

PERANCANGAN KONTROL KESTABILAN VERTIKAL PADA ROBOT BERODA SATU MENGGUNAKAN KONSEP PENDULUM TERBALIK

DESIGN OF VERTICAL STABILITY CONTROL ON A SINGLE WHEEL ROBOT USING INVERTED PENDULUM CONCEPT

Andi Aditya Pratama¹, Reza Fauzi Iskandar, S.Pd., M.T.², Dr. Eng. Asep Suhendi, S.Si., M.Si.³

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

andiaditya21@gmail.com¹, rezafauzii@gmail.com², as.suhendi@gmail.com³

Abstrak

Robot beroda satu merupakan robot yang dirancang untuk dapat menjaga keseimbangan berat badan robotnya, dalam hal ini terfokuskan dalam satu sumbu (*pitch*). Sistem robot beroda satu dapat diasumsikan sebagai sistem pendulum terbalik. Pendulum terbalik merupakan sistem yang labil dan untuk mendapatkan keseimbangan bisa didapatkan dengan berusaha mendapatkan posisi titik berat berada di atas titik tumpunya. Dikarenakan sistem pendulum terbalik ini merupakan sistem yang tidak stabil, maka diperlukan suatu pengontrolan untuk mengatur agar sistem tersebut dapat menjaga posisi vertikal terhadap posisi acuan. Pada penelitian ini, metode PID akan digunakan sebagai pengontrolan sistem dengan memanfaatkan perbedaan nilai *set point* dan nilai *present value* dari sensor MPU6050 untuk dapat menstabilkan keseimbangan robot. MPU6050 merupakan sebuah sensor yang berfungsi membaca nilai sudut yang ditimbulkan akibat berotasinya badan robot. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa robot dapat seimbang ketika tanpa beban maupun diberikan variasi beban. Pemberian beban ini bertujuan untuk melihat sejauh mana sistem dapat menjaga kestabilannya ketika dalam keadaan terbebani. Kondisi tanpa beban merupakan respon yang paling stabil dengan *settling time* sekitar 0,79 detik, *error steady state* 1,6% dan rasio osilasi sebesar 0,99375%. Kondisi pada 29 gram adalah beban maksimal yang dapat diberikan pada robot dengan *settling time* sekitar 1,21 detik, *error steady state* 2,067% dan rasio osilasi sebesar 1%. Ketika diberikan beban 33 gram, robot memperlihatkan pergerakan dinamis yang sangat besar sehingga melewati wilayah pengujian dengan nilai *settling time* sekitar 2,42 detik, *error steady state* 1,76% dan rasio osilasi sebesar 0,998%.

Kata Kunci: Robot beroda satu, pendulum terbalik, kendali PID.

Abstract

A one-wheeled robot is a robot designed to keep the robot's weight equilibrium which focuses in one direction (back and forth). The implementation of the one-wheeled robot can be assumed as an inverted pendulum. The inverted pendulum is an unstable system and an equilibrium can be obtained by trying to get the center of gravity position above the fulcrum. Due to the unstable system of this inverted pendulum, a control is needed to set so that the system can keep vertical position against the reference position. In this research, the PID control will be used as a system control utilizes the difference of setpoint value and the present value of an MPU6050 sensor to stabilize the robot equilibrium. MPU6050 is a sensor which serves to read the angle values caused by the rotating body robot. In this research obtained that robot can balanced when without load and given load variaton. Giving the load aims to see to what extent the system can maintain stability when burdened. Without load condition is the most stable response with settling time 0,79 second, error steady state 1,6% and oscillation ratio 0,99375%. Condition at 29 grams is maximum load that can be given to robot with settling time 1,21 second, error steady state 2,067 % and oscillation ratio 1%. When given load of 33 grams, the robot shows very large dynamic movement so that it pass through the test area with settling time 2,42 second, error steady state 1,76% and oscillation ratio 0,998%.

Keyword : single wheel robot, inverted pendulum, control PID.

1. Pendahuluan

Robot diciptakan karena robot diharapkan dapat membantu manusia dalam menyelesaikan pekerjaan yang memerlukan ketelitian dan akurasi tinggi. Robot didesain sedemikian rupa agar mampu bergerak layaknya manusia dan dapat berfikir dan bekerja berdasarkan logika-logika yang diprogramkan[1][2]. Bahkan setiap tahun kontes robot selalu ada untuk memperkenalkan dan memperluas ilmu pengetahuan tentang robot. Saat ini, robot banyak digunakan dalam berbagai bidang kehidupan masyarakat. Salah satu pengaplikasiannya adalah robot beroda satu.

