

Sistem Positioning Pada Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot Menggunakan Metode Gyrodometry Berbasis PI-Fuzzy Controller

Kris Nurariyanto

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: kris.18029@mhs.unesa.ac.id

Muhamad Syariffuddin Zuhrie, Bambang Suprianto, Puput Wanarti Rusimamto

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail: zuhrie@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, puputwanarti@unesa.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi pada era sekarang ini sangat berkembang pesat, khususnya pada bidang robotika. Jenis robot beroda digunakan dalam penelitian ini, yang di mana memanfaatkan empat roda omni dengan bentuk *frame* "X" sebagai penggerakannya. Salah satu sistem yang sangat berpengaruh pada robot otonom yaitu sistem *positioning* robot. Dengan robot dapat mengetahui posisi keberadaannya sekarang, maka akan memudahkan langkah pergerakan robot selanjutnya. Pada penelitian ini menerapkan sistem *positioning* robot, yaitu dengan mengontrol kecepatan roda omni sehingga robot dapat berpindah posisi sesuai dengan koordinat yang sudah ditentukan. Metode *gyrodometry* digunakan dalam menentukan nilai posisi koordinat robot, yang di mana metode ini menggunakan data dari dua kombinasi sensor yaitu *gyroscope* dan *rotary encoder*. Sensor *gyroscope* yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik karena memiliki nilai RMSE sebesar $0,52^\circ$ atau kurang dari 1° . Sedangkan pada pengujian *gyrodometry* dilakukan dengan dua metode pengujian dan dua kontrol pengendali. Pada pengujian *gyrodometry home to point* menghasilkan nilai RMSE dengan kontrol PI-Fuzzy sebesar 3,48 cm untuk sumbu x dan 3,35 cm untuk sumbu y, sedangkan dengan kontrol *Fuzzy Logic Controller* sebesar 7,96 cm untuk sumbu x dan 6,21 cm untuk sumbu y. Untuk pengujian *gyrodometry point to point* menghasilkan nilai RMSE dengan kontrol PI-Fuzzy sebesar 5,48 cm untuk sumbu x dan 4,54 cm untuk sumbu y, sedangkan dengan kontrol *Fuzzy Logic Controller* sebesar 6,48 cm untuk sumbu x dan 6,71 cm untuk sumbu y.

Kata Kunci: Gyrodometry, Positioning, Gyroscope, Rotary Encoder PI-Fuzz, Robot.

Abstract

The development of technology in the current era is growing rapidly, especially in the field of robotics. The type of wheeled robot is used in this study, which utilizes four omni wheels with an "X" shape frame as the driving force. One system that is very influential on autonomous robots is the robot positioning system. With the robot being able to find out where it is now, it will make it easier for the next robot to move. In this study, a robot positioning system is applied, namely by controlling the speed of the omni wheel so that the robot can move positions according to predetermined coordinates. The gyrodometry method is used to determine the coordinate position of the robot, in which this method uses data from two combinations of sensors, namely a gyroscope and a rotary encoder. The gyroscope sensor used has a fairly good level of accuracy because it has an RMSE value of 0.52° or less than 1° . Meanwhile, the gyrodometry test was carried out with two test methods and two controller controls. In the home to point gyrodometry test, the RMSE value with the PI-Fuzzy control is 3.48 cm for the x-axis and 3.35 cm for the y-axis, while with the Fuzzy Logic Controller it is 7.96 cm for the x-axis and 6.21 cm. for the y-axis. For point-to-point gyrodometry testing, the RMSE value with the PI-Fuzzy control is 5.48 cm for the x-axis and 4.54 cm for the y-axis, while with the Fuzzy Logic Controller it is 6.48 cm for the x-axis and 6.71 cm for the y-axis.

Keywords: Gyrodometry, Positioning, Gyroscope, Rotary Encoder PI-Fuzzy, Robot.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada era Industri 4.0 semakin

pesat, khususnya pada bidang robotika. Penggunaan robotika sendiri sudah banyak memberikan manfaat bagi

kehidupan manusia baik dalam mempermudah pekerjaan dan meningkatkan kecepatan produktifitas. Sudah berbagai macam robot dengan bentuk, fungsi, dan penggerak berupa kaki maupun roda yang telah tercipta. Robot beroda dengan roda biasa sebagai penggeraknya memiliki keterbatasan dalam pergerakannya sehingga membuat fungsi pergerakan robot jadi kurang maksimal terutama pada robot yang membutuhkan manuver ke berbagai arah. Oleh karena itu penggunaan *omnidirectional wheels* menjadi semakin populer di robotika, karena memungkinkan robot bergerak dalam lintasan lurus dari posisi satu menuju posisi lainnya tanpa perlu berbelok ke kiri atau ke kanan (Ignatiev dkk, 2016).

Dengan penggunaan *Four-Wheeled Omnidirectional*, robot dapat melakukan pergerakan hingga lebih dari 8 arah (kanan, kiri, maju, mundur, serong kanan atas, serong kanan bawah, serong kiri atas, serong kiri bawah) tanpa perlu menyesuaikan arah hadapnya. Penggunaan *Four-Wheeled Omnidirectional* pada robot akan membuat pengontrolannya menjadi lebih sulit dibandingkan dengan robot yang hanya menggunakan dua roda bias yang terpasang satu sumbu. Sebuah pengontrol yang mampu mengatur arah dan kecepatan pada tiap roda dibutuhkan dalam pengendalian robot dengan *Four-Wheeled Omnidirectional* sehingga robot dapat bergerak lurus (Priyambudi dkk, 2018).

Sistem pengendalian Proporsional Integral (PI) suatu sistem kontrol yang umum digunakan pada sistem yang memanfaatkan umpan balik dalam mengatur kecepatan, seperti pada industri karena kemampuannya yang dapat mengendalikan *linear plant*. Perubahan kecepatan yang diakibatkan dari respon sistem penggerak merupakan salah satu indikator kinerja dari kontrol kecepatan. Respon sistem yang diharapkan dalam pengendalian yaitu memiliki kecepatan respon yang bagus dalam mencapai *settling time* dan tanpa adanya respon *overshoot*. Tetapi pada PI *controller* tidak dapat diatur agar mendapatkan respon seperti yang diharapkan. Maka *controller* cerdas seperti *Fuzzy Logic Controller* dapat digunakan untuk peningkatan respon kecepatan. Logika fuzzy sendiri merupakan penggabungan kecerdasan manusia ke dalam proses kontrol sistem, sehingga akan memberikan respon dinamik yang lebih baik pada sistem.

