

Implementasi Pengendali Logika *Fuzzy* pada Navigasi Robot Penjejak Dinding

Gunawan Dewantoro¹, Deddy Susilo², Prabata Pideksa Adi³

Abstract— Navigation is one of the important issues when designing autonomous robot. PID-based control methods have some difficulties in dealing with uncertain and nonlinear plants. The advantages of fuzzy logic as a control method compared to the conventional controllers are flexible and straightforward for complex systems. Upon implementing fuzzy logic based control method, the robots are supposed to navigate autonomously and track along the maze in various configurations effectively and efficiently. The maze used in this study is adopted from the rule of Trinity College Fire-Fighting Home Robot (TCFFHR) Contest 2016. The embedded processor utilized in this study is ATmega 128. The principal sensors are Sonar Range Finders (SRFs), supported with line sensors and infrared sensors. The experiments show that fuzzy logic controller gives less contact per turn ratio compared to Proportional-Derivative controller and hence is very effective to deal with various environment situations while navigating.

Intisari— Navigasi merupakan salah satu kendala utama dalam perancangan robot otomatis. Metode kontrol berbasis PID yang populer dipakai menemui sejumlah kendala pada sistem yang tidak pasti dan nonlinier. Keunggulan logika *fuzzy* sebagai metode kontrol dibandingkan kontroler konvensional adalah fleksibilitas dan kemudahan perancangan untuk sistem yang kompleks. Pada penerapan metode kontrol logika *fuzzy*, robot dirancang agar mampu bernavigasi secara otomatis dan dapat menelusuri peta lapangan pengujian dengan segala kondisi serta variasi secara efektif dan efisien. Peta lapangan yang digunakan sebagai pengujian adalah peta lapangan yang digunakan dalam Trinity College Fire-Fighting Home Robot (TCFFHR) Contest 2016. Untuk perangkat pemroses robot memakai mikrokontroler tipe ATmega128. Robot ini memakai sensor Sonar Range Finder (SRF) sebagai sensor utama serta menggunakan sensor *infrared* dan sensor garis. Dari hasil pengujian robot yang menggunakan metode kontrol *fuzzy* mampu bernavigasi dengan rasio kontak per putaran yang lebih baik dibandingkan metode kontrol *Proportional-Derivative* dan sangat efektif dalam menghadapi berbagai situasi lingkungan yang terjadi ketika bernavigasi.

Kata Kunci— kontroler logika *fuzzy*, navigasi, robot penjejak dinding.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robot berkembang dengan pesat dewasa ini. Robot telah masuk dalam berbagai segi kehidupan manusia, mulai dari robot rumah tangga sampai dalam dunia industri.

Para peneliti dari seluruh belahan dunia saat ini berlomba untuk mendesain robot, agar mampu melaksanakan berbagai tugas membantu pekerjaan manusia. Salah satu upaya pemerintah Indonesia sendiri mendorong perkembangan robot adalah dengan menyelenggarakan Kontes Robot Pemadam Api Indonesia (KRPAI). Dalam kontes ini robot dituntut untuk dapat bermanuver didalam lingkungan asing disertai rintangan, untuk dapat menemukan titik api.

Untuk membangun sebuah robot otomatis, navigasi merupakan salah satu masalah utama yang akan dihadapi para perancang. Saat ini terdapat banyak metode kontrol yang dapat digunakan. Pengendali berbasis logika *fuzzy* merupakan metode pengendali yang termasuk golongan *Artificial Intelligence*. Tidak seperti pengendali konvensional misalnya kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) yang hanya menggunakan perhitungan matematis, pengendali berbasis logika *fuzzy* menggabungkan perhitungan matematis dan juga algoritma untuk mengendalikan perilaku robot terhadap dinamika lingkungan.

Sebagian besar dari metode kontrol yang saat ini digunakan masih berbasis PID. Dalam kenyataannya metode kontrol berbasis PID tersebut menemui sejumlah kendala antara lain model matematis yang tidak mencerminkan keadaan sesungguhnya [1]. Dalam metode PID, pemodelan sistem sangatlah penting. Melalui pemodelan dapat diketahui karakteristik sistem serta berguna dalam proses penalaan PID. Namun dalam praktiknya model matematis sistem sulit untuk dihasilkan karena beberapa kendala antara lain sering kali perancang menemui fenomena yang kurang dimengerti terjadi di dalam sistem, pemilihan parameter yang kurang akurat, dan kompleksitas sistem yang dimodelkan. Walaupun model matematis pada akhirnya didapatkan seringkali para peneliti menghadapi model matematis yang kompleks serta sulit diaplikasikan dalam alat karena keterbatasan pemroses. Cara lain yang dapat diambil adalah menyederhanakan sistem dengan mengabaikan aspek-aspek tertentu karena diasumsikan pada kondisi ideal.