Robot beroda satu merupakan robot yang dirancang untuk dapat menjaga keseimbangan berat badan robotnya. Pengaplikasian hukum kesetimbangan benda tegar menjadi pusat perhatian dalam mengembangkan robot ini.

Pada penelitian sebelumnya telah dikembangkan beberapa robot keseimbangan. Diantaranya, Murata Seiko Robot (robot yang memiliki keseimbangan dan dapat bergerak mundur)[3], segway[4], dan *Unicycle Robot*[5]. Khusus untuk *Unicycle robot*, penelitian telah berlangsung sejak tahun 1980-an di AS dan Jepang. Schoonwinkel dari Stanford University dan Prof. Yamafujii dari Tokyo University yang mengusulkan model dinamik robot dengan menerapkan sistem kontrol optimal[6]. Penelitian kontrol robot keseimbangan terus meningkat seiring berjalannya waktu. Banyak kompetisi yang melibatkan robot keseimbangan dalam beberapa dekade terakhir dikarenakan kesederhanaan mekaniknya yang membuatnya efektif dalam segi pergerakan dan diharapkan dapat memberikan solusi transportasi bagi para pengguna[7].

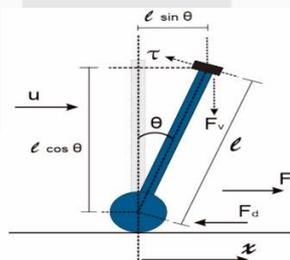
Sistem robot beroda satu dapat diasumsikan sebagai sistem pendulum terbalik[8]. Konsep sederhana robot ini adalah ketika robot mendapatkan gaya, sistem akan berusaha untuk mendapatkan titik keseimbangannya kembali dengan cara mengatur kecepatan roda motor. Kecepatan motor akan dipengaruhi oleh sudut kompensasi yang terbentuk akibat renggangnya badan robot terhadap sumbu y. Hal ini membuat robot akan berusaha menyeimbangkan meskipun titik pusat massa badan robot dapat berubah-ubah[9]. Peletakan titik pusat massa sangat dipengaruhi oleh pembuatan dasar-dasar mekanik seperti berat dan ketinggian robot. Kecepatan dan torsi motor DC sangat mempengaruhi kualitas robot yang dihasilkan. Karena pada dasarnya banyak yang memperlumahkan kinerja motor DC disebabkan beban yang diangkut motor melebihi kemampuan torsi motornya[10]. Persamaan rancangan dinamik robot beroda satu diturunkan untuk mengkonfirmasi kinerja dan pengendalian kontroler oleh simulasi sistem terkontrol diperoleh dengan menggunakan persamaan Newtonian[8][11].

Pada penelitian tugas akhir ini akan dirancang sebuah sistem robot beroda satu. Sistem terdiri dari pembuatan mekanik yang diharapkan mampu menghindari rugi-rugi mekanik dengan baik dan sistem ini menggunakan kontrol PID sebagai pengontrolan sistemnya. Diharapkan pengontrolan PID tersebut dapat memberikan respon sistem yang baik terhadap kestabilan robot beroda satu.

2. Dasar Teori

2.1 Pendulum Terbalik

Secara umum, suatu pendulum selalu bergerak kembali ke posisi keseimbangannya. Keseimbangan pada benda tegar terjadi apabila gaya dan torsi pada benda bernilai nol, maka benda tersebut tidak akan mengalami perubahan gerak, baik itu translasi maupun rotasi. Jika benda dalam keadaan bergerak, keseimbangan bisa didapatkan dengan berusaha mendapatkan posisi titik beratnya (CoG) berada di atas titik tumpunya [12]. Pendulum terbalik adalah sistem pendulum yang titik beratnya berada diatas titik tumpunya sehingga keseimbangan yang dapat dicapai merupakan keseimbangan labil atau tidak kembali ke posisi semula[13]. Dalam kasus ini titik tumpu tersebut ditempatkan pada sebuah roda yang dapat digerakkan dalam satu sumbu horizontal (maju-mundur), sehingga harus diatur sedemikian rupa (dikontrol) agar pendulum tetap tegak dengan cara memberikan gaya pada roda. Pendulum yang diletakkan diatas roda akan bergerak berotasi dalam bidang yang sama dengan arah gaya. Gaya yang diberikan kepada roda berasal dari torsi yang dihasilkan oleh motor. Tanpa adanya gaya yang sesuai, pendulum akan jatuh. Dengan adanya pengontrolan, motor akan memberikan gaya yang sesuai sehingga pendulum tetap dalam keadaan tegak[9].



Gambar 2.1 Model dari Pendulum Terbalik[12].

