

PENGENDALIAN MOTOR SATU RODA DENGAN PID - FUZZY CONTROL ONE WHEELED MOTOR WITH PID - FUZZY

Rio Ari Saputra¹, Angga Rusdinar.,ST.,MT.,Ph.D², Cahyantari Ekaputri.,ST.,MT³

Prodi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹rioarisaputra09@gmail.com, ²anggarusdinar@telkomuniversity.ac.id, ³cahyantarie@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Sepeda motor roda dua merupakan salah satu alat transportasi yang sangat vital, karena dengan memiliki dan menggunakan sepeda motor roda dua dapat mendukung kebutuhan aktifitas manusia. Selain itu sepeda motor roda dua lebih mudah dan praktis dibandingkan dengan alat transportasi lainnya. Sepeda motor memiliki kekurangan yang berdampak pada lingkungan sekitar seperti pada tanaman, polusi udara dan kebisingan pada daerah padat pengendara. Dengan pengembangan sepeda motor listrik dapat mengurangi polusi atau emisi di bumi.

Pada Tugas Akhir ini dibuat pengendalian kendaraan motor satu roda menggunakan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* untuk mendeteksi sudut pada kendaraan dan motor *Brushless DC* sebagai penggerak dari kendaraan tersebut. Kendaraan listrik motor satu roda terdiri dari 3 pengendalian yaitu pengendalian maju menggunakan metode *fuzzy logic controller*, pengendalian mundur menggunakan metode PID dan pengendalian pengereman.

Kendaraan motor satu roda dapat bergerak dengan cara mencondongkan badan kedepan, dengan mencondongkan badan ke depan kendaraan tersebut dapat bergerak seiring perubahan sudut yang terbaca oleh sensor. Pada tugas akhir ini di gunakan *fuzzy logic controller* dengan parameter keluaran *pulse width modulation* dari 90 sampai 110 dan parameter PID yang digunakan adalah $K_p=1$, $K_i=0$, dan $K_d=9$ dengan ketentuan tidak ada *overshoot* dan *rise time* 0.05 seconds.

Kata Kunci : Sistem Kendali, *Accelerometer*, *Gyroscope*, *Brushless DC Motor*, Pengendalian Maju, Pengendalian Mundur, Pengendalian Pengereman, *Unicycle*, *Fuzzy Logic Controller*, *PID*.

Abstract

Two-wheel motorcycle is one of the most vital means of transportation, because by owning and using a two-wheeled motorcycle can support the needs of humans activities. In addition, two-wheeled motorcycle is easier and more practical than other means of transportation. Motorcycles have disadvantages that impact on the environment such as on plants, air pollution and noise in the rider dense areas. With the development of electric motorcycles can reduce pollution or emissions on earth.

In this Final Project is made controlling one-wheeled motor vehicle using accelerometer and gyroscope sensors to detect angles on vehicles and motor Brushless DC as the driving of the vehicle. Electric motor vehicle one wheel consist of 3 controls that is forward control using fuzzy logic controller method, reverse control using PID method and braking control.

One-wheel motor vehicle can move by learning forward, by learning forward in the vehicle can move as the angle change is read by the sensor. In this final project is used fuzzy logic controller with pulse width modulation output parameter from 90 to 120 and parameter of PID used is $K_p = 1$, $K_i = 0$, and $K_d = 9$ with no overshoot and rise time 0.05 seconds.

Keywords: *Control System, Accelerometer, Gyroscope, Brushless DC Motor, Forward Control, Reverse Control, Braking Control, Fuzzy Logic Controller, PID.*

1. Pendahuluan

Sepeda motor roda dua merupakan salah satu alat transportasi yang sangat vital, karena dengan memiliki dan menggunakan sepeda motor roda dua dapat mendukung kebutuhan aktifitas manusia. Selain itu sepeda motor roda dua lebih mudah dan praktis dibandingkan dengan alat transportasi lainnya. Kemudahan dalam penggunaan dan pengisian bahan bakarnya memudahkan penggunaannya sehingga dapat dengan mudah memiliki kendaraan sepeda motor roda dua. Dalam kondisi tersebut kendara sepeda motor roda dua memiliki kekurangan yang berdampak pada lingkungan sekitar seperti pada tanaman, polusi udara dan kebisingan pada daerah padat pengendara.