Selain itu model kontrol berbasis PID tidak handal pada sistem yang tidak linier [2]. Dalam robot gaya gesek pada roda dan motor adalah salah satu aspek yang menyebabkan sistem tidak linier. Gaya gesek ini sulit untuk diprediksi dan sangat bervariasi pada beban robot itu sendiri. Pada perilaku sistem yang tidak linier sulit untuk melakukan penalaan PID. Pengendali berbasis *fuzzy* merupakan pengendali *non-*

^{1,2} Dosen, Prodi Teknik Elektro Universitas Kristen Satya Wacana, Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga 50711 Indonesia (telp: 0298-321212; fax: 0298-321212; e-mail: gunawan.dewantoro@staff.uksw.edu¹, deddy.susilo@ymail.com²)

³Mahasiswa, Prodi Teknik Elektro Universitas Kristen Satya Wacana, Jl. Diponegoro 52-60 Salatiga 50711 Indonesia (telp: 0298-321212; fax: 0298-321212; e-mail: prabataadi@gmail.com)

analytical [3]. Keandalan metode *fuzzy* tidak bergantung pada model matematis sistem yang dikendalikan namun bergantung pada kegiatan percobaan dan juga pengalaman yang dimiliki perancang. Metode kontrol berbasis *fuzzy* juga menjadi salah satu alternatif dalam menghadapi sistem yang tidak linier. Dalam memproses setiap masukan dari lingkungan, metode *fuzzy* menggunakan *range-to-point control*. Setiap parameter (*input/output*) diklasifikasikan dalam variabel linguistik. Nilai input dari sensor dalam bentuk variabel linguistik ini akan di proses di dalam aturan kontrol yang dibuat perancang untuk menentukan nilai output yang sesuai. Aturan kontrol inilah yang menjadi kekuatan metode *fuzzy* dalam menghadapi sistem yang tidak linier.

Dalam banyak penelitian model sistem berbasis *fuzzy* lebih handal daripada model sistem berbasis PID [4],[5]. Pengendali berbasis *fuzzy* memiliki *overshoot* yang rendah dan *error* yang kecil dibandingkan pengendali berbasis PD ataupun PID. Dalam penelitian [6],[7] juga menunjukkan bahwa metode kontrol berbasis logika *fuzzy* juga dapat bekerja secara adaptif sehingga dapat menyesuaikan dengan keadaan input yang selalu mengalami perubahan.

Dalam artikel ini kami mengimplementasikan kendali logika *fuzzy* pada robot beroda. Salah satu faktor penting dalam keberhasilan robot menjalankan tugasnya adalah navigasi. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini mencoba untuk mengklasifikasikan *error* pada proses fuzzifikasi di mana sensor *infrared* dan sensor garis ditambahkan untuk melengkapi nilai klasifikasi. Selain itu, input yang digunakan tidak menggunakan perubahan *error*, melainkan *error* pada SRF kanan, kiri dan depan. Kelebihan dari logika *fuzzy* ini adalah pengendali bekerja *range-to-point* di mana rentang data tertentu akan diolah secara matematis serta digabungkan dengan algoritma tertentu (metode *if-then*) yang dibuat dalam aturan kontrol (*rule base*). Prosesor ATmega 128 digunakan untuk mengeksekusi semua perintah meliputi akuisisi data, fuzzifikasi, inferensi, defuzzifikasi, dan menggerakkan aktuator. Prosesor ini sengaja dipilih karena memiliki kapasitas *memory* yang memadai untuk mengakses data menggunakan *linked-list*. Dengan mengetahui rentang data pembacaan sensor pada objek di lapangan pertandingan, penggunaan logika *fuzzy* sebagai basis kontrol akan lebih handal selama melakukan navigasi.

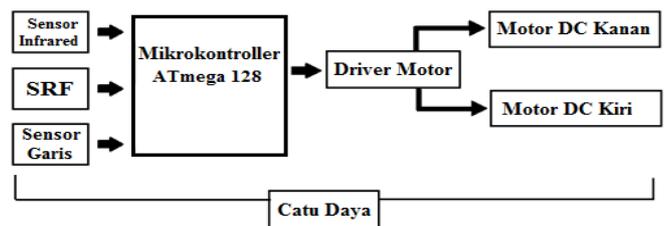
II. PERANCANGAN

Sebagaimana sebuah robot dirancang, bagian robot umumnya terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Titik berat penelitian ini adalah pada pengembangan dan evaluasi kinerja perangkat lunak khususnya metode navigasi robot. Meskipun demikian, bagian perangkat keras robot tetap akan dibahas secara ringkas untuk memberikan pemahaman yang lebih utuh.

