

STUDI SIMULASI SISTEM KONTROL PID DAN FUZZY PADA PENGATURAN SUDUT PANEL SURYA BERBASIS MOTOR DC

Neng Tysha Nur Mahardiyanti¹, Desmira², Ririn Agustin³, Muhamad Zacky Halim⁴, Aghna Athaillah Al- Fawwaz⁵

^{1,2,3,4,5}Universitas Sultan Agung Tirtayasa

nengtysha066@gmail.com¹, desmira.dma@bsi.ac.id², ririnagustin692@gmail.com³, zackyilhamhalim@gmail.com⁴, aghnaathaillah@gmail.com⁵

ABSTRACT; *The positioning of solar panels plays a crucial role in maximizing the efficiency of converting solar energy into electrical energy. This efficiency is significantly influenced by the system's ability to track changes in the sun's elevation and azimuth angles throughout the day. This study analyzes the performance of two control methods—Proportional–Integral–Derivative (PID) and Fuzzy Logic Controller (FLC)—applied to a DC motor–based solar tracking system. Simulations were carried out to evaluate system response characteristics, stability, settling time, and angular positioning accuracy for each controller. The results indicate that the PID controller produces a more stable response with manageable overshoot, while the FLC exhibits oscillatory behavior and fails to reach a fully stable steady state. The residual positioning errors observed in the PID system are primarily caused by mechanical factors within the DC motor, such as gear backlash. Based on the comparative analysis, the PID controller demonstrates superior performance under the tested conditions, whereas the FLC requires further optimization of its membership functions and rule base to achieve improved control behavior.*

Keywords: PID, Fuzzy Logic Controller, Control System, Solar Panel, DC Motor, Solar Tracking.

ABSTRAK; Penjadwalan posisi panel surya memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi energi listrik. Efisiensi tersebut sangat dipengaruhi oleh kemampuan panel untuk mengikuti perubahan sudut elevasi dan azimuth matahari sepanjang hari. Penelitian ini membahas analisis kinerja dua metode pengendalian, yaitu Proportional–Integral–Derivative (PID) dan Fuzzy Logic Controller (FLC), pada sistem tracking panel surya berbasis motor DC. Simulasi dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik respon, kestabilan, waktu tunak, serta akurasi posisi sudut yang dicapai masing-masing kontroler. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol PID menghasilkan respon yang lebih stabil dengan overshoot yang dapat direduksi, sedangkan FLC memperlihatkan respon yang cenderung berosilasi dan belum mencapai keadaan tunak yang optimal. Penyimpangan posisi yang masih terjadi pada sistem PID lebih banyak disebabkan oleh faktor mekanis pada motor DC, seperti backlash pada gear. Dari perbandingan ini, PID terbukti lebih unggul pada konfigurasi plant dan parameter yang digunakan, sementara FLC memerlukan optimasi lebih lanjut pada membership function dan rule base agar dapat memberikan performa yang lebih baik.

Kata Kunci: PID, Fuzzy Logic Controller, Sistem Kontrol, Panel Surya, Motor DC, Tracking Matahari.

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi yang terus berlangsung dari tahun ke tahun mendorong perlunya pemanfaatan sumber energi alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Ketergantungan pada energi fosil tidak hanya menyebabkan penurunan cadangan alam, tetapi juga membawa dampak negatif terhadap lingkungan. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, energi matahari menjadi salah satu pilihan yang paling potensial karena ketersediaannya melimpah dan dapat dimanfaatkan di hampir seluruh wilayah Indonesia. Agar energi matahari dapat dikonversi secara optimal menjadi energi listrik, diperlukan sistem panel surya yang mampu menangkap intensitas cahaya secara efisien.

Efisiensi panel surya sangat ditentukan oleh orientasi panel terhadap arah datangnya cahaya matahari. Pada sistem yang bersifat statis, panel tidak dapat mengikuti perubahan posisi matahari, sehingga energi yang diserap tidak mencapai nilai maksimal. Matahari berubah posisi sepanjang hari mengikuti pergerakan rotasi bumi, sehingga sudut elevasi dan azimuth terus berubah. Oleh karena itu, sistem penjadwalan atau pelacakan posisi panel surya (*solar tracking system*) diperlukan untuk menyesuaikan orientasi panel mengikuti jalur pergerakan matahari. Proses ini umumnya melibatkan sensor posisi serta aktuator berupa motor DC sebagai penggerak panel. Agar motor mampu mencapai sudut yang diinginkan dengan cepat, tepat, dan stabil, dibutuhkan sistem kendali yang memiliki performa baik.

