

## Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Tertala Fuzzy-Mamdani untuk Optimasi Aerasi Tambak Udang Vaname

Muhammad Wahyudi<sup>1\*</sup> dan Reynard Fawwaz<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

\*Corresponding author, e-mail: Muhammadreynardfawwaz@students.undip.ac.id

Received: December 19<sup>th</sup>, 2024. Revised: April 17<sup>th</sup>, 2025. Accepted: April 20<sup>th</sup>, 2025.

Available online: April, 2025. Published: April, 2025.

**Abstract**— Whiteleg shrimp aquaculture needs an effective aeration system to maintain dissolved oxygen levels, ensuring that water quality remains appropriate for shrimp development. DC motors are commonly used for aeration due to their efficiency benefits; however, manual control is less successful in dealing with dynamic pond conditions. The fuzzy-PID approach is a system that combines the quick reaction of PID control with the adaptive capabilities of Fuzzy logic, allowing DC motors to automatically alter performance based on oxygen levels in the pond. Tests demonstrate that the PID controller with Fuzzy outperforms conventional PID in settling time, overshoot, undershoot, IAE, ISE, and ITAE while having a slower rise time. The PID controller with Fuzzy excels at settling time, overshooting, undershooting, IAE, ISE, and ITAE. The Fuzzy PID controller maintains overshoot and undershoot stability throughout the control process. Fuzzy-PID control in the aeration system intends to improve energy efficiency, save operating costs, and keep oxygen levels within acceptable ranges, increasing pond output with more efficient spending.

**Keywords:** Aeration, fuzzy-PID, dissolved oxygen, whiteleg shrimp.

**Abstrak**— Akuakultur udang vaname membutuhkan sistem aerasi yang efektif untuk menjaga kadar oksigen terlarut, memastikan bahwa kualitas air tetap sesuai untuk perkembangan udang. Motor DC umumnya digunakan untuk aerasi karena manfaat efisiensinya; namun, kontrol manual kurang berhasil dalam menangani kondisi kolam yang dinamis. Pendekatan fuzzy-PID adalah sistem yang menggabungkan reaksi cepat kontrol PID dengan kemampuan adaptif logika Fuzzy, yang memungkinkan motor DC untuk secara otomatis mengubah kinerja berdasarkan kadar oksigen di kolam. Pengujian menunjukkan bahwa pengontrol PID dengan Fuzzy mengungguli PID konvensional dalam waktu pengendapan, overshoot, undershoot, IAE, ISE, dan ITAE sambil memiliki waktu naik yang lebih lambat. Pengontrol PID dengan Fuzzy unggul dalam waktu pengendapan, overshooting, undershooting, IAE, ISE, dan ITAE. Pengontrol PID Fuzzy mempertahankan stabilitas overshoot dan undershoot di seluruh proses kontrol. Kontrol Fuzzy-PID dalam sistem aerasi dimaksudkan untuk meningkatkan efisiensi energi, menghemat biaya pengoperasian, dan menjaga kadar oksigen dalam rentang yang dapat diterima, sehingga meningkatkan hasil kolam dengan pengeluaran yang lebih efisien.

**Kata kunci:** Aerasi, fuzzy-PID, oksigen terlarut, udang vaname.

Copyright (c) 2025. Muhammad Wahyudi dan Reynard Fawwaz

### I. PENDAHULUAN

Dalam pengembangan budidaya udang vaname membutuhkan manajemen kualitas air yang baik untuk menciptakan lingkungan optimal bagi pertumbuhan udang, dengan menjaga kadar DO (dissolved oxygen) yang stabil sebagai faktor utama. Aerasi pada tambak berperan penting dalam meningkatkan kadar DO yang mendukung metabolisme udang serta menjaga keseimbangan biologis ekosistem tambak. Penelitian membuktikan bahwa kadar DO yang rendah dapat menurunkan produktivitas dan kesehatan udang, sehingga sistem aerasi yang efisien menjadi kebutuhan utama (Prasetyo, A., & Arifin, D., 2020). Motor DC semakin

sering digunakan untuk menggerakkan aerator karena efisiensinya dan kemudahan pengaturan kecepatan (Waide, P., & Brunner, C. U., 2021). Namun, pengendalian kecepatan motor DC tetap menjadi tantangan, terutama dengan adanya variabel eksternal seperti suhu dan kadar oksigen yang berubah-ubah (Hidayat dkk, 2021).

Metode kontrol Fuzzy-PID dapat memberikan solusi dalam mengatasi tantangan tersebut, karena memadukan respons cepat dari kendali PID dengan penyesuaian dinamis yang ditawarkan oleh kendali logika Fuzzy (Borase dkk, 2021). Metode Fuzzy-PID pada Sistem Kendali Adaptif Neuro-Fuzzy PID untuk Kapal Katamaran Tanpa Awak memungkinkan sistem beradaptasi dengan sistem aerasi mengenai

perubahan lingkungan tambak, sehingga motor dapat mengatur aerasi secara otomatis sesuai kebutuhan oksigen (Irmawan dkk, 2021).

Pengendalian kecepatan motor DC menggunakan pengendali Fuzzy -PID berbasis Real Time Windows pada berperan utama dalam sistem, sedangkan pengendali Fuzzy membantu mengurangi overshoot dengan menerima sinyal error dan delta error, diimplementasikan pada PC menggunakan MATLAB Real Time Windows Target untuk memantau respons motor DC dalam berbagai kondisi masukan (Putra B. & Suryanto, L., 2022). Sistem kendali Fuzzy-PID mengintegrasikan pengatur kecepatan motor melalui PID dengan penyeimbang output menggunakan logika Fuzzy untuk meminimalkan lonjakan saat terjadi perubahan. Penerapannya sangat efektif pada sistem aerasi tambak udang vaname, dimana sistem ini secara otomatis mengoptimalkan kerja motor aerator untuk mempertahankan kadar oksigen yang ideal. Hal ini menjadikan teknologi otomatisasi berbasis Fuzzy-PID sebagai inovasi penting dalam pengembangan budidaya udang yang lebih efisien dan terkontrol.