A. Perangkat Keras Robot

Perangkat pemroses utama robot menggunakan mikrokontroler ATmega 128 yang bertugas mengolah data sensor dan memproses logika *fuzzy* untuk mengontrol

pergerakan robot seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Sensor yang digunakan pada robot ini yaitu, sensor jarak SRF, sensor *infrared*, dan sensor garis. Sensor jarak SRF digunakan sebagai pengukur jarak dinding dengan robot ketika robot bernavigasi menelusuri peta lapangan. Sensor *infrared* digunakan untuk mendeteksi objek pada titik buta robot yang tidak terjangkau oleh sensor SRF. Sedangkan sensor garis digunakan untuk membantu pergerakan robot ketika memasuki ruangan. Kerangka robot menyerupai bentuk sebuah mobil mainan, berbahan dasar plat *acrylic* yang memiliki 2 buah motor DC sebagai penggerak utama dengan kecepatan rotasi 200 rpm dan memiliki torsi 1,3 kg-cm untuk setiap motornya. Dimensi robot yang dibuat adalah ($p \times l \times t$) = $24 \times 21 \times 27$ cm. Sedangkan berat keseluruhan robot adalah 1,375 kg seperti terlihat pada Gambar 2.

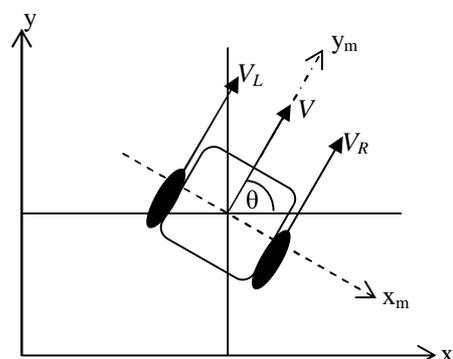


Gambar 1: Blok diagram perangkat keras robot



Gambar 2: Bentuk fisik robot

Untuk mengemudikan robot beroda ini digunakan jenis kemudi diferensial yang memiliki model kinematika seperti ditunjukkan Gambar 3.



Gambar 3: Model arsitektur kemudi diferensial



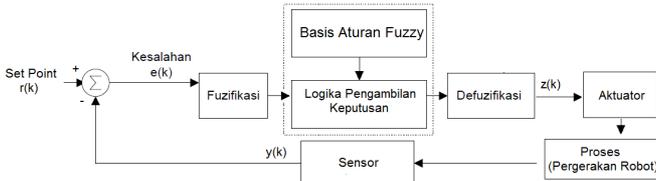
Persamaan kinematika pada model di atas adalah:

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

di mana ω adalah kecepatan sudut robot

B. Perangkat Lunak Robot

Dalam perancangan robot penulis menggunakan metode *fuzzy* untuk mengendalikan robot. Dalam penerapan logika *fuzzy* ada beberapa tahapan yang harus dilalui untuk mengolah input data sensor sebelum akhirnya dihasilkan sinyal *output* ke aktuator. Gambar 4 menunjukkan tahapan pengontrolan menggunakan metode *fuzzy*.



Gambar 4: Mekanisme kendali logika *fuzzy* kalang tertutup

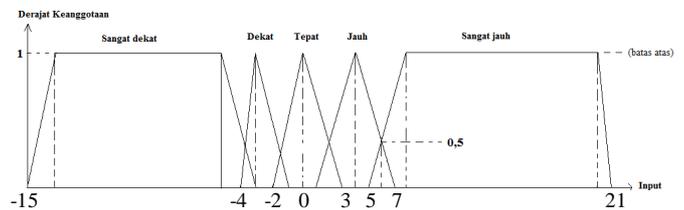
di mana $r(k)$ adalah jarak yang diinginkan, $z(k)$ adalah nilai *crisp* proses defuzzifikasi, $y(k)$ adalah jarak aktual, dan $e(k)$ adalah selisih antara $r(k)$ dan $y(k)$. Dikarenakan metode *fuzzy* bekerja berdasarkan himpunan-himpunan, maka data input sensor (input *error*) yang basisnya berbeda-beda harus diseragamkan dengan cara klasifikasi. Hasil proses klasifikasi ini akan didapatkan data *error* yang akan diolah oleh logika *fuzzy*. Tabel I menunjukkan klasifikasi data sensor yang digunakan pada robot. Tabel I menunjukkan bahwa semakin positif hasil klasifikasi nilai sensor maka semakin jauh jarak dinding dengan badan robot, sebaliknya semakin negatif hasil nilai klasifikasi maka semakin dekat jarak dengan dinding. Nilai aktual sensor ini merupakan data numerik keluaran SRF dan tidak memiliki satuan karena masih berupa data mentah.

