

Skema Kendali *Ball-Balancing Robot* Secara Nirkabel

Gunawan Dewantoro¹, Franciscus Dalu Setiaji², Edwin C. Mone³

Abstract—The control system and algorithm of robot keeps developing vigorously nowadays, including that of balancing robot which is an unstable system. And one of those robots is ball-balancing robot which has two degree of freedoms and is the advanced development of the universal two-wheel robots. However, these robots have not taken navigation control into account. These research aims to implement ball-balancing robot with wireless navigation control. The ball-balancing robot is a module which its equilibrium is controlled such that it tends to 0° for both θ as well as ψ angles, using two PID controllers. In addition, PID based speed control of the DC motors are also required. The inclination angle data are acquired by accelerometer and gyroscope simultaneously. The data processing and robot control are processed by ATmega2560 microcontroller. The system testing includes the accuracy of sensors data processing, PID control system, and the motion control of the robot. This control system has been realized but in general still has drawbacks. This robot is still sluggish to respond the changes of set points. This system only moves freely with disturbances up to 7° . This arises from the mechanical design limitation.

Intisari— Sistem kendali dan algoritma pengendalian robot terus mengalami perkembangan dewasa ini, salah satunya adalah pengendalian keseimbangan *balancing robot* di mana sistem ini bersifat tidak stabil. Salah satu *balancing robot* yang mulai dikembangkan akhir-akhir ini adalah *ball-balancing robot* yang memiliki dua derajat kebebasan dan merupakan pengembangan dari *two wheel robot* umumnya. Namun robot yang sedang berkembang ini tidak memberikan pengendalian gerakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan *ball-balancing robot* yang dapat dikendalikan gerakannya secara nirkabel. Modul *ball-balancing robot* adalah modul utama di mana robot dikendalikan keseimbangannya pada titik 0° baik untuk kemiringan sudut θ maupun ψ , dengan menggunakan dua buah sistem kendali PID. Selain itu, sistem kendali PID untuk pengendalian kecepatan motor DC juga diperlukan. Inputan data kemiringan sudut menggunakan sensor akselerometer dan sensor giroskop. Pengolahan data dan pengendalian robot diproses oleh sebuah mikrokontroler Atmega2560. Pengujian sistem meliputi pengujian keakuratan pengolahan data-data sensor yang digunakan terutama sensor kemiringan sudut, sistem kendali PID dan pengendalian gerak robot. Sistem kendali ini sudah direalisasikan namun sistem secara umum masih memiliki kelemahan di mana sistem kendali ini tidak cukup cepat untuk merespon perubahan *setpoint* yang diberikan. Sistem hanya dapat bergerak bebas dengan sudut gangguan maksimal 7° . Hal ini disebabkan karena keterbatasan desain mekanik sistem.

Kata Kunci— *Ball-balancing robot*, PID, akselerometer, giroskop, complementary filter.

^{1,2,3} Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer, Universitas Kristen Satya Wacana, Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga 50711, INDONESIA (telp: 0298-312 212; fax: 0298-321212; e-mail: ¹gunawan.dewantoro@staff.uksw.edu; ²fdsetiaji@yahoo.com ; ³edwin.constantin@gmail.com)

I. PENDAHULUAN

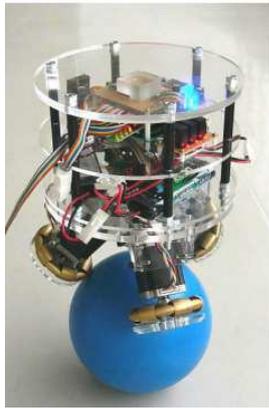
Ball-balancing robot adalah robot yang didesain untuk dapat mempertahankan keseimbangan pada roda bulat atau bola (*spherical wheel*). Seperti *two wheel balancing robot*, *ball-balancing robot* adalah sistem yang tidak stabil, sehingga dibutuhkan sistem kendali untuk mempertahankan posisi robot tegak lurus dengan permukaan tanah. Secara teori, salah satu kelebihan robot ini adalah kemampuannya untuk bergerak ke segala arah pada bidang datar dua dimensi (sumbu x dan y) tanpa perlu mengubah orientasi arah hadap atau berbelok.

