

# Perancangan Model *Balancing Robot* untuk Sarana Transportasi Tenaga Medis

M. Munadi<sup>1</sup>, Mochammad Ariyanto<sup>1</sup>, Royyan Saputra<sup>1</sup>, Joga D. Setiawan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang, Semarang, 50275  
Email korespondensi: munadi@undip.ac.id

---

## Abstrak

Robot telah menjadi peralatan mekanik yang dapat melakukan tugas fisik, baik dengan pengawasan atau menggunakan program yang telah didefinisikan terlebih dulu (kecerdasan buatan). Salah satu jenis robot adalah mobile robot yang memiliki mekanisme penggerak berupa roda (*wheel*) dan atau kaki (*leg*), sehingga dapat berpindah tempat dari suatu tempat ke tempat yang lain. Salah satu jenis mobile robot diantaranya adalah *balancing robot* yang beroda dua dan dapat menyeimbangkan diri terhadap permukaan bumi. Pada penelitian ini, kami akan mencoba merancang model *balancing-robot* yang dalam pengembangan di masa depan dapat digunakan di rumah sakit oleh tenaga medis sebagai sarana transportasi yang ramah lingkungan. Hal ini karena tenaga medis sering sekali harus mobile dalam memantau pasien. Terkait hal tersebut, agar model *balancing robot* dapat seimbang maka digunakan salah satu jenis kontroler Adapun sensor yang digunakan adalah sensor *accelerometer NI myRIO* untuk mendeteksi perubahan sudut, dan sensor *gyroscope* untuk mendeteksi kecepatan sudut. Agar *balancing robot* dapat seimbang digunakan metode kontrol *Proportional-Integral* untuk mengatur kecepatan dan arah putar motor DC. Tuning parameter kontrol *Proporsional-Integral* dilakukan dengan dua metode yaitu metode *Ziegler-Nichols* dan *trial and error*. Hasil tuning dari *Proporsional Integral* yang baik adalah nilai gain  $K_p = 5$  dan  $K_i = 0,001$ .

**Kata kunci:** *balancing robot, proporsional-integral, accelerometer, gyroscope.*

## Abstract

Robots have become mechanical equipment that can perform physical tasks, either by monitoring or using predefined programs (artificial intelligence). One type of robot is a mobile robot that has a driving mechanism in the form of a wheel and leg so that it can move from one place to another. One type of mobile robot includes *balancing a two-wheeled robot* and can balance itself to the surface of the earth. In this study, we will try to design a model of *balancing robots* that in future development can be used in hospitals by medical personnel as an environmentally friendly means of transportation. This is because medical personnel often have to be mobile in monitoring patients. Related to this, so that the model of *balancing robot* can be balanced, one type of controller is used. The sensor used is the *NI myRIO accelerometer sensor* to detect angular changes, and the *gyroscope sensor* to detect angular velocity. In order to balance the model of *balancing robot*, the *Proportional-Integral control method* is used to adjust the speed of the DC direction of the rotating motor. Tuning *Proportional-Integral control parameters* is done by two methods, namely *Ziegler-Nichols method* and *trial and error*. The good tuning from *Proportional Integral* is the gain value  $K_p = 5$  and  $K_i = 0.001$ .

**Keywords:** *balancing robot, proporsional-integral, accelerometer, gyroscope.*

---

## 1. Pendahuluan

Penelitian dan pengembangan tentang robot telah berkembang dengan cepat. Pengembangan robot pada awalnya dimulai tahun 1940-an ketika Argonne National Laboratories di Oak Ridge, Amerika, memperkenalkan sebuah mekanisme robotik yang diberi nama *master-slave manipulator*. Robot tersebut dipakai untuk menangani material radioaktif. Kemudian di tahun 1950-an, *Unimation Incorporated* memperkenalkan produk robot komersial pertama. Selanjutnya, pada pertengahan tahun 1960-an produk robot dipakai dalam kegiatan industri, maka muncul istilah *industrial robot* dan robot manipulator. Dewasa ini definisi robot industri sudah bergeser

karena teknologi *mobile robot* sudah dipakai meluas sejak awal tahun 1980-an. *Mobile robot* telah diaplikasikan di berbagai bidang, seperti eksplorasi, pencarian dan penyelamatan, penanganan material dan pendidikan [1]. Selain itu, *mobile robot* dapat digunakan sebagai robot utilitas, misalnya pada penggunaan robot untuk kebersihan [2], inspeksi [3], dan sarana transportasi di rumah sakit [4].

Bila dibandingkan dengan jenis robot yang lain, misalnya robot berkaki memiliki struktur mekanika dan dinamika yang lebih rumit, sedangkan *mobile robot* lebih sederhana, mudah dirancang dan hemat energi [5]. *Mobile robot* diklasifikasikan menjadi dua berdasarkan lingkungan tempat robot tersebut bekerja

dan alat yang digunakan untuk bergerak. Berdasarkan lingkungan tempat robot tersebut bekerja, *mobile robot* terbagi menjadi empat macam, yaitu robot yang bekerja di atas permukaan tanah (*land robot*), contohnya robot udara atau *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, *Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)*, robot yang bekerja pada lingkungan kutub, dan robot yang bekerja pada kondisi permukaan tanah. Sedangkan berdasarkan alat yang digunakan untuk bergerak, *mobile robot* terbagi menjadi robot berlingan (berkaki-lengan atau kaki yang menyerupai manusia ataupun hewan), dan robot beroda [6].

