

# Identifikasi Pemodelan Matematis Robot *Wall Following*

Fahmizal<sup>1</sup>, Muhammad Arrofiq<sup>2</sup>, Afrizal Mayub<sup>3</sup>

**Abstract**—This paper describes the process to obtain a mathematical model of a wall following robot. A mathematical modeling is carried out as an effort in determining Proportional, Integral, and Derivative (PID) controller parameters using analytic tuning. In this paper, the model approach used is Auto Regressive Exogenous (ARX). The ARX model is a model used to show the effect of control and disturbance on the output of the plant. The result of this research is a mathematical model of wall following robot which is then used to obtain PID controller parameters.

**Intisari**—Makalah ini memaparkan proses yang dilakukan untuk mendapatkan suatu model matematis sebuah robot *wall following*. Tujuan pemodelan matematis ialah sebagai upaya pengoptimalan dalam penentuan parameter pengendali *Proportional, Integral, dan Derivative (PID)* dengan cara penalaan analitik. Pada makalah ini, pendekatan model yang digunakan ialah *Auto Regressive Exogenous (ARX)*. Model ARX merupakan model yang digunakan untuk menunjukkan efek dari kendali dan gangguan pada keluaran suatu *plant*. Hasil penelitian ini ialah suatu model matematis robot *wall following* yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan parameter pengendali PID.

**Kata Kunci**— Identifikasi sistem, *Wall following robot, mobile robot, ARX, PID*.

## I. PENDAHULUAN

*Mobile robot* adalah tipe robot yang paling populer dalam dunia penelitian robot. Sebutan ini biasa digunakan sebagai kata kunci utama untuk mencari rujukan atau referensi yang berkaitan di robotika. Publikasi dengan judul yang berkaitan dengan *mobile robot* sering menjadi daya tarik, tidak hanya bagi kalangan peneliti, tapi juga bagi kalangan awam. Dari segi manfaat, penelitian tentang berbagai tipe *mobile robot* diharapkan dapat membantu manusia dalam melakukan otomatisasi dalam transportasi [1], platform bergerak untuk robot industri [2], eksplorasi tanpa awak [3], dan lain sebagainya.

Robot *wall following* adalah suatu robot dengan sistem navigasi memanfaatkan dinding (*wall*) sebagai arahan pergerakannya. Artinya, robot tersebut akan berusaha mengikuti atau meraba dinding dalam pergerakannya. Algoritme *wall following* ini biasanya menjadi salah satu dasar sebagai *behavior* dalam pergerakan suatu *autonomous mobile robot* [4]. Telah banyak penelitian yang fokus dalam hal kendali robot *wall following* ini. Biasanya peneliti

menggunakan pengendali PID [5], *fuzzy* [6], dan *Neural Network* [7] untuk menjadikan robot *wall following* bergerak secara halus, stabil, dan responsif.

Salah satu pengendali yang sering digunakan dan sangat menarik untuk diterapkan dalam hal kendali posisi robot *wall following* terhadap dinding ialah dengan pengendali PID. Dengan mengetahui model matematis sistem robot *wall following*, parameter pengendali PID dapat diperoleh dengan penalaan (*tuning*) analitik. Oleh sebab itu, makalah ini menyajikan prosedur dalam hal memperoleh model matematis robot *wall following*.

Secara mendasar, sebuah model dibangun berdasarkan data yang diamati [8]. Pemodelan suatu sistem merupakan tugas penting dalam penelitian ilmiah sebagai langkah pertama setiap analisis sistem [9]. Namun, untuk mendapatkan model bukanlah pekerjaan mudah. Terdapat dua cara dalam hal memperoleh model matematis sebuah sistem fisik, yaitu melalui pendekatan analisis dan eksperimen. Untuk metode dengan pendekatan analisis, sistem nyata (*real system*) diwakili oleh sebuah gabungan elemen-elemen pembentuk yang dianggap ideal. Pemodelan dengan cara analisis ini bisa menjadi sulit jika sistem tersebut sangat rumit dan pengetahuan terhadap sistem tersebut terbatas. Oleh karena itu, sistem identifikasi diperkenalkan sebagai alternatif dalam mendapatkan model dengan cara pendekatan.

Istilah identifikasi sistem telah diperkenalkan oleh Zadeh, dengan mengacu pada data hubungan masukan dan keluaran dari sistem yang belum diketahui karakteristiknya [10]. Metode ini dikenal dengan istilah identifikasi kotak hitam (*black box identification*) [11]. Dengan metode ini, model matematis robot *wall following* dapat diperoleh dengan cara pendekatan, dikarenakan banyak parameter fisis yang sulit untuk diketahui.

Tujuan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pemodelan matematis robot *wall following* dengan dianalisis menggunakan model identifikasi linear, yaitu *Auto Regressive Exogenous (ARX)*. Selanjutnya, proses penalaan parameter pengendali PID dengan cara analitik juga dipaparkan pada makalah ini.

Makalah ini disusun sebagai berikut. Pada Bagian II, metodologi dalam penelitian ini diusulkan. Bagian III menjelaskan pemodelan sistem robot *wall following*. Bagian IV menyajikan beberapa hasil simulasi yang menunjukkan keefektifan dan manfaat metode yang diusulkan. Bagian V merupakan kesimpulan dari penelitian ini.

## II. METODOLOGI

### A. *Wall Following*

*Wall following* adalah suatu algoritme untuk menyediakan orientasi navigasi kepada robot dengan menyusuri dinding. Salah satu keuntungannya adalah tidak perlu adanya garis penuntun ataupun suatu tanda khusus sebagai arahan bagi

<sup>1,2</sup>Dosen, Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Sekip Unit III, Gd. Herman Yohanes, Yogyakarta 55281, (Telp: (0274) 561111; Fax.: (0274) 542908, e-mail: fahmizal@ugm.ac.id ; rofiq@ugm.ac.id)

<sup>3</sup>Dosen, Pascasarjana S2 Pendidikan IPA FKIP, Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman, Bengkulu 38371, (Telp: +62 736 21186; Fax.: +62 736 21186, e-mail: afrizalmayub@unib.ac.id)

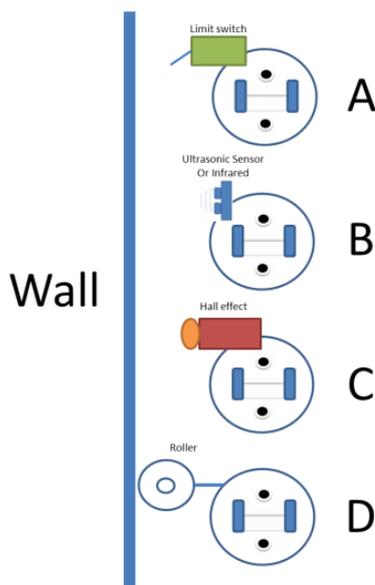
robot. Cara kerja sistem ini adalah dengan mengatur jarak dinding dengan robot tetap konstan. Bila terjadi perubahan, maka robot akan bergerak untuk kemudian menyesuaikan jarak lagi. Proses ini dilakukan secara berulang-ulang. Ada empat metode *wall following* yang dijelaskan pada Gbr. 1, yaitu sebagai berikut.