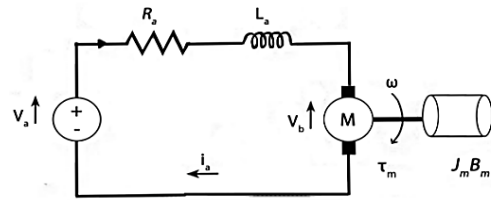
Penelitian lain menyebutkan bahwa pengontrol Fuzzy-PID memiliki aplikasi penting, seperti mengontrol pitch pesawat untuk menjaga stabilitas penerbangan, menjaga kestabilan kecepatan motor DC meskipun terjadi perubahan beban, mengontrol sistem servo CNC untuk mengurangi overshoot dan mempercepat waktu stabilisasi, serta mengelola motor BLDC dengan kestabilan tinggi, response cepat, dan presisi yang lebih baik (Borase, 2021).

Oleh karena itu, Fuzzy-PID juga dipilih karena kemampuannya menangani sistem non-linier, seperti pada tambak udang, di mana variabel yang sulit diprediksi seperti suhu dan salinitas air dapat dipantau untuk menjaga kualitas air yang mendukung pertumbuhan udang secara optimal.

## II. METODE

### A. Model Dinamik Motor DC

Motor DC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik melalui interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh kutub-kutub dan arus yang mengalir pada inti armature. Motor ini menghasilkan torsi yang secara langsung memberikan gerak rotasi sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik. Ketika dihubungkan dengan roda atau drum dan kabel, motor ini dapat menghasilkan gerak translasi. Rangkaian ekuivalen motor DC ditunjukkan pada Gambar 1. Adapun nilai-nilai parameter motor DC yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1 (Bansal, U. K., & Narvey, R., 2023).



Gambar 1. Representasi Skematik dari Motor DC

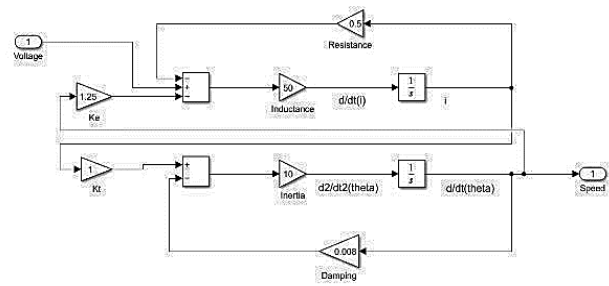
Tabel 1. Parameter Motor DC

Parameter	Nilai
Momen inersia	$J_m = 0,1 \text{ kg/m}^2$
Koefisien gesekan	$B_m = 0,008 \text{ N.ms}$
Konstanta GGL	$K_b = 1,25 \text{ V/rad}^{-1}$
Konstanta torsi	$K_a = 1 \text{ Nm/A}$
Resistansi listrik	$R_a = 0,5 \text{ ohm}$
Induktansi listrik	$L_a = 0,02 \text{ H}$
Tegangan armature	$V_a$
Tegangan GGL	$V_b$
Arus armature	$i_a$
Torsi yang dihasilkan	$\tau_m$
Torsi beban	$T_L$
Kecepatan motor	$w$
Sudut poros motor	$\theta$

Dinamika fisik motor DC, seperti pada pada Gambar 1, dapat dinyatakan dalam bentuk transformasi Laplace pada fungsi alih motor DC seperti pada persamaan 1 (Sachit, S., & Vinod, B. R., 2022).

$$\frac{w(s)}{v_a(s)} = \frac{K_a}{(sL_a + R_a)(sJ_m + B_m) + K_a K_b} \quad (1)$$

Motor DC dapat direpresentasikan melalui kombinasi struktur listrik dan mekanik. Struktur listrik menggambarkan rangkaian listrik pada belitan armature, yang terdiri dari resistor yang tersusun seri dengan impedansi belitan armatur. Sementara itu, struktur mekanik mencakup momen inersia rotor dan beban, serta gaya gesekan yang muncul akibat gerakan mekanis. Dari rangkaian listrik pada persamaan matematis motor DC pada persamaan 1 dapat digambarkan dalam model fungsi alih dengan menggunakan diagram seperti Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Motor DC

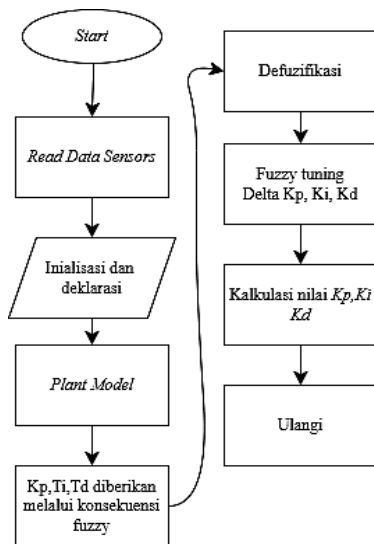
Diagram blok Simulink pada Gambar 2. merupakan model matematis motor DC yang

# Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Tertala Fuzzy-Mamdani untuk Optimasi Aerasi Tambak Udang Vaname

menggambarkan interaksi antara komponen listrik dan mekanik. Bagian listrik mencakup tegangan input, resistansi, induktansi, dan konstanta gaya gerak listrik ( $K_e$ ), yang menentukan arus listrik melalui integrasi perubahan arus. Bagian mekanik mengubah arus menjadi torsi melalui konstanta torsi ( $K_t$ ), dengan mempertimbangkan inersia  $0,1\text{ s kg.m}^2$  dan redaman  $0,5$  yang memengaruhi kecepatan sudut rotor. Loop umpan balik memanfaatkan Back EMF, redaman, dan arus untuk menjaga stabilitas sistem, dengan kecepatan sebagai output utama. Model ini menjelaskan cara motor DC mengontrol dan menghasilkan gerakan mekanis.

