

**PERBANDINGAN METODE *DIRECTION COSINE*
MATRIX(DCM) DAN DCM *MODIFIED KALMAN FILTER*
UNTUK ESTIMASI BESAR SUDUT ORIENTASI**

TUGAS AKHIR



MUHAMMAD WISAM IZDIHAR

311810025

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS MA CHUNG
MALANG
2023**

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa seluruh isi dari tugas akhir saya yang berjudul “Perbandingan *Metode Direction Cosine Matrix*(DCM) Dan *DCM Modified Kalman Filter* Untuk Estimasi Besar Sudut Orientasi” merupakan hasil karya intelektual mandiri yang diselesaikan tanpa menggunakan konten-konten yang illegal dan bukan karya orang lain yang saya klaim sebagai karya saya.

Referensi telah dicantumkan di daftar pustaka. Saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku apabila tugas akhir saya terbukti bukan hasil karya saya dan merupakan hasil karya orang lain.

Malang, 8 Maret 2023



Muhammad Wisam Izdiyar

NIM. 311810025

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**PERBANDINGAN METODE *DIRECTION COSINE MATRIX*
(DCM) DAN DCM *MODIFIED KALMAN FILTER* UNTUK
ESTIMASI BESAR SUDUT**

Oleh:

**MUHAMMAD WISAM IZDIHAR
311810025**

dari:

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS dan TEKNOLOGI
UNIVERSITAS MA CHUNG**

Telah dinyatakan lulus dalam melaksanakan Tugas Akhir sebagai syarat kelulusan
dan berhak mendapatkan gelar Sarjana Komputer (S.Kom)

Dosen Pembimbing 1,



Dr. Eng. Romy Budhi, ST., MT.
NIP. 20070035

Dosen Pembimbing 2,



Ir. Oesman Hendra Kelana, M.Div, M.Cs.
NIP. 20110022

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi,



Dr. Kestriana Rega Prilianti, M.Si.
NIP. 20120035

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada kita semua sehingga penyusun dapat membuat laporan ini dengan lancar. Laporan ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam Tugas Akhir bagi Mahasiswa dari Prodi Teknik Informatika Universitas Ma Chung Malang.

Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung serta membantu dalam penyusunan Laporan Praktik Kerja Lapangan ini, di antaranya :

1. Orang tua yang selalu mendukung dalam kegiatan praktik kerja lapangan ini.
2. Bapak Dr. Eng. Romy Budhi, ST., MT. , selaku dosen pembimbing 1 penelitian Tugas Akhir dan pembimbing di Human-Machine Interaction Research Center.
3. Bapak Ir. Oesman Hendra Kelana, M.Div, M.Cs, Dosen prodi Teknik Informatika selaku dosen pembimbing 2 penelitian Tugas Akhir.
4. Prodi Teknik Informatika Universitas Ma Chung serta HMI yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan Tugas Akhir.
5. Universitas Ma Chung Malang yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian Tugas Akhir.
6. Rekan se-angkatan.

Kemudian, saya menyadari bahwa tugas yang saya tulis ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun kami butuhkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhir kata, penulis berharap Tuhan YME membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga hasil penelitian Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dan menambah ilmu pembaca.

Malang, 8 Maret 2023



Muhammad Wisam Izdihar

Perbandingan Metode Direction Cosine Matrix(DCM) Dan DCM Modified Kalman Filter Untuk Estimasi Besar Sudut

Muhammad Wisam Izdihar, Romy Budhi Widodo, Oesman Hendra Kelana

Abstrak

Sensor inertial measurement unit (IMU) merupakan sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengkalkulasi atau mengestimasi tingkat sudut serta arah dari sebuah rangka yang didapatkan dari gabungan 2-3 sensor *gyroscope*, *magnetometer*, dan *accelerometer*. Agar sensor IMU dapat bekerja maka dibutuhkan software atau firmware yang dapat menggabungkan data dari beberapa sensor agar dapat mengestimasi dan mengukur sebuah arah dan orientasi yang biasa disebut dengan *Attitude Heading Reference System* (AHRS).

Untuk memperoleh hasil ukur beberapa macam filter dapat digunakan yang diantaranya merupakan *Direction Cosine Matrix* (DCM) dan filter Kalman. Pada penelitian ini dilakukan pengujian modul IMU GY-951 yang mengimplementasikan *firmware* Razor 9-Degree Of Freedom AHRS dan ditambahkan filter Kalman untuk mendapat hasil estimasi besar sudut dan hasil besar sudut keduanya akan dibandingkan. Sebagai acuan Awinda Xsens digunakan untuk membandingkan error serta plot dilakukan untuk melihat stabilitas dari setiap metode.

Dari hasil uji error menggunakan perhitungan MAE diperoleh nilai error filter DCM Modified Kalman Filter lebih besar dibandingkan dengan DCM dengan pengujian pada dua jenis putaran yaitu putaran normal dan putaran cepat. Pada putaran normal di sumbu y adalah $0,03^{\circ}$ dan pada sumbu x adalah $0,2^{\circ}$. Sedangkan di putaran cepat selisih pada sumbu y adalah 1.7° dan pada sumbu x adalah 2.4° .

Kata Kunci : IMU, AHRS, DCM, GY-951, Sensor inertial

Comparison of Direction Cosine Matrix Method(DCM) and Modified Kalman Filter Method for Angle Orientation Estimation.

Muhammad Wisam Izdihar, Romy Budhi Widodo, Oesman Hendra Kelana

Abstract

The Inertial Measurement Unit (IMU) sensor is an electronic device used to calculate or estimate the angular rate and direction of a frame obtained from a combination of 2-3 sensors: gyroscope, magnetometer, and accelerometer. To make the IMU sensor work, software or firmware is needed to combine data from several sensors to estimate and measure a direction and orientation commonly referred to as the Attitude Heading Reference System (AHRS).

To obtain measurement results, several filters can be used, including the Direction Cosine Matrix (DCM) and the Kalman filter. In this study, testing was carried out on the GY-951 IMU module that implements the Razor 9-Degree Of Freedom AHRS firmware and the Kalman filter was added to obtain the estimation of the large angle and the small angle, and both estimation results were compared. The Xsens Awinda was used as a reference to compare errors, and plots were made to observe the stability of each method.

From the error test results using MAE calculation, it was found that the error value of the Modified Kalman Filter DCM filter was larger compared to the DCM filter, tested on two types of rotations, namely normal rotation and fast rotation. In normal rotation, the difference on the y-axis was 0.03° and on the x-axis was 0.2° , while in fast rotation, the difference on the y-axis was 1.7° and on the x-axis was 2.4° .

Keywords : IMU, AHRS, DCM, GY-951, *Inertial sensor*

Daftar Isi

Lembar Pengesahan	i
Pernyataan Keaslian Tugas Akhir.....	ii
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel	ix
Bab I.....	1
Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Perumusan Masalah	2
1.5 Tujuan Penelitian	2
1.6 Manfaat	2
1.7 Sistematika Penulisan	3
Bab II.....	4
Tinjauan Pustaka	4
2.1 Board GY-951 dan YP-05.....	4
2.2 Sensor Accelerometer ADXL345	5
2.3 Sensor Gyro ITG-3205.....	6
2.4 Sensor magnetometer HMC5883L	6
2.5 Razor 9DOF AHRS	7
2.6 Direction Cosine Matrix (DCM) dan Euler Angles	8
2.7 Filter Kalman	10
2.8 Arduino IDE.....	11
2.9 Mean Absolute Error.....	12
Bab III	12

3.1 Alur Penelitian.....	12
3.2 Identifikasi Masalah	13
3.3 Studi Pustaka	14
3.4 Implementasi Firmware	14
3.5 Pengumpulan Data.....	14
3.6 Perbandingan	15
Bab IV	17
Hasil dan Pembahasan	17
4.1 Akuisisi data Euler dan Gyroscope	17
4.2 Estimasi dengan Kalman filter	18
4.3 Hasil pengujian dengan Awinde Xsens	22
4.3.1 Hasil pengujian skenario 1	24
4.3.2 Hasil pengujian skenario 2	25
4.3.3 Hasil pengujian skenario 3	27
4.3.4 Hasil pengujian skenario 4	29
4.3.5 Diskusi	30
Bab V	32
Lampiran	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Board GY-951	4
Gambar 2. 2 Board YP-05.....	5
Gambar 2. 3 Block Diagram ADXL345	5
Gambar 2. 4 Block diagram ITG-3205	6
Gambar 2. 5 Block diagram HMC5883L.....	7
Gambar 3. 1 Alur penelitian	13
Gambar 3. 2 Hasil output Razor AHRS	15
Gambar 3. 3 Ilustrasi blok diagram.....	16
Gambar 3. 4 MTw Awinda Xsens	16
Gambar 4. 1 Kode	17
Gambar 4. 2 Kode	17
Gambar 4. 3 Kode	18
Gambar 4. 4 Kode	19
Gambar 4. 5 kode	20
Gambar 4. 6 Kode	22
Gambar 4. 7 Akuisisi data.....	23
Gambar 4. 8 Board GY-951 dan Awinda Xsens.....	23
Gambar 4. 9 Plot error pitch putaran normal	25
Gambar 4. 10 error pitch putaran cepat.....	27
Gambar 4. 11 error roll putaran normal	28
Gambar 4. 12 error roll putaran cepat	30

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Board GY-951	4
Gambar 2. 2 Board YP-05.....	5
Gambar 2. 3 Block Diagram ADXL345	5
Gambar 2. 4 Block diagram ITG-3205	6
Gambar 2. 5 Block diagram HMC5883L.....	7
Gambar 3. 1 Alur penelitian	13
Gambar 3. 2 Hasil output Razor AHRS	15
Gambar 3. 3 Ilustrasi blok diagram.....	16
Gambar 3. 4 MTw Awinda Xsens	16
Gambar 4. 1 Kode	17
Gambar 4. 2 Kode	17
Gambar 4. 3 Kode	18
Gambar 4. 4 Kode	19
Gambar 4. 5 kode	20
Gambar 4. 6 Kode	22
Gambar 4. 7 Akuisisi data.....	23
Gambar 4. 8 Board GY-951 dan Awinda Xsens.....	23
Gambar 4. 9 Plot error pitch putaran normal	25
Gambar 4. 10 error pitch putaran cepat.....	27
Gambar 4. 11 error roll putaran normal	28
Gambar 4. 12 error roll putaran cepat	30

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Sensor inertial measurement unit (IMU) merupakan sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengkalkulasi atau mengestimasi tingkat sudut serta arah dari sebuah rangka yang didapatkan dari gabungan 2-3 sensor *gyroscope*, *magnetometer*, dan *accelerometer*. Sensor IMU biasa digunakan di bidang antariksa, robotika, navigasi, kesehatan, dan baru – baru ini bahkan pada video game untuk meningkatkan *immersion*. Agar sensor IMU dapat bekerja maka dibutuhkan software atau firmware yang dapat menggabungkan data dari beberapa sensor agar dapat mengestimasi dan mengukur sebuah arah dan orientasi yang biasa disebut dengan *Attitude Heading Reference System* (AHRS).

Untuk memperoleh hasil ukur beberapa macam filter dapat digunakan yang diantaranya merupakan *Direction Cosine Matrix* (DCM). DCM merupakan sebuah matrix 3x3 yang men-transformasi sebuah koordinat reference yang elemennya dapat ditentukan menggunakan *euler angles* dan *quaternion*. Filter Kalman merupakan algoritma yang menggunakan rentetan pengukuran dan di observasi berjangka waktu yang melibatkan derau dan ketidakpastian lainnya (Leccadito, 2013). Proses pada filter Kalman merupakan proses estimasi keadaan optimal yang diterapkan pada suatu system dinamis dan melibatkan derau acak, optimal yang dimaksud adalah meminimalkan error (Aroran, 2017).

Pada penelitian terdahulu (Premelani & Bizard, 2009) dibuat sebuah teori untuk implementasi DCM yang kemudian teori penelitian tersebut digunakan sebagai dasar pembuatan firmware Razor 9-Degree Of Freedom AHRS. Pada firmware Razor 9DOF AHRS elemen DCM yang digunakan adalah *euler angles* tanpa adanya filter menggunakan kalman.

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan pengujian modul IMU GY-951 yang menggunakan firmware Razor 9-Degree Of Freedom AHRS dan ditambahkan filter Kalman untuk mendapat hasil estimasi besar sudut orientasi dan hasil besar sudut orientasi keduanya akan dibandingkan.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, identifikasi masalah pada penelitian ini adalah bagaimana hasil perbandingan dari filter Kalman serta DCM *euler angles* dalam mengestimasi besar sudut orientasi.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Modul IMU yang digunakan adalah modul GY-951.
2. Bahasa pemrograman menggunakan C/C++.
3. Firmware pembanding yang digunakan adalah Razor 9DOF AHRS.
4. Transmisi data menggunakan USB 1.0.

1.4 Perumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, rumusan masalah pada penelitian ini bagaimana implementasi filter kalman pada modul GY-951 sehingga hasil estimasi besar sudut orientasi dapat dibandingkan dengan firmware Razor 9DOF AHRS. Dari hasil banding keduanya yang memberikan error lebih kecil merupakan hasil yang lebih baik

1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Implementasi filter kalman pada modul GY-951.
2. Pengujian modul GY-951 yang telah diimplementasikan filter kalman.
3. Perbandingan filter kalman dengan firmware Razor 9DOF AHRS pada modul GY-951.

1.6 Manfaat

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagi penulis

Menambah wawasan, pemahaman, pengetahuan, dan kemampuan penulis tentang pengukuran sudut dan orientasi IMU dengan menggunakan metode yang lainnya.

2. Bagi peneliti selanjutnya

Dengan dibuatnya tugas akhir ini diharapkan akan menambah bahan bacaan atau referensi untuk membantu peneliti dalam penelitiannya dan dapat membantu dalam memilih metode yang paling sesuai untuk aplikasi tertentu yang melibatkan penggunaan IMU dan firmwarena.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan penyelesaian dari penelitian ini, maka penulis Menyusun sistematika penulisan sebagai berikut :

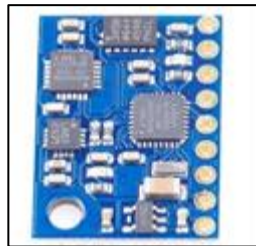
1. Bab I Pendahuluan berisi tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, dan tujuan dari penelitian mengenai perbandingan DCM dan filter Kalman.
2. Bab II Tinjauan Pustaka berisi teori-teori yang berhubungan dengan DCM dan filter Kalman beserta hardware yang diperlukan.
3. Bab III Analisis dan Perancangan Sistem berisi alur penelitian, implementasi, serta perancangan sistem dalam membandingkan DCM dan filter Kalman
4. Bab IV Hasil dan Pembahasan berisi hasil data yang telah diakuisisi dari kedua metode dan hasilnya dibandingkan
5. Bab V Penutup berisi kesimpulan yang didapatkan dari penelitian serta saran untuk pengembang lainnya.

BAB II

Tinjauan Pustaka

2.1 Board GY-951 dan YP-05

GY-951 merupakan board *Inertial Measurement Unit* (IMU) yang pada board ini terdapat 3 sensor yaitu 3-sumbu gyroscope, triaxial accelerometer, dan 3-sumbu magnetometer (Okystar, 2017), bentuk board seperti pada Gambar 2.1.

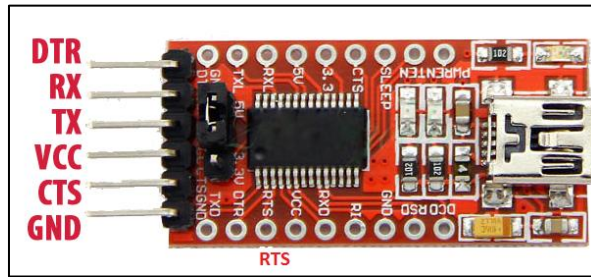


Gambar 2. 1 Board GY-951(sumber : <https://www.okystar.com/gy-951-9dof-atmega328-itg3205-adx1345-hmc5883l>)

Spesifikasi module GY-951:

1. Terdapat 9 sumbu sensor (3 sumbu *gyroscope* + 3 sumbu *accelerometer* + 3 sumbu medan magnet)
2. Menggunakan chip: Atmega328 + ITG3205 + ADXL345 + HMC5883L
3. Power supply: 3-5V
4. Jalur komunikasi serial
5. Data langsung berupa YAW ROLL PITCH
6. Sudut heading (YAW) 180
7. Sudut roll (ROLL) 180
8. Sudut pitch (PITCH) 180
9. Serial Baud Rate: 57600

YP-05 seperti pada gambar 2.2 merupakan board converter antara USB dan TTL serial untuk sebuah project yang memerlukan koneksi USB untuk mengupload program kedalam arduino (iotguider, 2017).



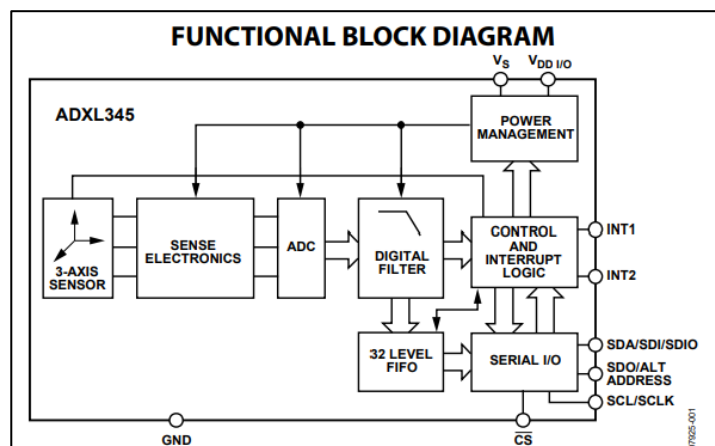
Gambar 2. 2 Board YP-05(sumber : <https://cdtechnologia.net/placas-electronicas/2896-adaptador-usb-ftdi-a-ttl-serial-ft232rl-yp-05>)

Adapun fungsi dari pin yang ada pada board YP-05 yaitu:

1. DTR – Untuk reset device atau hardware lainnya
2. RX – Untuk menerima data serial
3. TX – Untuk transmit data serial
4. VCC – Menyediakan output sebesar 5V atau 3.3V sesuai yang dibutuhkan
5. CTS – Menyalakan atau mematikan mode program pada device
6. GND – Pin ground

2.2 Sensor Accelerometer ADXL345

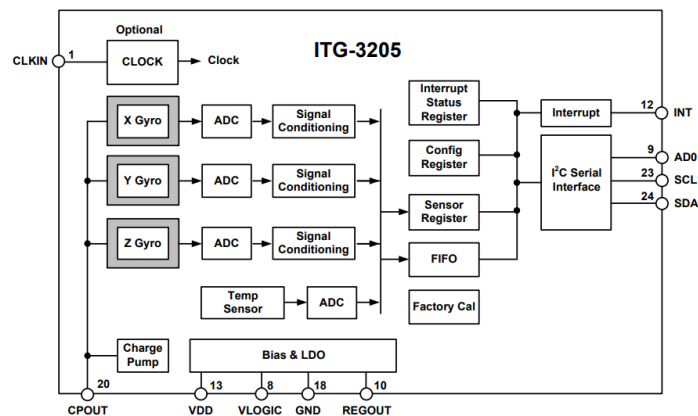
ADXL345 merupakan sensor 3-sumbu accelerometer dengan resolusi pengukuran tinggi (13-bit) hingga ± 16 g, data output digital ada dalam format 16-bit dan dapat di akses melalui SPI (3- atau 4-wire) atau melalui digital interface I2C. Gambar 2.3 menunjukkan blok diagram sensor ADXL345 (Devices, 2009).



Gambar 2. 3 Block Diagram ADXL345

2.3 Sensor Gyro ITG-3205

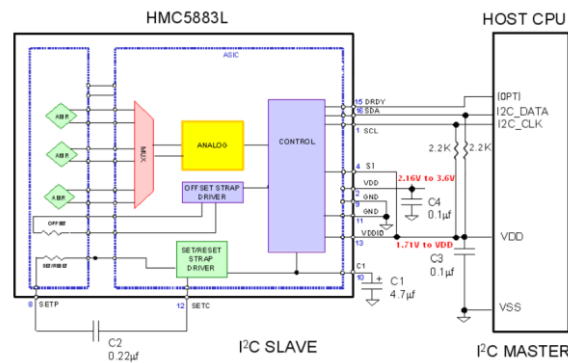
ITG-3205 merupakan sensor 3-sumbu gyroscope yang mampu mendeteksi tingkat rotasi dari sumbu X (roll), Y (pitch), dan Z (yaw). Range full-scale dari sensor gyro ITG-3205 adalah ± 2000 °/s. Sistem komunikasi pada ITG-3205 menuju processor adalah menggunakan interface serial I2C (Sense, 2010), Gambar 2.4 menunjukkan block diagram ITG-3205.