Salah satu penelitian dan perancangan yang mempopulerkan *ball-balancing robot* adalah *BallBot* yang direalisasikan pada tahun 2006 oleh Prof. Ralph L. Hollis dkk [1] seperti yang ditunjukkan Gbr. 1 (kiri). Gbr. 1 (kanan) menunjukkan salah satu rancangan *ball-balancing robot* dari bidang non-akademis yakni *Ball Balancer* yang dirancang oleh Dale A. Heatherington [2]. Penelitian lain dilakukan oleh Masaaki Kumagai dan Takaya Ochiai yang merancang *BallIP* [3] seperti ditunjukkan Gbr. 2. Namun, pengendalian arah gerak dari *Ball Balancer* masih memiliki kelemahan, di mana robot sulit untuk mempertahankan arah gerakannya.

BallBot maupun *BallIP* tidak memberikan pengendalian gerakan secara manual dengan menggunakan *remote control*. Oleh karena itu, penelitian ini merancang suatu sistem *ball-balancing robot* di mana pengendalian posisi sudutnya menggunakan kontroler PID, yang dilengkapi dengan modul kendali jarak jauh untuk mengendalikan arah gerakannya pada bidang datar dua dimensi (sumbu x dan y). Bab I menjelaskan *state of the art* dan motivasi penelitian. Bab II menjelaskan dasar teori yang mendasari penelitian ini. Bab III mencakup perancangan hardware dan software. Bab IV memberikan hasil pengujian dan analisisnya. Bab V berisi kesimpulan dan saran pengembangan penelitian.



Gbr. 1 Kiri, *Ball Bot*. Kanan, *Ball Balancer*



Gbr. 2 BallIP

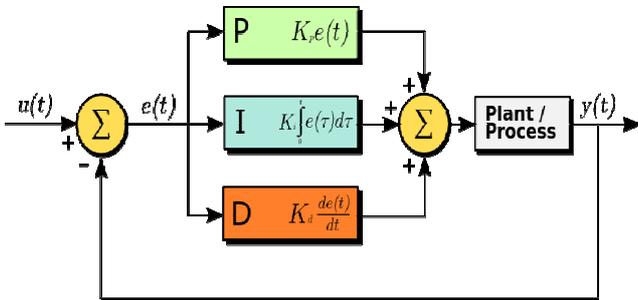
II. SKEMA KENDALI BALL-BALANCING

Untuk mengendalikan kemiringan sudut dari *ball-balancing robot*, maka digunakan sistem kendali PID. Sistem kendali PID akan melakukan kalkulasi, sehingga idealnya nilai output proses bernilai sama dengan setpoint (*error* = 0).

Sistem kendali PID sendiri memiliki bermacam-macam struktur. Struktur sistem kendali PID yang umum digunakan adalah PID ideal atau PID tipe A. Pada sistem digunakan sistem kendali PID tipe A bentuk independent. Persamaannya sebagai berikut [4]:

$$c_o(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Bentuk blok diagram sistem kendali PID bentuk *independent* ditunjukkan pada Gbr. 3 [5]:



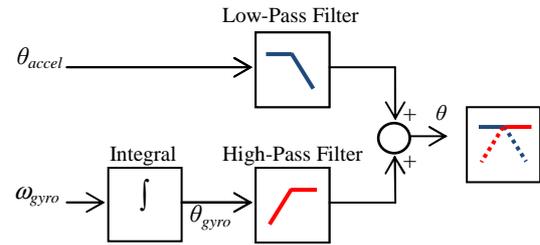
Gbr. 3. Bagan sistem kendali PID

Di mana:

- $c_o(t)$: output sistem kendali PID
- $e(t)$: *error*
- $u(t)$: *setpoint*
- $y(t)$: output sistem kendali (variabel proses)
- K_p : *gain* proposional
- K_i : *gain* integral
- K_D : *gain* derivatif
- T_I : *time* integral

