

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 State of the Art

Penelitian ini dilakukan dengan mempertimbangkan hasil dari beberapa studi terdahulu yang berhubungan sistem kendali pada gerak robot dengan topik meliputi kendali *Proportional Integral Derivative* (PID), Logika Fuzzy, dan metode tuning PID dengan Ziegler-Nichols. Berbagai studi terdahulu yang membahas topik yang relevan dapat ditemukan pada Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 2.1 State of the Art Penelitian

No.	Judul Jurnal	Tipe	Ringkasan
1.	Li, X., & Choi, B. J. (2013). Design of Obstacle Avoidance System For Mobile Robot Using Fuzzy Logic Systems. <i>International Journal of Smart Home</i> , 7(3), 321-328.[10]	Algoritma Logika Fuzzy untuk menghindari rintangan.	Implementasi sistem logika fuzzy untuk mengontrol kecepatan sudut roda pada <i>mobile robot</i> agar dapat menghindari rintangan yang cukup efektif dengan waktu tempuh yang cepat di lingkungan yang tidak diketahui.
2.	A. Pandey dan D. R. Parhi, "Autonomous mobile robot navigation in cluttered environment using hybrid Takagi-Sugeno fuzzy model and simulated annealing algorithm controller," <i>World Journal</i>	Logika fuzzy dengan tipe Takagi-Sugeno.	Penggunaan sistem inferensi Takagi-Sugeno pada penentuan keputusan arah gerak robot berupa sudut dan <i>Simulated Annealing Algorithm</i> (SAA)

	<p><i>of Engineering</i>, vol. 13, no. 5, hlm. 431–440, 2016.</p> <p>[11]</p>		<p>diterapkan untuk mencari sudut kemudi yang optimal dari mobile robot dengan menggunakan fungsi fitness dengan hasil waktu lebih cepat dibandingkan hanya menggunakan logika fuzzy saja.</p>
3.	<p>Pratama, D., Ardilla, F., Binugroho, E. H., & Pramadihanto, D. (2015, August). Tilt set-point correction system for balancing robot using PID controller. In 2015 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC) (pp. 129-135). IEEE.[12]</p>	<p>Sistem kendali PID pada sensor IMU.</p>	<p>Sistem kendali PID yang digunakan untuk mengoreksi kemiringan pada <i>balancing robot</i> dari hasil pembacaan sensor IMU. Kendali PID dapat menjaga keseimbangan robot dengan rata-rata waktu yang dibutuhkan kembali ke kondisi steady state setelah sistem menerima muatan adalah 1,13 detik.</p>
4.	<p>D. Diana, Amperawan, dan J. Al Rasyid, “Implementasi Sensor Kompas HMC5883L Terhadap Gerak Robot</p>	<p>Algoritma PID pada sensor <i>Inertial Measurement Unit</i> (IMU).</p>	<p>Implementasi sensor kompas pada gerak robot Micromouse agar dapat bergerak secara stabil dan</p>

	Micromouse dengan Menggunakan Algoritma PID,” <i>Jurnal Teknik Elektro</i> , vol. 6, no. 2, hlm. 120–124, Jul 2017. [13]		akurat menggunakan algoritma PID.
5.	Abidin, A. Z., Mardiyanto, R., & Purwanto, D. (2016, July). Implementation of PID controller for hold altitude control in underwater remotely operated vehicle. In 2016 International seminar on intelligent technology and its applications (ISITIA) (pp. 665-670). IEEE.[14]	Tuning PID dengan Metode Ziegler-Nichols.	Penggunaan metode Ziegler-Nichols untuk tuning parameter PID pada stabilisasi posisi kendaraan bawah air menggunakan sensor IMU. Hasil membuktikan bahwa <i>overshoot</i> lebih kecil, akurasi steady-state lebih tinggi dan waktu penyesuaian lebih kecil.
6.	A. E. Akbar, “Implementasi Sistem Navigasi Wall Following Menggunakan Kontroler PID Dengan Metode Tuning Pada Robot Kontes Robot Cerdas Indonesia (KRCI) Divisi Senior Beroda,” <i>Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya</i> , vol. 1, no. 1, hlm. 114859, 2013. [15]	Metode Tuning PID dengan Ziegler-Nichols 2.	Sistem navigasi <i>wall following</i> menggunakan kontroler PID dengan metode tuning osilasi Ziegler-Nichols. Metode ini dapat mempercepat proses tuning PID tanpa harus melewati proses <i>trial and error</i> yang cukup lama dan hasilnya mampu

