

PROTOTYPE KENDARAAN KESEIMBANGAN RODA DUA MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER

UNIVERSITAS TELKOM

PROTOTYPE OF TWO WHEELS SELF BALANCING VEHICLE USING FUZZY LOGIC CONTROLLER

TELKOM UNIVERSITY

Burhanuddin Indra¹, Dr Erwin Susanto, ST.MT., Ph.D.², Cahyantari Ekaputri, ST.MT.³

^{1,2}Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹burhanudinindra@students.telkomuniversity.ac.id

²erwinelektro@telkomuniversity.ac.id,

³cahyantarie@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi telah berkembang sangat pesat pada generasi ke generasi. Salah satunya adalah kendaraan personal seperti Segway *Personal Transpoter*. Kendaraan keseimbangan (*Self Balance Vehicle*) adalah kendaraan yang memiliki dua roda, di kanan dan di kiri sebagai keseimbangannya. Diharapkan Kendaraan keseimbangan ini dapat mengurangi pemakaian energy/energy dan dapat menjadi solusi kendaraan ramah lingkungan. Dalam penelitian tugas akhir ini penulis akan merancang sebuah kendaraan keseimbangan (*Self Balance Vehicle*) dengan menggunakan metode *Fuzzy Logic Controller* yang menggunakan motor DC dan sensor IMU. Pada sistem yang dibangun oleh penulis menggunakan sensor IMU sebagai inputan dan Motor DC sebagai output dari *mikrokontroller*. Pada analisa yang dilakukan penulis adalah bagaimana kendaraan dapat berdiri stabil pada titik keseimbangannya dan dapat membaca sensor yang akurat. Parameter inputan *Fuzzy Logic* ini akan berdampak sendiri pada performa sistem kontrol yang telah dibangun. Serta memperoleh nilai pembacaan sensor menggunakan kalman filter yang optimal adalah $Q_accelerometer = 0,001$; $Q_gyroscope = 0,003$ dan $R_pengukuran = 0,03$.

Kata kunci: *self-balacing control, fuzzy logic, Self Balancing, segway.*

Abstract

The development of technology has grown so rapidly over the generations. One is personal vehicles such as the Segway *Personal Transpoter*. Vehicle balance (*Balance Self Vehicle*) is a vehicle that has two wheels, on the right and left as balance. Vehicles are expected this balance can reduce the consumption of energy / energy and can be a solution of environmentally friendly vehicles. In this research, the writer will design a vehicle balance (*Balance Self Vehicle*) using *Fuzzy Logic Controller* which uses a DC motor and sensor IMU. In a system built by the author using IMU sensor as an input and output of the DC motor as the microcontroller. In the analysis the author is how vehicles can stand steady on its balance point and can read an accurate sensor. *Fuzzy Logic* input parameters will affect itself on Performance of control systems that have been built. And obtain the value of sensor readings using a Kalman filter is the optimal $Q_accelerometer = 0.001$; $Q_gyroscope = 0.003$ and $R_pengukuran = 0.03$

Keywords: *self-balacing control, fuzzy logic, Self Balancing, segway.*

1. Pendahuluan

Kendaraan keseimbangan (*Self Balance Vehicle*) adalah robot yang memiliki dua roda, dikanan dan dikiri sebagai penyeimbangannya. Kendaraan keseimbangan ini mengurangi pemakaian energi. Di bidang transportasi personal menghasilkan sebuah alat transportasi yang menggunakan motor listrik sebagai tenaga penggerak.

Penulis akan merancang sistem kendali keseimbangan kendaraan keseimbangan (*Self Balance Vehicle*) yang memiliki beban agar tetap mempertahankan posisi setimbang kendaraannya..