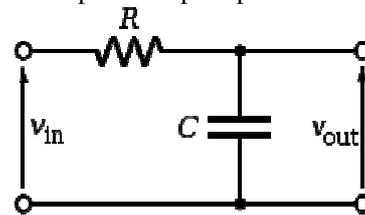
Complementary filter digunakan untuk menggabungkan output kemiringan sudut yang dihasilkan akselerometer dan output kemiringan sudut yang dihasilkan giroskop. Prinsip kerjanya adalah data kemiringan sudut akselerometer

dilewatkan ke *lowpass filter* orde 1 sementara data kemiringan sudut giroskop dilewatkan ke *highpass filter* orde 1, kemudian data ini digabungkan.. Blok diagram dari *complementary filter* ditunjukkan pada Gbr. 4 berikut ini [6]:



Gbr. 4. Blok diagram *complementary filter*

Low pass filter dapat diimplemetasikan dengan rangkaian resistor kapasitor seperti pada Gbr. 5 berikut:



Gbr. 5. Rangkaian *low pass filter*

Berdasarkan hukum Kirchoff dan kapasitansi kapasitor didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{in}(t) - V_{out}(t) = R i(t) \quad (2)$$

$$Q_c(t) = C V_{out}(t) \quad (3)$$

$$i(t) = \frac{dQ_c(t)}{dt} \quad (4)$$

$$i(t) = \frac{C dV_{out}(t)}{dt} \quad (5)$$

Persamaan (5) sendiri dapat disubstitusi ke dalam persamaan (2) lebih lanjut sehingga:

$$V_{in}(t) - V_{out}(t) = R C \frac{dV_{out}(t)}{dt} \quad (6)$$

Persamaan di atas dapat didiskretisasi. Untuk mempermudah, diasumsikan input dan output disampel pada selang waktu yang sama yaitu Δt . Input V_{in} direpresentasikan dengan persamaan sekuensial (x_1, x_2, \dots, x_i) dan output V_{out} dengan (y_1, y_2, \dots, y_i). Substitusi penyederhanaan ini pada persamaan (6) sehingga:

$$x_i - y_i = R C \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$y_i = \left(\frac{R C}{\Delta t + R C} \right) y_{i-1} + \left(\frac{\Delta t}{\Delta t + R C} \right) x_i \quad (8)$$

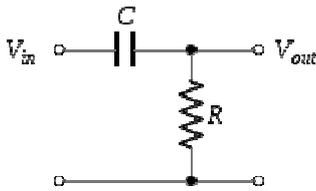
Persamaan (8) di atas adalah persamaan diskretisasi *low pass filter*. Lebih lanjut lagi jika dimisalkan:

$$\alpha = \frac{RC}{\Delta t + RC} \quad (9)$$

Maka persamaan (8) dapat disederhanakan menjadi [7]:

$$y_i = (\alpha) y_{i-1} + (1 - \alpha) x_i \quad (10)$$

Seperti pada *lowpass filter*, *highpass filter* dapat diimplementasikan dengan rangkaian resistor kapasitor seperti pada Gbr. 6 berikut:



Gbr. 6. Rangkaian *high pass filter*

Berdasarkan hukum Kirchoff didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$V_{out}(t) = R i(t) \quad (11)$$

$$Q_c(t) = C (V_{in}(t) - V_{out}(t)) \quad (12)$$

Melalui substitusi persamaan (12) ke dalam persamaan (5) didapatkan persamaan (13) sebagai berikut:

$$I(t) = C \left(\frac{dV_{in}(t)}{dt} - \frac{dV_{out}(t)}{dt} \right) \quad (13)$$

Persamaan (13) sendiri dapat disubstitusi ke dalam persamaan (11) sehingga:

$$V_{out}(t) = RC \left(\frac{dV_{in}(t)}{dt} - \frac{dV_{out}(t)}{dt} \right) \quad (14)$$

