing-masing, sehingga saat dibutuhkan, divais *master* akan memanggil alamat register tertentu. Berikut adalah alamat register yang digunakan dalam proses pengambilan data IMU.

- *Accelerometer X*            0x84
- *Accelerometer Y*            0xC4
- *Accelerometer Z*            0x94
- *Rate-gyroscope Roll*        0xA4
- *Rate-gyroscope Pitch*      0xE4

#### 4.3 Pengambilan Data GPS

Format data keluaran GPS ditetapkan oleh NMEA (National Maritime Electronic Association) dan dapat dikoneksikan ke komputer melalui port komunikasi serial dengan menggunakan kabel RS-232 atau ke media perangkat serial seperti mikrokontroler. Format pengiriman data serial yang digunakan sebagai default modul EG-T10 yang digunakan adalah 4800bps, 1 *stop bit*, *no parity*. Data posisi GPS akan terus terua memperbaharui data dengan frekuensi 1 Hz atau satu detik sekali.

Data keluaran dalam format NMEA 0183 berbentuk kalimat (string) yang merupakan rangkaian karakter ASCII 8 bit. Setiap kalimat diawali dengan satu karakter '\$', dua karakter *Talker ID*, tiga karakter *Sentence ID*, dan diikuti oleh *data fields* yang masing – masing dipisahkan oleh koma serta diakhiri oleh optional *checksum* dan karakter *carriage return / line feed* (CR/LF). Jumlah maksimum karakter dihitung dari awal kalimat (\$) sampai dengan akhir kalimat (CR/LF) adalah 82 karakter.

Format dasar data NMEA 0183 : \$*aa*ccc,c---c\**hh*<CR><LF>

Keterangan :

- aa* = *Talker ID*, menandakan jenis atau peralatan navigasi;
- ccc* = *Sentence ID*, menandakan jenis informasi yang terkandung dalam kalimat,
- c---c* = *data fields*, berisi data- data navigasi hasil pengukuran,
- hh* = *optional checksum*, untuk pengecekan kesalahan (error) kalimat
- <CR> = *Carriage Return*
- <LF> = *Line Feed*, menandakan akhir kalimat.

Jenis *Talker ID* yang ada pada spesifikasi NMEA 0183 untuk data keluaran GPS *receiver* adalah GP. Sedangkan untuk jenis *Sentence ID* terdapat tujuh macam data yang dapat ditampilkan yaitu :

1. GGA adalah data tetap GPS.
2. GLL adalah posisi geografis yaitu latitude/longitude.
3. GSA adalah GNSS DOP dan satelit yang aktif.
4. GSV adalah satelit GNSS dalam jangkauan.
5. RMC adalah spesifikasi data minimal GNSS yang direkomendasikan.
6. VTG adalah jalur dan kecepatan.
7. ZDA adalah waktu dan penanggalan.

Protokol data yang digunakan dalam perancangan sistem ini adalah NMEA 0183 dengan menggunakan output RMC (*Recommended Minimum Specific GNSS Data*) sebagai input data GPS yang akan digunakan dalam penghitungan.

\$GPRMC,203033.040,A,0618.6191,S,10648.2966,E,0.00,205.5,071209,01.3,W\*65

Tabel 4.2 Format pesan NMEA 0183 RMC

Isi Pesan	Deskripsi
\$	Awal pesan
GP	<i>Talker-id</i>
RMC	Identitas pesan
203033.040	Waktu penerimaan pesan (UTC)
A	Kualitas pesan (A : valid; V: tidak valid)
0618.6191	<i>Latitude</i> : 6 <sup>0</sup> 18.6191 menit (Ddd.mmmm)
Isi Pesan	Deskripsi
S	<i>Cardinal Latitude</i> (S : selatan; N : utara)
10648.2966	<i>Longitude</i> : 106 <sup>0</sup> 48.2966 menit (Ddd.mmmm)
E	<i>Cardinal Longitude</i> (E : timur; W : barat)
0.00	Kecepatan (knots)
205.5	Arah (heading)
071209	Tanggal penerimaan pesan : 7 Desember 2009
01.3	Deklinasi
W	Arah deklinasi (W: barat; E : timur)
*	Pemisah <i>checksum</i>
7C	<i>Checksum</i>
<CR><LF>	Akhir dari pesan

Sumber : GPS Compendium, telah diolah kembali

Dalam skripsi ini, data yang akan digunakan hanya data Latitude dan Longitude yang berisi data mengenai posisi dalam format sistem koordinat bujur dan lintang. Data lintang dan bujur tersebut dapat diubah menjadi data metric yang kemudian akan digunakan dalam penghitungan. Untuk mendapatkan jarak dalam satuan meter, ada beberapa tahap konversi yang dilakukan. Konversi pertama yang dilakukan adalah dengan mengubah format Ddd.mmmm yang mengantung satuan decimal derajat dan menit menjadi D.dddd yang memiliki

decimal derajat saja (persamaan 4.1 dan 4.2), lalu mengubahnya ke dalam bentuk radian (persamaan 4.3)

Dimana :

$$0.dddd = \frac{dd.mmmm}{60} \quad (4.1)$$

$$D.dddd = D + 0.dddd \quad (4.2)$$

$$rad = \frac{D.dddd}{57.2957795} \quad (4.3)$$

Setelah mendapatkan jarak dalam radian, maka kita dapat mengubahnya menjadi meter melalui persamaan 4.4 hingga 4.6.

Konversi radian ke *Nautical Miles* (NM)

$$NM = rad \times 3437.7387 \quad (4.4)$$

Konversi NM ke MI (mil)

$$mil = NM \times 1.150779 \quad (4.5)$$

Konversi mil ke Meter (m)

$$m = mil \times 1852 \quad (4.6)$$

#### 4.4 Digital Filter

Digital filter yang digunakan dalam skripsi ini adalah *Double Exponential Smoothing* biasa digunakan untuk memprediksi dalam dunia statistik, akan tetapi juga dapat digunakan untuk *filtering* sinyal dan dapat memproses secara cepat dan dapat digunakan sebagai alternatif Kalman Filter untuk prediksi orientasi dinamik<sup>[3]</sup>. Dengan menggunakan metode *double exponential*, data sinyal digital  $x_{(n)}$  dapat diproses untuk mengeliminasi *noise* secara sederhana dengan persamaan 4.7 dan 4.8

$$y_{(n)} = ax_{(n)} + (1-a)y_{(n-1)} \quad (4.7)$$

$$y_{(n)}^{[2]} = ay_{(n)} + (1-a)y_{(n-1)}^{[2]} \quad (4.8)$$

Data keluaran ADC pertama-tama akan difilter dengan menggunakan persamaan 4.7, yang hasil keluarannya akan difilter lagi dengan persamaan 4.8.

Hasil keluaran digital filter adalah  $y_{(n)}^{[2]}$  dimana  $a$  adalah parameter eksponensial yang bernilai diantara nol dan satu ( $0 < a < 1$ ). Penentuan parameter  $a$  ditetapkan melihat kondisi sinyal yang akan disaring. Penentuan parameter  $a$  yang mendekati 1 (satu) cocok untuk sinyal masukan yang memiliki banyak derau, sedangkan parameter  $a$  yang mendekati 0 (nol) menandakan sinyal masukan lebih dipercaya. Pada skripsi ini digunakan parameter  $a$  bernilai 0,2<sup>[4]</sup>.

Pada skripsi ini, Kalman Filter digunakan untuk dua kepentingan berbeda. Pertama, Kalman Filter akan digunakan untuk mendapatkan sudut kemiringan yang lebih akurat dan yang kedua, Kalman Filter juga akan digunakan untuk mendapatkan posisi pada sumbu X dan Y yang akurat. Untuk memudahkan dalam menjelaskan perancangan Kalman Filter yang digunakan, maka akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu Kalman Filter untuk penghitungan sudut dan penghitungan posisi.

#### 4.5 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut Kemiringan

Pada penghitungan sudut kemiringan, Kalman Filter yang digunakan memiliki dua data masukan, yaitu masukan pertama yang dapat diubah ke prediksi keluaran yang diinginkan, data masukan kedua merupakan data yang memiliki tingkat akurasi yang lebih baik. Dalam perancangan ini, maka data masukan pertama merupakan data kecepatan angular *rate-gyroscope* dan data masukan kedua adalah data percepatan linear *accelerometer*.

Pertama-tama perlu menentukan bentuk model data *rate-gyroscope* yang digunakan ke dalam bentuk umum model linear yang digunakan pada Kalman Filter (persamaan 2.4)

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

$\hat{x}_k$  akan dianggap terdiri dari dua *variabel state* berupa data sudut kemiringan dari *rate-gyroscope* setelah dikurangi bias dan variabel state kedua adalah besar biasnya.<sup>[5]</sup> Variabel  $u_k$  menunjukkan masukan, dalam kasus ini adalah data *rate-gyroscope*. Untuk mendapatkan sudut kemiringan dari *rate-gyroscope* setelah dikurangi bias dapat dituliskan seperti persamaan berikut ini:

$$Pitch_{gyro(k)} = Pitch_{gyro(k-1)} + (u_k - bias) \quad (4.9)$$

$$Roll_{gyro(k)} = Roll_{gyro(k-1)} + (u_k - bias) \quad (4.10)$$

*Rate-gyroscope* menghitung kecepatan putar (*deg/s*), maka perlu dikalikan dengan  $dt$  untuk mendapatkan data sudut (*deg*), sehingga kedua persamaan diatas persamaan menjadi:

$$Pitch_{gyro(k)} = Pitch_{gyro(k-1)} + (u_k - bias)dt$$

$$Pitch_{gyro(k)} = Pitch_{gyro(k-1)} - (bias \times dt) + u_k dt \quad (4.11)$$

$$Roll_{gyro(k)} = Roll_{gyro(k-1)} + (u_k - bias)dt$$

$$Roll_{gyro(k)} = Roll_{gyro(k-1)} - (bias \times dt) + u_k dt \quad (4.12)$$

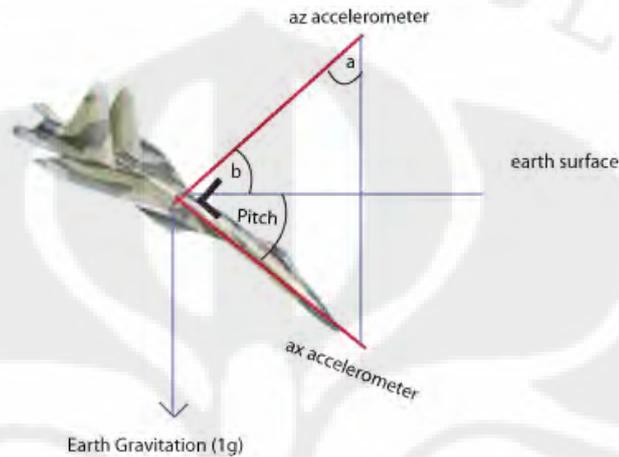
Dengan mengasumsikan bias adalah bernilai konstan maka persamaan umum model linear dari data *rate-gyroscope* adalah:

$$\begin{bmatrix} Pitch_{gyro(k)} \\ bias_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Pitch_{gyro(k-1)} \\ bias_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} Roll_{gyro(k)} \\ bias_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Roll_{gyro(k-1)} \\ bias_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (4.14)$$

Persamaan (4.13) dan (4.14) ini yang digunakan sebagai *predicted state* pada Kalman Filter dan meskipun bias dianggap konstan pada pemodelan, Kalman Filter akan menyesuaikan biasnya pada setiap iterasi dengan membandingkan hasil dengan masukan  $Z_k$  merupakan data kemiringan yang didapatkan dari *accelerometer*.

Berdasarkan gambar 4.2, tampak bahwa sudut pitch dipengaruhi oleh percepatan linear pada sumbu X dan Z sementara sudut roll dipengaruhi oleh percepatan sumbu Y dan Z. Gambar 4.2 dapat menggambarkan pengaruh percepatan pada sumbu X, Y, dan Z pada penghitungan sudut kemiringan.



Gambar 4.2 Ilustrasi mendapatkan sudut dari percepatan *accelerometer*

Berdasarkan gambar 4.2, kita dapat menghitung sudut  $a$  dengan

$$a = \arctan \left( \frac{ax_{accelerometer}}{az_{accelerometer}} \right) \quad (4.15)$$

Sehingga didapatkan :

$$b = 90^0 - a \quad (4.16)$$

$$Pitch_{acc} = 90^0 - b \quad (4.17)$$

Dari persamaan 4.15 hingga 4.17, didapatkan persamaan

$$Pitch_{acc} = \arctan \left( \frac{ax_{accelerometer}}{az_{accelerometer}} \right) \quad (4.18)$$

Sehingga, dengan metode yang sama, sudut roll didapatkan dengan

$$Roll_{acc} = \arctan\left(\frac{ay_{accelerometer}}{az_{accelerometer}}\right) \quad (4.19)$$

Dari persamaan-persamaan diatas, dapat kita tuliskan dalam bentuk persamaan ruang keadaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} Pitch_{gyro(k)} \\ bias_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Pitch_{gyro(k-1)} \\ bias_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (4.20)$$

$$Pitch_{acc(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Pitch_{gyro(k)} \\ bias_{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Roll_{gyro(k)} \\ bias_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Roll_{gyro(k-1)} \\ bias_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (4.21)$$

$$Roll_{acc(k)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Roll_{gyro(k)} \\ bias_{(k)} \end{bmatrix}$$

Nilai sudut hasil Kalman Filter serta besarnya bias pada persamaan 4.20 dan 4.21 akan diestimasi nilainya berdasarkan keluaran sistem.

Adapun matriks lainnya yang harus diinisialisasi adalah matriks P yang menggunakan  $\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$  dan nilai variable Q dipilih  $\begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , sedangkan variable R dipilih berdasarkan hasil percobaan.

#### 4.6 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi

Pada dasarnya, metode penghitngn posisi dengan Kalman Filter tidak jauh berbeda dengan penghitungan sudut, hanya saja tentu terdapat perbedaan pada data masukan dan parameter-parameter yang digunakan. Untuk mengolah data posisi pada skripsi kali ini, digunakan data percepatan linear  $ax$  dan  $ay$  yang didapatkan dari *accelerometer* dan data posisi yang didapatkan dari GPS. Adapun akurasi yang digunakan pada besaran meter (m). Data percepatan linear dari *accelerometer* memiliki tingkat akurasi yang tinggi ( $\frac{cm}{s^2}$ ), akan tetapi memiliki

derau yang sangat besar pula. Data GPS dapat diandalkan dalam jangka waktu yang lama, akan tetapi tidak memiliki akurasi yang baik, yaitu sekitar 3 meter hingga 12 meter pada perangkat penerima GPS komersial.