1) *Contact*: Robot menggunakan saklar mekanik yang merasakan sentuhan dengan dinding. Ini adalah metode yang paling mudah, tetapi saklar akan cenderung mengalami kerusakan mekanis setelah beberapa waktu.

2) *Non-contact, Active Sensor*: Robot menggunakan sensor aktif yang beroperasi dalam jarak dekat seperti inframerah atau ultrasonik untuk mengukur jarak antara dinding dengan robot.

3) *Non-contact, Passive Sensor*: Robot menggunakan sensor pasif seperti saklar efek Hall untuk mengukur jarak antara robot dengan dinding. Pada kasus ini, dinding harus berbahan logam atau dipasang kabel elektrik agar sensor dapat menangkap medan magnetik saat robot mendekati dinding.

4) *Soft-contact*: Robot menggunakan bahan mekanik untuk mendeteksi sentuhan dengan dinding, tetapi sentuhan ini diperhalus dengan memasang material lunak atau lentur seperti roda dengan busa atau karet. Kelebihan metode ini adalah berkurangnya kerusakan mekanis.



Gbr. 1 Metode-metode *wall following* [6].

**B. Identifikasi Plant**

Perancangan pengendali suatu sistem diawali dengan mengetahui karakteristik sistem. Hal ini dapat diketahui dari model matematis sistem tersebut. Model matematis diperoleh dengan penurunan matematis berdasarkan sifat fisis sistem atau proses identifikasi. Penurunan model matematis suatu sistem dapat dilakukan dengan identifikasi secara langsung untuk memperoleh data masukan dan keluaran sistem. Berdasarkan data masukan dan keluaran sistem, akan

diturunkan model matematis untuk merancang sistem pengendali. Salah satu metode identifikasi statis, yaitu metode *loop* terbuka dengan masukan sinyal *step*, dapat digambarkan seperti pada Gbr. 2. Hasil tanggapan keluaran identifikasi digunakan untuk mendapatkan fungsi alih menggunakan analisis grafis.

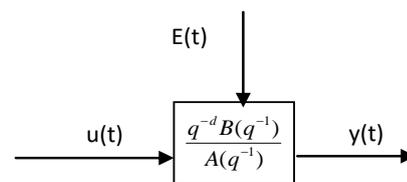


Gbr. 2 Metode *loop* terbuka dengan masukan sinyal *step*.

Identifikasi dinamis memiliki perbedaan dengan identifikasi statis berdasarkan sinyal uji dan metode permodelan yang digunakan. Dalam identifikasi dinamis, digunakan sinyal uji berupa sinyal acak atau semi-acak (*pseudo-random*). Sinyal ini memiliki nilai yang berubah sesuai dengan frekuensi tertentu. Dengan demikian, karakteristik sistem dapat diketahui lebih teliti dengan mencakup derau dan waktu tunda pada transmisi sinyal. Berdasarkan hubungan keluaran ini, dapat digunakan pemodelan untuk mencari persamaan matematika sistem dalam bentuk pendekatan *Auto-Regressive* (AR), *Moving-Average* (MA), atau *Auto-Regressive Moving-Average* (ARMA), baik dengan maupun tanpa derau (*variabel exogenous*).

**C. Pemodelan Auto Regressive Exogenous (ARX)**

Dalam melakukan proses pengendalian dengan menggunakan pengendali PID, model matematis *plant* harus terlebih dahulu dicari karena penentuan parameter PID sangat bergantung pada model matematis dari *plant* yang akan dikendalikan. Hal ini disebabkan setiap perhitungan pada parameter-parameter PID selalu melibatkan parameter dari model. Model ARX merupakan model yang digunakan untuk menunjukkan efek dari kendali dan gangguan pada keluaran suatu *plant*. ARX artinya proses AR dengan masukan eksternal (*exogenous*), dalam kasus ini  $u(t)$ . Pembangkitan proses ARX diilustrasikan pada Gbr. 3 dan (1) sampai (3).



Gbr. 3 Pembangkitan proses acak ARX.

$$y(t) = - \sum_{i=1}^n a_i y(t-1) + e(t) \tag{1}$$

dengan  $A(Q^{-1}) = 1 + \sum_{i=1}^n a_i Q^{-1}$  merupakan suatu polinomial sehingga semua akarnya terletak dalam *unit*

circle ( $A(Z^{-1}) = 0 \rightarrow |Z| < 1$ ). Struktur model ARX dapat dijelaskan sebagai  $A(Q)y(t) = B(Q)u(t-nk) + e(t)$ .

Melalui bantuan perangkat lunak MATLAB, model ARX diperoleh menggunakan estimasi dengan metode *least square* dengan

$$A(Q) = 1 + a_1Q^{-1} + \dots + a_nQ^{-n} \quad (2)$$

dan

$$B(Q) = 1 + b_1Q^{-1} + \dots + b_nQ^{-n}. \quad (3)$$

Secara matematis, permodelan pendekatan ARX dapat ditulis sebagai berikut.

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_ny(t-n_a) = b_1u(t-1) + \dots + b_nb_u(t-n_k - n_b + 1) + e(t) \quad (4)$$

dengan  $n_a$  and  $n_b$  adalah derajat model ARX, dan  $n_k$  adalah waktu tunda.

$y(t)$  = keluaran terhadap waktu,

$n_a$  = jumlah kutub,

$n_b$  = jumlah *zero* ditambah 1,

$n_k$  = jumlah masukan tercuplik yang terjadi sebelum memberikan pengaruh ke keluaran, disebut juga dengan waktu.

#### D. Pengendali PID

Pengendali PID merupakan pengendali yang aksi kendalinya proposional, integral, dan diferensial terhadap sinyal kesalahan, dengan hubungan sinyal pengaturan terhadap sinyal kesalahan dapat berupa proposional, integral, diferensial proposional atau gabungan di antaranya. Hubungan sinyal kesalahan dan sinyal pengaturan pada pengendali tipe PID *dependent* dapat dinyatakan dengan (5) sampai (7) [12].