Dengan menggunakan switch, *fuzzy controller* akan aktif ketika perubahan referensi masukan atau *error* yang besar, sedangkan PI *controller* akan aktif ketika perubahan referensi masukan atau *error* kecil sehingga akurasi *steady-state* dapat ditingkatkan dan menghilangkan pengaruh gangguan (Kristiyono, 2015).

Sistem *positioning* adalah satu hal yang krusial dalam pembuatan robot otonom. Tanpa adanya sistem

positioning pada robot, akan membuat robot mengalami kesulitan dalam menentukan tindakannya selanjutnya. Pembacaan sensor-sensor pada robot digunakan dalam penentuan posisi robot. Penentuan posisi robot dengan metode *gyrodometry* diterapkan pada penelitian ini, di mana dalam penentuan nilai koordinat posisi didapat dari kombinasi pengolahan data antara data dari sensor *gyroscope* dengan data dari pembacaan data pada *rotary encoder* yang kemudian diubah menjadi koordinat posisi sumbu x dan y (Borenstein dan Feng, 1996).

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui hasil respon sistem *positioning* pada *Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot* menggunakan metode *Gyrodometry* berbasis *PI-Fuzzy Controller* dengan pemodelan dan analisis data berdasarkan *fuzzy logic controller* dalam penelitian yang sudah diketahui sebelumnya (Al-Azka, 2020).

METODE

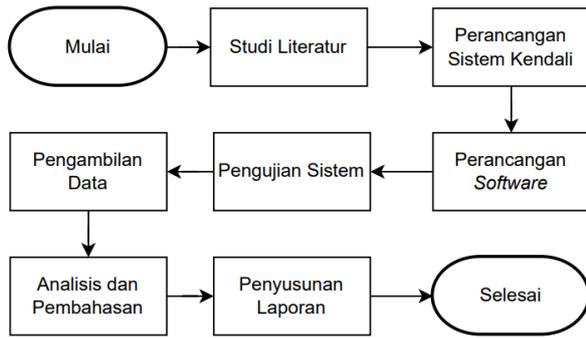
Pendekatan Penelitian

Metode penelitian kuantitatif dipakai dalam penelitian ini. Dalam buku Metodologi Penelitian Kualitatif dan Kuantitatif yang ditulis oleh Kasiram (2008:149), mengungkapkan bahwa penelitian kuantitatif adalah suatu proses menemukan pengetahuan data berupa nomor yang dimanfaatkan dalam menganalisis pengetahuan mengenai apa yang ingin diketahui (Al-Azka, 2021). Untuk memenuhi tujuan penelitian ini, penulis menggunakan *software* STM32CubeIDE 1.7.0 yang digunakan untuk memprogram *hardware* robot.

Rancangan Penelitian

Gambar 1 menunjukkan *flowchart* tahapan perancangan penelitian ini secara garis besar. Sebelum mengerjakan penelitian ini, terlebih dahulu peneliti mencari dan mempelajari referensi dan literatur dari beberapa penelitian yang masih berhubungan baik. Referensi penelitian dapat diperoleh melalui buku, jurnal, dan website. Dari beberapa penelitian tersebut akan diperoleh suatu pemodelan sistem dari *hardware four-wheeled omnidirectional mobile robot*. Pada tahap perancangan sistem kendali, kontrol *PI-Fuzzy* digunakan sebagai metode penggerak dari robot omni.

Setelah tahap perancangan sistem kendali kemudian dilanjutkan perancangan *software*, pada tahap ini dilakukan pemrograman pada mikrokontroler STM32F4 *Discovery*. Setelah robot siap diuji maka dilakukan 3 tahap pengujian, yaitu satu pengujian sensor *gyroscope* dan dua pengujian *gyrodometry*. Dari pengujian akan didapatkan data-data hasil percobaan yang nantinya akan dianalisis dan dibahas. Kemudian dilanjutkan pada tahap yang terakhir yaitu tahap penyusunan laporan.



Gambar 1. *Flowchart* tahapan perancangan penelitian

Desain Plant

Omnidirectional mobile robot merupakan salah satu jenis robot dengan roda sebagai penggerak. Robot *omnidirectional wheeled* dapat melakukan pergerakan ke berbagai macam arah tanpa perlu menyesuaikan arah sudut hadap robot. Sudah banyak jenis robot beroda omni yang telah digunakan, seperti *universal wheels*, *ball wheels*, dan *off-centered wheels*. Roda omni yang digunakan pada robot *omnidirectional wheeled* biasanya terdiri dari 3 ataupun 4 buah. Robot *omnidirectional wheeled* yang menggunakan tiga roda omni sanggup mencapai tiga gerakan *Degree of Freedom* (DOF) menggunakan tiga penggerak aktuator independen, namun terdapat masalah dalam stabilitas lantaran bidang kotak segitiga menggunakan tanah. Penggunaan empat roda omni akan meningkatkan stabilitas dari robot (Byun dkk, 2002).

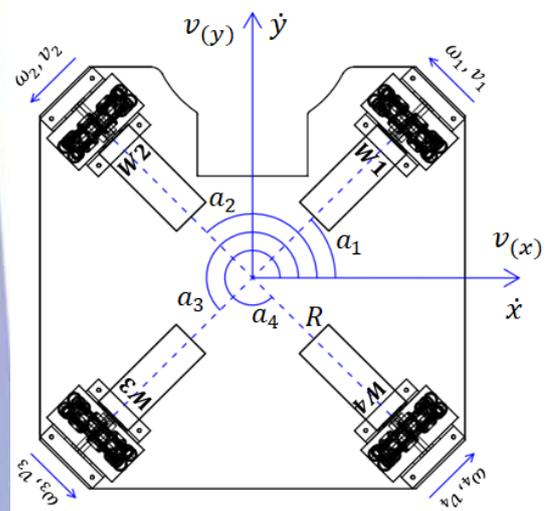
Penelitian ini menggunakan robot beroda dengan empat roda omni sebagai penggerak yang dipasang membentuk *frame* “x”. Robot ini memiliki dimensi panjang dan lebar masing-masing sebesar 46 cm dan tinggi sebesar 80 cm seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2. Untuk menunjang sistem *positioning*, robot ini sudah dilengkapi dengan dua *rotary encoder* tambahan yang dipasang pada bagian bawah robot serta sensor *gyroscope* yang sudah terintegrasi dengan mikrokontroler STM32F407 Discovery.