Penggunaan sepeda motor roda dua yang berlebihan dapat menyebabkan berbagai masalah seperti konsumsi bahan bakar semakin meningkat yang dapat menyebabkan kelangkaan. Selain itu berdampak juga pada lingkungan sekitar yang mengakibatkan terjadinya polusi udara. Solusi dari permasalahan di atas terjawab dengan munculnya inovasi kendaraan beroda dua tanpa bahan bakar bensin seperti sepeda motor roda dua tanpa bahan bakar bensin yang disebut dengan sepeda motor listrik yang dapat berjalan dengan baik tanpa ada polusi udara yang dikeluarkan dari bahan bakar kendaraan sepeda motor roda dua.

Akan tetapi penggunaan dari sepeda motor listrik roda dua tidak berdampak bagus untuk pengguna kendaraan yang berakibat kemacetan diperjalanan atau memenuhi tempat peletakan sepeda motor listrik roda dua tersebut. Sehingga penulis berfikir untuk dapat membuat sepeda motor yang tidak berdampak buruk untuk lingkungan dan

lebih baik saat di kendarai di perjalanan untuk mengurangi kemacetan di jalan, yaitu kendaraan motor listrik roda satu. [3]

Kendaraan listrik motor roda satu ini menggunakan tenaga listrik yang disimpan dibaterai yang nanti akan menggerakkan motor listrik yang terdapat pada kendaraan tersebut sehingga dapat berjalan.[4] Kendaraan tersebut dapat dinaiki dengan penggunanya dengan pengendalian maju, pengendalian mundur dan pengendalian pengereman tidak dapat terjatuh dari kendaraan motor satu roda. Kendaraan motor satu roda ini sangat ramah lingkungan yang dikarenakan penggunaan baterai sebagai sumber tegangan, kendaraan motor satu roda juga menggunakan suatu algoritma sistem kendali yang bisa membuat kendaraan tersebut dapat bergerak. Pada kendaraan motor satu roda mempunyai derajat maksimal untuk di kendarai yaitu $\pm 10^0$, untuk alasan keselamatan pengendara sudut yang baik adalah $\pm 8^0$ atau dengan kecepatan 20km/h. Namun kendaraan listrik roda satu tidak dapat berjalan jika tidak didukung dengan beberapa modul dan perhitungan rumus matematis yang dapat mendukung kendaraan motor satu roda [1].

2. Dasar Teori

2.1 Kendaraan Listrik Motor Satu Roda

Kendaraan listrik motor roda satu adalah kendaraan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber tegangan yang dimana sumber tegangan tersebut tersimpan dalam sebuah baterai. Energi tersebut dapat menjalankan sebuah motor yang terdapat pada kendaraan tersebut.

Dalam keadaan tidak menyala kendaraan listrik motor satu roda diletak di tempat dudukan motor, akan tetapi ketika ingin di jalankan kendaraan tersebut harus di lepaskan dari dudukan motor dan memiliki 2 buah tombol *power* dimana satu tombol untuk menjalankan sistem dari *microcontroller* dan tombol satu lagi untuk kebutuhan motor tersebut yang tersambung dari baterai. Untuk saat keadaan hidup motor tersebut belum bisa di katakan seimbang karena pengendara masih menggunakan kaki untuk menahan kendaraan tersebut supaya tidak terjatuh ke segala arah yang di karenakan kendaraan tersebut memiliki derajat kebebasan yang sangat banyak maka dari itu perlu digunakan kaki saat baru memulai berjalan.

Kemudian untuk menggerakkan kendaraan tersebut agar dapat maju pengendara dapat mencondokan badan kedepan atau mendorong pegangan kendaraan tersebut supaya mendapatkan perubahan derajat yang dikarenakan kendaraan tersebut dapat berjalan sesuai dengan perubahan derajat yang di baca oleh sensor yang ada, sedangkan untuk untuk mengurangi kecepatan pengendara juga dapat mencondongkan badan atau menarik pegangan kendaraan ke belakang agar dapat menurunkan kecepatan kendaraan tersebut dan bila sudah melewati batas yang kita inginkan kendaraan tersebut dapat berhenti atau melakukan pengereman.