## B. Flowchart Sistem

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Kontrol Otomat, Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Kampus Tembalang. Waktu pelaksanaan dimulai dari bulan Oktober - Desember 2024. Analisis data dapat dilihat pada Gambar 3:



Gambar 3. Diagram alir penelitian

### 1. Read Data Sensor

Sistem membaca data dari sensor sebagai input yang akan digunakan untuk proses pengendalian. Proses dimulai untuk mengendalikan kecepatan motor DC yang digunakan untuk menggerakkan sistem aerasi di tambak udang vaname. Sistem ini bertujuan untuk menjaga tingkat DO pada kecepatan optimal bagi pertumbuhan udang vaname. Sistem membaca data dari sensor, seperti sensor DO dan sensor kecepatan motor DC. Data ini diperlukan untuk mengetahui kondisi aktual tambak dan kecepatan motor yang akan dikontrol. Misalnya, jika kadar DO di bawah batas optimal, sistem akan meningkatkan kecepatan motor untuk mengoptimalkan aerasi.

### 2. Inisialisasi dan Deklarasi

Sistem melakukan inisialisasi variabel yang diperlukan untuk pengendalian. Ini mencakup pengaturan awal parameter kontrol  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ , serta variabel lainnya yang akan digunakan dalam pengendalian Fuzzy dan PID. Inisialisasi ini penting untuk memastikan bahwa semua parameter sudah siap untuk digunakan dalam proses tuning.

### 3. Plant Model

Plant model pada kasus ini adalah model matematika yang menggambarkan perilaku dinamis dari motor DC dan proses aerasi di tambak udang. Model ini mencakup hubungan antara input tegangan atau arus motor dengan output kecepatan motor, serta pengaruh kecepatan aerasi terhadap kadar DO dalam air. Dengan memahami plant model, sistem dapat memperkirakan respons motor terhadap perubahan parameter kontrol.

### 4. Defuzzifikasi

Nilai Fuzzy yang dihasilkan dari aturan Fuzzy diubah menjadi nilai konkret melalui proses defuzzifikasi. Nilai konkret ini adalah nilai yang digunakan untuk parameter kontrol PID, seperti  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Proses defuzzifikasi menghasilkan angka yang jelas untuk mengoptimalkan kontrol kecepatan motor secara langsung.

### 5. Fuzzy Tuning Delta $K_p$ , $K_i$ , $K_d$

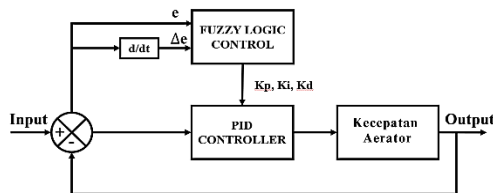
Sistem melakukan penyesuaian (Tuning) parameter kontrol  $\Delta K_p$ ,  $\Delta K_i$ , dan  $\Delta K_d$  menggunakan metode Fuzzy untuk meningkatkan kinerja kontrol motor DC. Nilai delta ini mewakili perubahan yang diperlukan untuk setiap parameter, disesuaikan berdasarkan kondisi saat ini di tambak. Jika ada gangguan atau perubahan dalam kondisi air tambak, metode Fuzzy menyesuaikan nilai ini secara dinamis untuk menjaga aerasi pada kecepatan optimal.

### 6. Kalkulasi nilai $K_p$ , $K_i$ , $K_d$

Setelah mendapatkan nilai tuning dari Fuzzy, sistem menghitung nilai parameter kontrol PID yang baru, yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Parameter ini akan menentukan seberapa agresif motor merespons perubahan dalam kondisi tambak untuk menjaga kecepatan yang optimal, sehingga kadar DO tetap sesuai dengan kebutuhan udang.

Diagram blok sistem kontrol Fuzzy -PID untuk kecepatan motor DC ditampilkan pada Gambar 4. Sistem pada Gambar 4. menunjukkan sistem kontrol PID yang dilengkapi dengan logika Fuzzy untuk mengatur kecepatan aerator. Sinyal input atau setpoint menentukan kecepatan aerator yang diinginkan. Kecepatan aktual yang terukur dikirim

kembali ke titik pengurang untuk dibandingkan dengan setpoint, menghasilkan error ( $e$ ) atau selisih antara kecepatan yang diinginkan dan yang tercapai. Nilai error ini, bersama dengan perubahan error ( $\Delta e$ ), diproses oleh Fuzzy Logic Control untuk menentukan nilai parameter PID ( $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ ) yang sesuai. Parameter ini selanjutnya digunakan oleh PID Controller untuk menghasilkan sinyal kontrol yang akan mengatur kecepatan aerator. Dengan adanya umpan balik ini, sistem mampu menyesuaikan sinyal kontrolnya secara terus-menerus untuk mengoreksi perbedaan antara kecepatan aktual dan setpoint.



Gambar 4. Diagram Blok Penelitian

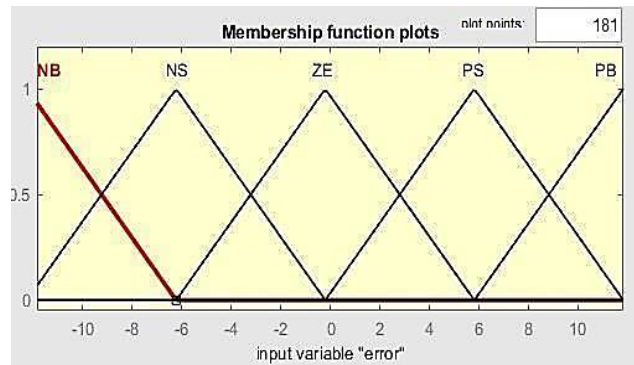
Selanjutnya, PID controller menggunakan parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang dihasilkan untuk memproses sinyal kontrol yang akan mengatur kecepatan aerator. Kecepatan aktual aerator, yang menjadi output sistem, kemudian dikembalikan sebagai umpan balik ke titik pengurang, sehingga memungkinkan sistem untuk melakukan koreksi berkelanjutan. Tuning dengan logika Fuzzy pada kontroler PID ini dirancang untuk meningkatkan presisi dan respons kontrol kecepatan aerator, yang sangat penting dalam aplikasi seperti pengaturan aerasi pada tambak udang Vannamei.