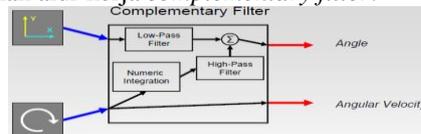
Persamaan dinamik untuk pendulum terbalik diberikan oleh persamaan sebagai berikut[12]:

$$\frac{\theta(s)}{F(s)} = \frac{-m l s^2}{m l s^4 + m c s^3 - m^2 g l s^2} \quad (2.1)$$

Persamaan 2.1 menjelaskan hubungan antara keluaran berupa posisi sudut dengan masukan berupa gaya yang dikerjakan menggunakan metoda transformasi Laplace, dimana m adalah massa total pendulum dan roda, I adalah momen inersia, g adalah percepatan gravitasi, l adalah jarak antara titik tumpu dan titik pusat gravitasi pendulum, dan c merupakan koefisien dari gesekan antara pendulum dan roda. Persamaan dinamik tersebut dihasilkan untuk mewakili gerakan rotasi dan gerakan translasi dari pendulum terbalik tersebut.

2.2 Complementary Filter

Complementary Filter adalah filter digital yang dapat menghilangkan efek gangguan sinyal (*noise*) dan penyimpangan (*drift*) dari pembacaan *accelerometer* dan *gyroscope*. *Accelerometer* dapat mengukur sudut kemiringan dengan akurat ketika sistem dalam keadaan diam (statis), tetapi tidak akurat ketika dalam keadaan bergerak (dinamis) dikarenakan dipengaruhi oleh gravitasi bumi dan getaran eksternal. *Gyroscope* dapat mengukur kecepatan sudut yang dinamis. Akan tetapi, tidak akurat dalam jangka panjang dikarenakan efek bias yang dihasilkan[14]. Gambar 2.3 menunjukkan alur kerja *complementary filter*.



Gambar 2.2 Alur kerja *complementary filter*.

Sinyal dari pengukuran *accelerometer* berupa nilai sudut memiliki *noise* pada frekuensi tinggi sehingga difilter dengan *Low Pass Filter* (LPF). Sinyal pengukuran *gyroscope* setelah integrasi data dari waktu ke waktu, sudut kemiringan dapat dihitung. Akan tetapi, nilai pengukuran kecepatan sudut memiliki *noise* pada frekuensi rendah sehingga difilter dengan *High Pass Filter* (HPF). Hasil penjumlahan dari kedua sinyal yang telah difilter tersebut adalah berupa sudut[15].

2.3 Kendali PID Penalaan Ziegler-Nichols 2

PID merupakan salah satu metode kontrol yang terdiri dari kontrol Proportional (P), Integral (I), dan Derivative (D). Ketiga pengontrolan tersebut dapat dipakai secara bersamaan maupun secara sendiri-sendiri tergantung dari respon yang diinginkan terhadap suatu plant. K_P merupakan konstanta penguatan proportional yang akan mempercepat respon dan selalu sebanding dengan besar sinyal kesalahan penggerak. K_I merupakan konstanta penguatan integral yang akan memperbaiki respon *steady-state*. K_D merupakan konstanta penguatan derivative. Pemberian nilai K_D dapat mengurangi *overshoot* yang ditimbulkan oleh sistem[16].

Penalaan Ziegler-Nichols metode osilasi 2 cocok digunakan pada sistem yang mengalami osilasi. Hal yang pertama yang harus dilakukan untuk menentukan penalaan PID adalah dengan memberikan nilai 0 pada parameter K_I dan K_D sementara nilai parameter K_P dinaikkan terus menerus sehingga mendapatkan osilasi yang stabil. Nilai K_P pada osilasi stabil tersebut dinamakan penguatan kritis (K_U). Kemudian carilah nilai periode osilasi (P_U) antar puncak gelombang osilasi tersebut[17][15]. Setelah mendapatkan nilai K_U dan P_U , tentukan nilai parameter K_P, K_I , dan K_D berdasarkan Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Model penalaran konstanta PID dengan metode Ziegler-Nichols

Type Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	0,5 K_u	0	0
PI	0,45 K_u	$P_u / 1,2$	-
PID	0,6 K_u	0,5 P_u	0,125 P_u

3. Perancangan Sistem

3.1 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam perancangan perangkat robot adalah sebagai berikut:

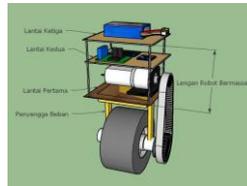
1. Mikrokontroler arduino nano
2. Sensor GY-521 MPU6050
3. Penggerak motor VNH2SP30
4. Gearbox motor DC 12 volt
5. Roda berdiameter 10 cm dan lebar 5,3 cm
6. Akrilik
7. Baterai Lithium Polymer 12 volt 2200 mAh
8. Spacer
9. *Timing pulley* dan *timing belt*
10. Mur dan baut