Pertama-tama perlu menentukan bentuk model data *accelerometer* yang digunakan ke dalam bentuk umum model linear yang digunakan pada Kalman Filter (persamaan 2.4)

$$\hat{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$$

$\hat{x}_k$  akan dianggap terdiri dari dua *variabel state* berupa data kecepatan sebagai hasil integrasi pertama dari data *accelerometer* dan variabel state kedua adalah data posisi yang didapatkan dari integrasi kecepatan (persamaan 2.1 dan 2.2). Variabel  $u_k$  menunjukkan masukan, dalam kasus ini adalah data *accelerometer*.

$$\begin{aligned} X_{(k)} &= X_{(k-1)} + Vx_{(k)}dt \\ Vx_{(k)} &= Vx_{(k-1)} + ax_{(k)}dt \end{aligned} \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} Y_{(k)} &= Y_{(k-1)} + Vy_{(k)}dt \\ Vy_{(k)} &= Vy_{(k-1)} + ay_{(k)}dt \end{aligned} \quad (4.23)$$

Dimana X dan Y adalah posisi, Vxd an Vy adalah kecepatan linear, serta ax dan ay merupakan data percepatan linear dari *accelerometer*. Apabila persamaan (4.22) dan (4.23) diubah menjadi persamaan ruang keadaan, maka akan didapatkan :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_{(k)} \\ Vx_{(k)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{(k-1)} \\ Vx_{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ dt \end{bmatrix} ax_{(k)} \\ X_{GPS(k)} &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} X_{(k)} \\ Vx_{(k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} Y_{(k)} \\ Vy_{(k)} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Y_{(k-1)} \\ Vy_{(k-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ dt \end{bmatrix} ay_{(k)} \\ Y_{GPS(k)} &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} Y_{(k)} \\ Vy_{(k)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Adapun matriks lainnya yang harus diinisialisasi adalah matriks P yang menggunakan  $\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$  dan nilai variable Q ditentukan  $\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ , sedangkan variable R dipilih berdasarkan hasil percobaan.

#### 4.7 Koreksi Gravitasi

Dalam penghitungan posisi, selain menggunakan data GPS digunakan pula data percepatan dari *accelerometer*. Akan tetapi, dalam kondisi nyatanya nanti, *accelerometer* akan turut menghitung gaya gravitasi bumi, tentu saja akan mempengaruhi penghitungan posisi yang tepat. Untuk itulah diperlukan adanya koreksi gravitasi dalam aplikasinya. Koreksi gravitasi dapat dikatakan sebagai penghilang faktor percepatan gravitasi dalam penghitungan percepatan linear oleh *accelerometer*. Adanya faktor penghitungan percepatan gravitasi akan sangat mempengaruhi penghitungan posisi sistem pada saat bergerak lurus beraturan, dimana kecepatan tetap dan percepatan bernilai nol. Koreksi gravitasi tersebut dapat dihitung dengan persamaan :

$$ax_{true} = ax_{accelerometer} - g(\sin(pitch)) \quad (4.26)$$

$$ay_{true} = ay_{accelerometer} + g(\sin(roll)) \quad (4.27)$$

$$az_{true} = az_{accelerometer} + g\sqrt{1 - \sin^2(pitch) - \sin^2(roll)} \quad (4.28)$$

Dengan nilai  $ax_{accelerometer}$  dan  $ay_{accelerometer}$  adalah sama dengan nol dan  $az_{accelerometer}$  bernilai - 1g ketika IMU sejajar dengan permukaan bumi.

Parameter g yang digunakan adalah percepatan gravitasi bumi pada permukaan bumi yang bernilai  $9,8\text{m/s}^2$ . Nilai parameter g ini bernilai konstan untuk setiap kondisi yang terjadi, sesuai dengan standar internasional yang berlaku dan hanya berlaku pada saat ketinggian sistem berada sama dengan ketinggian permukaan air laut. Parameter g yang konstan hanya berlaku bila bumi ini dianggap mempunyai kerapatan bumi yang sama pada seluruh permukaannya.

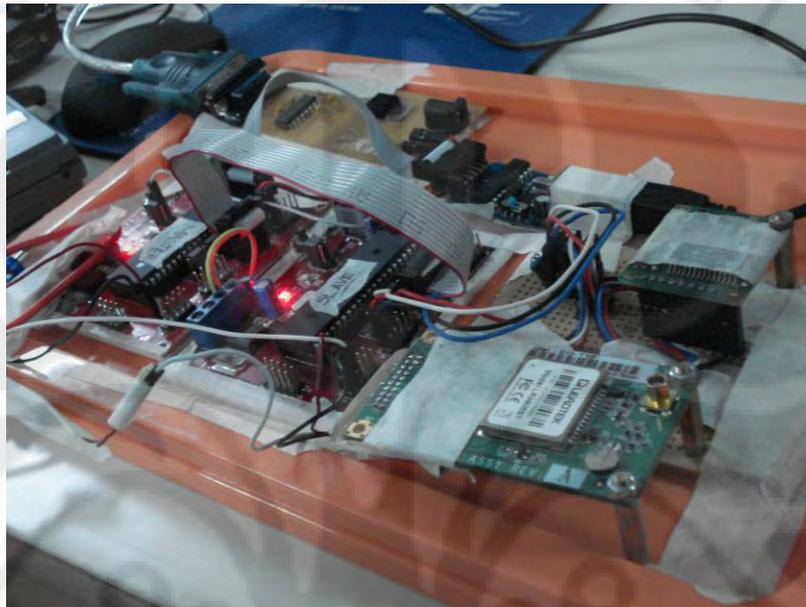
Sebenarnya, nilai percepatan gravitasi tersebut tidaklah sama di seluruh permukaan bumi. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besarnya percepatan gravitasi pada suatu lokasi di bumi.

Letak lintang (latitude) suatu lokasi di permukaan bumi mempengaruhi percepatan gravitasi di titik tersebut. Percepatan gravitasi pada suatu lokasi yang berada pada garis khatulistiwa lebih rendah daripada suatu lokasi yang dekat dengan kutub utara atau selatan bumi. Hal ini disebabkan gaya sentrifugal yang lebih tinggi di daerah khatulistiwa saat bumi berotasi akan mengurangi pengaruh gaya gravitasi bumi, sehingga di daerah tersebut percepatan gravitasinya lebih rendah bila dibandingkan dengan daerah kutub bumi. Faktor kedua yang juga mempengaruhi adalah ketinggian suatu lokasi terhadap permukaan air laut (altitude). Semakin tinggi lokasi tersebut terhadap permukaan air laut, semakin rendah percepatan gravitasi yang dialami. Faktor topografi (misalnya daerah pegunungan atau dataran rendah) dan geografi (kerapatan batuan atau permukaan bumi) juga mempengaruhi percepatan gravitasi pada suatu lokasi di bumi. Lokasi yang memiliki kerapatan batuan yang lebih tinggi akan mengalami percepatan gravitasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi yang memiliki kerapatan batuan yang rendah.

Beberapa faktor tersebut yang mempengaruhi besar percepatan gravitasi yang terjadi pada suatu lokasi tertentu di bumi yang tentunya tidak akan sama satu tempat dengan yang lainnya. Koreksi gravitasi yang diajukan pada skripsi ini akan memberikan parameter  $g$  yang konstan yang mengasumsikan percepatan gravitasi di seluruh lokasi di bumi adalah sama. Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat lagi, percepatan gravitasi pada suatu lokasi dapat dimodelkan dan dilakukan penghitungan yang akan memberikan data percepatan gravitasi yang sesuai dengan lokasi tersebut. Akan tetapi, pada perancangan sistem navigasi GPS/INS dan Kompas digital yang diajukan pada skripsi kali ini tidak membahas hal tersebut lebih lanjut.

## BAB 5

### ANALISA DATA KELUARAN SENSOR IMU, GPS, DAN KOMPAS DIGITAL

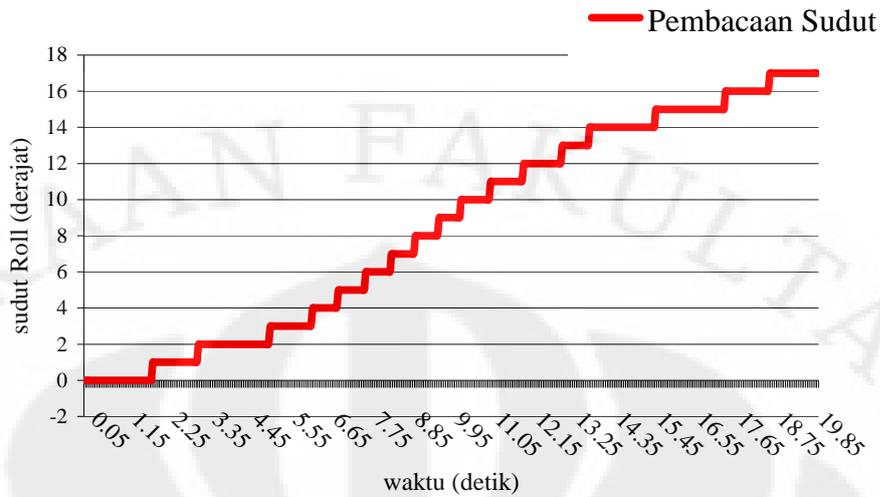


Gambar 5.1 Rancang bangun sistem navigasi GPS/INS dan Kompas digital

#### 5.1 Analisa Data *Rate-Gyroscope*

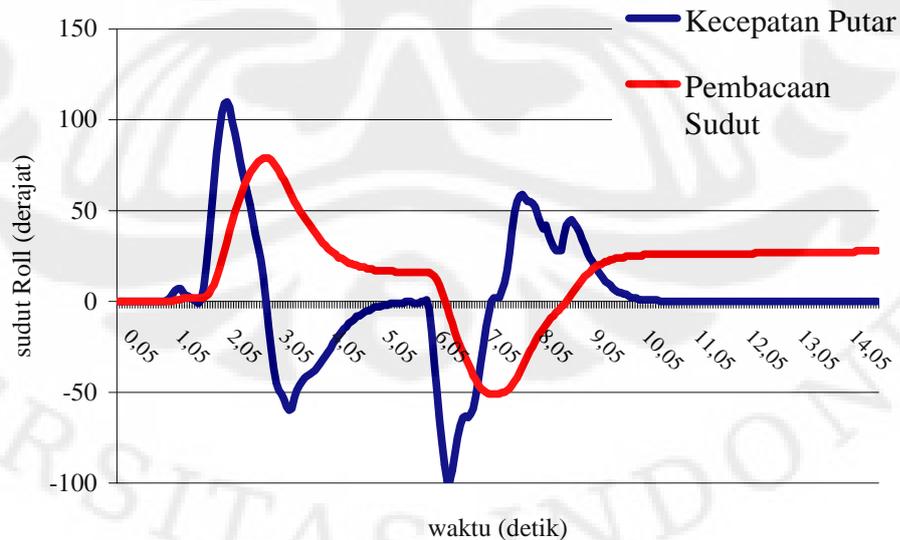
*Rate-Gyroscope* merupakan salah satu bagian dari sensor IMU yang memberikan data kecepatan putar sudut yang dialami sistem. *Rate-gyroscope* memiliki keunggulan dengan kemampuannya membaca pergerakan sudut kemiringan sistem dengan sensitivitas yang tinggi dan akurat, akan tetapi rentan terhadap derau dan akumulasi kesalahan.

Salah satu akibat dari akumulasi kesalahan adalah *drift* atau pergeseran pembacaan sudut. *Drift* dapat terjadi akibat derau pada data pembacaan kecepatan putar ikut dihitung dalam proses integrasi untuk mendapatkan sudut kemiringan. Akumulasi kesalahan terjadi karena kesalahan pembacaan sudut sebelumnya akan menjadi salah satu bagian dari penghitungan pembacaan sudut berikutnya, sehingga makin lama, kesalahan pembacaan sudut akan semakin tinggi dan terjadi *drift*.



Gambar 5.2 Drift pada Pembacaan Sudut Roll oleh Rate-Gyroscope

Tampak dari gambar 5.2, terjadi pergeseran pembacaan (*drift*) sudut *Roll* sejauh  $17^\circ$  selama 20 detik yang nilainya cukup besar apabila dibandingkan dengan kondisi sebenarnya pada saat pengukuran dilakukan saat sudut *roll* bernilai nol dan *rate-gyroscope* diletakkan pada bidang datar yang statis. Pembacaan sudut berdasarkan data kecepatan putar yang diberikan *rate-gyroscope* dapat dilihat pada gambar 5.3 berikut ini.



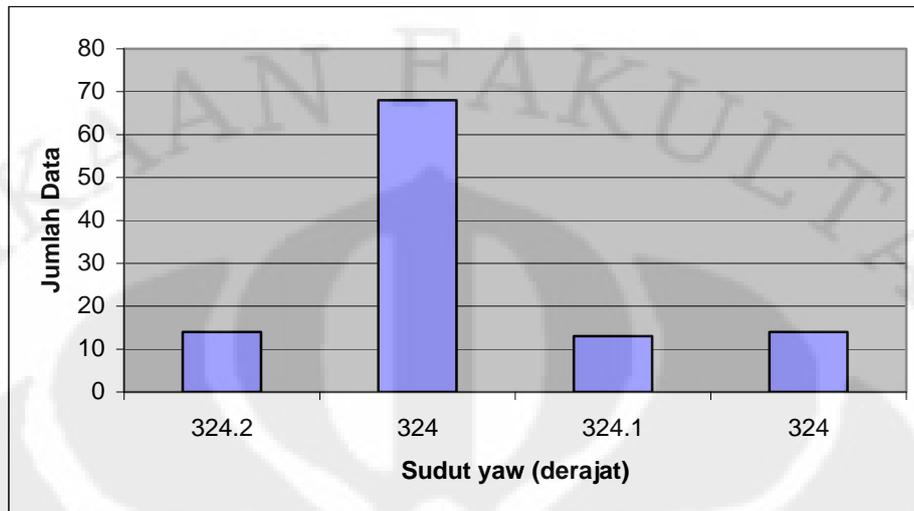
Gambar 5.3 Pembacaan sudut *roll* oleh *rate-gyroscope*

Pada saat dilakukan ujicoba penghitungan sudut berdasarkan data kecepatan putar *rate-gyroscope* untuk mengukur sudut *roll* sebesar  $0^\circ$  lalu  $40^\circ$  searah jarum jam dan kemudian kembali ke  $0^\circ$  pada gambar 4.9, dapat dilihat bahwa pengukuran sudut oleh *rate-gyroscope* tidak akurat, namun dapat memberikan pembacaan perubahan kecepatan putar yang baik. Tampak pada saat sudut dibuat statis pada  $40^\circ$  hasil pembacaan sudut bernilai sekitar  $16^\circ$  dan pada saat kembali ke  $0^\circ$ , pembacaan sudut tidak kembali ke  $0^\circ$  sebagaimana mestinya dan memberikan hasil pengukuran sekitar  $26^\circ$ . Dari hasil analisa, kemungkinan hal ini terjadi akibat adanya kecepatan putar yang terdeteksi oleh *rate-gyroscope* yang nilainya berlawanan dengan nilai kecepatan putar sebelumnya.