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (5)$$

atau dalam bentuk fungsi alih,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (6)$$

atau

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p (\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + 1)}{\tau_i s} \quad (7)$$

Jika dilihat derajat pembilang fungsi alih (orde), pengendali PID dapat dirancang menjadi pengendali orde nol (tipe P), orde-1 (tipe PI) atau orde-2 (tipe PD). Oleh karena itu, secara teoretis pengendali ini dapat diterapkan untuk mengendalikan *plant* orde-1 atau orde-2 saja. Akan tetapi, karena sistem/*plant* di robot umumnya merupakan sistem orde tinggi yang dapat direduksi menjadi sistem orde-1 atau orde-2, pengendali PID banyak diimplementasikan di robotika. Dewasa ini, telah banyak dikembangkan metode perancangan pengendali PID, antara lain sebagai berikut.

1. Perancangan dengan pendekatan tanggapan waktu.
  - a. Perancangan analitik dengan spesifikasi tanggapan orde-1 dan orde-2.
  - b. Metode Ziegler-Nichols.
  - c. Perancangan dengan *root locus* melalui pendekatan geometris dan/atau analitik.
2. Perancangan dengan pendekatan tanggapan frekuensi.
  - a. Metode analitik melalui diagram Bode.
  - b. Perancangan PI/PD menggunakan teknik perancangan kompensator *lead/lag* melalui diagram Bode.
3. Perancangan pengendali PID adaptif.

Perancangan pengendali PID selalu dilakukan dalam beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut.

1) *Menentukan Model Matematika Plant*: Model matematika *plant* diperoleh dari penurunan melalui hubungan fisik antar komponen atau dengan menggunakan metode identifikasi.

2) *Menentukan spesifikasi unjuk kerja*: Karena perancangan ini tergolong perancangan dengan pendekatan tanggapan waktu dan hanya untuk sistem orde-1 dan orde-2 saja, maka ukuran kualitas tanggapan yang digunakan adalah ukuran kualitas tanggapan waktu. Biasanya digunakan *settling time* dan % *error steady state* untuk pendekatan tanggapan orde-1, atau *settling time*, % *overshoot* dan % *error steady state* untuk pendekatan tanggapan sistem orde-2.

3) *Merancang Pengendali PID*: Merupakan tahapan akhir dari perancangan, meliputi pemilihan tipe pengendali dan menghitung nilai parameter pengendali.

#### E. Kinematika Differential Steering Mobile Robot

Pada makalah ini, tipe *steering* atau pengendalian pergerakan robot *wall following* yang digunakan ialah tipe *differential steering*. Parameter geometri dan kinematika *differential steering* ini ditunjukkan pada Gbr. 4. Posisi dan orientasi dari vektor *Wheel Mobile Robot* (WMR) dan kecepatannya masing-masing. Posisi dan orientasi robot digambarkan oleh vektor  $q = [x_Q, y_Q, \varphi]^T$ , dengan  $(x_Q, y_Q)$  menunjukkan posisi titik  $Q$  (bagian tengah poros bodi robot yang digerakkan) and  $\varphi$  adalah orientasi robot dalam rangka koordinat global ( $G_{ics}$ ). Kecepatan sudut roda kiri dan kanan dilambangkan dengan  $\dot{\theta}_l$  dan  $\dot{\theta}_r$ . Ada tiga variabel untuk kendali  $(x_Q, y_Q, \varphi)$  dan hanya dua masukan kendali (torsi dari motor DC). Oleh karena itu, sistem dalam kondisi *under-actuated*. Hubungan antara kecepatan linear  $v$  dan kecepatan sudut  $\omega$  robot dan laju perubahan posisi dan orientasi dijelaskan pada (8).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_Q \\ \dot{y}_Q \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 \\ \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kecepatan linear dan sudut robot dijelaskan pada (9) dan (10),

$$v = \frac{r(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l)}{2} \tag{9}$$

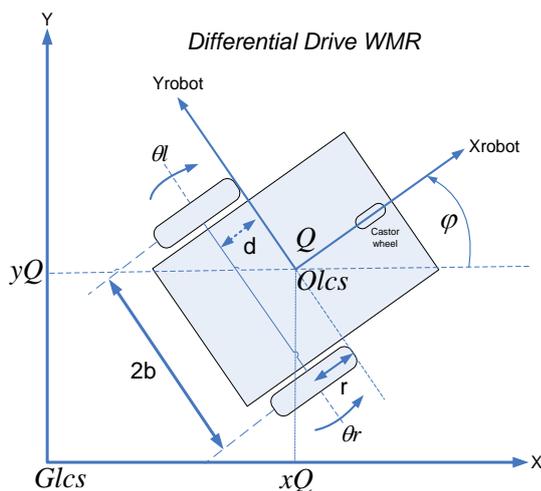
$$\omega = \frac{r(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)}{2b} \tag{10}$$

dengan  $r$  adalah jari-jari roda dan  $2b$  adalah panjang dasar roda, yaitu jarak antara roda yang diukur sepanjang poros rotasi roda. Dengan mensubstitusi (9) dan (10) ke (8), maka diperoleh (11) sampai (13).

$$\dot{x}_Q = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_r \cos \varphi + \dot{\theta}_l \cos \varphi) \tag{11}$$

$$\dot{y}_Q = \frac{r}{2}(\dot{\theta}_r \sin \varphi + \dot{\theta}_l \sin \varphi) \tag{12}$$

$$\omega = \frac{r(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l)}{2b} \tag{13}$$

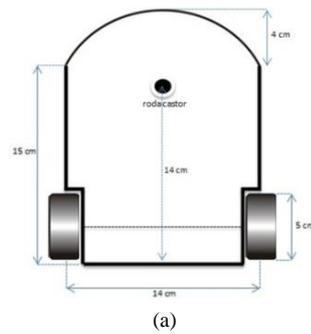


Gbr. 4 Parameter geometri dan kinematika differential steering.