Untuk kendaraan listrik motor satu roda dikatakan dapat berjalan jika seorang pengendara dapat mengendalikan kendaraan tersebut dalam kecepatan yang tetap bukan dalam keadaan tanpa pengendara, yang di butuhkan kendaraan tersebut adalah sebuah respon yang cepat, torsi yang tinggi dan penentuan kecepatan yang baik dan tepat dalam perbedaan suatu sudut yang di dapat, maka dari pada itu dibutuhkan suatu metode kontrol yang dapat membuat pengendara tersebut tidak dapat jatuh dari kendaraan tersebut. Dimana metode tersebut dapat mengedalikan kecepatan dari respon motor atau lebar pulsa motor tersebut yang nantinya akan didapat sebuah keluaran respon yang baik dari algoritma yang diinginkan.

2.2 Fuzzy Logic Controller[6]

Kendali *fuzzy logic* adalah suatu cabang ilmu *Artificial Intelligence*, yaitu suatu pengetahuan yang membuat komputer dapat meniru kecerdasan manusia sehingga diharapkan komputer dapat melakukan hal-hal yang apabila dikerjakan manusia memerlukan kecerdasan.

Dengan kata lain *fuzzy logic* mempunyai fungsi untuk “meniru” kecerdasan yang dimiliki manusia untuk melakukan sesuatu dan mengimplementasikannya ke suatu perangkat, misalnya robot, kendaraan, peralatan rumah tangga, dan lain-lain.

2.2.1 Proses Fuzzy Logic

Ada tiga proses utama dalam implementasi Fuzzy Logic yaitu fuzzification, inference system, dan defuzzification.

1. Fuzzification, adalah sebuah proses yang bertujuan mengubah inputan analog menjadi set variabel fuzzy. Semakin banyak variabel fuzzy semakin tinggi akurasi, namun memerlukan proses yang lebih lama dari bentuk tegas (crisp) menjadi fuzzy (variabel linguistik) yang biasanya disajikan dalam bentuk tegas dengan suatu fungsi keanggotaan masing – masing. Fungsi keanggotaannya adalah fungsi linear, kurva segitiga, kurva trapesium.
2. Inference System, merupakan sebagai acuan untuk menjelaskan hubungan antara variabel-variabel masukan dan keluaran yang mana variabel yang diproses dan yang dihasilkan berbentuk fuzzy. Untuk menjelaskan hubungan antara masukan dan keluaran biasanya menggunakan “IF-THEN”.
3. Defuzzification, merupakan proses perubahan variabel berbentuk fuzzy tersebut menjadi data-data pasti (crisp) yang dapat dikirimkan ke peralatan pengendalian. Penalaran dengan metode Sugeno hampir sama dengan penalaran Mamdani, hanya saja output (konsekuen) sistem tidak berupa himpunan fuzzy, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear. Singleton adalah sebuah himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan yang pada titik tertentu mempunyai sebuah nilai dan 0 di luar titik tersebut.

2.3 Pengendalian PID

2.3.1. Kendali Proporsional

Kendali Proporsional (P) menggunakan nilai konstanta P (K_p) sebagai nilai penguatan. Karakteristik dari kendali ini adalah mempercepat respon atau biasa disebut waktu naik (rise time), meningkatkan overshoot, tidak merubah orde proses, dan tidak menghilangkan offset. Hubungan kendali P dapat dinyatakan dalam persamaan

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \dots\dots\dots(3)$$

2.3.2. Kendali Integral

Kendali Integral (I) digunakan untuk menghilangkan nilai offset yang biasanya dihasilkan oleh kendali proporsional. Namun pemilihan nilai K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan nilai K_i yang terlalu tinggi menyebabkan nilai keluaran berosilasi. Penambahan kendali integral juga akan membuat respon dari sistem menjadi lambat. Oleh sebab itu dalam implementasinya kendali integral dikombinasikan dengan kendali proporsional. Hubungan kendali I dapat dinyatakan dalam persamaan.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t)dt \dots\dots\dots(4)$$

2.3.3. Kendali Derivatif

Kendali Derivatif (D) memiliki keunggulan yaitu dapat merespon perubahan error aktuator dan dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum nilai dari error aktuatornya menjadi sangat besar. Kendali derivatif ini bekerja berdasarkan laju perubahan error aktuatornya, bukan pada error aktuator itu sendiri. Biasanya kendali derivatif dikombinasikan dengan kendali proporsional atau dengan kendali proporsional dan integral. Secara matematis hubungan kendali derivatif dengan sinyal error ditunjukkan dengan persamaan:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