Salah satu contoh penggunaan *mobile robot* adalah *balancing robot* beroda dua yang dikembangkan oleh beberapa peneliti [7, 8]. *Balancing robot* beroda dua merupakan robot yang mencoba menyeimbangkan dua roda seolah-olah sebagai pendulum terbalik. Pada saat gaya diberikan kepada robot, maka robot menjadi miring. Selanjutnya motor akan memberikan gaya perlawanan yang sesuai sehingga robot tetap dalam keadaan tegak. Tanpa adanya gaya yang sesuai, robot akan jatuh [9]. *Balancing robot* juga telah dikembangkan menjadi salah satu model transportasi yang bernama “*Segway*”. Dimana harganya relatif lebih mahal dibanding sepeda tetapi memiliki kelebihan bentuk yang kecil dan compact.

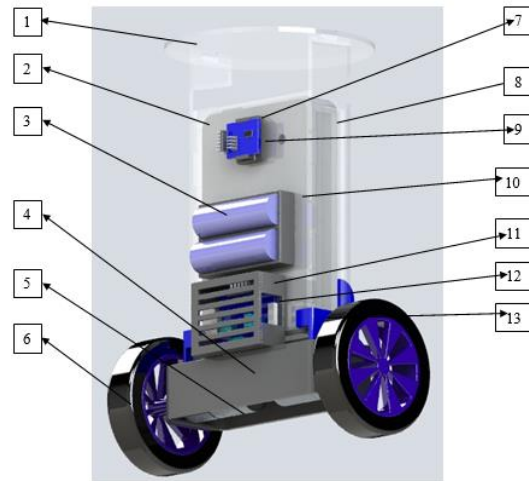
Saat ini pengembangan sarana transportasi yang ramah lingkungan digalakkan. Misalnya sarana transportasi di lingkungan rumah sakit yang biasanya menggunakan sepeda untuk mengurangi rasa kelelahan tenaga medis dalam memeriksa/mengontrol pasien di area rumah sakit yang luas. Akan tetapi, penggunaan sepeda memiliki keterbatasan diantaranya ukuran yang besar sehingga kurang fleksibel khususnya bila tenaga medis harus berjalan dari lantai yang satu ke lantai yang lain. Oleh sebab itu, penelitian ini akan melakukan perancangan model *balancing robot* sebagai tahap awal pengembangan sarana transportasi tenaga medis. Model *balancing robot* ini menggunakan sensor *gyroscope* dan *accelerometer* sebagai inputnya. Dari sinyal yang diperoleh kemudian diproses ke sistem motor DC sebagai aktuator yang diembedded pada mikrokontroler NI myRIO.

**2. Sistem Hardware Model Balancing Robot**

Model *balancing robot* yang dirancang merupakan salah satu konsep pengembangan *two wheel self-balancing mobile robot*. Prinsip kerjanya mirip dengan *segway*, sedangkan perbedaannya terletak pada tujuan fungsionalnya. Untuk mencapai tujuan tersebut, kegiatan penelitian diawali dengan membuat *drawing balancing robot* yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Adapun sistem elektrik model *balancing robot* terdiri dari beberapa komponen elektronika, diantaranya mikrokontroler (NI myRIO), motor DC, sumber daya, motor driver, ubec, dan sensor

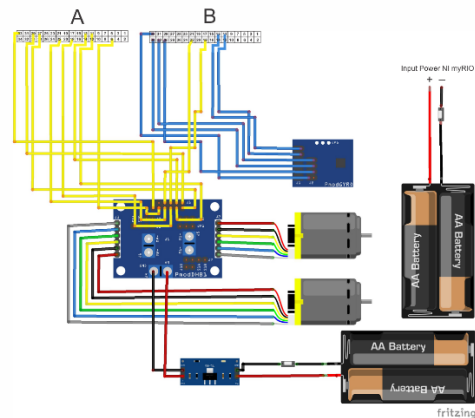
*gyroscope*. Beberapa komponen tersebut disusun membentuk sebuah diagram desain hardware (*wiring*) model *balancing robot* yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan diagram blok sistem model *balancing robot* ditunjukkan pada Gambar 3.