2. Dasar Teori

2.1 Segway

Sistem teknologi *Segway* menggunakan mikroprosesor dan rangkaian sensor yang berguna untuk menjaga keseimbangan pengendara. *Segway* pada dasarnya adalah sebuah robot yang dikenal dengan sebutan "*balancing robot*". *Balancing robot* bekerja dengan cara memutar kedua rodanya agar tubuhnya tetap tegak dan menerapkan sistem pendulum terbalik. Apabila tubuh



Gambar 2.1 Segway [1]

robot semakin miring ke depan maka rodanya juga akan semakin cepat berputar ke depan, sehingga posisi tubuh robot menjadi tegak kembali, begitu juga sebaliknya. Namun ada perbedaan antara *balancing robot* dan *Segway*, yaitu *Segway* dapat berbelok ke kiri dan ke kanan. Agar dapat berbelok ke kiri atau ke kanan, maka kecepatan rodanya harus dibuat berbeda. Perbedaan kecepatan tersebut ditentukan berdasarkan kemiringan stang. [1]

2.2 Sensor

Sensor merupakan piranti untuk mengkonversi energi yang berasal dari kejadian fisik menjadi arus listrik atau tegangan untuk keperluan pengukuran, kontrol, atau informasi. Sensor terbagi dalam beberapa macam seperti: sensor thermal, sensor optik, dan sensor mekanik.

2.2.1 Gyroscope

Gyroscope adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengukur atau mempertahankan orientasi dari sebuah objek. *Gyroscope* merupakan sebuah roda berat yang berputar pada jari-jarinya. Sebuah *giroskop* mekanis terdiri dari sebuah roda yang diletakkan pada sebuah bingkai. Roda ini berada di sebuah batang besi yang disebut dengan poros roda (*spin axis*). Ketika *gyroscope* digerakkan, maka ia akan bergerak mengitari porosnya. Poros tersebut terhubung dengan lingkaran-lingkaran yang disebut gimbal. Gimbal tersebut juga terhubung dengan gimbal lainnya pada dasar lempengan. Jadi saat piringan itu berputar, unit *gyroscope* itu akan tetap menjaga posisinya seperti pada saat pertama kali *gyroscope* diputar.

2.2.2 Accelerometer

Accelerometer adalah perangkat yang berfungsi untuk mengukur akselerasi. Akselerasi yang diukur dengan *accelerometer* belum tentu memiliki laju perubahan velositas. Sebaliknya, *accelerometer* mendapatkan akselerasi yang dimaksud dengan fenomena berat yang dialami oleh uji massa pada kerangka acuan perangkat *accelerometer*. Sebagai contoh, *accelerometer* di permukaan bumi akan mengukur akselerasi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ lurus ke atas karena beratnya. Sebaliknya, *accelerometer* jatuh bebas ke bumi mengukur nol untuk akselerasinya.

2.2.3 Inertial Measurement Unit (IMU)

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.

2.3 Motor DC

Pada *self balance scooter* ini menggunakan motor DC kursi roda karena pemakaian daya rendah, serta efisiensi tinggi saat pemakaian motor DC. Motor DC berfungsi sebagai motor penggerak roda bagian kanan dan kiri pada *self balance scooter*.

2.4 Driver 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.

2.5 Mikrokontroller

Mikrokontroller adalah IC yang dapat diprogram berulang kali, baik ditulis atau dihapus. Biasanya digunakan untuk pengontrolan otomatis dan manual pada perangkat elektronika. Rata-rata *mikrokontroller* memiliki instruksi manipulasi bit, akses ke I/O secara langsung dan mudah, dan proses *interrupt* yang cepat dan efisien.

2.6 Fuzzy Logic

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). Fuzzy logic dibagi menjadi tiga bagian proses, yaitu:

1. Fuzzyfication

Fuzzyfication merupakan proses pengubahan data masukan yang berupa nilai kebenaran bersifat pasti (*crisp input*) menjadi masukkan *fuzzy* yang berupa nilai linguistik dengan cara pemetaan *crisp input* pada himpunan *fuzzy*.

2. Inference

Suatu aturan *fuzzy* dituliskan sebagai: *IF antecedent THEN consequent*. Dalam suatu sistem berbasis aturan fuzzy, proses *inference* memperhitungkan semua aturan yang ada dalam basis pengetahuan. Hasil dari proses *inference* direpresentasikan oleh suatu *fuzzy set* untuk setiap untuk setiap *variable* bebas (pada *consequent*). Derajat keanggotaan untuk setiap nilai *variable* tidak bebas menyatakan ukuran kompatibilitas terhadap *variable* bebas (pada *antecedent*).