3.2 Perancangan Mekanik

Perancangan mekanik dibuat dengan menggunakan akrilik yang dibentuk secara bertingkat kemudian dihubungkan dengan roda lewat perantara penyangga beban. Penambahan penyangga beban ini ditujukan agar beban dapat bergerak *flexibel* dalam 1 arah. Akrilik dan pcb digunakan sebagai penampung komponen elektronika penyusun robot yang berisikan antara lain Arduino, sensor GY-521 MPU6050, motor DC, penggerak motor VNH2SP30 dan baterai Lithium polymer. Struktur-struktur tersebut disebut sebagai lengan robot bermassa.

Lengan robot bermassa diletakkan tepat diatas roda sesuai dengan titik tumpu perangkat. Hal ini dimaksudkan agar dapat menyeimbangkan perangkat dan hanya bergerak dalam satu sumbu saja.

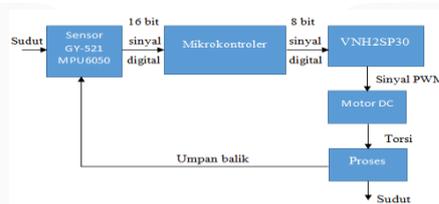
Setiap lantai dalam perangkat robot terdapat komponen-komponen penyusun robot. Pada lantai pertama motor DC beserta *timing pulley*. *Timing pulley* diletakkan pada keluaran *shaft* motor DC dan roda yang dihubungkan menggunakan *timing belt*. Lantai kedua terdapat komponen mikrokontroler arduino sebagai pusat pemrograman dari perangkat robot, sensor MPU6050, dan VNH2SP30 sebagai penggerak motor dari motor DC. Pada lantai ketiga terdapat baterai lithium polymer yang berfungsi sebagai pemasok daya pada masukan motor DC dan mikrokontroler.



Gambar 3.2 Model desain robot bertingkat

3.3 Perancangan Sistem Elektronika

Dalam perancangan sistem elektronika ini, pusat pengendalian sistem yang juga bertindak sebagai pemroses data yaitu menggunakan mikrokontroler arduino. Sensor GY-521 MPU6050 digunakan untuk mendeteksi timbulnya gerakan robot dalam hal ini sensor akan membaca sudut. Sensor ini merupakan gabungan antara sensor *gyroscope* dan *accelerometer*. Sensor tersebut dapat mengeluarkan 16 bit sinyal digital untuk selanjutnya diproses oleh mikrokontroler. Mikrokontroler tersebut akan mengolah data yang diberikan sensor dan kemudian mentransmisikan 8 bit sinyal digital ke penggerak motor VNH2SP30. Keluaran penggerak motor yang berupa sinyal PWM akan menentukan kecepatan dan arah perputaran pada motor DC yang kemudian mengeluarkan torsi dan akan mempengaruhi proses sistem. Pada sistem ini, keluarannya adalah nilai sudut dan terjadi umpan balik berupa pembacaan sensor MPU6050. Hal ini membuat sistem akan berusaha mendapatkan kestabilan secara terus-menerus.



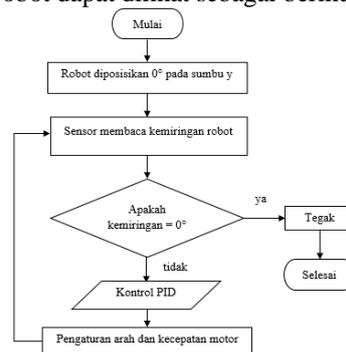
Gambar 3.1 Diagram blok perancangan sistem elektronika.

3.4 Kombinasi Accelerometer dan Gyroscope

Accelerometer dan *gyroscope* dapat dijadikan sebagai pendeteksi kemiringan. *Accelerometer* berfungsi sebagai pengukuran sudut saat sistem berada pada kondisi diam (*statis*). Sedangkan *gyroscope* berfungsi sebagai pengukuran kecepatan sudut saat sistem berada pada kondisi berotasi. Tetapi *accelerometer* maupun *gyroscope* sama-sama memiliki kelemahan. Kelemahan *accelerometer* terletak pada saat sistem berotasi, *accelerometer* tidak dapat bekerja secara maksimal karena respon yang lambat. Selain itu, *accelerometer* juga sensitif terhadap getaran eksternal sehingga dapat mengganggu pembacaan kemiringan sudut dan memiliki gangguan sinyal (*noise*). Sedangkan kelemahan *gyroscope* terletak pada perpindahan kecepatan sudut dalam jangka waktu yang panjang menjadi tidak akurat karena efek bias yang dihasilkan oleh *gyroscope* tersebut.