Gambar 2. 4 Block diagram ITG-3205

2.4 Sensor magnetometer HMC5883L

HMC5883L merupakan sensor magnetometer 3-sumbu yang didesain untuk mengukur arah dan besaran dari medan magnet bumi. Sensor ini dapat bekerja pada operasi dengan tegangan yang rendah (2.16 hingga 3.6V) dan daya yang rendah, 12-bit *attitude* dan *determination control* yang dipadukan dengan *anisotropic magnetoresistive* membuat HMC5883L dapat mencapai resolusi 2 mili-gauss pada area 8 gauss, sistem komunikasi yang digunakan pada sensor ini adalah I2C digital interface (Honeywell, 2011). Gambar 2.5 menunjukkan block diagram HMC5883L.



Gambar 2. 5 Block diagram HMC5883L

2.5 Razor 9DOF AHRS

Razor 9DOF (9 Degree Of Freedom) merupakan firmware berbasis firmware AHRS (*Attitude and Heading Reference System*) lama yang disediakan oleh SparkFun yang saat ini telah di update dan dapat digunakan pada module GY-951 atau module Razor lainnya (Bartz, Wang, & Geier, 2019). Beberapa hal yang telah diupdate dari code AHRS yang disediakan oleh SparkFun antara lain:

- Performa sensor yang lebih baik karena kalibrasi sensor
- Mode output binari dan text
- Serial command interface
- Lebih mudah dipahami dan di penyetelan
- Output correct angle dilakukan setelah start-up
- Terdapat test – sketch processing
- Library C++ tersedia untuk Mac OSX, Unix dan Linux
- Library Android tersedia untuk Android 2.0 dan yang terbaru

Secara internal perpaduan antara data dari *accelerometer*, *magnetometer*, dan *gyroscope* dilakukan menggunakan algoritma Direction Cosine Matrix (DCM). Pada firmware Razor 9DOF selain RAZOR_AHRS terdapat 5 file .ino lainnya sebagai subprogram yaitu Compass, DCM, Math, Output, dan Sensors yang memiliki fungsinya tersendiri sebagai berikut:

1. Sensors : untuk inialisasi I2C, inialisasi setiap sensor, dan mendapatkan data raw dari sensor.

2. DCM : merupakan fungsi-fungsi dari DCM yang terdiri dari fungsi Normalize, Drift correction, Matrix_update, dan Euler_angles.
3. Compass : merupakan fungsi untuk kompensasi medan magnet di sumbu X dan Y sebagai penunjuk arah medan magnet.
4. Math : merupakan fungsi – fungsi untuk melakukan perkalian vector cross dan dot, serta inisialisasi matrix rotasi menggunakan *euler angles*.
5. Output : untuk melakukan output berdasarkan mode yang sudah dikonfigurasi.

2.6 Direction Cosine Matrix (DCM) dan Euler Angles

Direction Cosine Matrix atau DCM adalah sebuah matriks transformasi 3x3 yang men-transformasi sebuah koordinat reference frame seperti arah, akselerasi, kecepatan, dan translasi yang merupakan beberapa tipe dari vector. Hal ini memungkinkan untuk merotasi vector dengan dikalikan *matrix direction cosines*. Untuk model pesawat atau helikopter notasi DCM dapat ditulis dengan merotasi vector yang diukur di frame reference dari pesawat (plane) terhadap frame reference dari permukaan (ground) (Premelani & Bizard, 2009).

$Q = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \\ Q_z \end{pmatrix}$ = merupakan sebuah vector seperti arah, kecepatan, atau akselerasi

$R = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{pmatrix}$ = matrix rotasi

$$Q_g = RQ_p$$

Q_g = sebuah vector Q diukur di frame reference dari ground

Q_p = sebuah vector Q diukur di frame reference dari plane

R = matriks transformasi 3x3 yang mentransformasi frame of reference

Untuk menggunakan euler angles matrix R atau juga bisa disebut direction cosine matrix dapat digunakan euler angles dengan komposisi yaw-pitch-roll ($\varphi - \theta - \phi$) dan dapat di tulis dengan notasi $C(\varphi, \theta, \phi)$.

Roll adalah rotasi dari $\emptyset$ yang melawan arah jarum jam pada sumbu X dengan matriks rotasi seperti pada persamaan (2.1).

$$C_x(\emptyset) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\emptyset & \sin\emptyset \\ 0 & -\sin\emptyset & \cos\emptyset \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Pitch adalah rotasi dari θ yang melawan arah jarum jam pada sumbu Y dengan matriks rotasi seperti pada persamaan (2.3).

$$C_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Yaw adalah rotasi dari φ yang melawan arah jarum jam pada sumbu Z dengan matriks rotasi seperti pada persamaan (2.3).

$$C_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Dimasukkan dalam notasi $C(\varphi, \theta, \emptyset)$ sehingga menjadi persamaan seperti pada persamaan (2.5).

$$C(\varphi, \theta, \emptyset) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\emptyset & \sin\emptyset \\ 0 & -\sin\emptyset & \cos\emptyset \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Diimplementasikan terhadap matrix R atau direction cosine matrix sehingga menjadi persamaan (3.6).

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta \cos\varphi & \sin\emptyset \sin\theta - \cos\emptyset \sin\varphi & -\sin\theta \\ \cos\theta \sin\varphi & \sin\emptyset \sin\theta \sin\varphi + \cos\emptyset \cos\varphi & \sin\emptyset \cos\theta \\ -\sin\theta & \sin\emptyset \cos\theta & \cos\emptyset \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

2.7 Filter Kalman

Filter Kalman adalah metode yang digunakan untuk mengurangi noise pada data pengukuran dan memperbaiki estimasi keadaan. Filter Kalman menggunakan model matematis sistem yang telah diketahui dan menggabungkan data pengukuran yang tersedia dengan estimasi keadaan sebelumnya untuk menghasilkan estimasi keadaan yang lebih stabil dan kovarian error yang lebih kecil. Filter Kalman memiliki dua fase utama yaitu prediksi dan update, yang menjalankan perhitungan berulang-ulang untuk memperbarui estimasi keadaan dan error covariance.

Pada fase prediksi ("Predict") estimasi keadaan pada waktu sebelumnya diproyeksikan ke waktu berikutnya menggunakan model sistem yang telah diketahui. Proses ini menghasilkan prediksi keadaan pada waktu berikutnya dan kovarian error yang terkait dengan prediksi tersebut. Fase prediksi dapat dijelaskan dengan persamaan matematis seperti pada persamaan (2.7) untuk prediksi keadaan selanjutnya yang diproyeksikan ke waktu berikutnya dan pada persamaan (2.8) untuk prediksi error kovarian pada waktu berikutnya .

$$x_{k|k-1} = Ax_{(k-1|k-1)} + Bu_k \quad (2.7)$$

$x_{k|k-1}$ = adalah estimasi keadaan terbaru pada waktu k, berdasarkan informasi dari waktu sebelumnya pada waktu $k - 1$.

$x_{(k-1|k-1)}$ = adalah estimasi keadaan pada waktu sebelumnya pada waktu $k - 1$.

A = matrix transisi keadaan yang menghubungkan keadaan sebelumnya dengan keadaan saat ini.

B = adalah matrix kontrol yang menghubungkan masukan kontrol u dengan keadaan.

$$P_{k|k-1} = A_k P_{(k-1|k-1)} A_k^T + Q_{k-1} \quad (2.8)$$

$P_{k|k-1}$ = prediksi error covariance pada waktu k, berdasarkan informasi pada waktu k-1.

$P_{(k-1|k-1)}$ = prediksi kovarian error pada waktu k-1 berdasarkan informasi pada waktu k-1.

Q_{k-1} = matrix kovariansi dari noise yang ada pada sistem pada waktu k-1. Q_{k-1} dapat dianggap sebagai error dalam prediksi keadaan sistem pada tahap prediksi("Predict")

Pada fase ("Correct") informasi pengukuran baru digunakan untuk memperbaiki prediksi keadaan dan error covariance pada waktu berikutnya. Proses ini melibatkan perhitungan residual (selisih antara pengukuran aktual dan prediksi pengukuran), inovasi covariance (kombinasi antara error covariance prediksi dan noise pengukuran), dan gain Kalman (matriks yang menentukan seberapa besar pengaruh pengukuran terhadap estimasi keadaan). Fase update dapat dijelaskan dengan persamaan matematis sebagai berikut seperti pada persamaan (2.9) untuk menghitung residual error, kovarian residual error pada persamaan (2.8), kalman gain pada persamaan (2.10), estimasi keadaan terbaru yang merupakan hasil akhir Kalman pada persamaan (2.11) dan update kovarian error pada persamaan (2.12).

$$y(k) = z(k) - Hx_{k|k-1} \quad (2.9)$$

$y(k)$ = Residual error

$$S(k) = HP_{(k|k-1)}H^T + R(k) \quad (2.10)$$

$S(k)$ = kovarian residual error

$R(k)$ = observasi derau pada pengukuran

$$K_k = \frac{P_{(k|k-1)}H^T}{s(k)} \quad (2.10)$$

K_k = Kalman gain pada waktu k.

$$x_{k|k} = x_{(k|k-1)} + K_k z_k - Hx_{k|k-1} \quad (2.11)$$

$x_{k|k}$ = estimasi keadaan terbaru pada waktu k.

z_k = pengukuran aktual pada waktu k.

$$P_{k|k} = (I - K_k H) P_{(k|k-1)} \quad (2.12)$$

$P_{k|k}$ = kovarian error terbaru pada waktu k.

I = matriks identitas.

2.8 Arduino IDE

Arduino IDE merupakan software open source yang dapat memudahkan untuk menulis serta mengupload program yang dapat digunakan pada semua jenis board Arduino (Arduino, 2022). Pada Arduino IDE Bahasa pemrograman yang didukung adalah C dan C++ yang dapat ditulis dalam kode utama yang disebut

dengan sketch yang akan menghasilkan sebuah file Hex yang nantinya akan di transfer dan diupload kedalam board. Didalam board Arduino terdapat microcontroller yang telah diprogram agar dapat menerima informasi yang berupa file Hex yang telah diupload.

2.9 Mean Absolute Error

MAE (Mean Absolute Error) adalah suatu metrik evaluasi yang umum digunakan dalam pemodelan regresi yaitu untuk menghitung rata-rata kesalahan absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi pada data yang diuji. Semakin kecil nilai MAE, semakin baik kinerja model regresi dalam memprediksi nilai aktual. Rumus menghitung MAE ada pada persamaan 2.13.

$$MAE = \frac{\sum(|y - \hat{y}|)}{n} \quad (2.13)$$

n = Jumlah data yang dievaluasi

y = nilai actual dari data

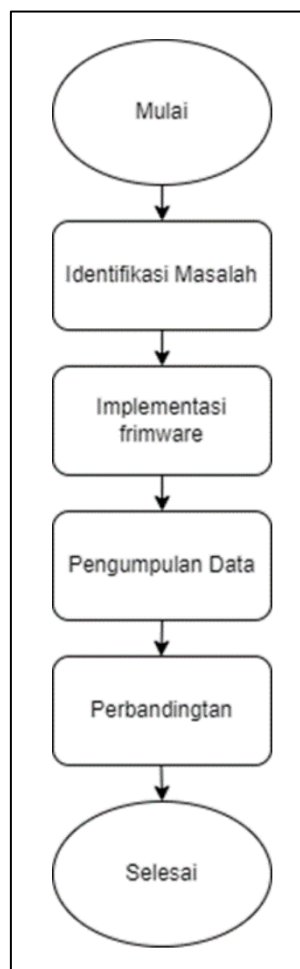
$\hat{y}$ = nilai prediksi dari data

Bab III

Analisis dan Perancangan Sistem

3.1 Alur Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari dan membandingkan suatu metode dengan metode lainnya. Alur penelitian dimulai dengan mengidentifikasi masalah, kemudian dilakukan studi pustaka untuk mempelajari penelitian terdahulu atau yang terkait dengan penelitian ini. Selanjutnya adalah implementasi firmware pada penelitian ini, setelah itu adalah pengumpulan data sehingga dapat dilakukan pengujian dan dibandingkan dengan metode lainnya. Alur penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Alur penelitian

3.2 Identifikasi Masalah

Identifikasi masalah pada penelitian ini ialah bagaimana hasil perbandingan dari filter Kalman serta DCM euler angles dalam mengestimasi tingkat sudut dan arah yang dimana juga mempertimbangkan faktor akurasi, stabilitas, dan sumber daya.

3.3 Studi Pustaka

Studi pustaka pada penelitian ini adalah mencari referensi dari penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian ini. Penelitian yang berkaitan adalah penelitian tentang firmware yang menggunakan metode DCM euler angles dalam fusi sensor inersia serta penelitian yang menggunakan filter Kalman pada sistem orientasi.

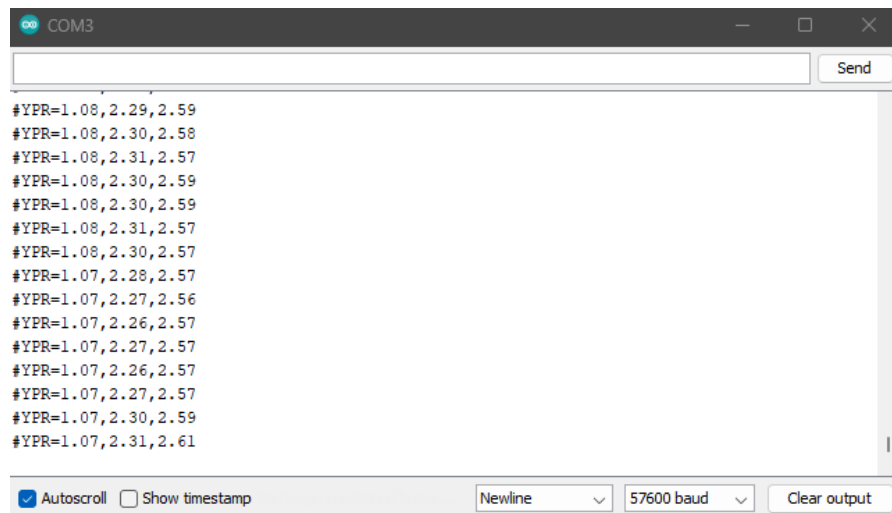
3.4 Implementasi Firmware

Firmware yang akan diimplementasikan pada penelitian ini adalah firmware yang menggunakan filter Kalman untuk dibandingkan dengan firmware Razor AHRS 9DOF yang telah dilakukan studi oleh peneliti pada penelitian sebelumnya pada board GY – 951. Paduan Razor DCM 9DOF AHRS dengan filter Kalman bekerja dengan menggabungkan data sensor inersial dari Razor DCM 9DOF AHRS dengan filter Kalman. Data sensor inersial digunakan sebagai input untuk filter Kalman yang kemudian memperbaiki estimasi keadaan orientasi sistem.

Dalam implementasi paduan ini, output dari Razor DCM 9DOF AHRS menjadi input untuk filter Kalman. Output filter Kalman kemudian digunakan untuk mengontrol perangkat yang terhubung dengan sistem tersebut. Proses prediksi pada filter Kalman dilakukan dengan menggunakan model matematis sistem yang telah diketahui, sedangkan proses update dilakukan dengan menggunakan data pengukuran dari sensor inersial. Filter Kalman digunakan untuk memperbaiki estimasi keadaan pada sistem dengan mengurangi noise pada data pengukuran dan memperbaiki estimasi keadaan orientasi pada sistem.

3.5 Pengumpulan Data

Data yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil output tingkat sudut pada setiap metode yang digunakan yaitu berupa sudut dari yaw, pitch, dan roll. Contoh output data ada pada gambar 3.2 yang merupakan hasil output dari firmware Razor AHRS 9DOF.

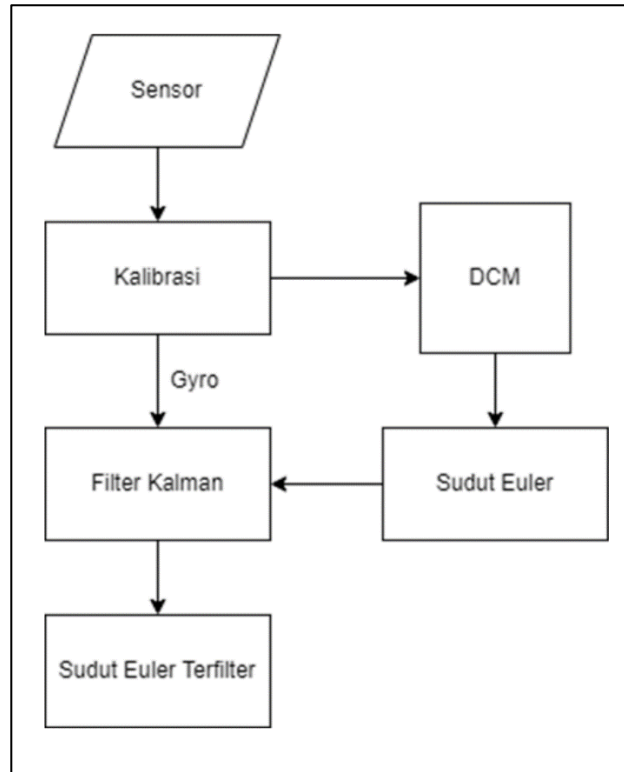


Gambar 3. 2 Hasil output Razor AHRS

3.6 Perbandingan

DCM (Direction Cosine Matrix) dan Kalman filter adalah dua algoritma yang digunakan untuk mengestimasi orientasi suatu objek dalam ruang tiga dimensi. Namun, keduanya memiliki pendekatan yang berbeda. DCM adalah metode yang mengukur orientasi relatif suatu objek terhadap suatu sistem koordinat global, dengan menggunakan matriks rotasi tiga dimensi. Metode ini memerlukan beberapa sensor, seperti accelerometer dan magnetometer, dan dapat menghasilkan estimasi orientasi yang cukup akurat. Kalman filter menggunakan model matematika yang digunakan untuk menggabungkan data dari beberapa sensor yang pada penelitian ini merupakan data yang dihasilkan oleh firmware Razor 9DOF AHRS yang menggunakan DCM pada pengestimasiannya dan menghasilkan estimasi yang lebih akurat. Filter Kalman bekerja dengan memprediksi nilai yang akan datang berdasarkan model sistem, lalu membandingkan prediksi tersebut dengan data yang diterima dari sensor dan melakukan koreksi pada prediksi berikutnya. Selain itu, Kalman filter juga mempertimbangkan noise atau

ketidakpastian lainnya dalam pengukuran sensor. Untuk desain sistem implementasi tersebut diilustrasikan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Ilustrasi blok diagram

Perbandingan yang dilakukan adalah hasil data dari kedua algoritma yang berupa yaw, pitch, dan roll dan hasilnya serta faktor akurasi, stabilitas, dan sumberdaya juga dipertimbangkan. Sebagai acuan nilai sudut maka digunakan MTw Awinda Xsens yang juga menghasilkan nilai tingkat sudut sehingga data dari DCM dan filter Kalman dapat dihitung dan dibandingkan yang dimana nilai peyimpanganya sudutnya terhadap Awinda Xsens adalah sebagai nilai error.