Gambar 2. *Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot*

Model Plant

Pemodelan kinematik adalah studi mengenai gerak robot berdasarkan analisis struktur geometrik dari suatu sistem kerangka koordinat acuan yang bergerak atau diam tanpa mempertimbangkan gaya, torsi, atau momen tertentu yang menyebabkan gerakan (Rijalusalam dan Iswanto, 2021). Penempatan posisi roda omni sangat mempengaruhi model kinematik dari robot *omnidirectional*. Pada penelitian ini menggunakan empat buah roda omni yang di mana sumbu dari keempat roda tersebut disatukan pada titik pusat robot dan sudut antara roda membentuk sudut 90° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan penjelasannya ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 3. Perancangan posisi empat roda omni

Tabel 1. Spesifikasi robot omni

No	Simbol	Deskripsi
1	$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$	Sudut antara roda dan titik referensi robot
2	$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$	Kecepatan sudut setiap roda
3	v_1, v_2, v_3, v_4	Kecepatan linier roda robot
4	W1, W2, W3, W4,	Simbol roda pada setiap sisi robot
5	R	Jarak dari roda ke pusat robot
6	r	jari-jari roda omni
7	$v(x)$	Kecepatan linier robot terhadap sumbu x robot
8	$v(y)$	Kecepatan linier robot terhadap sumbu y robot
9	\dot{x}	Kecepatan linier robot pada sumbu x global
10	\dot{y}	Kecepatan linier robot pada sumbu y global

Terdapat dua jenis model kinematik robot, yaitu *Invers Kinematic* dan *Forward Kinematic*. *Invers Kinematic* memanfaatkan nilai referensi jarak dan orientasi yang akan dituju untuk mencari nilai kecepatan linier dalam setiap roda. Sementara *Forward Kinematic* sebaliknya, memanfaatkan kecepatan linier robot untuk mencari nilai orientasi atau jarak robot.

Dari Gambar 3, kecepatan linier robot terhadap sasis robot dilambangkan dengan $v_{(R)} = [v_{(x)} \ v_{(y)}]^T$. Posisi koordinat dan orientasi robot terhadap koordinat global dilambangkan dengan $X_{(g)} = [x_{(R)} \ y_{(R)} \ \Psi]^T$. Kecepatan linier dan sudut robot terhadap koordinat global XOY dilambangkan dengan $V_{(g)} = [\dot{X} \ \dot{Y} \ \omega]$. $x_{(R)}$ adalah koordinat global robot pada sumbu x. $y_{(R)}$ adalah koordinat global robot pada sumbu y. ω adalah notasi kecepatan sudut robot ke koordinat referensi global. Ψ adalah sudut arah hadap robot dengan koordinat global x dan y. $\varphi_{(R)}$ adalah arah pergerakan robot pada koordinat global. L adalah notasi dari resultan kecepatan linier robot. Berdasarkan Gambar 3 dapat dibuat model matematik:

$$\varphi_{(R)} = \tan \frac{Y_{(R)}}{X_{(R)}} \quad (1)$$

$$\sqrt{\begin{matrix} (R) & (R) \\ (x) & (y) \end{matrix}} \quad (2)$$

$$\begin{matrix} (x) \\ (y) \end{matrix} \begin{bmatrix} s(\Psi) & n(\Psi) \\ -n(\Psi) & s(\Psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

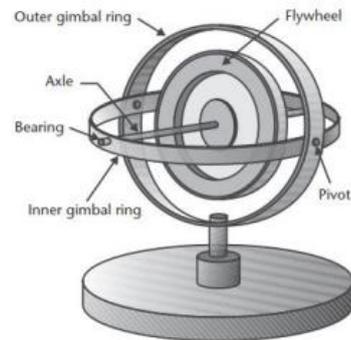
Berdasarkan Gambar 3 dapat dibuat persamaan *inverse kinematic* dan *forward kinematic*. *Inverse kinematic* ditunjukkan pada persamaan 4.

$$\begin{bmatrix} v^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n(\Psi) & s(\Psi) \\ n(\Psi) & s(\Psi) \\ n(\Psi) & s(\Psi) \\ n(\Psi) & s(\Psi) \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} v_{(x)} \\ v_{(y)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Gyrodometry Gyroscope

Gyroscope merupakan sensor yang memanfaatkan momentum sudut. Secara mekanis, *gyroscope* berbentuk seperti roda atau piringan yang berputar di mana porosnya bebas untuk mengambil orientasi apapun yang diilustrasikan oleh Gambar 4. Untuk menentukan orientasi gerak pada *gyroscope*, *gyro* sensor bertumpu dalam roda atau cakram yang berotasi dengan cepat dalam sumbu. *Gyroscope* mendapatkan presisi berdasarkan momentum sudut yang besar, yang sebanding menggunakan massa berat *flywheel* (Azizi dkk, 2012). Jumlah *axis gyroscope* ditentukan oleh

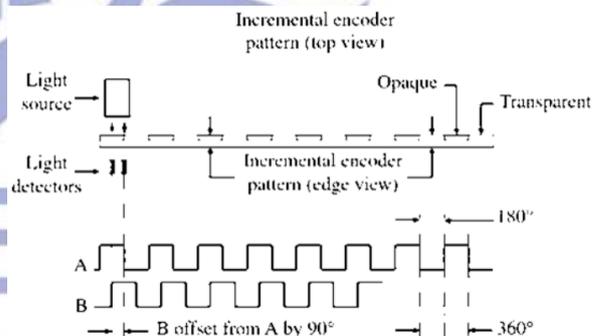
banyaknya jumlah *outer gimbal ring* pada *gyroscope* (Rif'an dkk, 2012).