3.5 Diagram Alir Sistem

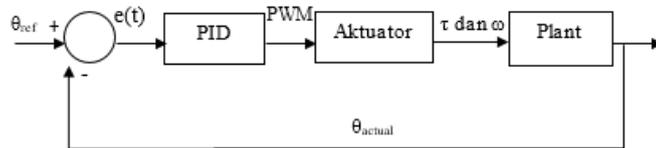
Diagram alir sistem perancangan robot dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 3.3 Diagram alir sistem.

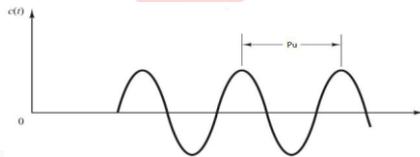
3.6 Perancangan Sistem Kontrol

Sensor yang digunakan adalah GY 521 MPU6050. Data dari sensor digunakan sebagai masukan dengan *set point* (SP) posisi sudut yang telah ditentukan ialah 0° . Selisih nilai *set point* (SP) dengan variabel terukur atau *present value* (PV) dari sensor disebut kesalahan dan nilai kesalahan tersebut akan digunakan sebagai perhitungan pada pengendali PID. Keluaran sistem kendali PID berupa sinyal PWM yang akan diteruskan ke motor DC. Motor DC akan menghasilkan torsi yang akan merotasikan roda kemudian menjadi masukan untuk proses pendulum terbalik. Keluaran dari proses tersebut akan dijadikan umpan balik yang kemudian dideteksi oleh sensor dan dijadikan sebagai *present value* (PV). Hal tersebut akan mengubah respon sistem mengikuti perubahan yang ada pada hasil pengukuran sensor dan acuan sistem yang telah ditentukan sebelumnya.



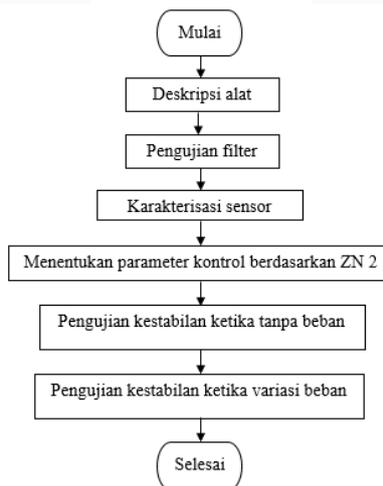
Gambar 3.4 Pengendali PID

Penalaan Ziegler-Nichols 2 cocok digunakan pada sistem yang mengalami osilasi. Pertama yang harus dilakukan untuk menentukan nilai parameter PID adalah dengan memberikan nilai 0 pada parameter K_I dan K_D sementara nilai parameter K_P dinaikkan terus menerus sehingga mendapatkan osilasi yang stabil. Nilai K_P pada osilasi stabil tersebut dinamakan penguatan kritis (K_U). Pada saat kondisi osilasi stabil dan konstan, carilah nilai periode osilasi (P_U) antar puncak gelombang osilasi tersebut [18][16]. Setelah mendapatkan nilai K_U dan P_U , tentukan nilai parameter K_P, K_I , dan K_D berdasarkan Tabel 2.1.



Gambar 3.5 Penalaan Ziegler-Nichols 2.

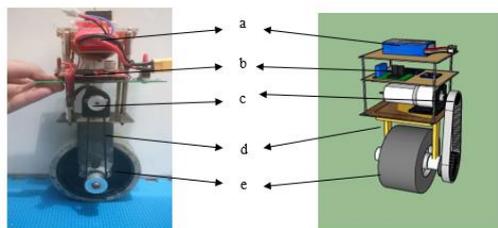
3.7 Alur Pengujian



Gambar 3.6 Alur pengujian sistem.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Deskripsi Alat



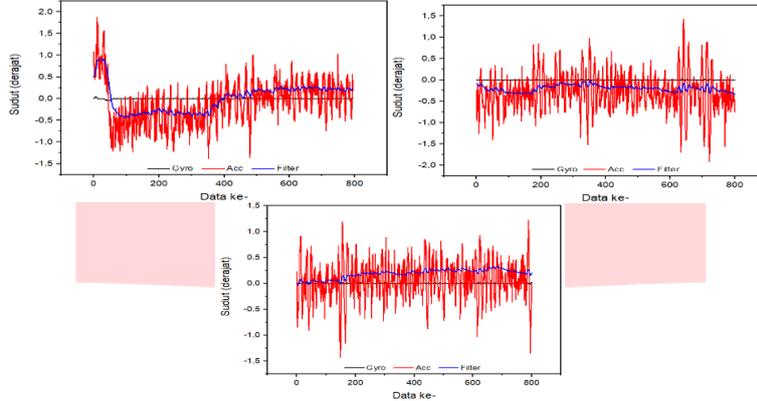
Gambar 4.1 Kerangka robot.

