

Jurnal *Rekayasa Elektrika*

VOLUME 14 NOMOR 3

Desember 2018

Robot Keseimbangan Beroda Dua dengan Sistem Kontrol Keseimbangan dan
Posisi Menggunakan Metode PID Bertingkat 181-188

Niam Tamami, Ibrahim Muhammad Diin, Bambang Sumantri, dan Endra Pitowarno

JRE	Vol. 14	No. 3	Hal 145–220	Banda Aceh, Desember 2018	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	-------------	------------------------------	--------------------------------------

Robot Keseimbangan Beroda Dua dengan Sistem Kontrol Keseimbangan dan Posisi Menggunakan Metode PID Bertingkat

Niam Tamami, Ibrahim Muhammad Diin, Bambang Sumantri, dan Endra Pitowarno
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Kampus PENS, Jalan Raya ITS Sukolilo, Surabaya 60111
e-mail: niam@pens.ac.id

Abstrak—Robot keseimbangan beroda dua yang dibahas pada penelitian ini merupakan sebuah robot yang akan menjaga keseimbangannya untuk tetap tegak dengan menggunakan 2 roda sebagai penggerak robot. Robot ini tidak dapat stabil pada saat kondisi tegak dan membutuhkan mekanisme kontrol ketika bergerak. Setidaknya terdapat 2 mekanisme kontrol pada robot ini, yaitu kontrol keseimbangan, dan kontrol posisi (jarak dan arah hadap). Metode yang digunakan sebagai mekanisme kontrol adalah PID bertingkat, yang terdiri kontrol keseimbangan sebagai kontrol primer dan kontrol posisi sebagai kontrol sekunder. Metode ini telah diterapkan pada robot. Berdasarkan percobaan pertama, kedua, dan ketiga, konfigurasi terbaik kontrol PID bertingkat yaitu PID untuk blok kontrol keseimbangan, PD untuk kontrol jarak, dan PD untuk kontrol arah hadap. Dengan menggunakan metode kontrol PID bertingkat, robot keseimbangan beroda dua telah mampu menyeimbangkan diri dengan osilasi berkisar $\pm 15,00$ derajat saat bergerak dan robot dapat bergerak menuju posisi yang diperintahkan dengan selisih kesalahan posisi terhadap target yaitu (0,17, -0,26) pada percobaan keempat dan (0,45, -0,43) pada percobaan kelima.

Kata kunci: robot keseimbangan beroda dua, kontrol PID bertingkat, kontrol keseimbangan, kontrol posisi

Abstract— The two-wheeled balancing robot is a robot that will maintain its balance to stay upright by using two wheels. This robot cannot be stable when the condition is upright and requires a control mechanism when moving. There are at least two control mechanisms in this robot, first is balance control, and the second is position control. The cascade PID method is proposed as a control mechanism, which consists of balance control as primary control and position control (distance and direction) as a secondary control. This method has been applied to robots. Based on the first, second, and third experiment, the best configuration of cascade PID control is PID for the balance control block, PD for distance control, and PD for direction control. By using cascade PID control, the two-wheeled balancing robot has been able to balance itself with oscillations ranging from ± 15.00 degrees when moving and it can move towards the ordered position with the error position from the target. Fourth experiment position error is (0.17, -0.26) and (0.45, -0.43) for the fifth experiment.

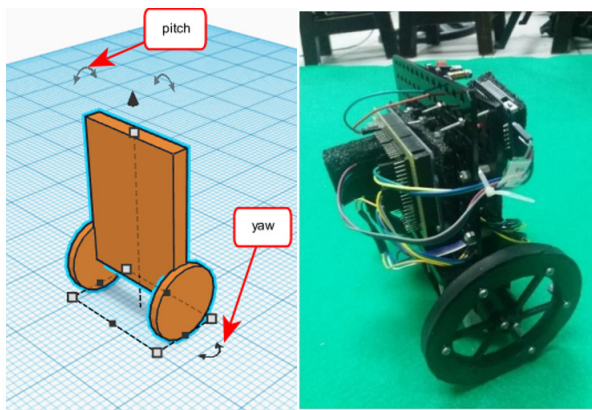
Keywords: two-wheeled balance robot, cascade PID control, balance control, position control

Copyright © 2018 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Perkembangan zaman menuntut adanya jenis robot dengan biaya produksi minimal, dengan kemampuan optimal yang dimilikinya. Faktor harga komponen merupakan salah satu penyumbang tingginya biaya produksi. Tingginya biaya produksi dapat dikurangi dengan mengurangi penggunaan komponen. Salah satu jenis robot dengan komponen aktuator minimal adalah robot keseimbangan dengan dua roda. Robot ini hanya memiliki aktuator berupa roda yang ada di bagian kiri dan kanan untuk dapat bergerak. Robot ini tidak dapat menstabilkan dirinya tanpa ada sensor keseimbangan dan kontroler. Untuk dapat bergerak, robot ini perlu untuk menyondongkan maju atau mundur tubuhnya dan berbelok.

Terdapat beberapa penelitian mengenai robot keseimbangan beroda dua. Michal Okulski melakukan penelitian mengenai robot keseimbangan roda dua dengan menggunakan metode kontrol PD bertingkat. Pada penelitian ini, robot dapat mengendalikan kestabilan dan kecepatan geraknya [1]. Firas membuat simulasi robot keseimbangan dengan menggunakan *fuzzy logic* sebagai kontrol keseimbangan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB [2]. Ji-Hyun Park membuat robot keseimbangan beroda dua dengan menambahkan kontrol momen giroskop sebagai alat bantu stabilisasi. Hasilnya penambahan kontrol momen giroskop dapat memberikan kompensasi pada sistem pada saat diganggu [3]. Ejaz Ahmad menerapkan metode kontrol *backstepping* untuk robot keseimbangan dengan dua roda [4]. Muhaimin Rahman membandingkan kinerja tiga jenis controller