3. Defuzzification

Terdapat berbagai metode *defuzzification* yang dapat diaplikasikan untuk berbagai macam masalah. Metode *Weighted Average* mengambil nilai rata-rata dengan menggunakan pembobotan berupa derajat keanggotaan. Sehingga y^* didefinisikan sebagai :

$$y^* = \frac{\sum \mu(y) \cdot y}{\sum \mu(y)} \quad (2.1)$$

Dimana y adalah nilai *crisp*, $\mu(y)$ adalah derajat keanggotaan dari nilai *crisp* y . Kelemahan dari metode ini hanya bisa digunakan bila fungsi keanggotaan dari keluaran *fuzzy* memiliki bentuk yang sama.

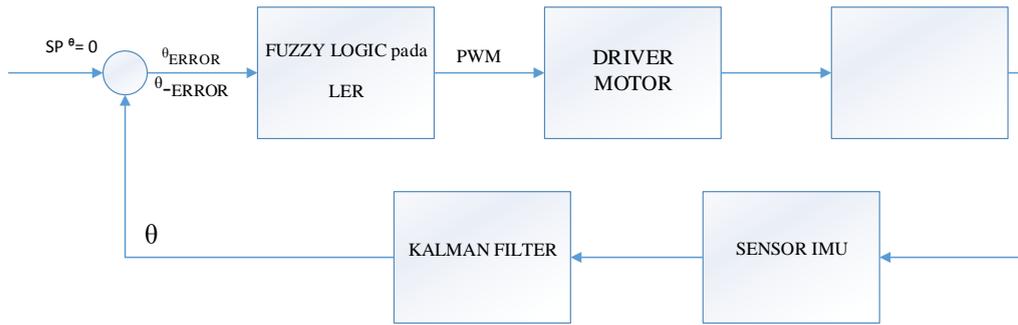
2.7 Kalman Filter

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.

3. Perancangan Sistem

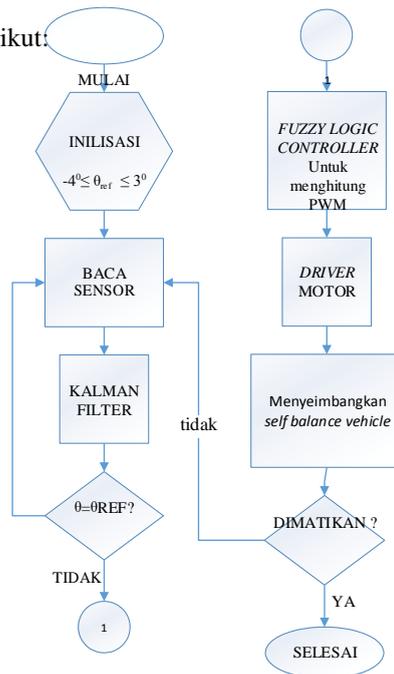
3.1 Perancangan Sistem Umum

SP0° adalah inialisasi input yang diberikan sebagai referensi sudut tegak kendaraan agar dapat berdiri tegak lurus terhadap bidang datar. Kemudian Arduino Mega akan memproses dari referensi sudut tegak yang diperoleh oleh sensor IMU kemudian akan diolah menggunakan logika *fuzzy*. Keluaran dari logika fuzzy akan memberi nilai PWM yang akan diteruskan ke driver motor. Driver motor kemudian mengerakan motor dan badan kendaraan bergerak sesuai perubahan posisi. Perubahan posisi badan kendaraan yang mempengaruhi sudut tegak yang akan kembali di periksa kembali oleh sensor IMU karena adanya perubahan rotasi dan kecepatan perpindahan sudut maka proses ini yang kembali diolah oleh mikrokontroler menggunakan logika fuzzy untuk mendapatkan sudut tegak yang stabil. Kalman filter memfilter proses nilai accelero dan gyro pada sensor IMU untuk mendapatkan nilai sudut yang akurat, lalu digunakan sebagai nilai inputan dari logika fuzzy.



Gambar 3.1 Diagram Blok Perancangan Umum Sistem

Flowchart dari sistem adalah sebagai berikut:



Gambar 3.2 Flowchart

3.2 Perancangan Perangkat Keras

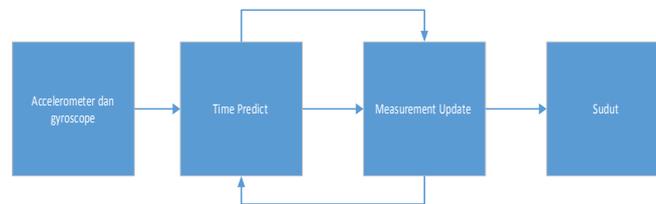


Gambar 3.3 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras atau *hardware* yang telah dilakukan adalah pembuatan mekanik, merancang *plant* serta pemilihan komponen yang digunakan seperti motor DC, sensor IMU, dan Arduino mega.