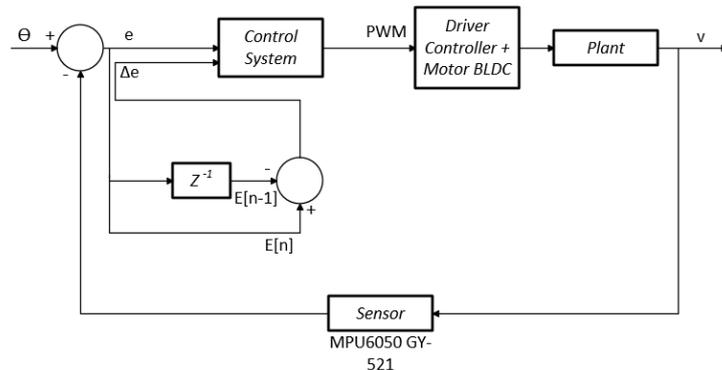
Dalam perancangan sistem kendali PID yang perlu dilakukan adalah mengatur nilai konstanta parameter P, I, dan D agar tanggapan sinyal keluaran sistem optimal. Persamaan matematis kendali PID adalah:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(6)$$

3. Perancangan Sistem

3.1 Blok diagram kendaraan motor satu roda

Perancangan perangkat keras merupakan hal yang sangat penting dalam pembuatan tugas akhir ini. Dengan adanya perangkat keras ini akan membuktikan apakah alat dapat bekerja dengan baik atau tidak.

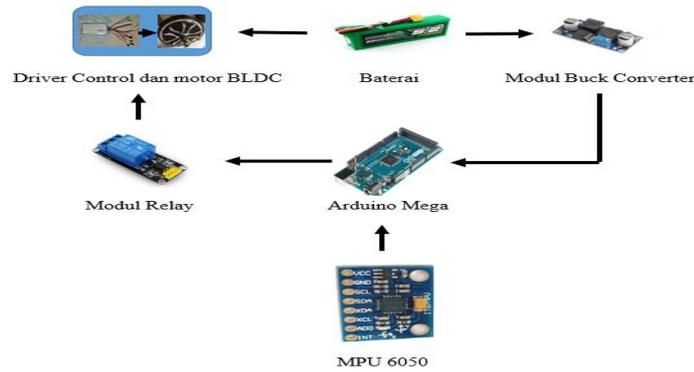


Gambar 1. Blok diagram *system control* kendaraan satu roda

Pada gambar III-1 di atas merupakan blok diagram sistem kontrol yang terdiri dari kendali maju dan kendali mundur motor satu roda, sistem pengendalian motor satu roda ini menggunakan sensor *accelerometer* dan *gyroscope* dengan metode *Fuzzy Logic Control* untuk mengontrol kecepatan saat maju dan pengendalian PID untuk mengendalikan saat kendaraan mundur. Pada perancangan ada beberapa perangkat yang digunakan yaitu Arduino (mikrokontroler), driver *controller*, motor BLDC dan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Blok diagram diatas juga menunjukkan cara kerja sistem yang akan dirancang, dari gambar di atas terdapat masukan terdapat masukan berupa sudut. Metode yang digunakan adalah *fuzzy logic controller* dengan menggunakan metode sugeno dan pemilihan PWM yang tepat serta metode PID dengan pemilihan K_p , K_i , K_d yang sesuai dengan perancangan yang di lakukan.

Sistem yang dirancang akan mampu mengatur kecepatan motor sesuai dengan masukan yang telah ditentukan. Sensor *accelerometer* dan *gyroscope* dan di bandingkan dengan setpoint yang diinginkan. Pada proses perbandingan terjadi pada blok *fuzzy logic controller* yang di beri masukan *error* dan *delta error* beserta blok PID yang hasil keluarannya akan di olah oleh *microcontroller*. Hasil dari proses tersebut dapat mengatur kecepatan motor BLDC sampai kecepatan yang di inginkan.

3.2 Desain Perangkat Keras



Gambar 3. Desain Perangkat keras

4. Hasil Percobaan dan Analisa

4.1 Pengujian Sensor MPU 6050

Pengujian di lakukan dengan cara meletakkan sensor tegak lurus pada kendaraan motor satu roda sehingga ketika di ukur secara manual akan lebih tepat kemudian seutas benang tipis di ikatkan pada *casis* kendaraan tersebut di sumbu kendaraan kemudian diukur menggunakan busur derajat, Pertama busur derajat di ukur setelah itu di lihat pada serial monitor di arduino berapa besar pembacaan pada sensor kemudian hasil di catat dan pengukuran selajutnya dengan cara yang sama.