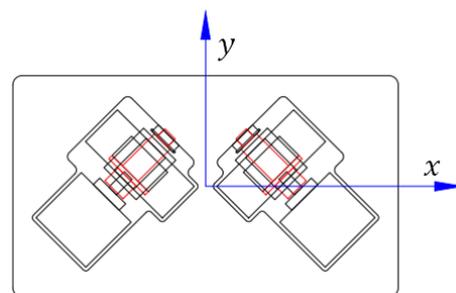
Gambar 4. *Gyroscope Illustration* (Sumber: Azizi dkk, 2012)

Rotary Encoder

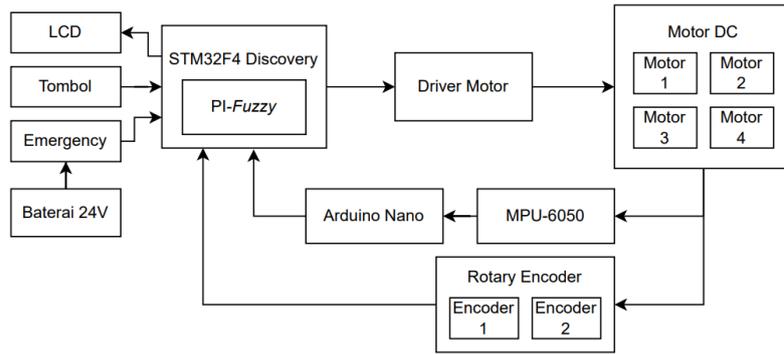
Odometry merupakan sebuah sistem pengukuran yang memanfaatkan data dari aktuator dalam memprediksi pergerakan robot (Dudek, 2008). *Rotary encoder* merupakan sensor yang berguna untuk mengukur perpindahan linier tanpa perlu mengubah data sinyal analog menjadi sinyal digital dikarenakan *output* yang dihasilkan oleh *rotary encoder* berbentuk digital. Struktur *rotary encoder* ditunjukkan pada Gambar 5, yang menunjukkan bahwa sensor ini menghasilkan serial pulsa dari pemanfaatan sensor optik yang nantinya diubah menjadi posisi, arah, dan gerakan.



Gambar 5. Struktur pada *encoder* (Sumber: Rachmawan, 2017)

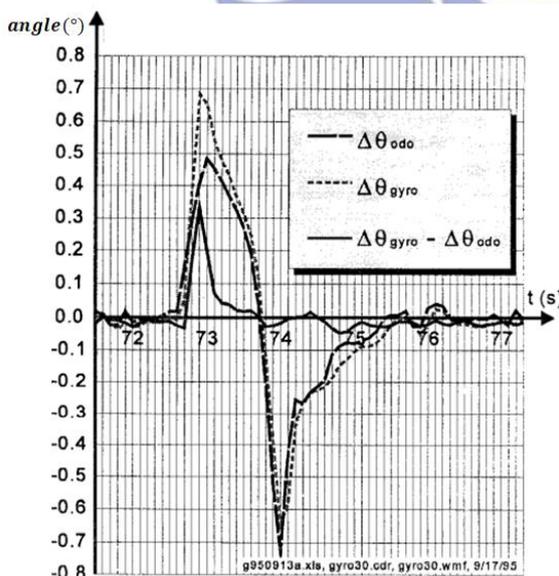


Gambar 6. Perancangan posisi *rotary encoder*



Gambar 7. Desain sistem four-wheeled omnidirectional mobile robot

Metode *gyrodometry* digunakan dalam penelitian ini untuk penentuan posisi robot. Metode *gyrodometry* merupakan salah satu metode yang digunakan dalam pencarian nilai koordinat posisi robot yang sering digunakan pada sistem *positioning*. Metode ini memanfaatkan kombinasi antara *output* data sensor *gyroscope* dengan *output* data yang dihasilkan oleh *odometry*. Salah satu masalah dari penggunaan *odometry* adalah potensi *error non-systematic* yang diakibatkan gundukan atau permukaan tanah yang tidak rata. Robot tidak dapat dikalibrasi untuk mentoleransi dan juga tidak mungkin untuk memprediksi frekuensi dari *error non-systematic* (Borenstein dan Feng, 1996). Dari data pada Gambar 8, mendukung hipotesis bahwa perbedaan antara kurva *odometry* dan kurva *gyro* hanya bertahan dalam waktu yang sangat singkat.



Gambar 8. Grafik hasil pengukuran *odometry*, *gyro*, dan *gyrodometry*

(Sumber: Borenstein dan Feng, 1996)

Pemasangan *rotary encoder* tambahan diperlihatkan pada Gambar 6. Hal ini dilakukan untuk

mengurangi nilai *error* akibat roda tergelincir saat robot bergerak. Dari arah hadap dan posisi penempatan *rotary encoder*, kecepatan arah sumbu x dan sumbu y pada robot dapat ditentukan dengan persamaan 5.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(45^\circ) & n(45^\circ) \\ n(45^\circ) & s(45^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Dengan ω adalah kecepatan sudut rotary encoder 1. Rotary encoder mendapatkan kecepatan sudut dari *counter* pada mikrokontroler yang diperbarui setiap 1ms. Dari persamaan ini didapat nilai kecepatan arah x dan y dari robot, namun belum mendapatkan koreksi nilai dari sensor *gyroscope*. Koreksi nilai dari sensor *gyroscope* ini digunakan agar saat robot melakukan manuver putaran arah hadap robot, sensor tetap menghitung kecepatan arah x dan y. Persamaan nilai kecepatan arah x dan y robot dengan koreksi nilai sensor *gyroscope* ditunjukkan pada persamaan 6.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s(\theta) & n(\theta) \\ n(\theta) & s(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} \quad (6)$$