Gambar 3. 4 MTw Awinda Xsens

Bab IV

Hasil dan Pembahasan

4.1 Akuisisi data Euler dan Gyroscope

Pada implementasi sebelum menuju filter Kalman perlu didapatkan nilai sudut dari DCM untuk diolah pada filter Kalman.

```
1 void Euler_angles(void)
2 {
3     pitch = -asin(DCM_Matrix[2][0]);
4     roll = atan2(DCM_Matrix[2][1], DCM_Matrix[2][2]);
5     yaw = atan2(DCM_Matrix[1][0], DCM_Matrix[0][0]);
6 }
```

Gambar 4. 1 Kode

Fungsi void Euler_angles() merupakan fungsi untuk mendapatkan nilai dari yaw pitch dan roll dengan orientasi yang telah diestimasi menggunakan DCM dengan persamaan nilai pitch (4.1), roll (4.2), dan yaw (4.3).

$$pitch = -\arcsin(r_{zx}) \quad (4.1)$$

$$roll = \text{atan2}(r_{zy}, r_{zz}) \quad (4.2)$$

$$yaw = \text{atan2}(r_{yx}, r_{xx}) \quad (4.3)$$

Kecepatan sudut juga digunakan pada kalman filter karena dengan melibatkan kecepatan sudut maka filter dapat memprediksi keadaan sistem dengan lebih akurat dengan membantu mengurangi dampak dari derau atau kebisingan pengukuran pada saat estimasi. Kecepatan sudut didapatkan dari data gyroscope yang telah dikonversi menjadi besaran vector.

```
1 Gyro_Vector[0]=GYRO_SCALED_RAD(gyro[0]);
2 Gyro_Vector[1]=GYRO_SCALED_RAD(gyro[1]);
3 Gyro_Vector[2]=GYRO_SCALED_RAD(gyro[2]);
```

Gambar 4. 2 Kode

Data gyro pada gambar kode 4.2 yang digunakan pada Kalman filter merupakan data dari sensor internal gyroscope yang telah dikalibrasi dan skalarnya dirubah ke radian.

4.2 Estimasi dengan Kalman filter

Hasil estimasi filter dengan filter Kalman dapat bervariasi tergantung pada aplikasi dan data yang digunakan namun dalam kasus ini Kalman filter digunakan untuk estimasi sudut.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengujian filter dengan Kalman antara lain:

1. Kualitas pengamatan: Semakin baik kualitas pengamatan yang digunakan, semakin akurat hasil filter Kalman.
2. Model sistem: Model sistem yang digunakan dalam filter Kalman harus seakurat mungkin untuk memastikan hasil yang optimal.
3. Pengaturan filter: Konfigurasi filter Kalman yang optimal harus dipilih dan disesuaikan dengan aplikasi yang diinginkan.
4. Karakteristik sinyal: Sinyal yang digunakan harus dipertimbangkan, seperti keadaan non-linieritas dan keacakan.

Sebelumnya pada sub bab 4.1 telah diakuisisi sudut Euler berupa yaw, pitch, dan roll dan data kecepatan sudut dari gyroscope yang kemudian akan digunakan pada filter Kalman.

```
1 kalAngleX = kalmanX.getAngle(TO_DEG(roll),  
    Gyro_Vector[0], G_Dt);  
2 kalAngleY = kalmanY.getAngle(TO_DEG(pitch) ,  
    Gyro_Vector[1], G_Dt);  
3 kalAngleZ = kalmanZ.getAngle(TO_DEG(yaw) ,  
    Gyro_Vector[2], G_Dt);
```

Gambar 4. 3 Kode

Pada gambar kode 4.3 mengimplementasikan filter Kalman untuk memperkirakan sudut roll, pitch, dan yaw dengan data yaw, pitch, dan roll dari Razor imu 9DOF AHRS dan data kecepatan sudut dari gyroscope yang telah telkalibrasi.

Baris kode ke 1 menggunakan instance filter Kalman bernama kalmanX untuk memperkirakan sudut roll berdasarkan pengukuran gyroscope pada sumbu X (Gyro_Vector[0]) dan interval waktu antar pengukuran (G_Dt). TO_DEG adalah fungsi yang mengonversi sudut roll dari radian ke derajat. Baris kode ke 2 seperti

baris kode sebelumnya yaitu memperkirakan sudut pitch berdasarkan pengukuran gyroscope pada sumbu Y (Gyro_Vector[1]) dan interval waktu antar pengukuran (G_Dt). Baris kode ke 3 memperkirakan sudut yaw berdasarkan pengukuran gyroscope pada sumbu Z (Gyro_Vector[2]) dan interval waktu antar pengukuran (G_Dt). Setiap sudut yang diperkirakan disimpan dalam variabel terpisah (kalAngleX, kalAngleY, dan kalAngleZ)

```

1  Kalman::Kalman() {
2      Q_angle = 0.001f;
3      Q_bias = 0.003f;
4      R_measure = 0.03f;
5      angle = 0.0f;
6      bias = 0.0f;
7      P[0][0] = 0.0f;
8      P[0][1] = 0.0f;
9      P[1][0] = 0.0f;
10     P[1][1] = 0.0f;
11 };

```

Gambar 4. 4 Kode

Pada gambar kode 4.4 kode 1 - 11 merupakan konstruktor untuk kelas Kalman. Konstruktor ini digunakan untuk menginisialisasi variabel-variabel yang digunakan dalam filter Kalman untuk mengestimasi nilai sudut dari sensor.

Pada baris kode ke 1 konstruktor menginisialisasi tiga variabel utama dari filter Kalman yaitu Q_angle, Q_bias, dan R_measure. Variabel-variabel ini bisa disesuaikan dengan kondisi penggunaan filter Kalman tertentu. Secara umum, Q_angle dan Q_bias digunakan untuk menentukan tingkat kepercayaan pada model sistem dan pengukuran sensor masing-masing, sedangkan R_measure digunakan untuk menentukan tingkat kepercayaan pada nilai pengukuran sensor. Selanjutnya, variabel angle dan bias direset ke nilai awal yaitu 0.0 dan matriks P diinisialisasi ke nilai 0.0 untuk mengasumsikan bahwa bias awal dari pengukuran sensor adalah 0.0 dan nilai sudut awal sudah diketahui. Matriks P digunakan untuk merepresentasikan ketidakpastian dari estimasi sudut dan bias.

Gambar kode 4.5 baris kode 1- merupakan implementasi dari algoritma filter Kalman pada sebuah fungsi bernama "getAngle". Fungsi ini memiliki tiga parameter masukan, yaitu "newAngle" yang merupakan pengukuran sudut terbaru, "newRate" yang merupakan pengukuran perubahan sudut terbaru, dan "dt" yang merupakan selang waktu antara dua pengukuran. Fungsi ini mengembalikan nilai sudut yang sudah diproses oleh filter Kalman.

```

1  float Kalman::getAngle(float newAngle, float newRate,
   float dt) {
2      rate = newRate - bias;
3      angle += dt * rate;
4      P[0][0] += dt * (dt*P[1][1] - P[0][1] - P[1][0] +
   Q_angle);
5      P[0][1] -= dt * P[1][1];
6      P[1][0] -= dt * P[1][1];
7      P[1][1] += Q_bias * dt;
8      float S = P[0][0] + R_measure;
9      float K[2];
10     K[0] = P[0][0] / S;
11     K[1] = P[1][0] / S;
12     float y = newAngle - angle; // Angle difference
13     angle += K[0] * y;
14     bias += K[1] * y;
15
16     float P00_temp = P[0][0];
17     float P01_temp = P[0][1];
18     P[0][0] -= K[0] * P00_temp;
19     P[0][1] -= K[0] * P01_temp;
20     P[1][0] -= K[1] * P00_temp;
21     P[1][1] -= K[1] * P01_temp;
22     return angle;
23 };

```

Gambar 4. 5 kode

Fungsi ini terdiri dari beberapa langkah yang mencakup dua tahap pada algoritma filter Kalman, yaitu tahap Time Update ("Predict") dan tahap Measurement Update ("Correct"). Algoritma dimulai pada tahap time update yang mengimplementasikan filter Kalman ("Predict") yaitu :

1. Menghitung nilai rate sebenarnya yang akan menjadi variable kontrol $u(k)$ dengan mengurangi nilai "bias" dari "newRate" kemudian pada baris kode ke 2 dan pada baris ke 3 mengupdate angle dan menjadi estimasi keadaan terbaru $x(k|k-1)$ dengan dt dan rate .

$$x(k|k-1) = Ax(k-1|k-1) + Bu(k)$$

2. Pada baris ke 4-7 Memperbarui matriks kovarian estimasi kesalahan dengan menghitung error kovarian $P(k|k-1)$.

$$P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A' + Q(k-1)$$

Setelah langkah 2 ini adalah tahap measurement Update ("Correct").

3. Pada baris 12 menghitung selisih antara pengukuran sudut terbaru dan sudut aktual $z(k)$ pada tahap time update ("Predict").

$$y(k) = z(k) - Hx(k|k-1)$$

4. Kode baris 8-11 Menghitung faktor Kalman gain ($K(k)$) yang diperlukan untuk memperbarui estimasi sudut dan bias. Faktor ini tergantung pada matriks P dan R_{measure} $R(k)$ yang merupakan kovarian estimasi error.

$$S(k) = HP(k|k-1)H' + R(k)$$

$$K(k) = P(k|k-1)H'/S(k)$$

5. Pada baris kode ke 13 - 14 yaitu memperbarui estimasi sudut dan bias dengan menggunakan faktor Kalman gain dan selisih sudut yang telah dihitung pada langkah ke-3 dan perkalian kalman gain $K(k)$ dengan pengukuran terbaru ($z(k)$). Pada langkah ini gain Kalman digunakan untuk menghitung berapa banyak bobot yang harus diberikan pada pengukuran aktual dan estimasi sudut terbaru $x(k|k-1)$. Gain Kalman $K(k)$ memperhitungkan ketidakpastian dalam pengukuran aktual dan estimasi state sebelumnya dan menyesuaikan bobotnya untuk menghasilkan angle $x(k|k)$. Setelah itu, estimasi state dan kovarian error diperbarui dengan menggunakan Kalman gain dan pengukuran actual $z(k)$.

$$y(k) = z(k) - Hx(k|k-1)$$

$$x(k|k) = x(k|k-1) + K(k)y(k)$$

6. Pada baris kode 16 – 21 memperbarui kembali matriks kovarian estimasi error dengan menggunakan faktor Kalman gain dan matriks P pada tahap Time Update ("Predict").

$$P(k|k) = (I - K(k)H)P(k|k-1)$$

Setelah semua langkah diatas dilakukan fungsi akan mengembalikan nilai sudut yang telah diproses oleh filter Kalman dengan variabel angle.

```
1 Serial.print(kalAngleZ);  
2 Serial.print(kalAngleY);  
3 Serial.print(kalAngleX);
```

Gambar 4. 6 Kode

Pada gambar kode 4.6 baris 1-3 merupakan keluaran sudut yang telah difilter menggunakan filter Kalman dan dapat di akuisisi.

4.3 Hasil pengujian dengan Awinda Xsens

Setelah data DCM diakuisisi dan data dari filter Kalman selanjutnya nilai sudut akan dibandingkan dengan nilai yang dihasilkan oleh awinda xsens. Dari data - data tersebut nilai penyimpangan atau error yang paling kecil terhadap awinda xsens merupakan data sensor yang lebih baik.

Pada pengujian akan terdapat beberapa skenario pengujian, untuk setiap sumbu akan terdapat 2 skenario untuk setiap sumbu sehingga akan ada 4 skenario jika terdapat 2 sumbu yang diuji yaitu sumbu pitch(y) dan roll(x), skenario yang dimaksud adalah sebagai berikut :

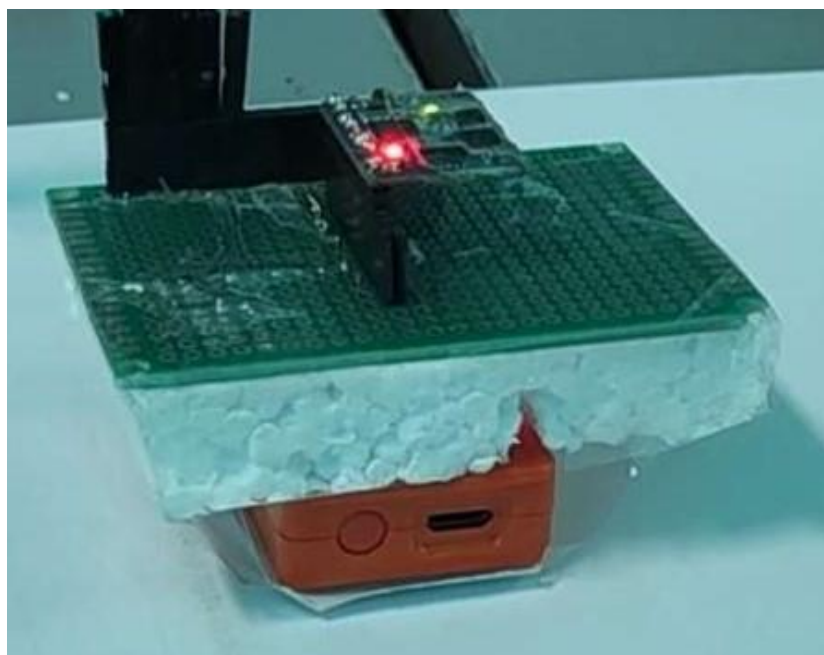
1. Skenario 1 sumbu y diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar normal.
2. Skenario 2 sumbu y diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar cepat.
3. Skenario 3 sumbu x diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar normal.
4. Skenario 4 sumbu x diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar cepat.

Pada saat pengujian kedua metode DCM dan filter Kalman berjalan secara bersamaan sehingga data juga diakuisisi bersamaan pada setiap skenarionya. Seperti pada gambar akuisisi data 4.7 merupakan data sensor DCM dan filter Kalman diakuisisi secara bersamaan menggunakan data streamer pada Microsoft excel.

TIME	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9
14:24:48.26	6.78 and 6.82 -0.80 and -0.79								
14:24:48.28	6.76 and 6.82 -0.83 and -0.80								
14:24:48.31	6.76 and 6.81 -0.82 and -0.80								
14:24:48.32	6.79 and 6.81 -0.83 and -0.80								
14:24:48.34	6.81 and 6.81 -0.87 and -0.81								
14:24:48.36	6.79 and 6.81 -0.90 and -0.81								
14:24:48.39	6.81 and 6.81 -0.90 and -0.82								
14:24:48.41	6.78 and 6.81 -0.88 and -0.82								
14:24:48.42	6.77 and 6.81 -0.86 and -0.82								
14:24:48.45	6.77 and 6.81 -0.87 and -0.83								
14:24:48.47	6.77 and 6.80 -0.87 and -0.83								
14:24:48.49	6.81 and 6.80 -0.86 and -0.83								
14:24:48.50	6.85 and 6.81 -0.82 and -0.83								
14:24:48.53	6.86 and 6.81 -0.78 and -0.83								

Gambar 4. 7 Akuisisi data

Sebagai acuan digunakan Awinda Xsens dan agar data Awinda Xsens dengan DCM dan filter Kalman dapat diakuisisi secara bersamaan maka kedua board GY-951 dan Awinda Xsens ditumpuk seperti pada gambar 4.8 dan akan diputar secara bersamaan sesuai dengan scenario pengujiannya.



Gambar 4. 8 Board GY-951 dan Awinda Xsens

4.3.1 Hasil pengujian sekenario 1

Pada sekenario 1 sumbu y diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar normal.

Tabel 4. 1 Hasil uji sumbu y putaran normal

No	y_dcm	y_kalman	y_awinda
1	7.11	5.89	1.120095
2	6.95	5.94	1.36199
3	7.48	6.02	1.539086
4	8.33	6.13	1.732947
5	8.19	6.24	1.91881
6	7.97	6.33	2.101191
7	8.06	6.42	2.280355
8	8.04	6.49	2.632989
9	7.93	6.55	2.948781
10	6.98	6.58	3.130114
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
495	6	18.34	0.618557
496	6	18.36	0.580305
497	5.97	18.34	0.561896
498	5.98	18.33	0.567079
499	6.01	18.29	0.598608
500	6.11	17.89	0.48199

Dari data yang diakuisisi yaitu sebanyak 500 data selanjutnya data pitch dari DCM dan Kalman akan dihitung errornya terhadap data dari awinda xsens menggunakan MAE (Mean Absolute Error).

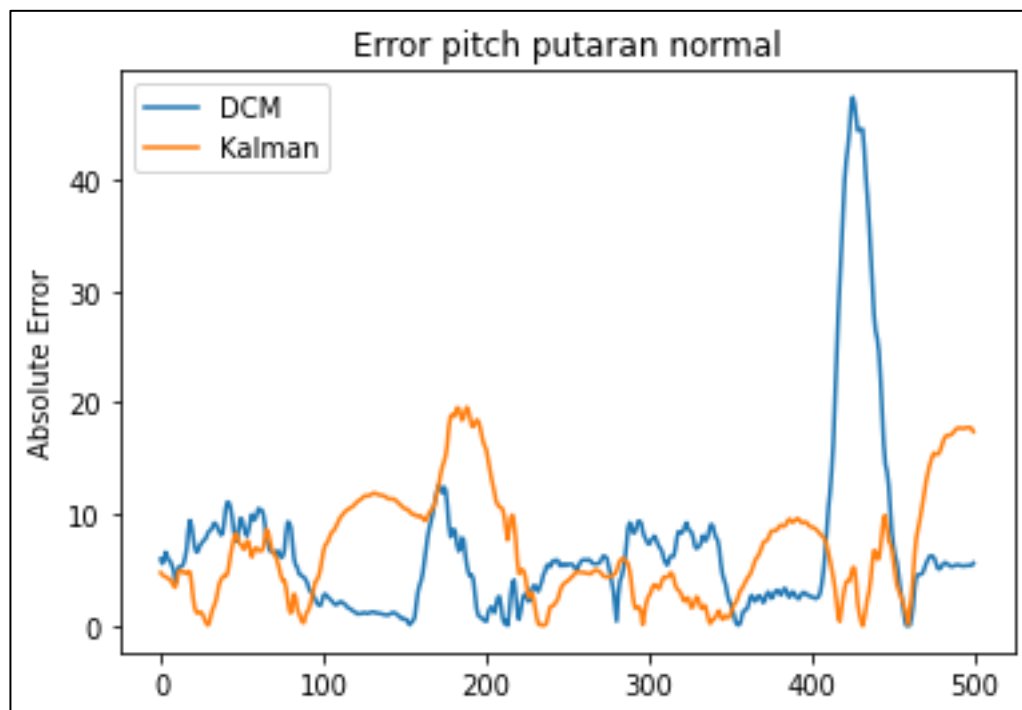
$$\begin{aligned}
 &\text{MAE dcm terhadap awinda} \\
 MAE &= \frac{\sum(|y_{dcm} - y_{awinda}|)}{500} \\
 &= 6,968941^\circ
 \end{aligned}$$

MAE Kalman terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|y_{kalman} - y_{awinda}|)}{500}$$
$$= 7,00237^\circ$$

Rata – rata penyimpangan sudut atau error dari pitch DCM dan awinda sebesar $6,968941^\circ$ sedangkan rata – rata penyimpangan sudut atau error dari Kalman dan awinda sebesar $7,00237^\circ$.

Dari rata- rata error oleh sudut pitch DCM dan filter Kalman perbedaan errornya adalah sebesar $0,033429^\circ$.



Gambar 4. 9 Plot error pitch putaran normal

4.3.2 Hasil pengujian sekenario 2

Pada sekenario 2 sumbu y diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan lebih cepat.

Tabel 4. 2 Hasil uji sumbu y putaran cepat

No	y_dcm	y_kalman	y_awinda
1	4.21	4.91	-0.94194
2	4.25	4.85	-0.8858
3	4.22	4.8	-0.92913
4	4.11	4.74	-0.93955
5	4.11	4.69	-0.78708
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
298	5.83	16.8	2.08473
299	5.68	16.83	1.823104
300	5.63	16.87	1.564631

Dari data yang diakuisisi sebanyak 300 data selanjutnya data pitch dari dcm dan Kalman yang diputar lebih cepat akan dihitung errornya terhadap data dari awinda xsens menggunakan MAE (Mean Absolute Error).