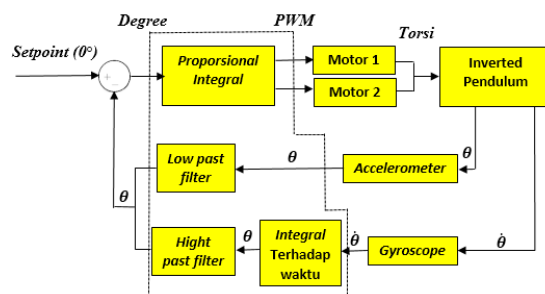
Gambar 1. Desain model *balancing robot*

Keterangan :

- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1. Chassis atas             | 9. Sensor <i>gyroscope</i>  |
| 2. Chassis utama            | 10. Tempat baterai belakang |
| 3. Baterai                  | 11. Dudukan PmodDHBI        |
| 4. Dudukan motor DC         | 12. PmodHBI                 |
| 5. Motor DC                 | 13. Tempat baterai depan    |
| 6. Roda                     |                             |
| 7. Dudukan <i>gyroscope</i> |                             |
| 8. NI myRIO                 |                             |



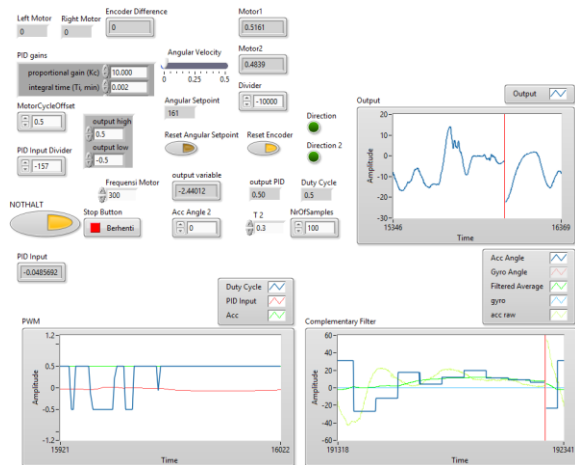
Gambar 2. Diagram wiring model *balancing robot*.



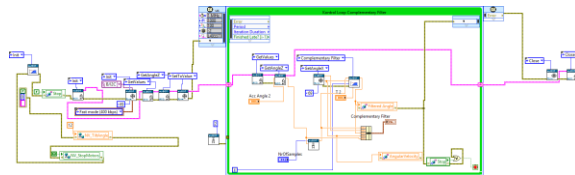
Gambar 3. Diagram blok sistem model *balancing robot*.

### 3. Pemrograman Model *Balancing Robot*

Setelah rangkaian hardware selesai dibuat, dilakukanlah pemrograman menggunakan software LabVIEW 2015 for NI myRIO. Software LabVIEW berfungsi sebagai *human machine interface* (HMI). Program yang dibuat ditunjukkan pada Gambar 4-8. Gambar 4 menunjukkan *front panel* model *balancing robot* dimana jalannya program dimulai dari masuknya sinyal input berupa tegangan. Disini terdapat empat sinyal input yang masing-masing didiskripsikan sebagai *angle filter*, *accelerometer*, *gyroscope* dan *encoder*, dimana masing-masing masuk pada pin *analog Input*.



Gambar 4. Front panel model balancing robot.

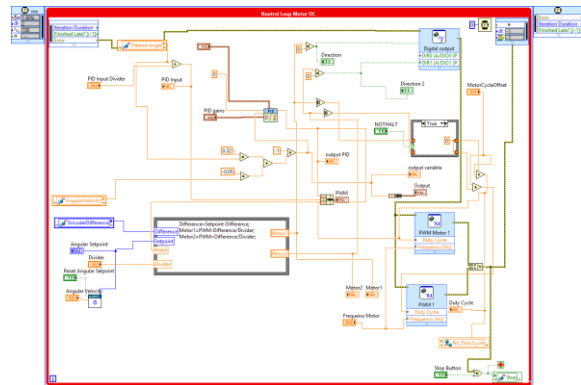


Gambar 5. Diagram blok *complementary filter* sensor *accelerometer* dengan sensor *gyroscope*.

Gambar 5 menunjukkan pemrograman untuk *time loop complementary filter* sensor *accelerometer* dengan sensor *gyroscope* yang digunakan untuk pembacaan sensor *accelerometer* dan *gyroscope*. Pembacaan awal yaitu input dari *angle filter*, *accelerometer* dan *gyroscope*. Adapun analog input sensor *gyroscope* terdapat pada pin I2C port B Ni myRIO. Sensor *accelerometer* membaca sudut pada sumbu Z dan sensor *gyroscope* membaca sudut pada sumbu X. *Complementary filter* dibaca pada ikon *angel filter*. Pada ikon *angel filter* dapat menentukan nilai *alpha* dan *filtered angel*. Pada gambar tersebut, ditunjukkan *shared variable* yang berfungsi sebagai transfer dari *while loop A* ke *while loop B* yaitu *filtered angle* dan *angular velocity* (sumbu X *gyroscope*).

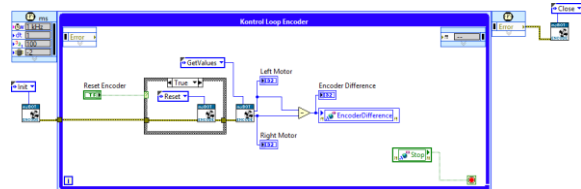
Gambar 7 menunjukkan *time loop* kontrol PWM motor DC. Blok diagram membaca keluaran dari motor DC yang digunakan pada *balancing robot*.