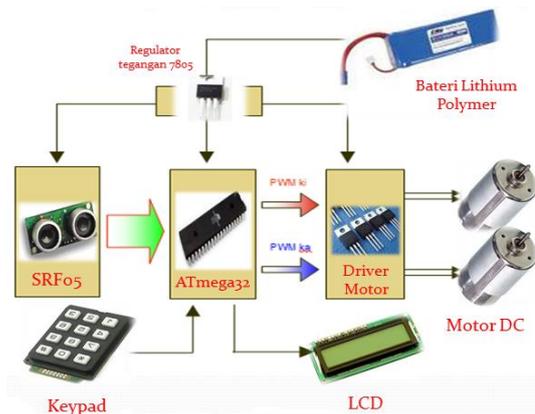
### III. PEMODELAN ROBOT WALL FOLLOWING

#### A. Desain Mekanik Robot Wall Following

Sistem mekanik yang baik mendukung pergerakan robot menjadi lebih baik. Oleh karena itu, perancangan mekanik, dalam hal ini bodi dan rangka robot, haruslah proporsional dengan panjang dan lebar serta tinggi robot. Material yang digunakan pada pembuatan rangka bodi robot wall following ini adalah bahan akrilik dengan ketebalan 3 mm. Bentuk dan dimensi robot dirancang secara proporsional dengan harapan robot dapat bermanuver dengan baik, salah satunya adalah gerakan pivot pada satu titik. Gbr. 5 menunjukkan rancangan desain mekanik robot dan hasil implementasi rancangan mekanik robot wall following.



Gbr. 5 (a) Rancangan desain mekanik robot wall following, (b) Hasil implementasi rancangan mekanik robot.



Gbr. 6 Diagram blok sistem elektronik robot.

#### B. Desain Sistem Elektronik Robot Wall Following

Dengan mengacu kepada diagram blok sistem elektronik pada Gbr. 6, sistem elektronik robot terdiri atas bagian masukan, bagian kendali, bagian keluaran, dan bagian catu daya (baterai). Bagian masukan berupa tiga buah sensor ultrasonik SRF05 dan tombol keypad yang berfungsi untuk memilih dan mengatur pengaturan pada robot. Pada bagian kendali digunakan mikrokontroler ATmega32. Pada bagian keluaran terdapat penampil LCD 2x16 dan driver motor sebagai penggerak aktuator robot.

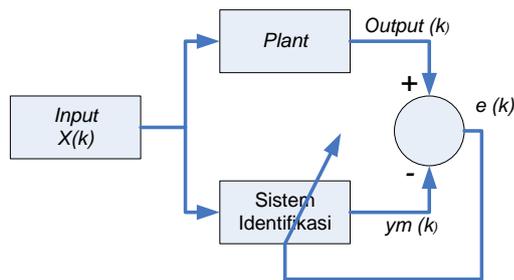
Sensor ultrasonik pada robot wall following diposisikan pada bagian depan, kiri, dan kanan pada bagian depan rangka robot. Tipe sensor ini digunakan dengan pertimbangan jarak deteksi tipe sensor ini yang jauh (3 cm hingga 3 m). Adapun kelemahan sensor ini adalah pada deteksi jarak dengan halangan yang posisinya tidak tegak lurus terhadap sensor.

Untuk mengatasi kelemahan ini, sensor dipasang sedemikian rupa pada robot dengan tujuan untuk mendapatkan hasil deteksi jarak dinding pada posisi yang mendekati posisi tegak lurus dari halangan. Gbr. 5(b) mengilustrasikan tata peletakan sensor ultrasonik SRF05 pada robot *wall following*.

C. Identifikasi Sistem Robot Wall Following

Identifikasi sistem merupakan suatu pendekatan eksperimental untuk menentukan model dinamik suatu sistem, digambarkan seperti Gbr. 7. Langkah-langkah identifikasi sistem terdiri atas empat tahap sebagai berikut.

1. Tersedianya data masukan dan keluaran *plant* yang akan diidentifikasi.
2. Pemilihan struktur model.
3. Estimasi parameter-parameter model.
4. Validasi model yang telah diidentifikasi (struktur dan nilai parameter-parameternya).



Gbr. 7 Diagram blok identifikasi sistem.

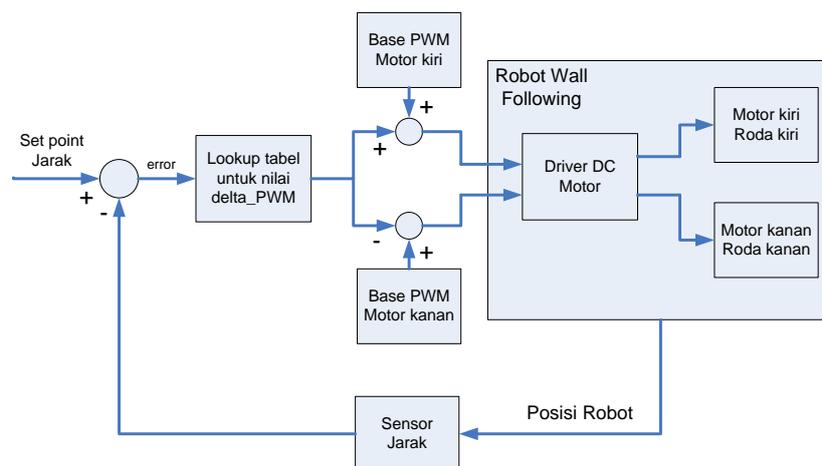
Dalam proses perancangan pengendali, model matematis sangat diperlukan untuk mengetahui karakteristik suatu *plant* yang akan diatur. Untuk mengetahui karakteristik suatu *plant*, perlu dilakukan identifikasi. Proses identifikasi pada robot *wall following* adalah suatu *plant* yang tidak stabil, sehingga proses identifikasi menggunakan metode *closed loop* untuk melihat tanggapan sistem terhadap sinyal uji yang diberikan. Dengan mendapatkan persamaan matematis suatu sistem, analisis dan perancangan pengendali yang sesuai dengan sistem tersebut dapat dilakukan dengan mudah. Gbr. 8 memperlihatkan skema proses identifikasi untuk mendapatkan model robot *wall following*.