Tabel 1. Pengujian Data Sensor MPU6050 (0° sampai 15°)

No	Sudut Busur	Sudut Sensor					Rata-rata error	error	Per-sentase error (%)
		P1	P2	P3	P4	P5			
1	0	0.12	0.11	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	Tak terdefinisi
2	1	1.09	1.11	1.12	1.11	1.12	1.11	0.11	11
3	2	2.08	2.11	2.09	2.12	2.10	2.11	0.11	5.5
4	3	3.10	3.11	3.11	3.09	3.11	3.10	0.10	3.3
5	4	4.09	4.11	4.11	4.08	4.10	4.09	0.09	2.25
6	5	5.09	5.10	5.11	5.11	5.12	5.10	0.10	2
7	6	6.11	6.12	6.11	6.10	6.09	6.10	0.10	1.6
8	7	7.07	7.09	7.09	7.11	7.08	7.08	0.08	1.14
9	8	8.10	8.12	8.12	8.11	8.09	8.10	0.10	1.25
10	9	9.10	9.10	9.12	9.11	9.11	9.10	0.10	1.11
11	10	10.10	10.09	10.08	10.11	10.09	10.09	0.09	0.9
12	11	11.11	11.08	11.11	11.09	11.11	11.10	0.10	0.9
13	12	12.09	12.11	12.10	12.10	12.11	12.10	0.10	0.8
14	13	13.10	13.09	13.10	13.09	13.10	13.09	0.09	0.69
15	14	14.11	14.10	14.10	14.09	14.11	14.10	0.10	0.71
16	15	15.09	15.10	15.11	15.11	15.09	15.10	0.10	0.66
Rata-rata Persentase Error									2.254

Tabel 2. Pengujian Data Sensor MPU6050 (-1° sampai -15°)

No	Sudut Busur (-)	Sudut Sensor					Rata-rata error (-)	Error (-)	Persentase error (%)
		P1 (-)	P2 (-)	P3 (-)	P4 (-)	P5 (-)			
1	1	1.10	1.10	1.11	1.10	1.11	1.10	0.10	10
2	2	2.10	2.09	2.09	2.11	2.10	2.09	0.09	4.5
3	3	3.09	3.10	3.10	3.11	3.10	3.10	0.10	3.3
4	4	4.09	4.11	4.10	4.09	4.10	4.09	0.09	2.25
5	5	5.10	5.10	5.11	5.11	5.11	5.10	0.10	2
6	6	6.11	6.11	6.11	6.10	6.09	6.10	0.10	1.6
7	7	7.10	7.09	7.09	7.10	7.08	7.09	0.09	1.28
8	8	8.10	8.11	8.11	8.11	8.09	8.10	0.10	1.25
9	9	9.11	9.10	9.12	9.11	9.11	9.11	0.11	1.22
10	10	10.11	10.10	10.09	10.10	10.10	10.10	0.10	1
11	11	11.11	11.09	11.11	11.09	11.10	11.10	0.10	0.9
12	12	12.10	12.10	12.10	12.10	12.10	12.09	0.09	1.08
13	13	13.10	13.09	13.11	13.09	13.11	13.10	0.10	0.76
14	14	14.11	14.10	14.11	14.09	14.11	14.10	0.10	0.71
14	15	15.11	15.10	15.10	15.10	15.09	15.10	0.10	0.66
Rata-rata Persentase Error									2.32

Berdasarkan table hasil pengujian tersebut pembacaan sensor berhasil dengan baik galat sensor *error* rata rata adalah 2.254% dengan sudut positif dan 2.32 % dengan sudut negative

4.2 Pengujian kec. Motor BLDC dalam RPM *Open Loop*

Pengujian di lakukan dengan cara memberikan nilai PWM dari 0-255 kemudian tachometer di letakan di tempat yang sudah di sediakan di samping roda sehingga jarak pengukuran tetap tidak berubah-ubah, kemudian di ukur kecepatan motor BLDC tersebut dan tegangan yang keluar di ukur di kabel pada *controller* BLDC.