Digital output pada *time loop* ini berfungsi sebagai pengendali arah putaran motor DC.



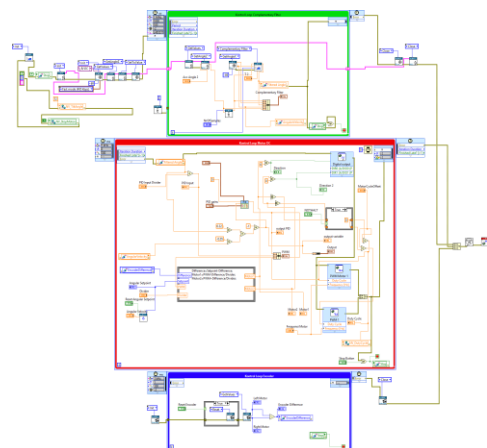
Gambar 6. Diagram blok kontrol PWM motor DC.

PWM output pada *time loop* ini memiliki 2 PWM *output*, dikarenakan ada 2 motor DC yang digerakkan. Adapun kontrol PID pada *balancing robot* terdapat di diagram blok ini.



Gambar 7. Diagram blok encoder.

Pada NI myRIO, disetiap port A, B, dan C terdapat satu input yang dapat digunakan sebagai *input* encoder. Adapun input yang digunakan pada port A dan port B. *Time loop* encoder memiliki ikon *shared variable* yang berfungsi untuk mentransfer data ke *time loop* kontrol PWM motor DC berupa *encoder diference*. Selanjutnya, secara keseluruhan diagram blok model *balancing robot* ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram blok model *balancing robot*.

### 4. Hasil dan Pembahasan

Sistem kontrol model *balancing robot* menggunakan sistem kontrol PID. Sistem kontrol PID merupakan

kontroler yang dapat membantu menentukan tingkat kepresisian suatu sistem instrumentasi dalam mencapai tujuan dengan karakteristik adanya umpan balik (feedback) pada sistem tersebut [10, 11]. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol *Proportional* (P), *Derivative* (D), dan *Integral* (I). Dalam perancangan sistem kontroler PID yang perlu dilakukan adalah mengatur gain kontroler ( $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ ) agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan. Selanjutnya, pengujian model *balancing robot* dilakukan pada dua perangkat robot, yaitu perangkat keras meliputi pengujian sensor *accelerometer* dan *gyroscope*, serta perangkat lunak yang meliputi pengujian algoritma *complementary filter* dan *tuning gain* PID.

**Perangkat Keras**

Pada board NI myRIO, terdapat beberapa peripheral yang umum dapat digunakan. Diantaranya adalah sensor *accelerometer*. Sensor *accelerometer* pada NI myRIO memerlukan kalibrasi agar mendapatkan hasil *auto zero*. Pengujian sensor *accelerometer* dilakukan dengan cara membandingkan keluarannya yang berupa sudut kemiringan terhadap busur derajat. Sumbu yang digunakan pada percobaan ini adalah sumbu Z. Hal ini karena penempatan NI myRIO pada posisi berdiri. Untuk mendapatkan nilai sumbu Z, maka dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (1). Adapun kemampuan sensor *accelerometer* dalam membaca sudut kemiringan mempunyai jangkauan kerja sebesar  $45^\circ$  dan  $-45^\circ$ . Dikarenakan *balancing robot* membutuhkan pembacaan sudut kemiringan sekitar  $20^\circ$  sampai  $-20^\circ$ , maka pengujian sudut kemiringan sensor *accelerometer* dilakukan pada jangkauan  $-90^\circ$  sampai  $90^\circ$  dengan kelipatan 10. Data hasil pengukuran yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 1.

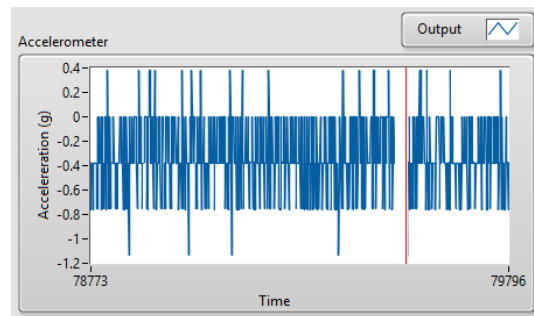
$$\text{Sumbu Z} = \left( \frac{180}{\pi} \times \arctan 2(y, z) + \pi \right) - \frac{270}{90} \times 157 - \text{offset} \quad (1)$$

dimana sumbu Z adalah nilai keluaran dari sumbu z, untuk *offset* yang dimaksud adalah nilai *offset* sensor, dan y serta z menunjukkan sumbu y dan z.