Gambar 1. Bentuk robot keseimbangan beroda dua

untuk robot keseimbangan beroda dua. Metode yang dibandingkan adalah metode PID, LQR, dan fuzzy dengan menggunakan simulasi dengan perangkat lunak *Robot Operating System* [5]. Muhaimin Rahman juga menerapkan metode *Q Learning* dan *Deep Q Network* untuk sistem kontrol robot keseimbangan beroda dua [6]. He Chun-hong melakukan penelitian mengenai desain robot keseimbangan dua roda termasuk pemrosesan sinyal sensor menggunakan *complementary filter*, dengan menggunakan kontrol keseimbangan PD [7]. Barlian melakukan penelitian mengenai penolakan gangguan pada robot keseimbangan beroda dua menggunakan kontrol *Feed-Forward* [8]. Navid Razmjoooy menerapkan sistem kontrol robot keseimbangan beroda dua menggunakan metode *Chebyshev Inclusion* [9]. Abhijeet Singh Chouhan melakukan penelitian mengenai robot keseimbangan dengan menggunakan *fuzzy tipe sugeno* sebagai kontrol keseimbangan [10]. Frankovský memodelkan robot keseimbangan beroda dua dalam *state space* [11]. Hai N. Phan melakukan penelitian mengenai robot keseimbangan dengan menggunakan pendekatan *quasi time optimal* untuk mensintesis metode kontrolnya [13]. Derry melakukan penelitian mengenai sistem kontrol pergerakan dan keseimbangan robot keseimbangan dengan dua roda menggunakan PID bertingkat [15]. Hau-Shiue Juang membandingkan kinerja metode PID dengan PI-PD pada sistem robot keseimbangan beroda dua [17]. Qin Yong melakukan penelitian mengenai sistem kontrol keseimbangan robot dengan menggunakan T-S Fuzzy [19].

Selain itu terdapat beberapa penelitian yang berkaitan tentang metode kontrol keseimbangan untuk robot yang cukup kompleks dengan menggunakan PID. Pakorn dan Nurbaiti menggunakan PID sebagai metode kontrol sudut *pitch* pesawat dengan mekanisme pencarian konstanta PID [14], [18]. Brice menggunakan PID dan Niam menggunakan PD untuk sistem kontrol keseimbangan terbang quadcopter [11], [16].

Penelitian mengenai sistem kontrol robot ini masih perlu terus dikembangkan agar didapatkan metode kontrol yang cocok dan efisien untuk jenis robot ini. Penelitian ini difokuskan pada sistem kontrol keseimbangan dan kontrol posisi robot. Pada penelitian ini metode kontrol yang diusulkan adalah metode kontrol PID bertingkat.

II. PERANCANGAN SISTEM

Pada penelitian ini, robot keseimbangan beroda dua memiliki misi utama agar dapat menuju pada posisi yang diinginkan. Berikut ini adalah detail perancangan dari sistem robot keseimbangan beroda dua.

A. Perancangan Mekanik

Mekanik robot keseimbangan beroda dua dibuat dengan bahan akrilik hitam dengan ketebalan 2 mm. Spesifikasi detail robot memiliki panjang 17,5 cm, lebar 8,5 cm, tinggi 18 cm, diameter roda 10 cm. Pada bagian paling bawah terdapat baterai lipo 3 sel 2200 mAh. Diatas baterai terdapat penggerak motor DC 100 rpm yang sudah dilengkapi sensor *rotary encoder* dan terhubung dengan as roda. Pada bagian paling atas terdapat rangkaian mikrokontroler dan komponen pendukung. Berat keseluruhan robot ini 895 gram. Pada robot ini, sudut *pitch* (Φ) menyatakan kemiringan robot (kedepan atau kebelakang) terhadap posisi tegaknya. Sudut *yaw* (Ψ) menyatakan arah hadap robot. Gambar 1 menunjukkan bentuk robot secara keseluruhan.

B. Perancangan Elektronik

Sistem elektronik robot keseimbangan beroda dua dapat dibagi menjadi 4 macam yaitu kontroler, sensor, aktuator, dan perangkat komunikasi. Kontroler utama robot ini menggunakan Arduino MEGA 2560. Robot ini menggunakan baterai lipo 3 sel 12 Volt 2200 mAh. Untuk dapat memberikan catu daya 5 Volt untuk perangkat lain, pada robot ini terdapat regulator 5 Volt. Robot ini dilengkapi sensor inersia untuk mendapatkan sudut *pitch* dan *yaw*, yaitu sensor akselerometer 3 aksis dan giroskop 3 aksis yang terdapat pada modul rangkaian GY-25. Jalur akses modul GY-25 menggunakan I2C. Aktuator robot menggunakan modul pengendali motor L298N dan motor DC. Sebagai masukan modul pengendali motor L298N adalah PWM (*Pulse Width Modulation*). Motor penggerak roda yang digunakan adalah Motor DC 100 rpm yang telah dilengkapi sensor *rotary encoder* untuk pembacaan putaran motor. Untuk memudahkan pengamatan respon robot melalui komputer, robot ini dilengkapi dengan radio komunikasi data X-Bee S2 2,4 GHz dengan antarmuka serial USART. Pada Gambar 2 adalah blok diagram perangkat keras robot.

C. Perancangan Antarmuka Grafik Komputer

Sesuai dengan misi utama dari robot keseimbangan beroda dua untuk dapat menuju posisi yang diinginkan, maka diperlukan antarmuka grafik yang dibuat di komputer sebagai pengendali robot. Pada antarmuka grafik yang dibuat, terdapat 4 grafik utama yaitu grafik lokasi robot, grafik jarak, grafik sudut *pitch*, dan grafik sudut *yaw*. Pada grafik lokasi robot, pengguna robot dapat memberikan perintah dimana titik posisi yang harus dikunjungi robot.

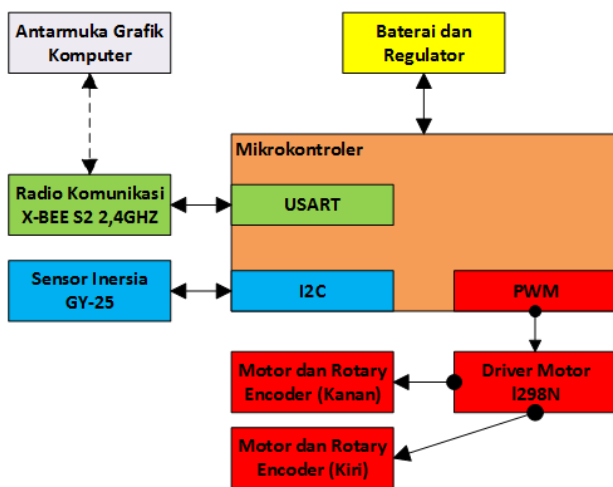
Setiap satuan pada peta robot mewakili jarak 20 cm. Pada grafik jarak, akan menunjukkan total jarak dalam skalar yang telah ditempuh robot. Pada grafik sudut *pitch*, menunjukkan kemiringan robot dengan acuan jika robot berdiri tegak lurus terhadap lantai datar maka nilai sudut *pitch* 0 derajat, jika condong ke depan nilai sudut *pitch* negatif, jika condong ke belakang nilai sudut *pitch* positif. Pada grafik sudut *yaw*, menunjukkan arah hadap dari robot dengan acuan 0 derajat merupakan nilai awal pada saat robot pertama kali dinyalakan. Pada penelitian ini sikap awal robot selalu dihadapkan ke depan. Gambar 3 menunjukkan tampilan antarmuka grafik komputer yang digunakan dalam penelitian.