TABEL I  
NILAI DELTA\_PWM TERHADAP NILAI ERROR

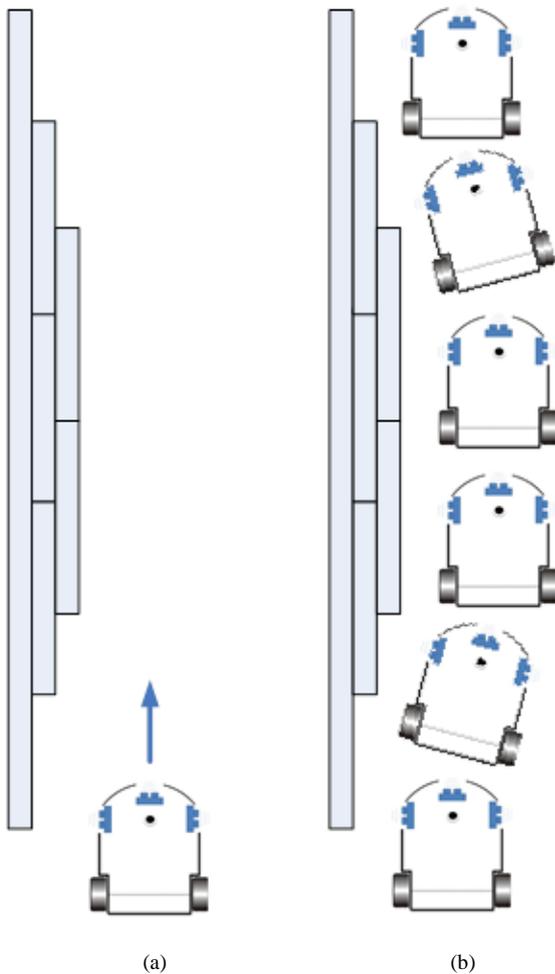
<i>error</i>	delta_PWM
5	50
4	40
3	30
2	20
1	10
0	0
-1	-10
-2	-20
-3	-30
-4	-40
-5	-50

Identifikasi untuk mendapatkan model *plant* robot *wall following* dilakukan dengan menggunakan metode telusur kiri dan mengikuti dinding yang dibuat bergelombang agar timbul perubahan dinamis, seperti ditunjukkan pada Gbr. 9. Dengan memberi masukan berupa *set point* jarak robot terhadap dinding, maka umpan balik sensor jarak sebelah kiri robot akan mengukur posisi robot dan melakukan koreksi yang bertujuan mengetahui kesesuaian dengan masukan yang diinginkan. Bila ada *error*, maka ada *gain* koreksi untuk mengarahkan posisi robot sesuai pada masukan (*set point*). *Gain* koreksi tersebut adalah nilai *delta\_PWM* yang diperoleh berdasarkan *lookup table* nilai *error* seperti yang disajikan pada Tabel I.

Nilai *delta\_PWM* adalah masukan *plant* dan nilai pengukuran sensor jarak adalah keluaran, yang diperlihatkan pada Gbr. 10. Kedua nilai tersebut diidentifikasi untuk mendapatkan model dinamis robot *wall following*. Waktu sampel pengambilan data masukan dan keluaran adalah 50 milidetik dengan waktu pengambilan data selama 5 detik, sehingga diperoleh 100 data masukan dan keluaran. Kemudian, pengolahan tersebut dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB dengan perintah ARX untuk mendapatkan fungsi alih *plant*.



Gbr. 8 Skema proses identifikasi untuk mendapatkan model robot *wall following* dengan mode *closed loop*.



Gbr. 9 (a) Robot wall following menggunakan metode telusur kiri, (b) Robot mengikuti dinding yang dibuat bergelombang.

Model yang digunakan untuk perancangan pengendali adalah yang memiliki nilai kesalahan *root mean square* (RMS) terkecil dan nilai *best fit* yang nilainya lebih dari 80% sehingga hasil pemodelan tersebut dapat diterima [13]. Selain itu, juga dipertimbangkan *final prediction error* (FPE) [14].

Kesalahan RMS merupakan nilai akar kesalahan rata-rata kuadrat yang menunjukkan seberapa besar nilai simpangan kesalahan dari nilai nol. Rumus kesalahan RMS ditunjukkan oleh (14).

$$\text{Kesalahan RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \tag{14}$$

dengan  $y_i$  adalah data identifikasi pada iterasi ke- $i$ .  $\hat{y}_i$  adalah data model pendekatan pada iterasi ke- $i$ , dan  $n$  adalah jumlah data identifikasi. Rumusan untuk memperoleh dan mengetahui nilai *good percentage of best fit* dituliskan pada (15). Sedangkan untuk FPE dijelaskan pada (16). FPE memperkirakan kesalahan *model fitting* saat model digunakan untuk memprediksi keluaran baru. Dengan metode ini, sebuah model dikatakan optimal hasilnya bila memiliki nilai FPE yang minimum.

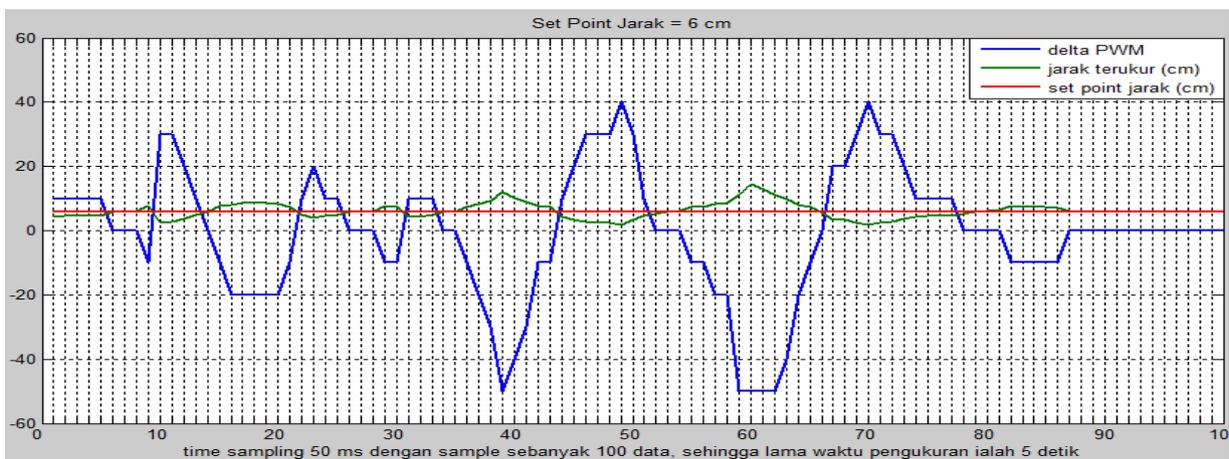
$$\text{Best fit} = 100 \times \left[ 1 - \frac{\text{norm}(\hat{y} - y)}{\text{norm}(y - \bar{y})} \right] \% \tag{15}$$

dengan  $y$  adalah data keluaran pengukuran sensor dan  $\hat{y}$  adalah data hasil identifikasi sedangkan  $\bar{y}$  adalah nilai rata-rata hasil pengukuran.

$$\text{FPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \begin{pmatrix} 1 + \frac{p}{N} \\ 1 - \frac{p}{N} \end{pmatrix} \tag{16}$$

Gbr. 11(a) merupakan potongan program identifikasi ARX pendekatan orde dua pada MATLAB, sedangkan Gbr. 11(b) adalah potongan hasil eksekusi identifikasi ARX berupa fungsi alih *plant*.

