

PERANCANGAN KONTROL KESTABILAN STATIS WAHANA RODA DUA MENGUNAKAN AKTUATOR GYROSCOPE

DESIGN TWO WHEEL VEHICLE STABILIZER CONTROL STATIC USING GYROSCOPE ACTUATOR

Fadhly Aziz Putra Pradana¹, Dr. Dudi Darmawan, S.Si, M.T.², Reza Fauzi Iskandar, S.Pd, M.T.³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

¹fadhlypradana@gmail.com, ²dudidw@gmail.com, ³rezafauzii@gmail.com

Abstrak

Kendaraan roda dua merupakan transportasi yang paling banyak digunakan di Indonesia. Kendaraan roda dua memiliki kelincuhan gerak dan harga yang cukup ekonomis akan tetapi kendaraan roda dua memiliki kekurangan dalam hal pengontrolan keseimbangannya yang mana sangat bergantung pada pengendaranya. Untuk mengatasi hal tersebut maka pada tugas akhir ini dirancang sebuah model wahana roda dua yang mampu menjadi keseimbangannya secara otomatis dengan menggunakan metode kontrol PID menggunakan aktuator giroskop. Prototipe yang dirancang menggunakan kontrol PID untuk mengetahui respon dari posisi balik dari gangguan sudut yang diberikan. mikroprosesor yang digunakan adalah Raspberry Pi 3 Model B yang memiliki empat core berkecepatan 1.2GHz dengan cache memory level 1 sebesar 32kB. Proses pengecekan kontrol PID dapat dilakukan dengan cepat dan menghasilkan respon kecepatan motor DC terhadap kemiringan untuk kembali ke posisi mendekati nilai sudut 0°. Sensor accelerometer digunakan sebagai sensor kemiringan dan umpan balik sistem. Sistem telah mampu menghasilkan kecepatan sudut sebesar 541.3 Rad/s^2 dengan kecepatan 5170 rpm. sistem telah berhasil mempertahankan kestabilan posisinya hingga kemiringan 3.5°.

Kata Kunci: kontrol PID, gyroscope, mikroprosesor Raspberry Pi 3 Model B, kontrol kesetimbangan.

Abstract

Two-wheeled vehicles are the most widely used transportation in Indonesia. Two-wheeled vehicles have agility of motion and the price is quite frugal will be two wheels of mutual lack in terms of control of the balance which is very dependent on the rider. To overcome this then in this final project designed a model of two-wheel rides that can be balance automatically by using the PID control method using a gyroscope actuator. The prototype is designed using a PID control to determine the response of the return position of the given angular noise. the microprocessor used is Raspberry Pi 3 Model B which has four cores with 1.2GHz speed with a cache memory level 1 of 32kB. The PID control checking process can be performed quickly and generates a DC motor speed response to the tilt to return to the position near the angle value of 0. The accelerometer sensor is used as a tilt sensor and system feedback. The system has been able to produce an angle speed of 541.3 with a speed of 5170 rpm. the system has successfully maintained the stability of its position to the slope of 3.5°.

Keywords: PID control, gyroscope, Raspberry Pi 3 Model B microprocessor, equilibrium control.

1. Pendahuluan

Kecelakaan lalu lintas di jalan raya Indonesia sering didominasi oleh kendaraan roda dua atau sepeda motor [1]. Korban kecelakaan lalu lintas biasanya berasal dari kalangan buruh. Hal ini terjadi karena kendaraan roda dua memiliki harga yang cukup ekonomis serta lincah dalam menghadapi kondisi jalan raya [2]. Selain mendominasi terjadinya kecelakaan, kendaraan roda dua memiliki kekurangan dari segi desain serta keseimbangan yang bergantung pada kondisi pengemudinya. Kendaraan yang memiliki desain yang nyaman dan mengurangi angka korban kecelakaan ialah kendaraan roda empat atau mobil. Mobil memiliki bentuk yang lebih nyaman dan aman dibandingkan sepeda motor. Kekurangan dari mobil adalah dimensi yang besar dan posisi roda yang sejajar sehingga tidak selincih sepeda motor. Selain itu, efisiensi bahan bakar mobil jauh di bawah sepeda motor. Solusi yang ditawarkan untuk mengurangi angka kecelakaan adalah alat transportasi yang memiliki bentuk sepeda motor dan memiliki keamanan dan kenyamanan mobil. Kendaraan ini merupakan mobil roda dua, yaitu kendaraan yang memiliki kelincuhan sepeda motor, kemandirian dan kenyamanan mobil [13]. Sebuah peneliti di Stockholm, Swedia

melakukan sebuah penelitian mengenai kendaraan roda dua yang memiliki fasilitas seperti kendaraan roda empat yang disebut mobil roda dua [3]. Kelebihan dari mobil roda dua terletak dari ukuran dan keselamatannya untuk pengendara. Mobil roda dua juga mampu tetap seimbang dalam keadaan apapun. Mobil roda dua dapat seimbang, karena mobil roda dua ini menggunakan sistem *giroskop*. *Giroskop* merupakan salah satu sistem yang paling luar biasa dan diakui secara luas di dunia [4]. *Giroskop* bukan merupakan teknologi yang terbaru. *Giroskop modern* pertama dirancang pada tahun 1810 oleh G.C Bohnenberger berbentuk bola yang berat, bukan berbentuk piringan [5]. Dan pada tahun 1852, Leon Foucault seorang ilmuwan perancis menggunakan giroskop untuk menunjukkan bahwa bumi berputar. Selanjutnya para ilmuwan mulai mengaplikasikan giroskop sebagai instrument penerbangan, *gyrocompass*, *autopilot*, dan keperluan navigasi untuk kapal dan pesawat terbang [6]. Namun giroskop, paling banyak digunakan sebagai navigasi dan pengukuran kecepatan sudut. Pada prinsipnya giroskop menggunakan roda yang berputar atau *flywheele* yang berporos bebas untuk mengambil setiap orientasi [7]. Meskipun orientasi ini tidak tinggal tetap, perubahan respon terhadap torsi dari luar jauh lebih sedikit dan dalam arah yang berbeda dari itu akan ada momentum sudut yang besar yang terkait dengan tingkat lebar piringan yang berputar. Karena torsi dari luar sistem akan diredam dengan meningkatkan kecepatan perangkat digimbal. Pada penerapan sebelumnya, giroskop yang digunakan di mobil roda dua menggunakan kecepatan yang konstan untuk dapat mempertahankan posisi [8]. Namun hal ini di anggap kurang efektif karena dapat mempercepat pengurangan sumber tenaga. Pada tugas akhir ini dipelajari mengenai respon kecepatan putar giroskop menggunakan kontrol PID [9] yang dibantu oleh sensor sudut untuk mengetahui derajat kemiringannya yang nantinya akan dipasang di sebuah wahana prototipe mobil roda dua. Giroskop yang dipasang di wahana prototipe mobil roda dua berupa sebuah aktuator yang dipasang roda besi yang nantinya roda tersebut bertugas sebagai roda putar yang berporos bebas untuk mengambil setiap rotasi. Dalam tugas akhir ini diharapkan nantinya kontrol PID dapat memberikan respon yang baik terhadap kestabilan wahana.