Pada gambar 5.3, tampak pada detik 1 hingga detik 2 tercatat adanya perubahan kecepatan putar yang bernilai positif, hal ini sesuai dengan kenyataan yang terjadi yaitu perubahan sudut *roll* dari  $0^\circ$  menuju  $40^\circ$ , akan tetapi setelah detik kedua, tercatat kecepatan putar negatif padahal IMU ada pada posisi statis di sudut *roll* =  $40^\circ$ . Pembacaan kecepatan putar yang berlawanan arah itu menyebabkan hasil pembacaan sudut oleh *rate-gyroscope* berubah menjadi sekitar  $16^\circ$  dan begitupula yang terjadi saat perubahan posisi IMU dari  $40^\circ$  menuju  $0^\circ$ .

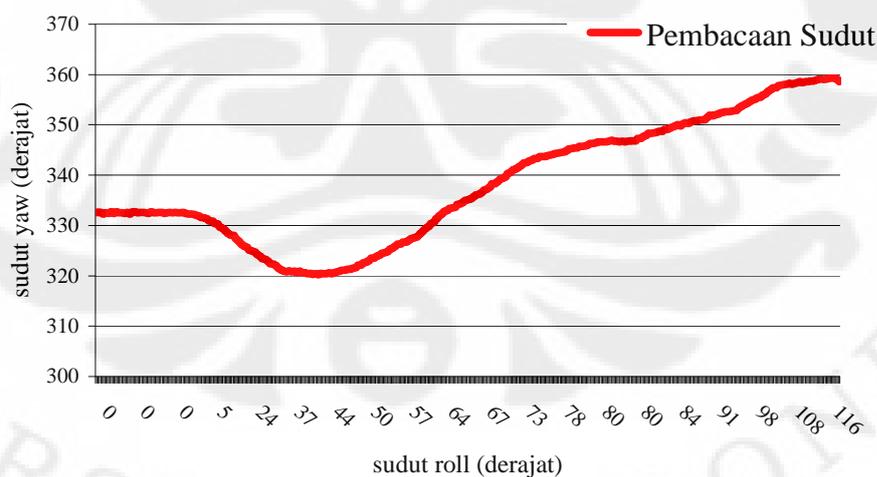
## 5.2 Analisa Data Kompas Digital

Pada perancangan sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital ini, modul IMU VS-IX001 tidak dilengkapi dengan *rate-gyroscope* pada sumbu Z, dengan begitu kita tidak mendapatkan referensi arah *heading* atau *yaw* berdasarkan pengukuran sensor secara langsung. Sebagai pengganti, modul kompas digital CMPS03 digunakan sebagai referensi arah *yaw*. Pada pengolahan data kompas digital (gambar 4.1) sistem navigasi GPS/INS tidak mempergunakan digital filter untuk mengolah data yang diberikan. Hal ini disebabkan oleh derau yang dialami saat pengukuran sudut *yaw* sangat kecil, seperti dapat digambarkan pada gambar 5.4. Dari gambar tersebut tampak tingkat kepresisian hingga  $0,1^\circ$  dan rata-rata deviasi  $1.371195^\circ$ , pembacaan kompas digital sudah cukup baik dan akurat untuk membantu sistem navigasi GPS/INS meskipun tidak dibantu oleh filter digital *Double Smoothing Exponential* seperti yang digunakan pada pengolahan data dari IMU.



Gambar 5.4 Pembacaan sudut yaw oleh kompas digital

Akan tetapi, perlu diperhatikan adalah kompas digital akan memberikan pembacaan yang akurat pada saat posisinya sejajar dengan permukaan bumi. Apabila posisi kompas digital tidak sejajar dengan permukaan bumi, atau dengan kata lain sudut *roll* atau *pitch* tidak sama dengan  $0^\circ$ , maka hasil pembacaan kompas akan berubah.



Gambar 5.5 Pembacaan sudut yaw terhadap sudut roll

Seperti yang dapat kita lihat pada gambar 5.5, saat sudut roll bernilai  $0^\circ$  hasil pembacaan kompas digital (sudut yaw) akurat. Namun ketika diberikan

putaran pada sumbu X yang menyebabkan sudut *roll* tidak lagi  $0^\circ$  terlihat adanya perubahan pembacaan sudut *yaw* oleh kompas yang akan turun hingga sudut *yaw* bernilai  $40^\circ$  dan akan terus bertambah nilainya saat sudut *roll* diperbesar lagi. Kesalahan pembacaan sudut oleh kompas digital saat posisinya tidak sejajar dengan permukaan bumi disebabkan oleh cara kerja kompas digital itu sendiri. Seperti yang telah dijelaskan pada bab 2, kompas digital mempergunakan sensor Hall yang akan memberikan data mengenai medan magnet yang memotong sensor dan akan merepresentasikan arah Utara dan Selatan di bumi. Pada saat posisi kompas digital sejajar dengan permukaan bumi, pembacaan sensor Hall akan akurat, sebab medan magnet bumi akan memotong sensor secara tegak lurus. Berbeda dengan kondisi saat sudut *roll* atau *pitch* tidak sama dengan  $0^\circ$ , menyebabkan posisi sensor juga berubah dan menyebabkan medan magnet tidak lagi tegak lurus memotong sensor, yang menyebabkan pembacaan sensor Hall juga menjadi tidak akurat lagi.

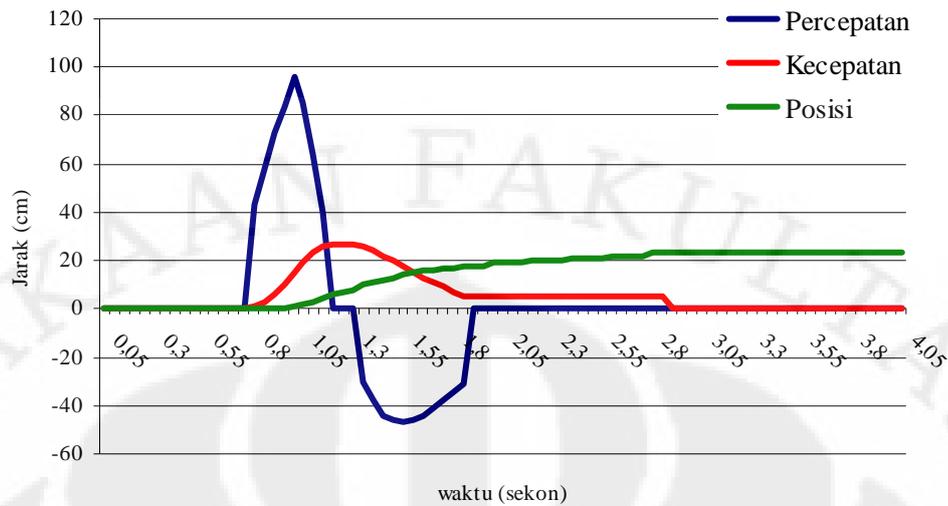
Untuk aplikasi pada sistem navigasi 2 dimensi, hal ini tentu tidak akan terlalu merepotkan sebab pada navigasi 2 dimensi, pergerakan *roll* dan *pitch* tidak terlalu besar. Berbeda dengan aplikasinya untuk navigasi 3 dimensi, dimana sudut *roll* dan *pitch* dapat bergerak dengan bebas, diperlukan pendekatan lain untuk mendapatkan posisi *heading* atau sudut *yaw* yang akurat untuk segala kondisi.

### 5.3 Analisa Data Accelerometer

*Accelerometer* pada sensor IMU yang digunakan akan memberikan data percepatan linear yang dialami oleh sistem. Data percepatan ini yang kemudian akan diolah menjadi data posisi. Data posisi tersebut didapatkan dari hasil integrasi sebanyak 2 kali dari percepatan, sesuai dengan persamaan 2.1 dan 2.2.

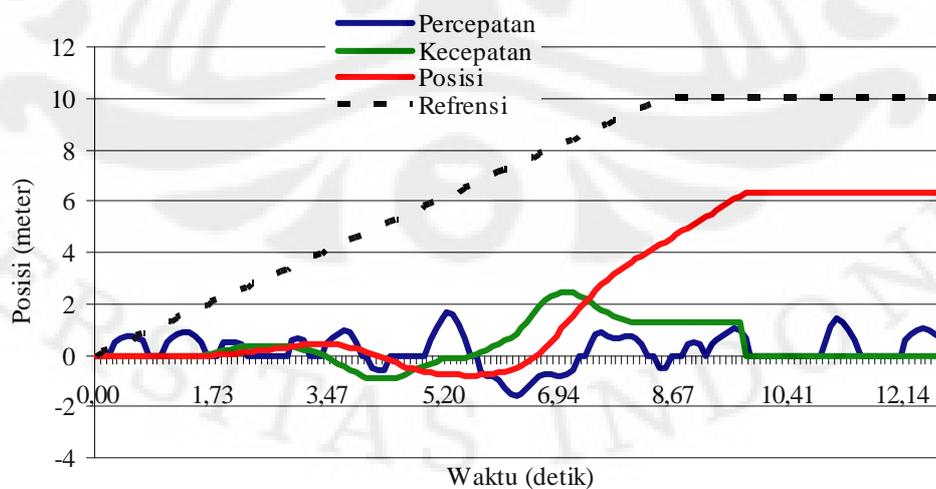
Sama halnya dengan *rate-gyroscope*, data keluaran *accelerometer* juga rentan terhadap derau dan akumulasi kesalahan penghitungan. Penggunaan digital filter dapat membantu mengeliminasi derau untuk mencegahnya ikut masuk ke dalam proses penghitungan.

Berikut adalah pembacaan data posisi dari percepatan *accelerometer*.



Gambar 5.6 Pembacaan data posisi dari *accelerometer*

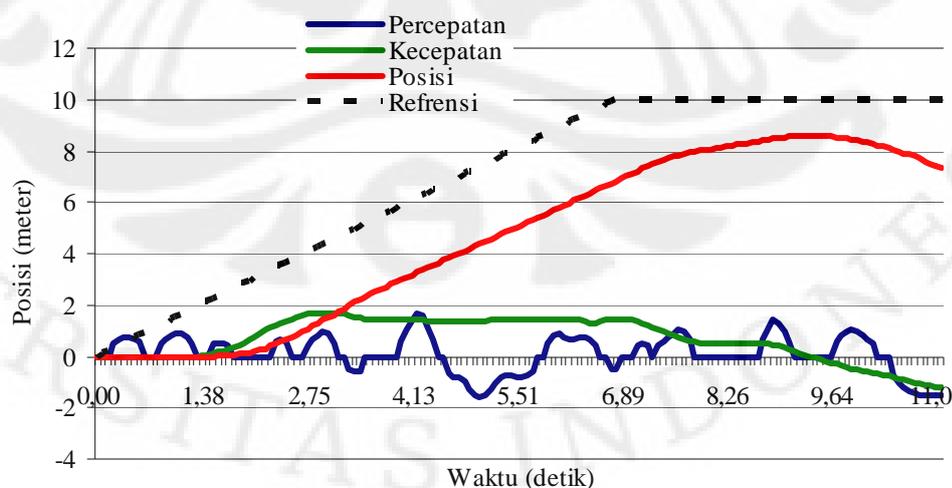
Gambar 5.6 menggambarkan data posisi yang didapatkan dari hasil pengolahan data *accelerometer*. IMU digerakkan dari posisi diam ke posisi 25cm kearah sumbu Y positif. Tampak dari gambar, pada saat dimulai pergerakan, tercatat ada percepatan Y positif yang menandai IMU mengalami gerak lurus berubah beraturan. Pada saat mencapai titik yang ditentukan, percepatan yang tercatat menunjukkan percepatan Y negatif, menandakan perlambatan IMU yang tadinya bergerak lalu kemudian berhenti. Data posisi yang didapatkan mendekati nilai sebenarnya, yaitu tercatat 27 cm. Tetapi dari serangkaian percobaan, pembacaan posisi berdasarkan data *accelerometer* ternyata kurang handal.



Gambar 5.7 Pembacaan data posisi dari *accelerometer*

Gambar 5.7 merupakan salah satu hasil pengambilan data yang dilakukan dengan menggerakkan sistem sejauh 10 meter ke arah sumbu Y positif. Tampak bahwa hasil pembacaan posisi oleh *accelerometer* kurang akurat, masih terdapat kesalahan sekitar 4 meter. Kurang akuratnya *accelerometer* dalam memberikan hasil pembacaan posisi berbanding terbalik dengan kemampuannya memberikan pembacaan sudut yang baik. Hasil penghitungan posisi berdasarkan data *accelerometer* didapat rata-rata pengukuran sumbu X sebesar 5.21 meter dan sumbu Y sebesar 6.14 meter untuk pergerakan 10 meter. Hal ini mungkin dikarenakan karakteristik IMU yang digunakan handal untuk memberikan data sudut, namun tidak untuk data posisi. Kemungkinan lain juga dapat disebabkan karena *accelerometer* tidak dapat membaca pergerakan dengan percepatan yang rendah. Percepatan yang rendah membutuhkan kecepatan sampling yang lebih tinggi dari *accelerometer* agar dapat membaca data pergerakan dengan lebih baik lagi. Respons sistem sebesar 160ms tampaknya menjadi salah satu penyebabnya.

Jalan keluar yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan kurang handalnya pembacaan posisi oleh *accelerometer* dapat diatasi dengan melakukan proses penalaan. Proses penalaan telah dicoba dilakukan dengan metode *trial and error* untuk menentukan *gain* percepatan yang digunakan untuk penghitungan posisi. Proses *trial and error* tersebut memberikan hasil nilai *gain* sebesar 1,5 yang dirasakan dapat membantu mengatasi permasalahan pembacaan data posisi oleh *accelerometer*.