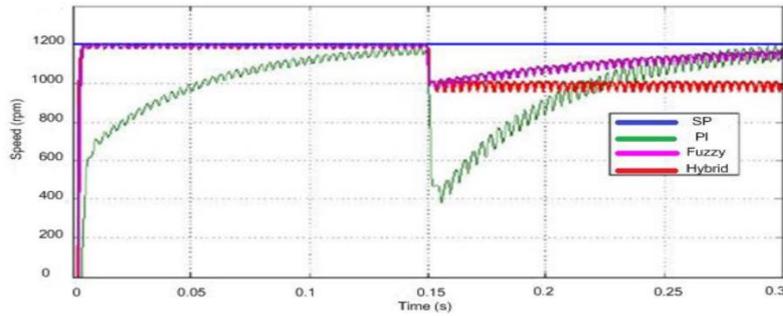
Dengan θ merupakan nilai yang diperoleh dari sensor *gyroscope*. Untuk mencari nilai koordinat posisi sumbu x dan y robot perlu dilakukan perhitungan integral kecepatan arah x dan y seperti yang ditunjukkan pada persamaan 7 dan 8.

$$\sum x \quad (7)$$

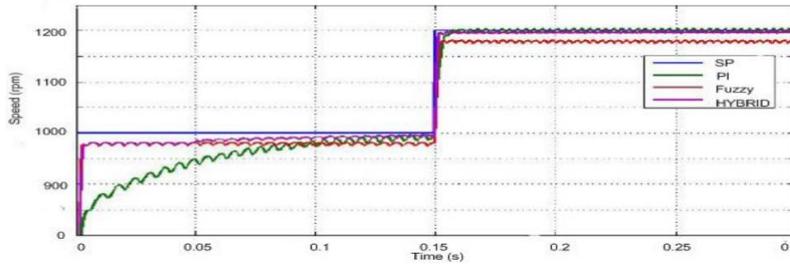
$$\sum y \quad (8)$$

Desain Sistem

Dari gambar diagram blok dan desain sistem *four-wheeled omnidirectional mobile robot* pada Gambar 7, nilai masukan (*Set Point*) sistem merupakan nilai koordinat posisi robot yang diinginkan. Kontroler *PI-Fuzzy* (*Proportional Integral Fuzzy*) akan diproses pada *STM32F4 Discovery*. Mikrokontroler *STM32F4* akan menghasilkan keluaran yang digunakan untuk mengontrol driver motor. Driver motor ini akan mengatur kecepatan dan arah putaran dari motor dc.



(a)



(b)

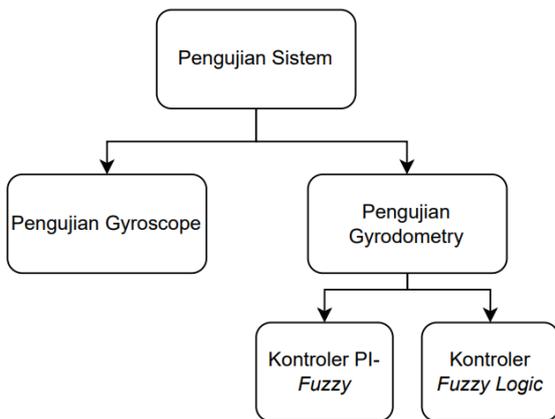
Gambar 10. (a) Respon kecepatan pada kasus 1; (b) Respon kecepatan pada kasus 2 (Sumber: Kristiyono, 2015)

Saat robot bergerak, metode *gyrodometry* akan menunjukkan nilai koordinat posisi robot berada sekarang dan kemudian nilai koordinat ini digunakan sebagai nilai umpan balik. Nilai dari metode *gyrodometry* ini didapat dari perhitungan dari nilai sensor MPU-6050 dan *rotary encoder*.

kontroler tersebut. Pada pengujian *gyrodometry* dilakukan dengan dua cara, yaitu *Home to Point* dan *Point to Point*.

Kontroler PI Fuzzy

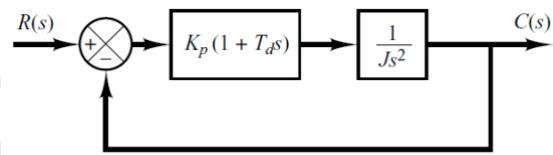
Kontrol PI merupakan solusi standar untuk sebagian aplikasi industri, karena memiliki struktur yang relatif sederhana yang dapat dengan mudah dipahami, dan banyak strategi pengendalian berdasarkan PI seperti *model predictif control*. (Pitalua-Diaz dkk, 2015).



Gambar 9. Diagram alir pengujian data

Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan dua tahapan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Pengambilan data sensor *gyroscope* untuk mengetahui tingkat akurasi sudut hadap robot, dan pengujian *gyrodometry* dengan kontroler PI-Fuzzy dan *Fuzzy Logic Controller* untuk mengetahui tingkat akurasi dari kedua

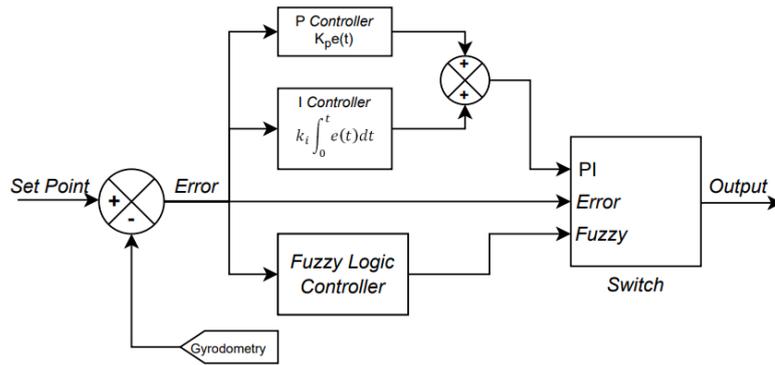


(a)



(b)

Gambar 11. (a) Kontrol PI dengan beban inersia; (b) Respon sistem kontrol PI dengan beban inersia (Sumber: Ogata, 1985)



Gambar 12. Diagram pengendalian kontrol PI-Fuzzy

Penggabungan dari kontroler Proporsional dan Integral memberikan keuntungan dalam meningkatkan kecepatan reaksi sistem dan menghilangkan offset. Output dari kontroler PI didefinisikan oleh persamaan 9

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (9)$$

Di mana $u(t)$ sebagai output, $e(t)$ adalah sinyal error, K_p adalah konstanta penguatan, dan K_i adalah konstanta integral (Ogata, 1985). Hasil dari respon sistem kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 11. Untuk transfer function dari kontroler PI dapat didefinisikan oleh persamaan 10.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (10)$$

Di mana T_i adalah waktu integral dan s adalah frekuensi bilangan kompleks. Agar didapatkan hasil respon kontrol PI yang baik, biasanya digunakan metode trial and error dengan mengubah nilai K_p dan K_i .