Seperti pada diskretisasi *low pass filter*, diasumsikan input dan output dicuplik pada selang waktu yang sama yaitu Δt . Input V_{in} direpresentasikan dengan persamaan sekuensial (x_1, x_2, \dots, x_i) dan output V_{out} dengan (y_1, y_2, \dots, y_i). Substitusi penyederhanaan ini pada persamaan (14) sehingga:

$$y_i = RC \left(\frac{x_i - x_{i-1}}{\Delta t} - \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (15)$$

$$y_i = \left(\frac{RC}{\Delta t + RC} \right) y_{i-1} + \left(\frac{RC}{\Delta t + RC} \right) (x_i - x_{i-1}) \quad (16)$$

Persamaan (16) di atas adalah persamaan diskretisasi *high pass filter*. Seperti pada persamaan diskretisasi *low pass filter*, didapatkan:

$$\alpha = \frac{RC}{\Delta t + RC} \quad (17)$$

Sehingga persamaan (16) dapat disederhanakan menjadi [8]:

$$y_i = (\alpha) y_{i-1} + (\alpha) (x_i - x_{i-1}) \quad (18)$$

Dimisalkan data kemiringan sudut akselerometer ada dua, yaitu θ_a dan ψ_a , sementara data kemiringan sudut giroskop dimisalkan θ_g dan ψ_g . Output adalah kemiringan sudut θ dan ψ . Jika ditinjau pada output kemiringan sudut θ , maka persamaan (10) dapat dirubah menjadi persamaan berikut:

$$\theta_i = (\alpha) \theta_{i-1} + (1 - \alpha) \theta_{a,i} \quad (19)$$

Sementara persamaan (18) dapat dirubah menjadi:

$$\theta_i = (\alpha) \theta_{i-1} + (\alpha) (\theta_{g,i} - \theta_{g,i-1}) \quad (20)$$

Sementara diketahui kecepatan sudut pada sumbu y (ω_y):

$$\omega_y = \frac{d(\theta_g)}{dt} \quad (21)$$

$$\omega_y = \frac{\theta_{g,i} - \theta_{g,i-1}}{\Delta t} \quad (22)$$

Sehingga persamaan (20) menjadi:

$$\theta_i = (\alpha) \theta_{i-1} + (\alpha) \omega_y \Delta t \quad (23)$$

Maka persamaan *complementary filter* untuk kemiringan sudut θ adalah [6]:

$$\theta_i = (\alpha) (\theta_{i-1} + \omega_y \Delta t) + (1 - \alpha) \theta_{a,i} \quad (24)$$

Dengan cara yang sama untuk kemiringan sudut ψ persamaan (10) didapatkan persamaan persamaan *complementary filter* untuk kemiringan sudut ψ adalah [6]:

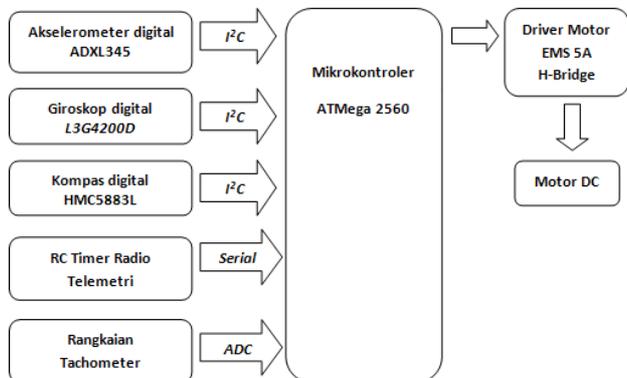
$$\psi_i = (\alpha) (\psi_{i-1} + \omega_x \Delta t) + (1 - \alpha) \psi_{a,i} \quad (25)$$

III. PERANCANGAN SISTEM

Modul *Ball Balancing Robot* terdiri dari robot beroda yang diletakkan di atas bola, di mana robot beroda tersebut akan terus dikendalikan posisinya tegak lurus dengan permukaan tanah pada sudut 0° agar terus berada di atas bola tanpa terjatuh.

Secara umum *ball-balancing robot* harus selalu dikendalikan posisi sudutnya pada arah sumbu x (sudut θ) dan pada arah sumbu y (sudut ψ), sehingga dibutuhkan 2 buah sistem kendali PID utama untuk pengendalian posisi sudutnya.