Gambar 5.8 Pembacaan data posisi dari *accelerometer* setelah hasil penalaan

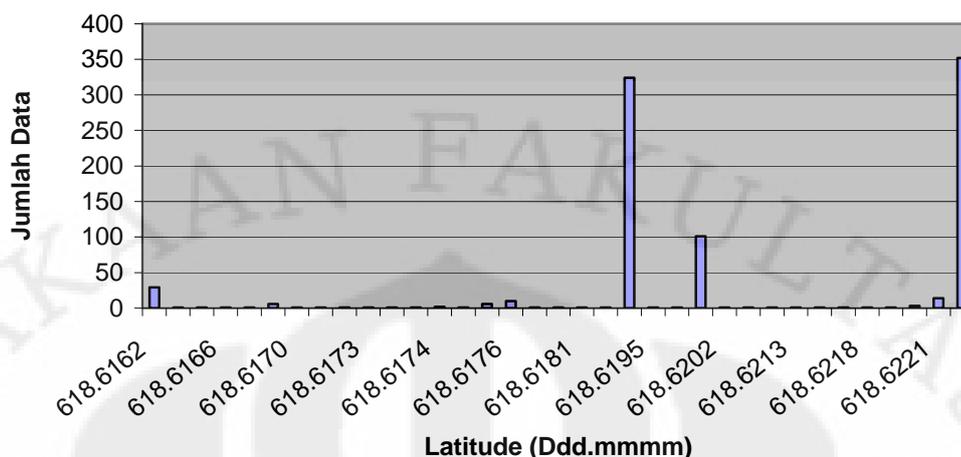
Rata-rata penghitungan pergerakan sejauh 10 meter didapatkan 7.68 meter untuk sumbu X dan 8.04 meter untuk sumbu Y. Terlihat terdapat perbaikan penghitungan posisi, namun parameter *gain* yang telah diterapkan hanya dapat berlaku untuk kondisi pada saat proses penalaan dilakukan. Apabila parameter penalaan tersebut dilakukan pada kondisi yang berbeda, misalkan percepatan yang berbeda, maka hasil penalaan tersebut tidak lagi sesuai.

#### 5.4 Analisa Data GPS

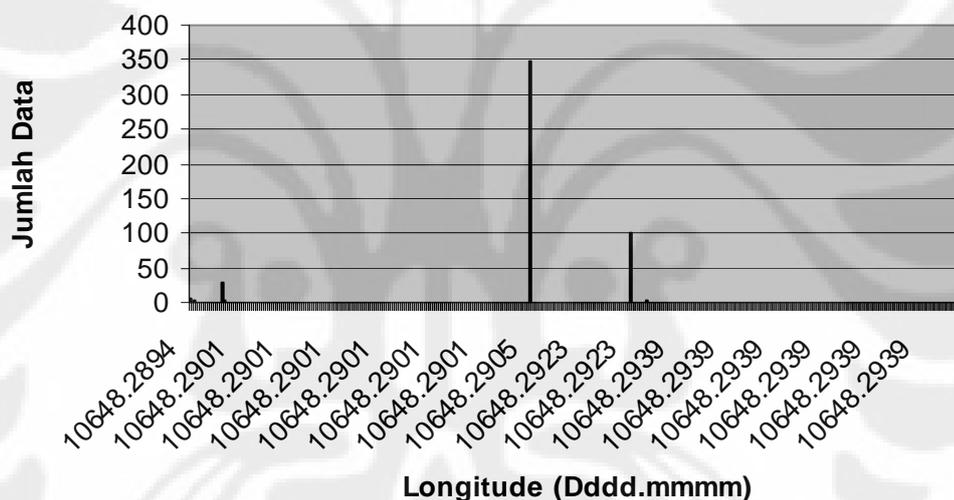
Pengambilan data GPS dilakukan dengan menggunakan modul GPS EG-T10 dengan *chipset* buatan Leadtek. Penggunaan data GPS memungkinkan sistem navigasi dapat memetakan posisi suatu objek tertentu pada bidang global (bidang bumi), tidak seperti navigasi INS yang akan memetakan posisi terhadap bidang lokal tanpa bantuan matriks transformasi yang akan mentransformasi gerak rotasi dan translasi yang dialami oleh suatu objek tersebut.

GPS mempunyai beberapa kelemahan, yaitu kurangnya tingkat presisi dalam penghitungan posisi dan membutuhkan penerimaan sinyal yang baik dari setidaknya tiga satelit untuk bekerja optimal. Akan tetapi, kemampuannya untuk memberikan data posisi yang cukup baik, maksudnya memberikan referensi posisi yang cukup stabil pada jangka waktu yang cukup lama. Untuk dapat menguji data GPS, maka pengambilan data dilakukan untuk melihat kemampuan GPS dalam memetakan pergerakan suatu objek yang memiliki penerima GPS pada saat objek tersebut diam dan dalam pergerakan.

Gambar 4.3 dan 4.4 menggambarkan pembacaan data modul GPS EG-T10 untuk objek yang diam pada posisi 618.6191 S, 10648.2925 E, yang diambil pada jeda waktu 15 menit, di halaman rumah dengan kondisi langit bebas dari awan dan terdapat pohon di dekatnya.

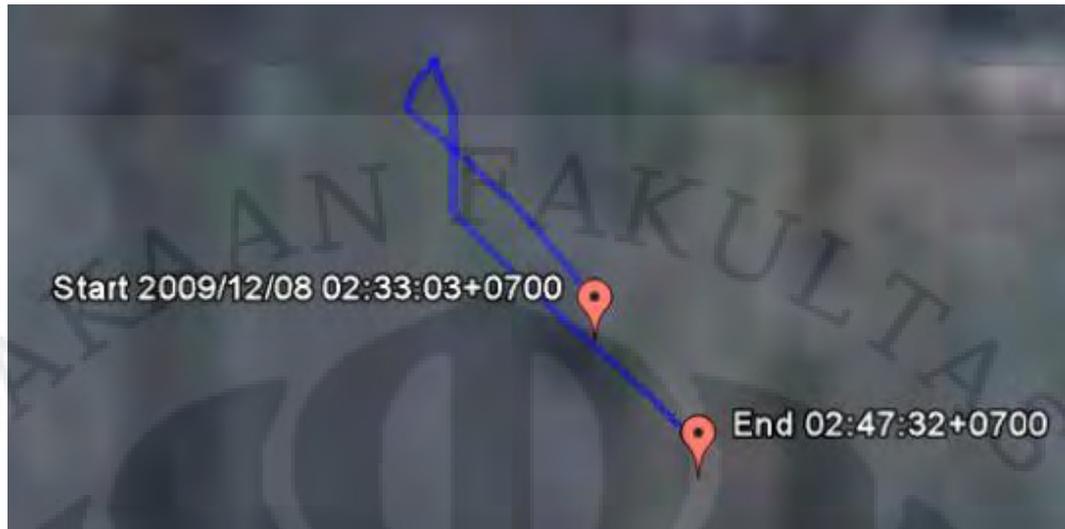


Gambar 5.9 Pembacaan data Latitude GPS

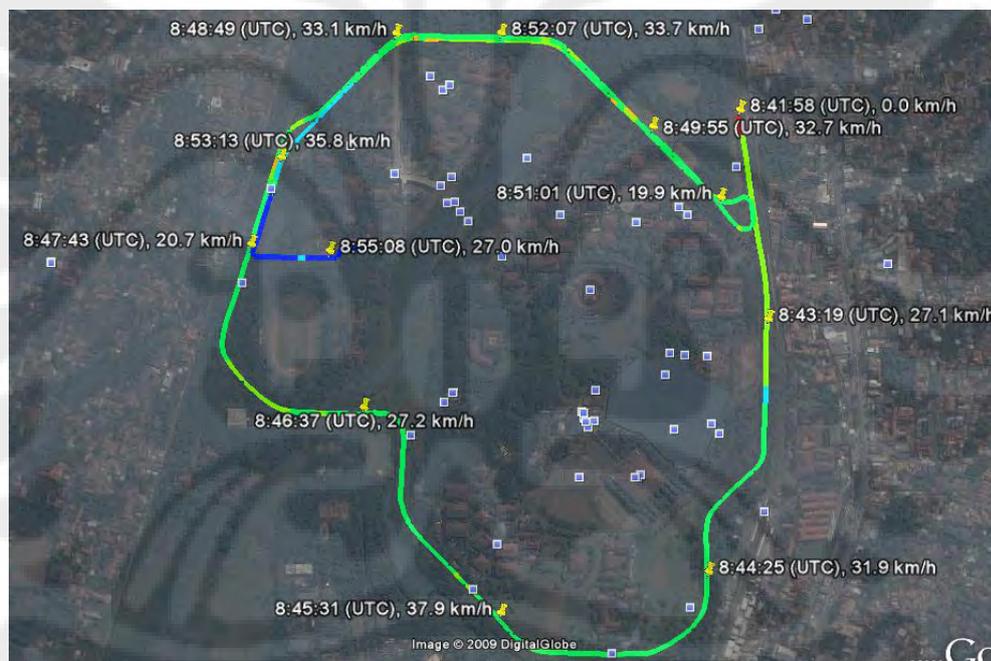


Gambar 5.10 Pembacaan data Longitude GPS

Berdasarkan gambar 5.9 dan 5.10, tampak bahwa pada saat objek dalam keadaan diam, pembacaan data posisi GPS baik posisi latitude maupun longitude mengalami pergerakan. Hal ini dapat disebabkan oleh pergerakan satelit GPS yang memberikan sinyal pewaktuan atomik dan juga dapat disebabkan pantulan sinyal GPS yang mengenai dinding bangunan dan memberikan data bayangan, atau yang disebut sebagai *multipath* yang telah dijelaskan dan digambarkan pada gambar 2.3. Untuk dapat lebih menggambarkan keakurasian pembacaan GPS pada objek diam, gambar 5.11 dan 5.12 akan memberikan pemetaan koordinat hasil pembacaan GPS dengan bantuan perangkat lunak Google Earth.



Gambar 5.11 Pemetaan pembacaan posisi GPS pada objek diam



Gambar 5.12 Pemetaan pembacaan posisi GPS pada objek bergerak

Sedangkan untuk data bergerak, modul GPS EG-T10 akan dibawa berputar kampus UI dengan menggunakan mobil dengan menempelkan antenna aktif di bagian tengah atap mobil dan mengendarai mobil dengan kecepatan yang konstan dan melewati berbagai lingkungan, seperti lingkungan yang bebas dari gangguan (dekat lapangan) atau lingkungan yang memiliki banyak penghalang

(dibawah pohon yang rindang). Hasil pemetaan tersebut digambarkan pada gambar 5.12.

Nampak bahwa pembacaan GPS mampu memberikan posisi yang cukup dapat menggambarkan pergerakan dengan baik, meskipun tidak dapat dihitung sejauh mana keakuratan hasil pemetaan tersebut. Dari gambar 4.6 dan 4.7, dapat ditarik kesimpulan bahwa modul GPS EG-T10 dapat dengan cukup baik memberikan data posisi baik untuk kondisi objek bergerak maupun diam, dengan rata-rata kesalahan 3.49 meter yang diukur ketika pembacaan posisi objek statis.

## BAB 6

### DESAIN, ANALISA, DAN UJI COBA KALMAN FILTER PADA SISTEM NAVIGASI GPS/INS DAN KOMPAS DIGITAL

#### 6.1 Desain Kalman Filter pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital

Salah satu tujuan dari rancang bangun sistem ini adalah untuk memberikan posisi dari suatu objek dengan menggabungkan keakuratan IMU namun memiliki derau dan bias yang tinggi dengan data posisi GPS yang ada kurang akurat namun dapat diandalkan dalam jangka waktu yang lama. Penggabungan kedua sumber masukan tersebut akan menggunakan algoritma Kalman Filter yang diprogram pada sistem ATmega32.

Dalam merancang Kalman Filter, terdapat beberapa parameter yang harus didefinisikan nilainya terlebih dahulu. Parameter-parameter tersebut adalah matriks  $Q$  yang merupakan variansi derau sistem, yang pada persamaan kalman filter dapat diketraahui dari variansi masukan, matriks  $R$  yang merupakan variansi derau keluaran sistem yang dapat dicari pada saat *tunning* Kalman Filter, matriks  $P$  yang merupakan matriks inisialisasi kovarian sistem,  $\Delta t$  yang merupakan waktu cuplik sistem.

##### 6.1.1 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut

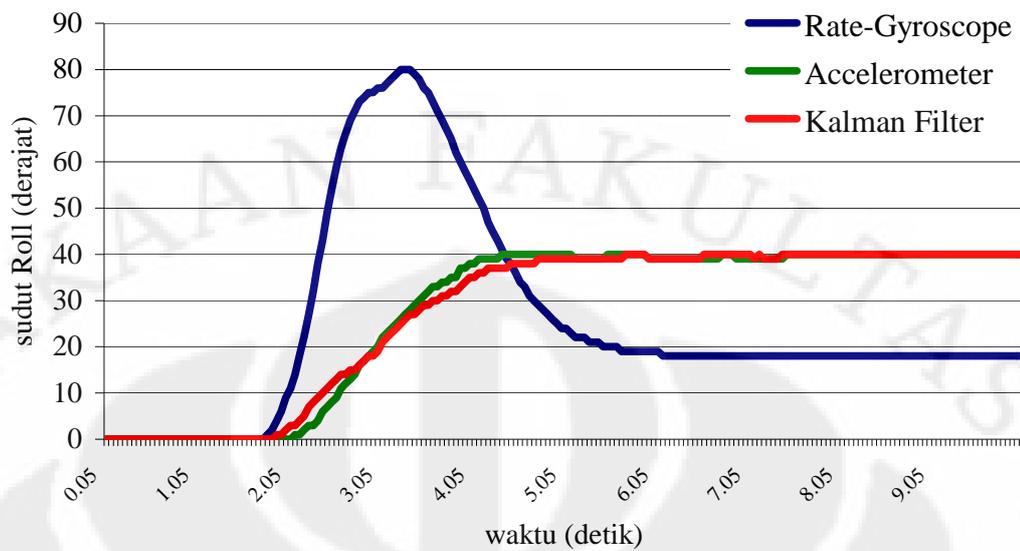
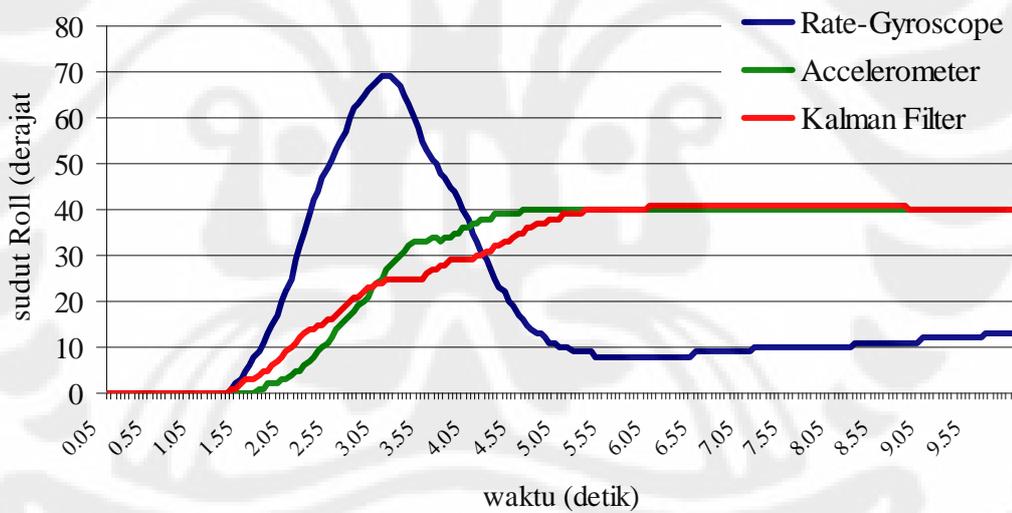
Pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas Digital, penghitungan sudut akan memberikan representasi sudut *Euler* berupa *pitch*, *roll*, dan *yaw*. Kalman Filter yang digunakan untuk penghitungan sudut akan mendapatkan masukan berupa hasil pembacaan sudut oleh *rate-groscope* dan *accelerometer*. Kalman Filter akan memberikan estimasi hasil penghitungan sudut berdasarkan kedua masukan tersebut untuk memberikan hasil yang mendekati kondisi nyata dan berusaha mengeliminasi derau yang rentan muncul saat pengolahan data untuk mendapatkan hasil penghitungan yang akurat. Pada saat perancangan Kalman Filter, ada beberapa parameter yang harus didefinisikan terlebih dahulu. Dalam pembahasan ini, hanya dilakukan pembahasan pada perancangan Kalman Filter