Tabel 3. Data Pengujian Pengendalian Maju Kec. Motor BLDC

No	PWM	Voltage Ukur	Voltage Hitung	RPM
1	0	0	0	0
2	10	0.16	0.19	0
3	20	0.34	0.39	0
4	30	0.54	0.58	0
5	40	0.73	0.78	0
6	50	0.84	0.98	7.2
7	60	1.09	1.17	16.5
8	70	1.34	1.37	35.9
9	80	1.53	1.56	42.2
10	90	1.72	1.76	92.3
11	100	1.95	1.96	143.6
12	110	2.15	2.15	187.4
13	120	2.36	2.35	231.0
14	130	2.56	2.54	283.6
15	140	2.76	2.74	287.0
16	150	2.96	2.94	287.0
17	160	3.16	3.13	291.2
18	170	3.35	3.33	298.0
19	180	3.55	3.52	299.5
20	190	3.75	3.72	299.5
21	200	3.95	3.92	299.5
22	210	4.15	4.11	299.5
23	220	4.35	4.31	299.5
24	230	4.55	4.50	299.5
25	240	4.75	4.70	299.5
26	250	4.95	4.90	299.5
27	255	5	5	299.5

Tabel 4. Data Pengujian Pengendalian Mundur Kec. Motor BLDC

No	PWM	Voltage Ukur	Voltage Hitung	RPM
1	0	0	0	0
2	10	0.16	0.19	0
3	20	0.34	0.39	0
4	30	0.54	0.58	0
5	40	0.73	0.78	0
6	50	0.84	0.98	0
7	60	1.09	1.17	25.3
8	70	1.34	1.37	40.9
9	80	1.53	1.56	50.1
10	90	1.72	1.76	60.5
11	100	1.95	1.96	66.3
12	110	2.15	2.15	70.2
13	120	2.36	2.35	81
14	130	2.56	2.54	83.3
15	140	2.76	2.74	90.6
16	150	2.96	2.94	100.9
17	160	3.16	3.13	109
18	170	3.35	3.33	109
19	180	3.55	3.52	109
20	190	3.75	3.72	109
21	200	3.95	3.92	109
22	210	4.15	4.11	109
23	220	4.35	4.31	109
24	230	4.55	4.50	109
25	240	4.75	4.70	109
26	250	4.95	4.90	109
27	255	5	5	109

Pengujian di lakukan dengan cara memberikan nilai PWM dari 0-255 kemudian tachometer di letakan di tempat yang sudah di sediakan di samping roda sehingga jarak pengukuran tetap tidak berubah-ubah, kemudian di ukur kecepatan motor BLDC tersebut dan tegangan yang keluar di ukur di kabel pada *controller* BLDC. Dapat di lihat dari table di atas motor dapat bergerak ketika di berikan PWM 50.

4.3 Pengujian Fuzzy Logic Controller

Tabel 5. Data pengujian Fuzzy Logic Controller Close Loop

No.	Nilai error	Nilai delta error	Hasil Matlab	Hasil Arduino	Hasil Perhitungan
1	3	3	90	90	90
2	3	5	90	90	90
3	3	8	93.3	93.3	93.3
4	3	11	100	100	100
5	5	3	90	90	90
6	5	6	93	93	93
7	5	8	99	99	99
8	5	11	105	105	105
9	8	3	95	95	95
10	8	5	98.9	98.9	98.9
11	8	8	106	106	106
12	8	11	110	110	110

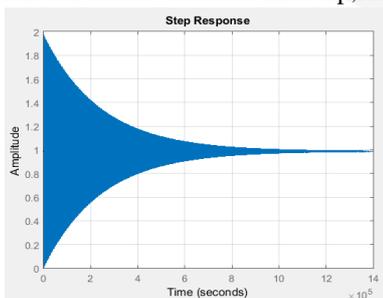
Pada table diatas kita ketahui bahwa hasil keluaran Antara matlab dengan Arduino dan perhitungan manual sama. Dan dapat disimpulkan bahwa program fuzzy logic yang dikeluarkan sama dengan simulasi matlab dan perhitungan manual.