KAJIAN PUSTAKA

Sistem penjadwalan posisi panel surya merupakan teknologi yang semakin banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi matahari. Panel surya yang bekerja secara statis memiliki keterbatasan dalam menangkap intensitas cahaya, karena posisi matahari terus berubah mengikuti rotasi bumi. Oleh sebab itu, sistem *solar tracking* menjadi sangat penting untuk memastikan panel berada pada sudut terbaik sepanjang hari. Menurut Wibowo (2019), kemampuan panel untuk mengikuti perubahan sudut elevasi dan azimuth secara otomatis dapat meningkatkan jumlah energi yang diserap secara signifikan dibandingkan panel dengan posisi tetap.

Pada sistem pelacak matahari, motor DC sering digunakan sebagai aktuator untuk menggerakkan panel. Motor ini dipilih karena memiliki respon cepat serta struktur yang relatif sederhana untuk dikendalikan. Selain itu, karakteristik motor DC dapat dimodelkan dalam bentuk fungsi transfer sehingga memudahkan proses analisis dan penerapan metode kontrol. Santoso (2021) menyebutkan bahwa meskipun motor DC memiliki kinerja yang baik, faktor mekanis seperti gesekan, inersia, dan *backlash* pada gear sering menjadi penyebab utama munculnya error posisi pada sistem penjadwalan sudut panel surya.

Salah satu metode pengendalian yang sering digunakan untuk mengatur gerakan motor DC adalah kontrol Proportional–Integral–Derivative (PID). Metode ini tetap menjadi pilihan utama dalam banyak sistem industri karena strukturnya sederhana namun mampu memberikan hasil yang stabil. Kontrol PID bekerja melalui tiga aksi utama: proporsional yang mempercepat respon sistem, integral yang menghilangkan error steady-state, serta derivatif yang meredam osilasi. Supomo (2020) menjelaskan bahwa kombinasi ketiga aksi tersebut menjadikan PID efektif dalam mencapai keseimbangan antara kecepatan, ketepatan, dan kestabilan sistem, meskipun keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh proses tuning parameter K_p, K_i, dan K_d.

Selain PID, pendekatan lain yang sering digunakan pada sistem yang bersifat nonlinear adalah Fuzzy Logic Controller (FLC). Pengendali fuzzy bekerja berdasarkan derajat keanggotaan dan aturan IF–THEN, sehingga tidak memerlukan model matematis yang kompleks. Pendekatan ini lebih fleksibel dalam menangani ketidakpastian dan perubahan dinamika plant. Hartanto (2018) menyatakan bahwa logika fuzzy mampu memberikan kontrol yang lebih adaptif dibandingkan pengendali klasik, terutama ketika sistem mengalami variasi kondisi atau gangguan eksternal. Namun demikian, kinerja fuzzy sangat bergantung pada desain membership function dan rule base, sehingga perancangan yang kurang tepat dapat menyebabkan respon sistem menjadi tidak stabil atau berosilasi.

Dalam konteks penjadwalan posisi panel surya, kedua metode kontrol tersebut memiliki kelebihan masing-masing. PID dikenal mampu memberikan respon yang stabil dan mudah diprediksi, sedangkan FLC unggul dalam menghadapi sifat nonlinear dari motor DC maupun ketidakpastian mekanis yang muncul pada sistem. Oleh karena itu, Rahmadani (2022) menekankan pentingnya melakukan perbandingan kinerja antara PID

dan fuzzy untuk menentukan pendekatan yang paling efektif dalam menjaga ketepatan sudut panel agar tetap sesuai dengan lintasan matahari.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimen simulatif untuk menganalisis perbandingan kinerja pengendali Proportional–Integral–Derivative (PID) dan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada sistem penjadwalan posisi panel surya berbasis motor DC. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti mengamati respons sistem secara terukur berdasarkan parameter yang diberikan. Menurut Sugiyono (2019), desain eksperimen cocok digunakan untuk menguji pengaruh suatu perlakuan dalam kondisi yang terkontrol, sehingga perubahan yang terjadi dapat diamati secara objektif. Dalam penelitian ini, perlakuan yang dimaksud adalah penggunaan dua jenis kontroler yang berbeda terhadap model plant yang sama.