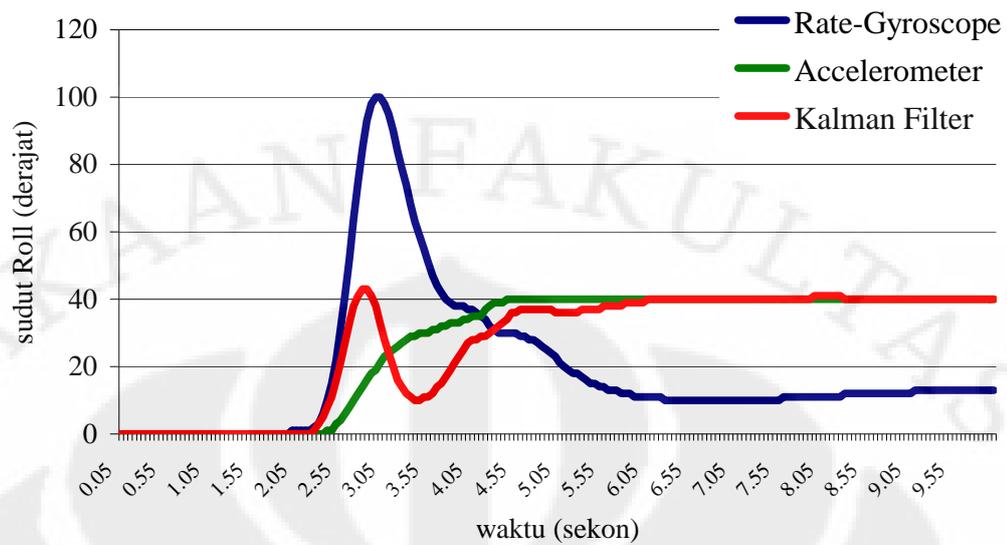
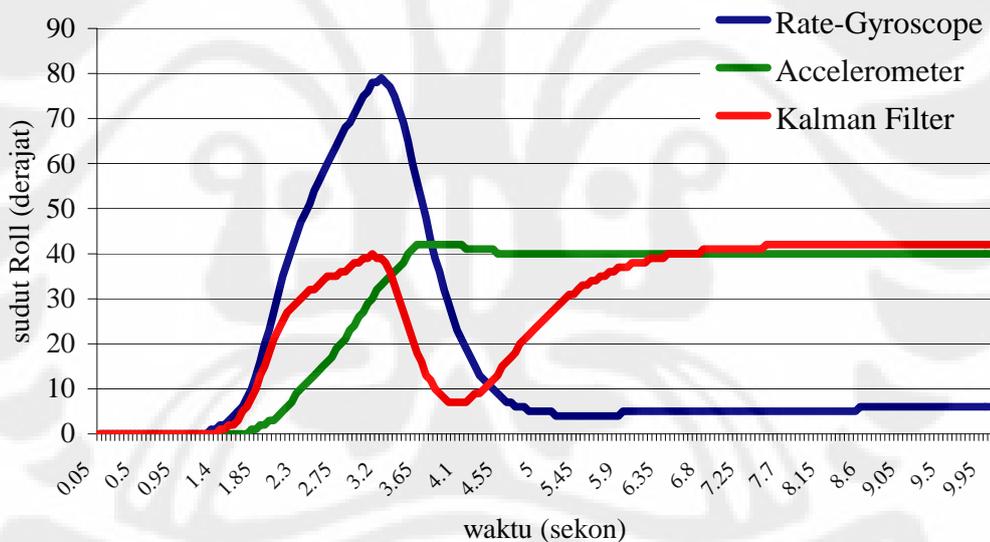
yang dilakukan untuk mengolah data sudut *Roll*, disebabkan karena penghitungan sudut *Pitch* memiliki karakteristik yang sama dan akan menggunakan parameter yang sama juga.

Pada penghitungan sudut, parameter Q bernilai  $\begin{bmatrix} 0.4 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ . Parameter Q merupakan matriks *process noise covariance* yang bisa didapat dari penghitungan standar deviasi masukan dari *rate-gyroscope* yang akan menjadi masukan *Uk*. Terlihat bahwa masukan *rate-gyroscope* memiliki standar deviasi yang cukup rendah, namun tidak presisi untuk jangka waktu yang lama dalam penghitungan sudut disebabkan adanya *drift* yang terjadi.

Selain parameter matriks Q, terdapat beberapa parameter lain pada Kalman Filter yang harus diberikan nilai inisialisasi. Parameter tersebut adalah matriks R yang merupakan *measurement noise covariance* yang merupakan derau saat penghitungan dengan Kalman Filter dan matriks P yang akan berpengaruh pada respons sistem. Penentuan parameter matriks R juga dilakukan dengan serangkaian ujicoba untuk mendapatkan respons Kalman Filter yang sesuai dengan keinginan kita.

Dengan melakukan serangkaian ujicoba, kita dapat menemukan respons Kalman Filter yang sesuai dengan karakteristik sistem yang telah kita buat. Berikut adalah gambaran perubahan matriks R terhadap respons yang diberikan Kalman Filter pada saat pengukuran sudut *roll* yang diatur dari  $0^\circ$  kemudian diubah ke  $40^\circ$  dan dibiarkan statis. Parameter matriks R diubah nilainya untuk memperlihatkan pengaruh besarnya nilai *measurement noise covarian* terhadap respons Kalman Filter dalam mengolah data masukan *rate-gyroscope* dan *accelerometer*.

Gambar 6.1 Pembacaan sudut roll dengan  $R = 1$ Gambar 6.2 Pembacaan sudut roll dengan  $R = 5$

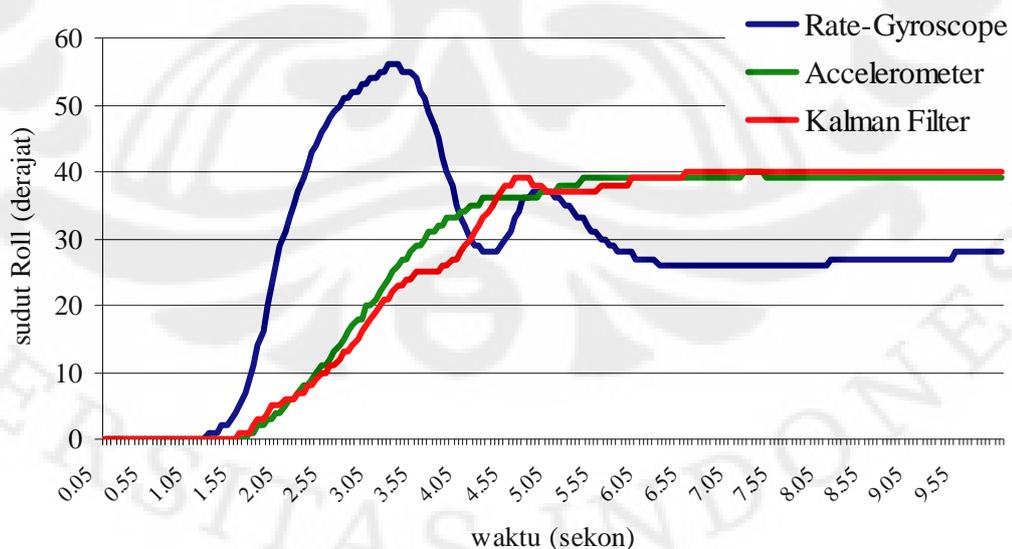
Gambar 6.3 Pembacaan sudut roll dengan  $R = 10$ Gambar 6.4 Pembacaan sudut roll dengan  $R = 100$ 

Dari gambar 6.1 hingga 6.4, tampak bahwa inisialisasi matriks  $R$  yang berbeda akan mengakibatkan respons Kalman Filter berubah pula. Pada gambar 6.1, inisialisasi  $R = 1$  mengakibatkan hasil keluaran Kalman Filter akan sangat mendekati dengan masukan dari *accelerometer*, bahkan tampak pada grafik respons Kalman hanya sedikit sekali mendapatkan pengaruh dari masukan dari *rate-gyroscope*. Bila dibandingkan dengan gambar 6.4 dimana  $R$  diberi nilai 100,

akan tampak respons Kalman Filter akan dipengaruhi oleh masukan dari *accelerometer* dan *rate-gyroscope*, bahkan dapat dikatakan respons Kalman Filter hampir menyerupai masukan *rate-gyroscope*, hanya saja nilainya tidak sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa inialisasi matriks R akan berpengaruh pada respons Kalman Filter, semakin kecil nilai R (gambar 6.1), Kalman Filter akan lebih percaya pada masukan  $Z_k$ , atau dalam hal ini *accelerometer*. Sedangkan semakin besar nilai matriks R (gambar 6.4) maka Kalman filter akan lebih mempercayai masukan  $U_k$ .

Pada desain Kalman Filter untuk penghitungan sudut akan dipilih nilai matriks  $R = 5$  (gambar 6.2) dengan alasan respons Kalman Filter mendekati masukan *accelerometer* namun juga masih mendapatkan pengaruh dari *rate-gyroscope* sebagai acuan utama penghitungan sudut. Adapun alasan pemilihan data *accelerometer* yang menjadi acuan, disebabkan data penghitungan sudut oleh *rate-gyroscope* kurang dapat diandalkan untuk jangka waktu yang lama (kondisi statis) dan juga ditemukan pula efek *drift* pada pembacaan sudut oleh *rate-gyroscope* seperti yang tampak pada gambar 5.2.

Untuk penentuan nilai matriks P dan pengaruhnya, dapat dilihat dari gambar 6.5 berikut.



Gambar 6.5 Pembacaan sudut roll dengan  $R = 5$  dan  $P = 10000$

Untuk dapat melihat pengaruh perubahan nilai matriks P terhadap respons Kalman Filter, maka kita dapat membandingkan gambar 6.2 yang menggambarkan inialisasi nilai matriks  $R = 5$  dan  $P = 1$  dengan gambar 6.5. Bila dibandingkan, akan tampak bahwa semakin besar nilai inialisasi matriks P yang digunakan, respons Kalman Filter lebih cepat. Akan tetapi, makin cepat respons Kalman Filter, akan berdampak pada kestabilan sistem itu sendiri.<sup>[3]</sup> Sehingga pada desain Kalman Filter untuk penghitungan sudut kali ini, menggunakan

nilai inialisasi matriks P sebesar  $\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$

Rangkaian uji coba penentuan parameter R diringkas dalam sebuah tabel, akan dapat dilihat pengaruh perubahan parameter R untuk mendapatkan nilai R yang memberikan hasil keluaran Kalman Filter secara maksimal

Tabel 6.1 Pengaruh parameter R pada keluaran Kalman Filter untuk penghitungan sudut

Parameter R	Hasil keluaran Kalman Filter yang didapat
1 (gambar 6.1)	Hasil keluaran Kalman Filter terlalu mempercayai masukan <i>accelerometer</i> . Parameter R perlu dinaikkan.
10 (gambar 6.2)	Kalman Filter telah mampu memperhitungkan masukan <i>gyroscope</i> dan <i>accelerometer</i> , hanya saja keluaran Kalman Filter memberikan estimasi yang kurang akurat sebelum mencapai nilai stabil. Parameter R = 10 dinilai terlalu besar.
100 (gambar 6.3)	Uji coba ini akan melihat pengaruh R terhadap keluaran Kalman Filter. Sesuai dengan teori, semakin besar nilai R, maka keluaran Kalman Filter semakin percaya masukan <i>gyroscope</i> .
5 (gambar 6.4)	Akibat parameter R = 10 dirasa terlalu besar, maka dilakukan percobaan dengan R = 5. Hasil keluaran Kalman Filter sesuai dengan yang dihasapkan. Tidak terlalu menyerupai masukan <i>accelerometer</i> , namun perubahan <i>gyroscope</i> memberikan pengaruh untuk memberikan estimasi yang lebih akurat. Parameter ini dipilih, sebab untuk R = 3 dan R = 7 hasilnya serupa

### 6.1.2 Perancangan Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi

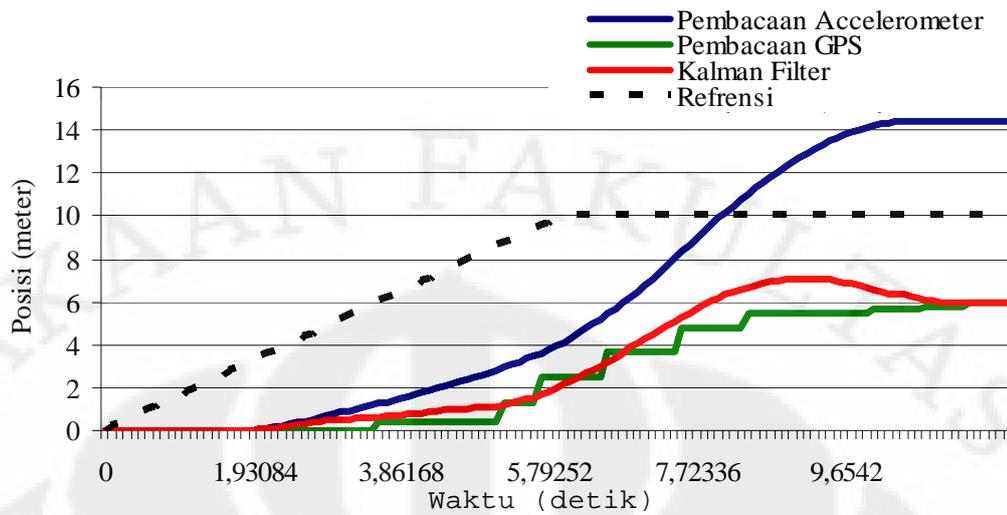
Pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas Digital, Kalman Filter juga digunakan untuk penghitungan posisi pada koordinat global (bumi). Kalman Filter yang digunakan untuk penghitungan posisi akan mendapatkan masukan berupa hasil pembacaan posisi oleh *accelerometer*. Data posisi dari GPS akan memberikan masukan kedua bagi Kalman Filter sebagai *observer*. Kalman Filter akan memberikan estimasi hasil penghitungan posisi berdasarkan kedua masukan tersebut untuk memberikan hasil yang mendekati kondisi nyata dan berusaha mengeliminasi derau yang rentan muncul saat pengolahan data untuk mendapatkan hasil penghitungan yang akurat.