III. METODE

A. Kontrol PID Bertingkat

Metode kontrol yang digunakan sengaja dirancang tanpa mengidentifikasi model matematika robot, tetapi menggunakan aturan sederhana dan intuitif yaitu:

1. Jika robot miring ke depan, robot bergerak maju. Demikian pula untuk sebaliknya.
2. Jika robot masih miring ke depan, robot bergerak maju dengan cepat. Demikian pula untuk sebaliknya.



Gambar 2. Blok diagram perangkat keras robot

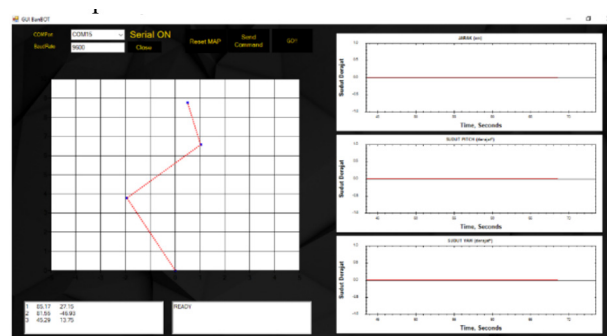
Pada penelitian ini, metode kontrol PID digunakan sebagai metode dasar sistem kontrol robot keseimbangan beroda dua. Pemilihan metode ini dikarenakan PID mampu diproses dengan cepat pada mikrokontroler. Berikut adalah dasar persamaan PID yang dipakai

$$u(n) = K_p E(n) + K_i \sum_{k=0}^n E(k) + K_d (E(n) - E(n-1)), (1)$$

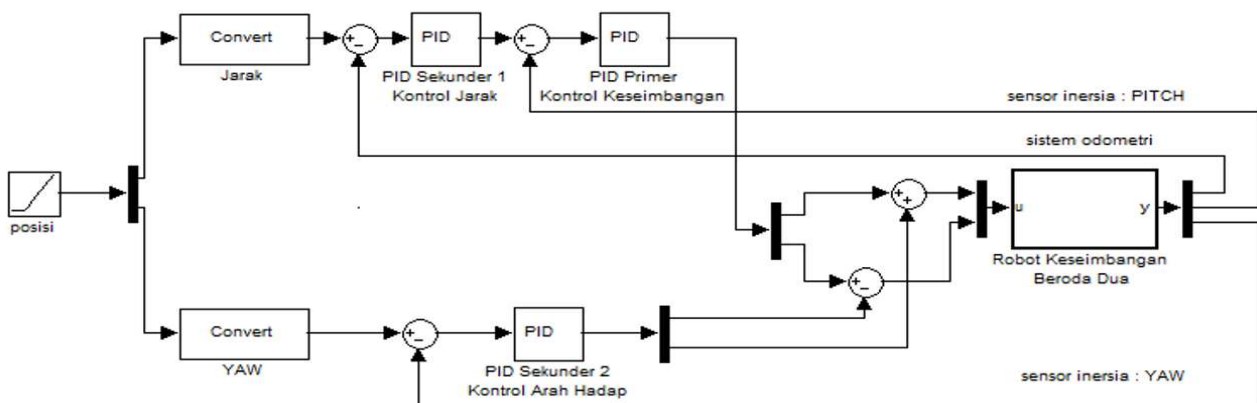
dengan μ adalah keluaran kontrol, E adalah *error*, yaitu selisih nilai referensi dengan nilai actual, K_p adalah penguat proporsional, K_i adalah penguat integral, dan K_d adalah penguat derivatif.

Pada sistem robot keseimbangan beroda dua, diperlukan 2 jenis kontrol yaitu kontrol keseimbangan dan kontrol posisi. Kontrol keseimbangan merupakan prioritas utama dari robot, karena jika sistem kontrol ini gagal, maka robot jatuh. Prioritas kedua adalah kontrol posisi dari robot. Untuk dapat mengontrol posisi robot, terdapat 2 parameter yang perlu diatur, yaitu jarak dan arah hadap. Dengan demikian, setidaknya terdapat 3 blok kontrol PID pada sistem ini, yaitu blok kontrol keseimbangan, blok kontrol jarak, dan blok kontrol arah hadap.

Sistem kontrol PID yang diusulkan pada penelitian ini menggunakan PID bertingkat yang dapat dilihat pada Gambar 4. PID ini terdiri dari blok PID primer untuk kontrol keseimbangan, blok PID sekunder 1 untuk kontrol jarak dan blok PID sekunder 2 untuk kontrol arah hadap robot. Keluaran dari PID sekunder 1 menjadi masukan PID primer, dengan begitu masukan nilai referensi PID primer bergantung pada keluaran PID sekunder 1. Ini berarti jika titik tujuan robot di depan semakin jauh, maka robot akan



Gambar 3. Tampilan antarmuka grafik komputer



Gambar 4. Metode kontrol PID bertingkat yang digunakan pada robot keseimbangan beroda dua

semakin mencondongkan tubuhnya ke depan untuk bisa bergerak maju. Pada penelitian ini terdapat pembatasan nilai kemiringan maksimal pada robot agar robot tetap mampu menstabilkan tubuhnya. Pada blok diagram PID sekunder 2, nilai PID akan mempengaruhi nilai putaran roda kanan dan kiri secara berlawanan. Hal ini bertujuan agar robot dapat mengubah arah hadapnya sesuai dengan yang diinginkan.

Untuk strategi pencarian nilai konstanta PID primer dengan melakukan percobaan secara langsung sehingga didapatkan konstanta PID terbaik dan nilai batas sudut pitch untuk keseimbangan robot. Nilai batas sudut *pitch* merupakan nilai batas maksimal robot untuk dapat menstabilkan tubuhnya lagi pada sudut pitch 0 derajat. Setelah didapatkan parameter tersebut, langkah selanjutnya adalah mencari nilai konstanta terbaik pada PID sekunder 1 dengan melakukan percobaan langsung. Keluaran nilai PID sekunder 1 terbatas sesuai nilai batas sudut pitch robot pada blok PID primer. Terakhir adalah PID sekunder 2, untuk pencarian nilai konstanta PID juga berdasarkan percobaan langsung.

