

Implementasi Robot Keseimbangan Beroda Dua Berbasis Mikrokontroler

GRACE BOBBY, ERWIN SUSANTO, FIKY YOSEP SURATMAN

Jurusan Teknik Elektro Telkom University Bandung

Email : gracebobbysidauruk@yahoo.co.id

ABSTRAK

Perkembangan dunia robot berkembang pesat dari tahun ke tahun. Salah satu contohnya ialah Segway Personal Transporter. Variasi teknik dalam pergerakan robot pada lingkungan yang dinamik pun semakin banyak, diantaranya Pole-Placement Controller, Fuzzy Logic, Proportional Integrated Derivative Controller (Kontrol PID). Pada penelitian ini Fuzzy Logic akan digunakan sebagai pengontrol robot keseimbangan ini. Pada sistem ini digunakan dua sensor (accelerometer dan gyroscope) untuk mendapatkan pembacaan data yang stabil dan handal. Dari hasil percobaan kalman filter, diperoleh nilai parameter kalman filter yang optimal adalah $Q_{accelerometer} = 0,001$, $Q_{gyroscope} = 0,003$ dan $R_{pengukuran} = 0,03$.

Kata kunci: Accelerometer, Gyroscope, Fuzzy Logic, Kalman Filter, Self-balancing Control.

ABSTRACT

The development of robots is growing rapidly from year to year. One example is the Segway Personal Transporter. A variety of techniques in the movement of the robot in the dynamic environment became more numerous, including Pole-Placement Controller, Fuzzy Logic, Proportional Integrated Derivative Controller (PID control). In this project, Fuzzy Logic will be used as an balancing robot controller. In this system, used two sensors (accelerometer and gyroscope) to obtain data readout is stable and reliable. From the experimental of Kalman filter, obtained the optimal parameter values of Kalman filter are $Q_{accelerometer} = 0.001$, $Q_{gyroscope} = 0.003$ and $R_{measure} = 0.03$.

Keywords: Accelerometer, Gyroscope, Fuzzy Logic, Kalman Filter, Self-balancing Control.

1. PENDAHULUAN

Di dunia modern saat ini. Penelitian mengenai robot sangatlah banyak dan berkembang pesat, disertai dengan kemajuan teknologi yang terus menerus berkembang. Salah satu yang membuat penulis ingin untuk mengembangkan pengetahuannya mengenai robot dan sejenisnya. Robot yang akan dibahas disini adalah robot yang akan dapat menyeimbangkan dirinya hanya dengan dua roda. Dimana pada saat ini kita sudah mengenal adanya kendaraan Segway Personal Transporter. Kendaraan yang memiliki dua roda, dikanan dan dikiri sebagai penyeimbangnya.

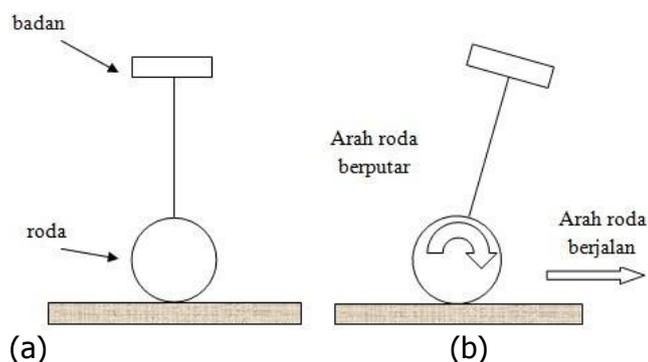
Di sini akan dirancang prototip dari Segway. Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, ini juga merupakan pengembangan dari pendulum terbalik yang di letakan diatas kereta beroda. Sedangkan tujuan dari penelitian ini ialah mendesain suatu sistem kontrol yang handal agar robot dapat berdiri tegak.

Untuk dapat menyeimbangkannya dibutuhkan metode kontrol yang baik dan handal untuk mempertahankan posisi robot dalam keadaan tegak lurus terhadap permukaan bumi tanpa memerlukan pengendali dari luar dan menerapkan Self-balancing Control. Maka dari itu penulis memilih kontrol Fuzzy Logic sebagai kontrol yang dapat menciptakan kontrol sesuai dengan yang diharapkan penulis. Penentuan pada metode control Fuzzy Logic ini ialah dikarenakan dengan menggunakan Fuzzy Logic ini keluaran dari system berupa *crisp* tegas yang dapat menjaga kestabilan robot yang dibuat.

Pada penelitian ini digunakan Arduino uno, serta memakai sensor accelerometer dan gyroscope yang akan mengendalikan motor DC. Masalah yang didapatkan pada penelitian ini antara lain ialah merealisasikan kontrol Fuzzy Logic pada sistem robot dengan merealisasikan Kalman Filter agar pembacaan sensor akurat. Sehingga robot ini dapat mempertahankan posisinya tegak lurus dengan seimbang terhadap permukaan bumi pada bidang datar. Dan dapat menerapkan Self-balancing Control pada robot.

Balancing Robot

Balancing robot beroda dua merupakan suatu *robot mobile* yang memiliki dua roda di kedua sisinya dan tidak akan seimbang tanpa sebuah metode kontrol yang baik (**Wibowo, 2013**). Saat *balancing robot* beroda dua cenderung ke depan atau miring ke kanan pada Gambar 1, maka yang perlu dilakukan adalah motor akan memutar searah jarum jam sehingga *balancing robot* beroda dua akan berputar ke arah depan. Gaya yang digunakan untuk menyeimbangkan dihasilkan dari putaran roda.

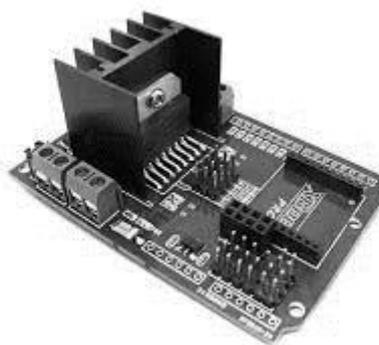


Gambar 1. *Balancing Robot* Beroda Dua Menyeimbangkan Diri.
(a) Posisi Robot Seimbang
(b) Arah Roda Berjalan dan Berputar Ketika Posisi Miring ke depan.

Logika Fuzzy

Logika Fuzzy merupakan logika dalam pengambilan keputusan yang digunakan untuk memecahkan masalah dengan sistem yang sulit untuk dimodelkan, teori tentang fuzzy set pertama kali diperkenalkan dan dikembangkan oleh Dr. Lotfi A. Zadeh dari Universitas California, Berkeley pada tahun 1965. Dalam kehidupan banyak masalah dengan informasi yang sulit direpresentasikan ke dalam sebuah model rumus atau angka yang pasti karena informasi tersebut bersifat kualitatif (tidak bisa dihitung secara kuantitatif).