Sama halnya seperti saat perancangan Kalman Filter untuk penghitungan sudut, ada beberapa parameter yang harus didefinisikan terlebih dahulu. Dalam pembahasan ini, hanya dilakukan pembahasan pada perancangan Kalman Filter yang dilakukan untuk mengolah data posisi pada sumbu Y, disebabkan karena penghitungan posisi pada sumbu X memiliki karakteristik yang sama dan akan menggunakan parameter yang sama juga.

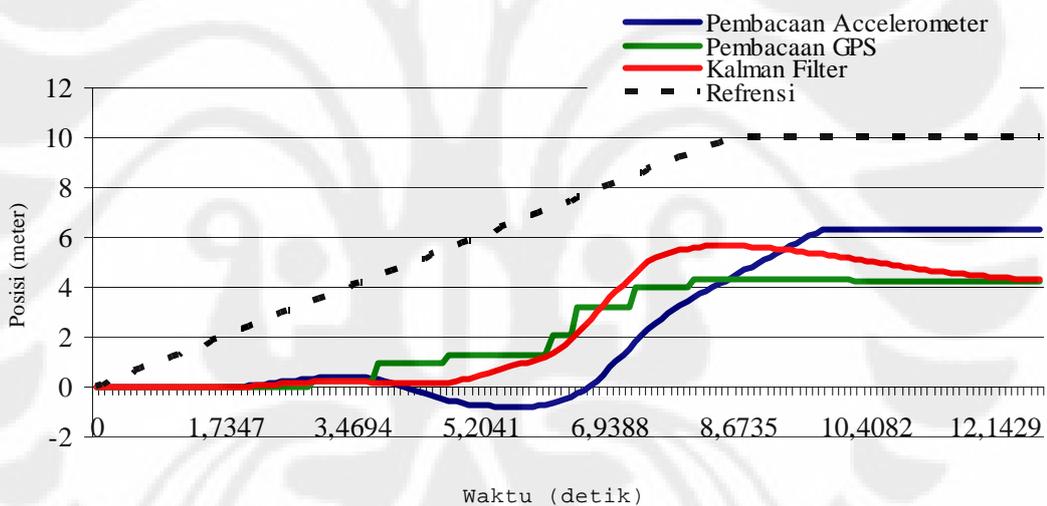
Pada rancangan Kalman Filter pada sistem navigasi GPS/INS untuk penghitungan posisi, matriks Q diatur bernilai  $\begin{bmatrix} 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix}$  yang merupakan nilai

standar deviasi pembacaan *accelerometer*, matriks P diatur bernilai  $\begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$ ,

matriks R bernilai 500 dari hasil percobaan. Adapun data posisi latitude dan longitude setelah diubah menjadi jarak dalam satuan meter (persamaan 4.1 hingga 4.6) tersebut akan dimasukkan ke dalam persamaan Kalman Filter sebagai masukan  $Z_k$  yang akan menjadi matriks *observer*. Pemilihan R bernilai 500 disebabkan data GPS yang kurang akurat tetapi dapat diandalkan untuk memberikan data posisi namun harus tetap memperhitungkan data dari *accelerometer* yang rentan terhadap derau namun kurang handal dalam penghitungan posisi. Untuk mendapatkan nilai R yang optimal, tidak ada patokan yang pasti, tetapi harus melalui rangkaian proses percobaan untuk menemukan nilai R yang paling sesuai.



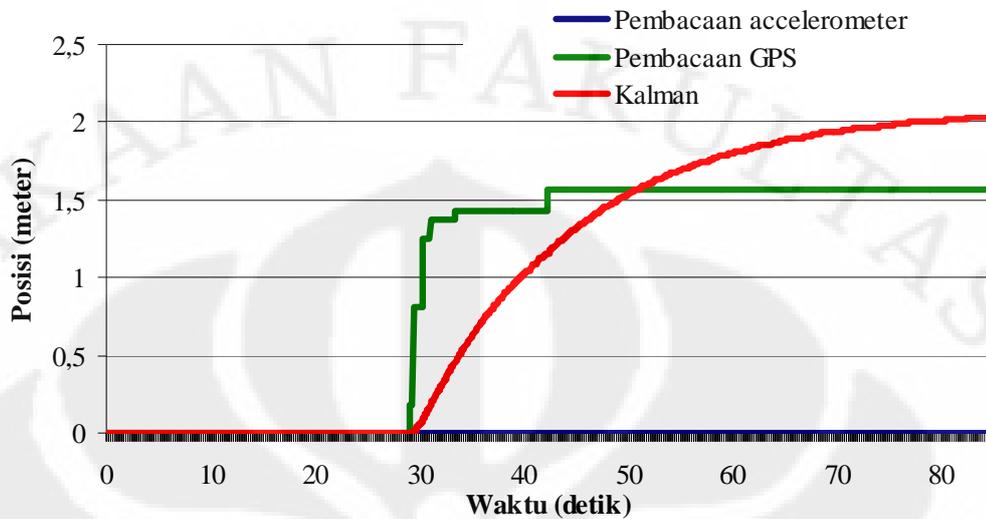
Gambar 6.6 Pembacaan posisi Y dengan  $R = 100$



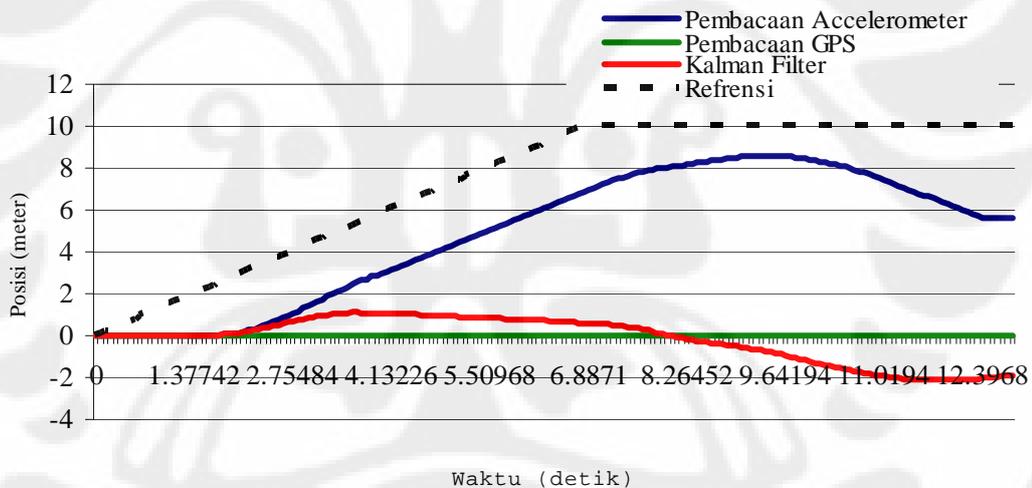
Gambar 6.7 Pembacaan posisi Y dengan  $R = 500$

Gambar 6.6 dan 6.7 merupakan contoh hasil percobaan yang dilakukan dalam menentukan nilai  $R$ . Pada saat percobaan, sistem digerakkan sejauh 10 meter ke arah sumbu Y positif dengan sudut  $yaw$  berkisar diusahakan tetap di sekitar angka  $358^\circ$  hingga  $2^\circ$ . Dengan mengatur sudut  $yaw$  tersebut, maka akan didapat data perubahan posisi pada sumbu Y yang sesuai besarnya dengan perubahan data posisi Latitude yang diberikan oleh GPS. Penentuan nilai  $R$  juga dilakukan dengan percobaan yang menggambarkan gangguan pada sinyal GPS

saat sistem dalam kondisi diam dan pengambilan data posisi saat GPS tidak mendapatkan sinyal.



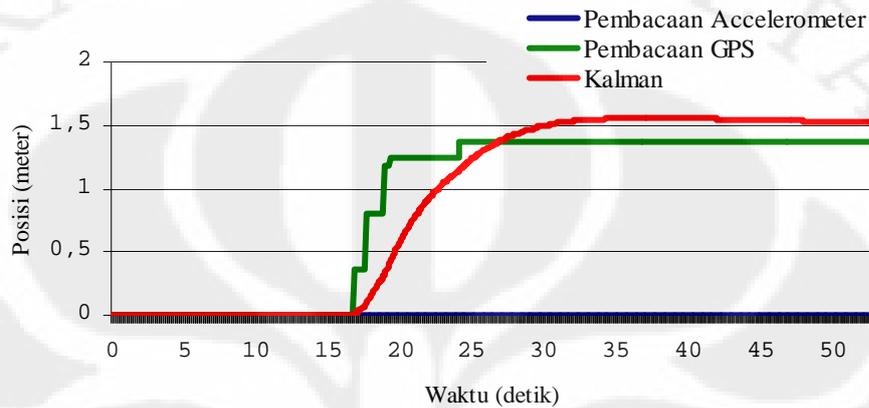
Gambar 6.8 Ilustrasi gangguan sinyal GPS saat sistem statis dengan  $R = 500$



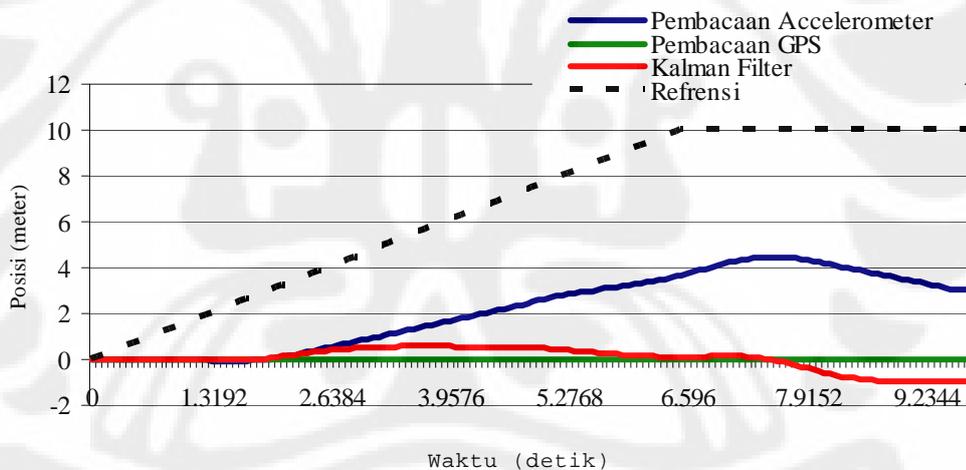
Gambar 6.9 Ilustrasi pembacaan posisi saat tidak mendapat sinyal GPS dengan  $R = 500$

Gambar 6.8 memberikan gambaran sistem saat posisi diam dan sinyal GPS mendapatkan gangguan dalam penerimaan sinyal yang memberikan kesalahan pembacaan posisi. Gangguan diberikan dengan cara memberikan penghalang di atas antenna GPS hingga terjadi kesalahan pembacaan lokasi. Pergerakan posisi pembacaan GPS adalah selisih antara posisi awal dengan posisi terkini saat percobaan dilakukan. Terlihat bahwa gangguan sinyal memberikan kesalahan pembacaan GPS sejauh 1.6 meter. Dengan parameter  $R$  pada Kalman

Filter diatur pada nilai 500, membuat sistem lebih percaya kepada GPS dibandingkan *accelerometer*. Apabila kita bandingkan gambar 6.8 dengan 6.10, pemberian nilai R yang lebih besar akan membuat sistem lebih lambat stabil dan terdapat *overshoot* yang cukup tinggi (sekitar 20 cm untuk  $R = 100$  dan 40cm untuk  $R = 500$ ).



Gambar 6.10 Ilustrasi gangguan sinyal GPS saat sistem statis dengan  $R = 100$



Gambar 6.11 Ilustrasi pembacaan posisi saat tidak mendapat sinyal GPS dengan  $R = 100$

Gambar 6.9 dan 6.11 memberikan gambaran saat sistem bekerja saat tidak mendapatkan data GPS. Sistem navigasi GPS/INS seharusnya tetap dapat memberikan data navigasi yang baik saat salah satu sistem navigasi tidak mendapatkan data yang baik. Saat GPS tidak mendapatkan sinyal, maka sistem navigasi sepenuhnya menjadi tanggung jawab IMU. Gambar 6.9 dan 6.11 memperlihatkan bahwa sistem GPS/INS yang dirancang masih tergantung pada data posisi yang diberikan oleh GPS. Saat sinyal GPS hilang, data posisi GPS

akan bernilai nol dan menjadi masukan untuk Kalman Filter. Masukan *observer* yang bernilai nol menyebabkan *error* hasil estimasi *accelerometer* bernilai sangat besar dan Kalman Filter akan memberikan keluaran yang nilainya mendekati *observer* yang lebih dipercaya. Pemberian nilai  $R = 100$  membuat Kalman Filter lebih mempercayai data posisi GPS. Akan tetapi bila dilihat gambar 6.9, pemberian nilai  $R = 500$  juga memberikan hasil keluaran Kalman Filter yang serupa, meskipun seharusnya Kalman Filter lebih percaya pada *accelerometer*. Pemberian nilai  $R$  yang lebih tinggi akan mengakibatkan sistem lebih lama mencapai kestabilan dan *overshoot* yang dihasilkan semakin tinggi. Desain Kalman Filter yang digunakan pada skripsi ini mempergunakan nilai  $R = 500$ , dengan asumsi data posisi yang diberikan GPS lebih dapat diandalkan.

Rangkaian uji coba penentuan parameter  $R$  diringkas dalam sebuah tabel, akan dapat dilihat pengaruh perubahan parameter  $R$  untuk mendapatkan nilai  $R$  yang memberikan hasil keluaran Kalman Filter secara maksimal

Tabel 6.2 Pengaruh parameter  $R$  pada keluaran Kalman Filter untuk penghitungan posisi

Parameter $R$	Hasil keluaran Kalman Filter yang didapat
10	Hasil keluaran Kalman Filter terlalu mempercayai masukan GPS. Parameter $R$ perlu dinaikkan.
50	Hasil keluaran Kalman Filter masih terlalu mempercayai masukan GPS. Parameter $R$ perlu dinaikkan.
100	Memberikan keluaran Kalman Filter yang cukup baik, hanya saja estimasi yang diberikan masih terlalu menyerupai data GPS. Apabila sinyal satelit mengalami gangguan, akan tampak bahwa keluaran Kalman Filter masih lebih mempercayai GPS dibandingkan <i>accelerometer</i>
500	Dipilih agar pengaruh <i>accelerometer</i> dapat lebih memberikan estimasi keluaran Kalman Filter yang lebih baik. Saat sinyal satelit mengalami gangguan, tampak Kalman Filter lebih lama mencapai kesetimbangan. Meskipun Kalman masih lebih mempercayai GPS, namun meningkatkan lagi nilai $R$ bukan pilihan yang tepat.