MAE dcm terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|y_{dcm} - y_{awinda}|)}{500}$$

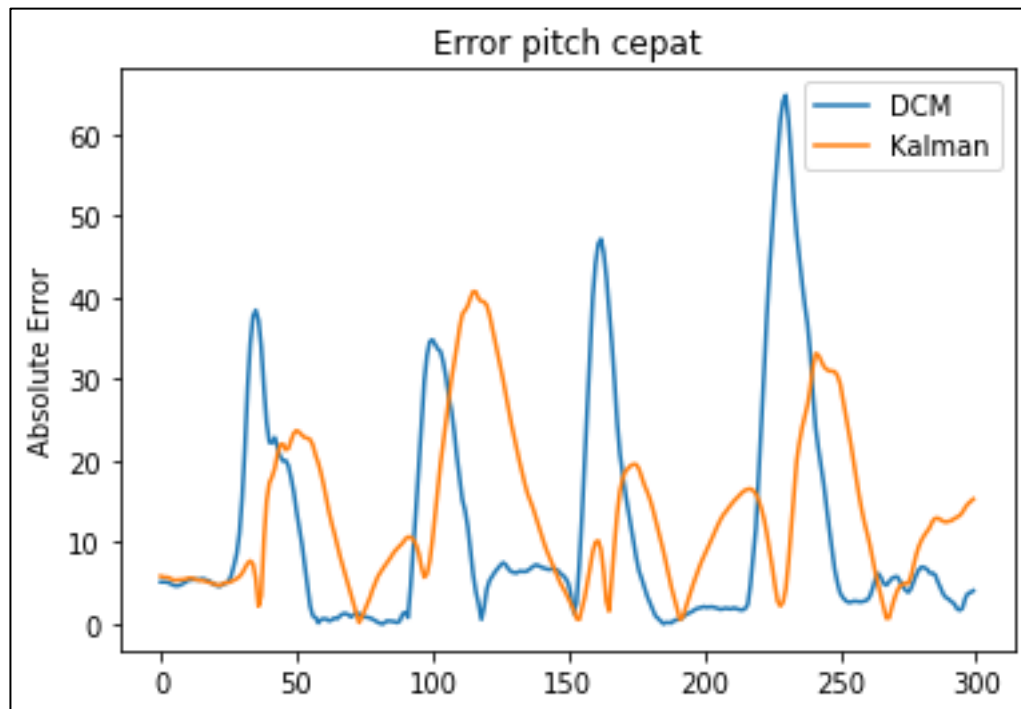
$$= 11,62981^\circ$$

MAE Kalman terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|y_{kalman} - y_{awinda}|)}{500}$$

$$= 13,36923^\circ$$

Rata – rata penyimpangan sudut atau error dari pitch DCM dan awinda sebesar $11,62981^\circ$ sedangkan rata – rata penyimpangan sudut atau error dari Kalman dan awinda sebesar $13,36923^\circ$ kemudian dari rata- rata error oleh sudut pitch DCM dan filter Kalman perbedaan errornya adalah sebesar $1,73942^\circ$.



Gambar 4. 10 error pitch putaran cepat

4.3.3 Hasil pengujian sekenario 3

Pada sekenario 3 sumbu x diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar normal.

Tabel 4. 3 Hasil uji sumbu x putaran normal

No	x_dcm	x_kalman	x_awinda
1	-0.44	-0.05	0.555728
2	-0.62	-0.08	0.383768
3	-0.46	-0.1	0.199006
4	-0.56	-0.13	0.202722
5	-0.69	-0.16	0.305054
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
485	-1.97	-16.79	-1.98197
486	-1.85	-16.82	-2.21132
487	-1.7	-16.79	-2.56589
488	-1.08	-16.74	-2.83499
489	-0.72	-16.64	-2.84124
490	-0.53	-16.52	-2.78473

Dari data yang diakuisisi selanjutnya data pitch dari dcm dan Kalman yang diputar lebih cepat akan dihitung errornya terhadap data dari awinda xsens menggunakan MAE (Mean Absolute Error).

MAE dcm terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|x_{dcm} - x_{awinda}|)}{490}$$

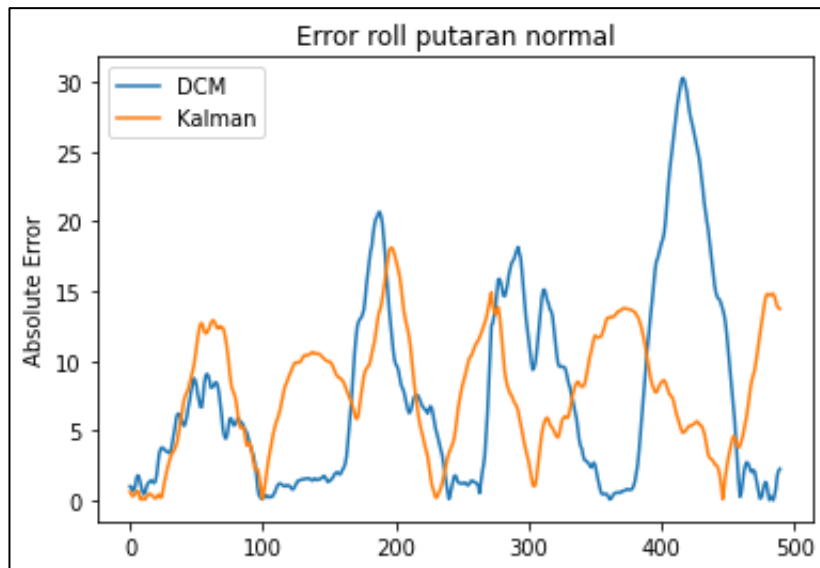
$$= 7,530184^\circ$$

MAE Kalman terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|x_{kalman} - x_{awinda}|)}{490}$$

$$= 7,815051^\circ$$

Rata – rata penyimpangan sudut atau error dari pitch DCM dan awinda sebesar $7,530184^\circ$ sedangkan rata – rata penyimpangan sudut atau error dari Kalman dan awinda sebesar $7,815051^\circ$ kemudian dari rata- rata error oleh sudut roll DCM dan filter Kalman perbedaan errornya adalah sebesar $0,284867^\circ$.



Gambar 4. 11 error roll putaran normal

4.3.4 Hasil pengujian sekenario 4

Pada sekenario 4 sumbu x diputar sebesar 90° dan sebaliknya sebesar 90° dengan kecepatan putar lebih cepat.

Tabel 4. 4 Hasil uji sumbu x putaran cepat

No	x_dcm	x_kalman	x_awinda
1	-1.19	-1.52	-0.43906
2	-1.35	-1.52	-0.53217
3	-1.8	-1.54	-0.51111
4	-3.08	-1.65	-0.43188
5	-6.11	-1.93	-0.36335
6	-11.27	-2.5	-0.34813
7	-20.07	-3.54	-0.45121
8	-30.06	-5.06	-0.68807
9	-40.99	-7.06	-1.08421
10	-49.68	-9.37	-2.25988
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
214	1.03	10.51	-3.37084
215	1.25	9.58	-3.70559
216	1.28	8.72	-3.87117
217	1.37	7.89	-3.61985
218	1.11	7.05	-3.08917
219	0.78	6.26	-2.28312
220	0.41	5.46	-1.17257

Dari data yang diakuisisi selanjutnya data pitch dari dcm dan Kalman yang diputar lebih cepat akan dihitung errornya terhadap data dari awinda xsens menggunakan MAE (Mean Absolute Error).

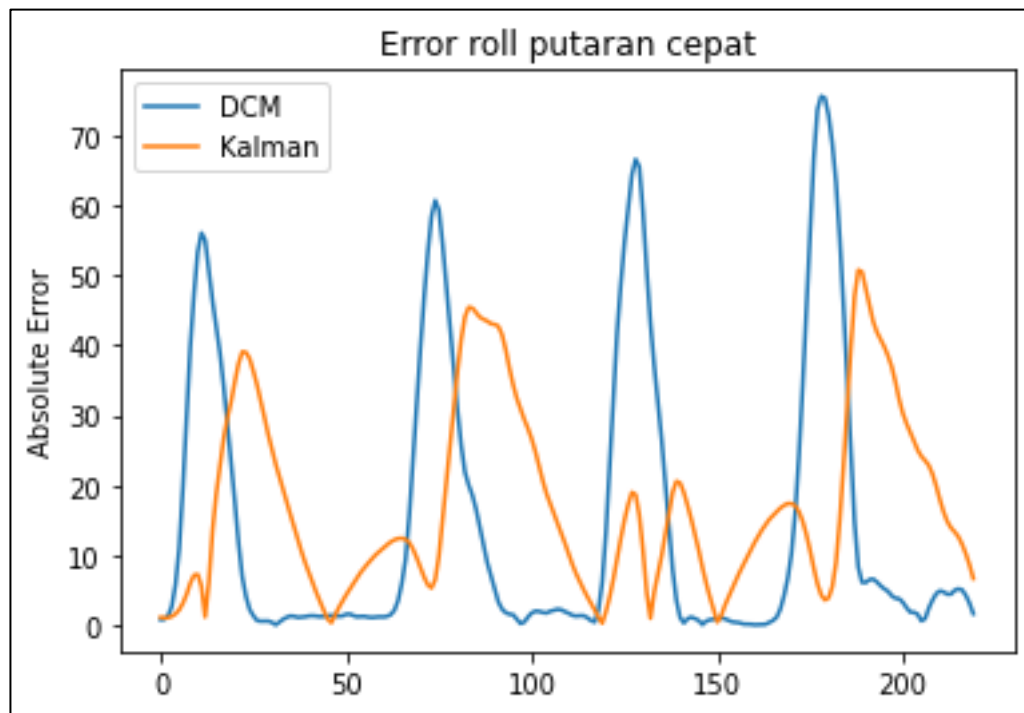
$$\begin{aligned}
 &\text{MAE dcm terhadap awinda} \\
 MAE &= \frac{\sum(|x_{dcm} - x_{awinda}|)}{220} \\
 &= 14,88291^\circ
 \end{aligned}$$

MAE Kalman terhadap awinda

$$MAE = \frac{\sum(|x_{kalman} - x_{awinda}|)}{220}$$

$$= 17,28564^\circ$$

Rata – rata penyimpangan sudut atau error dari pitch DCM dan awinda sebesar $0,015368^\circ$ sedangkan rata – rata penyimpangan sudut atau error dari Kalman dan awinda sebesar $0,015949^\circ$ kemudian dari rata- rata error oleh sudut roll DCM dan filter Kalman perbedaan errornya adalah sebesar $2,40273^\circ$.



Gambar 4. 12 error roll putaran cepat

4.3.5 Diskusi

Dalam hasil pengujian didapatkan MAE dari pitch dan roll dari setiap skenario pengujian didapatkan hasil pengujian seperti pada tabel pengujian MAE.

Tabel 4. 5 Hasil uji MAE

	y_dcm	y_kalman	x_dcm	x_kalman	selisih y	selisih x
normal	6,968941	7,00237	7,530184	7,815051	0,033429	0,284867
cepat	11,62981	13,36923	14,88291	17,28564	1,73942	2,40273

Pada pengujian tersebut didapatkan nilai error baik DCM maupun filter Kalman memiliki nilai error yang tinggi yaitu sekitar $6^{\circ} - 14^{\circ}$ pada DCM dan $7^{\circ} - 17^{\circ}$ pada filter Kalman. Kecepatan putar juga mempengaruhi error nya yaitu semakin cepat putaran maka nilai error semakin tinggi. Kemudian untuk selisih error antara DCM dan filter Kalman, error pada filter Kalman relatif lebih besar yaitu pada putaran normal selisih error Kalman dan DCM pada sumbu y sekitar $0,03^{\circ}$ dan pada sumbu x sekitar $0,2^{\circ}$. Pada putaran cepat selisih mencapai $1^{\circ} - 2^{\circ}$ yaitu sekitar $1,7^{\circ}$ pada sumbu y dan sekitar $2,4^{\circ}$ pada sumbu x. Nilai -nilai error dari filter Kalman masih dapat di tuning dengan penyesuaian parameter – parameter pada filter Kalman seperti matrix kovarian dan Kalman gain untuk mendapatkan tingkat akurasi yang dibutuhkan maka dari itu kebutuhan tuning parameter yang tepat juga mempengaruhi hasil error.

Penggunaan kedua algoritma secara bersamaan juga akan memerlukan sumber daya komputasi yang lebih besar, terutama jika jumlah sensor yang digunakan untuk mengukur orientasi objek dan variabel terukur lainnya cukup besar seperti pada DCM memerlukan sumberdaya komputasi yang besar karena melibatkan beberapa operasi matematika seperti matrix rotasi, cross product, dan integrasi numerik. Karena itu penggunaan DCM dan filter Kalman secara bersamaan harus dipertimbangkan dengan baik terutama dalam hal sumber daya komputasi yang tersedia dan kebutuhan akurasi yang diinginkan. Dalam hasil pengujian ini penggunaan kedua algoritma DCM pada firmware Razor 9DOF AHRS dan filter Kalman pada GY-951 masih belum menimbulkan masalah performa sehingga masih belum diperlukan optimasi lebih lanjut.

Bab V

Penutup

5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik simpulan pada DCM akurasi lebih baik daripada filter Kalman. Dengan menghitung nilai error terhadap Awinda Xsens yang dimana hasil error filter Kalman selalu lebih besar pada setiap hasil uji skenarionya yaitu pada putaran normal pada sumbu y $0,03^\circ$ lebih besar dan pada sumbu x lebih besar $0,2^\circ$, kemudian pada putaran cepat pada sumbu y $1,7^\circ$ dan pada sumbu x lebih besar $2,4^\circ$. Pada saat pengujian ketika dua algoritma dijalankan di board GY – 951 tidak menimbulkan kendala performa.

5.2 Saran

Saran untuk pembuatan atau pengembangan project menggunakan DCM dari firmware razor AHRS atau filter Kalman pada board GY-951 :

1. Menentukan metode yang tepat antara DCM atau filter Kalman.
2. Menentukan nilai error yang dapat diterima pada pengaplikasiannya.

Daftar Pustaka

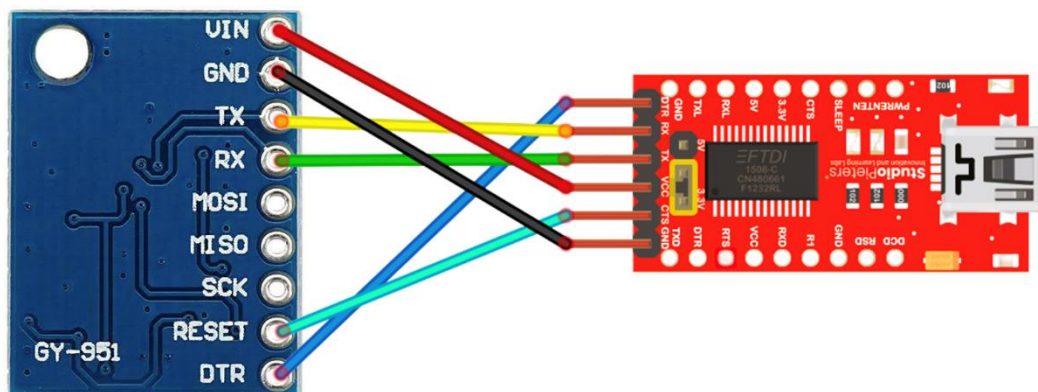
- Arduino. (2022). *Arduino IDE*. Retrieved from Arduino.cc: <https://www.arduino.cc/en/software>
- Aroran, A. M. (2017). *A Kalman Filter*. Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma.
- Bartz, P., Wang, J., & Geier, M. (2019). Building an AHRS using the SparkFun "9DOF Razor IMU" or "9DOF Sensor Stick".
- Devices, A. (2009). Digital Accelerometer. *ADXL345*.
- Honeywell. (2011). 3-Axis Digital Compass IC HMC5883L.
- iotguider. (2017). *iotguiderGetting Started Guide for Internet of Things*. Retrieved from iotguider: <https://iot-guider.com/ftdi-usb-to-ttl/programming-using-ftdi-usb-to-ttl-serial/>
- Leccadito, M. (2013). A Kalman Filter Based Attitude Heading Reference System Using a Low Cost Inertial Measurement Unit.
- Okystar. (2017). *okytar*. Retrieved from OKY3238: <https://www.okystar.com/product-item/gy-951-9dof-atmega328-itg3205-adxl345-hmc5883l-9-axis-inertial-navigation-compass-module-oky3238/>
- Premelani, W., & Bizard, P. (2009). Direction Cosine Matrix IMU: Theory.
- Sense, I. (2010). ITG-3205 Product Specification. p. 5.

Lampiran

Rangkaian

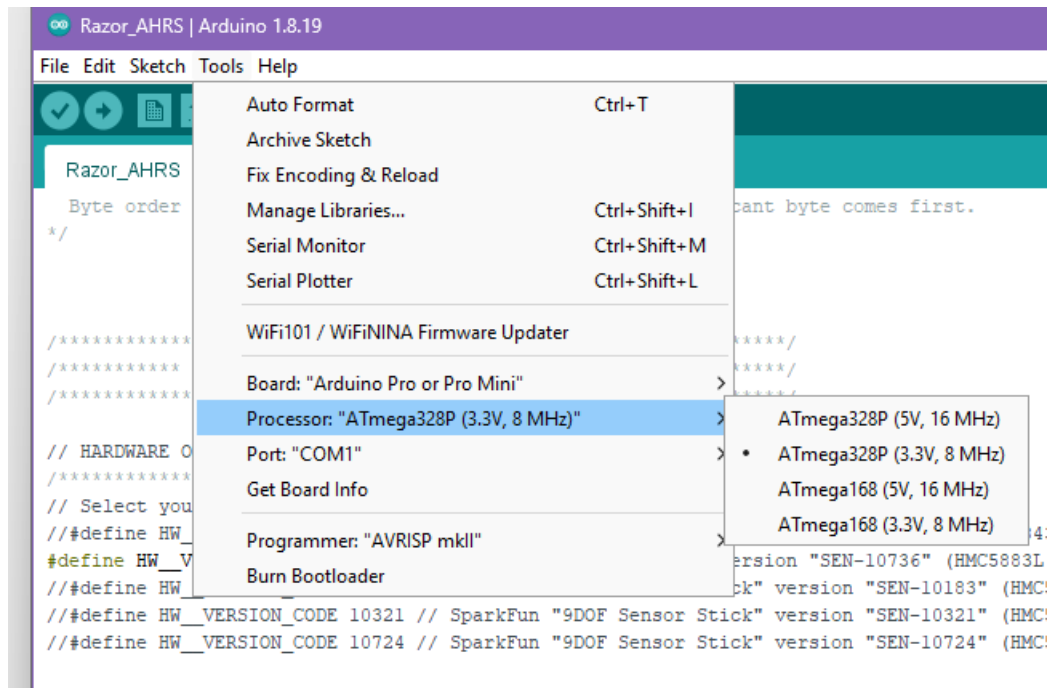
Hal yang perlu diperlukan adalah board GY-951 dan board YP-05, dan kabel jumper. Setelah itu sambungkan board GY-951 dan YP-05 sesuai dengan layout berikut:

VIN	VCC
GND	GND
TX	RX
RX	TX
Reset	CTS
DTR	DTR

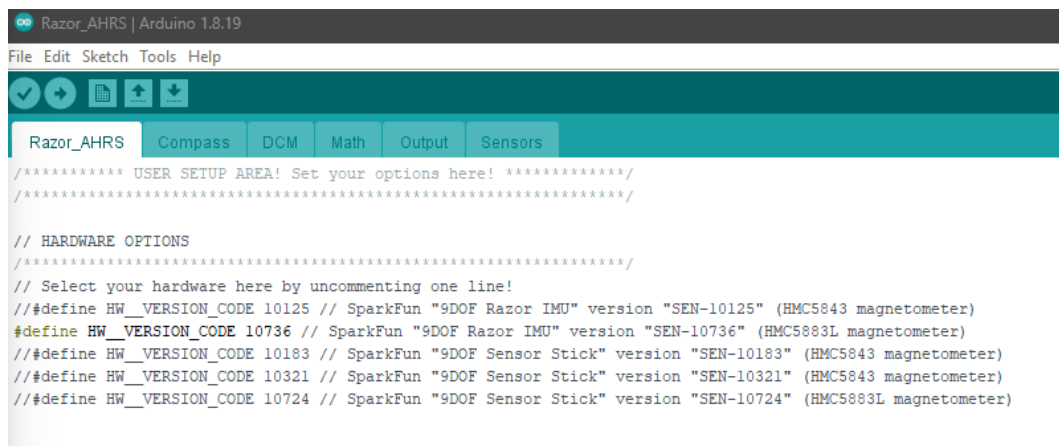


Pengaturan Firmware

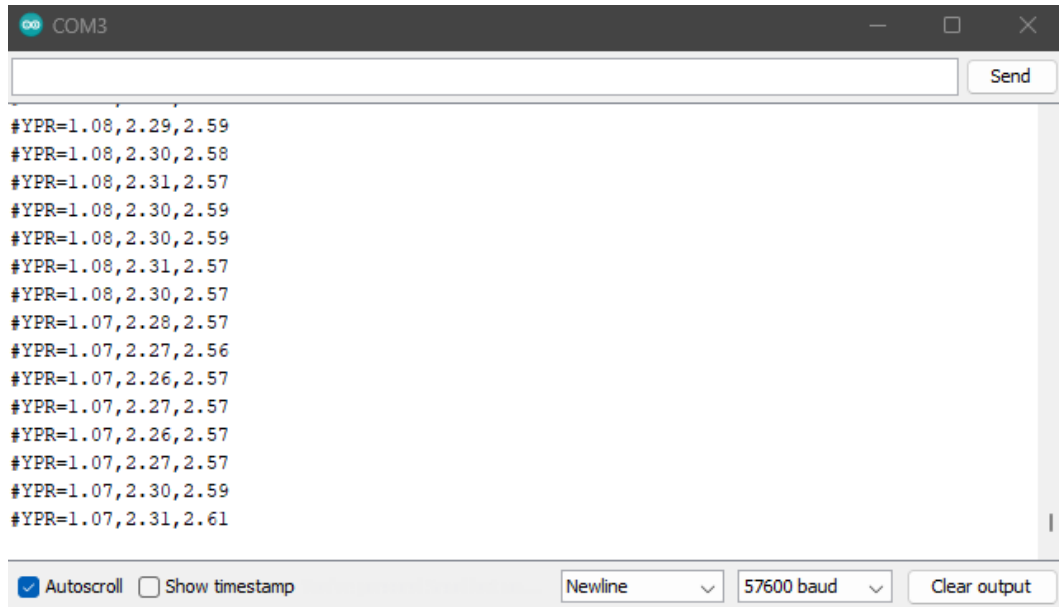
Mula – mula download firmware Razor AHRS dari github, setelah itu buka file Razor_AHRS.ino menggunakan software Arduino. Pada Arduino pada bagian atas di file Razor_AHRS.ino masuk ke tools kemudian pada bagian board pilih “Arduino pro or mini” dan pada bagian “processor” pilih Atmega328 3.3v 8MHz.