			bernavigasi dengan aman, halus, responsif dan cepat.
7.	Barakat, M. H., Azar, A. T., & Ammar, H. H. (2020). Agricultural Service Mobile Robot Modeling and Control Using Artificial Fuzzy Logic and Machine Vision. <i>In The International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications (AMLT2019) 4</i> (pp. 453-465). Springer International Publishing.[16]	Penggabungan logika fuzzy dan kendali PID pada sensor IMU.	Penelitian menggunakan logika fuzzy untuk self-tuning pada parameter PID untuk penentuan sudut sensor IMU. Pengontrol PID Fuzzy <i>self-tuning</i> menunjukkan overshoot kecil dan akurasi yang lebih tinggi untuk mencapai target.

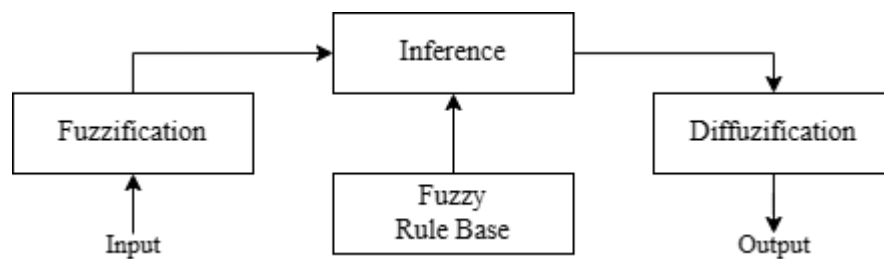
Berdasarkan tabel 2.1 di atas, penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu yang diteliti oleh Xi Li dan Byung-Jae Choi dengan judul “Design of Obstacle Avoidance System for Mobile Robot Using Fuzzy Logic Systems” [10]. Penelitian tersebut membahas tentang desain sistem navigasi *mobile robot* menggunakan logika fuzzy untuk menghindari rintangan. Sensor ultrasonik digunakan untuk mendeteksi jarak objek atau rintangan dengan posisinya. Sistem logika fuzzy digunakan untuk mengendalikan kecepatan sudut roda kiri dan kanan. Peneliti mengusulkan tabel aturan baru yang diinduksi dari pertimbangan jarak dengan rintangan dan sudut antara robot dengan target. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan menghasilkan lintasan yang baik dengan menghindari rintangan dan memiliki waktu tempuh yang lebih cepat.

Penelitian ini menawarkan keterbaruan yang membedakan dengan penelitian sebelumnya tentang penggabungan kendali Fuzzy dan PID. Penelitian ini mengimplementasikan gabungan sistem kendali yaitu Logika Fuzzy sebagai penentu arah gerak robot dengan akurat, sedangkan PID untuk mencapai kestabilan yang optimal setelah mendapat arah gerak robot tersebut.

2.2 Sistem Kendali Logika Fuzzy

Logika Fuzzy merupakan pengembangan dari logika Boolean oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965, yang didasarkan pada teori matematika himpunan fuzzy, yang merupakan generalisasi dari teori himpunan klasik. Konsep derajat dalam verifikasi suatu kondisi diperkenalkan dalam logika fuzzy, sehingga kondisi dapat dinyatakan dalam keadaan selain benar atau salah, dengan demikian logika fuzzy memberikan fleksibilitas yang sangat berharga dalam penalaran. Logika fuzzy memungkinkan ketidakakuratan dan ketidakpastian dapat diperhitungkan, sehingga memberikan kemampuan untuk memecahkan masalah yang kompleks [17].

Tahapan-tahapan dalam menyusun logika fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.1 struktur kontrol fuzzy.



Gambar 2.1 Struktur Kontrol Fuzzy

Tahap awal dalam logika fuzzy adalah mengenali variabel input dan output dalam bentuk linguistik dan mendefinisikan himpunan fuzzy yang sesuai (inisialisasi). Fuzzifikasi atau klasifikasi fuzzy adalah proses mengubah data yang jelas menjadi variabel fuzzy dengan menggunakan fungsi keanggotaan (*set fuzzy*). Dalam proses ini, data dikonversi menjadi himpunan fuzzy dengan menentukan derajat keanggotaan untuk setiap

himpunan fuzzy yang diidentifikasi. Proses ini memungkinkan data yang tidak terdefinisi dengan jelas untuk digunakan dalam penalaran logika fuzzy. Dengan demikian, fuzzifikasi memungkinkan kita untuk memasukkan ketidakpastian dan ketidakakuratan ke dalam sistem logika [18].