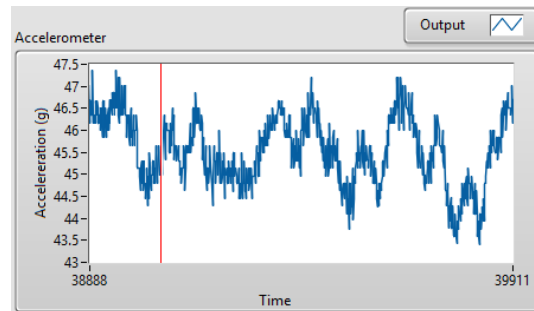
Berdasarkan Tabel 1 diperoleh data bahwa sensor *accelerometer* pada NI myRIO masih terdapat kesalahan (error). Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya adalah proses pengukuran dari busur dan *accelerometer* yang kurang tepat, pembulatan dalam pemrograman, dan *noise* yang dihasilkan oleh sensor *accelerometer* itu sendiri. Beberapa nilai sudut kemiringan yang dideteksi oleh sensor *accelerometer* ditampilkan dalam bentuk grafik dengan waktu tunggu 10 ms. Adapun sudut kemiringan yang ditampilkan pada grafik bernilai  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $-45^\circ$ . Grafik pengujian sudut sensor *accelerometer* ditunjukkan pada Gambar 9.

**Tabel 1.** Hasil pengukuran kemiringan sudut sensor *accelerometer*.

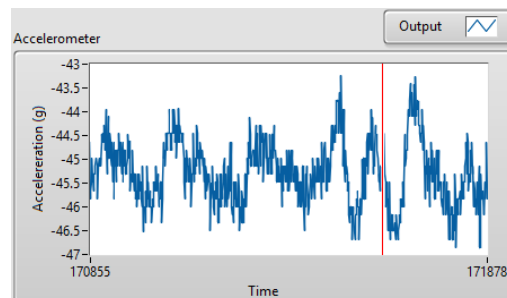
No.	Busur Derajat	Sudut Sensor <i>Accelerometer</i>
1	$-90^\circ$	$-152.7^\circ$
2	$-80^\circ$	$-117.4^\circ$
3	$-70^\circ$	$-97.6^\circ$
4	$-60^\circ$	$-66.5^\circ$
5	$-50^\circ$	$-53.6^\circ$
6	$-40^\circ$	$-46.5^\circ$
7	$-30^\circ$	$-32.4^\circ$
8	$-20^\circ$	$-12.2^\circ$
9	$-10^\circ$	$-9.4^\circ$
10	$0^\circ$	$0.8^\circ$
11	$10^\circ$	$11.2^\circ$
12	$20^\circ$	$21.3^\circ$
13	$30^\circ$	$36.2^\circ$
14	$40^\circ$	$44.1^\circ$
15	$50^\circ$	$53.5^\circ$
16	$60^\circ$	$64.2^\circ$
17	$70^\circ$	$97.2^\circ$
18	$80^\circ$	$121.6^\circ$
19	$90^\circ$	$142.5^\circ$



(a)



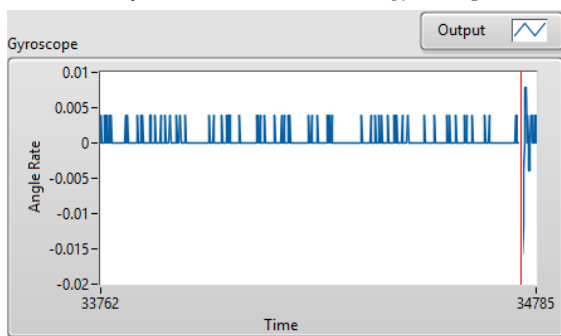
(b)



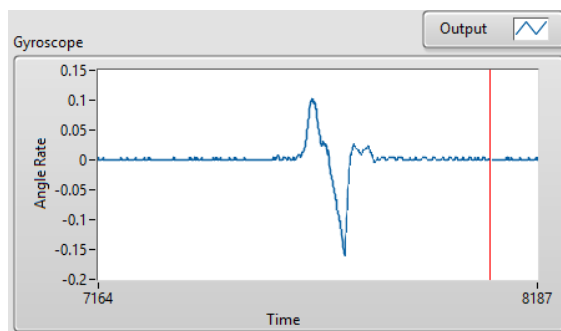
(c)

**Gambar 9.** Grafik sensor *accelerometer* mendeteksi sudut kemiringan (a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $-45^\circ$

Pengujian dilakukan menggunakan sensor *gyroscope* untuk melihat kecepatan sudut yang dideskripsikan dalam bentuk grafik. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 10 dimana menggunakan waktu tunggu 100 ms. Sumbu yang digunakan pada sensor *gyroscope* yaitu pada sumbu X. Hal ini dikarenakan sensor *gyroscope* yang dipasang pada *balancing robot* ditempatkan pada sumbu X. Gambar 10 (a) menunjukkan grafik *angle rate* sensor *gyroscope* dalam keadaan diam atau tidak melakukan rotasi, sehingga kecepatan rotasi pada sensor *gyroscope* adalah 0. Akan tetapi, sinyal yang dihasilkan mempunyai nilai yang berubah-ubah, seharusnya jika sensor *gyroscope* dalam keadaan diam, keluarannya akan sama dengan nilai *offset*-nya. Hal ini dikarenakan sensor *gyroscope* mempunyai nilai bias. Gambar 10 (b) menunjukkan grafik *angle rate* sensor *gyroscope* ketika diberi rotasi. Pada saat grafik menurun menunjukkan bahwa sensor *gyroscope* berotasi searah jarum jam yang ditandai dengan mengecilnya nilai keluaran sensor *gyroscope*. Sedangkan pada saat grafik menaik menunjukkan bahwa sensor *gyroscope* berotasi berlawanan arah jarum jam yang ditandai dengan membesarnya nilai keluaran sensor *gyroscope*.