Driver Motor



Gambar 2. Driver Motor DC

Antara mikrokontroler dengan suatu motor. Fungsi *driver* motor yaitu untuk menjalankan motor sebagai mengatur arah putaran motor maupun kecepatan putaran motor dan digunakan *driver* motor karena arus yang keluar dari mikrokontroler tidak mampu memenuhi

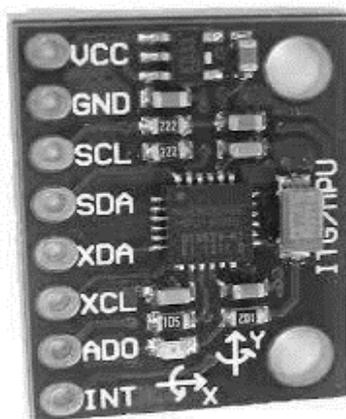
kebutuhan motor DC, serta mengubah tegangan yang dikeluarkan mikrokontroler agar sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan motor tersebut.

Pada penelitian ini digunakan satu jenis *driver* motor, yaitu *driver* motor MotoMama Itread Studio yang ditunjukkan pada Gambar 2. MotoMama merupakan basis *driver* motor perisai H-Bridge di ST L298N *Chip*.

Sensor Kemiringan

Dalam dunia elektro mekanik ada beberapa alat sensor gerak yang dapat digunakan dan salah satunya adalah *accelerometer* dan *gyroscope*. Secara sederhana *accelerometer* merupakan sebuah alat untuk sensor posisi dan perpindahan sedangkan *gyroscope* digunakan sebagai sensor sudut/gerak rotasi. Baik *accelerometer* maupun *gyroscope* sudah banyak diterapkan terutama pada bidang mekanika khususnya sistem keseimbangan.

Inertial Measurement Unit (IMU)



Gambar 3. IMU 6050

Gambar 3 ialah sensor MPU-6050. IMU digital ini memiliki 3-axis *accelerometer* dan 3-axis *gyroscope* yang mana sensor ini terhubung secara I2C, dan ketika dikombinasikan dengan filter, akan menampilkan pembacaan kemiringan yang sangat stabil.

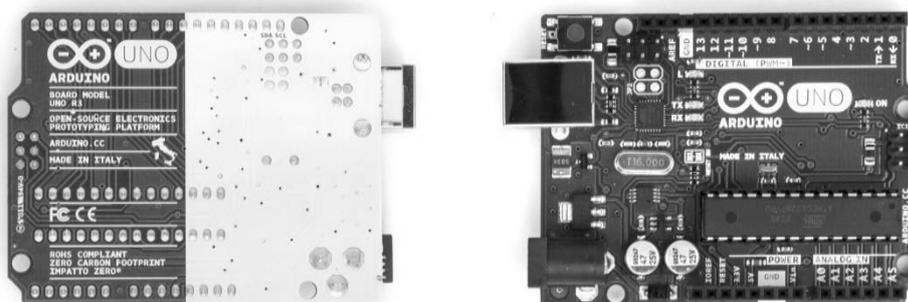
Motor DC

Agar robot dapat berdiri tegak dengan stabil maka pemilihan motor DC sangatlah penting. Motor DC dengan torsi dan RPM yang tinggi menjadi sangat krusial untuk kestabilan robot. Sementara yang penulis pakai ada motor DC N20 motor yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Motor DC

Arduino Uno



Gambar 5. Arduino Uno

Arduino Uno merupakan sebuah perangkat mikrokontroler berbasis ATmega 328. Seperti halnya mikrokontroler lain, Arduino Uno juga memiliki fasilitas dasar dari mikrokontroler. Arduino Uno memiliki 14 pin input/output digital, dengan 6 diantaranya bisa digunakan sebagai PWM (*Pulse With Modulation*), 6 pin input analog, ICSP *header*, 16 MHz kristal osilator, USB *port* dan tombol reset yang ditunjukkan pada Gambar 5.

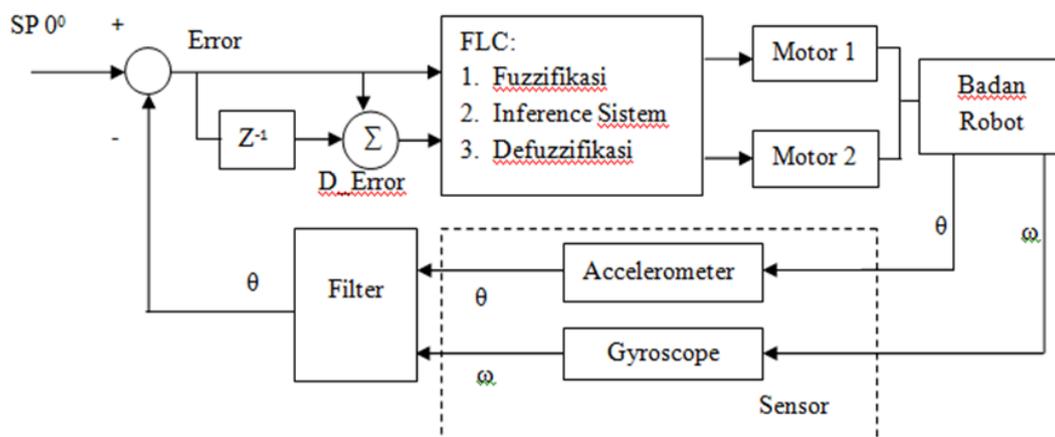
Kalman Filter

Penulis ingin menunjukkan kelebihan Kalman filter untuk memberi prediksi yang baik untuk sudut robot terhadap permukaan bumi dan menjaga robot agar tetap seimbang. Karena Kalman Filter digunakan untuk menghilangkan segala *noise* pengukuran pada *accelerometer* dan *gyroscope*. Kelemahan dari Filter ini sendiri adalah tidak adanya standar dalam metode

mendapatkan persamaan matematis yang akan digunakan di Kalman Filter. Inilah yang membuat Kalman Filter menjadi kompleks. Kelemahan pada implementasi Kalman Filter pada sistem embedded adalah besarnya beban yang diberikan pada mikrokontroler. Dikarenakan pada akan mengerjakan perhitungan matriks yang kompleks.

2. PERANCANGAN SISTEM

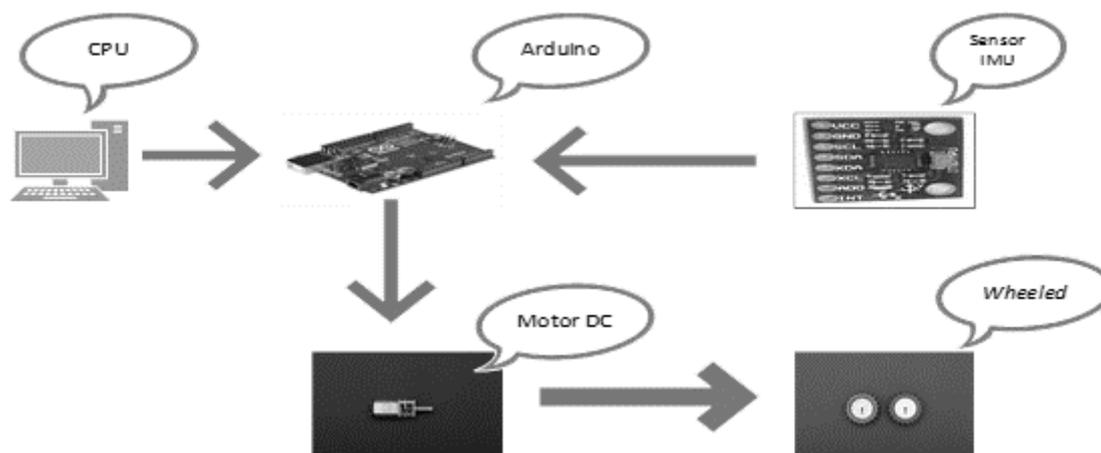
Perancangan robot keseimbangan terdiri dari blok sistem yang diintegrasikan menjadi satu sistem utuh. Pembagian blok sistem dibagi menjadi blok sensor, blok pengolahan data, dan blok keluaran (**Pamungkas, A.P, 2013**). Pada blok sensor, robot menggunakan sensor IMU sebagai masukan. Pertama adalah gabungan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yang berfungsi untuk mengukur derajat robot yang berporos pada pusat bumi. Pada bagian keluaran merupakan pengaturan arah pergerakan dan kecepatan dua motor DC yang dipasang secara diferensial dengan menggunakan *driver* motor. Data yang dihasilkan dari bagian pengolahan akan digunakan untuk mengatur arah gerak dari kedua motor serta mengatur kecepatannya menggunakan *duty cycle*. Berikut ini adalah diagram blok dari sistem yang digunakan dalam penelitian ini:



Gambar 6. Diagram Blok Sistem

Gambar 6 adalah struktur kerja system. Nilai masukan (*Set Point*) sistem berupa nilai derajat yang dikehendaki ialah 0° . Hasil dari keluaran kendali berupa tegangan dalam bentuk PWM (*Pulse Width Modulation*). Sensor *accelerometer* dan *gyroscope* akan bekerja untuk mengukur nilai dari derajat robot (*Present Value*) dan kemudian menjadikan nilai pembacaan sebagai nilai umpan balik negatif.

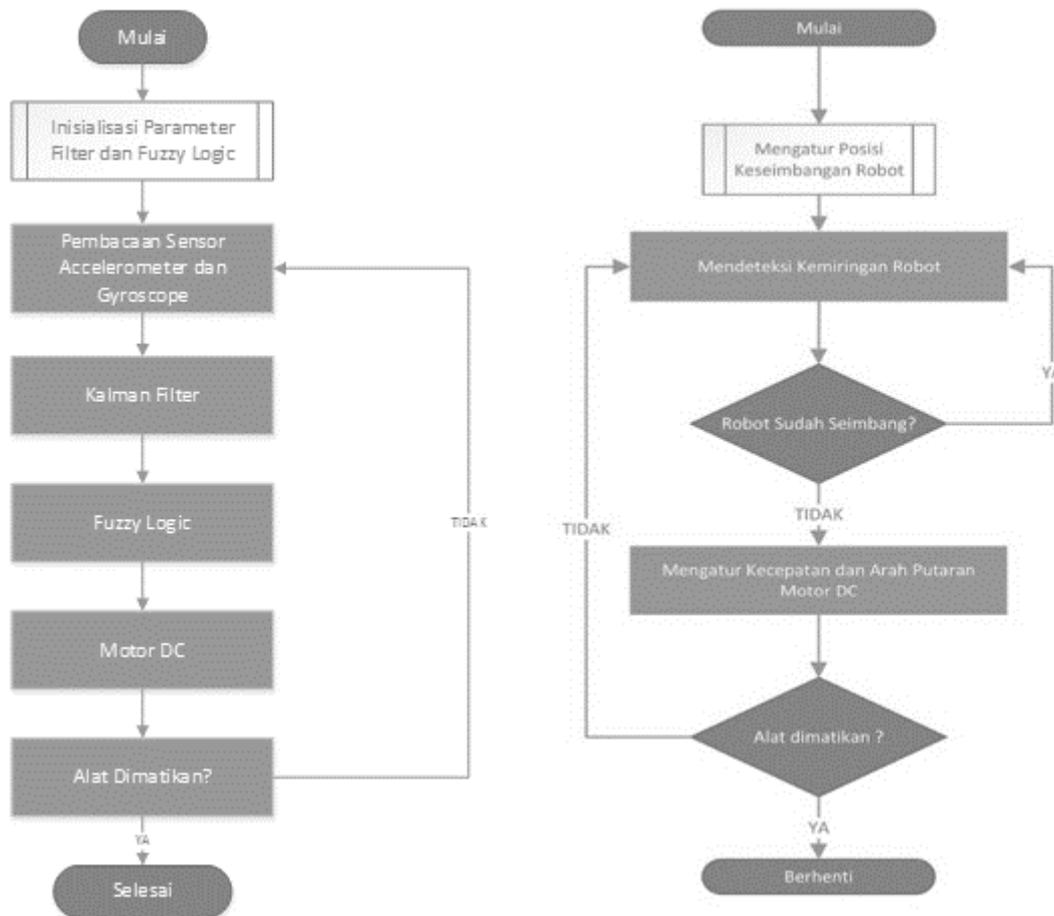
Pada Gambar 7 akan menjelaskan alur kerja dari perangkat yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 7. Alur Kerja Perangkat

Gambar 7 menunjukkan alur proses kerja keseluruhan perangkat. Proses pemrograman digunakan melalui Arduino Uno R3 yang terhubung secara *serial* terhadap PC (*Personal Computer*). Dalam program Arduino telah diatur nilai *set point* dari sistem sebesar 0° . Mikrokontroler kemudian menghasilkan nilai PWM untuk menyeimbangkan robot. Nilai derajat dari badan robot kemudian akan dibaca kembali oleh sensor IMU secara *analog*. Untuk proses analisis data, digunakan perangkat lunak, untuk *plotting* data yang dibaca secara *serial* di Arduino.

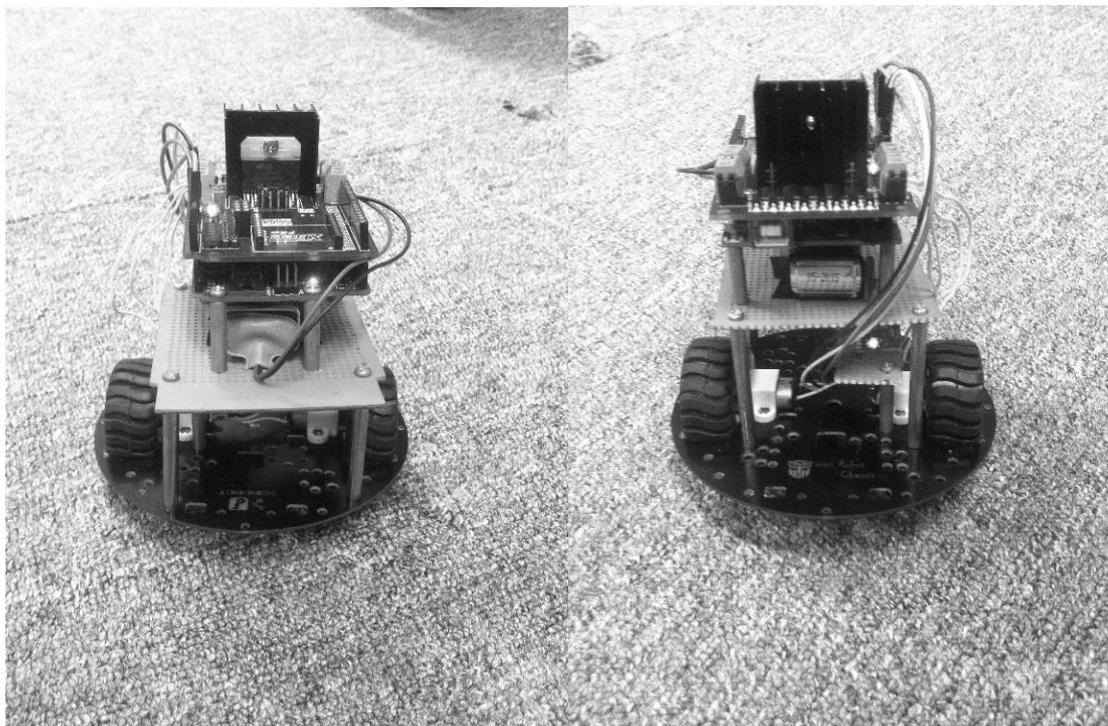
Sementara untuk *flowchart* sistem yang digunakan oleh mikrokontroler dapat dilihat pada Gambar 8 berikut ini :