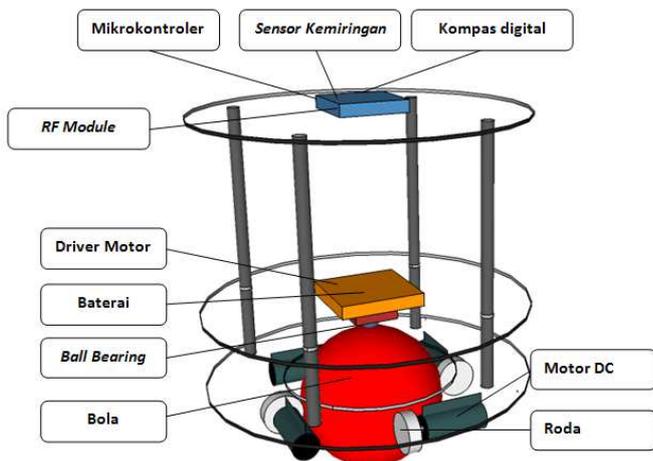
Ball-balancing robot juga dilengkapi modul pengendali gerakan di mana modul ini bertugas untuk mengendalikan gerakan robot secara nirkabel. Selain itu modul ini juga bertugas untuk memantau kemiringan sudut dari *ball-balancing robot*. Pengendalian keseimbangan, pembacaan sensor, dan pengendalian arah gerak robot dijalankan oleh mikrokontroler. Berikut adalah blok diagram dari modul-modul tersebut:



Gbr. 7. Blok diagram Ball-Balancing Robot

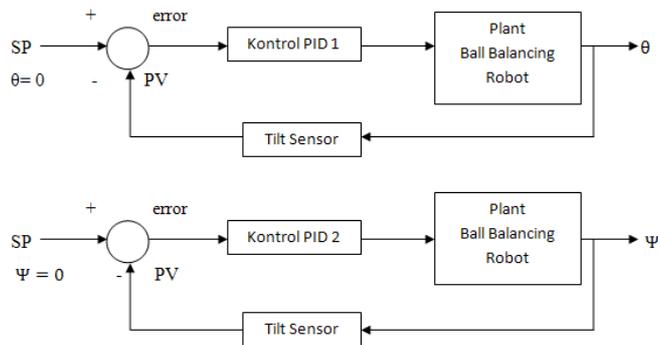


Gbr. 8. Blok diagram modul pengendali gerakan



Gbr. 9. Desain modul Ball-Balancing Robot

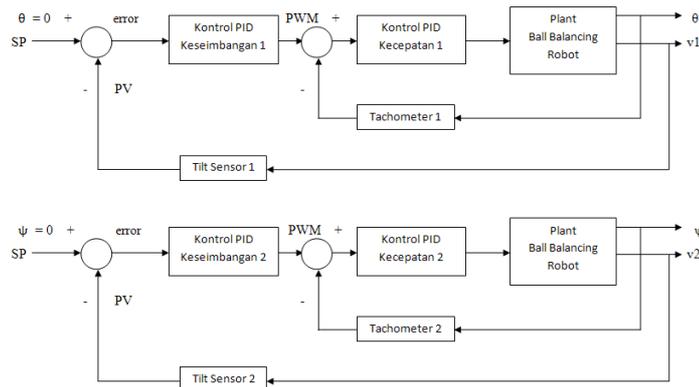
Gbr. 10 adalah blok diagram perancangan sistem kendali PID pada *ball-balancing robot*:



Gbr. 10. Blok diagram sistem kendali PID untuk kemiringan θ dan ψ .

Output sistem kendali PID adalah nilai PWM yang diberikan pada motor DC. Jadi, pengendalian keseimbangan robot dilakukan secara tidak langsung di mana yang dikendalikan secara langsung adalah kecepatan motor DC.