(a)



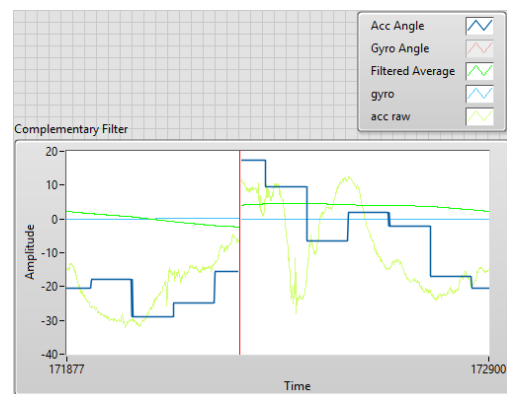
(b)

**Gambar 10.** *Angle rate* sensor *gyroscope* ketika (a) Diam, (b) Berotasi

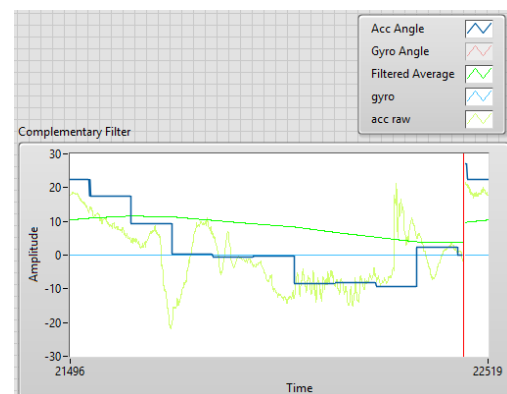
### Perangkat Lunak

Selanjutnya pengujian terhadap algoritma *complementary filter* dilakukan. Pengujian ini bertujuan untuk melihat respon keluaran sudut kemiringan *accelerometer*, kecepatan sudut *gyroscope* dan hasil penggabungan (*fusion*) kedua sensor tersebut. Berdasarkan pengujian *complementary filter*, maka penentuan nilai *time constant* ( $\tau$ ) dengan beberapa variasi dan pengaruh penentuan koefisien filter dilakukan. Penentuan nilai

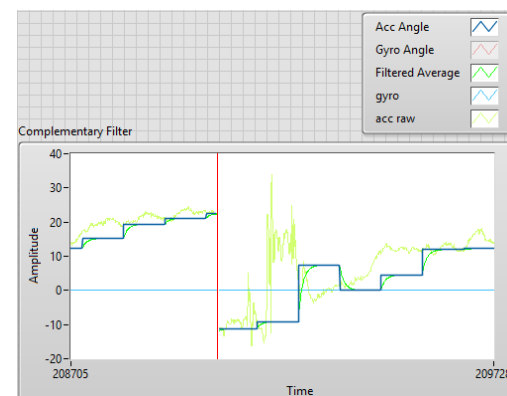
*time constant* ( $\tau$ ) pada koefisien filter dilakukan dengan menggunakan waktu sampling ( $dt$ ) sebesar 10 ms. Pada saat berotasi, beberapa variasi nilai *time constant* yang akan dilakukan saat pengujian adalah 5; 1; 0,3; dan 0,01. Beberapa grafik yang menunjukkan adanya variasi *time constant* pada saat model *balancing robot* berotasi ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan grafik tersebut, diperoleh hasil nilai koefisien filter 0,997 pada *time constant* ( $\tau$ ) 0,3 detik. Sinyal keluaran *complementary filter* ini memiliki hasil yang stabil dibandingkan dengan *complementary filter* sebelumnya. Oleh sebab itu, maka nilai *time constant* yang digunakan untuk aplikasi *balancing robot* adalah 0,3 detik.



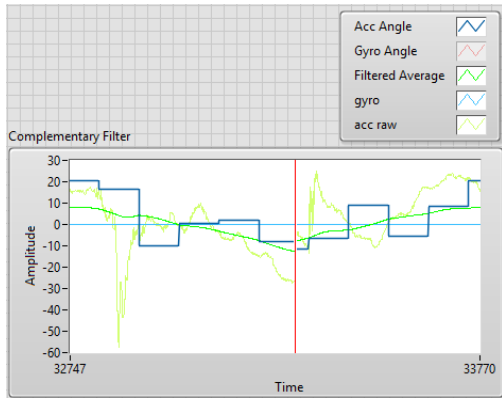
(a)



(b)