### C. Perancangan Sistem Logika Fuzzy

Logika Fuzzy menunjukkan sejauh mana suatu nilai itu benar dan sejauh mana suatu nilai itu salah, tidak seperti logika klasik, suatu nilai hanya mempunyai 2 kemungkinan yaitu merupakan suatu anggota himpunan atau tidak (Tahtawi dkk, 2020). Dasar dari penentuan fungsi keanggotaan error didasari pada pengontrolan kecepatan menuju setpoint 50 dan dasar dari penentuan fungsi keanggotaan delta error didasari pada kemungkinan perubahan error yang dapat terjadi. Dasar dari penentuan fungsi keanggotaan untuk  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  didasari pada nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  yang digunakan pada kondisi eksisting yaitu dengan nilai  $K_p = 6,396$ ,  $K_i = 16,494$ , dan  $K_d = 0,0597$  (Athoillah, M. N., & Zuhrie, M. S., 2021). Fungsi keanggotaan pada input dan output menggunakan fungsi segitiga (Suwandi, I. A. P. dkk, 2021).

Fungsi keanggotaan untuk error yaitu NB, NS, ZE, PS, dan PB dengan range  $[-11,834, 11,834]$  yang didasari dari percobaan simulasi kontrol PID

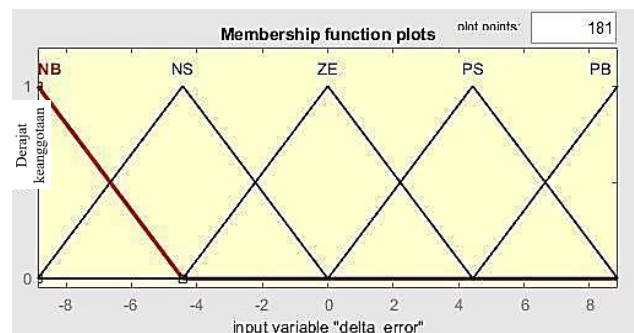
konvensional, sehingga didapatkan range perubahan error yang terjadi berkisar antara  $-11,834$  hingga  $11,834$ . Fungsi keanggotaan untuk error dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Fungsi keanggotaan error

Gambar 5 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk error yaitu Negative Big (NB) dengan range  $[-11,83, -11,24, -6,216]$ , Negative Small (NS) dengan range  $[-11,24, -6,216, -0,2005]$ , Zero (ZE) dengan range  $[-6,216, -0,2005, 5,815]$ , Positive Small (PS) dengan range  $[-0,237, 5,78, 11,8]$ , Positive Big (PB) dengan range  $[5,815, 11,83, 12,83]$ .

Fungsi keanggotaan untuk delta error terdiri dari NB, NS, ZE, PS, dan PB pada rentang  $[-8,862, 8,862]$  yang didasari dari percobaan simulasi kontrol PID konvensional, sehingga didapatkan range perubahan delta error yang terjadi berkisar antara  $-8,862$  hingga  $8,862$ . Pada Gambar 6 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk delta error.



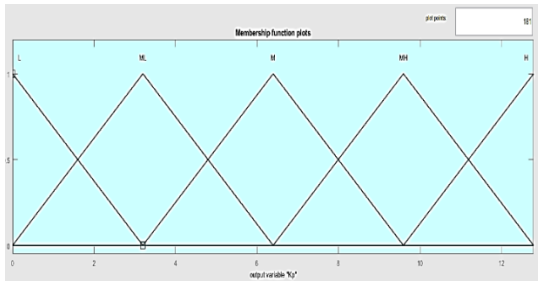
Gambar 6. Fungsi keanggotaan delta error

Gambar 6 menunjukkan fungsi keanggotaan untuk delta error yaitu Negative Big (NB) dengan range  $[-8,862, -8,862, -4,431]$ , Negative Small (NS) dengan range  $[-8,862, -4,431, -0,0006152]$ , Zero (ZE) dengan range  $[-4,43, -0,000615, 4,43]$ , Positive Small (PS) dengan range  $[-0,113, 4,317, 8,75]$ , Positive Big (PB) dengan range  $[4,429, 8,862, 8,862]$ .

Fungsi keanggotaan untuk  $K_p$  terdiri dari L, ML, M, MH, dan H dengan range  $[0, 12,79]$  didapatkan range tersebut dikarenakan nilai  $K_p$  pada

## Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Tertala Fuzzy-Mamdani untuk Optimasi Aerasi Tambak Udang Vaname

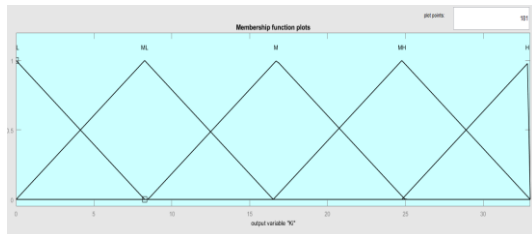
eksisting bernilai 6,396. Fungsi keanggotaan parameter Kp dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Fungsi keanggotaan Kp

Gambar 7 menunjukkan fungsi keanggotaan Kp di mana terdapat 5 buah fungsi keanggotaan untuk Kp yaitu Low (L) dengan range [0, 0, 3,2], Medium Low (ML) dengan range [0, 3,2, 6,4], Medium (M) dengan range [3,2, 6,4, 9,6], Medium High (MH) dengan range [6,4, 9,6, 12,79], High (H) dengan range [9,6, 12,79, 12,79].

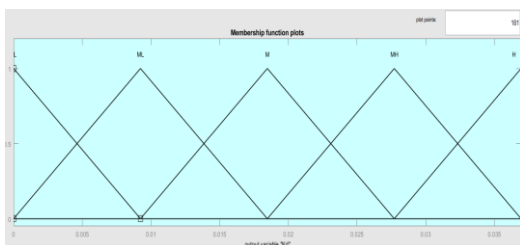
Fungsi keanggotaan untuk Ki yaitu L, ML, M, MH, dan H dengan range [0, 33,03] didapatkan range tersebut dikarenakan nilai Ki pada eksisting bernilai 16,517. Fungsi keanggotaan untuk Ki parameter terlihat di Gambar 8.