Gambar 8. Flowchart sistem kerja dan perancangan hardware

Flowchart pada Gambar 8 merupakan urutan kerja sistem robot keseimbangan yang dibuat. Yang pertama dilakukan adalah menentukan keseimbangan dari robot. Selanjutnya dari yang sudah dirancang maka dengan otomatis program akan memilih kecepatan dan arah putar motor DC.

Flowchart pada Gambar 8 yang kedua menunjukkan urutan kerja dari perangkat lunak yang dirancang. Yang pertama dilakukan adalah inisialisasi parameter Fuzzy Logic dan kalman filter. Lalu setelah mendapat nilai pembacaan dari sensor akan dibaca menggunakan metode kalman filter untuk mendapat kemiringan robot yang mana nilai tersebut akan di proses dalam Fuzzy Logic dan mengeluarkan *output* berupa PWM untuk menggerakkan motor dengan kecepatan dan arah putaran yang sudah ditentukan.



Gambar 9. Bentuk Fisik Robot tampak Depan dan Belakang

Gambar 9 menunjukkan robot tampak depan dan belakang. Bentuk fisik robot ini mempunyai tinggi 132mm dan *Chassis* diameter 122mm. Ruang antara plat memberikan keluasaan untuk meletakkan komponen elektrik dan hardware lainnya. Jarak antara *Chassis* dan tanah 15mm diameter roda 42×19 mm. Dua buah motor DC ditempelkan di plat yang paling bawah.

2.1 Perancangan Fuzzy Logic

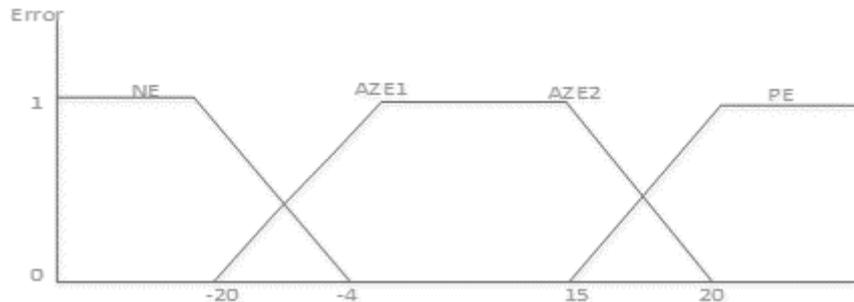
Logika fuzzy digunakan sebagai pengolah data masukan dari sensor IMU. Hal ini bertujuan agar proses penyeimbangan berjalan lancar.

2.1.1 Fuzzyfication

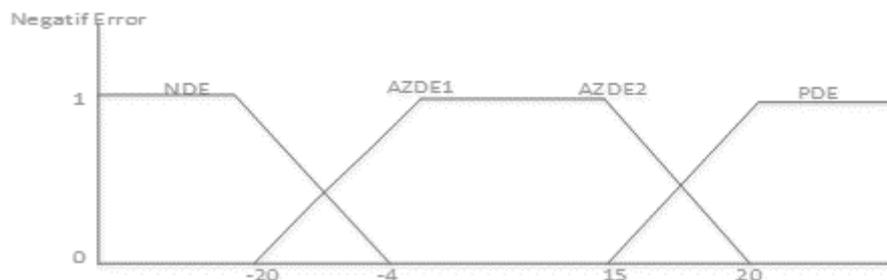
Data hasil pembacaan sensor IMU merupakan data masukan bernilai tegas (*crisp*) kemudian diubah menjadi himpunan *fuzzy* menurut fungsi keanggotaannya (**Priyoprahastyo, 2015**). Proses awal dari fuzzyfikasi adalah membuat *membership function* (fungsi keanggotaan) dari masukan, serta menentukan banyaknya *variable linguistic* dalam fungsi keanggotaan tersebut. Dari fungsi keanggotaan yang dibuat akan diketahui nilai derajat keanggotaan dari masing-masing *variable* dalam himpunan fuzzy berdasarkan masukan tegas (*crisp*).

Pada sistem ini terdapat masukan dari sensor IMU. Masukan dari sensor IMU ini memiliki masing-masing empat nilai linguistik untuk masing-masing sensor NE, AZE1, AZE2 dan PE.

Masukan kedua dari delta error NDE, AZDE1, AZDE2 dan PDE dengan fungsi keanggotaan bahu trapesium.



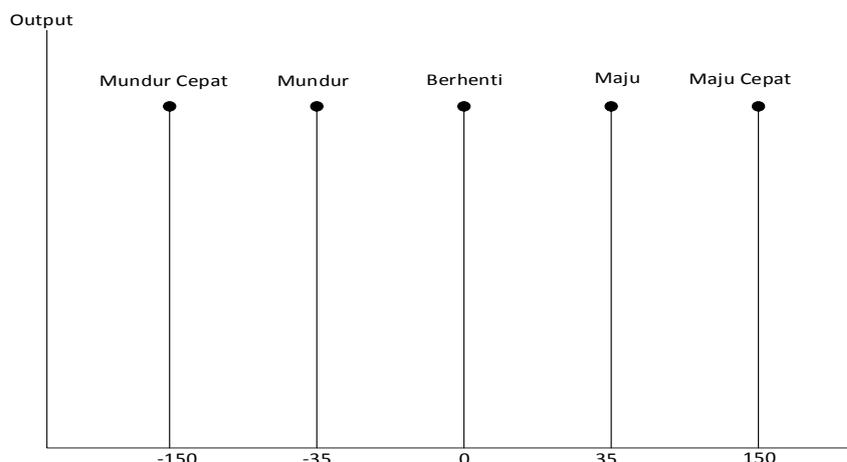
Gambar 10. Fungsi keanggotaan masukan sensor error



Gambar 11. Fungsi keanggotaan masukan sensor negatif error

Pada keluaran sistem menggunakan model sugeno, pembentukan fungsi keluaran pada model sugeno memiliki fungsi yang lebih sederhana dengan respon lebih cepat dari model yang lain. Bentuk keluaran fungsi keanggotaan pada model sugeno mempunyai bentuk *singleton*, bentuk dengan derajat keanggotaan satu pada suatu nilai *crisp* tunggal dan nilai nol pada suatu *crisp* yang lain.