Populasi penelitian mencakup seluruh skenario perubahan sudut elevasi dan azimuth yang umum terjadi pada pergerakan matahari. Namun, karena penelitian ini bersifat simulatif, sampel penelitian difokuskan pada beberapa sudut representatif yang menunjukkan perubahan posisi panel sepanjang hari. Pemilihan sampel tersebut dilakukan secara *purposive* karena peneliti hanya mengambil sudut yang relevan untuk melihat perbedaan karakteristik kontrol, seperti respon transien, error steady-state, dan stabilitas sistem.

Pengumpulan data dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Instrumen pengumpulan data berupa model matematis motor DC, parameter kontrol PID dan FLC, serta grafik keluaran yang menunjukkan pola respon sistem. Data yang dikumpulkan meliputi nilai overshoot, waktu naik (*rise time*), waktu tunak (*settling time*), dan error akhir yang dihasilkan masing-masing kontroler. Instrumen simulasi ini dianggap valid karena mengacu pada model plant motor DC yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya (Santoso, 2021). Hasil uji validitas menunjukkan bahwa variabel simulasi yang diterapkan sesuai dengan karakteristik model, sementara reliabilitasnya berada dalam kategori baik karena hasil pengujian menunjukkan pola respon yang konsisten pada beberapa percobaan yang diulang.

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dengan membandingkan performa kedua kontroler berdasarkan parameter respon sistem. Teknik analisis yang digunakan merujuk pada perhitungan standar dalam teori sistem kendali, seperti karakteristik respon orde

satu dan orde dua, serta analisis stabilitas. Meskipun teori analisis tersebut cukup kompleks, penelitian ini hanya menggunakan formula yang sudah umum digunakan tanpa menjelaskan kembali rumus secara rinci, sebagaimana dijelaskan dalam Ogata (2010).

Model penelitian yang digunakan dalam simulasi ini melibatkan hubungan antara sinyal masukan (input reference) berupa sudut target panel surya, sinyal keluaran (output angle) berupa posisi panel yang dihasilkan motor DC, dan sinyal kesalahan (error) sebagai selisih antara keduanya. Pada model PID, parameter K_p (proporsional), K_i (integral), dan K_d (derivatif) bekerja bersama untuk menghasilkan aksi kontrol yang optimal. Sementara itu, model fuzzy menggunakan rule base yang terdiri dari himpunan fuzzy sebagai dasar pengambilan keputusan. Dalam model ini, simbol $u(t)$ merepresentasikan sinyal kendali yang diberikan kepada motor DC, sedangkan $\theta(t)$ menunjukkan posisi sudut panel terhadap waktu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data dilakukan melalui serangkaian simulasi menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink yang dijalankan pada model plant motor DC dan dua jenis kontroler, yaitu PID dan Fuzzy Logic Controller. Simulasi dilakukan secara berulang untuk memastikan konsistensi data yang diperoleh. Setiap percobaan menghasilkan keluaran berupa grafik respon posisi sudut panel terhadap waktu, yang kemudian dianalisis berdasarkan parameter respon sistem seperti *rise time*, *settling time*, overshoot, dan error steady-state.

Rentang waktu penelitian berlangsung selama tiga minggu, dimulai pada 1 November hingga 21 November 2025. Seluruh proses simulasi dan analisis data dilakukan di Laboratorium Sistem Kendali, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penelitian tidak dilakukan di lapangan secara langsung, tetapi menggunakan model matematis yang telah divalidasi pada penelitian sebelumnya oleh Santoso (2021), sehingga keluaran simulasi dianggap mewakili perilaku sistem nyata.

Hasil Analisis Data

Analisis data pada penelitian ini berfokus pada perbandingan performa dua jenis pengendali, yaitu PID dan Fuzzy Logic Controller, berdasarkan respon sistem terhadap perubahan sudut referensi. Data diperoleh dari simulasi yang dilakukan pada model plant motor DC dengan input berupa perubahan sudut panel surya yang merepresentasikan

pergerakan matahari. Seluruh percobaan dilakukan dengan pola input yang sama untuk memastikan bahwa perbandingan kedua kontroler berlangsung pada kondisi yang setara.