Gambar 8. Fungsi keanggotaan Ki

Gambar 8 menunjukkan fungsi keanggotaan Ki di mana terdapat 5 buah fungsi keanggotaan untuk Ki yaitu Low (L) dengan range [0, 0, 8,26], Medium Low (ML) dengan range [0, 8,26, 16,52], Medium (M) dengan range [8,26, 16,52, 24,78], Medium High (MH) dengan range [16,52, 24,78, 33,03], High (H) dengan range [24,78, 33,03, 33,03].

Fungsi keanggotaan untuk Kd yaitu L, ML, M, MH, dan H dengan range [0, 1,158] didapatkan range tersebut dikarenakan nilai Kd pada eksisting bernilai 0,0597. Fungsi keanggotaan parameter Kd pada Gambar 9.



Gambar 9. Fungsi keanggotaan Kd

Gambar 9 menunjukkan fungsi keanggotaan Kd di mana terdapat 5 buah fungsi keanggotaan untuk Kd yaitu Low (L) dengan range [0, 0, 0,0092], Medium Low (ML) dengan range [0, 0,0092, 0,019], Medium (M) dengan range [0,0092, 0,019, 0,028], Medium High (MH) dengan range [0,019, 0,028, 0,037], High (H) dengan range [0,028, 0,037, 0,037].

Penentuan rule base dapat dijadikan dasar sebagai perancangan rule base pada keluaran Kp, Ki, dan Kd. Sistem kontrol ini menggunakan rule base yang terdiri dari 25 aturan untuk memastikan respons sistem yang optimal. Aturan-aturan tersebut dirancang khusus untuk mengendalikan kecepatan motor DC, dengan memperhatikan berbagai kombinasi kondisi masukan guna menghasilkan parameter kontroler (Abdelghany, M. A dkk, 2023). Tabel 2. menunjukkan aturan fuzzy untuk keluaran Kp.

Tabel 2. Penentuan rule Fuzzy terhadap keluaran Kp

e/Δe	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	H	H	MH	MH	SH	M	M
NM	H	H	MH	SH	SH	M	SL
NS	MH	MH	MH	SH	M	SL	SL
Z	MH	MH	SH	M	SL	ML	ML
PS	SH	SH	M	SL	SL	ML	ML
PM	SH	M	SL	ML	ML	ML	L
PB	M	M	ML	ML	ML	L	L

Rules Kp ditentukan berdasarkan fungsinya untuk mempercepat respons sistem. Jika error besar dengan delta error kecil atau besar (jauh dari setpoint), diperlukan Kp besar. Jika error kecil dan delta error kecil (dekat dan stabil), diperlukan Kp sedang. Jika dekat setpoint tetapi berubah cepat, diperlukan Kp kecil untuk menghindari overshoot. Aturan Fuzzy untuk Kp dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Penentuan rule Fuzzy terhadap keluaran Ki

e/Δe	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	L	L	ML	ML	SL	M	M
NM	L	L	ML	SL	SL	M	M
NS	L	ML	SL	SL	M	SH	SH
Z	ML	ML	SL	M	SH	MH	MH
PS	ML	SL	M	SH	SH	MH	H
PM	M	M	SH	SH	MH	H	H
PB	M	M	SH	MH	MH	H	H

Rules untuk Kd didasarkan pada fungsinya menghilangkan steady state error. Kd kecil digunakan jika error besar dan delta error kecil, atau jika error kecil dan delta error kecil untuk mencegah overshoot. Sebaliknya, Kd besar diperlukan jika error besar dan delta error besar. Penentuan rule fuzzy untuk Kd disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Penentuan rule Fuzzy terhadap keluaran Kd

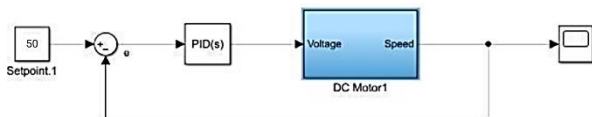
e/Δe	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	SH	SL	L	L	L	ML	SH

NM	SH	SL	L	ML	ML	SL	M
NS	M	SL	ML	ML	SL	SL	M
Z	M	SL	SL	SL	SL	SL	M
PS	M	M	M	M	M	M	M
PM	H	SL	SH	SH	SH	SH	H
PB	H	MH	MH	MH	SH	SH	H

Rules  $K_d$  ditentukan berdasarkan fungsinya untuk meredam osilasi dan overshoot.  $K_d$  kecil diperlukan jika error besar dan delta error kecil (mendekati setpoint dengan cepat) atau jika error kecil dan delta error kecil (stabil di dekat setpoint).  $K_d$  besar diperlukan jika error besar dan delta error besar (menjauh dari setpoint).  $K_d$  sedang digunakan saat sistem dekat setpoint dan stabil.

#### D. Kendali PID-Konvensional

Simulasi kontrol PID pada kondisi existing untuk mengamati respon sistem dengan harapan simulasi ini dapat mewakili plant sesungguhnya. Dalam proses simulasi, data yang diambil mencakup nilai error dan delta error dari sistem dengan menggunakan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  pada kondisi eksisting dengan nilai  $K_p = 6,396$ ,  $K_i = 16,494$ , dan  $K_d = 0,0597$  (Athoillah, M. N., & Zuhrie, M. S., 2021). Data ini penting karena akan digunakan sebagai dasar dalam perancangan kontroler PID dengan Tuning menggunakan logika Fuzzy. Hasil pemodelan matematis digunakan untuk membangun diagram blok dengan kontroler PID seperti pada Gambar 10.



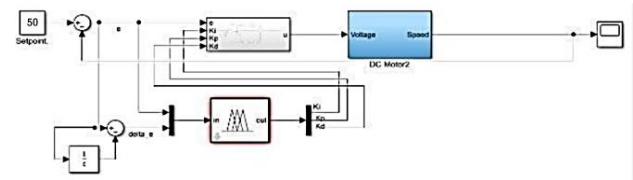
Gambar 10. Diagram blok sistem kontrol PID konvensional

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 10, simulasi dilakukan untuk menguji dan mengevaluasi performa kontroler menggunakan perangkat lunak Simulink Matlab. Sistem kontrol yang dirancang diuji untuk mengamati respons kontroler PID konvensional terhadap berbagai kondisi operasional. Analisis simulasi digunakan untuk mempelajari perilaku error dan delta error, sehingga parameter kontroler PID dapat disesuaikan. Simulasi ini membantu menguji dan mengevaluasi kontroler sebelum implementasi, memungkinkan optimasi desain untuk performa yang lebih baik dan respons pengendalian kecepatan yang lebih akurat.