C. Fuzzifikasi

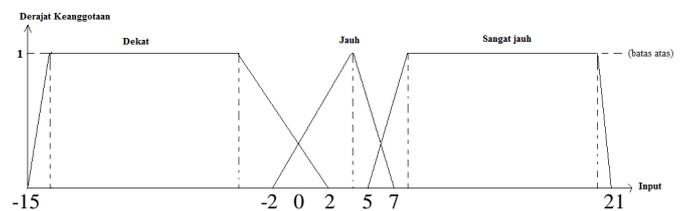
Fuzzifikasi adalah proses mentransformasikan data tegas (*crisp data*) masukan menjadi variabel linguistik (himpunan *fuzzy*), dengan derajat keanggotaan tertentu atau bisa disebut nilai *fuzzy* masukan. Dalam proses ini nilai *fuzzy* masukan yang dihasilkan dipengaruhi oleh rancangan fungsi keanggotaan input yang digunakan. Dalam penelitian ini fungsi keanggotaan input yang dirancang dan digunakan dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Robot ini menggunakan tiga buah masukan yang digunakan untuk menentukan posisinya pada peta lapangan. Masing-masing nilai masukan mempunyai fungsi keanggotaannya masing-masing. Contoh penggunaan fungsi keanggotaan ini misalkan *error* kanan memiliki nilai tegas dari sensor senilai +6 maka hasil dari proses fuzzifikasi adalah derajat keanggotaan 0,5 (skala 0-1) untuk himpunan “Jauh” dan “Sangat Jauh”. Sedangkan untuk himpunan yang lain derajat keanggotaannya adalah 0.

TABEL I
KLASIFIKASI NILAI INPUT SENSOR

Nilai Aktual Sensor (tanpa satuan)	Nilai Klasifikasi Sensor		
	Kiri	Depan	Kanan
$SRF \leq (\text{Setpoint}-130)$	-7	-7	-7
$(\text{Setpoint}-130) < SRF \leq (\text{Setpoint} -110)$	-6	-6	-6
$(\text{Setpoint} -110) < SRF \leq (\text{Setpoint} -90)$	-5	-5	-5
$(\text{Setpoint} -90) < SRF \leq (\text{Set Point}-70)$	-4	-4	-4
$(\text{Setpoint} -70) < SRF \leq (\text{Set Point}-50)$	-3	-3	-3
$(\text{Setpoint} -50) < SRF \leq (\text{Set Point}-30)$	-2	-2	-2
$(\text{Setpoint} -30) < SRF \leq (\text{Set Point}-10)$	-1	-1	-1
$(\text{Setpoint} -10) < SRF \leq (\text{Set Point})$	0	0	0
$(\text{Setpoint}) < SRF \leq (\text{Set Point}+10)$	0	0	0
$(\text{Setpoint} +10) < SRF \leq (\text{Setpoint} +30)$	1	1	1
$(\text{Setpoint} +30) < SRF \leq (\text{Set Point}+50)$	2	2	2
$(\text{Setpoint} +50) < SRF \leq (\text{Set Point}+70)$	3	3	3
$(\text{Setpoint} +70) < SRF \leq (\text{Set Point}+90)$	4	4	4
$(\text{Setpoint} +90) < SRF \leq (\text{Setpoint} +110)$	5	5	5
$(\text{Setpoint} +110) < SRF \leq (\text{Setpoint} +130)$	6	6	6
$(\text{Setpoint} +130) < SRF \leq (\text{Setpoint} +150)$	7	7	7
$(\text{Setpoint} +150) < SRF \leq (\text{Setpoint} +170)$	8	8	8
$(\text{Setpoint} +170) < SRF \leq (\text{Setpoint} +190)$	9	9	9
$(\text{Setpoint} +190) < SRF \leq (\text{Setpoint} +210)$	10	10	10
$(\text{Setpoint} +210) < SRF \leq (\text{Setpoint} +230)$	11	11	11
$(\text{Setpoint} +230) < SRF \leq (\text{Setpoint} +250)$	12	12	12
$(\text{Setpoint} +250) < SRF \leq (\text{Setpoint} +270)$	13	13	13
$(\text{Setpoint} +270) < SRF \leq (\text{Setpoint} +290)$	14	14	14
$(\text{Setpoint} +290) < SRF \leq (\text{Setpoint} +310)$	15	15	15
$(\text{Setpoint} +310) < SRF \leq (\text{Setpoint} +330)$	16	16	16
$(SRF \geq \text{Set Point}+330)$	20	20	20
Sensor IR Kanan ==0	-	-	-7
Sensor IR Kiri ==0	-7	-	-
Sensor Garis Kanan ≥ 500	-	-	0
Sensor Garis Kiri ≥ 500	0	-	-