4.4 Pengujian PID

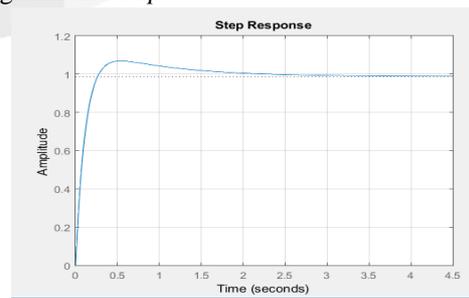
Dari menggunakan identifikasi sistem didapat fungsi alih sebagai berikut

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{9.467}{s^2 + 8.233 \times 10^{-7} s + 0.1191}$$

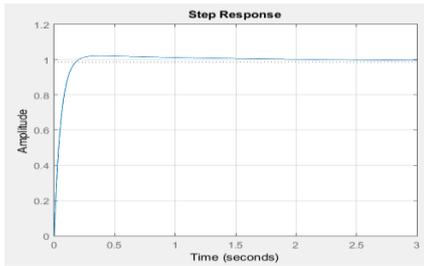
Dengan bantuan matlab simulasi nilai Kp,Ki,Kd dapat dilihat dari grafik *unit step*



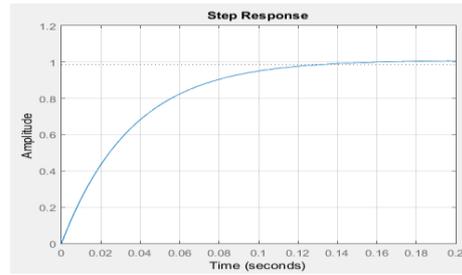
Gambar IV-1 *step respons* Kp =1, Ki = 0 dan Kd = 0



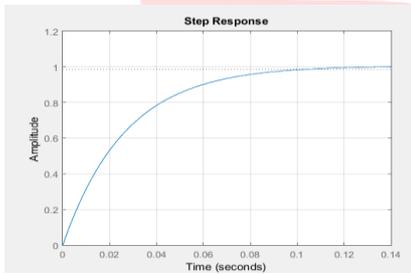
Gambar IV-2 *step respons* Kp =1, Ki = 0 dan Kd = 1



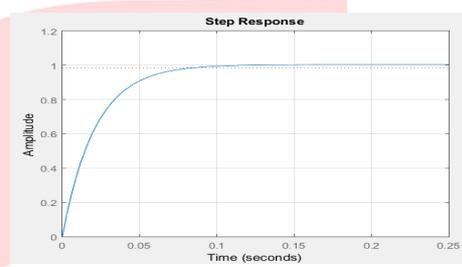
Gambar IV-3 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 2$



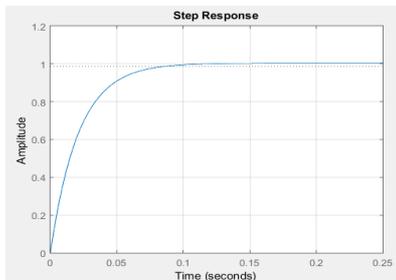
Gambar IV-4 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 3$



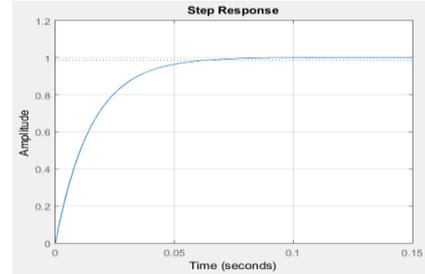
Gambar IV-5 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 4$



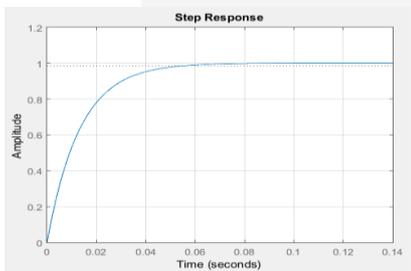
Gambar IV-6 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 5$



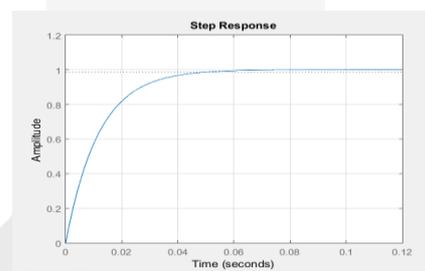
Gambar IV-7 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 6$



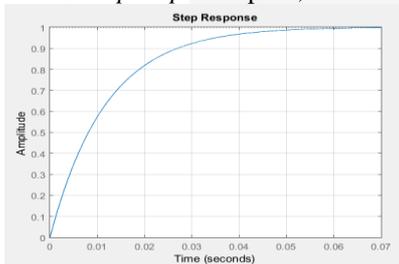
Gambar IV-8 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 7$