#### E. Kendali PID-Tuning Fuzzy

Metode kontrol PID dengan Fuzzy merupakan teknik pengendalian menggunakan kontroler PID di mana nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  diatur menggunakan logika Fuzzy (Gunawan D. dkk, 2022). Penggunaan kontrol

PID dirancang dengan struktur ideal independen, dan diharapkan mampu menghasilkan sinyal kendali terbaik. Diagram blok kendali PID yang digunakan ditampilkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram blok Fuzzy-PID sistem pengendalian kecepatan

#### F. Indeks Evaluasi Kerja

Kinerja sistem dievaluasi menggunakan indeks yang dipilih berdasarkan karakteristik proses untuk menyortir aspek tertentu dari performa. Dengan pendekatan ini, sistem dapat dirancang dan disesuaikan agar sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Indeks-indeks tersebut berfungsi sebagai parameter untuk mengevaluasi performa sistem kontrol, dan masing-masing indeks dapat dihitung melalui persamaan yang dijelaskan pada bagian berikut (Bozali, B. dkk, 2024).

Integral of the Square Error (ISE)

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2)$$

Integral of Absolute Magnitude Error (IAE)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3)$$

Integral of Time multiplied by the Absolute Error (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)| dt \quad (4)$$

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

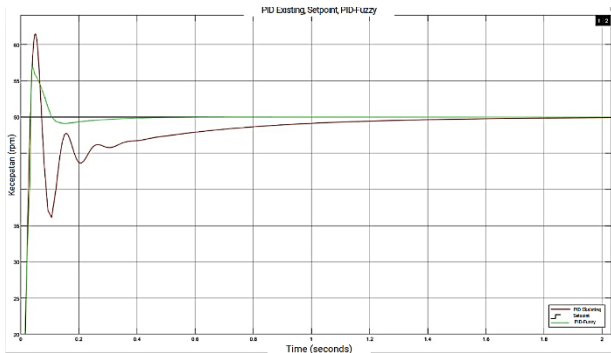
Sistem ini akan diuji dengan referensi kecepatan yang ditargetkan mencapai 50 rpm. Kontroler Fuzzy-PID yang telah dirancang akan dibandingkan dengan set point serta kontrol PID yang sudah ada. Sistem ini dirancang untuk meminimalkan waktu menuju titik steady state dan meminimalkan nilai evaluasi kinerja model dalam bentuk ISE, IAE, ITAE (Maghfiroh, H., dkk, 2021). Pada kontrol PID yang eksisting, parameter yang digunakan adalah  $K_p = 6,396$ ,  $K_i = 16,494$ , dan  $K_d = 0,0597$  (Rositawati., dkk., 2022).

#### A. Hasil Pengujian Respons Sistem dengan Nilai Referensi Tetap

Dalam pengujian respons sistem, dilakukan pengujian dengan nilai referensi sebesar 50 rpm menggunakan kontroler PID berbasis Fuzzy.

# Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Tertala Fuzzy-Mamdani untuk Optimasi Aerasi Tambak Udang Vaname

Kontroler ini dirancang untuk memenuhi kriteria performa seperti ISE, IAE, dan ITAE yang digunakan untuk mengukur tingkat kesalahan sistem (Ashiddiqi, 2021). Nilai kriteria yang lebih kecil mencerminkan stabilitas, respon cepat, dan minimisasi overshoot yang lebih baik. Respons sistem kontrol aktual menggunakan kontrol PID dengan nilai  $K_p = 6,396$ ,  $K_i = 16,494$ , dan  $K_d = 0,0597$ , dengan hasil dapat dilihat pada Gambar 12 (Athoillah, M. N., & Zuhrie, M. S., 2021).



Gambar 12. Respons sistem untuk nilai referensi tetap

Hasil pengujian yang didapatkan pada Gambar 12 menunjukkan hasil respons sistem yang berbeda antara kontroler PID dengan Fuzzy dan kontroler PID konvensional (Ridwan, dkk., 2019). Pada kontroler PID dengan Fuzzy, sistem menunjukkan Tabel 5. Hasil pengujian respons sistem dengan nilai referensi tetap.

Tabel 5. Hasil pengujian respons sistem dengan nilai referensi tetap

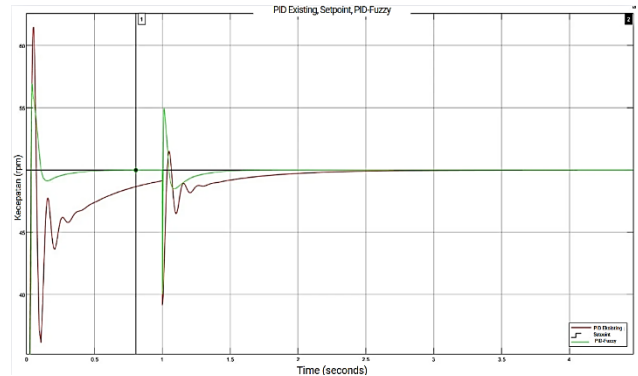
Kontroler	Steady Time	Evaluasi Kinerja		
		IAE	ISE	ITAE
PID	3,42	4,38	49,9	1829
Fuzzy-PID	0,81	1,35	33,5	654

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 5 menunjukkan bahwa kontroler PID dengan Fuzzy menunjukkan kontroler PID konvensional tampaknya memiliki keterbatasan yang dapat diatasi melalui penerapan teknik Fuzzy, yang menghasilkan respons sistem yang lebih baik. Mendapatkan kriteria ISE yang menunjukkan hasil yang terbaik dengan ditandainya yaitu overshoot yang lebih tinggi sedikit dari kriteria ITSE (Transferano, dkk., 2021). Melalui perhitungan indeks kinerja, kontroler Fuzzy-PID berhasil mencapai nilai kesalahan kumulatif yang lebih rendah.