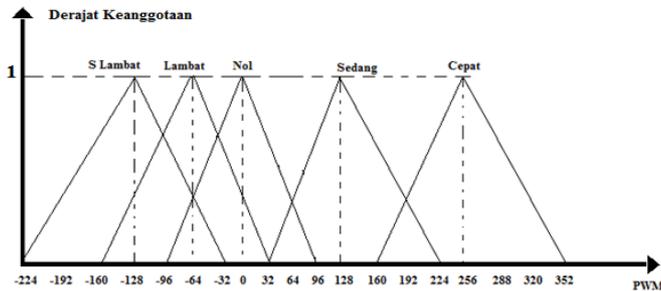
Gambar 5: Fungsi keanggotaan input *error* kanan dan kiri



Gambar 6: Fungsi keanggotaan input *error* depan

Dalam perancangan robot ini digunakan dua buah fungsi *fuzzy output* yaitu fungsi keanggotaan keluaran *Pulse Width Modulation* (PWM) roda kanan dan fungsi keanggotaan output PWM roda kiri yang ditunjukkan pada Gambar 7.

Sumbu mendatar merupakan sumbu PWM yaitu nilai-nilai yang digunakan untuk mengontrol kecepatan motor DC. Misal jika nilai PWM untuk memutar roda senilai 256, maka derajat keanggotaannya adalah 0,5 untuk himpunan ‘‘Cepat’’.



Gambar 7: Fungsi keanggotaan output PWM roda kanan dan kiri

D. Basis aturan dan logika pengambilan keputusan

Pada tahapan ini, sistem menalar nilai masukan untuk menentukan nilai keluaran (*fuzzy output*) sebagai bentuk pengambil keputusan [5]. Tahap ini mengkombinasikan fungsi keanggotaan dan basis aturan dalam menentukan keluaran *fuzzy*. Tiap aturan akan dievaluasi sehingga hasil penilaian dan pengambilan keputusan merupakan kumpulan atau korelasi antar aturan. Pada perancangan robot penulis menggunakan metode *max-min inference* dalam mengevaluasi tiap aturan *fuzzy* [8].

Dalam penelitian ini, basis aturan kontrol dibuat berdasarkan pengetahuan dan pengalaman perancang dalam dinamika pergerakan robot penjejak dinding. Sebuah aturan kendali *fuzzy* adalah aturan dalam bentuk ‘‘jika ... maka ...’’ (*IF-THEN*) seperti berikut [9]:

- Aturan 1 : Jika $x = A1$ dan $y = B1$ maka $z = C1$
- Aturan 2 : Jika $x = A2$ dan $y = B2$ maka $z = C2$

Aturan yang ditetapkan digunakan untuk menspesifikasikan hubungan antara himpunan *fuzzy* masukan dan himpunan *fuzzy* keluaran. Robot ini memiliki dua mode navigasi yaitu *follow* kanan dan kiri. Untuk *follow* kanan robot akan menjelajahi ruangan dengan arah berlawanan arah jarum jam sebaliknya untuk *follow* kiri robot akan menjelajahi ruangan searah jarum jam. Untuk *follow* kanan robot hanya menggunakan input *error* depan dan kanan. Sedangkan untuk *follow* kiri robot hanya menggunakan input *error* depan dan kiri. Tabel II, III, IV, dan V menunjukkan rancangan aturan kontrol dalam navigasi robot penjejak dinding ini.

TABEL III
TABULASI ATURAN KONTROL UNTUK RODA KANAN SAAT FOLLOW KANAN

<i>Error Depan</i> \ <i>Error Kanan</i>	Dekat	Jauh	Sangat Jauh
Sangat Dekat	Cepat	Sedang	Cepat
Dekat	Cepat	Cepat	Cepat
Tepat	Cepat	Sedang	Cepat
Jauh	Cepat	Nol	Sedang

Gunawan Dewantoro: Implementasi Pengendali Logika Fuzzy...