3.3 Penggabungan sensor dengan kalman filter

Accelerometer dan gyroscope memiliki kelemahan masing-masing jika digunakan untuk pengukuran sudut. Oleh karena itu kedua sensor tersebut biasanya digabungkan dengan beberapa metode. Metode yang digunakan pada tugas akhir ini adalah kalman filter. Pada kasus ini kalman filter mendapat masukan nilai dari sensor accelerometer dan gyroscope yang kemudian akan diestimasi nilai sudut yang dibaca oleh kedua sensor tersebut.



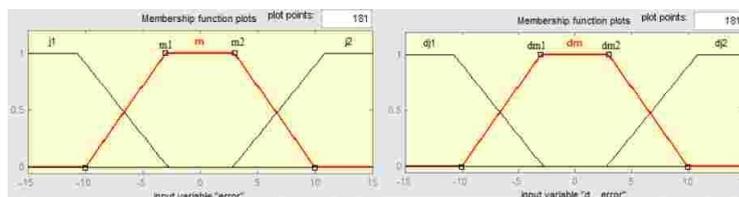
Gambar 3.4 Diagram Blok Penggabungan Sensor.

3.4 Perancangan Fuzzy Logic

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

3.4.1 Fuzzyfication

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



Gambar 3.5 input error dan - error

Untuk keluaran sistem yang berupa kecepatan memiliki lima nilai linguistik, yaitu: **MUNDUR CEPAT (M2C)**, **MUNDUR (MD)**, **STOP(STP)**, **MAJU(MJ)**, **MAJU CEPAT (M1C)**.

3.4.2 Rule Inference

Pengolahan data dari fuzzyfikasi yang menghasilkan keluaran yang dikehendaki dengan aturan-aturan yang telah dibuat oleh penulis. Dari aturan-aturan tersebut nantinya yang akan menjadi respon dari sistem terhadap berbagai kondisi (*set point*) dan gangguan yang terjadi pada sistem. Berikut adalah table *Rule inference system*.

```

1. If (error is j1) and (d_error is dj1) then (pwm is m2c) (1)
2. If (error is j1) and (d_error is dm) then (pwm is md) (1)
3. If (error is j1) and (d_error is dj2) then (pwm is md) (1)
4. If (error is sm) and (d_error is dj1) then (pwm is mj) (1)
5. If (error is sm) and (d_error is dm) then (pwm is stp) (1)
6. If (error is sm) and (d_error is dj2) then (pwm is mj) (1)
7. If (error is sj2) and (d_error is dj1) then (pwm is mj) (1)
8. If (error is sj2) and (d_error is dm) then (pwm is m1c) (1)
9. If (error is j2) and (d_error is dj2) then (pwm is m1c) (1)
  