Karena keluaran dalam bentuk *singleton* maka fungsi pada setiap nilai linguistik bernilai satu dan nol pada diluar nilai linguistik. Keluaran pada sistem yang dibuat ada dua, yaitu PWM pengontrol motor dc kanan dan kiri. Untuk keluaran sistem yang berupa kecepatan memiliki lima nilai linguistik, yaitu: **MUNDUR CEPAT, MUNDUR, BERHENTI, MAJU, MAJU CEPAT.**



Gambar 12. Fungsi keanggotaan keluaran motor

2.1.2 Rule Inference

Pada *rule inference*, terjadi proses pengolahan data masukan fuzzyfikasi dengan hasil keluaran yang dikehendaki dengan aturan-aturan tertentu. Dari aturan-aturan yang dibentuk inilah yang nantinya akan menentukan respon dari sistem terhadap berbagai kondisi *set point* dan gangguan yang terjadi pada sistem yang akan dibuat. Rule inference sistem tertulis pada Tabel 1.

Tabel 1. Rule Inference motor

Error Delta Errpr	NE	AZE1	AZE2	PE
NDE	MC-	MC-	M+	M+
AZDE1	M-	M-	B	M+
AZDE2	MC-	M-	B	MC+
PDE	M-	B	MC+	MC+

Keterangan : MC-=Mundur Cepat, M-= Mundur, B=Berhenti, M+= Maju, MC+= Maju Cepat..
Berdasarkan tabel, maka sistem mempunyai 16 aturan fuzzy, yaitu:

- 1 Jika Error = **NE** dan Delta Error = **NDE** maka Motor DC = **MUNDUR CEPAT**.
- 2 Jika Error = **NE** dan Delta Error = **AZDE1** maka Motor DC = **MUNDUR**.
- 3 Jika Error = **NE** dan Delta Error = **AZDE2** maka Motor DC = **MUNDUR CEPAT**.

Sampai dengan

- 16 Jika Error = **PE** dan Delta Error = **PDE** maka Motor DC = **MAJU CEPAT**.

2.1.3 Defuzzyfication

Defuzzifikasi merupakan pemetaan bagi nilai-nilai *fuzzy* keluaran yang dihasilkan pada tahap *rules inference* ke nilai-nilai keluaran kuantitatif. Pada perancangan robot mobil ini proses defuzzifikasi menggunakan metode *Weight Average* dan keluaran dari proses defuzzifikasi berupa nilai PWM yang nantinya digunakan untuk mengontrol kecepatan motor DC.

2.2 Kalman Filter Diskrit

Kalman filter merupakan filter digital rekursif yang dapat mengestimasi proses dengan sangat efektif. Kalman filter dapat mengurangi noise pada pengukuran sensor sebelum masuk ke dalam sistem kontrol. Oleh karena itu kalman filter sering digunakan pada sistem kontrol yang sensitif terhadap noise karena dapat meminimalkan *square error*. Pada implementasinya kalman filter tidak memerlukan data yang harus disimpan. Setiap data pengukuran yang masuk akan diproses ulang. Sehingga kalman filter akan lebih mudah untuk diimplementasikan pada mikrokontroler (Royan, 2015). Sebelum kalman filter digunakan untuk membaca data dari sensor, proses atau sistem harus dimodelkan dalam sistem linear.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (1)$$

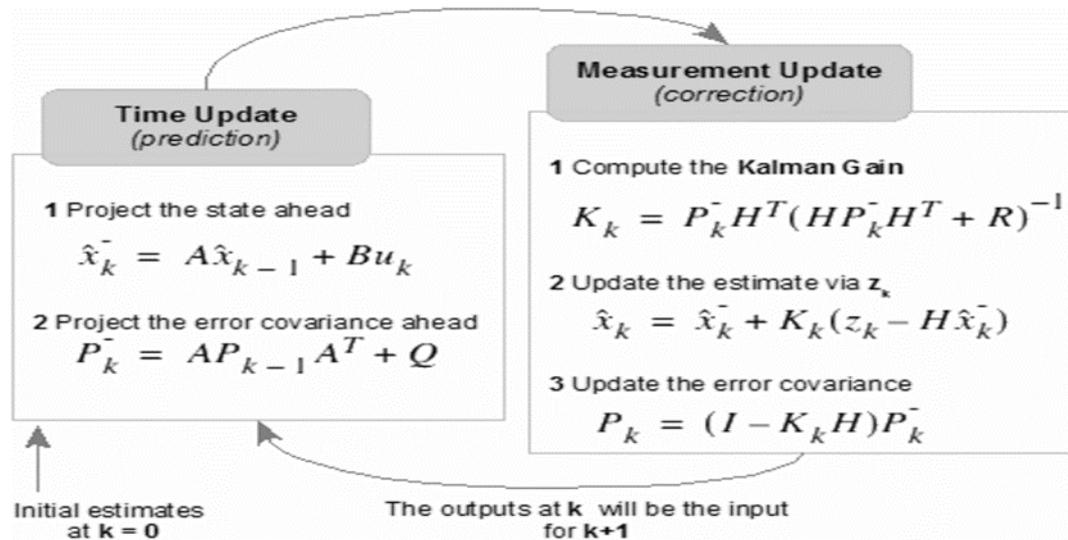
$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

Persamaan 1 merepresentasikan persamaan *state* proses. x_k merupakan kombinasi dari nilai sebelumnya dengan sinyal u_k dan *process noise*. A, B , dan H menyatakan *state matrices*, w_{k-1} menyatakan *process noise*. Persamaan 2 merepresentasikan persamaan *output state*. z_k adalah nilai yang terukur dari sensor, dan v_k menyatakan *noise* pengukuran. *Noise* proses w_{k-1} dan *noise* pengukuran v_k tidak memiliki hubungan karena keduanya merupakan *independent random noise variables*. Tapi keduanya dapat dimisalkan dengan matrik kovarian Q_w dan R_v . Sehingga dapat dituliskan pada Persamaan 3 dan 4.

$$Q_w = E [w_k w_k^T] \quad (3)$$

$$R_v = E [v_k v_k^T] \quad (4)$$

Dari Persamaan 3 dan 4, T adalah *matrix transpose* dan E merupakan nilai estimasinya. *Process noise covariance* (Q_w) matrix dan *measurement noise covariance* (R_v) merupakan komponen penting dalam kualitas hasil dari keluaran kalman filter. Kedua matriks kovarian ini dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan statistic. Namun, pada penelitian ini penulis menggunakan metode *tunning*. Yaitu dengan *trial and error* sampai mendapat nilai yang paling baik untuk pembacaan sensor yang digunakan. Kalman filter memperkirakan keluaran sensor dengan skema umpan balik. Pertama, kalman filter akan memperkirakan keadaan pada suatu waktu. Lalu mengambil nilai pengukuran yang ber-*noise* dalam bentuk umpan balik. Maka perhitungan dari kalman filter akan terbagi menjadi dua bagian, yaitu *Time Update* (kondisi prediksi) dan *Measurement Update* (kondisi koreksi). Dua persamaan inilah yang menjadi dasar dari kalman filter.