Fuzzy logic controller (FLC) adalah algoritma pengendalian sistem atau proses berdasarkan pengetahuan manusia tentang bagaimana mengontrol sistem tanpa menggunakan model matematika. Pada desain sistem kontrol logika fuzzy yang paling penting adalah desain proses fungsi keanggotaan input, proses, dan output berdasarkan aturan if-then.

Tujuan hybrid control dari kontrol PI dan kontrol fuzzy adalah untuk menghasilkan pengontrol dengan hasil respon yang lebih baik daripada pengontrol PI atau FLC. FLC memberikan respon kecepatan sistem yang baik, respon start-up/rising time dan perubahan referensi yang besar, sedangkan pada kontroler PI sangat baik dalam melakukan adaptasi pada variasi torsi beban dan memberikan akurasi steady state (Kristiyono, 2015).

Pada penelitian sebelumnya sudah dilakukan uji coba dengan menggunakan pengontrol PI, Fuzzy, dan PI Fuzzy. Gambar 10. menunjukkan grafik respon perubahan kecepatan dengan pengontrol PI, Fuzzy, dan PI Fuzzy pada kasus 1 dan kasus 2. Di mana pada kasus

1 motor memiliki kecepatan konstan 1200 rpm dan beban perubahan variabel 4Nm untuk 6Nm pada 0.15s, sementara pada kasus 2 motor memiliki beban konstan 6Nm dan perubahan kecepatan variabel dari 1000 rpm ke 1200 rpm. Dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kontrol PI lebih baik dalam mempertahankan akurasi steady state, sementara pada kontrol fuzzy dapat melakukan waktu penetapan yang lebih cepat. Untuk kontrol PI-Fuzzy adalah kombinasi dari kontrol PI dan kontrol FLC (Kristiyono, 2015). Skema pengendalian yang digunakan pada penelitian ini adalah PI-Fuzzy. Gambar 12 menunjukkan kontroler PI dan Fuzzy yang terintegrasi dengan sebuah switching.

Pembacaan nilai rotary encoder dan gyroscope dibandingkan dengan nilai set point dan akan menghasilkan nilai error. Nilai error ini digunakan untuk mengendalikan switching untuk merubah kontroler FLC saat nilai error besar dan sebaliknya untuk kontroler PI ketika nilai error kecil. Algoritma switching dapat dituliskan seperti pada persamaan 11.

$$\begin{cases} (fuzzy & r) \\ (PI & r) \end{cases} \quad (11)$$

di mana s adalah kesalahan posisi, dan ϵ adalah ambang batas nilai untuk switching. Output dari kontroler PI-Fuzzy berupa kecepatan Pulse Width Modulation (PWM) motor.

Penggunaan skema kontroler PI-Fuzzy bertujuan memanfaatkan karakteristik terbaik dari PI controller dan Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk memberikan pengontrol yang memiliki respon sistem lebih baik daripada kontrol PI atau FLC (Kristiyono, 2015).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada sistem yang telah dikembangkan akan dibahas pada bab ini, yang di mana terdiri dari pengujian sensor gyroscope dan pengujian positioning dengan metode gyrodometry. Nilai error yang dihasilkan dari percobaan ini digunakan untuk mencari nilai Root Mean

Square Error (RMSE). RMSE sendiri merupakan jumlah dari *error* kuadrat atau selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai sebenarnya, di mana semakin kecil nilai RMSE (mendekati 0) semakin akurat hasil prediksinya. RMSE digunakan dalam analisis yang membandingkan data yang diinginkan dengan data sebenarnya untuk menentukan seberapa besar kesalahan yang terjadi. Nilai RMSE dapat dihitung dengan persamaan 12 yang di mana e_1 merupakan nilai *error* 1.

$$\sqrt{\quad\quad\quad} \quad (12)$$

Pengujian Sensor Gyroscope

Tujuan pengujian ini adalah mengetahui taraf akurasi menurut sudut hadap robot. Pengujian sensor *gyroscope* dilakukan dengan memutar sensor pada kertas yang berisi nilai sudut sebenarnya, sedangkan nilai pembacaan sensor akan ditampilkan pada LCD. Nilai *error* akan diketahui dari selisih antara nilai yang ditampilkan pada LCD dengan nilai sudut sebenarnya. Tabel 2 menunjukkan hasil dari pengujian sensor *gyroscope*.

Tabel 2. Pengujian sensor *gyroscope*

No	Sudut (°)	Sudut pembacaan <i>gyroscope</i> (°)	Error (°)
1	0	0,2	0,2
2	30	30,1	0,1
3	60	59,4	0,6
4	90	89	1
5	120	119,7	0,3
6	150	149,8	0,2
7	180	179,9	0,1
8	210	210,2	0,2
9	240	240,9	0,9
10	270	270,4	0,4
11	300	299,2	0,8
12	330	330,2	0,2
RMSE (°)			0,52

- Error sudut condong ke kanan
- Error sudut condong ke kiri

Berdasarkan Tabel 2, maka didapat hasil pengujian sensor *gyroscope* berdasarkan nilai pembacaan sensor dengan sudut sebenarnya yang menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,519615°. Dari hasil percobaan ini dapat diketahui bahwa sensor *gyroscope* memiliki

tingkat akurasi nilai sudut yang bagus dan kesalahan sudut masih bisa ditoleransi karena nilai RMSE lebih kecil dari 1°. Dengan pembacaan sensor *gyroscope* yang akurat, akan meningkatkan juga pergerakan robot dalam menentukan sudut arah hadapnya, serta dapat memaksimalkan pembacaan nilai posisi robot yang di mana didapat dari perhitungan sensor *gyroscope* dan *rotary encoder*.