Tabel 4.1 Beberapa komponen penyusun kerangka robot.

Ket.	Nama
a	Baterai
b	Penggerak motor VNH2SP30
c	Timing pulley
d	Penyanggan beban
e	Roda robot

4.2 Pengujian Complementary Filter

Pengujian filter dilakukan untuk melihat pengaruh perubahan koefisien filter terhadap nilai sudut yang dikeluarkan. Pemberian nilai koefisien filter bervariasi, diantaranya 0,97, 0,98 dan 0,99 dengan memberikan waktu sampling sebesar 10 ms.



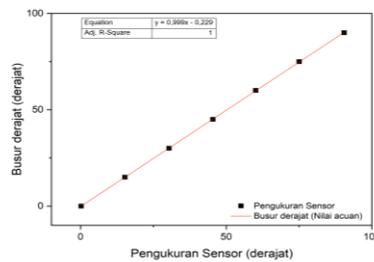
Gambar 4.2 Grafik complementary filter dengan koefisien filter 0,97, 0,98, dan 0,99.

Berdasarkan pada gambar-gambar tersebut dapat terlihat bahwa nilai koefisien filter 0,97 memiliki lebih banyak noise daripada koefisien filter 0,98 dan 0,99. Dan pada gambar-gambar tersebut juga memperlihatkan bahwa nilai koefisien 0,99 cenderung lambat dalam memberikan waktu pembaharuan sinyal daripada koefisien filter 0,98 dan 0,97. Dengan demikian, koefisien filter yang layak digunakan adalah 0,98 pada gambar 4.5.

4.3 Karakteristik Sensor

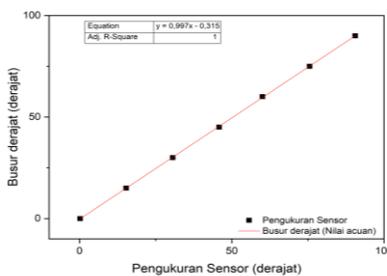
Pengujian kelayakan sensor MPU6050 dilakukan dengan cara mengkalibrasikan sensor dengan busur derajat (nilai acuan) dengan sumbu yang akan diamati adalah sumbu y (*Pitch*).

- Pengukuran pada sumbu y positif



Gambar 4.3 Grafik pengukuran busur derajat dengan sudut pada sumbu y positif

- Pengukuran pada sumbu y negatif



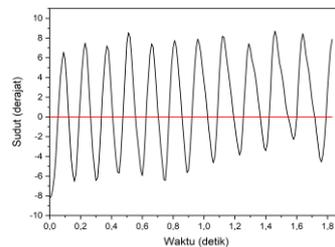
Gambar 4.4 Grafik pengukuran busur derajat dengan sensor pada sumbu y negatif

Gambar 4.3 memperlihatkan grafik karakterisasi sensor MPU6050 pada arah sumbu y positif telah linier dengan korelasi $R^2=1$. Hal ini menunjukkan bahwa sensor tersebut layak digunakan dalam pengukuran sumbu y

positif. Sedangkan pada gambar 4.4 memperlihatkan grafik karakterisasi sensor MPU6050 pada arah sumbu y negative telah linier dengan korelasi $R^2=1$. Hal ini menunjukkan bahwa sensor MPU6050 sudah linier dan layak digunakan pada arah sumbu y negatif.

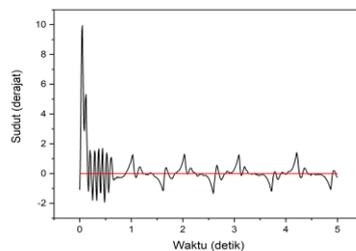
4.4 Pengujian Sistem Kendali

Penentuan nilai parameter kontrol PID dilakukan dengan cara penalaan Ziegler-Nichols metode osilasi. Pertama, dibutuhkan parameter K_P yang besar hingga mendapatkan bentuk sistem yang berosilasi stabil. Ketika system telah mencapai kondisi stabil, parameter K_P dinyatakan sebagai penguatan kritis (K_U). Pemberian nilai K_P yang terlalu besar akan membuat sistem menjadi tidak stabil dan jika pemberian nilai K_P yang terlalu kecil akan memperlambat respon sistem.