Gambar 13. Skema Algoritma Kalman Filter

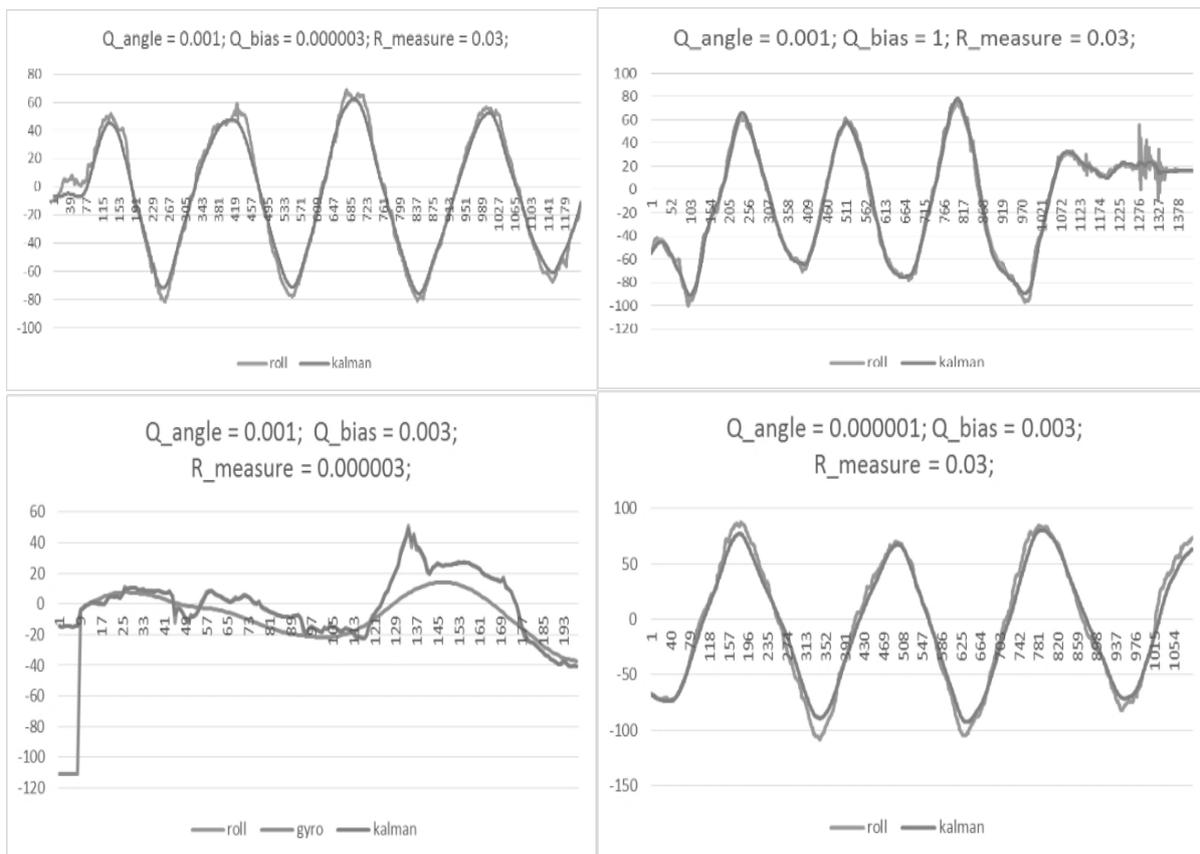
3. PENGUJIAN

Pengujian pada penelitian ini terbagi menjadi 3 bagian dan bertahap :

1. Pengujian Kalman Filter
2. Pengujian Fuzzy Logic
3. Kesimpulan atau nilai keseluruhan kinerja Robot

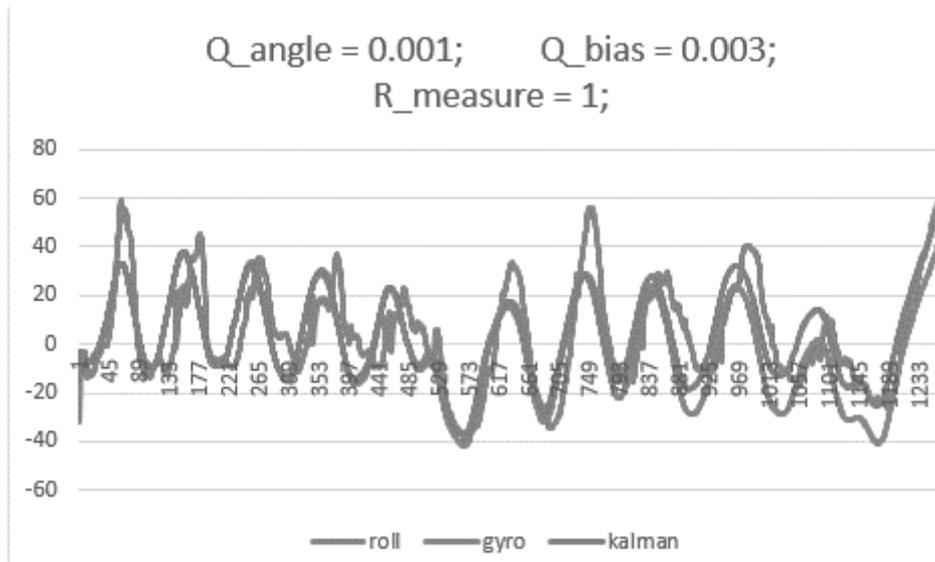
3.1 Pengujian Kalman Filter

Seperti yang sudah dijelaskan, tujuan utama dari Kalman filter adalah menghilangkan *noise* pengukuran pada *sensor accelerometer* serta mengurangi *drift* dari *gyroscope* (Putra,2015). Kalman filter memberikan prediksi sudut yang lebih baik dari data asli dari *accelerometer*. Agar filter dapat berjalan dengan lancar, maka perlu dilakukan *tuning* manual (Boskovich,1993). Parameter yang perlu dituning adalah Q_w dan R_v . Matriks Q_w terdiri dari *noise* proses,yaitu Q_{angle} dan Q_{bias} sedangkan R_v merupakan *noise* pengukuran yaitu $R_{measure}$.

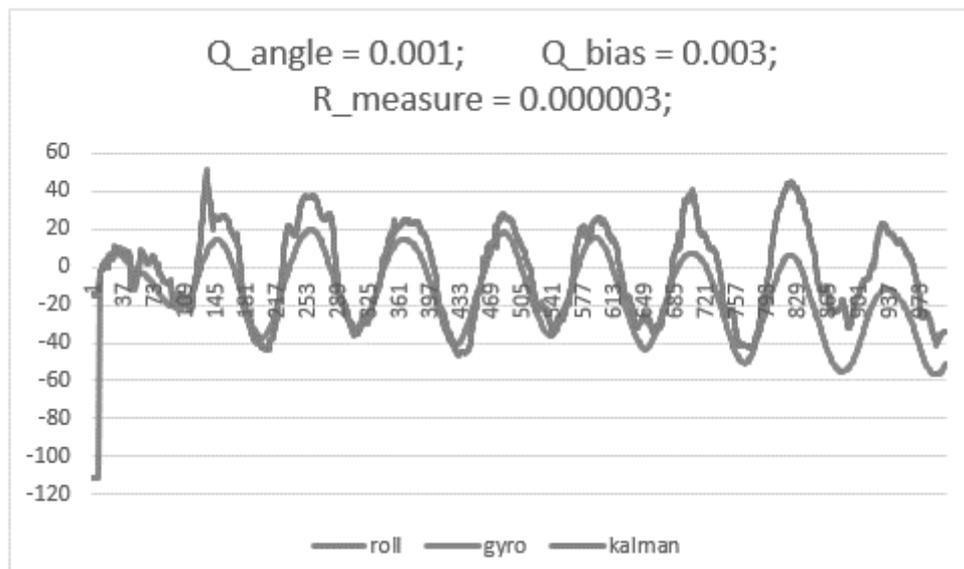


Gambar 14. Tuning yang tidak baik

Dari Gambar 14 kita dapat melihat bahwa keluaran dari kalman filter (bewarna kuning) masih mendominasi pemilihan pembacaan sensor yaitu pembacaan dari *accelerometer* ataupun *gyroscope*. Sedangkan yang diharapkan pada penelitian ini kalman filter dapat menggabungkan kedua sensor tersebut dan mengurangi *noise* yang dimiliki masing-masing sensor atau memprediksi sudut keluaran yang sesungguhnya.