Karena board GY-951 merupakan IMU dan jenis sensor magnetometer merupakan HMC5883L maka pada versi hardware yang dipilih adalah versi hardware dengan kode 10736.



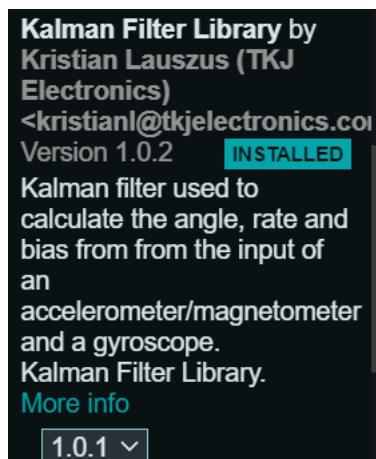
Untuk melakukan tes dan melihat hasil output, pada bagian “tools” pilih “serial number monitor” dan ubah baud rate menjadi 57600 maka hasil output akan seperti gambar berikut:



```
#YPR=1.08,2.29,2.59
#YPR=1.08,2.30,2.58
#YPR=1.08,2.31,2.57
#YPR=1.08,2.30,2.59
#YPR=1.08,2.30,2.59
#YPR=1.08,2.31,2.57
#YPR=1.08,2.30,2.57
#YPR=1.07,2.28,2.57
#YPR=1.07,2.27,2.56
#YPR=1.07,2.26,2.57
#YPR=1.07,2.27,2.57
#YPR=1.07,2.26,2.57
#YPR=1.07,2.27,2.57
#YPR=1.07,2.30,2.59
#YPR=1.07,2.31,2.61
```

Langkah – Langkah implementasi filter Kalman dengan modifikasi firmware razor 9dof ahrs :

Tambahkan library filter Kalman oleh TKJ Electronics, filter Kalman ini dikhususkan untuk sistem inersia



Pada Razor_AHRS.ino

```
#include <Kalman.h>

Kalman kalmanX;
Kalman kalmanY;
Kalman kalmanZ;
double compAngleX, compAngleY, compAngleZ;
double kalAngleX, kalAngleY, kalAngleZ;

float kalRoll;
float kalPitch;
float kalYaw;
```

Masih pada file Razor_AHRS.ino pada fungsi setup()

```
kalmanX.setAngle(roll);
kalmanY.setAngle(pitch);
kalmanZ.setAngle(yaw);
```

Masih pada file Razor_AHRS.ino pada main loop()

```
Kalman_filter();
```

Pada DCM.ino tambahkan fungsi Kalman_filter

```
void Kalman_filter(void)
{
    kalAngleX = kalmanX.getAngle(TO_DEG(roll), Gyro_Vector[0], G_Dt);
    kalAngleY = kalmanY.getAngle(TO_DEG(pitch) , Gyro_Vector[1], G_Dt);
    kalAngleZ = kalmanZ.getAngle(TO_DEG(yaw) , Gyro_Vector[2], G_Dt);
}
```

Pada Output.ino pada fungsi output_angles tambahkan output filter Kalman

```
Serial.print(TO_DEG(yaw)); Serial.print(" and ");
Serial.print(kalAngleZ); Serial.print("||");
Serial.print(TO_DEG(pitch)); Serial.print(" and ");
Serial.print(kalAngleY); Serial.print("||");
Serial.print(TO_DEG(roll)); Serial.print(" and ");
Serial.print(kalAngleX); Serial.println();
```

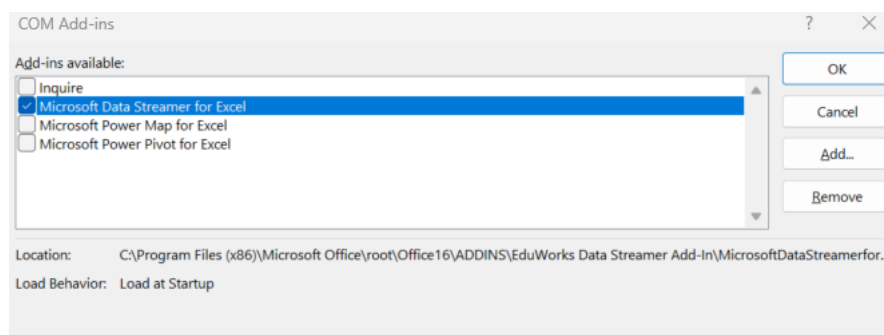
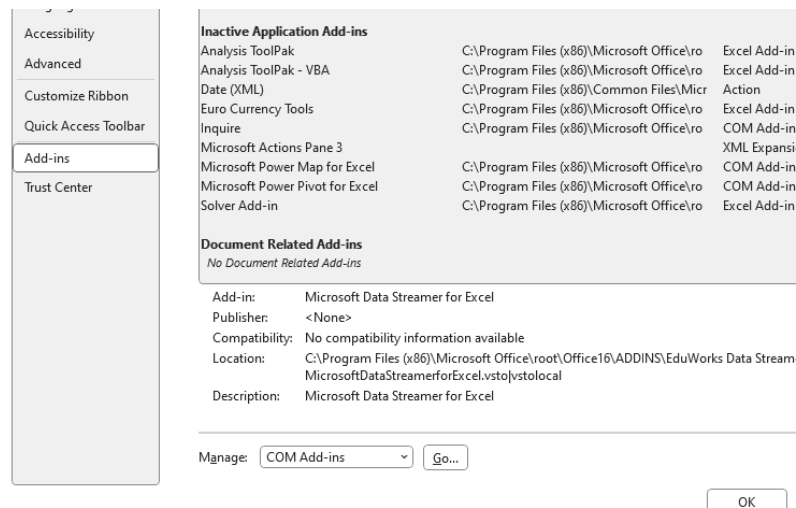
Tuning parameter filter Kalman dapat dilakukan di library Kalman

```
Q_angle = 0.001f;  
Q_bias = 0.003f;  
R_measure = 0.03f;
```

Akuisisi Data Sensor

Data diakuisisi secara langsung menggunakan excel data stream, untuk mengaktifkan data stream pada excel :

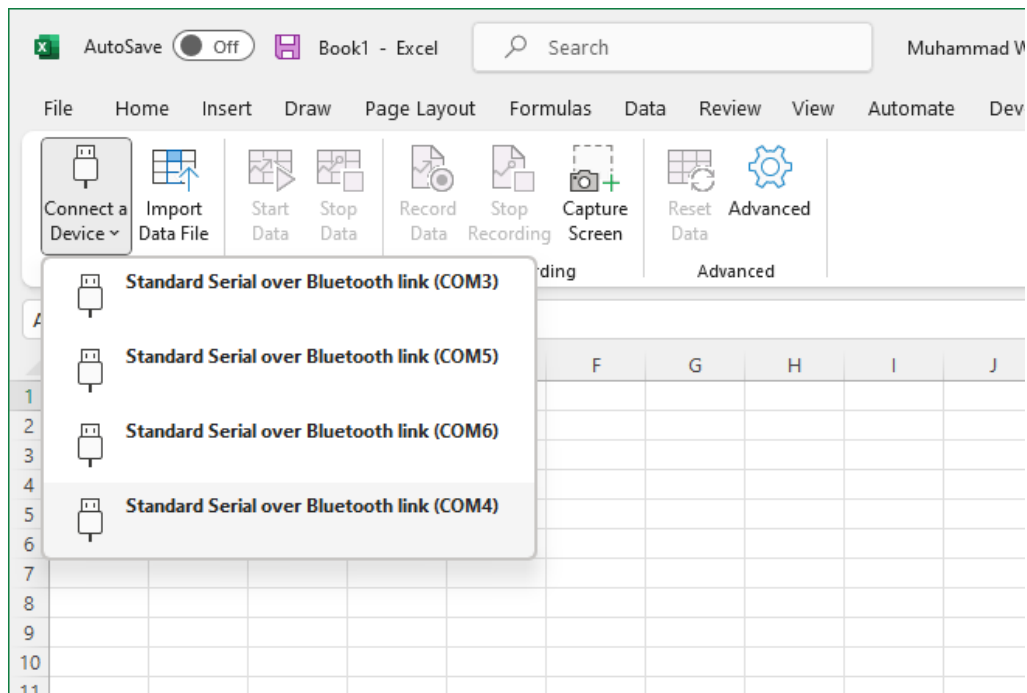
1. Menuju File > Options > add-ins.
2. Pilih Com Add-ins.
3. Lalu centang box Microsoft Data Streamer For Excel



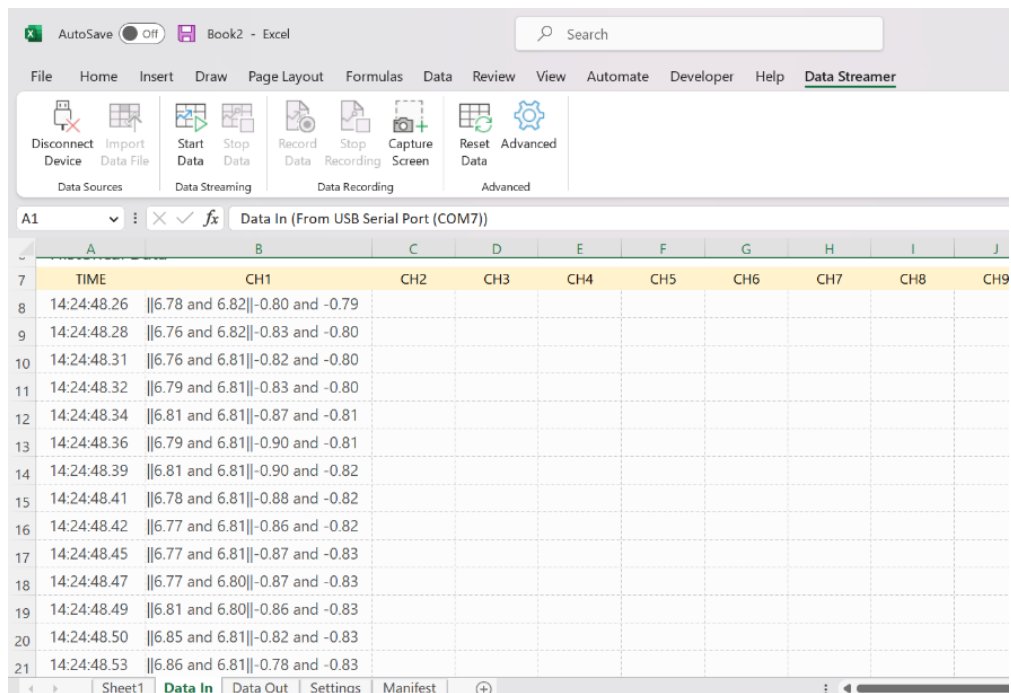
Setelah Data streamer diaktifkan maka Tab Data Streamer akan muncul dan pilih Tab tersebut.



Kemudian pilih Port yang akan digunakan.

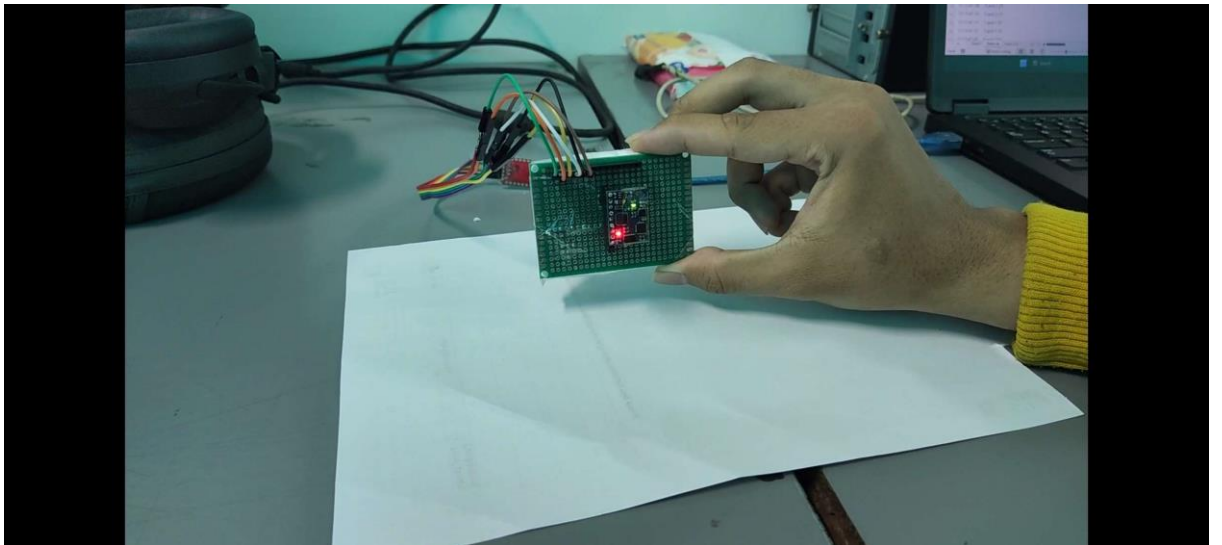
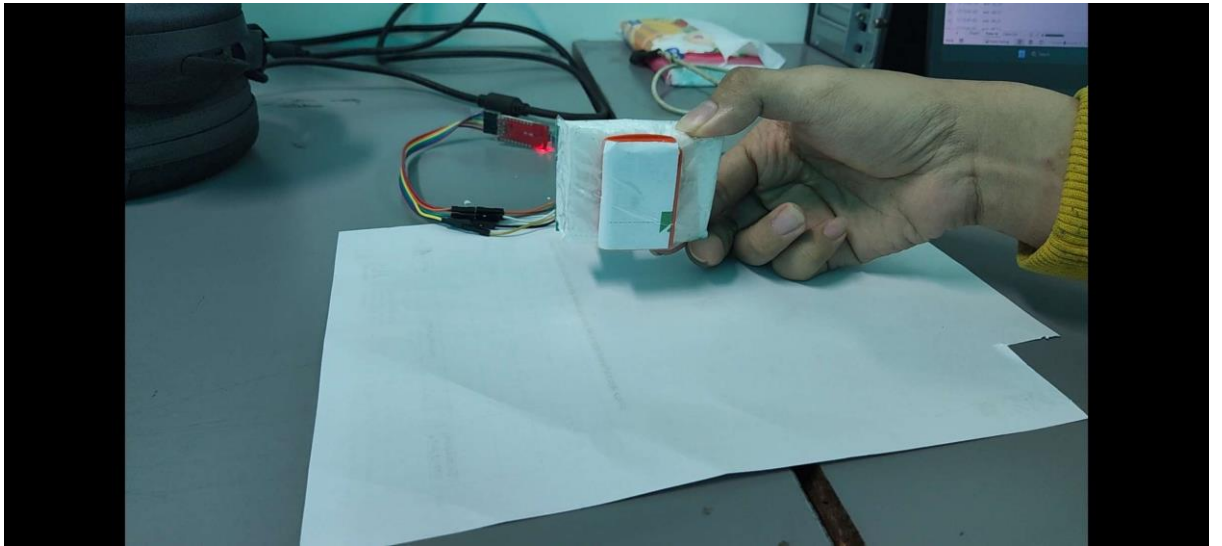


Setelah Port dipilih kemudian klik Start Data agar data dapat diakuisisi.

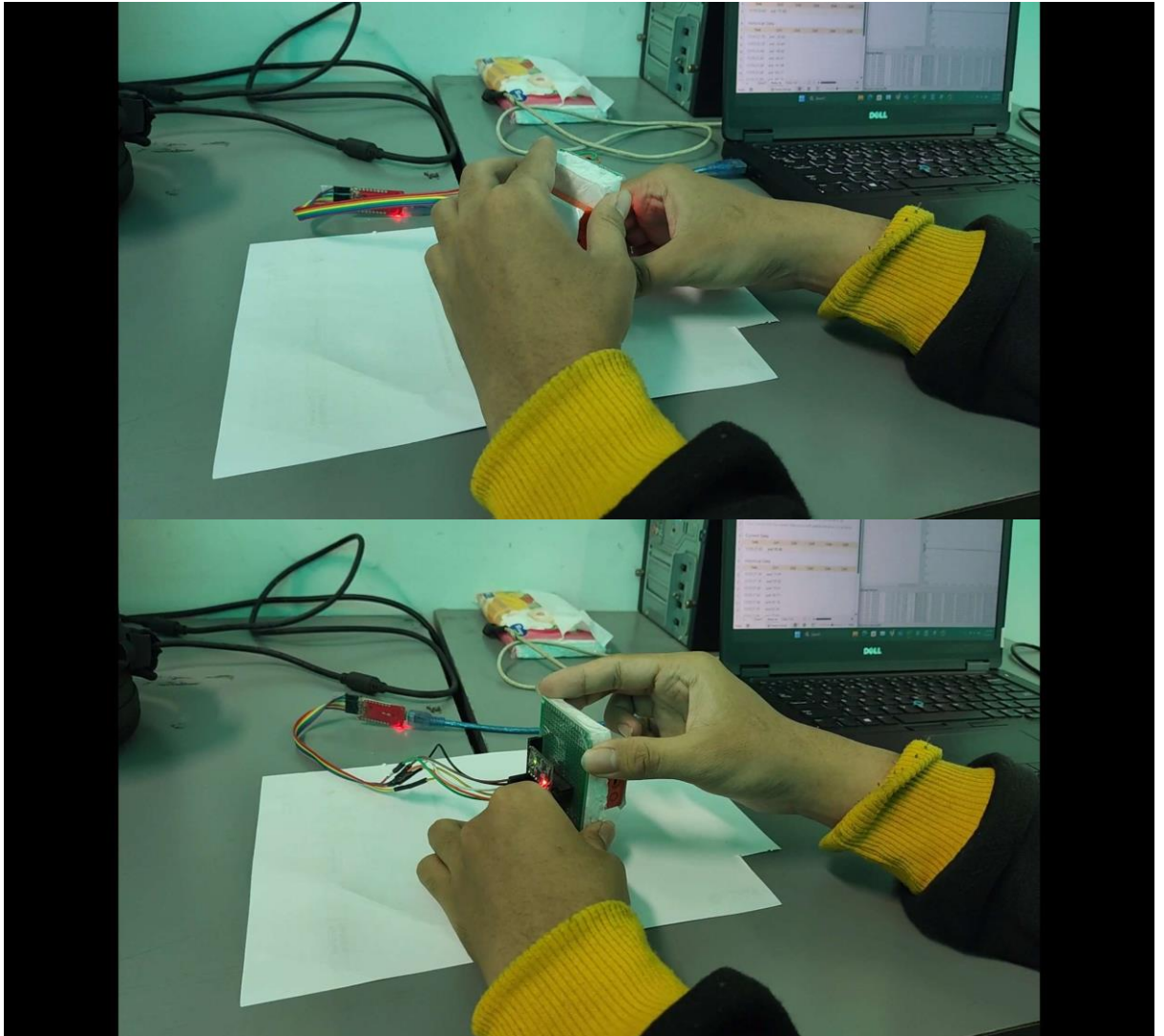


Pengujian

Sumbu putar pitch 90 derajat dan sebaliknya



Sumbu Putar roll 90 derajat dan sebaliknya



Tabel y putar cepat

No	y_dcm	y_kalman	y_awinda
1	4.21	4.91	-0.94194
2	4.25	4.85	-0.8858
3	4.22	4.8	-0.92913
4	4.11	4.74	-0.93955
5	4.11	4.69	-0.78708
6	3.98	4.63	-0.72803
7	3.85	4.57	-0.82213
8	3.79	4.51	-0.94648
9	3.93	4.46	-0.99402
10	4.03	4.41	-1.05654
11	4.11	4.37	-1.23118
12	4.09	4.33	-1.29817
13	4.16	4.3	-1.27479