2. Dasar Teori

2.1. Definisi gyroscope

Gyroscope adalah benda yang berbentuk seperti roda atau piringan yang dapat berputar pada porosnya [11]. Benda ini terbuat dari metal, dinamakan *gyro rotor* dengan kata lain *gyroscope* merupakan alat untuk mempertahankan orientasi berdasarkan prinsip momentum angular. Pada dasarnya *mechanical gyroscope* adalah sebuah piringan (rotor) yang berputar pada sumbu (axis) yang mampu bergerak ke beberapa arah.

2.2. Karakteristik Gyroscope

Mekanisme utama dari *gyroscope* adalah roda yang serupa dengan roda sepeda. Hal ini tepi luar itu memiliki massa yang berat. Berputar dengan kecepatan tinggi pada bantalan gesekan yang sangat rendah. *gyroscope* juga dapat digunakan untuk membangun *gyrocompasses*, yang melengkapi atau menggantu kompas magnetic dikapal atau dipesawat terbang [5], dan untuk membantu dalam stabilitas. Ketika *gyroscope* dibawah pengaruh torsi, hal ini menunjukkan sejumlah perilaku termasuk presesi dan stabilitas. Persamaan mendasar yang menggambarkan perilaku *gyroscope* ini adalah :

$$\tau = \frac{dL}{dt} = \frac{d(I\omega)}{dt} = I \alpha \quad (1)$$

Dimana,

τ = torsi

L = momentum sudut

I = momen inersia

α = percepatan sudut

2.3. Momentum sudut

Angular momentum atau momentum sudut merupakan momentum yang dimiliki oleh benda yang sedang bergerak rotasi. Untuk benda tegar berputar disekitar sumbu simetri, momentum sudut dapat dinyatakan sebagai produk tubuh momen inersia, I (ukuran resistensi obyek perubahan rotasi kecepatan) dan kecepatan sudut ω [12].

$$L = I \omega \quad (2)$$

Dimana,

L = momentum sudut

I = momen inersia

ω = kecepatan sudut

2.4. Sistem Kontrol PID

Variable PID merupakan kontroler mekanisme umpan balik yang terdiri dari *proportional-integral-derivative controller*. Sistem variable PID secara kontinyu menghitung nilai kesalahan sebagai beda antara *setpoint* yang diinginkan dan variable proses terukur. K_p merupakan konstanta proporsional yang berlaku sebagai *Gain* (penguat) tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler, K_i dapat memperbaiki respon *steady-state*, tetapi jika pemilihan K_i tidak tepat maka akan menyebabkan respon transien yang tinggi yang menyebabkan ketidakstabilan sistem. Sebaliknya, jika pemilihan K_i yang terlalu tinggi maka akan menyebabkan output berisolasi. Sedangkan K_d merupakan konstanta *Derivative* yang dapat mengurangi efek *overshoot* (efek yang berlebihan) dalam menuju *steady-state*[9].

2.5 Perhitungan Nilai K_p , K_i , dan K_d

Perangkat kontrol kestabilan pada penelitian ini menggunakan kontrol PID sebagai kontrol utama pengendali PWM motor DC. Dalam kontrol PID, nilai K_p , K_i , dan K_d harus ditentukan untuk mendapatkan respon yang baik dari sistem. Nilai K_p , K_i , dan K_d nantinya akan berpengaruh pada nilai PWM ketika terjadi perubahan sudut yang dibaca oleh sensor. Oleh karena itu, nilai tersebut akan disesuaikan dengan beberapa kondisi pada sistem sehingga didapatkan beberapa respon yang sesuai. Perhitungan nilai K_p , K_i , dan K_d dilakukan menggunakan metode Ziegler – Nichols II dengan menentukan nilai *Ultimate Gain* (K_u) dan *Ultimate Periode* (T_u) [14]. Persamaan tersebut ditulis pada tabel berikut.

Tabel 1 parameter kontrol Ziegler – Nichols II

kontrol	K_p	K_i	K_d
P	0.5 K_u		
PI	0.4 K_u	0.8 T_u	
PID	0.6 K_u	0.5 T_u	0.125 T_u

3. Perancangan Sistem

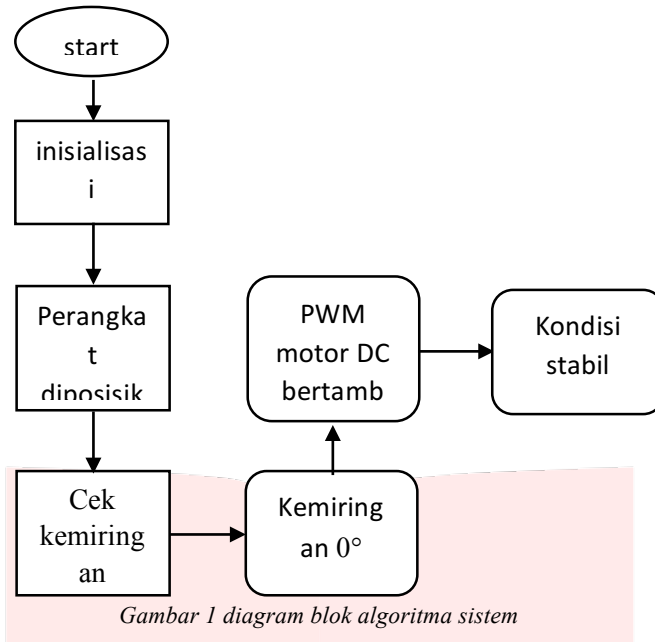
3.1 Perancangan sistem Alat

Pada perancangan sistem keseluruhan tugas akhir ini, mencakup perancangan *hardware* dan *software*. Sensor yang digunakan adalah MPU-6050 (sensor kemiringan) sebagai acuan untuk implementasi *gyroscope stabilizer*. Selanjutnya otak dari pengatur sistem, menggunakan Raspberry Pi 3 model B. dan motor DC beserta piringan metal sebagai output dari sistem yang berfungsi menjaga kestabilan dari perangkat.