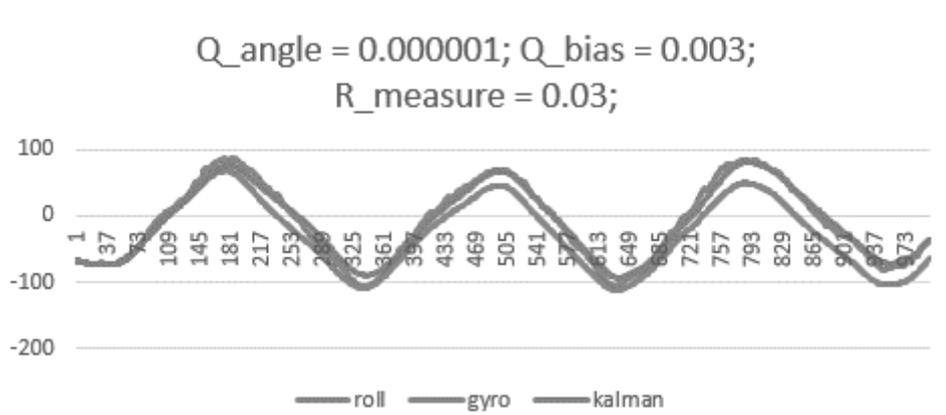


Gambar 15. Tuning R_measure

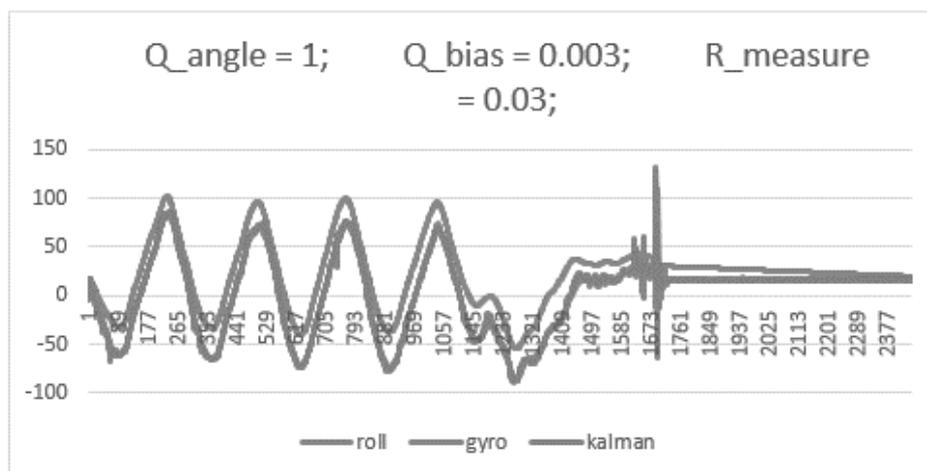


Gambar 16. Tuning R_measure

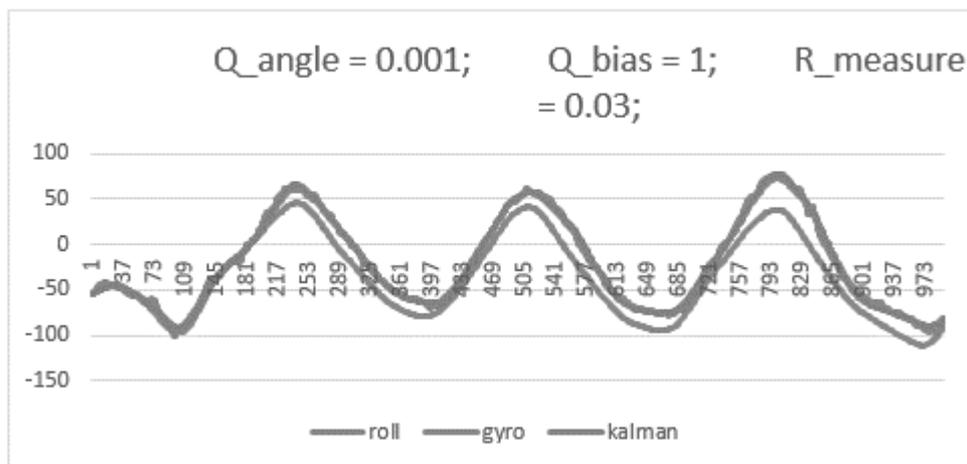
Dari Gambar 15 dan Gambar 16 diatas diperoleh bahwa perubahan nilai R_measure menjadi lebih besar membuat terjadinya *overshoot* pada awal pembacaan. Diawal Terlihat bahwa kalman mengikuti sudut pembacaan dari *accelerometer* tapi seiring jalan kalman pun mengikuti nilai pembacaan dari *gyroscope* atau mengikuti nilai bias yang tidak respon terhadap waktu yang sebenarnya. Disinilah kita harus menemukan atau menentukan parameter yang tepat untuk R_measure.