14	4.26	4.27	-1.17941
15	4.29	4.25	-1.1141
16	4.4	4.23	-1.11786
17	4.43	4.22	-1.06978
18	4.36	4.2	-0.99735
19	4.35	4.18	-0.89311
20	4.17	4.15	-0.81874
21	4.04	4.12	-0.75389
22	3.98	4.09	-0.68433
23	3.95	4.05	-0.70593
24	3.99	4.03	-0.90637
25	3.98	4	-1.06263
26	4.05	3.98	-1.11213
27	4.78	4.01	-1.1982
28	5.94	4.1	-1.26829
29	7.31	4.26	-1.29713
30	9.89	4.57	-1.23415
31	14.34	5.12	-1.09389
32	20.71	6	-0.83778
33	28.84	7.29	-0.14954
34	35.53	8.82	1.102385
35	40.88	10.52	3.178599
36	45.22	12.35	6.76906
37	49.38	14.34	12.15799
38	54.01	16.49	19.93363
39	58.05	18.78	29.00064
40	60.87	21.1	36.17462
41	63.01	23.44	40.73864
42	66.11	25.86	43.90251
43	70.36	28.44	47.50617
44	73.55	31.06	51.87631
45	76.18	33.7	55.65872
46	78.42	36.38	58.43524
47	80.42	39.03	60.38228
48	82.61	41.72	63.21855
49	84.8	44.4	66.90073
50	86.64	47.11	70.48256
51	87.2	49.69	73.39294
52	87.54	52.24	75.74085
53	87.57	54.66	77.8069
54	87.04	57	79.85512
55	86.59	59.19	81.97094
56	86.13	61.31	83.91566
57	86.21	63.3	85.22256
58	86.77	65.28	85.98765
59	87.01	67.15	86.89273

60	86.92	68.99	87.4827
61	87.1	70.72	87.72478
62	87.16	72.42	87.76835
63	87.3	74.02	87.66209
64	87.34	75.6	87.85047
65	87.34	77.06	88.07621
66	87.45	78.52	88.0976
67	87.17	79.86	88.15753
68	87.05	81.17	88.28221
69	87.1	82.38	88.38095
70	87.26	83.54	88.39964
71	87.37	84.7	88.23368
72	87.04	85.75	88.16612
73	86.72	86.77	88.07395
74	86.63	87.7	87.87395
75	86.83	88.63	87.80737
76	87	89.47	87.87196
77	87.11	90.33	87.94028
78	87.13	91.09	87.86061
79	87.02	91.86	87.61014
80	87.05	92.53	87.42524
81	87.16	93.22	87.35087
82	87.48	93.84	87.4366
83	87.53	94.47	87.56017
84	87.32	95.01	87.65909
85	87.36	95.57	87.7228
86	87.38	96.04	87.70036
87	87.39	96.53	87.66967
88	87.54	96.95	87.70545
89	88.19	97.41	87.82088
90	89.15	97.83	87.92715
91	89.3	98.27	87.87012
92	87.06	98.51	87.85935
93	83.26	98.56	87.91778
94	78.7	98.31	87.99874
95	73.88	97.81	88.111
96	68.89	97.1	88.48064
97	64.48	96.16	89.22069
98	59.53	95.02	89.26756
99	54.58	93.64	87.49172
100	49.79	92.07	84.38171
101	45.19	90.31	80.0286
102	40.59	88.38	74.86142
103	35.77	86.25	69.46739
104	30.84	83.95	64.24415
105	27.17	81.55	59.2234

106	23.79	79.07	54.04636
107	20.91	76.5	48.79335
108	17.73	73.86	43.87457
109	15.58	71.2	39.20199
110	13.96	68.56	34.45927
111	11.83	65.89	29.59335
112	9.99	63.21	25.23714
113	8.15	60.53	22.09486
114	6.96	57.88	18.89043
115	6.43	55.31	15.34108
116	6.03	52.79	12.04185
117	5.74	50.35	9.657236
118	5.67	47.98	8.115755
119	5.6	45.7	6.154136
120	6.11	43.53	4.051652
121	6.65	41.44	2.397254
122	6.87	39.45	1.546837
123	7.03	37.51	1.161367
124	7.25	35.68	0.873863
125	7.51	33.89	0.697109
126	7.86	32.22	0.667038
127	8.15	30.59	0.64688
128	8.14	29.04	0.892075
129	8.04	27.52	1.315657
130	7.9	26.07	1.497433
131	7.97	24.66	1.664642
132	8.2	23.35	1.936239
133	8.56	22.07	2.099825
134	8.74	20.88	2.318327
135	8.97	19.73	2.558559
136	9.19	18.65	2.670209
137	9.3	17.6	2.524771
138	9.46	16.63	2.426101
139	9.78	15.69	2.545435
140	9.95	14.82	2.797575
141	9.98	13.97	3.007723
142	10.05	13.18	3.190143
143	10.12	12.41	3.378773
144	10.2	11.71	3.521398
145	10.36	11.04	3.624239
146	10.51	10.39	3.769775
147	10.59	9.8	3.977099
148	10.37	9.2	4.16107
149	10.16	8.64	4.188105
150	9.83	8.07	4.236845
151	9.32	7.53	4.367878

152	8.02	6.9	4.468043
153	5.87	6.22	4.535735
154	2.09	5.31	4.659323
155	-2.34	4.25	4.787008
156	-8.39	2.89	4.73287
157	-15.39	1.25	4.465279
158	-22.77	-0.71	4.260715
159	-29.79	-2.9	4.020755
160	-36.7	-5.38	3.468306
161	-42.12	-7.97	2.051725
162	-47.09	-10.73	-0.52544
163	-51.64	-13.57	-4.45916
164	-55.6	-16.52	-10.0579
165	-59.24	-19.5	-16.7272
166	-62.8	-22.58	-24.1546
167	-66.01	-25.65	-31.5622
168	-68.39	-28.77	-38.6206
169	-69.99	-31.78	-45.4323
170	-71.93	-34.78	-51.1128
171	-73.99	-37.82	-55.6347
172	-75.45	-40.76	-59.4743
173	-76.72	-43.7	-62.7753
174	-77.73	-46.51	-65.929
175	-78.98	-49.33	-68.8993
176	-79.66	-52.01	-71.5494
177	-80.17	-54.67	-73.6649
178	-80.73	-57.18	-75.1978
179	-81.13	-59.68	-76.6848
180	-81.67	-62.03	-78.2616
181	-82.31	-64.39	-79.7225
182	-82.51	-66.59	-80.7934
183	-82.64	-68.76	-81.6263
184	-83.11	-70.8	-82.4243
185	-83.53	-72.84	-83.1796
186	-83.61	-74.71	-83.6256
187	-83.74	-76.58	-83.9275
188	-83.99	-78.31	-84.1364
189	-84.28	-80.04	-84.415
190	-84.37	-81.63	-84.8266
191	-84.59	-83.21	-85.1086
192	-84.64	-84.65	-85.1981
193	-84.53	-86.09	-85.3279
194	-84.47	-87.38	-85.5534
195	-84.49	-88.61	-85.7464
196	-84.45	-89.84	-85.8647
197	-84.36	-90.93	-85.9746

198	-84.26	-92.03	-86.114
199	-84.24	-92.99	-86.1923
200	-84.26	-93.97	-86.302
201	-84.32	-94.83	-86.4417
202	-84.53	-95.71	-86.5525
203	-84.53	-96.47	-86.6088
204	-84.52	-97.25	-86.6107
205	-84.57	-97.92	-86.5746
206	-84.57	-98.61	-86.4856
207	-84.61	-99.19	-86.3969
208	-84.55	-99.79	-86.4158
209	-84.56	-100.28	-86.5031
210	-84.67	-100.8	-86.538
211	-84.69	-101.22	-86.5387
212	-84.59	-101.66	-86.5635
213	-84.69	-102.01	-86.556
214	-84.79	-102.39	-86.5477
215	-84.85	-102.68	-86.5597
216	-84.73	-102.98	-86.6
217	-84.29	-103.17	-86.6586
218	-81.87	-103.25	-86.6878
219	-78.39	-103.06	-86.6858
220	-74.98	-102.67	-86.7194
221	-68.86	-101.98	-86.7782
222	-62.6	-100.94	-86.775
223	-55.96	-99.63	-86.764
224	-49.2	-97.97	-86.8265
225	-43.52	-96.13	-86.9324
226	-38.51	-94.07	-87.0325
227	-33.75	-91.86	-87.1032
228	-28.93	-89.44	-86.6567
229	-22.88	-86.8	-84.5996
230	-17.17	-83.92	-81.2436
231	-11.81	-80.9	-76.6119
232	-8.53	-77.81	-70.202
233	-5.88	-74.72	-62.972
234	-3.57	-71.58	-55.3283
235	-0.59	-68.41	-48.4179
236	1.84	-65.19	-42.9458
237	3.9	-61.98	-37.9166
238	5.85	-58.77	-33.2269
239	8.05	-55.56	-28.6984
240	9.82	-52.37	-23.4504
241	10.38	-49.28	-17.7196
242	10.9	-46.25	-13.1077
243	11.14	-43.31	-10.3468

244	11.09	-40.49	-8.23728
245	10.85	-37.77	-6.21436
246	10.33	-35.15	-3.94345
247	10.01	-32.65	-1.64233
248	9.84	-30.23	0.757817
249	9.71	-27.9	3.024106
250	9.89	-25.63	4.801252
251	9.77	-23.47	5.987822
252	9.48	-21.38	6.233065
253	9.33	-19.39	6.465361
254	9.19	-17.45	6.521938
255	9	-15.63	6.323159
256	8.72	-13.85	5.917649
257	8.31	-12.2	5.524184
258	7.78	-10.6	5.059686
259	7.49	-9.11	4.768965
260	7.55	-7.63	4.703016
261	7.75	-6.24	4.804005
262	8.2	-4.84	4.759631
263	8.77	-3.5	4.366984
264	9.65	-2.13	4.084537
265	10.14	-0.84	3.940891
266	9.43	0.38	3.739964
267	8.49	1.46	3.529804
268	7.97	2.51	3.21619
269	7.92	3.49	2.763371
270	7.96	4.42	2.391248
271	7.95	5.35	2.203439
272	7.93	6.2	2.137051
273	7.62	7.02	2.368435
274	7.48	7.76	2.889795
275	7.72	8.52	3.537323
276	8.17	9.24	4.29002
277	8.52	9.97	4.222138
278	8.63	10.62	3.486321
279	8.81	11.29	2.775034
280	9	11.89	2.334958
281	9.17	12.5	2.172293
282	9.05	13.04	2.154543
283	8.94	13.58	2.233642
284	8.4	14.02	2.178989
285	8.1	14.45	1.8581
286	7.85	14.82	1.866174
287	7.32	15.16	2.194291
288	7.07	15.44	2.688629
289	6.76	15.71	3.141521

290	6.65	15.93	3.430987
291	6.57	16.15	3.547352
292	6.36	16.31	3.642549
293	6.03	16.47	3.555815
294	5.28	16.53	3.417349
295	5	16.59	3.304689
296	4.91	16.67	2.976828
297	5.57	16.72	2.459819
298	5.83	16.8	2.08473
299	5.68	16.83	1.823104
300	5.63	16.87	1.564631

Tabel y putar normal

No	y_dcm	y_kalman	y_awinda
1	7.11	5.89	1.120095
2	6.95	5.94	1.36199
3	7.48	6.02	1.539086
4	8.33	6.13	1.732947
5	8.19	6.24	1.91881
6	7.97	6.33	2.101191
7	8.06	6.42	2.280355
8	8.04	6.49	2.632989
9	7.93	6.55	2.948781
10	6.98	6.58	3.130114
11	6.76	6.6	2.583243
12	6.99	6.62	1.738137
13	7.02	6.66	1.697844
14	7.11	6.69	1.76011
15	7.48	6.74	1.91383
16	8.23	6.83	2.113683
17	9.17	6.98	2.265939
18	10.82	7.2	2.315095
19	12.11	7.48	2.667317
20	12.91	7.77	3.942707
21	13.5	8.08	5.612699
22	13.86	8.4	6.814506
23	14.14	8.73	7.538037
24	14.65	9.07	7.926743
25	15.35	9.44	8.197483
26	15.99	9.82	8.618317
27	16.87	10.23	9.276816
28	17.84	10.68	10.11144
29	18.85	11.17	10.92869

30	19.98	11.7	11.64372
31	21.13	12.26	12.6192
32	22.53	12.88	13.90653
33	23.97	13.54	15.05371
34	25.34	14.25	16.10378
35	26.38	14.98	17.27408
36	27.49	15.75	18.74444
37	28.79	16.54	20.3109
38	29.6	17.35	21.46024
39	30.84	18.2	22.55813
40	32.9	19.14	23.64562
41	35.1	20.13	24.5751
42	37.01	21.2	25.90942
43	38.78	22.29	27.75386
44	40.35	23.43	29.84753
45	41.35	24.55	31.70583
46	41.97	25.69	33.56681
47	42.64	26.81	35.07843
48	43.67	27.95	36.01558
49	45.44	29.13	36.63732
50	47.35	30.38	37.69361
51	48.3	31.6	38.77086
52	48.43	32.77	39.61796
53	49.46	33.97	41.06295
54	50.89	35.19	42.81626
55	52.62	36.48	44.02447
56	53.79	37.74	44.49027
57	55.19	39.05	45.21817
58	56.53	40.35	46.91018
59	58.21	41.72	48.67532
60	60.03	43.1	50.07376
61	61.82	44.55	51.29785
62	63.11	45.97	52.71636
63	64.54	47.42	54.14444
64	65.87	48.85	55.84192
65	67.25	50.32	58.1428
66	68.01	51.74	60.38233
67	69.01	53.2	61.61944
68	69.01	54.56	62.26784
69	69.63	55.92	62.9255
70	70.5	57.24	63.86911
71	71.3	58.58	64.88678
72	72.49	59.9	66.06795
73	73.64	61.26	66.88991
74	73.97	62.53	67.55578
75	74.32	63.79	68.2163

76	75.33	65.03	69.08894
77	77.2	66.34	70.42385
78	79.44	67.73	71.15621
79	80.75	69.08	71.44775
80	81.1	70.41	71.83309
81	81.56	71.67	72.81477
82	82.41	72.97	74.99945
83	83.03	74.2	77.06716
84	83.29	75.42	77.87881
85	83.23	76.55	78.00844
86	83.4	77.68	78.74363
87	84.03	78.76	79.45771
88	84.63	79.85	80.18286
89	84.94	80.86	80.56883
90	85.05	81.86	80.90579
91	85.4	82.81	81.54725
92	85.63	83.76	82.26858
93	85.73	84.64	82.65222
94	85.73	85.5	82.81588
95	85.52	86.26	82.82764
96	85.39	87.02	83.02636
97	85.61	87.72	83.60944
98	85.9	88.45	83.99623
99	85.89	89.09	84.08514
100	86.1	89.74	83.89824
101	86.35	90.34	83.62321
102	86.56	90.91	83.69572
103	86.78	91.5	84.08854
104	86.92	92.02	84.37784
105	86.88	92.55	84.4698
106	86.88	93.01	84.63053
107	87.05	93.49	84.97988
108	87.11	93.9	85.18971
109	87.23	94.33	85.33318
110	87.41	94.71	85.38935
111	87.6	95.11	85.45688
112	87.77	95.45	85.60079
113	87.83	95.81	85.79571
114	87.86	96.11	85.90857
115	87.85	96.41	86.06535
116	87.86	96.66	86.23325
117	87.94	96.93	86.38061
118	88.01	97.15	86.54747
119	88	97.38	86.66266
120	87.95	97.56	86.69105
121	87.9	97.75	86.72759

122	87.78	97.88	86.71141
123	87.86	98.03	86.77185
124	87.9	98.14	86.79957
125	87.89	98.26	86.75617
126	87.9	98.34	86.71242
127	87.88	98.4	86.73961
128	87.95	98.49	86.83896
129	88.03	98.54	86.87119
130	88.05	98.6	86.84267
131	88.03	98.62	86.78442
132	87.97	98.65	86.73108
133	87.97	98.65	86.79768
134	88.02	98.67	86.87831
135	88.06	98.65	86.91946
136	88.02	98.65	86.92223
137	88	98.61	86.93192
138	87.9	98.58	86.90727
139	87.95	98.52	86.96058
140	87.98	98.48	87.00278
141	88.03	98.42	87.03823
142	88.06	98.37	86.99208
143	88.08	98.29	86.9206
144	88.04	98.23	86.8522
145	88	98.14	86.84787
146	87.93	98.05	86.90395
147	87.91	97.95	86.97384
148	87.74	97.85	87.00501
149	87.73	97.72	86.99539
150	87.59	97.6	87.00111
151	87.58	97.47	86.96532
152	87.43	97.32	86.87313
153	87.04	97.16	86.73201
154	86.67	96.97	86.75773
155	86.35	96.78	86.71861
156	86.15	96.57	86.5908
157	85.53	96.33	86.33229
158	84.23	96.02	86.16043
159	82.77	95.64	85.84565
160	81.69	95.21	85.32957
161	80.87	94.76	84.94344
162	79.88	94.26	84.6539
163	78.43	93.7	84.25918
164	76.59	93.05	83.57044
165	74.5	92.32	82.51394
166	72.55	91.51	81.3402
167	70.86	90.64	80.27251

168	69.25	89.72	79.21973
169	67.01	88.71	77.8747
170	64.59	87.61	76.10385
171	61.91	86.39	74.19306
172	59.67	85.12	72.30095
173	57.86	83.81	70.15329
174	56.25	82.47	68.18051
175	53.9	81.04	66.32653
176	52.15	79.57	64.32856
177	51.02	78.11	61.85253
178	49.74	76.64	58.80368
179	48.38	75.14	56.36018
180	46.25	73.57	54.65707
181	44.54	71.98	53.21726
182	43.03	70.36	51.36266
183	41.95	68.76	49.20437
184	40.97	67.17	47.67471
185	39.68	65.57	46.63714
186	37.58	63.9	45.47003
187	35.88	62.21	43.60988
188	34.76	60.52	41.2412
189	33.81	58.87	39.27968
190	33.2	57.23	37.96403
191	32.61	55.65	37.07587
192	31.53	54.04	36.08124
193	30.48	52.46	34.62582
194	29.75	50.89	32.70057
195	29.33	49.38	30.90982
196	28.56	47.86	29.50805
197	27.65	46.38	28.47881
198	26.96	44.89	27.67143
199	26.34	43.46	26.96238
200	25.41	42.01	25.86603
201	24.41	40.58	24.81166
202	23.11	39.15	24.214
203	22.2	37.7	23.72667
204	21.27	36.3	22.98364
205	20.76	34.91	22.25674
206	20.48	33.6	21.66367
207	19.16	32.2	21.02599
208	17.39	30.81	19.94272
209	16.08	29.39	18.71639
210	15.59	28.06	17.44375
211	15.58	26.76	16.31487
212	15.96	25.57	15.72752
213	16.14	24.39	15.66468