Pengujian Gyrodometry Home to Point

Pengujian *gyrodometry* dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi robot dalam melakukan *positioning*. Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah ke robot untuk berpindah dari posisi *home* (0,0) menuju titik yang sudah ditentukan menggunakan kontrol PI-Fuzzy dengan nilai $K_p = 2$ dan $K_i = 0,8$ serta kontrol FLC hingga menghasilkan data pada Tabel 3 dan Tabel 4. Berdasarkan data yang sudah diperoleh, didapatkan nilai RMSE dengan kontrol PI-Fuzzy sebesar 3,483892 cm untuk sumbu x dan 3,347947cm untuk sumbu y. Sementara pada pengujian *home to point* dengan kendali FLC memiliki nilai RMSE sebesar 7,962569 cm untuk sumbu x dan 6,213896 cm untuk sumbu y.

Tabel 3. Pengujian *gyrodometry home to point* dengan PI-Fuzzy

No	Posisi		Pengukuran Posisi PI-Fuzzy		Error Posisi PI-Fuzzy	
	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
1	0	80	1,6	79	-1,6	1
2	-70	120	-69	118,8	-1	1,2
3	-150	0	-147	-2,3	-3	2,3
4	-100	-50	-97	-47,5	-3	-2,5
5	0	-100	-2,3	-97	2,3	-3
6	50	140	42	135,6	8	4,4
7	130	0	128	-3,7	2	3,7
8	50	120	51,5	114,2	-1,5	5,8
RMSE (cm)					3,48	3,35

Pada kendali PI-Fuzzy memiliki *error* terkecil sebesar 1 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (-70,120) dan 1 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (0, 80), sementara pada FLC memiliki nilai *error* terkecil sebesar 2 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (0,-100) dan 0,2 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (50, 120). Untuk nilai *error* terbesar pada kendali PI-Fuzzy sebesar 8 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (50, 140) dan 5,8 cm pada sumbu y saat

melakukan *positioning* pada koordinat (50, 120), sementara pada FLC memiliki nilai *error* terbesar sebesar 15,5 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (50, 120) dan 12,4 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (-100, -50).

Tabel 4. Pengujian *gyrodometry home to point* dengan FLC

No	Posisi		Pengukuran Posisi FLC		Error Posisi FLC	
	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
1	0	80	4,5	85,2	-4,5	-5,2
2	-70	120	-58	128	-12	-8
3	-150	0	-156,2	7	6,2	-7
4	-100	-50	-104,2	-37,6	4,2	-12,4
5	0	-100	-2	-96,5	2	-3,5
6	50	140	45	141,6	5	-1,6
7	130	0	134,2	-0,5	-4,2	0,5
8	50	120	34,5	120,2	15,5	-0,2
RMSE (cm)					7,96	6,21

Pengujian Gyrodometry Point to Point

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan perintah ke robot untuk berpindah dari posisi *home* (0,0) menuju titik yang sudah ditentukan, dan dilanjutkan menuju titik-titik yang lain menggunakan kontrol PI-Fuzzy dengan nilai $K_p = 2$ dan $K_i = 0,8$ serta kontrol FLC hingga menghasilkan data pada Tabel 5 dan Tabel 6. Berdasarkan data yang sudah diperoleh, didapatkan nilai RMSE dengan kontrol PI-Fuzzy sebesar 5,477878 cm untuk sumbu x dan 4,536204 cm untuk sumbu y. Sementara pada pengujian *home to point* dengan kendali FLC memiliki nilai RMSE sebesar 6,84147 cm untuk sumbu x dan 6,714271 cm untuk sumbu y.

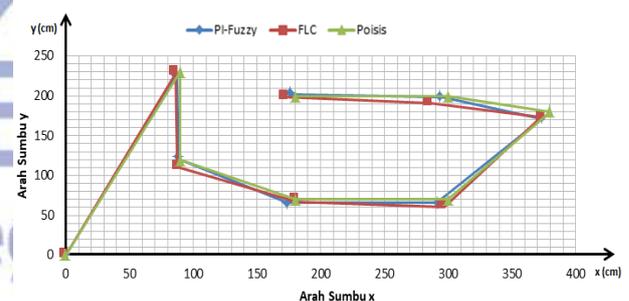
Tabel 5. Pengujian *gyrodometry point to point* dengan PI-Fuzzy

No	Posisi		Pengukuran Posisi PI-Fuzzy		Error Posisi PI-Fuzzy	
	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
1	90	230	87,2	226,4	2,8	3,6
2	90	120	88,6	121	1,4	-1
3	180	70	174	65,4	6	4,6
4	300	70	291	65,4	9	4,6
5	380	180	373,5	171	6,5	9
6	300	200	295	199	5	1
7	180	200	176	202,4	4	-2,4
RMSE (cm)					5,48	4,54

Pada kendali PI-Fuzzy memiliki *error* terkecil sebesar 1,4 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (90, 120) dan 1 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (90, 120) dan (300, 200), sementara pada FLC memiliki nilai *error* terkecil sebesar 1,2 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (180, 70) dan 1,8 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (90, 230) dan (180, 200). Untuk nilai *error* terbesar pada kendali PI-Fuzzy sebesar 9 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (300, 70) dan 9 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (380, 180), sementara pada FLC memiliki nilai *error* terbesar sebesar 13,8 cm pada sumbu x saat melakukan *positioning* pada koordinat (300, 200) dan 9,5 cm pada sumbu y saat melakukan *positioning* pada koordinat (300, 70).

Tabel 6. Pengujian *gyrodometry point to point* dengan FLC

No	Posisi		Pengukuran Posisi FLC		Error Posisi FLC	
	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
1	90	230	86	228,2	4	1,8
2	90	120	87,6	111	2,4	9
3	180	70	181,2	67,2	-1,2	2,8
4	300	70	296,8	60,5	3,2	9,5
5	380	180	373	173	7	7
6	300	200	286,2	191	13,8	9
7	180	200	172,6	198,2	7,4	1,8
RMSE (cm)					6,84	6,71



Gambar 13. Pergerakan *positioning* robot *point to point*

Berdasarkan hasil percobaan yang ditunjukkan oleh Gambar 13, dapat diketahui bahwa *positioning* dengan menggunakan kontrol PI-Fuzzy lebih mendekati nilai posisi yang diinginkan daripada *positioning* dengan menggunakan FLC.