```

Gambar 3.6 Rule Inference

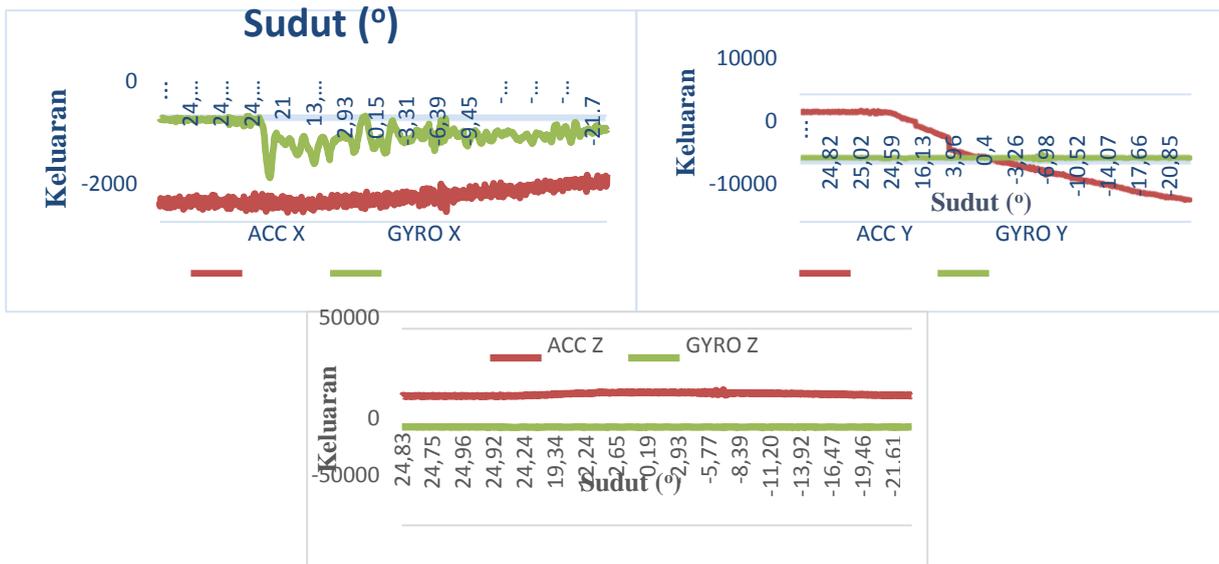
3.4.3 Defuzzification

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 Weigh Average dan keluaran dari proses defuzzifikasi berupa nilai PWM yang nantinya digunakan untuk mengontrol kecepatan motor DC.

4. Pengujian Dan Analisa

4.1 Pengujian sensor MPU 6050

Hasil pengujian sensor MPU6050 menunjukkan bahwa sensor ini dapat bekerja dengan baik sesuai dengan gambar plot.



Gambar 4.1 Pembacaan nilai accelero dan gyroscope terhadap sumbu x,y dan z

4.2 Pengujian Kalman

Pengujian kalman filter dilakukan dengan cara membandingkan nilai keluaran sudut dari accelerometer dengan nilai keluaran sudut dari kalman filter selama IMU dalam keadaan diam dan digerakan.

Parameter kalman yang digunakan

Q angle (Q accelerometer) = 0.001

Q bias (Q gyroscope) = 0.003

R measure = 0.03

Tabel 4.1 Percobaan Kalman Filter

Sudur (derajat)	Kalman Filter (derajat) 1	!Delta error1	Kahn an Filter (derajat) 2	!Del(a error1 2	Kalman Filter (derajat) 3	!Delt2 error13	Kalman Filter (derajat) 4	!Delia error14	Kalman Filter (derajat) 5	!Delta error1 5
-15	-15,34	0,34	-15,24	0,24	-15,2	0,20	-15,08	0,08	-15,08	0,08
-14	-14,19	0,19	-14,39	0,39	-14,15	0,15	-14,12	0,12	-14,12	0,12
-13	-13,17	0,17	-13,07	0,07	-13,04	0,04	-13,05	0,05	-13,05	0,05
-12	-12,55	0,55	-12,35	0,35	-12,03	0,03	-12,43	0,43	-12,13	0,13
-11	-11,35	0,35	-11,45	0,45	-11,42	0,42	-11,22	0,22	-11,12	0,12
-10	-10,32	0,32	-10,22	0,22	-10,21	0,21	-10,14	0,14	-10,14	0,14
-9	-9,4	0,40	-9,4	0,4	-9,14	0,14	-9,18	0,18	-9,18	0,18
-8	-8,26	0,26	-8,2	0,2	-8,2	0,20	-8,82	0,82	-8,82	0,82
-7	-7,13	0,13	-7,1	0,1	-7,01	0,01	-7,21	0,21	-7,21	0,21
-6	-6,08	0,08	-6,03	0,03	-6,07	0,07	-6,37	0,37	-6,37	0,37
-5	-5,07	0,07	-5,12	0,12	-5,01	0,01	-5,01	0,01	-5,01	0,01
-4	-4,1	0,10	-4,23	0,23	-4,2	0,20	-4,2	0,20	-4,2	0,2
-3	-3,13	0,13	-3,11	0,11	-3,11	0,11	-3,21	0,21	-3,21	0,21
-2	-2,1	0,10	-2,1	0,1	-2,1	0,10	-2,19	0,19	-2,19	0,19
-1	-1,05	0,05	-1,05	0,05	-1,08	0,08	-1,02	0,02	-1,02	0,02
0	0	0,00	0,13	0,13	0,17	0,17	0,01	0,01	0,01	0,01