3.2 Perancangan Algoritma dan Kontrol

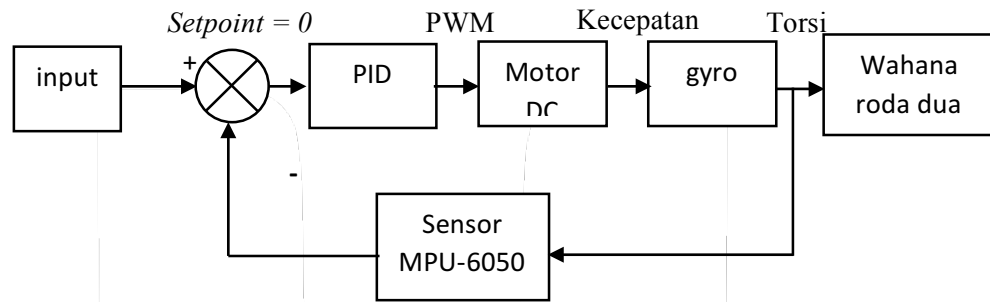
a.) Perancangan Algoritma

Perancangan algoritma pada perangkat, berdasarkan teori untuk mendapatkan kestabilan. Saat algoritma diterapkan, perangkat berada diposisi 0° (dalam keadaan seimbang) dan dalam keadaan diam (tidak gerak). Sensor kemiringan digunakan untuk mendeteksi kemiringan yang terjadi pada perangkat saat diberi gangguan dari luar. Apabila sensor mendeteksi perangkat tidak dalam keadaan posisi 0° , maka motor DC yang diberikan roda beban akan berotasi lebih cepat. Sebaliknya, ketika perangkat berada diposisi 0° , maka kecepatan rotasi motor DC akan berkurang sesuai dengan kecepatan yang sudah di tentukan sebelumnya.



Gambar 1 diagram blok algoritma sistem

b.) perancangan kontrol PID

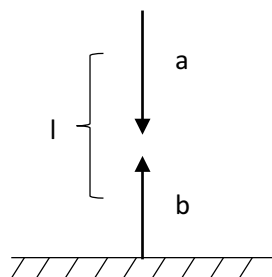


Gambar 2 diagram blok sistem kontrol

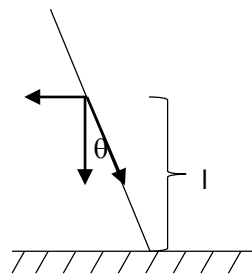
Pada perancangan PID di tugas akhir ini, data dari sensor kemiringan digunakan sebagai *input*, dengan *setpoint* kemiringan 0° . Motor DC yang terhubung dengan piringan beban digunakan sebagai alat untuk mendapatkan nilai derajat kemiringan pada perangkat. Jadi, ketika sensor kemiringan membaca selain 0° , maka nilai yang dibaca sensor akan dianggap sebagai *error*, dan nilai *error* ini akan digunakan sebagai perhitungan untuk PID. Output dari perhitungan PID sendiri adalah kecepatan rotasi motor DC yang terhubung dengan roda beban.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Gyroscope



Gambar 3 posisi sudut 90°



Gambar 4 posisi sudut 30°

$$\begin{aligned}\tau_a &= \tau_b & \tau_b &= I \alpha \\ \tau_a &= (F_a) (l) & &= \frac{dL}{dt} \\ &= (F_a) (l) (\sin \theta) & &= \frac{d(I\omega)}{t} = \frac{I\omega}{t}\end{aligned}$$

$$\tau_a = \tau_b$$

$$(F_a) (l) (\sin \theta) = \frac{I\omega}{t}$$

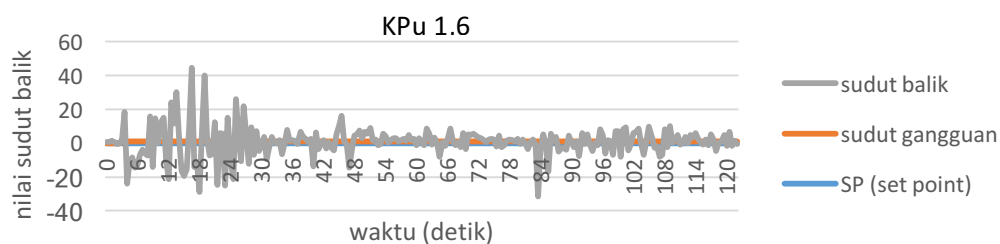
$$\frac{(1.5 \text{ kg}) (10 \text{ m/s}^2) (0.04 \text{ m}) (1.7 \text{ s}) (\sin 90)}{(0.58 \text{ kg})(3.249 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = \omega$$

$$\omega = 541.3 \text{ Rad/s}$$

dengan massa sistem secara keseluruhan 1.5 Kg, massa gimbale 0.58 Kg, jari-jari gimbale 0.057 m, dan waktu konstante gimbale berputar 1.7 s. *gyroscope* akan memiliki torsi ideal dengan kecepatan sudut sebesar 541.3 Rad/s^2 . berdasarkan informasi tersebut bahwa *gyroscope* memiliki keterbatasan dalam memberi gaya untuk menjaga keseimbangan sistem. Oleh karena itu ada suatu kondisi dimana sistem akan jatuh ke kanan atau ke kiri karena kemiringan sistem yang sudah melebihi batas. Arah gaya yang dihasilkan oleh *gyroscope* ditentukan oleh arah putaran motor. saat motor bergerak searah jarum jam maka sesuai dengan kaidah tangan kanan dan arah momentum sudut mengarah ke bawah. Dengan demikian maka gaya yang menekan kebawah akan semakin besar sehingga sistem akan semakin stabil.

4.2 Tuning kontrol PID

Dari gambar dibawah didapatkan nilai *Ultimate Periode* ($T_u = 1\text{s}$), Nilai dari *Ultimate Periode* yang sudah didapat lalu dimasukkan kedalam persamaan Ziegler – Nichols II untuk mencari nilai K_i , dan K_d . Dan berdasarkan hal tersebut pada penelitian ini digunakan nilai K_p dengan nilai 0.96, nilai K_i 0.5 dan nilai K_d 0,125.