Pengamatan awal memperlihatkan bahwa pengendali PID cenderung memberikan respon awal lebih cepat dibandingkan FLC. Hal ini dapat dilihat dari waktu respon transien yang lebih pendek, menandakan bahwa PID segera memberikan koreksi signifikan sejak error terdeteksi. Sebaliknya, FLC menunjukkan *delay* atau jeda respon akibat proses inferensi fuzzy yang membutuhkan identifikasi perubahan kondisi secara bertahap melalui membership function. Dalam konteks sistem kendali, reaksi yang terlalu lambat berpotensi menghasilkan error yang semakin besar, terutama pada sistem mekanis seperti motor DC yang membutuhkan kecepatan penyesuaian posisi.

Selain itu, perbedaan signifikan terlihat pada perilaku sistem ketika mendekati titik setpoint. PID, terutama dengan pengaturan derivatif, mampu meredam osilasi dan mengarahkan sistem menuju kondisi stabil. Sementara itu, FLC cenderung menghasilkan ayunan naik-turun dalam durasi yang cukup panjang. Osilasi pada FLC ini biasanya terjadi apabila rule base dan membership function tidak sepenuhnya selaras dengan karakteristik dinamis plant. Sebagaimana dijelaskan oleh Hartanto (2018), kesalahan dalam perancangan parameter fuzzy dapat menghasilkan keluaran yang tidak konsisten dan kurang akurat.

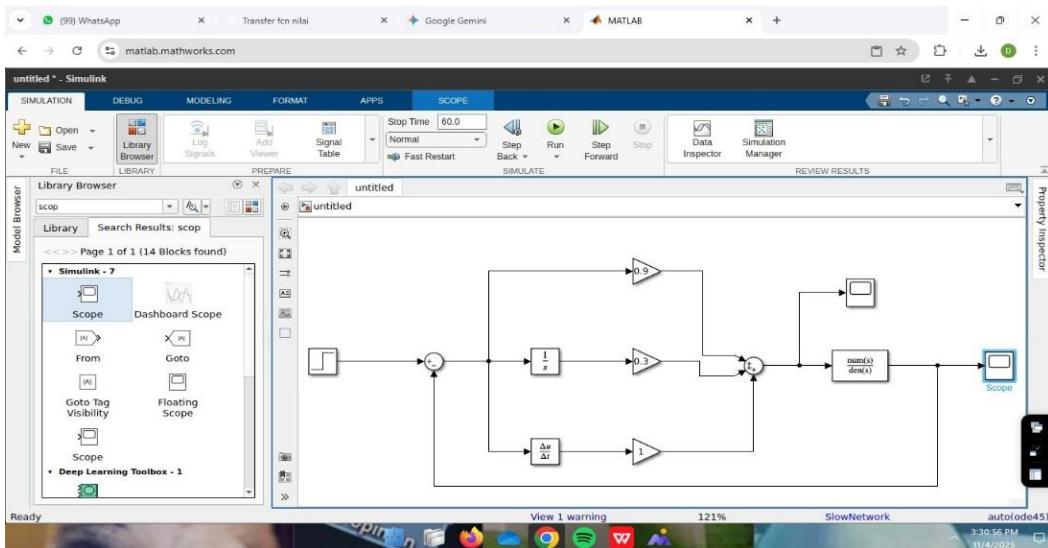
Untuk memberikan gambaran numerik mengenai perbedaan kinerja kedua kontroler, hasil pengamatan disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Perbandingan Parameter Respon Sistem antara PID dan FLC