Dari pengujian ditemukan bahwa nilai PWM yang diberikan tidak sebanding dengan output motor DC yang dihasilkan. Oleh karena itu dirasa perlu untuk menambahkan sistem kendali PID untuk mengendalikan kecepatan motor DC. Umpan balik sistem kendali ini didapat dari rangkaian tachometer dengan *setpoint* didapatkan dari output sistem kendali PID keseimbangan robot. Berikut adalah perancangan blok diagram sistem kendali PID secara keseluruhan:

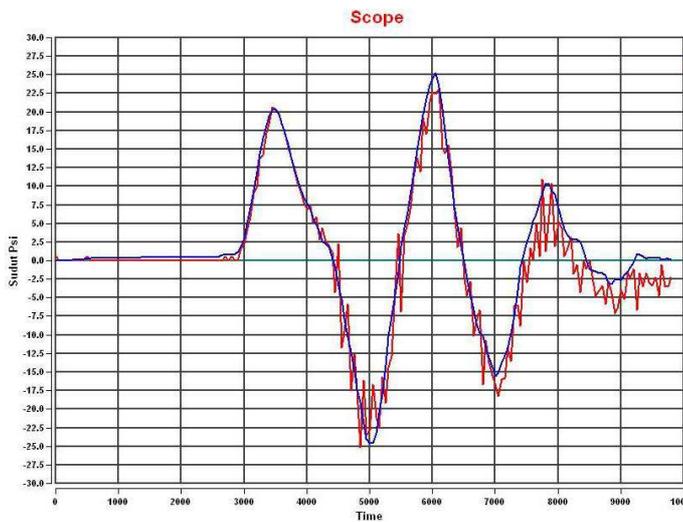


Gbr. 11. Blok diagram sistem kendali PID keseluruhan

IV. HASIL PERCOBAAN DAN ANALISIS

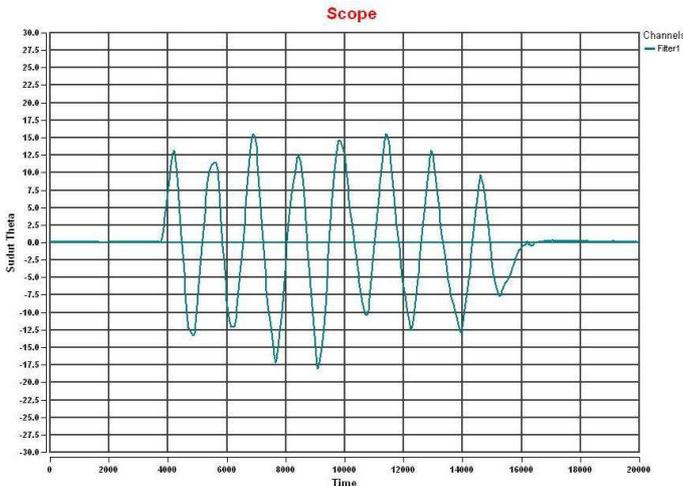
Pengujian pertama yang dilakukan adalah pengujian data kemiringan sudut akselerometer dan giroskop. Dari pengujian ditemukan bahwa sensor akselerometer akurat untuk mengukur kemiringan sudut sistem yang diam atau tidak bergerak, akan tetapi tidak akurat untuk mengukur kemiringan sudut sistem yang bergerak. Data kemiringan sudut memiliki *noise*. Hal ini disebabkan karena untuk mendapatkan data kemiringan sudut dari akselerometer, dibutuhkan data percepatan gravitasi bumi. Namun jika sistem bergerak, akselerometer juga akan mengukur percepatan gerak sistem tersebut sehingga pengukuran tidak akan akurat.

Sensor giroskop akurat untuk mengukur kemiringan sudut sistem yang bergerak, namun tidak akurat untuk mengukur kemiringan sudut sistem yang diam karena data kemiringan sudut giroskop akan mengalami *drift* atau terakumulasi. Berikut adalah perbandingan data kemiringan sudut yang diperoleh dari akselerometer dan giroskop:



Gbr. 12. Grafik perbandingan data kemiringan sudut akselerometer dan data kemiringan sudut giroskop.