Sangat Jauh	Cepat	Lambat	Nol
-------------	-------	--------	-----

TABEL III
TABULASI ATURAN KONTROL UNTUK RODA KIRI SAAT FOLLOW KANAN

<i>Error Depan</i> \ <i>Error Kanan</i>	Dekat	Jauh	Sangat Jauh
Sangat Dekat	S Lambat	Lambat	Lambat
Dekat	S Lambat	Nol	Sedang
Tepat	S Lambat	Sedang	Cepat
Jauh	S Lambat	Cepat	Cepat
Sangat Jauh	S Lambat	Cepat	Cepat

TABEL III
TABULASI ATURAN KONTROL UNTUK RODA KANAN SAAT FOLLOW KIRI

<i>Error Depan</i> \ <i>Error Kiri</i>	Dekat	Jauh	Sangat Jauh
Sangat Dekat	S Lambat	Lambat	Lambat
Dekat	S Lambat	Nol	Sedang
Tepat	S Lambat	Sedang	Cepat
Jauh	S Lambat	Cepat	Cepat
Sangat Jauh	S Lambat	Cepat	Cepat

TABEL V
TABULASI ATURAN KONTROL UNTUK RODA KIRI SAAT FOLLOW KIRI

<i>Error Depan</i> \ <i>Error Kiri</i>	Dekat	Jauh	Sangat Jauh
Sangat Dekat	Cepat	Sedang	Cepat
Dekat	Cepat	Cepat	Cepat
Tepat	Cepat	Sedang	Cepat
Jauh	Cepat	Nol	Sedang
Sangat Jauh	Cepat	Lambat	Nol

Contoh kasus dalam penggunaan aturan kontrol saat *follow* kanan:

IF *Error Kanan* ‘‘Tepat’’ AND *Error Depan* ‘‘Sangat Jauh’’ THEN PWM Roda Kanan IS ‘‘Cepat’’

E. Defuzifikasi

Proses defuzifikasi bertujuan untuk mengkonversi nilai *fuzzy output* kembali menjadi data keluaran tegas (*crisp output*) atau keluaran klasik kepada objek kontrol [2]. Dalam perancangan robot metode defuzzifikasi yang digunakan perancang adalah metode *center of gravity*. Metode ini dirumuskan pada (2):

$$Z_{COG} = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_{fo}(z_j) \cdot z_j}{\sum_{j=1}^n \mu_{fo}(z_j)} \quad (2)$$

Di mana $\mu_{fo}(z_j)$ merepresentasikan luasan area dari fungsi himpunan yang ada pada fungsi *fuzzy output* dengan nilai *centroid point Z* yang ke-j. *Centroid point* adalah titik tengah sumbu x (sumbu mendatar) yang ada pada masing-masing himpunan pada fungsi *fuzzy output*.



III. PENGUJIAN DAN ANALISIS

A. Pengujian Sensor SRF

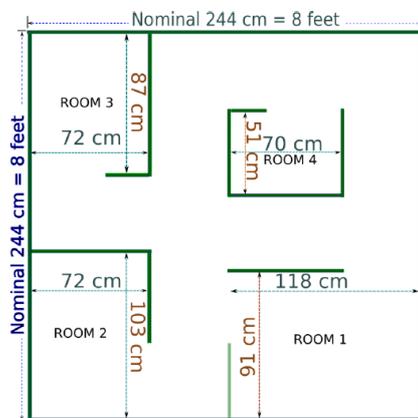
Dalam pengujian SRF ini, sensor akan diletakkan berhadapan lurus dengan dinding atau objek penghalang yang cukup lebar kemudian divariasikan jaraknya pada rentang jarak 3 cm sampai 400 cm. Nilai yang dicatat dalam pengujian ini adalah lamanya waktu sinyal *echo* saat dalam kondisi *high* untuk setiap variasi jarak. Pengujian dilakukan menggunakan timer mikrokontroler dengan frekuensi 172,8 kHz. Dari pengujian ini, nilai SRF cukup linier dengan rata-rata untuk kenaikan 1 cm maka nilai timer naik 10,2 poin seperti ditunjukkan Tabel VI.

TABEL VI
HASIL PENGUJIAN SRF

Jarak Dari Tembok	Nilai Timer
400 cm	4136
300 cm	3025
200 cm	2038
100 cm	1014
60 cm	606
50 cm	503
40 cm	404
30 cm	302
20 cm	206
10 cm	108
3 cm	40

B. Pengujian Navigasi Follow Kanan dan Follow Kiri

Dalam pengujian ini robot akan bernavigasi mengelilingi peta lapangan selama 3 menit. Percobaan dilakukan sebanyak 60 kali untuk masing masing mode navigasi dan dilakukan pada peta TCFHR 2016 seperti ditunjukkan Gambar 8.