Pada Gambar 4 keluaran blok PID sekunder 1 akan menjadi nilai referensi baru untuk blok PID primer. Blok PID primer mempunyai keluaran yang berfungsi untuk menggerakkan motor dengan umpan balik sensor agar tetap stabil. Karena blok PID primer sebagai prioritas, maka blok ini dieksekusi lebih cepat daripada blok diagram PID sekunder 1 dan 2. Pada blok PID primer dieksekusi dalam frekuensi 500 Hz, sedangkan sekunder 1 dan 2 pada frekuensi 100 Hz.

B. Odometri

Untuk mengetahui posisi robot dalam koordinat (x, y) maka diperlukan metode untuk mendapatkan posisi dan rotasi robot. Pada robot keseimbangan beroda dua terdapat sensor *rotary encoder* pada tiap-tiap roda untuk menghitung putaran motor dan sensor inersia untuk mendapatkan sudut arah hadap robot. Pada penelitian ini digunakan metode odometri untuk mengolah data sensor *rotary encoder* dan sensor inersia.

Data keluaran rotari encoder berupa jumlah pulsa (jp), maka jarak tempuh roda (d) dinyatakan dalam persamaan

$$d = jp / tjp * 3,14 * D, \quad (2)$$

dimana D adalah diameter roda dan tjp adalah total jumlah pulsa dalam satu kali putaran.

Jarak tempuh roda (d) yang dihitung dalam 1 periode eksekusi program (P) merupakan kecepatan dari robot.

$$v = d / P. \quad (3)$$

Jarak tempuh robot mengacu pada titik tengah robot (dTengah). Jarak tempuh titik tengah robot didapatkan berdasarkan rata-rata dari jarak tempuh roda kanan (dKanan) dan jarak tempuh roda kiri (dKiri) sesuai persamaan berikut ini.

$$dTengah = (dKanan + dKiri) / 2. \quad (4)$$

Untuk menghitung posisi robot untuk gerakan berbelok, maka diperlukan data sudut *yaw* dari robot (Ψ) yang didapatkan secara langsung dari sensor inersia.

Selanjutnya posisi baru robot (x' , y') merupakan hasil penjumlahan posisi sebelumnya dengan posisi sesaat/posisi dalam satu periode eksekusi program/kecepatan robot.

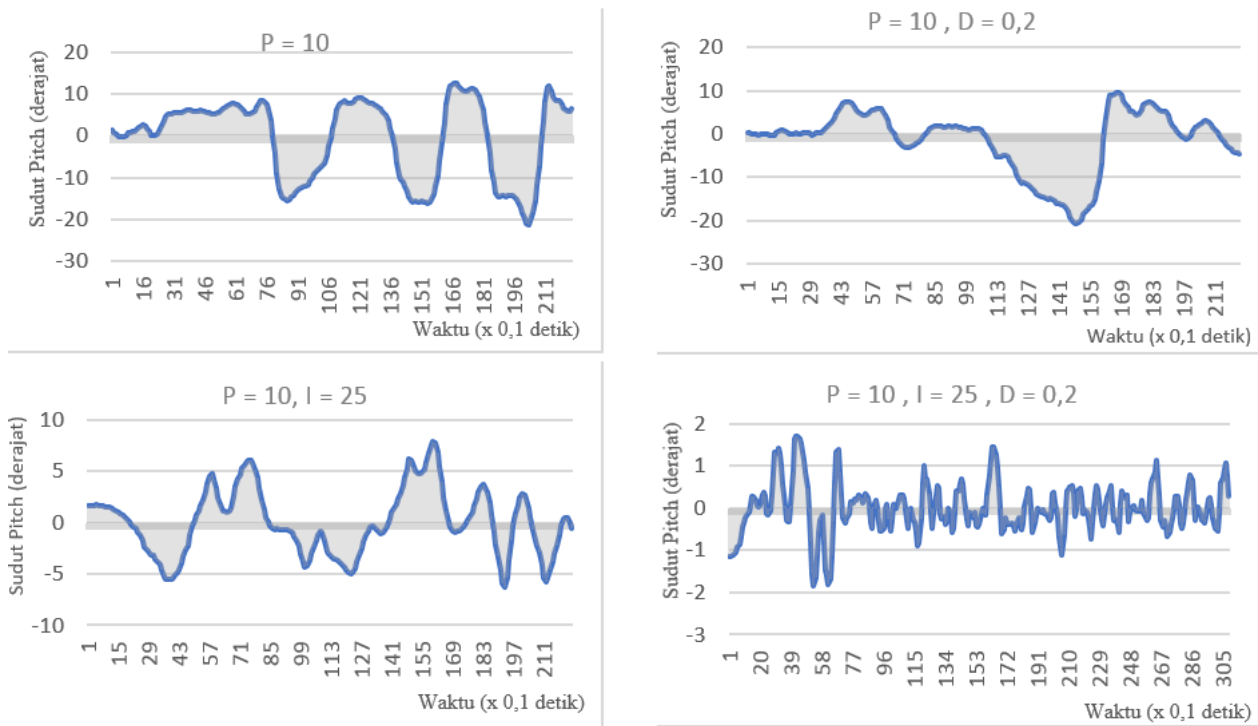
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat lima percobaan pada bagian ini. Percobaan pertama dilakukan untuk mencari konfigurasi dan konstanta PID keseimbangan robot. Percobaan kedua dilakukan untuk mencari konfigurasi dan konstanta PID jarak robot. Percobaan ketiga dilakukan untuk mencari konfigurasi dan konstanta PID arah hadap robot. Percobaan keempat dilakukan untuk menguji kinerja robot dengan memberikan dua titik tujuan. Percobaan kelima dilakukan untuk menguji kinerja robot dengan memberikan tiga titik tujuan.