Tampaknya, untuk kasus kehilangan data posisi GPS memerlukan metode lain. Metode Kalman Filter yang diajukan pada skripsi ini, belum mampu memberikan hasil data navigasi yang baik apabila terdapat gangguan pada salah satu sistem navigasinya, terutama sistem navigasi GPS. Navigasi GPS/INS yang baik akan mampu memberikan navigasi yang baik dalam segala kondisi, karena menggabungkan kehandalan sistem navigasi inersia yang tidak memerlukan masukan dari luar dan kehandalan GPS yang mampu memberikan data posisi di permukaan bumi dengan baik.

## 6.2 Uji coba Kalman Filter pada sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital

Setelah seluruh parameter Kalman Filter dipilih untuk mendapatkan respons terbaik, maka tahap selanjutnya adalah melakukan uji coba terhadap sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang dibahas pada skripsi ini. Pengujian dibagi menjadi 2 tahap, yaitu tahap pertama adalah pengujian hasil keluaran Kalman Filter untuk penghitungan sudut dan yang kedua pengujian hasil keluaran Kalman Filter untuk penghitungan posisi.

### 6.2.1 Pengujian Kalman Filter untuk Penghitungan Sudut

Desain Kalman Filter yang dibuat akan diprogram pada mikrokontroler ATmega32 tempat melakukan penghitungan. Pengujian dilakukan dengan cara mengukur sudut *pitch* dan *roll* sebanyak 10 kali untuk setiap sudut dan dirata-rata untuk mendapatkan rata-rata kesalahan. Dari hasil percobaan, didapatkan hasil sebagai berikut :

Tabel 6.3 Hasil penghitungan sudut Kalman Filter

Sudut Sebenarnya (derajat)	Hasil Kalman Pitch (derajat)	Hasil Kalman Roll (derajat)
-90	-90.3	-89.8
-60	-60.2	-60.1
-30	-30.1	-30.2
0	0	0
30	29.9	30.2
60	60.2	59.8
90	89.7	89.9

Tampak dari tabel 6.3, pengukuran sudut *Pitch* dan *Roll* hasil pengolahan Kalman Filter dengan masukan *rate-gyroscope* dan *accelerometer* dapat menghasilkan penghitungan sudut yang mendekati nilai sudut yang sebenarnya dengan rata-rata deviasi kurang dari  $1^0$ .

### 6.2.2 Pengujian Kalman Filter untuk Penghitungan Posisi

Pada penghitungan posisi dengan menggunakan Kalman Filter, digunakan 2 buah masukan, yaitu data *accelerometer* dan data GPS. Tujuan utama dari pengujian ini untuk membuktikan bahwa hasil keluaran Kalman Filter mampu memberikan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan data GPS yang memiliki tingkat akurasi sekitar 3 meter hingga 12 meter. Proses penalaan yang telah dilakukan pada saat percobaan dan pengambilan data berikutnya, menunjukkan perbaikan kinerja Kalman Filter yang diajukan pada skripsi ini. Tercatat rata-rata keluaran Kalman Filter untuk penghitungan jarak 10 meter didapatkan 8.43 meter untuk sumbu X dan 8.52 meter untuk sumbu Y.

## 6.3 Penentuan dan analisa pengaruh parameter R terhadap respons Kalman Filter

Pada perancangan Kalman Filter, terdapat beberapa parameter yang harus diberikan nilainya pada saat inisialisasi untuk mendapatkan hasil keluaran Kalman Filter yang dapat dengan maksimal mengurangi derau dan memberikan estimasi yang mendekati nilai sebenarnya. Salah satu parameter yang dicari adalah parameter matriks R yang merupakan *measurement noise covariance* atau derau keluaran proses penghitungan. Pada dasar teori mengenai Kalman Filter, nilai matriks R akan mempengaruhi nilai *Optimal Kalman Gain* (persamaan 2.7). Nilai *Optimal Kalman Gain* ( $K_k$ ) yang paling baik adalah yang dapat mengurangi nilai error kovarian keadaan berikutnya berdasarkan data masukan saat ini (*a posteriori error covariance*).

Pemberian nilai R yang sangat kecil (mendekati nol) dapat menyebabkan nilai  $K_k$  memberikan beban atau kepercayaan kepada error  $\tilde{y}_k$  (persamaan 2.6) yang lebih, menyebabkan keluaran Kalman Filter akan lebih mendekati masukan

$z_k$  daripada masukan  $u_k$ . Sebaliknya, bila diberikan nilai R yang sangat besar, maka yang lebih dipercaya oleh Kalman Filter adalah masukan  $u_k$ .

Pengaturan ini sangat diperlukan dan mempengaruhi keluaran Kalman Filter yang dirancang. Sedapat mungkin, keluaran Kalman Filter tidak terlalu percaya pada salah satu masukan, entah masukan  $z_k$  ataupun  $u_k$ . Sebab, bila lebih percaya ke salah satu masukan, hasil keluaran Kalman tidak akan maksimal bila salah satu masukan memberikan data masukan yang salah akibat kesalahan pembacaan, derau, atau bahkan tidak berfungsinya sensor yang memberikan data tersebut.

Memang untuk penentuan nilai R tidak dapat diberikan patokan yang jelas, melainkan harus dilakukan serangkaian uji coba untuk melihat keluaran Kalman Filter yang dihasilkan. Dalam perancangan Kalman Filter untuk sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang diajukan pada skripsi ini, penentuan parameter atau nilai matriks R dilakukan dengan cara intuitif dan uji coba hingga mendapat hasil yang dirasa paling tepat. Cara intuitif dilakukan dengan melakukan analisa terlebih dahulu terhadap kedua jenis masukan Kalman Filter, untuk dapat menentukan nilai R yang sekiranya dapat memberikan hasil keluaran yang mendekati nilai sebenarnya. Apabila hasil analisa menyatakan bahwa data masukan  $u_k$  dapat dipercaya, maka penentuan nilai awal R dapat dibuat besar. Sebaliknya, bila masukan  $u_k$  kurang dapat dapat memberikan data yang akurat, maka penentuan nilai awal matriks R dapat lebih kecil dan menyebabkan Kalman Filter akan lebih mempercayai data masukan  $z_k$ .

Pada perancangan Kalman Filter untuk penghitungan sudut, parameter R yang dicoba antara lain 1, 5, 10, dan 100 (gambar 6.1 – 6.4). Perubahan nilai R yang diberikan akan mempengaruhi grafik keluaran Kalman Filter. Tampak saat nilai R diberikan 1 atau bernilai kecil (gambar 6.1), grafik keluaran Kalman Filter menyerupai grafik pembacaan sudut berdasarkan data *accelerometer*, atau dengan kata lain Kalman Filter lebih mempercayai data masukan  $z_k$ . Apabila nilai parameter R diubah menjadi lebih besar, grafik keluaran Kalman Filter bergerak menjauhi grafik pembacaan *accelerometer* sedikit demi sedikit. Bila kita

membandingkan gambar 6.1 hingga 6.4, maka akan tampak, semakin besar nilai parameter  $R$  yang kita tetapkan, semakin grafik keluaran Kalman Filter menjauhi grafik pembacaan *accelerometer* atau masukan  $z_k$ .

Pemilihan parameter  $R = 5$  untuk Kalman Filter pada penghitungan sudut disebabkan karena data masukan  $u_k$  yang berasal dari *rate-gyroscope* rentan terhadap derau dan menyebabkan *drift* saat penghitungan sudut (gambar 5.2). Pemberian nilai  $R = 5$  akan membuat Kalman Filter lebih percaya pada data sudut hasil pengolahan *accelerometer* yang menjadi masukan  $z_k$  tetapi masih memperhitungkan data masukan *rate-gyroscope*. Meskipun hasil penghitungan sudut kemiringan oleh *accelerometer* menunjukkan hasil yang baik, Kalman Filter yang dirancang tidak boleh terlalu percaya pada masukan tersebut. Hal itu untuk mencegah bila pada suatu saat data pembacaan *accelerometer* tidak akurat akibat derau atau kerusakan alat.

Pada perancangan Kalman Filter untuk penghitungan posisi menemukan kendala, yaitu penghitungan posisi berdasarkan data *accelerometer* yang menjadi masukan  $u_k$  kurang akurat (gambar 5.7 dan 5.8) sedangkan data posisi dari GPS yang menjadi masukan  $z_k$  juga memiliki deviasi sekitar 3.49 meter dari posisi sebenarnya di bumi. Masih menggunakan intuisi dan uji coba, pemberian nilai  $R$  untuk Kalman Filter pada penghitungan posisi ini akan mencoba untuk membuat hasil keluaran Kalman Filter lebih percaya pada data posisi GPS namun tetap memperhitungkan posisi hasil penghitungan *accelerometer*. Untuk dapat memenuhi kondisi tersebut, maka untuk percobaan penentuan nilai  $R$  digunakan nilai  $R$  sebesar 100 dan 500 (gambar 6.6 dan 6.7) lalu kemudian dianalisa. Untuk penentuan  $R = 100$ , terlihat bahwa hasil keluaran Kalman Filter masih lebih mempercayai data posisi yang diberikan GPS daripada hasil penghitungan *accelerometer*. Kondisi ini berimbas pada saat terjadi gangguan sinyal satelit GPS (gambar 6.10 dan 6.11), keluaran Kalman Filter masih mendekati data posisi GPS padahal saat gangguan satelit data yang seharusnya dapat lebih dipercaya adalah data *accelerometer*.

Maka dari itu, percobaan berikutnya adalah memberikan nilai  $R = 500$ . Dari gambar 6.7, terlihat grafik keluaran Kalman Filter telah mampu mendekati

nilai yang sebenarnya. Dengan memberikan nilai  $R$  yang lebih besar, diharapkan Kalman Filter dapat lebih mengandalkan data *accelerometer* dan GPS, tidak salah satu saja. Untuk dapat membuktikannya, maka dilakukan ujicoba dengan memberikan gangguan pada sinyal satelit GPS (gambar 6.8 dan 6.9). Parameter  $R = 500$  membuat Kalman Filter memperhitungkan data *accelerometer* dan GPS, namun hasil keluaran Kalman Filter akan tetap mendekati nilai posisi GPS. Pemilihan nilai  $R$  yang lebih besar lagi dapat membuat Kalman Filter menjadi lambat kerjanya dan menimbulkan *overshoot* dalam penghitungannya (gambar 6.8 dan 6.10).

Kalman Filter pada penghitungan posisi pada akhirnya dirancang dengan nilai  $R = 500$ , dengan maksud Kalman Filter akan tetap memperhitungkan kedua data masukan, tidak hanya percaya salah satunya saja agar sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital masih mampu memberikan estimasi posisi yang mendekati nilai sebenarnya pada kondisi apapun.

Kesimpulan yang dapat diambil dari penentuan nilai parameter  $R$  pada perancangan Kalman Filter dapat dituliskan dalam poin-poin berikut ini :

1. Nilai  $R$  yang mendekati nol akan membuat Kalman Filter lebih mempercayai masukan  $z_k$  dibandingkan  $u_k$  dan begitupula sebaliknya, pemberian nilai  $R$  yang besar akan membuat Kalman Filter lebih mempercayai masukan  $u_k$  dibandingkan  $z_k$ .
2. Semakin besar nilai  $R$  akan membuat Kalman Filter lambat mencapai kestabilan.
3. Tidak ada patokan pasti untuk menentukan nilai parameter  $R$ , harus dilakukan dengan cara ujicoba dan membutuhkan intuisi berdasarkan hasil analisa data masukan Kalman Filter yang digunakan.
4. Pemilihan nilai  $R$  yang optimal adalah yang mampu mengurangi nilai error kovarian keadaan berikutnya berdasarkan data masukan saat ini. Keluaran Kalman Filter juga diusahakan tidak terlalu percaya dan tergantung pada salah satu masukan saja.

## **BAB 7 KESIMPULAN**

Dari keseluruhan pembahasan dalam skripsi ini dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu :

1. Sistem navigasi GPS/INS dan Kompas digital menggunakan Kalman Filter dapat diaplikasikan pada mikrokontroler AVR yang terjangkau harganya dan banyak terdapat di pasaran.
2. Sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang diajukan memiliki respons sistem sebesar 160ms.
3. Hasil pengujian keakuratan data sudut *pitch* dan *roll* dengan menggunakan Kalman Filter memiliki rata-rata deviasi kurang dari  $1^{\circ}$
4. Penghitungan posisi menggunakan data *accelerometer* kurang handal, hasil percobaan penghitungan jarak 10 meter didapatkan rata-rata pengukuran 5,21 meter pada sumbu X dan 6,14 meter pada sumbu Y.
5. Pemberian gain sebesar 1.5 pada data *accelerometer* untuk penghitungan posisi mampu memberikan koreksi yang cukup baik dengan rata-rata penghitungan jarak 10 meter untuk sumbu X sebesar 7.68 meter dan sumbu Y sebesar 8.04 meter.
6. Hasil pengujian keakuratan penghitungan posisi dengan Kalman Filter dengan gain 1.5 pada data *accelerometer* untuk pergerakan 10 meter didapatkan hasil rata-rata 8.43 meter untuk sumbu X dan 8.52 meter untuk sumbu Y.
7. Penentuan parameter matriks R berpengaruh pada keluaran Kalman Filter. Nilai R yang optimal dapat meminimalisir error kovarian keadaan berikutnya yang berasal dari data saat ini.
8. Desain Kalman Filter untuk sistem navigasi GPS/INS dan kompas digital yang diajukan pada skripsi ini belum dapat memberikan data navigasi posisi yang baik bila sistem navigasi GPS mengalami masalah (tidak mendapatkan sinyal), sebab sistem masih bergantung pada hasil pembacaan posisi GPS.

## DAFTAR ACUAN

- [1] GPS Compendium  
[www.u-blox.com/en/tutorials-links-gps.html](http://www.u-blox.com/en/tutorials-links-gps.html)
- [2] Marito, Ingot (2008, Juli). *Sistem Navigasi Helikopter Berdasarkan Data Posisi Secara Telemetry*, Skripsi, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia
- [3] J. Laviola Jr., Joseph (2003). *Double Exponential Smoothing: An Alternative to Kalman Filter-Based Predictive Tracking*. Providence: Brown University Technology Center for Advanced Scientific Computing and Visualization.
- [4] Kusmanto, Nando (2009, Juli). *Rancang Bangun Sisten Navigasi Inersia Dengan Kalman Filter Pada Mikrokontroler AVR*, Skripsi, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia
- [5] Pycke, Tom (2006, 22 Mei). *Kalman Filtering of IMU data*.  
<http://tom.pycke.be/mav/71/kalman-filtering-of-imu-data>

## DAFTAR PUSTAKA

Gedex (2008, Mei 17). *Menggunakan jalur I<sup>2</sup>C*.