Setelah selesai melakukan identifikasi menggunakan ARX, langkah selanjutnya ialah menguji validasi model tersebut, telah sesuai dengan yang diharapkan atau belum. Gbr. 12 menunjukkan cara pengujian validasi model dan Gbr. 13 memperlihatkan tanggapan model sebelum proses koreksi.



Gbr. 10 Sinyal masukan (delta\_PWM) dan keluaran (jarak terukur) pada *plant* robot wall following dengan *set point* jarak 6 cm dari dinding.

```

1 - sample=arx([input1(:,2),output1(:,2)],[2 1 1])
2 - [num1,den1]=th2tf(sample)
3 - gz=tf(num1,den1,0.05)
4 - kontinu=d2c(gz)

```

(a)

Transfer function:  
 $-0.06409 z$

-----  
 $z^2 - 1.146 z + 0.3165$

Sampling time: 0.05

Transfer function:  
 $-0.9177 s - 44.2$

-----  
 $s^2 + 23.01 s + 117.3$

(b)

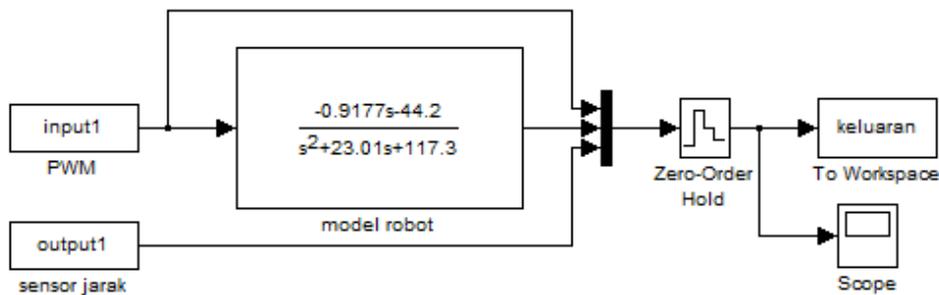
Gbr. 11 (a) Potongan program identifikasi ARX pendekatan orde dua pada MATLAB, (b) Potongan hasil eksekusi identifikasi ARX berupa fungsi alih *plant*.

Dari hasil pengujian validasi dapat disimpulkan bahwa keluaran model belum mendekati keluaran *plant* sebenarnya, tetapi telah mengikuti pola. Untuk itu, perlu dilakukan koreksi

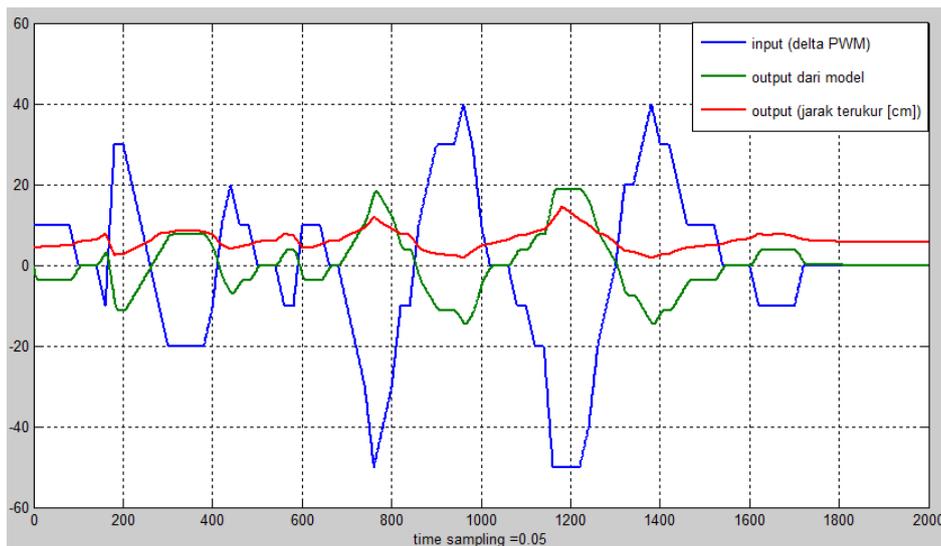
model. Koreksi ini dapat dilakukan dengan cara melakukan identifikasi ulang dengan jumlah data yang lebih banyak atau cara menambahkan dan memberi *gain* pada model sedemikian rupa sehingga keluaran model dapat mendekati keluaran *plant* sebenarnya. Gbr. 14 memperlihatkan pengujian validasi model setelah proses pengkoreksian model menggunakan Simulink dan Gbr. 15 menunjukkan tanggapan model setelah proses pengoreksian.

IV. PENALAN ANALITIK PENGENDALI PID

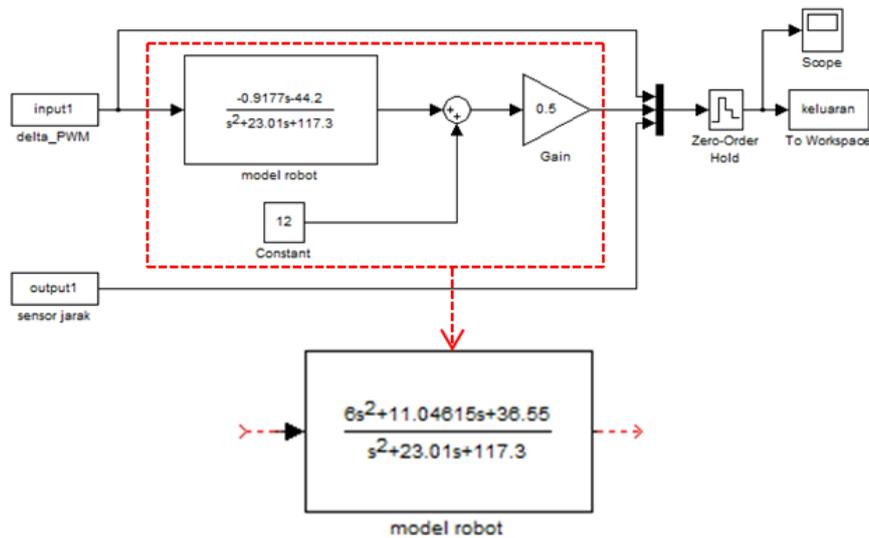
Sebelum pengendali PID diimplementasikan pada robot *wall following* menggunakan mikrokontroler ATmega32, terlebih dahulu dilakukan penalaan pengendali secara analitik dan disimulasikan, dalam hal ini dengan bantuan Simulink MATLAB. Tujuan dilakukannya penalaan analitik ialah mencari parameter  $K_n$ ,  $\tau_n$ , dan  $\tau_d$  yang akan dijadikan sebagai acuan pada saat implementasi. Namun, apabila hasil parameter analitik tidak dapat memenuhi spek yang diinginkan, maka penalaan dengan cara eksperimen dilakukan. Berdasarkan model robot yang diperoleh dari proses identifikasi, dapat diperoleh parameternya dengan penjelasan sebagai berikut. Suatu *plant* orde-2 tanpa tunda dapat direpresentasikan dalam bentuk diagram blok seperti pada Gbr. 16(a), dengan  $K$  adalah *Gain overall*,  $\omega_n$  adalah frekuensi alami tak teredam, dan  $\zeta$  adalah rasio peredaman. Sedangkan diagram blok pengendali PID ditunjukkan pada Gbr. 16(b),