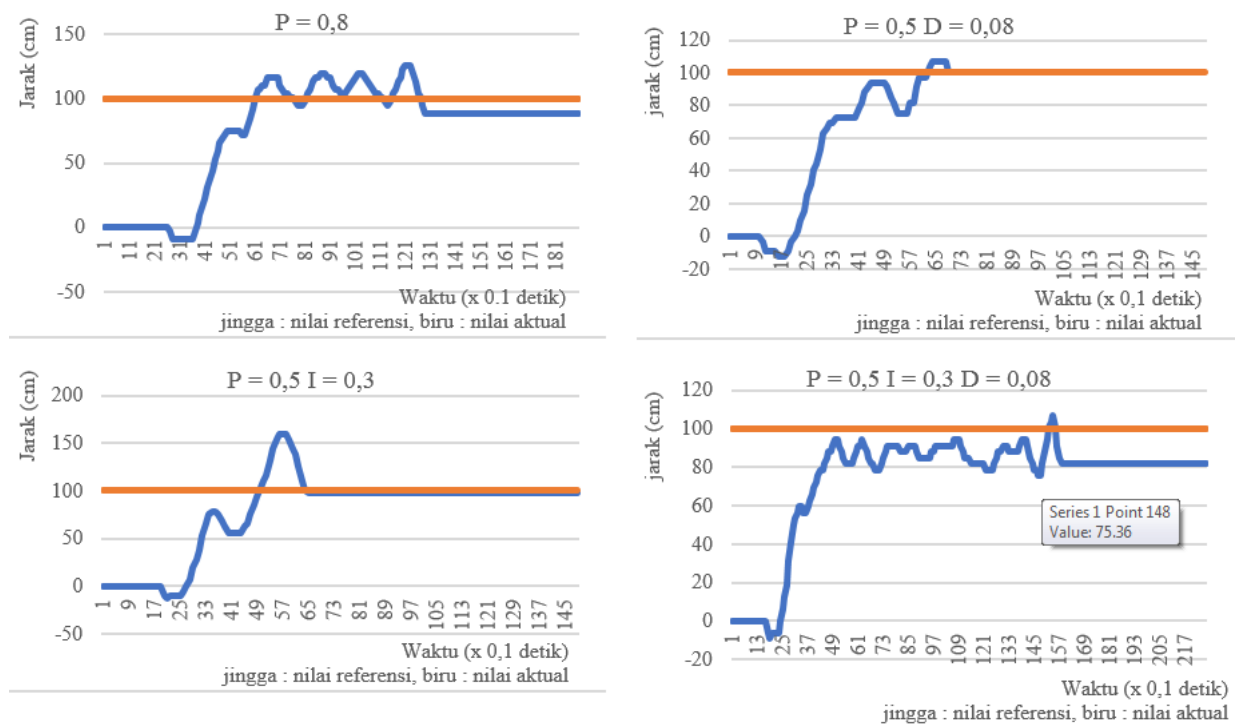
Percobaan pertama merupakan uji pencarian konstanta blok PID primer atau blok kontrol keseimbangan robot. Nilai referensi yang digunakan adalah 0 derajat. Metode pencarian konstanta blok PID primer dengan percobaan secara langsung. Kemudian menentukan kombinasi PID dengan respon terbaik dengan konfigurasi metode kontrol yaitu P, PI, PD, PID. Parameter respon terbaik didapatkan dari nilai terkecil simpangan *error* terhadap sudut pitch 0 derajat robot. Pada percobaan ini nilai awal konstanta kontrol P adalah 10 dengan simpangan *error* ± 20 derajat. Nilai ini dipilih karena telah memberikan respon terbaik jika dibandingkan dengan nilai lain pada respon keseimbangan robot. Selanjutnya diujicobakan kombinasi PI, PD, dan PID. Pada kombinasi kontrol PI, digunakan konstanta P=10 dan I = 25. Kombinasi kontrol PD, digunakan kombinasi P=10 dan D=0,2. Pada kombinasi PID, digunakan konstanta P=10, I=25, dan D=0,2. Keempat kontrol ini, yaitu P, PI, PD, dan PID dibandingkan hasil respon kontrolnya. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai *error* blok PID primer dengan konstanta P=10, I=25, dan D=0,2 memberikan respon terbaik dengan nilai *error* ± 2 derajat. Dengan demikian, konstanta pada blok PID primer diatur dengan nilai P=10, I=25, dan D=0,2. Data hasil percobaan pertama dapat dilihat pada Gambar 5.

Percobaan kedua merupakan uji pencarian konstanta blok PID sekunder 1 atau blok kontrol jarak robot. Blok PID sekunder 1 perlu didukung dengan blok PID primer agar robot bisa seimbang ketika bergerak maju. Nilai konstanta blok PID primer sesuai dengan konstanta yang telah didapatkan pada percobaan pertama, yaitu P=10, I=25, D=0,2.

Metode pencarian blok PID sekunder 1 dengan percobaan secara langsung. Nilai referensi yang digunakan adalah 100 cm. Kemudian menentukan kombinasi PID dengan respon terbaik dengan konfigurasi kontroler yaitu P, PI, PD, PID. Parameter respon terbaik didapatkan dari *error* jarak dan *overshoot* terkecil dari respon jarak robot.



Gambar 5. Percobaan pertama, hasil percobaan kombinasi metode PID untuk blok kontrol keseimbangan

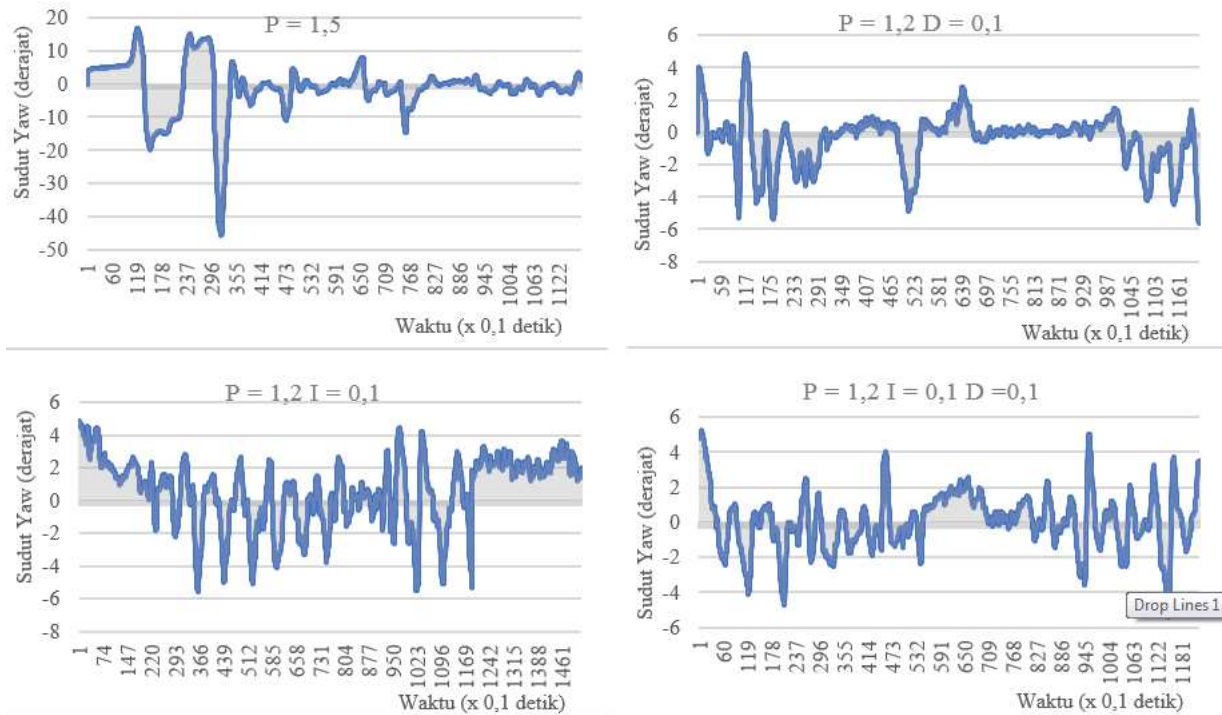


Gambar 6. Percobaan kedua, hasil percobaan kombinasi metode PID untuk blok kontrol jarak