Gambar 4.5 Grafik sistem osilasi stabil.

Berdasarkan gambar 4.6, terlihat bahwa sistem telah mencapai osilasi stabil jika diberikan nilai kontrol $K_U=50$ dan $P_U=1,5$ detik. Didapatkanlah $K_P=30$, $K_I=400$, dan $K_D=0,56$.



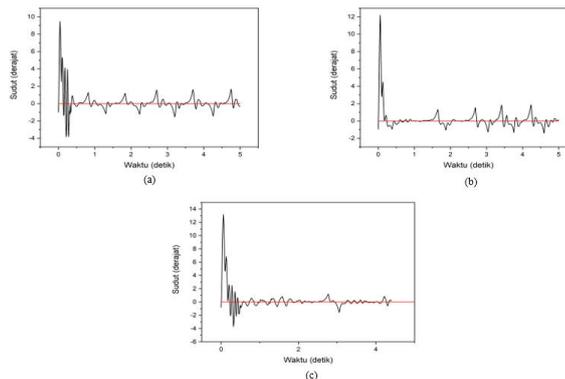
Gambar 4.6 Grafik respon kendali.

Tabel 4.2 Spesifikasi respon ketika tanpa beban.

<i>Rise Time</i>	6,835 ms	<i>Settling Time</i>	0,79 s
<i>Peak Time</i>	0,04 s	<i>Error Steady State</i>	1,6%
<i>Maximum Overshoot</i>	11,04%	Rasio Osilasi	0,994%

Berdasarkan pada gambar 4.8 dan tabel 4.1 terlihat bahwa sistem berosilasi kecil secara terus menerus dengan nilai *maximum overshoot* sebesar 11,04%. Nilai tersebut diakibatkan oleh terlalu tingginya nilai parameter K_I yang didapatkan berdasarkan penalaan Ziegler-Nichols. *Settling time* sangat cepat sekitar 0,79 detik dengan nilai *error steady state* mencapai 1,6% pada sudut $1,41^\circ$ sedangkan *set point* sistem berada pada 0° . Rasio osilasi mencapai 0,994% menandakan bahwa sistem pada kondisi tanpa beban memiliki fluktuasi sinyal yang kecil.

Untuk melihat respon kontrol lebih jauh, diberikanlah variasi beban di salah satu sisi robot sehingga robot tidak mampu lagi mempertahankan kestabilannya. Variasi beban yang diberikan adalah 18 gram, 29 gram dan 33 gram.



Gambar 4.7 Grafik respon kontrol ketika variasi beban: (a) 18 gram, (b) 29 gram, dan (c) 33 gram.

Tabel 4.3 Spesifikasi respon ketika variasi beban.

Spesifikasi respon	Beban (gram)			Spesifikasi respon	Beban (gram)		
	18	29	33		18	29	33
<i>Rise Time</i>	4,047 ms	4,382 ms	5,364 ms	<i>Settling Time</i>	1,09 s	1,21 s	2,42 s
<i>Time Peak</i>	0,04 s	0,05 s	0,06 s	<i>Error Steady State</i>	1,86%	2,07%	1,76%
<i>Maks. Overshoot</i>	11,55%	13,54%	14,64%	Rasio Osilasi	1%	1%	0,998%

Berdasarkan pada gambar 4.7 dan tabel 4.3 menunjukkan perbedaan spesifikasi respon yang terjadi ketika diberikan variasi beban. Pada pembebanan 29 gram adalah beban maksimal yang dapat diberikan kepada robot. Pada beban tersebut memperlihatkan *settling time* sebesar 1,21 detik dengan *error steady state* sekitar 2,067%. Hal tersebut menjelaskan bahwa pada pembebanan tersebut, pergerakan robot masih stabil menjaga keseimbangannya dengan kesalahan maksimal sudut 1,86 tetapi telah memperlihatkan pergerakan dinamis yang tidak terlalu besar sehingga masih berada pada wilayah pengujian robot.

Ketika diberikan pembebanan 33 gram, nilai *maximum overshoot* adalah yang terbesar diantara variasi beban lainnya yaitu sebesar 14,64%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kenaikan *overshoot* seiring semakin besarnya beban yang diberikan. Pada kondisi beban tersebut juga memperlihatkan nilai *settling time* yaitu sekitar 2,42 detik dengan *error steady state* sebesar 1,76% dan rasio osilasi bernilai 0,998%. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada pembebanan tersebut robot cenderung memperlihatkan kesalahan dan fluktuasi sinyal terkecil dan untuk mencapai keadaan tunak membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan kondisi beban-beban lainnya. Robot masih mampu mempertahankan kedudukan disekitar *set point* 0° tetapi telah memperlihatkan pergerakan dinamis yang sangat besar sehingga melewati wilayah pengujian robot..