Gambar 8: Bentuk dan ukuran lapangan pengujian

Selama robot menjelajahi peta terdapat beberapa parameter sebagai acuan keberhasilan navigasi. Berikut penjabarannya :

1. Jumlah kontak dengan dinding selama 3 menit (K)

Ketika bernavigasi, robot diharapkan untuk tidak melakukan kontak dengan dinding. Semakin sedikit kontak dengan dinding, maka kehandalan navigasi robot semakin baik.

2. Jumlah kontak dengan dinding yang panjang goresan lebih dari 2 cm (K2)

Dalam aturan TCFHR 2016, jika robot melakukan kontak dengan dinding dan mengakibatkan goresan pada dinding dengan panjang goresan lebih dari 2 cm maka akan dikenakan penalti. Maka jika robot tidak menggores dinding maka navigasi dianggap berhasil.

3. Jumlah putaran dalam 3 menit (P)

Semakin banyak putaran yang dapat dilakukan robot, maka kehandalan navigasi akan semakin baik.

4. Apakah semua ruangan terjelajahi dalam waktu kurang dari 3 menit? (TR)

Jika terjelajahi semua maka akan terisi "Ya" dan jika tidak terjelajahi semua akan terisi "Tidak". Selama bernavigasi, robot harus dapat menjelajahi semua ruangan dalam peta pengujian.

5. Apakah sebelum 3 menit robot terjebak? (TJ)

Jika terjebak maka akan terisi "Ya" dan jika tidak terjebak akan terisi "Tidak". Kondisi robot yang terjebak akan sangat merugikan dalam perlombaan. Definisi terjebak disini adalah robot tidak bergerak atau melakukan gerakan yang sama terus menerus pada sebuah tempat.

Hasil dari pengujian ini dapat dilihat pada Tabel VII dan Tabel VIII, terlihat bahwa navigasi robot yang menggunakan logika *fuzzy* memiliki performa yang lebih baik dibandingkan metode kontrol *Proportional Derivative* (PD).

TABEL VII

PERBANDINGAN NILAI RATA-RATA PARAMETER PENGUJIAN NAVIGASI FOLLOW KANAN

	Metode PD	Metode <i>Fuzzy</i>
K (kontak/putaran)	2,367	0,66
K2 (kontak/putaran)	0	0
P (putaran)	4,9475	5,5
TR	Ya	Ya
TJ (kali terjebak)	2	0

TABEL VIII

PERBANDINGAN NILAI RATA-RATA PARAMETER PENGUJIAN NAVIGASI FOLLOW KIRI

	Metode PD	Metode <i>Fuzzy</i>
K (kontak/putaran)	3,16	1,75
K2 (kontak/putaran)	0	0
P (putaran)	4,91	5,5
TR	Ya	Ya
TJ (kali terjebak)	3	0

C. Pengujian Pergerakan Robot Menuju Set Point

Pengujian selanjutnya adalah menguji navigasi robot pada lintasan lurus untuk melihat pola gerakan robot dan waktu yang diperlukan untuk menuju *setpoint*. Robot ini diharapkan mampu melakukan navigasi pada lintasan lurus dengan jarak

10 cm dari tembok lapangan. Variasi pengujian dilakukan dengan memberikan *offset* pada kondisi start awal robot sebelum bernavigasi, yaitu pada 20 cm jarak badan robot dari tembok (*setpoint* +10cm) dan 0 cm (*setpoint* -10 cm) seperti yang terlihat pada Gambar 9. Tabel IX menunjukkan waktu rata-rata menuju *steady state* dengan *offset* awal 0 cm dan 20 cm. Terlihat bahwa saat bernavigasi, robot mencapai *steady state* sesuai dengan *setpoint* yaitu 10 cm dengan waktu rata-rata 2,9 detik. Dalam metode kontrol logika *fuzzy*, untuk meningkatkan respons robot terhadap *error* dapat dilakukan dengan merancang fungsi keanggotaan input di mana transisi antar himpunan dibuat curam (meningkatkan kemiringan *slope*).