214	15.5	23.24	15.53519
215	14.74	22.07	13.59266
216	13.98	20.96	11.25053
217	13.72	19.86	9.92723
218	13.72	18.84	9.608064
219	12.77	17.78	9.94556
220	12.3	16.76	10.90759
221	11.64	15.73	11.04952
222	11.19	14.78	9.916566
223	10.95	13.82	8.760387
224	10.82	12.94	8.07616
225	10.56	12.04	7.707216
226	10.43	11.21	7.876356
227	10.02	10.4	7.835463
228	9.64	9.57	6.757878
229	9.17	8.8	5.825276
230	9.22	8.05	5.61733
231	9.46	7.38	5.877149
232	9.19	6.69	6.00894
233	9	6.06	5.895433
234	9.1	5.44	5.520313
235	8.96	4.88	5.011593
236	8.87	4.31	4.279495
237	8.56	3.8	3.713328
238	8.96	3.3	3.562311
239	9.28	2.88	3.808765
240	9.38	2.46	4.105759
241	9.43	2.1	3.882545
242	9.37	1.72	3.527038
243	9.18	1.4	3.363327
244	9.12	1.06	3.235025
245	9.07	0.78	3.212376
246	8.92	0.48	3.495674
247	9.03	0.24	3.666949
248	9.22	0	3.685981
249	9.16	-0.2	3.641456
250	8.91	-0.42	3.524755
251	8.93	-0.59	3.435767
252	8.98	-0.74	3.454954
253	8.96	-0.91	3.431417
254	8.87	-1.03	3.396243
255	8.72	-1.17	3.436097
256	8.57	-1.28	3.54696
257	8.62	-1.4	3.488024
258	8.85	-1.46	3.354059
259	9.02	-1.53	3.262016

260	9.14	-1.55	3.228697
261	9.11	-1.6	3.193695
262	9.04	-1.6	3.130082
263	8.96	-1.63	3.094876
264	8.98	-1.62	3.043083
265	8.87	-1.63	3.042731
266	8.78	-1.61	3.164194
267	8.9	-1.6	3.323148
268	9	-1.56	3.451612
269	9.07	-1.52	3.478355
270	9.06	-1.46	3.451581
271	9.13	-1.4	3.403685
272	9.39	-1.31	3.323587
273	9.51	-1.22	3.23711
274	9.49	-1.12	3.285009
275	9.41	-1.03	3.354538
276	8.81	-0.95	3.419214
277	8.26	-0.9	3.494287
278	7.51	-0.91	3.604818
279	6.81	-0.92	3.679578
280	5.37	-1.03	3.642383
281	3.31	-1.21	3.735569
282	1.2	-1.5	3.94414
283	0.02	-1.8	4.025156
284	-0.52	-2.12	3.87236
285	-1.4	-2.45	3.579624
286	-2.89	-2.87	3.036721
287	-4.79	-3.34	2.430632
288	-7.13	-3.94	1.630126
289	-8.88	-4.57	0.36593
290	-10.3	-5.26	-1.38109
291	-11.7	-5.96	-3.35114
292	-13.3	-6.73	-4.96267
293	-14.71	-7.52	-5.98836
294	-16.01	-8.36	-6.66459
295	-16.93	-9.19	-7.53674
296	-18.07	-10.06	-8.85187
297	-19.31	-10.93	-10.808
298	-21.01	-11.88	-12.989
299	-22.55	-12.85	-14.8004
300	-23.73	-13.86	-16.3333
301	-24.9	-14.85	-17.5733
302	-26.53	-15.89	-18.8989
303	-28.27	-17	-20.4649
304	-29.86	-18.12	-21.8081
305	-30.75	-19.25	-22.9057

306	-31.22	-20.33	-23.7904
307	-31.87	-21.43	-24.7542
308	-33.1	-22.52	-26.1882
309	-34.39	-23.67	-27.7814
310	-35.16	-24.77	-29.1537
311	-35.9	-25.89	-30.2469
312	-36.77	-26.98	-31.3237
313	-38.43	-28.14	-32.6244
314	-40.3	-29.32	-34.0785
315	-41.46	-30.53	-35.2269
316	-42.19	-31.69	-35.9473
317	-43.48	-32.91	-36.58
318	-45.33	-34.14	-37.4538
319	-47.09	-35.44	-38.6211
320	-48.06	-36.7	-39.7386
321	-48.97	-37.97	-40.6243
322	-50.02	-39.21	-41.5208
323	-51.75	-40.53	-42.7437
324	-53.58	-41.85	-44.3448
325	-54.38	-43.18	-45.6901
326	-54.93	-44.44	-46.413
327	-55.68	-45.69	-47.3067
328	-56.6	-46.97	-48.7004
329	-57.65	-48.21	-50.472
330	-59.05	-49.51	-52.1205
331	-60.24	-50.77	-53.1989
332	-61.18	-52.06	-54.0089
333	-62.47	-53.33	-54.8935
334	-64.35	-54.68	-56.2642
335	-65.53	-55.98	-57.8265
336	-66.42	-57.31	-58.7588
337	-67.45	-58.59	-59.4266
338	-68.85	-59.93	-60.1898
339	-70.07	-61.23	-60.9625
340	-70.93	-62.54	-61.9637
341	-71.49	-63.79	-63.1385
342	-72.11	-65.05	-64.193
343	-72.71	-66.25	-65.0187
344	-73.04	-67.45	-66.0948
345	-73.31	-68.56	-67.7465
346	-73.7	-69.69	-69.1057
347	-74.16	-70.75	-70.0037
348	-74.54	-71.81	-70.8935
349	-74.87	-72.8	-72.0438
350	-75.31	-73.81	-73.0575
351	-75.68	-74.75	-73.6762

352	-75.66	-75.63	-74.1221
353	-75.61	-76.51	-74.5917
354	-75.59	-77.31	-75.2355
355	-75.85	-78.11	-75.7408
356	-76.16	-78.86	-76.0762
357	-76.11	-79.6	-76.4088
358	-75.95	-80.25	-76.9088
359	-75.87	-80.9	-77.2479
360	-76.14	-81.49	-77.5859
361	-76.39	-82.1	-77.8783
362	-76.3	-82.63	-78.2238
363	-75.99	-83.14	-78.5081
364	-75.85	-83.58	-78.5936
365	-76.22	-84.06	-78.645
366	-76.41	-84.47	-78.6062
367	-76.36	-84.89	-78.7745
368	-76.29	-85.24	-78.9671
369	-76.28	-85.6	-78.9777
370	-76.55	-85.91	-78.9027
371	-76.73	-86.24	-78.8054
372	-76.64	-86.51	-78.9242
373	-76.35	-86.78	-79.1315
374	-76.15	-86.97	-79.1935
375	-76.11	-87.18	-78.9697
376	-76.38	-87.36	-78.8534
377	-76.38	-87.51	-78.9902
378	-76.18	-87.67	-79.1493
379	-76.03	-87.76	-79.2135
380	-75.97	-87.88	-79.1526
381	-76.1	-87.95	-79.0241
382	-76.26	-88.05	-79.0181
383	-76.02	-88.09	-79.1579
384	-75.82	-88.13	-79.1867
385	-75.78	-88.13	-79.0401
386	-75.95	-88.17	-78.7643
387	-76.04	-88.16	-78.5889
388	-75.92	-88.16	-78.7515
389	-75.79	-88.12	-78.8449
390	-75.76	-88.09	-78.7131
391	-75.86	-88.03	-78.4953
392	-75.9	-88	-78.375
393	-75.96	-87.93	-78.3988
394	-75.81	-87.87	-78.54
395	-75.59	-87.76	-78.5429
396	-75.4	-87.67	-78.4024
397	-75.34	-87.54	-78.2363

398	-75.48	-87.44	-78.2098
399	-75.59	-87.32	-78.3518
400	-75.71	-87.22	-78.3301
401	-75.63	-87.09	-78.2257
402	-75.62	-86.95	-78.1712
403	-75.68	-86.84	-78.1264
404	-75.6	-86.69	-78.1178
405	-75.54	-86.56	-78.1455
406	-75.18	-86.39	-78.1826
407	-74.3	-86.18	-78.0876
408	-73.01	-85.88	-77.9526
409	-71.35	-85.51	-77.8156
410	-69.27	-85.03	-77.7973
411	-67.33	-84.47	-77.8655
412	-65.99	-83.85	-77.9646
413	-64.2	-83.17	-78.0304
414	-61.79	-82.36	-77.9933
415	-57.73	-81.36	-77.942
416	-53.71	-80.18	-77.9498
417	-50.27	-78.88	-77.9549
418	-47.01	-77.46	-77.8668
419	-43.42	-75.91	-77.4922
420	-39.42	-74.2	-76.7741
421	-35.72	-72.36	-75.7353
422	-32.63	-70.43	-74.3715
423	-29.52	-68.41	-72.4368
424	-25.85	-66.26	-70.2988
425	-22.04	-63.99	-68.6512
426	-19.56	-61.7	-66.9334
427	-17.86	-59.42	-64.6134
428	-15.38	-57.08	-60.9688
429	-12.29	-54.65	-56.6624
430	-8.84	-52.12	-53.2414
431	-5.48	-49.52	-49.9902
432	-2.33	-46.85	-46.8441
433	-0.86	-44.24	-43.6222
434	0.29	-41.66	-40.0646
435	1.78	-39.1	-36.6453
436	2.65	-36.57	-33.4845
437	3.36	-34.12	-29.9371
438	4.29	-31.7	-25.992
439	5.37	-29.33	-22.5637
440	6.08	-26.98	-20.3661
441	7.1	-24.69	-18.6742
442	8.25	-22.4	-16.3869
443	9.02	-20.19	-13.1637

444	9.74	-18	-9.52509
445	10.13	-15.91	-6.17864
446	10.54	-13.84	-3.92886
447	10.68	-11.89	-3.16632
448	10.23	-10.01	-2.38389
449	9.57	-8.27	-0.90129
450	8.56	-6.63	0.232703
451	7.82	-5.11	0.687753
452	7.16	-3.68	0.914833
453	7.15	-2.27	1.411977
454	7	-0.98	2.253488
455	6.7	0.29	3.200306
456	6.46	1.44	3.876745
457	5.94	2.57	4.520034
458	5.56	3.57	5.113522
459	5.35	4.57	5.354003
460	5.06	5.46	5.338841
461	5.07	6.35	5.028362
462	5.22	7.17	4.546959
463	5.38	8	3.669581
464	5.73	8.75	2.317341
465	6.07	9.52	1.63917
466	6.22	10.22	1.643888
467	6.11	10.91	1.516876
468	5.95	11.51	1.301108
469	5.81	12.12	1.033991
470	5.79	12.65	0.606179
471	5.83	13.19	0.238553
472	5.94	13.66	0.024603
473	6.05	14.15	-0.16421
474	6.05	14.56	-0.23449
475	5.95	14.98	-0.28673
476	5.9	15.33	-0.16991
477	5.85	15.65	0.252615
478	5.83	15.99	0.627872
479	5.87	16.27	0.7825
480	5.92	16.56	0.712564
481	5.94	16.79	0.489981
482	5.92	17.03	0.277128
483	5.9	17.22	0.240241
484	5.89	17.42	0.34286
485	5.93	17.57	0.507025
486	5.97	17.74	0.629215
487	5.97	17.85	0.647532
488	5.96	17.98	0.578945
489	5.95	18.06	0.492688

490	5.93	18.16	0.448911
491	5.93	18.21	0.473312
492	5.96	18.28	0.542379
493	5.98	18.3	0.608398
494	6.01	18.34	0.637382
495	6	18.34	0.618557
496	6	18.36	0.580305
497	5.97	18.34	0.561896
498	5.98	18.33	0.567079
499	6.01	18.29	0.598608
500	6.11	17.89	0.48199

Tabel x putar cepat

No	x_dcm	x_kalman	x_awinda
1	-1.19	-1.52	-0.43906
2	-1.35	-1.52	-0.53217
3	-1.8	-1.54	-0.51111
4	-3.08	-1.65	-0.43188
5	-6.11	-1.93	-0.36335
6	-11.27	-2.5	-0.34813
7	-20.07	-3.54	-0.45121
8	-30.06	-5.06	-0.68807
9	-40.99	-7.06	-1.08421
10	-49.68	-9.37	-2.25988
11	-58.21	-12.03	-4.81779
12	-65.49	-14.92	-9.39657
13	-71.96	-18.04	-16.9113
14	-78.21	-21.35	-27.4526
15	-84.75	-24.88	-38.4298
16	-89.9	-28.51	-47.2894
17	-93.99	-32.19	-55.1017
18	-96.77	-35.89	-62.6335
19	-97.86	-39.47	-69.0896
20	-98.39	-42.97	-74.9331
21	-98.77	-46.33	-81.1399
22	-98.71	-49.6	-87.0088
23	-98.67	-52.71	-91.7864
24	-98.83	-55.77	-94.7694
25	-98.94	-58.67	-96.749
26	-99.1	-61.52	-97.8166
27	-99.14	-64.22	-98.5292
28	-99.43	-66.88	-98.9058
29	-99.59	-69.4	-99.0554
30	-99.66	-71.88	-99.1167
31	-99.62	-74.2	-99.265
32	-99.51	-76.48	-99.5115
33	-99.38	-78.61	-99.786
34	-99.19	-80.69	-99.9868
35	-99.09	-82.64	-100.175
36	-99.01	-84.55	-100.288
37	-99.07	-86.33	-100.282
38	-99.13	-88.09	-100.2
39	-99.03	-89.72	-100.138
40	-98.98	-91.32	-100.148
41	-98.91	-92.8	-100.19
42	-98.9	-94.2	-100.209
43	-98.91	-95.6	-100.162

44	-98.96	-96.88	-100.138
45	-98.97	-98.16	-100.17
46	-98.91	-99.31	-100.172
47	-98.79	-100.46	-100.158
48	-98.81	-101.5	-100.133
49	-98.86	-102.54	-100.09
50	-98.79	-103.46	-100.065
51	-98.57	-104.38	-100.084
52	-98.56	-105.2	-100.104
53	-98.77	-106.03	-100.074
54	-98.84	-106.77	-99.9961
55	-98.72	-107.51	-99.9283
56	-98.7	-108.15	-99.9091
57	-98.83	-108.81	-99.9298
58	-98.86	-109.38	-99.9246
59	-98.77	-109.96	-99.8949
60	-98.75	-110.45	-99.909
61	-98.8	-110.95	-99.9391
62	-98.72	-111.37	-99.9275
63	-98.45	-111.79	-99.9161
64	-97.83	-112.08	-99.9191
65	-96.45	-112.32	-99.9528
66	-93.99	-112.35	-99.9544
67	-90.58	-112.17	-99.9339
68	-84.32	-111.68	-99.8973
69	-76.08	-110.7	-99.8529
70	-67.35	-109.34	-99.7262
71	-59.87	-107.62	-99.4102
72	-51.86	-105.57	-98.7272
73	-44.2	-103.18	-97.4659
74	-36.77	-100.52	-95.2397
75	-30.38	-97.6	-91.1272
76	-25.33	-94.58	-84.6885
77	-21.8	-91.48	-76.2332
78	-18.95	-88.36	-67.3713
79	-16.64	-85.2	-58.9254
80	-14.22	-82.02	-50.5226
81	-11.81	-78.81	-42.545
82	-9.02	-75.56	-34.7141
83	-6.31	-72.28	-28.1911
84	-3.49	-68.97	-23.52
85	-1.8	-65.7	-20.3571
86	-1.28	-62.52	-17.8426
87	-1.43	-59.46	-15.4089
88	-1.45	-56.48	-12.7493
89	-1.16	-53.59	-10.1082

90	-0.63	-50.75	-7.65235
91	0.06	-47.99	-4.98263
92	0.74	-45.29	-2.54595
93	1.15	-42.65	-1.10876
94	0.98	-40.14	-0.7583
95	0.53	-37.71	-0.99837
96	0.34	-35.44	-1.10574
97	0.02	-33.17	-0.76883
98	-0.01	-31.03	-0.18589
99	0.02	-28.95	0.435171
100	0.01	-26.96	1.132085
101	-0.15	-25.04	1.556902
102	-0.42	-23.23	1.540284
103	-0.73	-21.47	1.196335
104	-1	-19.82	0.772622
105	-1.15	-18.21	0.548169
106	-1.32	-16.71	0.63058
107	-1.45	-15.23	0.647583
108	-1.5	-13.86	0.7351
109	-1.51	-12.5	0.639713
110	-1.49	-11.24	0.377939
111	-1.6	-10	0.045885
112	-1.63	-8.85	-0.27376
113	-1.7	-7.72	-0.44969
114	-1.85	-6.68	-0.5322
115	-1.93	-5.66	-0.62554
116	-1.72	-4.7	-0.69062
117	-1.29	-3.77	-0.68499
118	-0.26	-2.77	-0.67017
119	1.52	-1.76	-0.68162
120	5.35	-0.53	-0.76861
121	12.34	1.01	-0.87681
122	21.82	3.01	-0.97547
123	31.47	5.37	-1.17862
124	40.46	8.1	-1.35497
125	47.38	10.99	-1.36251
126	53.9	14.13	-0.89284
127	59.87	17.39	0.141985
128	66.34	20.91	1.945401
129	72.53	24.54	5.902987
130	78.24	28.36	12.68733
131	80.47	32.05	21.41637
132	81.83	35.7	31.11913
133	83.34	39.22	40.15998
134	84.57	42.72	47.40372
135	85.21	46.05	53.40982

136	85.78	49.34	59.21977
137	85.56	52.42	65.35465
138	85.14	55.43	71.39712
139	85.07	58.25	77.26343
140	85.07	61.02	81.56625
141	84.93	63.61	83.912
142	84.72	66.07	84.99602
143	84.71	68.5	85.59375
144	84.76	70.76	85.86746
145	85.07	73.01	85.96482
146	85.16	75.09	85.7884
147	85.35	77.16	85.37952
148	85.62	79.08	85.08452
149	85.71	80.98	84.98533
150	85.75	82.72	84.93305
151	85.8	84.46	84.86227
152	85.82	86.04	84.84354
153	85.77	87.61	84.89497
154	85.71	89.03	85.07104
155	85.72	90.45	85.29519
156	85.77	91.72	85.39284
157	85.78	93	85.47752
158	85.72	94.14	85.60074
159	85.74	95.28	85.64165
160	85.69	96.28	85.60493
161	85.57	97.29	85.56275
162	85.54	98.17	85.5187
163	85.45	99.06	85.49539
164	85.41	99.82	85.48298
165	85.18	100.59	85.50855
166	84.94	101.22	85.56
167	84.51	101.79	85.59958
168	83.33	102.31	85.59486
169	81.32	102.61	85.51478
170	78.75	102.79	85.41943
171	75.1	102.68	85.32332
172	69.29	102.3	85.25085
173	61.05	101.41	85.19995
174	51.09	100.05	85.18639
175	40.27	98.11	85.15023
176	28.67	95.69	85.01713
177	17.87	92.77	84.61365
178	9.97	89.62	83.74196
179	6.49	86.43	82.15059
180	4.34	83.3	79.7451
181	3.38	80.18	76.32341

182	2.82	77.14	71.68594
183	1.84	74.1	65.20403
184	0.74	71.1	56.18099
185	-0.37	68.11	45.50271
186	-1.35	65.18	33.9692
187	-2.16	62.29	22.70044
188	-2.26	59.5	12.43952
189	-2.25	56.79	6.001688
190	-2.47	54.14	3.621977
191	-2.64	51.56	3.420904
192	-3.04	49.03	3.423865
193	-3.43	46.56	3.122847
194	-3.91	44.15	2.222378
195	-4.7	41.77	0.893835
196	-5.55	39.42	-0.38784
197	-6.21	37.11	-1.40245
198	-6.24	34.9	-2.06898
199	-5.85	32.77	-2.04069
200	-5.28	30.76	-1.54185
201	-4.68	28.83	-1.45308
202	-4.29	26.98	-1.83538
203	-4.26	25.18	-2.43196
204	-4.66	23.44	-2.87457
205	-4.81	21.73	-3.29514
206	-4.57	20.12	-3.999
207	-4.05	18.59	-4.93777
208	-3.27	17.16	-5.66315
209	-2.21	15.83	-5.75989
210	-0.77	14.64	-5.23458
211	0.48	13.52	-4.38224
212	1.05	12.49	-3.65201
213	1.07	11.47	-3.31207
214	1.03	10.51	-3.37084
215	1.25	9.58	-3.70559
216	1.28	8.72	-3.87117
217	1.37	7.89	-3.61985
218	1.11	7.05	-3.08917
219	0.78	6.26	-2.28312
220	0.41	5.46	-1.17257