1	1,12	0,12	1,09	0,09	1,06	0,06	1,06	0,06	1,06	0,06
2	2,12	0,12	2,12	0,12	2,18	0,18	2,18	0,18	2,28	0,28
3	3,15	0,15	3,15	0,15	3,14	0,14	3,17	0,17	3,17	0,17
4	4,2	0,20	4,19	0,19	4,13	0,13	4,13	0,13	4,13	0,13
5	5,19	0,19	5,15	0,15	5,12	0,12	5,16	0,16	5,16	0,16
6	6,15	0,15	6,13	0,13	6,17	0,17	6,19	0,19	6,19	0,19
7	7,13	0,13	7,13	0,13	7,12	0,12	7,22	0,22	7,22	0,22
8	8,09	0,09	8,09	0,09	8,19	0,19	8,69	0,69	8,59	0,59
9	9,42	0,42	9,34	0,34	9,31	0,31	9,1	0,10	9,1	0,1
10	10,3	0,30	10,02	0,02	10,12	0,12	10,02	0,02	10,02	0,02
11	11,4	0,40	11,4	0,4	11,4	0,40	11,04	0,04	11,04	0,04
12	12,32	0,32	12,01	0,01	12,7	0,70	12,07	0,07	12,07	0,07
13	13,12	0,12	13,08	0,08	13,04	0,04	13,04	0,04	13,04	0,04
14	14,15	0,15	14,15	0,15	14,2	0,20	14,2	0,20	14,2	0,2
15	15,18	0,18	15,15	0,15	15,11	0,11	15,21	0,21	15,21	0,21

4.3 Pengujian Fuzzy Controller

Tujuan utama dari penggunaan *fuzzy controller* adalah agar kendaraan keseimbangan dapat mempertahankan posisi setimbangnya. Pada pengujian fuzzy ini terlihat kendaraan keseimbangan menjaga kestabilannya diantara sudut -4^0 dan 3^0 . Pada gambar terlihat bahwa inisialisai terdapat overshoot yang disebabkan inisialisasi prediksi dari kalman filter, akan tetapi overshoot tersebut hilang karena mendapatkan inisialisasi prediksi dari kalman filter.

Parameter Fuzzy : $-10^0, -4^0, 3^0, 10^0$

Tabel 4.2 Percobaan Fuzzy

Sudut (derajat)	θ-error (derajat)	Kalsifikasi fuzzy	θ-error (derajat)	Kalsifikasi fuzzy	Output fuzzy mikrokontroler (PWM)	Output fuzzy matlab (PWM)	fuzzy	Sudut (derajat)	θ-error (derajat)	Klasifikasi fuzzy	θ-error (derajat)	Klasifikasi fuzzy	Output fuzzy mikrokontroler (PWM)	Output fuzzy matlab (PWM)	fuzzy
-15	-15,08	a	-15,34	f	-255	-255	-255	1	1,06	c	1,12	h	0	0	0
-14	-14,12	a	-14,19	f	-255	-255	-255	2	2,28	c	2,12	h	0	0	0
-13	-13,05	a	-13,17	f	-255	-255	-255	3	3,17	d	3,15	i	15,45	19,7	4,5
-12	-12,13	a	-12,55	f	-255	-255	-255	4	4,13	d	4,2	i	21,89	70,6	18,87
-11	-11,12	a	-11,35	f	-255	-255	-255	5	5,16	d	5,19	i	132	114	200
-10	-10,14	a	-10,32	f	-255	-226	-255	6	6,19	d	6,15	i	150	148	200
-9	-9,18	b	-9,4	g	-200	-209	-200	7	7,22	d	7,13	i	180	175	200
-8	-8,22	b	-8,26	g	-200	-197	-200	8	8,59	d	8,09	i	195	196	200
-7	-7,21	b	-7,13	g	-200	-176	-200	9	9,1	d	9,42	i	200	201	200
-6	-6,37	b	-6,08	g	-108	-150	-203	10	10,02	e	10,3	j	220	212	255
-5	-5,01	b	-5,07	g	-104	109	-200	11	11,04	e	11,4	j	255	255	255
-4	-4,2	b	-4,1	g	-24,87	-71	-4,9	12	12,07	e	12,32	j	255	255	255
-3	-3,21	c	-3,13	h	-20	-21,1	0	13	13,04	e	13,12	j	255	255	255
-2	-2,19	c	-2,1	h	0	0	0	14	14,2	e	14,15	j	255	255	255
-1	-1,02	c	-1,05	h	0	0	0	15	15,21	e	15,18	j	255	255	255
0	0,01	c	0,21	h	0	0	0								