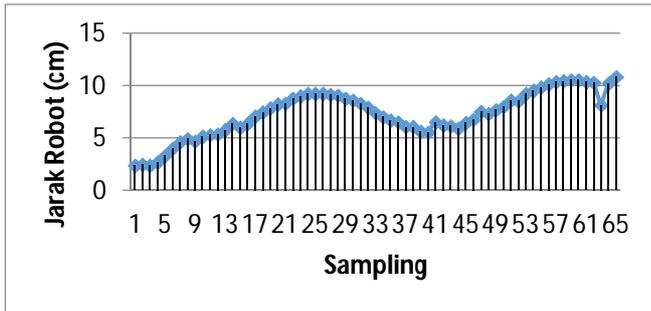
yaitu kurang dari 1 kontak/putaran sedangkan untuk *follow* kiri rasio kurang dari 2 kontak/putaran. Robot dapat menjelajahi semua ruangan tanpa terjebak dan tanpa mengakibatkan goresan yang panjangnya lebih dari 2 cm pada dinding. Dalam waktu 3 menit jumlah putaran minimal mengelilingi lapangan yang dapat dilakukan robot adalah 5 kali putaran. Dalam bernavigasi ketika robot mencapai *steady state* sesuai dengan *setpoint* yaitu 10 cm dengan waktu rata-rata 2,9 detik. Dari hasil pengujian, metode ini dapat mengurangi jumlah kontak per putaran dibandingkan metode PD.

UCAPAN TERIMA KASIH

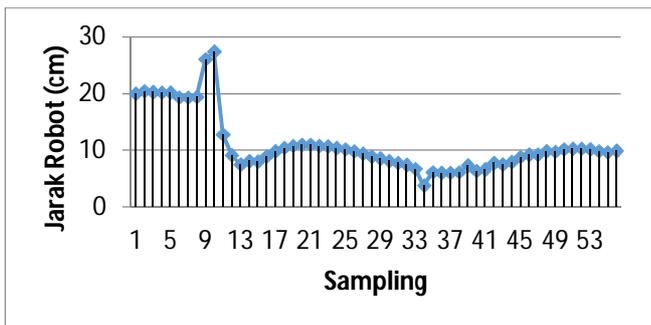
Penulis mengucapkan terima kasih kepada DRPM Dikti pada skema Penelitian Dosen Pemula 2015 atas segala dukungan yang diberikan.

REFERENSI

- [1] D. Hanafi, M. Fauzi, dan M. Yusof, *Wall Follower Autonomous Robot Development Applying Fuzzy Incremental Controller*, Intelligent Control and Automation, vol.4, hal. 18-25, 2013.
- [2] A. Ilyas, S. Jahan, dan M. Ayyub, *Tuning Of Conventional PID and Fuzzy Logic Control Using Different Defuzzification Technique*, International Journal of Scientific & Technology Research, vol.2 (1), Jan. 2013.
- [3] V. M. Peri dan D. Simon, *Fuzzy logic control for an autonomous robot*, Proc. NAFIPS 2005, hal. 337 – 342.
- [4] G. Dewantoro dan Y. L. Kuo, *Robust speed-controlled permanent magnet synchronous motor drive using fuzzy logic controller*, Proc. FUZZ-IEEE 2011, hal. 884-888.
- [5] Y. Bai, H. Zhuang, D. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. ser. Advances in Industrial Control, Springer, 2006.
- [6] M. Hunt dan C. Daly, *Autonomous mobile robot navigation using Fuzzy Logic Control*, M.Sc. thesis, Dublin City University, Jun. 1998.
- [7] I. G. M. W. Meindra, R. S. Hartati, Linawati. *Peramalan beban listrik harian dengan metode Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Majalah Ilmiah Teknologi Elektro vol. 13 (1), Jan. 2014.
- [8] A. Septiaji, I. Setiawan, dan Darjat. *Perancangan robot mobil penjejak dinding koridor menggunakan kendali logika fuzzy*, M.T. thesis, Universitas Diponegoro, Indonesia, 2011.
- [9] N. K. Ariasih, I. P. A. Bayupati, dan I. K. Gede. *Sistem pendukung pemilihan lokasi TPA sampah menggunakan metode min_max inference fuzzy*. Majalah Ilmiah Teknologi Elektro vol. 14 (1), Jan. 2015.



(a)



(b)

Gambar 9: Jarak robot ke dinding ketika robot bernavigasi dengan posisi start (a) 0 cm dan (b) 20 cm

TABEL IX

WAKTU RATA-RATA MENUJU *STEADY STATE* DARI *OFFSET* 0 CM DAN 20 CM

Mode Navigasi	Waktu yang diperlukan
<i>Follow</i> kanan (0cm)	3,316 sec
<i>Follow</i> kanan (20cm)	4,35 sec
<i>Follow</i> kiri (0cm)	2,066 Sec
<i>Follow</i> kiri (20cm)	2,116 Sec

IV. KESIMPULAN

Navigasi robot yang berbasis kendali logika *fuzzy* telah berhasil direalisasikan. Dalam melakukan navigasi menjelajahi peta lapangan selama 3 menit, rasio kontak dengan dinding dengan jumlah putaran untuk *follow* kanan