Defuzzifikasi adalah proses konversi dari suatu besaran fuzzy menjadi nilai numerik yang dapat digunakan sebagai output pengendali dalam suatu sistem. Dalam pengaturan sistem, keluaran pengendali harus berupa nilai diskrit. Defuzzifikasi diperlukan untuk mengubah hasil fuzzy menjadi nilai keluaran yang tepat. Nilai keluaran dihitung dengan menjumlahkan hasil perkalian keanggotaan himpunan masukan untuk setiap masukan dengan nilai keluaran yang sesuai. Kemudian, hasil perkalian tersebut dibagi dengan jumlah dari perkalian keanggotaan himpunan masukan untuk setiap masukan [19].

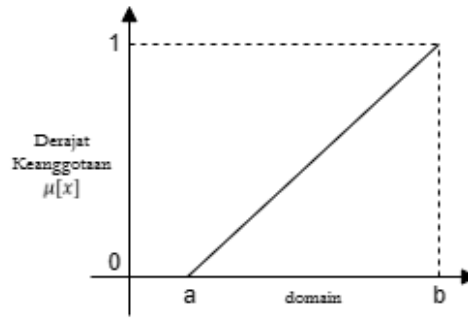
2.3 Logika Fuzzy dengan Model Takagi-Sugeno-Kang

Fuzzy Takagi-Sugeno-Kang (TSK) adalah salah satu teknik logika fuzzy yang dapat digunakan untuk memodelkan sistem kontrol dengan respon yang ideal. Metode ini menggabungkan model linier dan nonlinier untuk menyelesaikan masalah sistem yang kompleks dan tidak dapat diprediksi [20]. Model fuzzy tipe Sugeno karena ini bekerja dalam teknik pembelajaran adaptif dan lebih kompak dan efisien secara komputasi [11]. Konsep fuzzy TSK yaitu pada keluaran dari sistem fuzzy ini berbentuk himpunan fuzzy *singleton*. Pada proses inferensi fuzzy TSK memiliki basis aturan dalam bentuk serangkaian ungkapan "Jika-Maka" [21].

a) Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*)

Fungsi keanggotaan (*membership function*) merupakan sebuah kurva yang memetakan setiap nilai input ke suatu nilai keanggotaan dengan rentang antara 0 hingga 1. Untuk mendapatkan nilai keanggotaan tersebut, dapat digunakan pendekatan fungsi. Terdapat beberapa jenis fungsi yang bisa digunakan, seperti [22]:

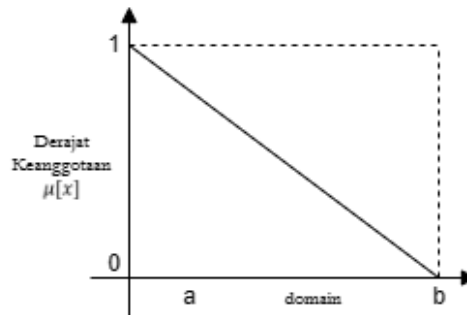
1. Representasi Kurva Linier Naik



Gambar 2.2 Representasi Kurva Linier Naik

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x - a}{b - a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (1)$$

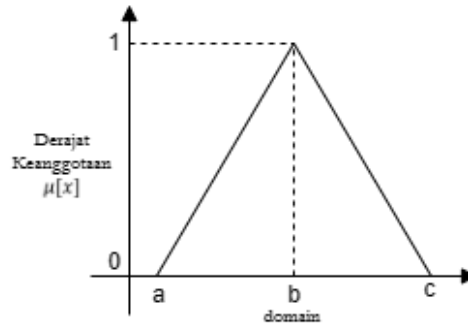
2. Representasi Kurva Linier Turun



Gambar 2.3 Representasi Kurva Linier Turun

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b - x}{b - a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (2)$$

3. Representasi Kurva Segitiga:



Gambar 2.4 Representasi Kurva Segitiga

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \text{ atau } x > c \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (3)$$

b) Aturan fuzzy dalam model Takagi-Sugeno-Kang

Jika x_1 adalah A_{i1} , x_2 adalah A_{i2} , x_3 adalah A_{i3} , maka f_i adalah a_i (4)

c) Defuzzifikasi untuk variabel diskrit (*singleton*)