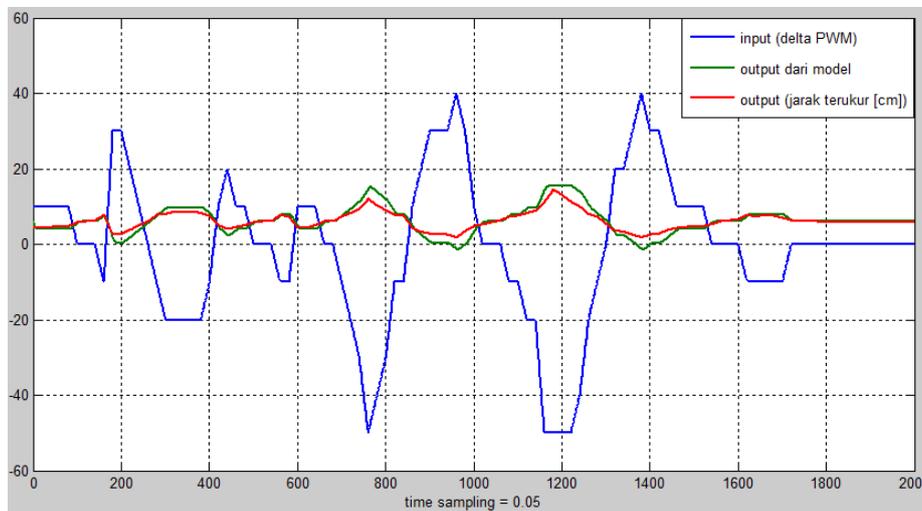
Gbr. 12 Pengujian validasi model menggunakan Simulink.



Gbr. 13 Tanggapan model sebelum proses koreksi.

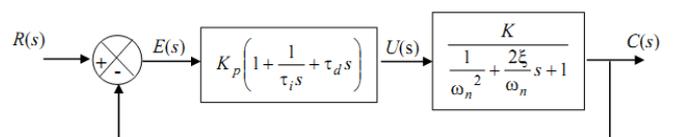


Gbr. 14 Pengujian validasi model setelah proses pengkoreksian model menggunakan Simulink.



Gbr. 15 Tanggapan model setelah proses pengkoreksian.

dengan  $K_p$  adalah penguatan proporsional,  $\tau_i$  adalah waktu integral, dan  $\tau_d$  adalah waktu diferensial. Jika pengendali PID diterapkan pada *plant* orde-2 tanpa tunda dalam suatu sistem pengaturan, maka diagram bloknya adalah seperti yang diperlihatkan pada Gbr. 17.

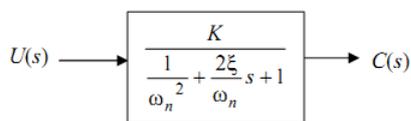


Gbr. 17 Pengendali PID diterapkan pada *plant* orde-2 tanpa tunda.

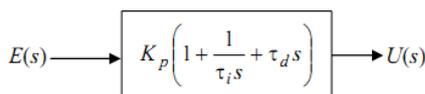
Berdasarkan Gbr. 16, parameter  $K_p$ ,  $\tau_i$ , dan  $\tau_d$  dapat diperoleh dengan menggunakan (17).

$$K_p = \frac{2\xi}{T^* \omega_n K} ; \tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} ; \tau_d = \frac{1}{2\xi \omega_n} \quad (17)$$

Model robot *wall following* hasil identifikasi ialah seperti dituliskan pada (18). Untuk dapat melakukan penalaan analitik, model identifikasi tersebut direduksi atau disederhanakan menjadi (19) dengan mengasumsikan *plant* robot *wall following* ini menjadi *plant* orde-2 tanpa tunda, dengan tujuan memudahkan dalam memperoleh parameter pengendali PID pada (17).

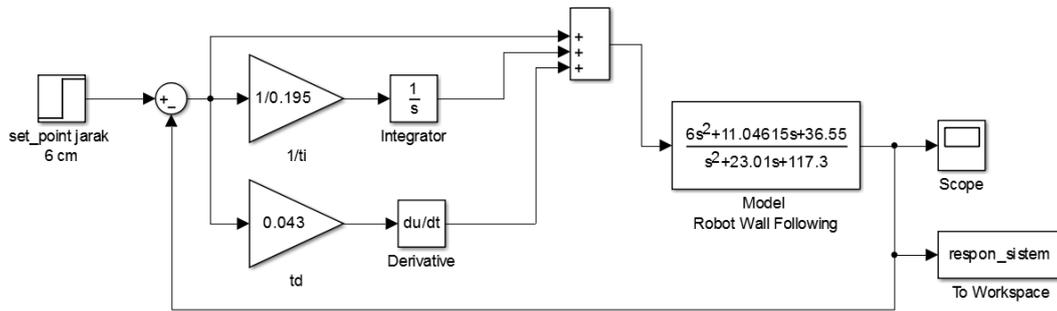


(a)