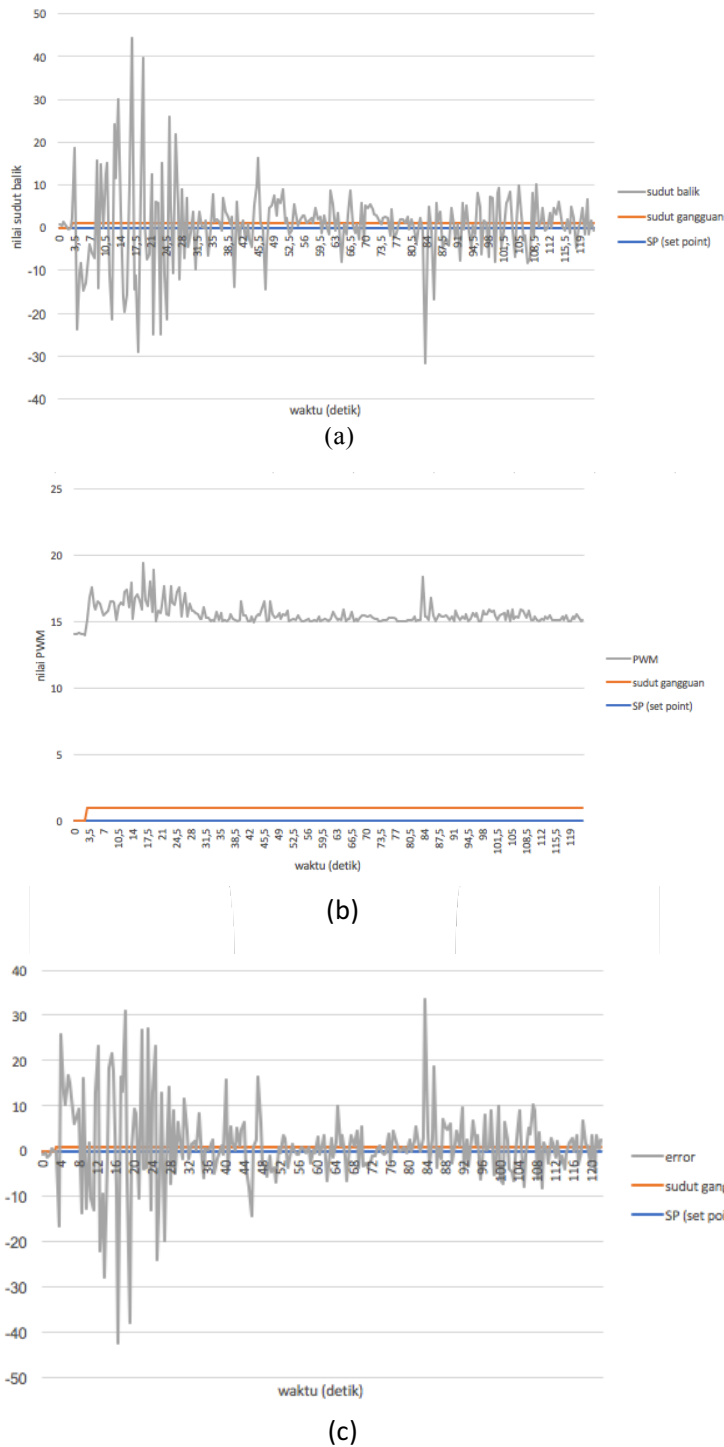


Gambar 5 grafik respon $K_p = 1,6$ dengan gangguan 1°

4.3 Pengujian sistem menggunakan kontrol PID

sudut gangguan = 1°

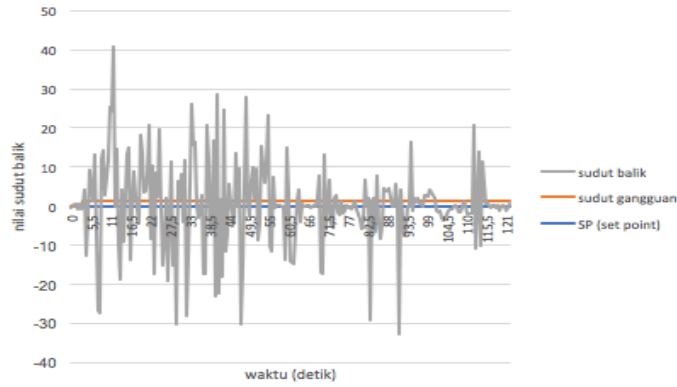
Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.8$, $K_d = 0.02$ dan sistem diberi gangguan sudut sebesar 1° . Sistem beresilasi diwaktu 3,5 detik dengan sudut $1,4^\circ$ kemudian kembali stabil diwaktu 35 detik dengan sudut 0.84° . pada bagian (b) nilai PWM mulai naik di waktu 3.5 detik menjadi 14.17 kemudian kembali stabil di waktu 35 detik dengan nilai PWM 14,01. Dan pada bagian (c) nilai error mulai naik pada detik ke 3 dengan nilai *error* -1.17 kemudian kembali stabil di detik 35 dengan nilai error 0.98. Nilai rata-rata error keseluruhan 0.270.



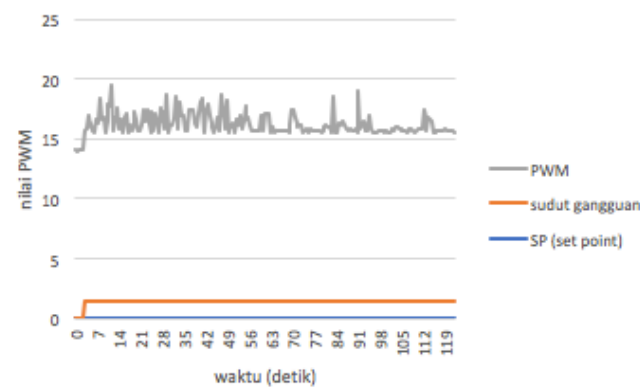
Gambar 5 hasil pengujian gangguan 1° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