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (5)$$

2.4 Sistem Kendali *Proportional Integral Derivative* (PID)

Sistem Kendali PID adalah sistem kendali yang memanfaatkan tiga komponen utama untuk mencapai stabilitas dan kinerja optimal pada sistem kendali. Komponen-komponen atau parameter-parameter kendali PID tersebut meliputi *Proportional* (P), *Integral* (I), dan *Derivative* (D) [13]. Pada umumnya parameter sistem kendali PID digunakan secara bersama, namun dapat juga digunakan secara terpisah karena setiap parameter memiliki keunggulan dan kekurangan tersendiri seperti aksi kontrol *proportional* dapat mempercepat *rise time* (waktu naik), aksi kontrol *integral* dapat memperkecil kesalahan (error), serta aksi kontrol *derivative* dapat mengurangi *overshoot* atau *undershoot* [23].

Cara kerja sistem kendali PID adalah dengan membandingkan sinyal masukan (*input*) dengan sinyal *set point* (nilai yang diinginkan) dan menghasilkan sinyal keluaran (*output*) yang membantu mengatur sistem untuk mencapai *set point* yang diinginkan. Perhitungan sistem kendali PID melibatkan rumus matematis yang menggabungkan tiga komponen untuk menghasilkan sinyal *output* yang optimal. Sistem kendali PID digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti kontrol suhu, kontrol posisi, dan kontrol kecepatan [24].

Persamaan matematis pada penggabungan parameter sistem kendali PID dapat dirumuskan:

$$U(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (6)$$

Persamaan 1 menyatakan bahwa nilai $u(t)$ yang dihasilkan adalah hasil penjumlahan dari tiga faktor yaitu gain proportional (K_p), gain integral (K_i), dan gain derivative (K_d), dimana masing-masing faktor dipengaruhi oleh waktu (t) dan kesalahan (*error*).

a) Kontrol *Proportional* (P)

Kontrol proporsional dari kontrol PID menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan error atau perbedaan antara setpoint dan nilai aktual sistem. Proporsional memberikan respons yang lebih cepat pada perubahan besar dalam error karena mengeluarkan sinyal keluar sebesar konstanta pengalinya [25].

b) Kontrol *Integral* (I)

Pengontrol integral memiliki peran penting untuk menghilangkan kesalahan *steady-state* pada sebuah sistem kontrol. Tanpa adanya unsur integrator dalam *plant* ($1/s$), pengontrol proporsional tidak akan dapat memberikan respon yang akurat pada output sistem, sehingga penggunaan pengontrol integral menjadi penting untuk memastikan output sistem sesuai dengan respon yang diinginkan. Oleh karena itu, penggunaan pengontrol integral secara efektif dapat meningkatkan

performa sistem kontrol, terutama pada plant yang memerlukan penyesuaian jangka panjang untuk mencapai setpoint yang diinginkan.

c) Kontrol *Derivative* (D)

Pengontrol derivatif bekerja dengan menggunakan kecepatan perubahan sinyal error sebagai parameter pengendali. Jika tidak terdapat perubahan dalam sinyal kesalahan, maka pengontrol derivatif tidak akan memberikan perubahan pada output sistem. Dengan kata lain, kontrol derivatif hanya memberikan pengaruh ketika terjadi perubahan pada error, sehingga penting untuk memastikan bahwa parameter pengontrolnya diatur dengan tepat agar memberikan respon yang optimal pada sistem.

2.5 Metode Tuning PID dengan Ziegler-Nichols

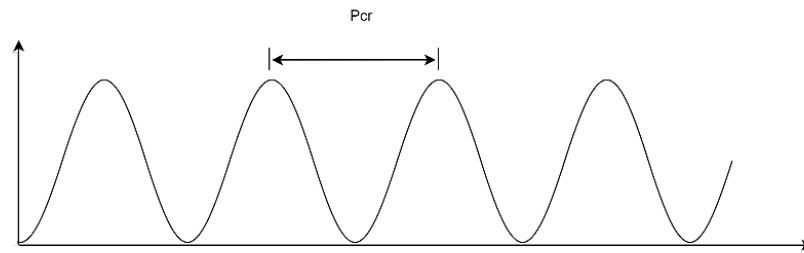
Tuning parameter pada kontrol PID merupakan proses penting untuk menentukan nilai-nilai optimal dari parameter-parameter kontrol seperti K_p , K_i , dan K_d . Selain itu, tuning parameter ini juga dapat mencakup penyetelan terhadap parameter lainnya seperti *time sampling*, penentuan *set point*, dan lain-lain.