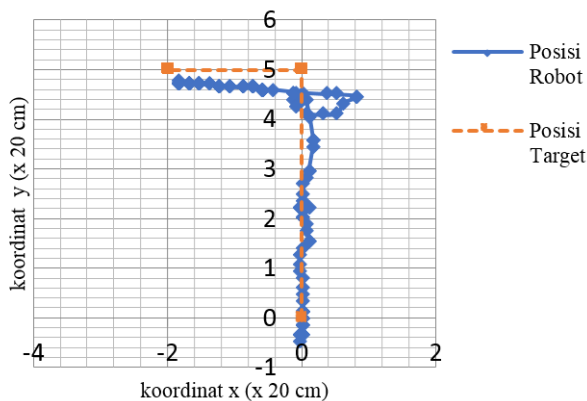
Pada percobaan ini nilai awal konstanta kontrol P adalah 0,8, nilai ini dipilih karena robot sudah mampu menuju target posisi yang telah ditentukan meskipun masih terdapat osilasi. Selanjutnya diujicobakan kombinasi PI, PD, dan PID. Pada kombinasi kontrol PI, digunakan konstanta $P=0,5$ dan $I = 0,3$.

Kombinasi kontrol PD, digunakan kombinasi $P=0,5$ dan $D=0,08$. Pada kombinasi PID, digunakan konstanta

$P=0,5, I=0,3,$ dan $D=0,08$. Keempat kontrol ini, yaitu P, PI, PD, dan PID dibandingkan hasil respon kontrolnya. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai *error* blok PID sekunder 1 dengan konstanta $P=0,5$ dan $D=0,08$ memberikan respon terbaik dengan *error* dan *overshoot* terkecil. Dengan demikian, konstanta pada blok PID sekunder 1 diatur dengan nilai $P=0,5,$ dan $D=0,08$. Data hasil percobaan pertama dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 7. Percobaan ketiga, hasil percobaan kombinasi metode PID untuk blok kontrol arah hadap



Gambar 8. Percobaan keempat, data rekam kontrol posisi robot

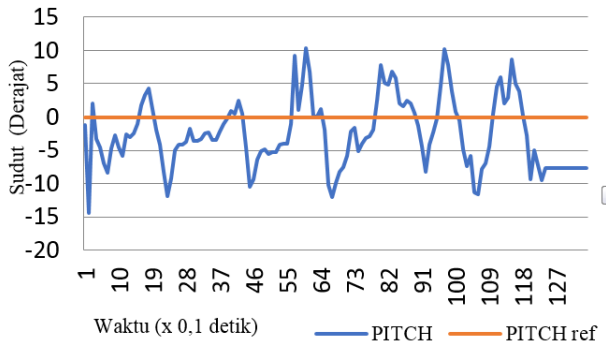
Percobaan ketiga merupakan uji pencarian konstanta blok PID sekunder 2 atau blok kontrol arah hadap robot. Blok PID sekunder 2 perlu didukung dengan blok PID primer agar robot bisa seimbang ketika mengubah arah hadapnya. Nilai konstanta blok PID primer sesuai dengan konstanta yang telah didapatkan pada percobaan pertama, yaitu $P=10$, $I=25$, $D=0,2$. Metode pencarian blok PID sekunder 2 dengan melakukan percobaan secara langsung. Nilai referensi yang digunakan adalah 0 derajat. Kemudian menentukan kombinasi PID dengan respon terbaik dengan konfigurasi kontroler yaitu P, PI, PD, PID. Parameter respon terbaik didapatkan dari *error* posisi dan osilasi terkecil dari target arah hadap robot. Pada percobaan ini nilai awal konstanta kontrol P adalah 1,5, nilai ini dipilih karena robot sudah mampu mengatur arah hadapnya sesuai dengan target yang telah ditentukan meskipun masih terdapat osilasi. Selanjutnya diujicobakan kombinasi PI, PD, dan PID. Pada kombinasi kontrol

PI, digunakan konstanta $P=1,2$ dan $I = 0,1$. Kombinasi kontrol PD, digunakan kombinasi $P=1,2$ dan $D=0,1$. Pada kombinasi PID, digunakan konstanta $P=1,2$, $I=0,1$, dan $D=0,1$. Keempat kontrol ini, yaitu P, PI, PD, dan PID dibandingkan hasil respon kontrolnya. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai *error* blok PID sekunder 2 dengan konstanta $P=1,2$ dan $D=0,1$ memberikan respon terbaik dengan osilasi terkecil. Dengan demikian, konstanta pada blok PID sekunder 2 diatur dengan nilai $P=1,2$, dan $D=0,1$. Data hasil percobaan pertama dapat dilihat pada Gambar 7.

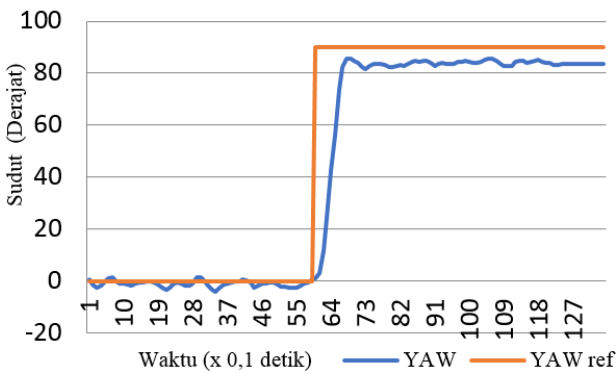
Pada percobaan keempat, pengujian robot keseimbangan beroda dua untuk mencapai titik-titik target tujuan yang dikirimkan lewat peta antarmuka grafik komputer. Skala yang digunakan pada peta adalah 1 satuan menyatakan 20 cm panjang sebenarnya.