sudut gangguan = $1,5^\circ$

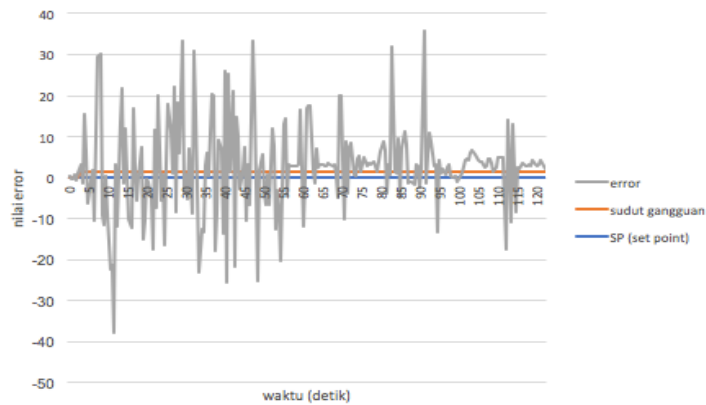
Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.8$, $K_d = 0.02$ dan sistem diberi gangguan sudut sebesar 1.5° . Sistem beresilasi diwaktu 3 detik dengan sudut -1.68° kemudian kembali stabil diwaktu 66 detik dengan sudut -1.39° . pada bagian (b) nilai PWM mulai naik diwaktu 3 detik menjadi 14.15 kemudian kembali stabil diwaktu 66 detik dengan nilai PWM 14.13. Dan pada bagian (c) nilai error mulai naik pada detik ke 3 dengan nilai *error* 1.68 kemudian kembali stabil didetik 66 dengan nilai error 1.39. Nilai rata-rata error keseluruhan 1.054.



(a)



(b)

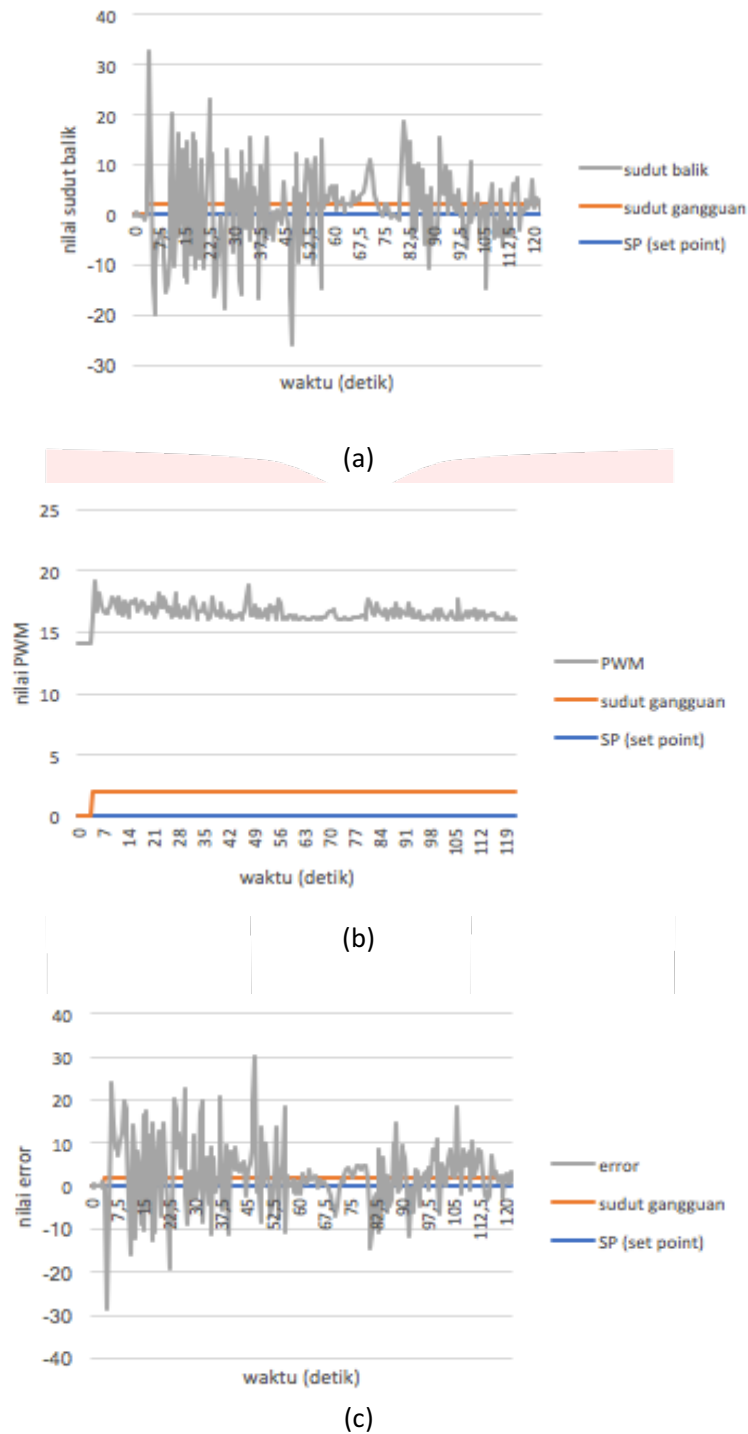


(c)

Gambar 7 hasil pengujian gangguan 1.5° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