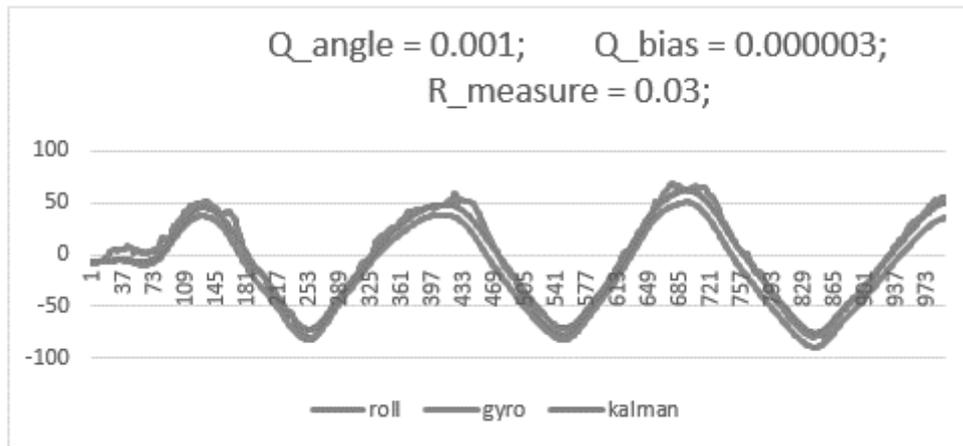
Gambar 17. Tuning Q_w



Gambar 18. Tuning Q_w



Gambar 19. Tuning Q_w

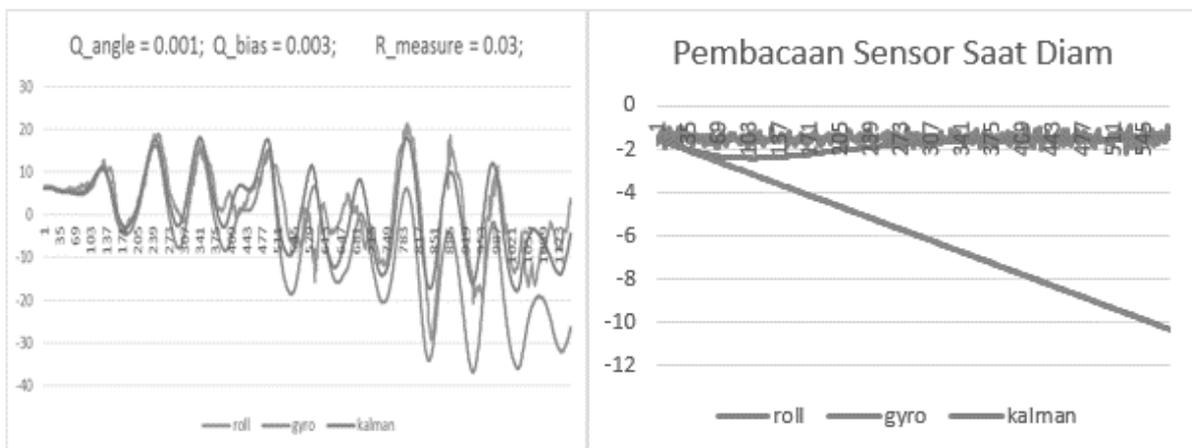


Gambar 20. Tuning Q_w

Pada Gambar 17 sampai 20 menunjukkan perbandingan sudut accelerometer dan kalman filter dengan mengubah nilai Q_w . Perubahan nilai Q_{angle} dan Q_{bias} menentukan salah satu nilai lebih dipercaya antara *accelerometer* dan *gyroscope*. Jika nilai Q_{angle} lebih kecil dibandingkan nilai Q_{bias} maka pembacaan nilai *accelerometer* lebih dipercaya dibandingkan dengan nilai pembacaan *gyroscope*, begitu juga sebaliknya.

Setelah melakukan beberapa percobaan untuk mencari nilai Q_w dan R_v yang optimal. Didapatkan nilai parameter kalman filter yang optimal adalah:

- Q_{angle} ($Q_{\text{accelerometer}}$) = 0.001
- Q_{bias} ($Q_{\text{gyroscope}}$) = 0.003
- R_{measure} = 0.03

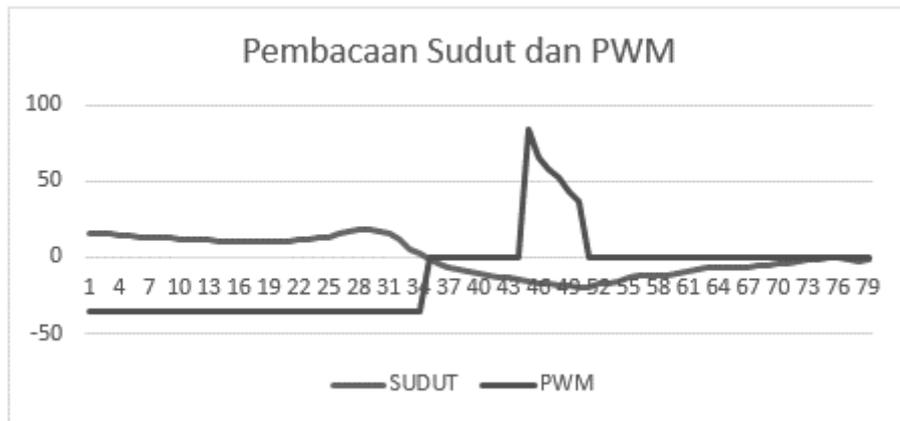


Gambar 21. Tuning yang Optimal

3.2 Pengujian Fuzzy Logic

Tujuan dari Fuzzy Logic adalah kestabilan. Terlihat robot menjaga kestabilannya di sudut 0° . Pada Gambar 22 terlihat bahwa pada awal inialisasi terdapat sebuah overshoot yang disebabkan inialisasi prediksi sudut kalman, akan tetapi setelah itu overshoot itu hilang.

Parameter Fuzzy ialah : -20° , -4° , 15° , 20° .



Gambar 22. Pembacaan Sudut dan PWM

*Jika sudut menunjukkan keluaran negatif yaitu pembacaan posisi robot miring ke belakang maka PWM akan mengeluarkan nilai positif untuk menggerakkan motor ke arah depan. Begitu juga sebaliknya.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kendali Fuzzy Logic, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan menggunakan 2 buah input pada proses fuzzifikasi dan menggunakan 16 rules, robot mampu mencapai kesetimbangannya kembali (*steady state*) setelah mendapatkan gangguan dari luar. Pengujian robot keseimbangan dengan menggunakan kendali fuzzy logic dapat membuat robot berdiri tegak pada pusat bumi dan robot mampu mencapai tujuan dari penelitian ini ialah mendesain suatu kontrol handal yang dapat membuat robot berdiri tegak.
2. Penggunaan filter pada sensor IMU dengan penggabungan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* yaitu kalman filter, sangat berguna dan membantu dalam mengurangi *noise* dan *drift* pada sensor.
3. Penggabungan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* menggunakan kalman filter memberikan nilai perhitungan sudut yang lebih baik dibandingkan perhitungan sudut langsung menggunakan *accelerometer* atau *gyroscope*.

4. Pemilihan nilai Q_w dan R_v pada kalman filter sangat berpengaruh pada nilai keluaran sudut dari sensor IMU. Nilai Q_w dan R_v yang optimal setelah melakukan beberapa percobaan adalah $Q_{accelerometer} = 0,001$; $Q_{gyroscope} = 0,003$ dan $R_{measurement} = 0,03$.

DAFTAR RUJUKAN

- Wibowo, B.C. dan Iqbal. M. (2013). Implementasi Metode Logika Fuzzy pada Kontrol Keseimbangan Robot Mobil Beroda Dua. Jurnal Universitas Muria. Kudus.
- Pamungkas, A.P. Balancing Robot Beroda Dua Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis Mikrokontroler Arduino. Fakultas Teknik Elektro, Universitas Dian Nuswantoro.
- Priyoprahastyo, L.P. (2015). Design and Implementatio of Collision Avoidance for Automated Guided Vehicle (AGV) Using Ultrasonic Sensors With Fuzzy Logic Methods. Telkom University.
- Royyan, M. (2015). Implementation of Kalman Filter and PID Controller for Inverted Pendulum Robot. Telkom University.
- Putra, N.W. (2015). Design And Implementation ADCS (Attitude Determination And Control System) For Nano Satellite Using Reaction Wheel. Telkom University
- Boskovich, S.M. (1993). A Two Wheeled Robot Control System, California State Polyrechnic University