<http://gedex.web.id/archives/2008/05/17/menggunakan-jalur-i2c/>

Welch, Greg & Bishop, Gary. *An Introduction to the Kalman Filter*. Chappel Hill: Department of Computer Science University of North Carolina 2006

Pitowarno, Endra. *Robotika : Desain, Kontrol , dan Kecerdasan Buatan*. Yogyakarta: Andi Yogyakarta. 2007

Joni, I Made & Budi Rahardjo. *Pemrograman C dan Impelmentasinya*. Bandung: Penerbit Informatika.. 2008

Winoto, Ardi. *Mikrokontroler AVR Atmega8/32/16/8535 dan Pemrogramannya dengan bahasa C pada WinAVR*. Bandung: Informatika Bandung. 2008

Hidayat, Nur (2009, Juli). *Rancang Bangun Sistem Kendali Quadrotor untuk Kesetimbangan Posisi dengan PID*, Skripsi, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia

Kumar N., Vikas. *Integration of Inertial Navigation System and Global Positioning System Using Kalman Filtering*. Mumbai: M.tech dissertation in Department of Aerospace Engineering Indian Institute of Technology Bombay. 2004

Zhang, Pifu, *et.al*. *Navigation with IMU/GPS/Digital Compass with Unscented Kalman Filter*. In *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*. Niagara Falls, Canada. 2005

Phuyal, Bhisnu. *An Experiment for a 2-D and 3-D GPS/INS Configuration for Land Vehicle Applications*. 2004

National Instrument. (2008, Desember 10). *Inertial Measurement Unit*. Desember 22, 2008. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8163>

NONGNU. *Example Using the two-wire interface (TWI)*.

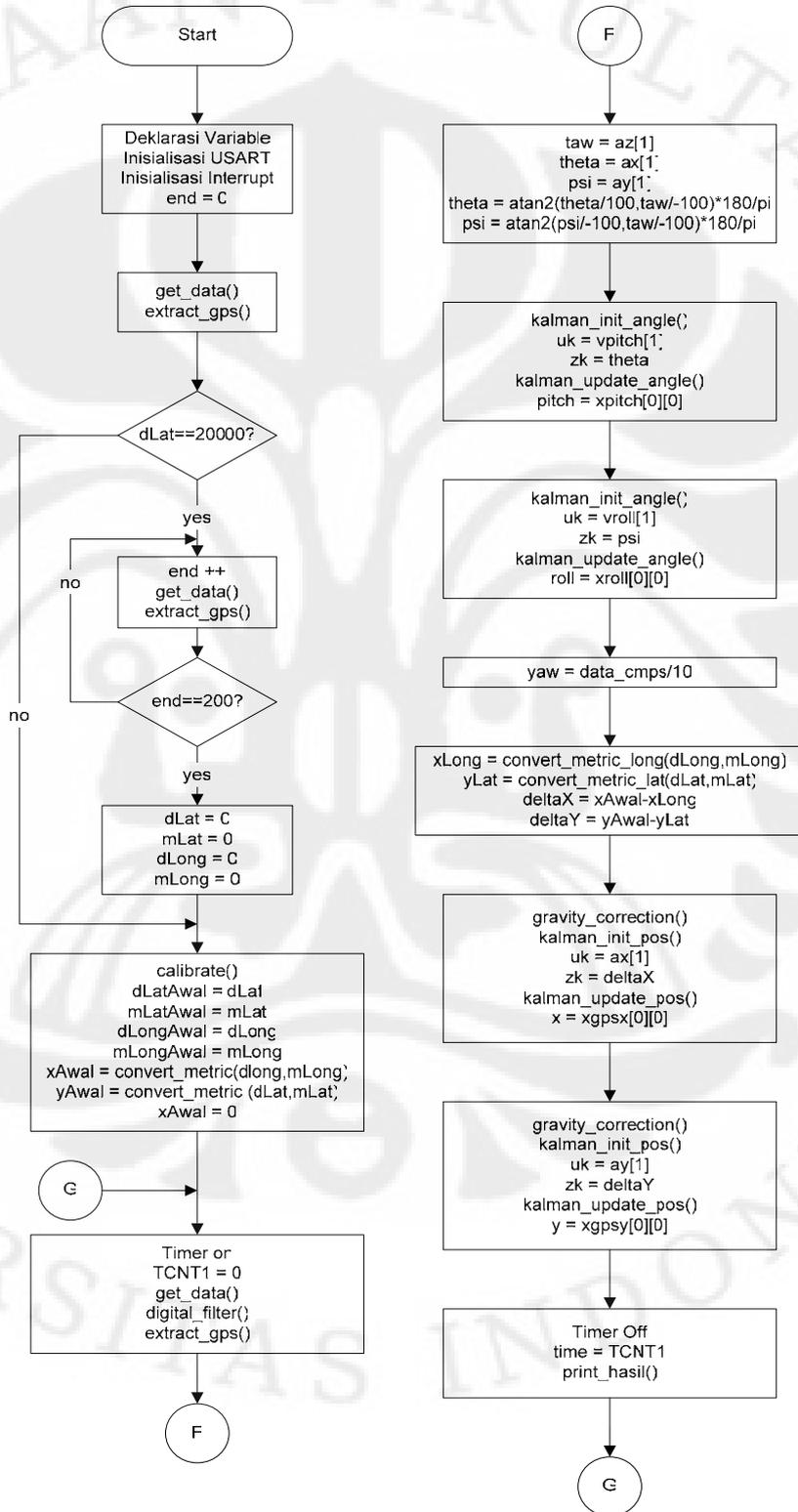
[http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group\\_twi\\_demo.html](http://www.nongnu.org/avr-libc/user-manual/group_twi_demo.html).

Procyon AVRlib. *I2C.c*.

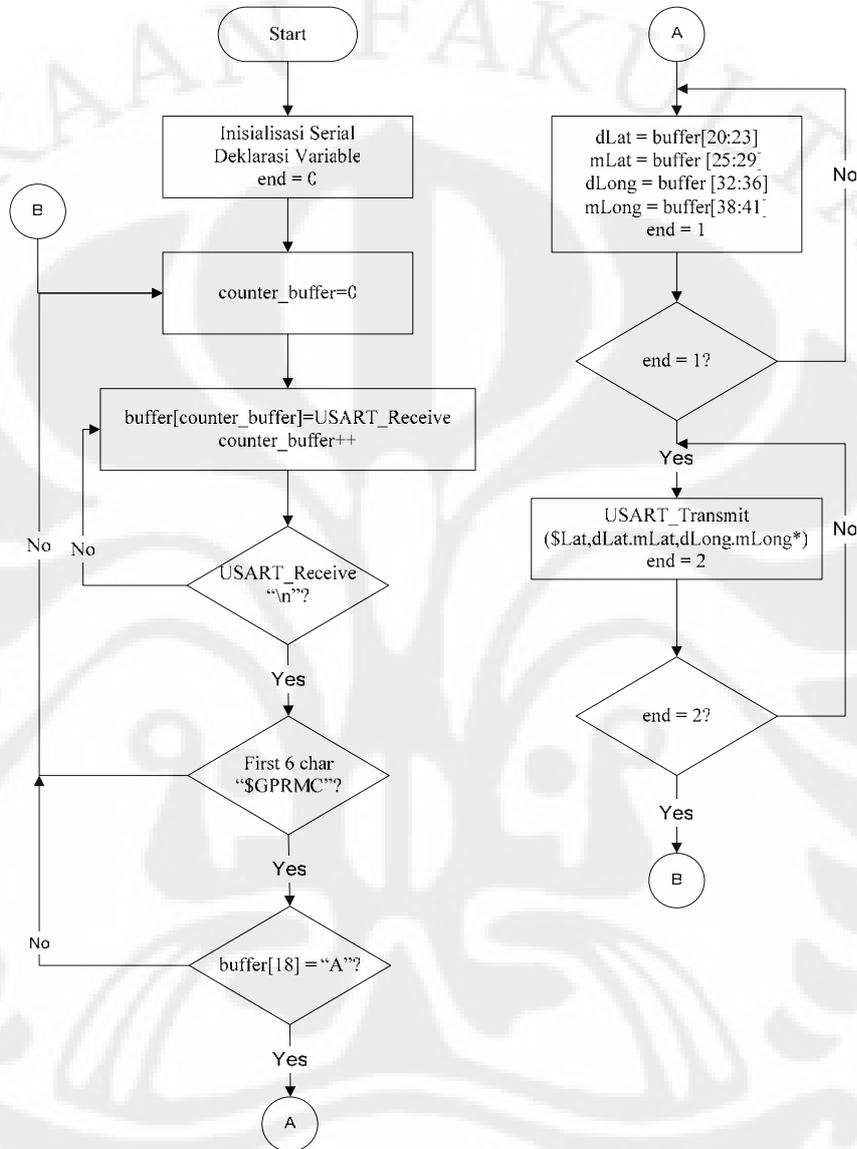
[http://www.mil.ufl.edu/~chrisarnold/components/microcontrollerBoard/AVR/avr-lib/docs/html/i2c\\_8c-source.html](http://www.mil.ufl.edu/~chrisarnold/components/microcontrollerBoard/AVR/avr-lib/docs/html/i2c_8c-source.html)

## LAMPIRAN

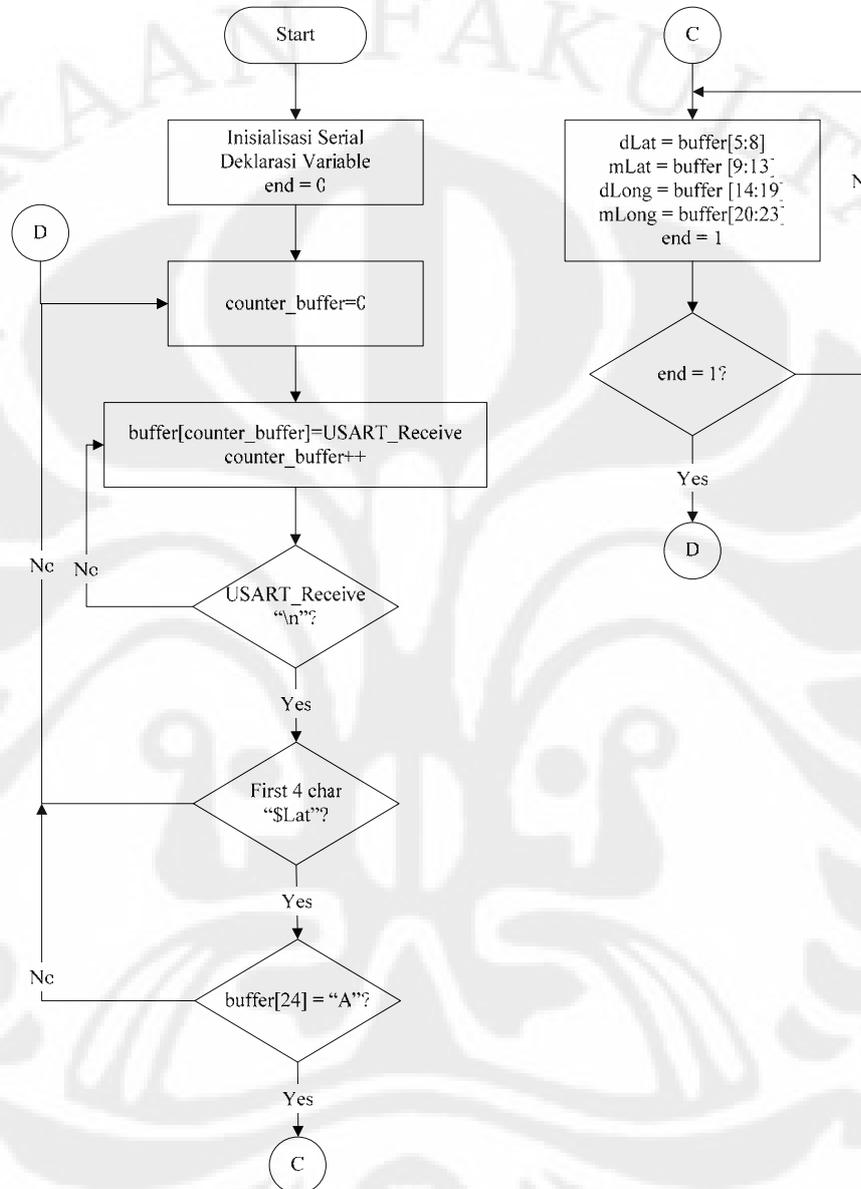
Lampiran 1 : Algoritma Pemrograman Sistem Navigasi GPS/INS dan Kompas Digital dengan Kalman Filter



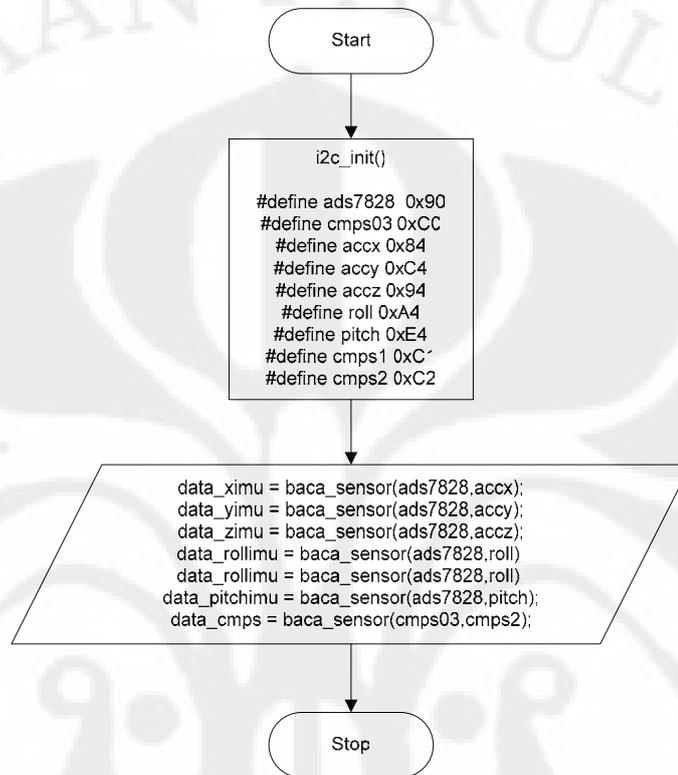
Lampiran 2 : Algoritma Pemrograman Pengambilan Data GPS pada  
Mikrokontroler *Slave*



Lampiran 3 : Algoritma Pemrograman Pengambilan Data GPS (*extract\_gps()*)  
pada Mikrokontroler *Master*



Lampiran 4 : Algoritma Pemrograman Pengambilan Data IMU (*get\_data()*) pada Mikrokontroler *Master*



Lampiran 5 : Algoritma Pemrograman Kalibrasi Data IMU (*calibrate()*) pada Mikrokontroler *Master*