5. Kesimpulan dan Saran

5.1.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian yang dilakukan pada perancang kendaraan keseimbangan menggunakan metode *fuzzy logic*:

1. Setelah melakukan perancangan mekanika pada kendaraan keseimbangan ini didapat hasil mekanika yang belum sempurna. Pemakaian rantai pada mekanika kendaraan keseimbangan yang kurang baik, sehingga menghambat percobaan yang telah dilakukan. Beban mekanika mencapai 44 kg sehingga motor DC yang dipakai harus mempunyai torsi yang lebih besar dan mekanika transmisi daya angkat yang harusnya lebih baik.
2. Dengan menggunakan 2 buah *input* pada proses *fuzzifikasi* dan menggunakan 9 *rules*, robot mampu mencapai kesetimbangannya (*steady state*). Setelah mendapat gangguan dari luar. Pengujian kendali *fuzzy logic* kendaraan dapat berdiri setimbang pada bidang datar *horizontal* pusat bumi.
3. Penggunaan filter kalman pada sensor IMU, sangat berguna untuk membantu mengurangi *noise* dan *drift* pada sensor.
4. Terdapat *error* pada pembacaan kalman filter sebesar 17,28% ini disebabkan titik keseimbangan yang kurang tepat pada badan kendaraan dan kesalahan *parallax* saat pengujian kalman filter terhadap pengujian manual.
5. 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 adalah $Q_{accelerometer} = 0,001$; $Q_{gyroscope} = 0,003$; dan $R_{measurement} = 0,03$.

5.1.2 Saran

Pada tugas akhir ini penulis menggunakan *fuzzy logic* sebagai algoritma kontrolernya. Kekokohan dari sistem tidak seutuhnya teruji. Maka dari itu penulis sangat menyarankan agar metoda kontrol dapat dikembangkan lebih lanjut, entah mengembangkan metode tuning ataupun menggunakan metode yang lebih canggih seperti LQR, JST (Jaringan Syaraf Tiruan) atau metode lainnya.

Untuk saat ini kendaraan keseimbangan ini hanya bisa diuji coba pada permukaan yang mendatar, kedepannya diharapkan akan ada pengujian kendaraan keseimbangan pada permukaan bergelombang dan menanjak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] <http://www.Segway.com>
- [2] Riyadi, Muhammad. 2009. *Pendeteksi Posisi Menggunakan Sensor Accelerometer MMA7260Q Berbasis Mikrokontroler Atmega32*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [3] Grasser, Felix; D'arrigo, Aldo; Colombi, Silvio; Rufer, Alfred (2001), "JOE: A Mobile, Inverted Pendulum", *Laboratory of Industrial Electronics Swiss Federal Institute of Technology Lausanne*
- [5] Colton, Shane, "A Simple Solution For Integrating Accelerometer And Gyroscope Measurements For A Balancing Platform", Submitted as a chief Delphi white paper, 25 Juni 2007.
- [6] Laksana, Andra, "Balancing Robot Beroda Dua Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral", Makalah, Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2011.
- [7] Royyan, M., 2015. *Implementation of Kalman Filter and PID Controller for Inverted Pendulum Robot*. Telkom University
- [8] Bobby, Grace., 2015 *Desing and Implementision of Balance two-Wheeled Robot Based Microcontroller*. Telkom University
- [9] Handry, K., dan Purwanto. D., Keseimbangan Robot Beroda Dua Menggunakan Metode Fuzzy Logic,
- [10] Heryanto, M. Ary dan Wisnu Adi. "Pemrograman Bahasa C untuk mikrokontroler ATMega 8535". Yogyakarta : Penerbit Andi.
- [11] Datasheet AVR Microcontroller ATMega8535
- [12] Firdausi, A dan Setyo Budi, A., 2013. "Mekanika dan Elemen Mesin"