5 Kesimpulan

Berdasarkan pada penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa robot beroda satu yang dirancang mampu mengontrol keseimbangan menggunakan pengontrolan PID dengan $K_p=30$, $K_i=400$, dan $K_D=0,56$. Robot dapat seimbang ketika tanpa beban maupun diberikan variasi beban. Kondisi tanpa beban merupakan respon stabil dengan *settling time* sekitar 0,79 detik, *error steady state* 1,6% dan rasio osilasi sebesar 0,994%. Kondisi pada 29 gram adalah beban maksimal yang dapat diberikan pada robot dengan *settling time* sekitar 1,21 detik, *error steady state* 2,067% dan rasio osilasi sebesar 1%. Ketika diberikan beban 33 gram, robot memperlihatkan pergerakan dinamis yang sangat besar sehingga melewati wilayah pengujian dengan nilai *settling time* sekitar 2,42 detik, *error steady state* 1,76% dan rasio osilasi sebesar 0,998%.

6 Referensi

- 1 As' Ari, Heru Dibyo Laksono, dan Tati Erlina. "Perancangan Robot *Wall Follower* Dengan Metode Proportional Integral Derivative (PID) Berbasis Mikrokontroler". Universitas Andalas. Padang. 2014.
- 2 Sanjaya, Mada. "Panduan praktis pemrograman ROBOT VISION menggunakan MATLAB dan IDE ARDUINO". Andi. Yogyakarta. 2014.
- 3 Murata Manufacturing Co., Ltd. "muRata innovator in electronic". [Online]. <https://www.murata.com/en-sg/about/mboyngirl/mgirl>
- 4 Segway Simply Moving. [Online]. <http://www.segway.com/>
- 5 M. Anfa'ur Rosyidi, Eko Henfri Binugroho, Ekti Radin Charel S., R. Sanggar Dewanto, and Dadet Pramadihanto. "*Speed and Balancing Control for Unicycle Robot*". Surabaya:IEEE, 2016.
- 6 In-Woo Han, Jae-Won, and Jang-Myung Lee. "*Balancing Control of Unicycle Robot*". Korea: Springer. 2013.
- 7 Ricardo Carona, A. Pedro Aguiar, and Jos'e Gaspar. "*Control Of Unicycle Type Robots*". *Universidade Tecnica de Lisboa*. Portugal. Pp 180-185, 2008.
- 8 Utomo, Hadi Putranto. "*Inverted Pendulum Control System With State And Output Feedback*". Bogor: *Researchgate*. 2009.
- 9 Gang Wang, Sang Yong Lee, Seok Won Kang, and Jang-Myung Lee. "*Balance Control of a Variable Centroid Inverted Pendulum Robot*" *Intelligent Autonomous Systems*, pp. 201-208. 2013.
- 10 Arifin Wahid I., Triyogatama Wahyu W., dan Tri Wahyu S.. "Sistem Kontrol Torsi pada Motor DC". Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta. April 2016.
- 11 Andri Novandri, Roslidar dan Aulia Rahman. "Rancang Bangun *Self Balancing* Berbasis Mikrokontroler ATmega328P Dengan Kendali PID". Universitas Syiah Kuala. Banda Aceh. 2017.
- 12 Halliday, Resnick, and Walker. "Fisika Dasar edisi 7 jilid 1". Jakarta: Erlangga, 2005.
- 13 Thiang and Hendrik Thiehun. "Implementasi kendali logika fuzzy pada pendulum terbalik rotasional". Universitas Kristen Petra. Surabaya. 2000.
- 14 Andra Laksana, Iwan Setiawan, dan Sumardi. "*Balancing Robot* Beroda Dua Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral". Universitas Diponegoro. Semarang.
- 15 Rizka Bimarta, Agfianto Eko Putra, dan Andi Dharmawan. "*Balancing Robot* Menggunakan Metode Kendali Proporsional Integral Derivatif". Universitas Gajah Mada. Yogyakarta. 2015.
- 16 Iwan Setiawan. "Kontrol PID Untuk Proses Industri". Surabaya: PT. Elex Media Komputindo. 2008.
- 17 Raranda, dan Puput Wanarti Rusimamto. "Implementasi Kontroler PID pada *Two Wheels Self Balancing Robot* Berbasis Arduino Uno". Universitas Negeri Surabaya. Surabaya. 2017.