sudut gangguan = 2°

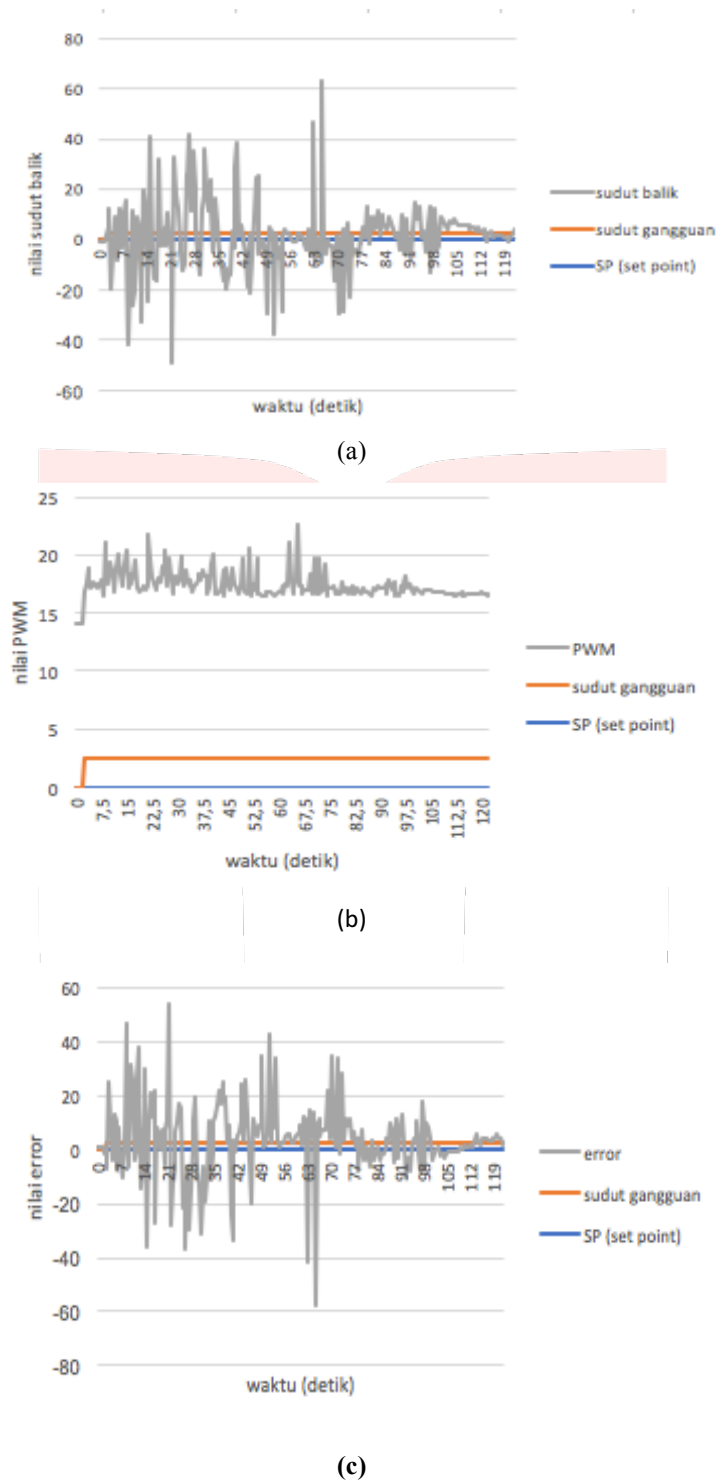
Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.8$, $K_d = 0.02$ dan sistem diberi gangguan sudut sebesar 2° . Sistem beresilasi di waktu 4 detik dengan sudut 2.01° kemudian kembali stabil diwaktu 57 detik dengan sudut -0.54° . pada bagian (b) nilai PWM mulai naik di waktu 4 detik menjadi 14,20 kemudian kembali stabil di waktu 57 detik dengan nilai PWM 14.08. Dan pada bagian (c) nilai error mulai naik pada detik ke 4 dengan nilai *error* -2.01 kemudian kembali stabil di detik 57 dengan nilai error -1.61. Nilai rata-rata error keseluruhan 0.532.



Gambar 8 hasil pengujian gangguan 2° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

sudut gangguan = 2,5°

Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.8$, $K_d = 0.02$ dan sistem diberi gangguan sudut sebesar 2.5°. Sistem beresilasi di waktu 2.5 detik dengan sudut 2.68° kemudian kembali stabil diwaktu 54 detik dengan sudut -0.66°. pada bagian (b) nilai PWM mulai naik di waktu 2.5 detik menjadi 14.27 kemudian kembali stabil di waktu 54 detik dengan nilai PWM 14.06. Dan pada bagian (c) nilai error mulai naik pada detik ke 2.5 dengan nilai *error* -2.68 kemudian kembali stabil di detik 54 dengan nilai error 0.66. Nilai rata-rata error keseluruhan 0.924.

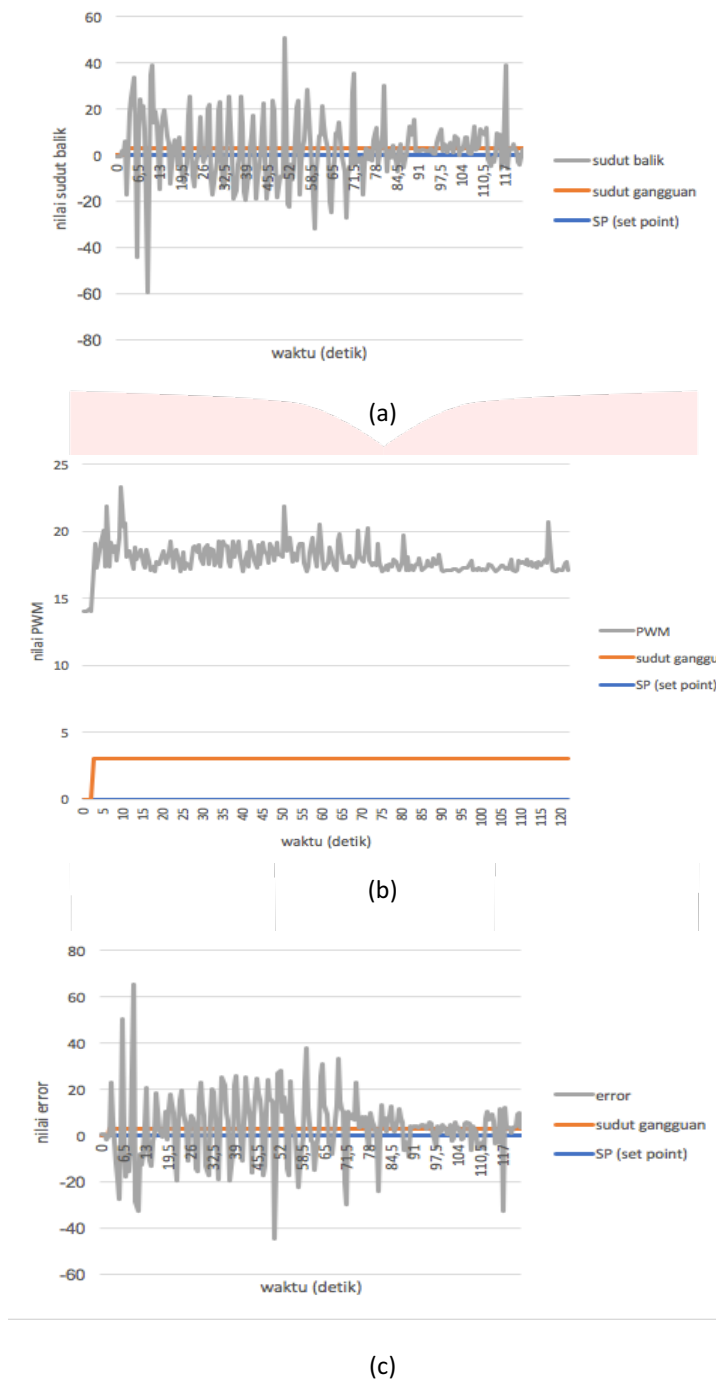


Gambar 9 hasil pengujian gangguan $2,5^\circ$ (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

sudut gangguan = 3°

Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0.1$, $K_i = 0.8$, $K_d = 0.02$ dan sistem diberi gangguan sudut sebesar 3° . Sistem beresilasi di waktu 2.5 detik dengan sudut 3.07° kemudian kembali stabil di waktu 90 detik dengan sudut -1.12° pada bagian (b) nilai PWM mulai naik di waktu 2.5 detik menjadi 14.22 kemudian kembali stabil di waktu 90 detik dengan nilai PWM 14.11. Dan pada bagian (c) nilai