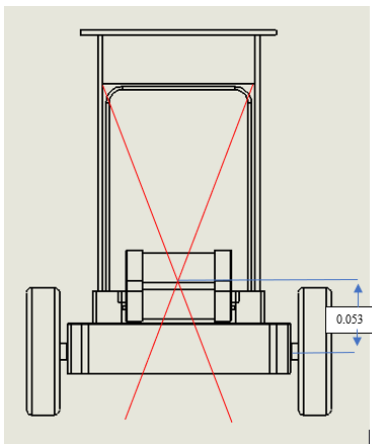
(c)



(d)

**Gambar 11.** Pengujian *time constant* ( $\tau$ ) untuk (a) 5; (b) 1; (c) 0,01; dan (d) 0,3

Tahap berikutnya adalah pengujian *tunning gain* PID pada model *balancing robot* yang dilakukan dengan dua metode, yaitu metode *Ziegler-Nichols* dan *trial and error*. Pada penelitian ini, model *balancing robot* didekati berdasarkan *inverted pendulum* [12]. Adapun hasil parameter CoG model *balancing robot* ditunjukkan pada Gambar 12 dan Tabel 2.



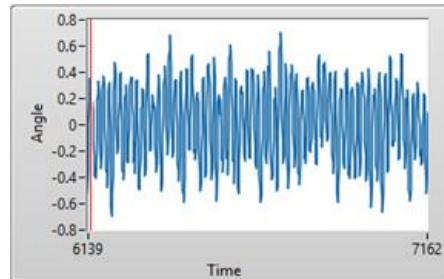
**Gambar 12.** CoG balancing robot

**Tabel 2.** Parameter pengujian CoG

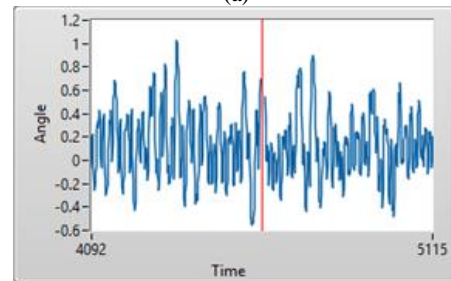
Parameter	Simbol	Nilai
Massa <i>Balancing robot</i>	m	0,739 kg
Panjang <i>Balancing robot</i>	l	0,053 m
Gaya Gesekan	b	0,1 N/m/s
Konstanta Gravitasi	g	9,81
Momen Inersia Robot	I	0,00069 kgm <sup>2</sup>

Pada sistem kontrol PID, berdasarkan metode *Ziegler-Nichols*, diperoleh nilai  $K_u = 100$  dan  $T_u = 0,19$ , sehingga didapat gain *proportional integral* yaitu  $K_p = 45$  dan  $K_i = 59,94$ . Berdasarkan pengujian nilai gain tersebut, model *balancing robot* sering beresilasi. Oleh sebab itu, nilai gain ini tidak dipilih untuk diaplikasikan pada kontroler yang digunakan. Adapun pengujian menggunakan metode *trial and error* dilakukan dengan mengubah nilai konstanta  $K_p$  dan  $T_i$ , kemudian melihat respon sistem model *balancing robot* atas sudut kemiringan yang ditampilkan. Pengujian konstanta  $K_p$  menggunakan tiga buah nilai

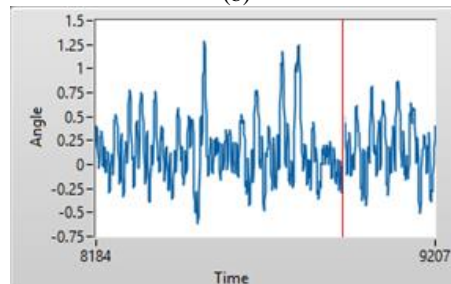
yaitu 5; 10; dan 15. Sedangkan nilai konstanta  $T_i$  menggunakan dua buah nilai 0,001 dan 0,002. Hasil pengujian metode ini ditunjukkan pada Gambar 13. Berdasarkan perbandingan grafik respon sistem pada model *balancing robot* atas nilai konstanta  $K_p$  dan  $T_i$  dengan menggunakan pengamatan visual, maka respon sistem yang terbaik ditunjukkan pada Gambar 13 (a) dengan nilai gain  $K_p = 5$  dan  $T_i = 0,001$ .



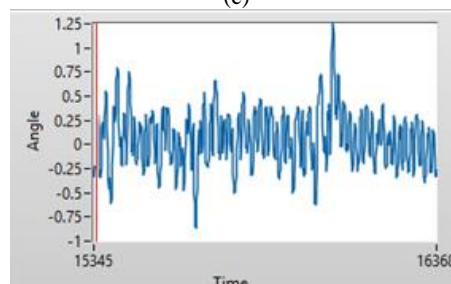
(a)



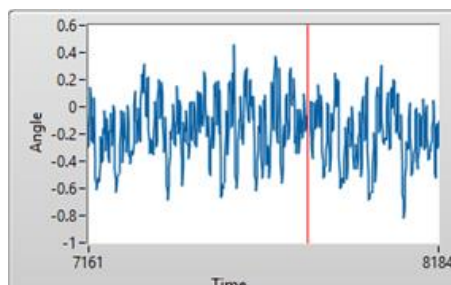
(b)