Data rekam posisi robot dapat dilihat pada Gambar 8. Pada percobaan ini robot diperintahkan menuju titik (0,00 , 5,00) kemudian diteruskan menuju titik terakhir (-2,00 , 5,00) sesuai garis merah pada peta. Garis biru menunjukkan respon pergerakan robot. Berdasarkan data rekam posisi robot, robot telah menuju posisi (-1,83, 4,74). Masih terdapat selisih *error* posisi robot yaitu sebesar 0,17 untuk koordinat x, dan -0,26 untuk koordinat y.

Data rekam keseimbangan robot pada saat bergerak dari (0,00, 0,00) menuju (0,00, 5,00) kemudian menuju (2,00, 5,00) dapat dilihat pada Gambar 9. Garis merah merupakan nilai referensi keseimbangan, yaitu 0 derajat. Garis biru menyatakan respon sudut robot ketika bergerak menuju posisi yang diperintahkan. Dari perekaman data yang telah dilakukan, robot mampu menjaga keseimbangannya hingga sampai pada target posisi tetapi masih terdapat osilasi sudut *pitch* dari robot berkisar dari



Gambar 9. Percobaan keempat, data rekam kontrol keseimbangan robot saat berjalan



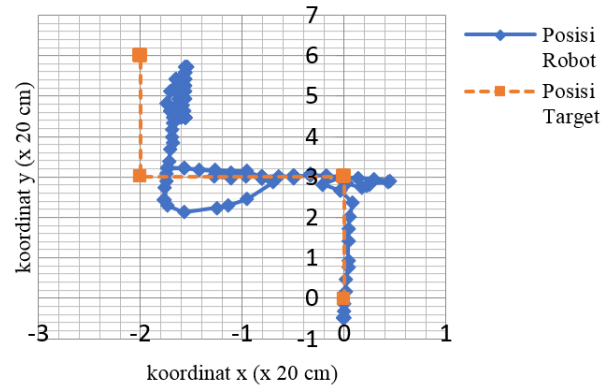
Gambar 10. Percobaan keempat, data rekam kontrol arah hadap robot

-14,42 derajat hingga 10,24 derajat.

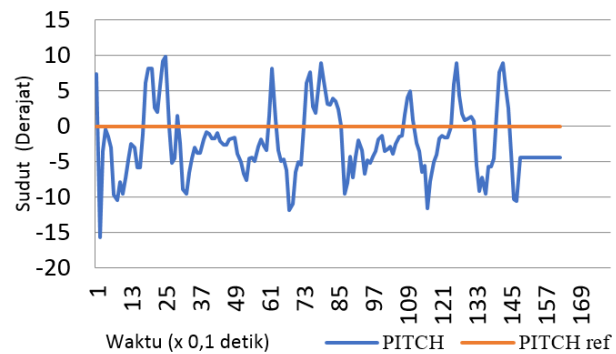
Data rekam arah hadap robot pada saat bergerak dari (0,00, 0,00) menuju (0,00, 5,00) kemudian menuju (2,00, 5,00) dapat dilihat pada Gambar 10. Garis merah merupakan nilai referensi arah hadap. Nilai referensi berubah dari 0,00 derajat menuju 90,00 derajat pada detik 6,10 saat berbelok dari titik (0,00, 5,00) ke (2,00, 5,00). Garis biru menyatakan respon arah hadap robot ketika bergerak menuju posisi yang diperintahkan. Dari perekaman data yang telah dilakukan, robot mengubah arah hadap hingga 83,65 derajat dan menjaga keseimbangannya hingga sampai pada target posisi.

Pada percobaan kelima, hampir sama dengan percobaan keempat, tetapi robot diperintahkan menuju 3 titik target. Data rekam posisi robot dapat dilihat pada Gambar 11. Pada percobaan ini robot diperintahkan menuju titik (0,00, 5,00) kemudian diteruskan menuju titik (-2,00, 3,00) dan terakhir menuju titik (-2,00, 6,00) sesuai garis merah pada peta. Garis biru menunjukkan respon pergerakan robot. Berdasarkan data rekam posisi robot, robot telah menuju posisi (-1,55, 5,57). Masih terdapat selisih *error* posisi robot yaitu sebesar 0,45 untuk koordinat x, dan -0,43 untuk koordinat y.

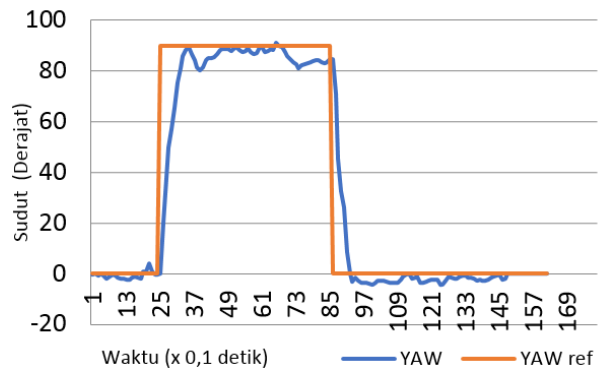
Data rekam keseimbangan robot pada saat bergerak dari (0,00, 0,00) menuju (0,00, 3,00) kemudian menuju (-2,00, 3,00) kemudian menuju (-2,00, 6,00) dapat dilihat pada Gambar 12. Garis merah merupakan nilai referensi keseimbangan, yaitu 0 derajat. Garis biru menyatakan respon sudut robot ketika bergerak menuju posisi yang



Gambar 11. Percobaan kelima, data rekam kontrol posisi robot



Gambar 12. Percobaan kelima, data rekam kontrol keseimbangan robot saat berjalan



Gambar 13. Percobaan kelima, data rekam kontrol arah hadap robot

diperintahkan. Dari perekaman data yang telah dilakukan, robot mampu menjaga keseimbangannya hingga sampai pada target posisi tetapi masih terdapat osilasi sudut *pitch* dari robot berkisar dari -15,65 derajat hingga 9,85 derajat.

Data rekam arah hadap robot pada saat bergerak dari (0,00, 0,00) menuju (0,00, 3,00) kemudian menuju (-2,00, 3,00) kemudian menuju (-2,00, 6,00) dapat dilihat pada Gambar 13. Garis merah merupakan nilai referensi arah hadap. Nilai referensi berubah dari 0,00 derajat menuju 90,00 derajat pada detik 2,50 saat berbelok dari (0,00, 3,00) menuju (-2,00, 3,00). Kemudian arah hadap berubah menjadi 0,00 derajat pada detik 8,60 saat berbelok dari (-2,00, 3,00) ke (-2,00, 6,00). Garis biru menyatakan respon arah hadap robot ketika bergerak menuju posisi yang diperintahkan. Dari perekaman data yang telah

dilakukan, robot mengubah arah hadap hingga 83,65 derajat dan menjaga keseimbangannya hingga sampai pada target posisi.