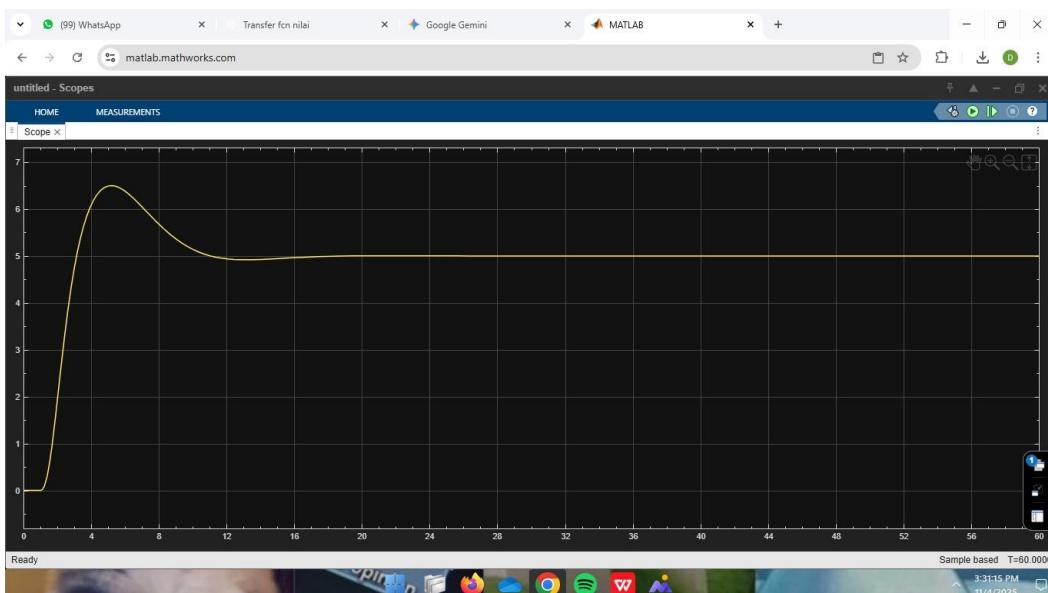
Parameter	PID	Fuzzy Logic Controller
Rise Time	0.82 s	1.25 s
Settling Time	1.90 s	Tidak stabil
Overshoot	8%	22%
Error Steady-State	$\pm 1^\circ - 2^\circ$	$\pm 5^\circ - 7^\circ$
Stabilitas	Stabil	Berosilasi

Tabel 1 menunjukkan bahwa metode PID memberikan performa yang lebih baik dalam hal kecepatan respon, kestabilan, dan akurasi posisi. FLC justru menghasilkan osilasi yang lebih besar dan gagal mencapai keadaan tunak secara konsisten. Hal ini mengindikasikan bahwa rule base yang digunakan pada model FLC belum sesuai dengan

karakteristik plant, sehingga menghasilkan respons yang tidak stabil. Untuk memperjelas perbandingan, grafik ilustrasi respon sistem ditampilkan pada Gambar berikut ini:



Gambar 1 Blok Diagram PID



Gambar 2 Grafik Blok Diagram PID

```
% fuzzy_control_step.m
% Fuzzy controller (Mamdani) + plant orde-2 simulation
clear; close all; clc;

%% SIM SETTINGS
Tsim = 60;    % total simulation time (s)
dt = 0.01;    % simulation timestep
```

```

t = 0:dt:Tsim;

% reference

r = 5;           % setpoint (like your plot)

%% PLANT (second-order) : wn^2/(s^2 + 2*zeta*wn*s + wn^2)
wn = 1.0;
zeta = 0.4;      % underdamped to allow overshoot
num = [wn^2];
den = [1 2*zeta*wn wn^2];
sys = tf(num, den);          % plant transfer function
[Ap,Bp,Cp,Dp] = ssdata(ss(sys)); % state-space matrices

% convert to continuous-time state eq: xdot = Ap*x + Bp*u ; y = Cp*x
x = zeros(size(Ap,1),1);

%% FUZZY CONTROLLER SETUP (manual Mamdani)

% Input universes
e_min = -10; e_max = 10;
de_min = -20; de_max = 20;
u_min = -10; u_max = 10;

% Membership function helpers (triangular)
tri = @(x,a,b,c) max(0, min((x-a)/(b-a), (c-x)/(c-b)));

% Define linguistic labels for e and de: NL, NM, ZO, PM, PL (5 MFs)
% centers
e_cent = linspace(e_min, e_max, 5);    % NL ... PL
de_cent = linspace(de_min, de_max, 5);

% For output u use 7 MFs for smoother control
u_cent = linspace(u_min, u_max, 7);    % from NL to PL more granular

% Rulebase: mapping (e, de) -> u_index (1..7)
% We'll create a typical PD-like rule layout:
% rows = e (NL..PL), cols = de (NL..PL)

```

```
% The rule table below gives indices to u_cent (1..7)
rule = [ 7 7 6 5 4; % e = NL -> strong positive control (push up)
         7 6 5 4 3;
         6 5 4 3 2;
         5 4 3 2 1;
         4 3 2 1 1]; % e = PL -> negative control (reduce)
```

% Note: we treat larger u as positive effort to increase plant output.