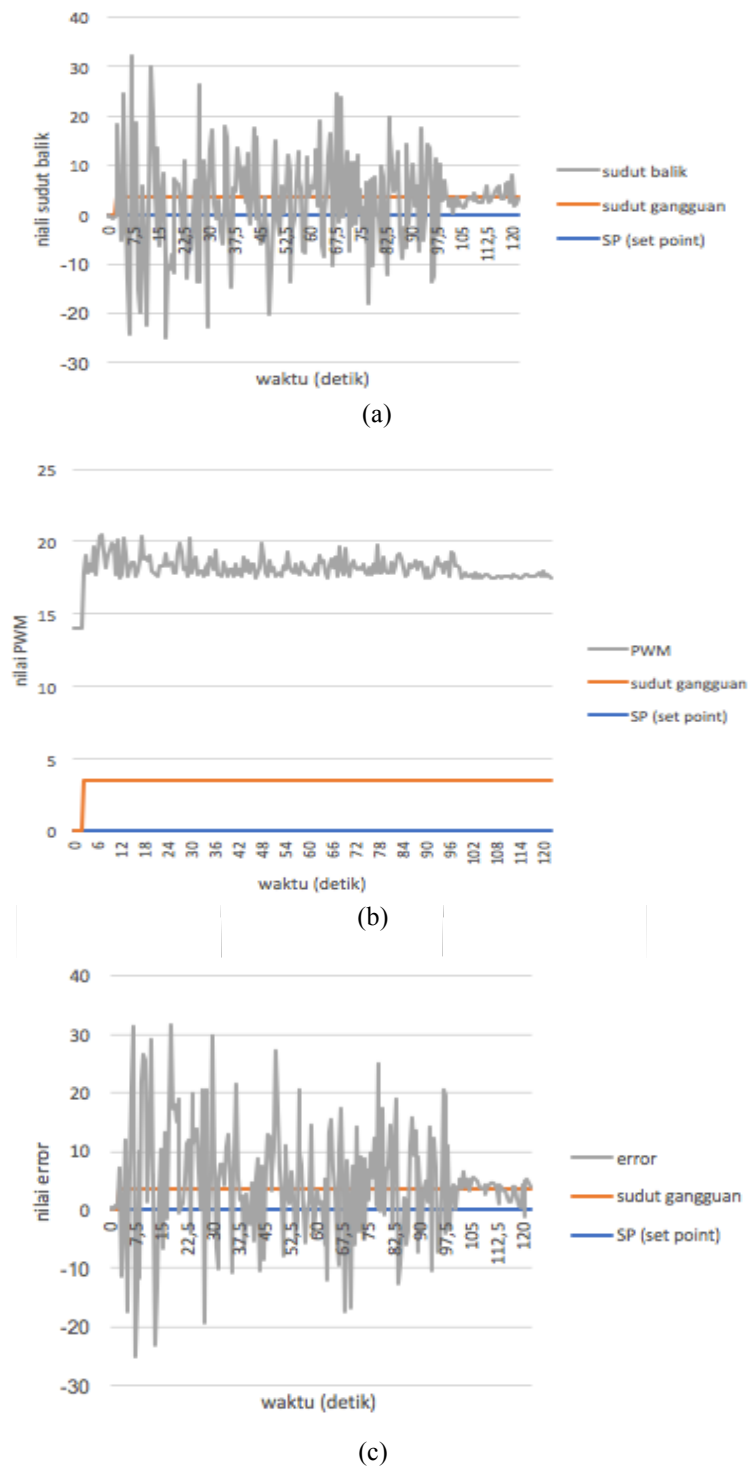
error mulai naik pada detik ke 2.5 dengan nilai *error* -3.07 kemudian kembali stabil di detik 90 dengan nilai error 1.12. Nilai rata-rata error keseluruhan 0.600.



Gambar 10 hasil pengujian gangguan 3° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

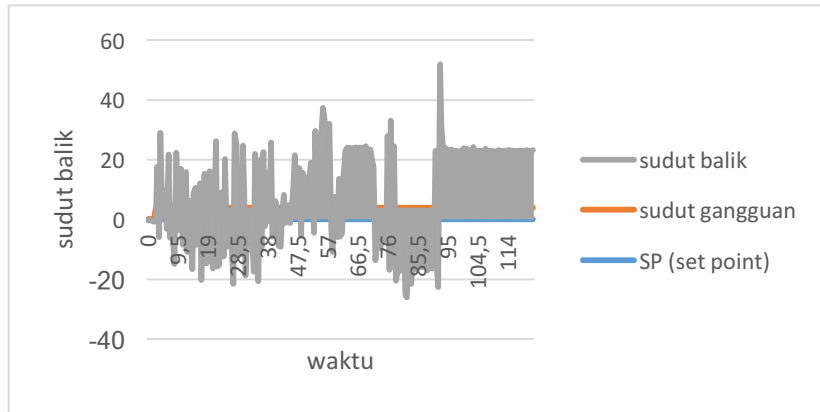
sudut gangguan = $3,5^\circ$

Pada gambar dibawah bagian (a) didapatkan bahwa saat nilai *set point* = 0, $K_p = 0,1$, $K_i = 0,8$, $K_d = 0,02$ dan sistem diberi gangguan gaya sebesar $3,5^\circ$. Sistem beresilasi di waktu 2,5 detik dengan sudut $-3,65^\circ$ kemudian kembali stabil di waktu 100,5 detik dengan sudut $-0,42^\circ$. pada bagian (b) nilai PWM mulai naik di waktu 2,5 detik menjadi 14,36 kemudian kembali stabil di waktu 100,5 detik dengan nilai PWM 14,05. Dan pada bagian (c) nilai error mulai naik pada detik ke 2,5 dengan nilai *error* $3,65$ kemudian kembali stabil di detik 100,5 dengan nilai error 0,42. nilai rata-rata error keseluruhan 0,979.