Maka diperlukan suatu metode untuk menggabungkan data kemiringan sudut akselerometer dan giroskop. Metode yang digunakan adalah dengan *complementary filter*. Berikut adalah grafik contoh kemiringan sudut hasil dari metode *complementary filter*:

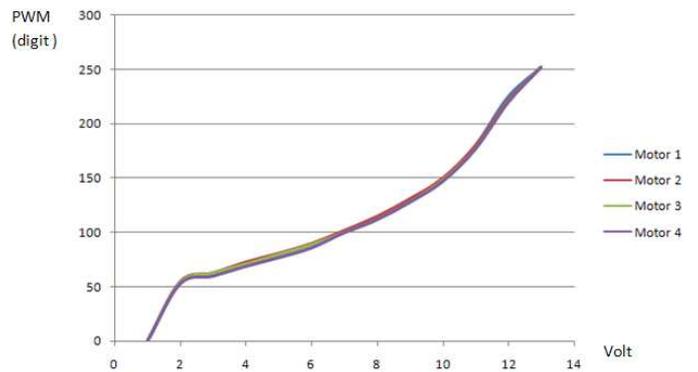


Gbr. 13. Data kemiringan sudut θ hasil *complementary filter*

Dari pengujian didapatkan bahwa dengan metode *complementary filter*, data kemiringan sudut sistem tidak mengalami *drift* ketika sistem dalam keadaan diam, serta tidak mengalami noise ketika sistem digerakkan.

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengetahui hubungan antara nilai PWM yang diberikan pada motor DC dan output tegangan yang dihasilkan motor. Hal ini dirasa

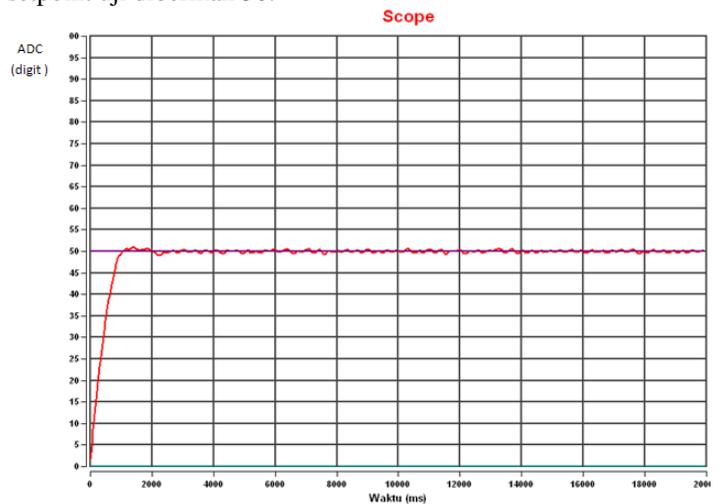
penting karena pada sistem ball-balancing robot yang dikendalikan secara langsung adalah kecepatan putar motor DC.



Gbr. 14. Grafik hubungan antara PWM dan tegangan motor DC yang dihasilkan

Dapat dilihat pada Gbr. 13. grafik hubungan antara PWM dan output motor bersifat tidak linear, tidak sesuai dengan asumsi awal bahwa hubungan antara PWM dan output motor bersifat linear. Hal ini mengakibatkan pengendalian keseimbangan *ball-balancing robot* dan pengendalian gerakan robot sulit dilakukan.

Pengujian selanjutnya yang dilakukan adalah pengujian sistem kendali PID kecepatan putar motor DC. Didapatkan respon terbaik untuk nilai $K_p=10$, $K_i=5$, dan $K_d = 1$ dengan setpoint uji diberikan 50:

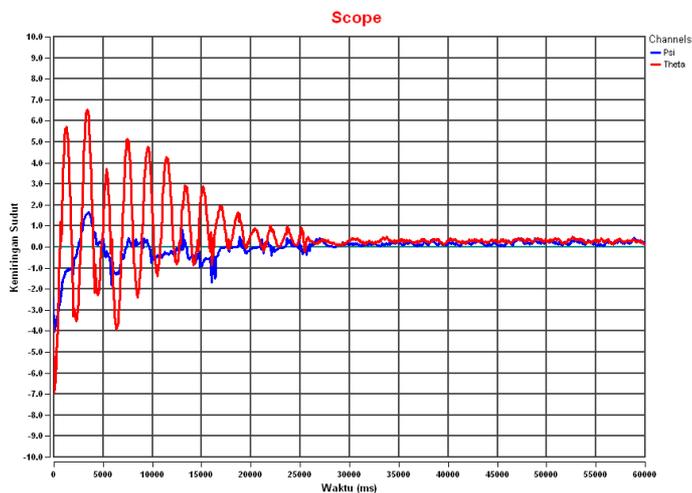


Gbr. 15. Grafik respon pengendalian kecepatan putar motor DC

Dari pengujian ditemukan bahwa sistem kendali PID mampu merespon nilai setpoint yang diberikan sehingga output menetap dinilai setpoint 50. Namun respon sistem dalam menanggapi perubahan setpoint tidak cepat, di mana didapat nilai rise time sebesar 1 detik, padahal setpoint dari sistem kendali PID ini didapatkan dari sistem kendali PID keseimbangan di mana nilainya berubah dengan cepat (*sample*

time sebesar 50 ms). Sistem *ball-balancing robot* sendiri membutuhkan respon sistem yang cepat. Sehingga secara umum pengendalian keseimbangan robot sulit dilakukan.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian sistem kendali PID keseimbangan robot secara keseluruhan. Secara umum, karena output motor tidak sesuai dengan nilai PWM yang diberikan maka pengendalian keseimbangan robot serta pengendalian gerakan robot sulit dilakukan dan belum dapat direalisasikan. Berikut adalah respon terbaik sistem dengan nilai $K_p=3$, $K_i=7$, dan $K_d = 0.01$.



Gbr. 16. Grafik respon kesimbangan Ball-Balancing Robot

V. KESIMPULAN

Sistem *ball-balancing robot* terbagi atas dua modul, yaitu modul *ball-balancing robot* dan modul pengendali gerakan di mana kedua modul ini dicatu oleh baterai *lithium-polymer*. Pengendalian keseimbangan *ball-balancing robot* menggunakan dua buah sistem kendali PID utama. Pengendalian keseimbangan robot dilakukan baik untuk kemiringan sudut θ maupun kemiringan sudut ψ . Sensor akselerometer atau sensor giroskop saja tidak cukup untuk

membaca data kemiringan sudut secara akurat. Data dari akselerometer dan giroskop harus digabungkan untuk menghasilkan data yang akurat. Salah satunya caranya adalah dengan menggunakan *complementary filter*. Penalaan parameter PID dan pengendalian keseimbangan robot memiliki kendala yakni adanya ketidaksesuaian antara nilai PWM yang diberikan dengan output motor DC yang dihasilkan. Sehingga sistem kendali PID untuk pengendalian keseimbangan robot saja tidak cukup, namun perlu adanya sistem kendali PID untuk pengendalian kecepatan motor DC. Sistem kendali ini sudah direalisasikan namun sistem secara umum masih memiliki kelemahan di mana sistem kendali ini tidak cukup cepat untuk merespon perubahan setpoint yang diberikan. Sistem hanya dapat bergerak bebas dengan sudut maksimal $\pm 7^\circ$. Hal ini disebabkan karena keterbatasan desain mekanik sistem.

REFERENSI

- [1] T.B. Lauwers, Kantor, G.A., and R.L. Hollis, "A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006.
- [2] D.A. Heatherington, (2013) *Analog Ball Balancer*. [Online]. Available: www.wa4dsy.net/robot/balancing-robot/ball-balancer
- [3] M. Kumagai and T. Ochiai, "Development of a Robot Balanced on a Ball— Application of passive motion to transport —", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [4] S. Iwan, *Kontrol PID Untuk Proses Industri*, Jakarta, Indonesia: Elex Media Komputindo, pp. 69-98, 2008.
- [5] -----, (2013) PID Controller. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [6] S. Colton, "The Balance Filter - A Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform", Massachusetts Institute of Technology, Boston, Chief Delphi White Paper, 2007.
- [7] -----, (2013) Low-Pass Filter. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter
- [8] -----, (2013) High-Pass Filter. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/High-pass_filter