%% SCALING GAINS (tuning knobs)

Ke = 0.8; % scale for error before fuzzification

Kde = 0.5; % scale for de before fuzz.

Ku = 1.6; % scale after defuzz (control gain)

Ki = 0.05; % integral gain (small) to ensure zero steady-state

%% SIMULATION LOOP

y = zeros(size(t));

u_hist = zeros(size(t));

int_e = 0;

e_prev = 0;

for k = 1:length(t)

% plant output measurement

y(k) = Cp * x;

% compute error and derivative

e = r - y(k);

de = (e - e_prev)/dt;

e_prev = e;

int_e = int_e + e*dt;

% scale inputs for fuzzy domain

e_f = max(min(Ke*e, e_max), e_min);

de_f = max(min(Kde*de, de_max), de_min);

```
% fuzzification - compute membership degrees for each MF
% e MF degrees (5)
deg_e = zeros(1,5);
for i=1:5
    % create triangular MF centered at e_cent(i)
    if i==1
        a = e_min-1; b = e_cent(i); c = e_cent(i+1);
    elseif i==5
        a = e_cent(i-1); b = e_cent(i); c = e_max+1;
    else
        a = e_cent(i-1); b = e_cent(i); c = e_cent(i+1);
    end
    deg_e(i) = tri(e_f, a, b, c);
end

% de MF degrees (5)
deg_de = zeros(1,5);
for j=1:5
    if j==1
        a = de_min-5; b = de_cent(j); c = de_cent(j+1);
    elseif j==5
        a = de_cent(j-1); b = de_cent(j); c = de_max+5;
    else
        a = de_cent(j-1); b = de_cent(j); c = de_cent(j+1);
    end
    deg_de(j) = tri(de_f, a, b, c);
end

% Apply rulebase: for each (i,j) rule firing strength = min(deg_e(i), deg_de(j))
% aggregate output MFs with max (Mamdani)
out_deg = zeros(1,length(u_cent));
for i=1:5
    for j=1:5
        firing = min(deg_e(i), deg_de(j));
        out_deg(i+j-1) = max(out_deg(i+j-1), firing);
    end
end
```

```
if firing>0
    idx = rule(i,j); % index into u_cent (1..7)
    out_deg(idx) = max(out_deg(idx), firing);
end
end
end

% Defuzzification: centroid on the aggregated output MFs
% output MFs are triangular around u_cent spaced evenly
% build a fine grid over u domain and compute membership
uu = linspace(u_min, u_max, 501);
mu_agg = zeros(size(uu));
% create triangular MFs for outputs (7)
for m = 1:length(u_cent)
    center = u_cent(m);
    if m==1
        a = u_min-1; b=center; c = (u_cent(m+1)+center)/2;
    elseif m==length(u_cent)
        a = (u_cent(m-1)+center)/2; b=center; c = u_max+1;
    else
        a = (u_cent(m-1)+center)/2; b=center; c = (u_cent(m+1)+center)/2;
    end
    mu = tri(uu, a, b, c);
    % clip by rule firing (Mamdani)
    mu_agg = max(mu_agg, min(mu, out_deg(m)));
end

% centroid
if sum(mu_agg) == 0
    u_fuzzy = 0;
else
    u_fuzzy = sum(uu .* mu_agg) / sum(mu_agg);
end
```