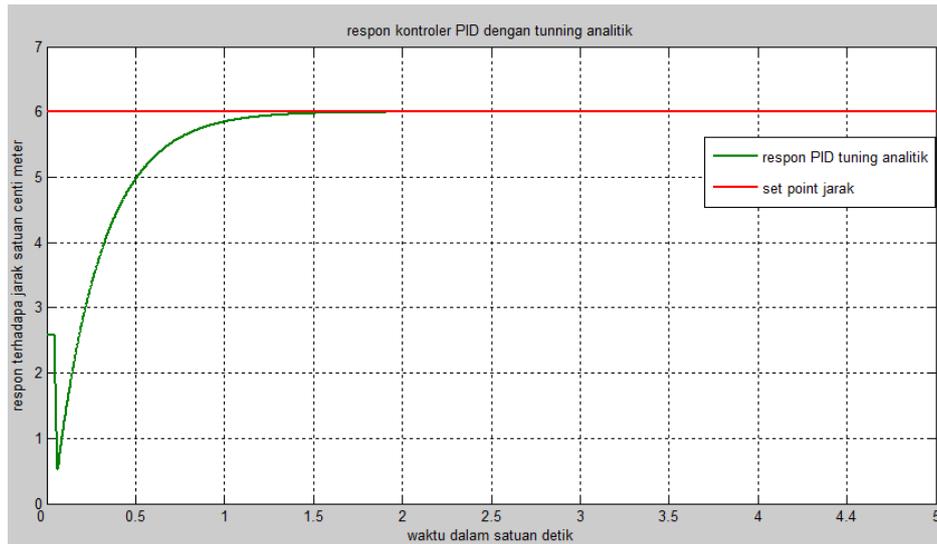


(b)

Gbr. 16(a) *Plant* orde-2 tanpa tunda, (b) Diagram blok pengendali PID.



Gbr. 18 Simulink hasil penalaan analitik pengendali PID.



Gbr. 19 Tanggapan hasil penalaan analitik pengendali PID.

$$tf = \frac{6s^2 + 11.04615s + 36.55}{s^2 + 23.01s + 117.3} \tag{18}$$

$$tf = \frac{36.55}{s^2 + 23.01s + 117.3} \tag{19}$$

TABEL II  
PARAMETER HASIL PENALAN ANALITIK PENGENDALI PID

Parameter	Hasil penalaan analitik
$K_p$	0,126
$\tau_i$	0,195
$\tau_d$	0,043

Selanjutnya dilakukan kalkulasi secara analitik untuk mendapatkan parameter pengendali PID dengan kondisi tanggapan sistem yang diinginkan, yaitu  $\tau^* = 0,25$  detik, sehingga diperoleh parameter  $K_p$ ,  $\tau_i$ , dan  $\tau_d$  seperti disajikan pada Tabel II. Konstanta waktu,  $\tau^*$ , adalah waktu yang dibutuhkan respons mulai  $t = 0$  sampai dengan respons mencapai 63,2% dari respons *steady state* [10].

Gbr. 18 dan Gbr. 19 adalah hasil tanggapan parameter penalaan analitik dengan menggunakan Simulink MATLAB. Saat nilai-nilai parameter analitik tersebut diterapkan pada simulasi Simulink, tanggapan waktu telah sesuai dengan yang diharapkan, yaitu  $\tau = 0,25$  detik dengan tanggapan tidak mengalami *overshoot*.

Makalah ini telah menyajikan skema dan langkah-langkah yang dilakukan dalam mengidentifikasi suatu model robot *wall following*. Pendekatan yang digunakan ialah tipe ARX orde-2. Hasil identifikasi ini digunakan untuk menala parameter pengendali PID dengan cara analitik. Parameter pengendali yang diperoleh ialah  $K_p = 0,126$ ,  $\tau_i = 0,195$ , dan  $\tau_d = 0,043$  agar tanggapan sistem memiliki  $\tau = 0,25$  detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Departemen Teknik Elektro dan Informatika Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada atas dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

REFERENSI

[1] Bojarski, M., Del Testa, D., Dworakowski, D., Firner, B., Flepp, B., Goyal, P., Jackel, L.D., Monfort, M., Muller, U., Zhang, J. and Zhang, X. (2016) End to End Learning for Self-Driving Cars, [Online], <http://arxiv.org/abs/1604.07316>, arXiv:arXiv:1604.07316., tanggal akses: 2017.

- [2] Kelly, A., Nagy, B., Stager, D. and Unnikrishnan, R., "Field and Service Applications-An Infrastructure-Free Automated Guided Vehicle Based on Computer Vision-An Effort to Make an Industrial Robot Vehicle that Can Operate Without Supporting Infrastructure", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 14, No. 3, hal 24-34, 2007.
- [3] Fahmizal, Surriani, A., Budianto, M. and Arrofiq, M., "Altitude Control of Quadrotor Using Fuzzy Self Tuning PID Controller", *IEEE 5th International Conference on Instrumentation, Control, and Automation (ICA)*, 2017, hal. 67-72.
- [4] Fahmizal, Chen TS, Chi SW, Kuo CH. "Fuzzy Controller Based Subsumption Behavior Architecture for Autonomous Robotic Wheelchair", *IEEE International Conference on Advanced Robotics and Intelligent Systems (ARIS)*, 2013, hal. 158-163.
- [5] Yata T., Kleeman L., Yuta S., "Wall Following Using Angle Information Measured by a Single Ultrasonic Transducer", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, Vol. 2, hal. 1590-1596.
- [6] Fahmizal, Kuo CH. "Development of a Fuzzy Logic Wall Following Controller for Steering Mobile Robots", *IEEE International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY)*, 2013, hal. 7-12.
- [7] Jung, I.K., Hong, K.B., Hong, S.K. and Hong, S.C., "Path Planning of Mobile Robot Using Neural Network", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 1999, Vol. 3, hal. 979-983.
- [8] L. Ljung, "Prediction Error Estimation Methods", *Circ. Syst. Signal Process*, Vol. 21, hal. 11-21, 2002.
- [9] G. H. Shakouri and H. R. Radmanesh, "Identification of a Continuous Time Nonlinear State Space Model for the External Power System Dynamic Equivalent by Neural Network," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 31, Issues 7-8, hal. 334-344, 2009.
- [10] L. A. Zadeh, "On the Identification Problem," *IEEE Transactions On Circuit Theory*, Vol. 3, No 4, hal. 277-281, 1956.
- [11] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, 2nd ed., New Jersey, USA: Prentice Hall, 1999.
- [12] Fahmizal, Setyawan, G., Arrofiq, M. and Mayub, A., "Logika Fuzzy pada Robot Inverted Pendulum Beroda Dua", *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, Vol. 4, No. 4, hal. 244-252, 2017.
- [13] H. J. Palanth, S. Lacy, J. B. Hoagg and D. S. Bernstein, "Subspacebased Identification for Linear and Nonlinear Systems," *IEEE International Conference on American Control Conference*, 2005, hal. 2320-2334.
- [14] Ling, T.G., Rahmat, M.F., Husain, A.R. and Ghazali, R., "System Identification of Electro-Hydraulic Actuator Servo System". *IEEE 4th International Conference On Mechatronics (ICOM)*, 2011, hal. 17.