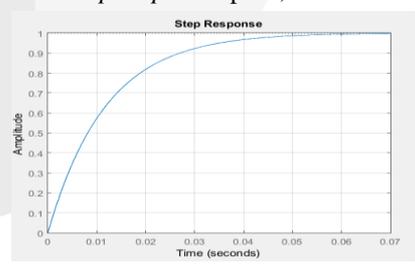
Gambar IV-9 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 8$



Gambar IV-10 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 0$ dan $K_d = 9$



Gambar IV-11 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 1$ dan $K_d = 9$



Gambar IV-12 *step respons* $K_p = 1$, $K_i = 2$ dan $K_d = 9$

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil data modul MPU 6050 pada kendaraan listrik motor satu roda di dapat galat sensor *error* rata-rata adalah 2.254% dengan sudut positif dan 2.32 % dengan sudut negatif
2. Hasil pengujian kecepatan motor terhadap PWM yang diberikan untuk pengendalian maju kecepatan motor bisa mencapai RPM yang tinggi 299.0 sedangkan pada kecepatan pengendalian mundur *open loop* hanya 109.
3. Pengendalian maju dengan penggunaan metode *fuzzy logic controller* antara sudut 2° sampai 15° menggunakan PWM 90, 100, dan 110 untuk 3 *memberships function* dengan 9 *rules*.
4. Pengendalian mundur dengan penggunaan metode PID antara sudut -2° sampai -15° pada tugas akhir dengan ketentuan tidak ada *overshoot* dan *rise time* 0.05 seconds maka nilai PID yang digunakan adalah $K_p=1$, $K_i=0$, dan $K_d=9$.

5.2 Saran

Dari hasil kesimpulan dapat diambil saran pada penelitian ini :

1. Beban yang di tanggung motor BLDC terlalu berat maka motor BLDC di ganti dengan spesifikasi yang memiliki torsi yang lebih besar atau melakukan perancangan mekanik dengan mengurangi beban pada kendaraan tersebut dengan menyesuaikan dengan spesifikasi motor BLDC yang di gunakan sekarang atau dengan melakukan menambahkan *gear* yang tepat untuk mendapatkan torsi yang sesuai.
2. Untuk melakukan perputaran arah yang sangat cepatan harus melakukan pergantian *driver controller* karena *driver controller* yang digunakan saat memiliki *system* keamanan untuk tidak melakukan perputaran yang berubah ubah terus agar motor BLDC dapat di pakai lebih panjang tapi kurang baik untuk digunakan untuk tugas akhir ini dan ketika sedang melakukan pengendalian maju dan ingin merubah ke pengendalian mundur harus melakukan pengosongan tegangan pada BLDC, ini di sebababkan *driver controller* yang di gunakan sudah mengaturnya agar BLDC tidak rusak.
3. Pada kendaraan listrik motor satu roda keluaran dari sel satu dengan lain pada baterai Lipo yang di gunakan tidak sama maka di perlukan *battery management system* (BMS) karena jika tidak di atur ketika 1 sel sudah drop maka baterai tersebut sudah tidak dapat digunakan lagi.

Daftar Pustaka

- [1] Desna Riattama, Eko Henfri Binugroho, Raden Sanggar Dewanto and Dadet Pramadihanto, "PENS-Wheel (One-Wheeled Self Balancing Vehicle) Balancing Control using PID Controller," International Electronics Symposium (IES), 2016.
- [2] Bakhtiar Ramadhan, Eko Henfri Binugroho, Raden Sanggar Dewanto, and Dadet Pramadihanto, "PENS – Wheel (Self Balancing One-Wheel Vehicle) Mechanical Design and Sensor System", International Electronic Symposium (IES) 2016.
- [3] Ni Luh Putu Andrea M.S., "Perancangan dan Implementasi Kontrol Pergerakan Maju Pada Electric Unicycle," Telkom University, 2016
- [4] Faisal Pakpahan, "Sistem Kontrol Pengereman Pada Electric Unicycle Menggunakan Metode Logika Fuzzy dan Filter Noise Sensor Menggunakan Metoda Kalman Filter," Telkom University, 2016.
- [5] Astrom K.J and Hagglund T, "PID Controllers : Theory, Design, and Tuning", Instrument Society of America, 1995 BrooksBots. *Fireball*. <http://brooksbots.com/images/Fireball/>
- [6] Jyh-Shing Roger Jang. "Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence". Prentice Hall, 1997.