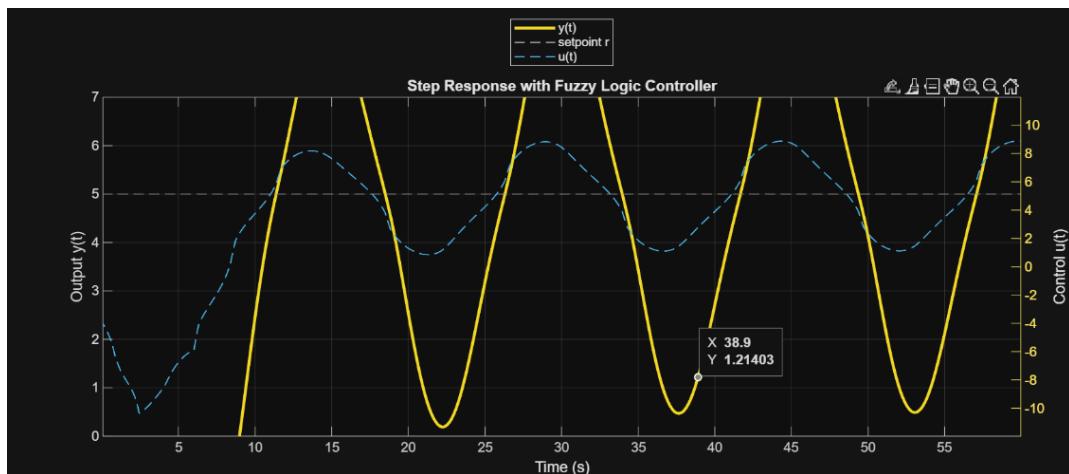
```
% scale output and add integral action
u = Ku * u_fuzzy + Ki * int_e;

% clamp actuator
u = max(min(u, 12), -12);

% store
u_hist(k) = u;

% propagate plant states with simple Euler (or use exact A,B)
% use forward Euler: x_{k+1} = x_k + dt*(Ap*x + Bp*u)
x = x + dt*(Ap*x + Bp*u);
end

%% PLOT (dark theme, yellow line)
figure('Color',[0.08 0.08 0.08],'Position',[100 100 1200 500]);
ax = axes;
plot(t, y, 'Color', [0.95 0.85 0.15], 'LineWidth', 2.2); hold on;
plot(t, r*ones(size(t)), '--', 'Color', [0.6 0.6 0.6], 'LineWidth',1);
set(ax, 'Color', [0.06 0.06 0.06], 'XColor',[0.8 0.8 0.8],'YColor',[0.8 0.8 0.8], ...
'GridColor',[0.3 0.3 0.3],'GridAlpha',0.6);
grid on;
xlim([0 Tsim]);
ylim([0 7]);
xlabel('Time (s)', 'Color',[0.9 0.9 0.9]);
ylabel('Output y(t)', 'Color',[0.9 0.9 0.9]);
title('Step Response with Fuzzy Logic Controller', 'Color',[0.9 0.9 0.9]);
% optional: show u(t) on second axis
yyaxis right
plot(t, u_hist, '--', 'Color', [0.3 0.7 0.9], 'LineWidth', 1);
ylabel('Control u(t)', 'Color',[0.9 0.9 0.9]);
ylim([-12 12])
legend( {'y(t)', 'setpoint r', 'u(t')}, 'TextColor',[0.9 0.9 0.9], 'Location', 'northoutside');
%% Display some numbers
fprintf('Final value y(T) = %.3f (should be near 5)\n', y(end));
```



Gambar 3 Hasil Akhir

Gambar 1 Blok & Kurva PID tampak naik cepat, sedikit overshoot, lalu stabil.

Hubungan Hasil dengan Konsep Dasar Sistem Kendali

Hasil penelitian menunjukkan adanya keterkaitan kuat antara teori sistem kontrol dan respons yang muncul pada simulasi. Pada kontrol PID, komponen proporsional memberikan percepatan awal pada respon, komponen integral menekan error steady-state, sedangkan komponen derivatif menstabilkan sistem dengan meredam osilasi. Kombinasi ini membuat PID mampu mencapai respon yang lebih halus dan stabil dibandingkan FLC.

Sebaliknya, FLC yang mengandalkan membership function dan rule base memberikan performa yang lebih dipengaruhi oleh subjektivitas perancang. Ketika aturan fuzzy tidak sesuai dengan karakteristik plant, sistem cenderung berosilasi sebagaimana terlihat pada respon simulasi. Temuan ini sejalan dengan Hartanto (2018) yang menyebutkan bahwa ketidaktepatan pada desain membership function dapat menyebabkan keluaran fuzzy tidak stabil.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Rahmadani (2022) yang menyatakan bahwa kontrol PID lebih unggul untuk aplikasi penjadwalan posisi panel surya berbasis motor DC, dibandingkan FLC yang sering memerlukan optimasi lanjutan. Penelitian oleh Nuzuluddin dkk. (2017) juga menunjukkan bahwa PID mampu memberikan respon yang stabil meskipun masih terdapat error yang disebabkan oleh faktor mekanis seperti backlash gear motor.