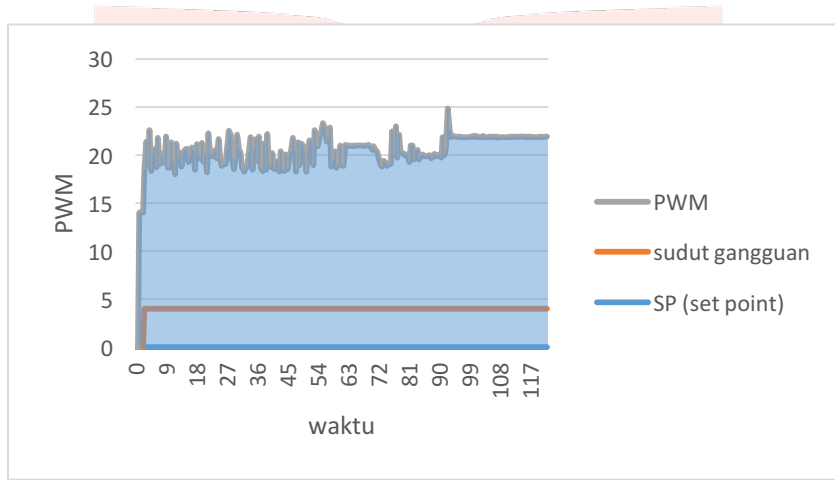


Gambar 11 hasil pengujian gangguan 3,5° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

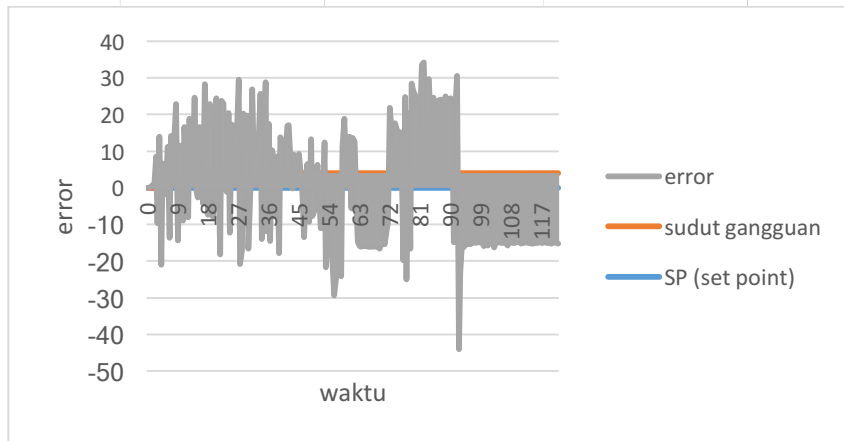
sudut gangguan = 4°



(a)



(b)



(c)

Gambar 12 hasil pengujian gangguan 4° (a) waktu terhadap sudut balik (b) waktu terhadap nilai PWM (c) waktu terhadap nilai error

Berdasarkan hasil pengujian seperti yang ditunjukkan oleh gambar 6 sampai gambar 12, semakin besar gangguan sudut yang diberikan maka akan semakin lama juga respon sistem untuk kembali ke kondisi mendekati *set point* dan bahkan sistem tidak mampu untuk kembali mendekati nilai *setpoint*. Secara keseluruhan data yang didapatkan tidak selalu stabil dikarenakan adanya *noise* yang dihasilkan dari getaran akibat rotasi gimbal yang mempengaruhi nilai sensor.

5. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan pada perancangan kontrol kestabilan wahana roda dua dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. implementasi kontrol PID yang telah dirancang dan ditanamkan pada prototipe wahana roda dua, memberikan nilai rata-rata error pada sudut 1° sebesar 0,270 , sudut $1,5^\circ$ dengan nilai rata-rata error 1,054 , sudut 2° dengan rata-rata error 0,532 $^\circ$, sudut $2,5^\circ$ dengan rata-rata error 0,924 $^\circ$, sudut 3° dengan rata-rata error 0,600 $^\circ$, dan sudut $3,5^\circ$ dengan rata-rata error 0,979 $^\circ$. Jika sudut gangguan yang diberikan makin besar, maka respon giroskop untuk kembali mendekati nilai *setpoint* membutuhkan waktu yang lama.
2. Giroskop yang telah dirancang mampu menjaga keseimbangan sistem dengan batas maksimal kemiringan $3,5^\circ$. Dengan nilai kecepatan sudut awal 541.3 Rad/s dengan nilai rpm 5170.
3. Hasil data yang didapat dari proses pengujian memiliki nilai yang tidak sempurna. Dikarenakan konstruksi giroskop yang tidak bisa meredam getaran.



Daftar Pustaka

- [1] <http://www.solidaritas.net/2017/01/kawasan-industri-rawan-kecelakaan-lalu-lintas.html> “Kawasan Industri Rawan Kecelakaan Lalu Lintas”, [Akses 10 Januari 2017 pukul 07.00].
- [2] Peter Jorgensen, Dr. John E. Hurtado, “Gyroscopic Stabilization of Unstable Dynamical Systems”, Texas A&M University 2007.
- [3] Simon monk, “Adafruit’s Raspberry Pi Lesson 9. Controlling a DC Motor” , 2014.
- [4] Tao zhang, “Analysis of Active Gyro Based Roll-Stabilization of Slender Boat Hulls”, Stockholm, Sweden 2014.
- [5] Mukhamad Mardiansyah,”Gyroscope Instruments”, SMK 29 jakarta selatan 2013.
- [6] Stephen C. Spry, Anouck R. Girard, “Gyroscopic Stabilization of Unstable Vehicles: Configurations, Dynamics, and Control”, 2008.
- [7] Akshay Khot, Nishad Kumbhojkar, “Modeling And Validation of Prototype of Self Stabilizing Two Wheeler Using Gyroscope”, singhad college of engineering, pure, Maharashtra, India 2014.
- [8] <http://osoyoo.com/2016/04/08/get-input-signal-from-raspberry-pi-gpio/>, “Mercury Tilt Switch Work With Raspberry Pi”, [Akses 8 April 2016 pukul 20.00].
- [9] Gokul lakshmanan,”theory of gyrocompass”, Sree Narayana Guru College of Engineering and Technology, India 2015
- [10] Bonaventura Dhimas Gutama, “desain dan implementasi kontrol keseimbangan kendaraan roda dua dengan metoda kontrol logika samar berbasis mikrokontroler”. Bandung: Universitas Telkom.