### B. Pengujian Respons Perubahan Referensi

Dalam pengujian respon sistem kontrol PID dengan Fuzzy dilakukan dengan memberikan nilai referensi yang berubah (Ma'arif, dkk., 2021). Pengujian ini

dilakukan untuk mengetahui sistem dalam mengikuti perubahan referensi. Nilai referensi kecepatan air divariasikan dengan dinaikkan dan diturunkan sistem seperti pada Gambar 13. Pengujian ini diharapkan membuat sistem dapat beradaptasi terhadap perubahan nilai referensi dengan cepat dan baik.



Gambar 13. Respons sistem untuk perubahan nilai referensi

Hasil pengujian yang didapatkan pada Gambar 13 menunjukkan hasil respons sistem yang berbeda antara kontroler PID dengan Fuzzy dan kontroler PID konvensional. Pada kontroler PID dengan Fuzzy, sistem menunjukkan Tabel 6. Hasil pengujian respons sistem dengan nilai referensi tetap.

Tabel 6. Hasil pengujian respons sistem dengan perubahan referensi

Kontroler	Steady Time	Evaluasi Kinerja		
		IAE	ISE	IAE
PID	1,04	2,04	27,2	1379
Fuzzy-PID	0,77	2,04	24,7	1204

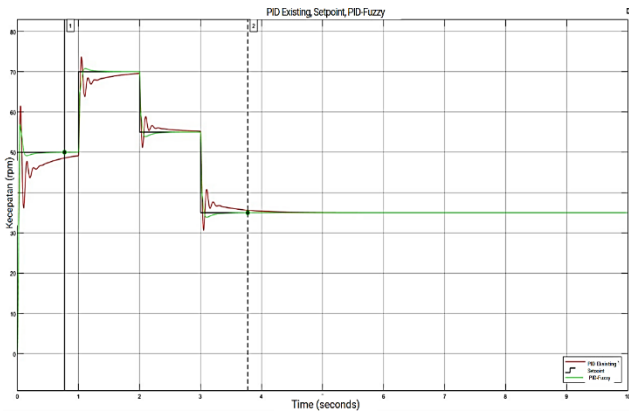
Berdasarkan data pengujian pada Tabel 6 menunjukkan perbedaan antara respons sistem antara kontroler PID konvensional dengan kontroler PID dengan Fuzzy. Kontroler fuzzy-PID unggul dalam waktu stabilisasi yang cepat dan kemampuan mengurangi kesalahan sistem, terlihat dari nilai ISE yang rendah serta pengendalian fluktuasi response sistem (Prihatna, 2020). Meskipun IAE dan nilai yang dihasilkan hampir sama dengan kontroler konvensional, kontroler fuzzy-PID secara keseluruhan memberikan performa lebih baik, terutama pada sistem dengan dinamika kompleks, dengan respons yang lebih halus, terkendali, dan efisien dalam menghadapi perubahan (Ashari, dkk., 2020).

### C. Pengujian Respons Sistem dengan Gangguan

Pengujian pengaruh gangguan pada sistem pengontrolan kecepatan dilakukan dengan memberikan gangguan sesaat, yaitu dengan memberikan sinyal gangguan pada plant, sehingga kecepatan pada plant turun (Triyono, dkk., 2023).



Kontroler diharapkan mampu mengembalikan kecepatan dengan cepat sesuai setpoint setelah mengalami gangguan (Gumilar, 2019). Gambar 14 menunjukkan respons sistem ketika mengalami gangguan.



Gambar 14. Respons sistem terhadap gangguan

Gambar 14 menunjukkan hasil pengujian gangguan sesaat pada detik ke-1, di mana kecepatan pada plant naik drastis selama 1 detik hingga mencapai 70, sesuai dengan penambahan gangguan, kedua kontroler berusaha dengan cepat mengembalikan output ke setpoint, yang menyebabkan sedikit overshoot sebelum sistem kembali stabil. Pada kontroler PID dengan Fuzzy, proses pengembalian output ke setpoint berlangsung lebih lambat (Hartadi, dkk., 2024), meskipun tidak menyebabkan overshoot sebesar kontroler PID konvensional. Evaluasi menggunakan ISE, IAE, dan ITAE menunjukkan bahwa PID dengan Fuzzy memiliki performa lebih baik dalam mengurangi osilasi dan kesalahan total selama proses stabilisasi. Hasil perbandingan lengkap dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian respons sistem dengan gangguan

Kontroler	Steady Time	Evaluasi Kinerja		
		IAE	ISE	ITAE
PID	1	8,76	71,53	3343
Fuzzy-PID	0,77	2,91	44,65	1204

Secara keseluruhan, kontroler PID dengan tuning Fuzzy menunjukkan kecepatan untuk mencapai steady state lebih cepat dan baik dalam hal meredam overshoot dan undershoot (Fakhrudin, dkk., 2021), meskipun dengan nilai rise time yang lebih lambat dibandingkan dengan kontroler PID konvensional. Kontroler PID dengan Fuzzy cocok untuk diaplikasikan pada plant yang membutuhkan respons yang cepat, seperti pada pengendalian kecepatan pada motor dc plant aerator.

#### IV. KESIMPULAN

Pengujian menunjukkan bahwa kontroler PID dengan Fuzzy memiliki kinerja lebih baik dalam settling time, overshoot, undershoot, IAE, ISE, dan ITAE dibandingkan PID konvensional, meskipun rise time-nya lebih lambat. Kontroler ini menjadi pilihan terbaik untuk meredam overshoot dan mencapai steady state lebih cepat. Pengujian dengan variasi referensi menunjukkan bahwa kontroler PID dengan Fuzzy unggul dalam settling time, overshoot, undershoot, IAE, ISE, dan ITAE, meskipun responnya lebih lambat dibandingkan PID konvensional. Kontroler ini tetap menjadi pilihan terbaik karena mampu meredam overshoot dan mencapai steady state lebih cepat. Pengujian menunjukkan bahwa kontroler PID dengan Fuzzy unggul dalam menjaga stabilitas overshoot dan undershoot selama proses pengendalian. Meskipun responnya lebih lambat dibandingkan PID konvensional, kontroler ini ideal untuk plant yang memerlukan respon cepat, seperti pada pengendalian kecepatan pada motor dc plant aerator.