Tabel x putar normal

No	x_dcm	x_kalman	x_awinda
1	-0.44	-0.05	0.555728
2	-0.62	-0.08	0.383768
3	-0.46	-0.1	0.199006
4	-0.56	-0.13	0.202722
5	-0.69	-0.16	0.305054
6	-1.21	-0.22	0.429911
7	-1.42	-0.29	0.373155
8	-1.55	-0.35	0.056592
9	-1.54	-0.41	-0.34985
10	-1.39	-0.46	-0.58692
11	-1.09	-0.5	-0.63327
12	-1.1	-0.54	-0.60802
13	-1.2	-0.58	-0.44878
14	-1.41	-0.63	-0.28231
15	-1.49	-0.68	-0.22905
16	-1.62	-0.74	-0.27837
17	-1.84	-0.81	-0.40352
18	-1.88	-0.87	-0.55385
19	-1.95	-0.94	-0.70624
20	-2.21	-1.02	-0.87923
21	-2.68	-1.13	-0.93632
22	-3.5	-1.28	-0.91596
23	-4.36	-1.46	-1.04302
24	-5.14	-1.68	-1.47923
25	-5.95	-1.92	-2.17475
26	-6.76	-2.2	-3.00473
27	-7.44	-2.5	-3.81088
28	-8.16	-2.83	-4.6105
29	-8.85	-3.17	-5.39257
30	-9.58	-3.55	-6.12165
31	-10.25	-3.94	-6.8617
32	-11.21	-4.37	-7.572
33	-12.42	-4.84	-8.25954
34	-13.53	-5.37	-8.89993
35	-14.95	-5.93	-9.67185
36	-16.48	-6.56	-10.5463
37	-17.85	-7.23	-11.6455
38	-19.12	-7.95	-12.936
39	-20.33	-8.68	-14.2668
40	-21.33	-9.44	-15.6283
41	-22.47	-10.24	-17.0536
42	-23.73	-11.07	-18.3811

43	-25.21	-11.96	-19.5378
44	-26.75	-12.87	-20.6561
45	-28.62	-13.87	-21.883
46	-30.5	-14.91	-23.3296
47	-32.68	-16.03	-24.8662
48	-34.72	-17.2	-26.4199
49	-36.8	-18.44	-28.051
50	-38.56	-19.71	-29.9225
51	-40.23	-21.02	-31.947
52	-41.6	-22.33	-33.9962
53	-43.02	-23.69	-35.9115
54	-44.38	-25.05	-37.6791
55	-45.83	-26.45	-39.1555
56	-47.77	-27.88	-40.3356
57	-49.9	-29.39	-41.4843
58	-51.82	-30.91	-42.879
59	-53.59	-32.48	-44.5274
60	-55.19	-34.05	-46.2639
61	-56.62	-35.65	-48.0866
62	-58.04	-37.24	-49.9727
63	-59.88	-38.88	-51.7562
64	-61.62	-40.53	-53.4121
65	-63.32	-42.19	-54.9016
66	-64.82	-43.89	-56.3546
67	-66.11	-45.56	-57.8801
68	-67.31	-47.25	-59.6155
69	-68.26	-48.89	-61.3661
70	-69.03	-50.53	-62.927
71	-69.59	-52.1	-64.467
72	-70.34	-53.68	-65.7211
73	-71.19	-55.21	-66.77
74	-72.34	-56.78	-67.7255
75	-73.67	-58.31	-68.485
76	-74.88	-59.88	-69.0693
77	-75.68	-61.37	-69.7912
78	-76.52	-62.89	-70.8602
79	-77.49	-64.36	-72.1084
80	-78.73	-65.88	-73.3324
81	-79.96	-67.35	-74.3641
82	-81.03	-68.85	-75.1418
83	-81.65	-70.27	-75.867
84	-82.65	-71.72	-76.9482
85	-83.92	-73.15	-78.365
86	-85.33	-74.62	-79.8754
87	-86.24	-76.02	-81.0579
88	-86.76	-77.43	-81.7888

89	-87.54	-78.77	-82.6818
90	-88.55	-80.11	-84.0706
91	-89.68	-81.49	-85.6044
92	-90.43	-82.8	-86.6946
93	-90.9	-84.11	-87.4074
94	-91.22	-85.34	-88.0618
95	-91.52	-86.57	-88.823
96	-91.92	-87.71	-89.9808
97	-92.06	-88.86	-91.0959
98	-92.16	-89.91	-91.7856
99	-92.42	-90.97	-92.167
100	-92.62	-91.94	-92.5129
101	-92.73	-92.92	-92.8152
102	-92.84	-93.81	-93.1083
103	-92.92	-94.7	-93.2952
104	-93.1	-95.51	-93.3855
105	-93.35	-96.34	-93.5621
106	-93.51	-97.09	-93.7746
107	-93.76	-97.85	-93.9959
108	-93.92	-98.54	-94.1779
109	-93.98	-99.23	-94.381
110	-94.02	-99.84	-94.6041
111	-94.02	-100.46	-94.8533
112	-94.11	-101.01	-95.1733
113	-94.26	-101.57	-95.4273
114	-94.35	-102.06	-95.5614
115	-94.37	-102.52	-95.5229
116	-94.39	-102.99	-95.471
117	-94.47	-103.4	-95.487
118	-94.55	-103.82	-95.555
119	-94.65	-104.18	-95.7318
120	-94.75	-104.56	-95.8194
121	-94.85	-104.87	-95.8973
122	-95.06	-105.21	-95.9612
123	-95.24	-105.5	-96.0315
124	-95.33	-105.8	-96.1272
125	-95.23	-106.03	-96.2013
126	-95.22	-106.28	-96.379
127	-95.22	-106.47	-96.5953
128	-95.41	-106.69	-96.8088
129	-95.49	-106.85	-96.9335
130	-95.49	-107.03	-96.9915
131	-95.44	-107.16	-96.9262
132	-95.4	-107.3	-96.9205
133	-95.47	-107.39	-97.0263
134	-95.55	-107.51	-97.1008

135	-95.59	-107.57	-97.1728
136	-95.64	-107.66	-97.1925
137	-95.68	-107.7	-97.1874
138	-95.73	-107.76	-97.1502
139	-95.72	-107.78	-97.1832
140	-95.7	-107.79	-97.2665
141	-95.81	-107.82	-97.3027
142	-95.85	-107.81	-97.2988
143	-95.8	-107.82	-97.313
144	-95.82	-107.78	-97.3319
145	-95.81	-107.77	-97.3977
146	-95.82	-107.72	-97.4753
147	-95.77	-107.68	-97.5268
148	-95.91	-107.62	-97.563
149	-96.15	-107.59	-97.5994
150	-96.26	-107.53	-97.5718
151	-96.12	-107.47	-97.5234
152	-96.07	-107.39	-97.5071
153	-96	-107.31	-97.5505
154	-96	-107.21	-97.6862
155	-95.94	-107.12	-97.8193
156	-95.97	-107.01	-97.9436
157	-95.99	-106.91	-98.002
158	-96.08	-106.8	-97.989
159	-96.04	-106.69	-97.8965
160	-95.88	-106.55	-97.8644
161	-95.63	-106.42	-97.8449
162	-95.49	-106.26	-97.8459
163	-95.26	-106.1	-97.9134
164	-94.8	-105.89	-97.9734
165	-93.83	-105.63	-97.9873
166	-92.65	-105.33	-97.9283
167	-91.35	-104.94	-97.7816
168	-89.95	-104.51	-97.6009
169	-88.39	-103.99	-97.4348
170	-86.75	-103.42	-97.2444
171	-85.33	-102.78	-96.9018
172	-83.81	-102.1	-96.2536
173	-82.35	-101.35	-95.1389
174	-80.68	-100.54	-93.6774
175	-78.96	-99.65	-92.0403
176	-77.06	-98.71	-90.396
177	-75.12	-97.69	-88.7821
178	-72.85	-96.58	-87.2948
179	-70.45	-95.38	-85.9347
180	-68.25	-94.12	-84.5266

181	-66.09	-92.79	-83.0845
182	-63.5	-91.37	-81.351
183	-61.12	-89.88	-79.3418
184	-58.23	-88.29	-77.3396
185	-55.47	-86.62	-75.2304
186	-52.61	-84.85	-72.7956
187	-49.86	-83.01	-70.1752
188	-47.14	-81.1	-67.7733
189	-44.86	-79.15	-65.5274
190	-42.84	-77.18	-63.2029
191	-40.82	-75.16	-60.6323
192	-39.11	-73.14	-57.9204
193	-37.56	-71.1	-55.1946
194	-36.15	-69.08	-52.4533
195	-34.74	-67.04	-49.6892
196	-33.42	-65.03	-47.153
197	-32.24	-63.01	-44.9519
198	-31.26	-61.05	-42.9312
199	-30.31	-59.08	-41.1506
200	-29.37	-57.15	-39.4863
201	-28.17	-55.21	-37.9192
202	-26.82	-53.3	-36.4283
203	-25.57	-51.38	-34.8981
204	-24.67	-49.51	-33.475
205	-24.05	-47.66	-32.3295
206	-23.34	-45.87	-31.4128
207	-22.63	-44.08	-30.4672
208	-21.86	-42.35	-29.2787
209	-20.99	-40.61	-27.9822
210	-20.19	-38.94	-26.7041
211	-19.23	-37.24	-25.4888
212	-18.21	-35.6	-24.5404
213	-17.14	-33.94	-23.8395
214	-16.07	-32.32	-23.22
215	-15.03	-30.72	-22.4623
216	-14.07	-29.1	-21.5996
217	-13.19	-27.54	-20.7494
218	-12.4	-25.98	-19.8689
219	-11.72	-24.48	-18.9325
220	-10.89	-22.96	-17.8692
221	-10.02	-21.5	-16.7664
222	-9.1	-20.01	-15.7354
223	-8.2	-18.59	-14.6973
224	-7.21	-17.14	-13.6221
225	-6.37	-15.75	-12.6011
226	-5.3	-14.32	-11.8375

227	-4.44	-12.96	-11.1879
228	-3.77	-11.59	-10.4105
229	-3.25	-10.29	-9.44038
230	-2.85	-8.99	-8.46002
231	-2.46	-7.78	-7.58376
232	-1.99	-6.55	-6.7621
233	-1.45	-5.39	-5.83879
234	-0.93	-4.22	-4.87717
235	-0.44	-3.12	-4.01967
236	-0.1	-2.02	-3.31643
237	-0.12	-1.02	-2.71875
238	-0.35	-0.04	-2.20877
239	-0.57	0.84	-1.78563
240	-0.77	1.66	-1.38967
241	-0.8	2.49	-0.8932
242	-0.82	3.23	-0.37789
243	-0.82	3.98	0.112425
244	-0.8	4.64	0.542472
245	-0.91	5.29	0.822144
246	-1.01	5.87	0.767938
247	-1.04	6.45	0.494399
248	-0.98	6.96	0.299128
249	-1.01	7.47	0.232876
250	-1.01	7.91	0.197492
251	-1.03	8.36	0.162056
252	-1.04	8.74	0.203968
253	-1.01	9.13	0.254597
254	-1.04	9.45	0.153401
255	-1.07	9.79	0.000298
256	-1.16	10.06	-0.03239
257	-1.25	10.33	0.051848
258	-1.26	10.55	0.148619
259	-1.25	10.78	0.133672
260	-1.26	10.95	0.050465
261	-1.28	11.14	-0.01428
262	-1.24	11.27	-0.02729
263	-1.09	11.43	-0.03213
264	0.48	11.64	-0.04089
265	1.21	11.85	-0.05137
266	1.88	12.11	-0.06888
267	2.38	12.34	-0.13129
268	3.09	12.61	-0.15151
269	4.56	12.91	-0.11128
270	6.1	13.3	-0.17445
271	8.13	13.74	-0.22629
272	10.46	14.31	-0.19155

273	12.56	14.9	0.002236
274	14.35	15.58	1.632634
275	15.94	16.27	2.686592
276	17.5	17.04	3.683627
277	18.99	17.81	4.250748
278	20.6	18.65	4.795716
279	22.05	19.49	6.173479
280	23.61	20.41	7.976223
281	25.15	21.32	10.02587
282	26.89	22.32	12.22292
283	28.76	23.33	14.12887
284	30.79	24.43	15.8032
285	32.8	25.55	17.35547
286	34.97	26.76	18.84332
287	36.85	27.97	20.32324
288	38.69	29.26	21.71795
289	40.36	30.54	23.22797
290	42.09	31.85	24.78141
291	43.96	33.23	26.33155
292	45.8	34.61	27.88202
293	47.78	36.07	29.62688
294	49.36	37.5	31.5944
295	50.85	38.98	33.49863
296	51.82	40.39	35.43171
297	52.59	41.82	37.35263
298	53.26	43.19	39.2387
299	54.07	44.57	41.00367
300	54.96	45.91	42.70099
301	55.93	47.27	44.50555
302	57.06	48.6	46.38169
303	58.25	49.97	48.2898
304	59.49	51.29	50.12916
305	61.18	52.7	51.70398
306	62.85	54.08	52.96505
307	64.4	55.52	53.80072
308	65.96	56.93	54.39172
309	67.66	58.41	55.01468
310	69.3	59.85	55.72425
311	71.09	61.37	56.53523
312	72.6	62.85	57.52497
313	73.81	64.36	58.7086
314	74.65	65.8	59.93781
315	75.62	67.22	61.29928
316	77.05	68.71	62.95985
317	78.4	70.15	64.71717
318	79.9	71.64	66.32942

319	81.06	73.08	67.90179
320	81.92	74.55	69.55973
321	82.62	75.93	71.17861
322	83.26	77.32	72.71883
323	84	78.64	74.13924
324	84.84	79.99	75.22636
325	85.65	81.27	76.08199
326	86.48	82.59	76.88658
327	87.52	83.84	77.958
328	88.7	85.15	79.15321
329	89.73	86.39	80.42062
330	90.58	87.67	81.75479
331	91.23	88.87	82.83358
332	91.73	90.08	83.60595
333	91.83	91.18	84.21114
334	92.04	92.29	84.77792
335	92.17	93.3	85.43328
336	92.4	94.32	86.10108
337	92.72	95.26	86.85538
338	92.78	96.2	87.68771
339	93.02	97.05	88.67579
340	93.57	97.89	89.66835
341	94.33	98.77	90.6156
342	94.63	99.57	91.41476
343	94.98	100.39	92.07804
344	95.26	101.13	92.42731
345	95.37	101.88	92.6055
346	95.41	102.53	92.76137
347	95.42	103.2	92.89608
348	95.48	103.78	93.12618
349	95.8	104.4	93.28439
350	96.08	104.94	93.37561
351	96.19	105.5	93.67477
352	96.25	105.97	94.22738
353	96.36	106.47	94.81232
354	96.35	106.89	95.20784
355	96.29	107.31	95.58869
356	96.29	107.67	95.81991
357	96.35	108.04	95.91544
358	96.37	108.34	95.92395
359	96.33	108.65	95.86428
360	96.26	108.89	95.83619
361	96.3	109.16	96.04415
362	96.35	109.36	96.2836
363	96.31	109.57	96.43656
364	96.28	109.73	96.57302

365	96.24	109.86	96.69203
366	96.23	110.01	96.73762
367	96.16	110.1	96.71741
368	96.12	110.21	96.68207
369	96.17	110.26	96.70823
370	96.17	110.34	96.72094
371	96.04	110.36	96.69674
372	95.98	110.39	96.64137
373	95.92	110.38	96.61122
374	95.87	110.38	96.62804
375	95.8	110.33	96.6081
376	95.8	110.31	96.57446
377	95.8	110.24	96.54701
378	95.77	110.19	96.54403
379	95.67	110.09	96.49911
380	95.38	110	96.44513
381	95.01	109.85	96.38763
382	94.44	109.69	96.36486
383	93.76	109.47	96.30282
384	92.74	109.21	96.24163
385	91.49	108.85	96.19594
386	90.13	108.46	96.13537
387	89.01	107.99	96.08685
388	87.83	107.49	96.05411
389	86.63	106.91	96.0427
390	85.5	106.3	96.01594
391	84.4	105.66	95.96333
392	83.31	104.96	95.84927
393	82.06	104.23	95.58395
394	80.75	103.44	95.15031
395	79.12	102.59	94.56102
396	77.47	101.67	93.87686
397	75.87	100.71	92.97994
398	74.45	99.69	91.78265
399	72.75	98.63	90.46438
400	71	97.49	89.14586
401	69.37	96.32	87.84652
402	67.78	95.09	86.51717
403	66.02	93.82	85.22414
404	64	92.47	84.05093
405	61.58	91.05	82.90332
406	59.23	89.55	81.71953
407	56.81	87.98	80.39215
408	54.45	86.35	78.84201
409	52.14	84.65	77.27132
410	49.86	82.9	75.78603

411	47.65	81.08	74.40258
412	45.34	79.22	72.96424
413	42.88	77.29	71.34269
414	40.62	75.33	69.63704
415	38.45	73.33	67.98548
416	36.14	71.26	66.25202
417	34.04	69.18	64.32695
418	32.02	67.06	62.17088
419	30.21	64.94	59.95619
420	28.4	62.79	57.69313
421	26.86	60.66	55.3746
422	25.27	58.5	53.15544
423	23.65	56.36	51.02033
424	21.78	54.18	48.78743
425	20.03	52.01	46.55713
426	18.22	49.81	44.28385
427	16.41	47.63	41.99707
428	14.69	45.41	39.76814
429	13.04	43.22	37.70147
430	11.59	41.01	35.6171
431	10.39	38.87	33.51885
432	9.19	36.71	31.58574
433	8.37	34.63	29.79024
434	7.47	32.56	28.15354
435	6.65	30.55	26.68764
436	5.78	28.55	25.23543
437	4.89	26.61	23.52479
438	3.97	24.66	21.67363
439	3	22.79	19.86519
440	2.12	20.95	18.15071
441	1.14	19.09	16.50687
442	-0.1	17.28	14.74257
443	-1.56	15.42	12.98941
444	-2.97	13.62	11.47893
445	-4.17	11.8	10.15271
446	-4.98	10.06	9.043993
447	-5.48	8.32	8.225272
448	-5.78	6.7	7.546129
449	-5.95	5.08	6.815552
450	-5.96	3.59	5.976493
451	-5.87	2.12	5.070724
452	-5.71	0.77	4.169174
453	-5.49	-0.55	3.337263
454	-5.23	-1.76	2.541633
455	-5.22	-2.96	1.641988
456	-5.25	-4.05	0.484441

457	-5.17	-5.14	-0.89385
458	-4.9	-6.1	-2.1976
459	-4.55	-7.05	-3.24901
460	-4.25	-7.89	-3.98787
461	-3.9	-8.71	-4.46143
462	-3.54	-9.42	-4.85769
463	-3.05	-10.12	-5.10249
464	-2.68	-10.71	-5.18398
465	-2.48	-11.26	-5.20295
466	-2.46	-11.82	-5.12007
467	-2.53	-12.3	-4.90655
468	-2.52	-12.8	-4.66019
469	-2.57	-13.22	-4.58075
470	-2.5	-13.65	-4.65951
471	-2.61	-14.01	-4.69884
472	-2.92	-14.41	-4.51103
473	-3.05	-14.73	-4.16283
474	-3.25	-15.08	-3.79086
475	-3.32	-15.37	-3.44864
476	-3.27	-15.66	-3.09116
477	-3.18	-15.89	-2.66316
478	-3.21	-16.13	-2.18193
479	-3.17	-16.31	-1.85657
480	-2.95	-16.49	-1.75392
481	-2.45	-16.59	-1.79235
482	-1.98	-16.68	-1.9464
483	-1.71	-16.71	-2.00923
484	-1.76	-16.77	-1.96236
485	-1.97	-16.79	-1.98197
486	-1.85	-16.82	-2.21132
487	-1.7	-16.79	-2.56589
488	-1.08	-16.74	-2.83499
489	-0.72	-16.64	-2.84124
490	-0.53	-16.52	-2.78473