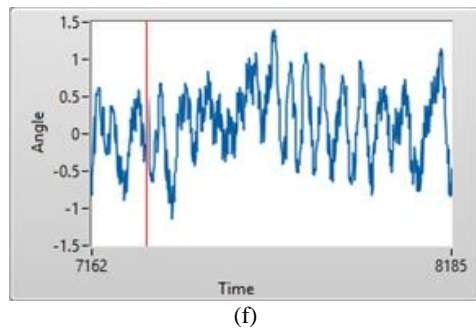
(c)



(d)



(e)



(f)  
**Gambar 13.** Respon sistem pada balancing robot untuk nilai gain (a)  $K_p = 5$  dan  $T_i = 0,001$ ; (b)  $K_p = 10$  dan  $T_i = 0,001$ ; (c)  $K_p = 15$  dan  $T_i = 0,001$ ; (d)  $K_p = 5$  dan  $T_i = 0,002$ ; (e)  $K_p = 10$  dan  $T_i = 0,002$ ; (f)  $K_p = 15$  dan  $T_i = 0,002$ .

## 5. Kesimpulan

Artikel ini menyampaikan hasil penelitian tentang model *balancing robot* yang kedepannya akan dikembangkan sebagai model alat transportasi ramah lingkungan untuk tenaga medis di lingkungan rumah sakit. Berdasarkan *conceptual design*, model *balancing robot* didesain dengan konfigurasi dasar menggunakan dua roda, posisi mikrokontroler tegak, dan beban yang dibawa oleh model *balancing robot* diletakkan di bagian atas. Berdasarkan pemrograman menggunakan LabVIEW 2015, diagram blok model *balancing robot* telah dibuat. Untuk kontrol loop *complementary filter* diperoleh nilai *time constant* ( $\tau$ ) = 0,3 dan nilai *koefision filter* sebesar 0,997. Adapun model *balancing robot* menggunakan dua buah motor DC yang dikontrol menggunakan kontrol PI. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode *Ziegler-Nichols* dan *trial and error*, maka didapatkan nilai gain kontrol PI yang optimal adalah  $K_p = 5$  dan  $K_i = 0,001$ .

## Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didukung dengan dana dari Fakultas Teknik Universitas Diponegoro melalui hibah Penelitian Dasar Tahun 2018.

## Daftar Pustaka

- [1] fRonald Ping M.C., Karl A. Stol, C. Roger Halkyard. 2013, "Review of modelling and control of two-wheeled robots." *Annual Reviews in Control, Elsevier*, Vol. 37 (1), 89-103.
- [2] Palacin J., PallejaT., Valganon I., Pernia R., Roca J. 2005, "Measuring coverage performances of a floor cleaning mobile robot using a vision system." In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4236-4241.
- [3] Seung-Nam Y., Jae-Ho J., Chang-Soo H. 2007, "Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel." *Automation in Construction, Elsevier*, Vol. 16 (3), 255-261.
- [4] Evans J.M. 1998, "HelpMate: anautonomous mobile robot courier for hospital." in: Proceedings of IROS'98, 1695-1700.

- [5] Krzystof J. Kalinski, Michal Mazur. 2016, "Optimal control of 2-wheeled mobile robot at energy performance index." *Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier*, Vol. 70-71, 373-386.
- [6] Tengku M., Darlis H., Abdul M. 2017, "Remote control komunikasi robot berbasis pergerakan tangan pada smartphone menggunakan metode logika fuzzy." *Jurnal Inspirasi*, Vol. 7, 52-59.
- [7] Sangtae K., Jungmin S., SangJoo K. 2011, Development of a two-wheeled mobile tilting and balancing (MTB) robot. *Proc of 2011 11<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1-6.
- [8] Xiaogang R., Jing C., 2010. On-line NNAC for a balancing two-wheeled robot using feedback-error-learning on the Neurophysiological mechanism. *Journal of Computers*, Vol 6 (3), 489-496.
- [9] C. Gonzalez, I. Alvarado, D. Munoz L.P. 2017, "Low cost two-wheels self balancing robot for control education." *IFAC-PapersOnLine, Elsevier*, Vol. 50 (1), 9174-9179.
- [10] Shandy H.T, Rusdhianto E, M. Rameli. 2012, Perancangan dan implementasi kontroler PID untuk pengendalian tegangan pada generator set." *Jurnal Teknik ITS*, Vol. 1, 2301-9271.
- [11] Ahmad N. K. N., Mohd. A. A., Riduwan G., Nasrul S. P. 2011, Performance comparison between fuzzy logic controller (FLC) and PID controller for a highly nonlinear two-wheels balancing robot. *Proc. of First international conference on informatics and computational intelligence (ICI)*, 176-181.
- [12] Y. Kim, S.H. Kim, Y.K. Kwak. 2006, Improving driving ability for a two-wheeled inverted-pendulum-type autonomous vehicle. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 165-175.