#### REFERENSI

Abdelghany, M. A., Elnady, A. O., & Ibrahim, S. O. (2023). Optimum PID controller with fuzzy self-Tuning for DC servo motor. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 4(4), 500–508. <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i4.18676>

Al Tahtawi, A. R., Yahya, S., Setiadi, B., & Marsya, C. (2020). The implementation of embedded fuzzy logic controller on liquid kecepatan control system. *Advances in Engineering Research*, 198, 161–166.

Ashari, A. B., Suprianto, B., & Hermawan, A. C. (2020). Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID. *Jurnal Teknik Elektro*, 9(3), 763-771.

Ashiddiqi, M. R. (2021). Desain Dan Implementasi Tuning Cascade PID Pada Heat Exchanger Tipe Shell-Tube (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).

Athoillah, M. N., & Zuhrie, M. S. (2021). Rancang Bangun PID Controller Dengan Tuning Ziegler Nichols Untuk Pengendalian Posisi Sudut Motor DC. *Jurnal Teknik Elektro*, 10(2), 537-545.

Bansal, U. K., & Narvey, R. (2023). Speed control of DC motor using fuzzy PID Controller. *Advance in Electronic and Electric Engineering*, 3(9), 1209–1220.

Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, S. Y., & Pawar, S. N. (2021). A review of PID control, Tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818–827.

Bozali, B., Al Saremi, N. B. N., & Öztürk, A. (2024). Enhancing DC Motor Speed Control Performance Using Heuristic Optimization and Comparative



## Kendali Kecepatan Motor DC Menggunakan PID Tertala Fuzzy-Mamdani untuk Optimasi Aerasi Tambak Udang Vaname

- Analysis of Control Methods. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 12(4), 2220-2244.
- FAKRUDDIN, H. H., TOAR, H., PURWANTO, E., OKTAVIANTO, H., BASUKI, G., APRIYANTO, R. A. N., & MUNTASHIR, A. A. (2021). Strategi implementasi adaptive neuro fuzzy inference system (anfis) pada kendali motor induksi 3 fase metode vektor-tidak langsung. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(4), 786.
- Gumilar, E., & MT, I. A. F. (2019). Pengaturan Tekanan Pada Rig 38-714 Menggunakan Kontroler PI Berbasis Neural Network Dengan Skema MRAC (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Gunawan, D., Away, Y., Sara, I. D., & Novandri, A. (2022). Komparasi performansi antara Proportional Integral Derivative Controller (PID) dan Fuzzy Logic Controller (FLC) pada penjejak cahaya dengan tiga sensor. *Jurnal ELTIKOM: Jurnal Teknik Elektro, Teknologi Informasi dan Komputer*, 6(2), 140–151.
- Hartadi, F. T., Wicaksana, B. A., Saputro, H., & Priambodo, A. S. (2024). Sistem Kendali Fuzzy Untuk Robot Mobile: Studi Kasus Pelacakan Objek Bergerak Menggunakan Simulasi Webots. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3).
- Hidayat, M., Purnama, R., & Kartika, T. (2021). Optimasi kendali motor DC pada sistem aerasi otomatis. *Jurnal Teknik Akuakultur*, 8(2), 50–63.
- Irmawan, E., Priyambodo, T. K., & Sofyan, E. (2021). Sistem Kendali Adaptif Neuro-Fuzzy PID pada Kapal Katamaran Tanpa Awak. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronika, Engine*, 3(2), 5–16.
- Ma'arif, A., Istiarno, R., & Sunardi, S. (2021). Kontrol proporsional integral derivatif (pid) pada kecepatan sudut motor dc dengan pemodelan identifikasi sistem dan tuning. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 9(2), 374.
- Maghfiroh, H., Saputro, J. S., Hermanu, C., Ibrahim, M. H., & Sujono, A. (2021). Performance evaluation of different objective function in PID tuned by PSO in DC-motor speed control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1096/1/012061>
- Prasetyo, A., & Arifin, D. (2020). Pengaruh DO pada kesehatan udang vaname di tambak. *Jurnal Teknologi Perikanan*, 11(1), 35–44.
- Prihatna, A. (2020). ANALISIS PERFORMANSI SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI MENGGUNAKAN FUZZY-WHALE OPTIMIZATION ALGORITHM (FUZZY-WOA) (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Putra, B., & Suryanto, L. (2022). Implementasi Fuzzy-PID untuk Pengendalian Kecepatan Motor DC dalam Sistem Tambak Udang. *Jurnal Otomasi dan Kontrol*, 9(4), 78–85.
- Ridwan, R., Purwanto, E., Oktavianto, H., Rusli, M. R., & Toar, H. (2019). Desain kontrol kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan fuzzy pid berbasis indirect field oriented control. *Jurnal Integrasi*, 11(2), 146-155.
- Rositawati, S., & Mulyana, I. G. (2022). Dampak Variasi Beban Dan Keterbatasan Pembangkit Terhadap Kontrol Frekuensi Sistem menggunakan Automatic Generation Control. *Sutet*, 12(1), 1-11.
- Sachit, S., & Vinod, B. R. (2022). MRAS based speed control of DC motor with conventional PI control— A comparative study. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 20(1), 1–12.
- Suwandi, I. A. P., Sumaryo, S., & Yuwono, S. (2021). Pengendalian kadar pH air berbasis kontrol PID pada prototipe water treatment plant. *Proceedings of Engineering*, 8(2).
- Transferano, J. S., Hakim, E. A., & Pakaya, I. (2021). Pemodelan Dinamik Non-linear dan Analisis Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Studi Kasus: PLTMH UMM. *SinarFe7*, 4(1).
- Triyono, B., Fadilah, R., Tohir, T., & Supriyanto, S. (2023, August). Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor DC Berbasis PID Ziegler-Nichols Pada Alat Pengaduk Cairan Viskos. In *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar (Vol. 14, No. 1, pp. 586-592)*.
- Waide, P., & Brunner, C. U. (2021). Energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems.