Masih terdapat selisih posisi target dengan posisi aktual robot. Hal ini dipengaruhi dua faktor. Faktor pertama yaitu selip pada roda robot. Berdasarkan data rekam posisi terlihat jalur pergerakan robot (garis biru) tidak benar-benar sesuai dengan nilai referensi (garis merah), dapat dilihat pada saat robot berbelok. Hal ini dikarenakan terdapat proses penyeimbangan tubuh robot sehingga terdapat gerakan maju atau mundur yang bisa menimbulkan selip. Faktor kedua yaitu selisih arah hadap robot. Berdasarkan data rekam arah hadap dapat dilihat bahwa masih terdapat selisih respon arah hadap terhadap nilai referensi. Contohnya dapat dilihat pada saat nilai referensi arah hadap berubah 90,00 derajat untuk berbelok, robot hanya berbelok 83,65 derajat. Kedua faktor kesalahan ini yang menyebabkan adanya selisih posisi target dan aktual robot.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan pertama, kedua, dan ketiga konfigurasi terbaik kontrol PID bertingkat yaitu PID pada blok kontrol keseimbangan, PD pada kontrol jarak, dan PD pada kontrol arah hadap.

Dengan menggunakan kontrol PID bertingkat, robot keseimbangan beroda dua telah mampu menyeimbangkan diri dengan osilasi berkisar $\pm 15,00$ derajat dan dapat bergerak menuju posisi yang diperintahkan dengan selisih posisi (0,17, -0,26) pada percobaan keempat dan (0,45, -0,43) pada percobaan kelima yang disebabkan karena faktor selip roda pada robot dan selisih respon arah hadap robot terhadap titik referensi.

REFERENSI

- [1] Okulski, Michał, and Maciej Ławryńczuk. "A Cascade PD Controller for Heavy Self-balancing Robot." In *Conference on Automation*, pp. 183-192. Springer, Cham, 2018.
- [2] Mohammed, Hussein S., Bashar F. Midhat, and Firas A. Raheem. "PID and Fuzzy Logic Controller Design for Balancing Robot Stabilization." *Iraqi Journal of Computers, Communication and Control & Systems Engineering* 18, no. 1 (2018): 1-10.
- [3] Park, Ji-Hyun, and Baek-Kyu Cho. "Development of a self-balancing robot with a control moment gyroscope." *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15, no. 2 (2018): 1729881418770865.
- [4] Ahmad, Ejaz, Ateeq ur Rehman, Owais Khan, Muhammad Haseeb, and Nihad Ali. "Backstepping control design for two-wheeled self balancing robot." In *2018 1st International Conference on Power, Energy and Smart Grid (ICPESG)*, pp. 1-6. IEEE, 2018.
- [5] Rahman, MD Muhaimin, SM Hasanur Rashid, KM Rafidh Hassan, and M. M. Hossain. "Comparison of different control theories on a two wheeled self balancing robot." In *AIP Conference Proceedings*, vol. 1980, no. 1, p. 060005. AIP Publishing, 2018.
- [6] Rahman, M. D., S. M. Rashid, and M. M. Hossain. "Implementation of Q Learning and Deep Q Network For Controlling a Self Balancing Robot Model." *arXiv preprint arXiv:1807.08272* (2018).
- [7] He, Chun-hong, and Bin Ren. "Design of two wheel self balancing car." In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 113, no. 1, p. 012074. IOP Publishing, 2018.
- [8] Prasetyo, Barlian Henryranu, and Wijaya Kurniawan. "Disturbance rejection using feed-forward control system on self balancing robot." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 154, p. 03002. EDP Sciences, 2018.
- [9] Razmjoo, Navid, and Mehdi Ramezani. "Optimal Control of Two-Wheeled Self-Balancing Robot with Interval Uncertainties Using Chebyshev Inclusion Method." *Majlesi Journal of Electrical Engineering* 12, no. 1 (2018): 13-21.
- [10] Chouhan, Abhijeet Singh, Dayal R. Parhi, and Animesh Chhotray. "Control and Balancing of Two-Wheeled Mobile Robots using Sugeno Fuzzy Logic in the domain of AI Techniques." *Emerging trends in Engineering, Science and Manufacturing, (ETESM-2018)*, IGIT, Sarang, India (2018).
- [11] Njinwoua, Brice J., and Alain Vande Wouwer. "Cascade attitude control of a quadcopter in presence of motor asymmetry*." *IFAC-PapersOnLine* 51, no. 4 (2018): 113-118.
- [12] Frankovský, P., L. Dominik, A. Gmiterko, I. Virgala, P. Kurylo, and O. Perminova. "Modeling of two-wheeled self-balancing robot driven by DC gearmotors." *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* 22, no. 3 (2017): 739-747.
- [13] Phan, Hai N., and Chiem X. Nguyen. "Building embedded quasi-time-optimal controller for two-wheeled self-balancing robot." In *MATEC Web of Conferences*, vol. 132, p. 02005. EDP Sciences, 2017.
- [14] Poksawat, Pakorn, Liuping Wang, and Abdulghani Mohamed. "Automatic tuning of attitude control system for fixed-wing unmanned aerial vehicles." *IET Control Theory & Applications* 10, no. 17 (2016): 2233-2242.
- [15] Pratama, Derry, Eko Henfri Binugroho, and Fernando Ardilla. "Movement control of two wheels balancing robot using cascaded PID controller." In *International Electronics Symposium (IES), 2015*, pp. 94-99. IEEE, 2015.
- [16] Tamami, Niam, Endra Pitowarno, and I. Gede Puja Astawa. "Proportional Derivative Active Force Control for "x" Configuration Quadcopter." *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology* 5, no. 2 (2014): 67-74.
- [17] Juang, Hau-Shiue, and Kai-Yew Lurr. "Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the arduino microcontroller board." In *Control and Automation (ICCA), 2013 10th IEEE International Conference on*, pp. 634-639. IEEE, 2013.
- [18] Wahid, Nurbaiti, and Nurhaffizah Hassan. "Self-tuning fuzzy PID controller design for aircraft pitch control." In *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on*, pp. 19-24. IEEE, 2012.
- [19] Yong, Qin, Liu Yanlong, Zang Xizhe, and Liu Ji. "Balance control of two-wheeled self-balancing mobile robot based on TS fuzzy model." In *Strategic Technology (IFOST), 2011 6th International Forum on*, vol. 1, pp. 406-409. IEEE, 2011.

Penerbit:

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: rekayasa.elektrika@unsyiah.net

Telp/Fax: (0651) 7554336