PENUTUP

Simpulan

Hasil penelitian yang telah dilakukan oleh penulis, maka bisa disimpulkan bahwa sistem *positioning* menggunakan metode *gyrodometry* berbasis PI-Fuzzy Controller dapat bekerja dan mencapai *set point* dengan baik. Robot dapat berpindah posisi sesuai *set point* yang sudah ditentukan sebelumnya.

Pada pengujian sensor *gyroscope* yang dipakai dalam mengetahui sudut arah hadap robot memiliki nilai *error* RMSE sebesar $0,52^\circ$. Sementara pada pengujian *positioning* dilakukan dengan dua cara yaitu *home to point* dan *point to point*. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui tingkat akurasi dan besar nilai *error* antara penggunaan kontrol PI-Fuzzy dan FLC. Pada pengujian *home to point* didapatkan nilai RMSE pada sumbu x sebesar 3,48 cm dengan kontrol PI-Fuzzy dan sebesar 7,96 cm dengan kontrol FLC. Sementara untuk RMSE pada sumbu y sebesar 3,36 cm dengan kontrol PI-Fuzzy dan sebesar 6,21 cm dengan kontrol FLC. Sementara pada pengujian *point to point* didapatkan nilai RMSE pada sumbu x sebesar 5,48 cm dengan kontrol PI-Fuzzy dan sebesar 6,84 cm dengan kontrol FLC. Sementara untuk RMSE pada sumbu y sebesar 4,54 cm dengan kontrol PI-Fuzzy dan sebesar 6,71 cm dengan kontrol FLC. Dari hasil pengujian *home to point* dan *point to point* ini dapat diketahui bahwa penggunaan kontrol PI-Fuzzy dapat lebih meminimalisir nilai *error* dibandingkan dengan penggunaan FLC.

Saran

Perlunya pengembangan kontrol PI-Fuzzy sangatlah penting. Upaya pengoptimalan hasil respon sistem *positioning* menggunakan *Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot* dapat dikembangkan dari kontrolernya, sehingga nantinya dapat menghasilkan keluaran yang lebih baik. Baik pengembangan kontroler PI-Fuzzy, atau kombinasi dari beberapa kontroler lainnya. Selain pengembangan pada kontrolnya, pengembangan metode *gyrodometry* juga perlu dilakukan. Penambahan metode lain yang tidak terpengaruh oleh slip roda seperti pengolahan citra yang memanfaatkan kamera omni 360° pada robot sehingga akan mengurangi *error* nilai koordinat posisi robot.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Azka, Muhammad Hisyam. 2021. *Rancang Bangun Sistem Positioning Mobile Robot Omnidirectional Wheel Menggunakan STM32 Berbasis Fuzzy Logic Controller*. Jurnal Teknik Elektro Volume 10 No. 03, September 2021, 547-555.
- Azizi. Vahid, Barzande. Farshad, dan Behtash. Amir Masoud K. 2012. *A Novel Design of a Z-Axis MEMS Vibratory Gyroscope*. International Conference on Mechanical Engineering and Advanced Technology (ICMEAT) 10 – 12 October 2012, Isfahan, Iran.
- Borenstein. Johann, dan Feng. Liqiang. 1996. *Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots*. Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 1996, Minneapolis, Minnesota.
- Byun. Kyung-Seok, Kim. Sung-Jae, dan Jae-Bok. Song. 2002. *Design of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Variable Wheel Arrangement Mechanism*. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2002, Washington, D.C., United States of America.
- Dudek, Michael J.G. 2008. *Inertial Sensor, GPS, and Odometry*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 477-490, Heidelberg, Jerman.
- Ignatiev. Konstantin V, Kopichev M.M. dan Putov A.V. 2016. *Autonomous Omni-Wheeled Mobile Robots*. 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia.
- Kasiram, Moh. 2008. *Metodologi Penelitian*. Malang: UIN-Malang Pers.
- Kristiyono, Roedy. 2015. *Studi Perbandingan PI, Fuzzy dan Hybrid PI Fuzzy Controller untuk Pengendalian Kecepatan Brushless DC Motor*. Jurnal Teknik ATW, No. 13, (2015) ISSN 1693-6329.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering : 5th ed*. Upper Saddle River: Pearson Education.
- Priyambudi. Aryono, Firman. Beny, dan Kristiyana, Samuel. 2018. *Kendali Kecepatan Motor Pada Robot Dengan Empat Roda Omni Menggunakan Metode PID*. Jurnal Elektrikal, Volume 5 No. 1, Juni 2018, 54-63.
- Pitalua-Diaz. Nun, Herrera-Lopez. Enrique J., Valencia-Palomo. Guillermo, Gonzalez-Angeles. Alvaro, Rodriguez-Carvajal. Ricardo A., dan Cazarez-Castro. 2015. *Comparative Analysis Between Conventional PI and Fuzzy Logic PI Controllers For Indoor Benzene Concentrations*. Sustainability 2015, 7, 5398-5412; DOI: 10.3390/su7055398, ISSN 2071-1050.
- Rachmawan, Adnan. 2017. *Penentuan Posisi Robot Sepak Bola Beroda Menggunakan Rotary Encoder*

- dan Kamera. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rif'an. Mochammad, Djuriatno. Waru, Sulistiyanto. Nanang, Siwindarto. Ponco, Aswin. M., dan Nurdinawati. Vita. 2012. *Pemanfaatan 3 Axis Gyroscope L3G4200D Untuk Pengukuran Sudut Muatan Roket*. Jurnal EECCIS Vol. 6, No. 2, Desember 2012.
- Rijalusalam. Dhiya Uddin, dan Iswanto. Iswanto. 2021. *Implementation Kinematics Modeling and Odometry of Four Omni Wheel Mobile Robot Trajectory Planning and Motion Control Based Microcontroller*. Journal of Robotic and Control (JRC) Volume 2, Issue 5, September 202, ISSN: 2715-5072, DOI: 10.18196/jrc.25121.