Ada beberapa metode tuning PID yang umum digunakan dalam pengendalian sistem, salah satunya adalah Ziegler-Nichols. Pada tuning PID dengan menggunakan Ziegler-Nichols terdapat dua cara yaitu metode kurva reaksi dan metode osilasi (siklus kontinu). Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu metode osilasi (siklus kontinu).

Metode osilasi Ziegler-Nichols ini menggunakan pendekatan *trial and error* untuk mencari parameter K_p , T_i , dan T_d . Langkah-langkah metode osilasi ini yaitu sebagai berikut [26]:

1. Buat sebuah sistem loop tertutup dengan memasukkan kontroler P dan plant ke dalamnya.
2. Setelah itu, dengan menggunakan kontrol proporsional dengan nilai $K_i = 0$ dan $K_d = 0$ nilai tersebut ditingkatkan dari nol sampai ke nilai kritis

K_{cr} , sehingga mengakibatkan keluaran sistem mengalami osilasi yang berkelanjutan dengan amplitude yang kurang lebih konsisten [27].



Gambar 2.5 Osilasi Ziegler-Nichols

3. Berdasarkan keluaran osilasi yang berkelanjutan tersebut, penguatan kritis K_{cr} dan periode P_{cr} dapat ditentukan.
4. Menghitung nilai K_p , T_i , dan T_d sesuai yang ditunjukkan Tabel 2.2 parameter metode osilasi Ziegler-Nichols.

Tabel 2.2 Tabel Ziegler-Nichols 2

Type of Controller	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

5. Nilai K_i dan K_d didapatkan dengan perhitungan sebagai berikut:

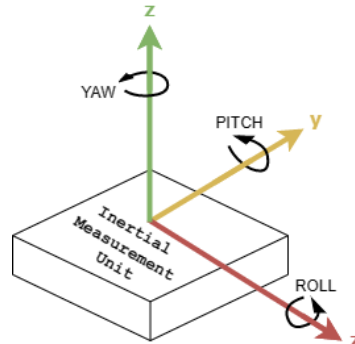
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (7)$$

$$K_d = K_p \times T_d \quad (8)$$

2.6 Inertial Measurement Unit (IMU)

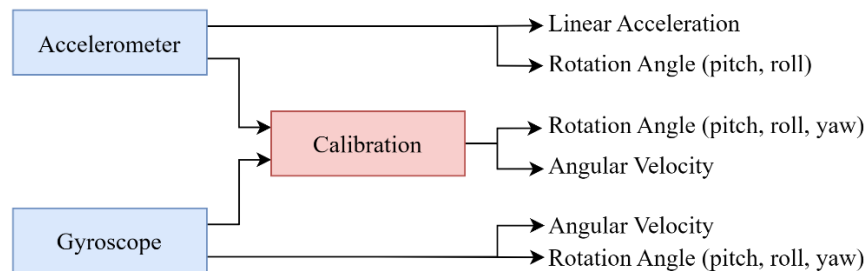
Inertial Measurement Unit (IMU) adalah perangkat elektronik yang terdiri dari beberapa sensor yang digunakan untuk mengukur dan memberikan orientasi objek, percepatan, kecepatan, perpindahan, laju sudut, dan sudut rotasi menggunakan akselerometer dan giroskop [28]. Jenis IMU ini terdiri dari akselerometer dan giroskop, dimana setiap sensor memiliki dua

hingga tiga derajat kebebasan untuk sumbu x, y, dan z seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Roll (x), Pitch (y), dan Yaw (z) pada sensor IMU

Dengan menggabungkan kedua sensor, akan didapatkan empat hingga enam *Degree of Freedom* (DOF). Data percepatan dari akselerometer dan kecepatan sudut dari giroskop diambil secara terpisah dan kemudian dikalibrasi untuk mendapatkan data keluaran yang lebih akurat seperti pada Gambar 2.7. Dari kedua sensor tersebut, sudut dapat diukur sehingga kedua data dapat dipadukan dan disesuaikan agar hasilnya lebih akurat.



Gambar 2.7 IMU berdasarkan dua jenis sensor

Sumber: Ahmad dkk. 2013 [29]

IMU jenis ini memiliki keunggulan yaitu dapat digunakan tanpa terpengaruh oleh medan magnet luar pada sensor ketika ditempatkan dekat dengan bahan feromagnetik. Namun, hanya mengandalkan akselerometer dan giroskop saja tidak cukup untuk meningkatkan akurasi pengukuran karena adanya kebisingan sensor dan masalah drift giroskop (kesalahan pengukuran pada sensor giroskop) [29].