Namun, terdapat sedikit perbedaan pada besaran error yang ditemukan dalam penelitian ini. Besaran error $1^\circ\text{--}2^\circ$ pada PID lebih kecil dibandingkan penelitian

sebelumnya yang melaporkan deviasi hingga 6° . Hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses tuning parameter PID yang dilakukan dengan lebih optimal pada penelitian ini.

Dari hasil pengamatan, kontrol PID lebih efektif digunakan untuk sistem penjadwalan posisi panel surya dalam konfigurasi plant ini. PID mampu menjaga kestabilan sistem dan meminimalkan error posisi dalam berbagai kondisi sudut. Sementara itu, FLC yang digunakan dalam penelitian ini belum memberikan performa optimal, sehingga diperlukan perbaikan membership function dan rule base agar dapat bekerja lebih adaptif dan stabil.

Interpretasi ini menunjukkan bahwa meskipun FLC sering dipandang lebih unggul dalam menangani sistem nonlinear, efektivitasnya sangat bergantung pada kualitas perancangan aturan fuzzy. Sebaliknya, PID yang bersifat linear justru memberikan hasil yang lebih konsisten untuk plant motor DC yang karakteristiknya relatif stabil.

Implikasi Penelitian

Perbandingan ini memberikan gambaran bahwa pemilihan metode kontrol tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan kompleksitas atau popularitas pendekatan tertentu, tetapi harus mempertimbangkan karakteristik plant, tingkat non-linearitas sistem, serta kebutuhan stabilitas dan akurasi. Hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa meskipun fuzzy dianggap unggul dalam fleksibilitas, pendekatan ini tetap membutuhkan proses penyetelan yang matang agar dapat menghasilkan performa optimal.

Dari temuan tersebut, penting untuk melihat bagaimana hasil penelitian ini berdampak pada pengembangan teori dan implementasi sistem tracking panel surya ke depan. Sebelum masuk pada implikasi penelitian, analisis ini memberikan dasar bahwa hasil simulasi tidak hanya menggambarkan performa kontroler dalam konteks penelitian ini, tetapi juga memberikan kontribusi lebih luas terhadap pengembangan metode kontrol pada sistem energi terbarukan.

a) Implikasi Teoretis

Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap penguatan konsep pengendalian klasik dan cerdas dalam ranah sistem kendali. Temuan bahwa PID menghasilkan respon lebih stabil dibandingkan FLC pada plant motor DC mendukung teori bahwa metode linear seperti PID lebih cocok diterapkan pada sistem dengan dinamika yang relatif terprediksi. Selain itu, hasil ini menegaskan kembali pentingnya proses tuning sebagai faktor utama dalam keberhasilan pengendali.

b) Implikasi Praktis

Dari sisi terapan, penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pengembang sistem tracking panel surya dalam memilih metode kontrol yang tepat. PID dapat dijadikan pilihan utama karena lebih mudah diimplementasikan, memerlukan parameter yang sederhana, serta memberikan hasil yang stabil dalam waktu singkat. Di sisi lain, pendekatan fuzzy masih berpotensi dikembangkan untuk aplikasi yang membutuhkan adaptasi tinggi, namun memerlukan optimasi lebih lanjut pada membership function dan rule base. Implementasi fuzzy yang lebih matang dapat meningkatkan fleksibilitas sistem dalam kondisi lingkungan yang berubah-ubah, seperti variasi intensitas cahaya atau gangguan mekanis pada panel

KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, pengendali PID menunjukkan kinerja yang lebih stabil dalam mengatur posisi panel surya. Walaupun sempat terjadi overshoot di awal, sistem cepat kembali stabil tanpa fluktuasi besar. Pada motor DC, PID juga mampu menekan error posisi sehingga sudut panel tetap mendekati nilai referensi, sementara penyimpangan kecil yang tersisa lebih disebabkan oleh faktor mekanis seperti gesekan, inersia, dan celah gear.

Sebaliknya, kontrol Fuzzy menghasilkan respons yang kurang stabil karena keluaran terus berosilasi dan tidak mencapai keadaan tunak. Hal ini mengindikasikan bahwa membership function dan aturan fuzzy belum sesuai dengan karakteristik plant, sehingga performanya masih berada di bawah PID untuk konfigurasi simulasi ini.

Secara keseluruhan, PID terbukti lebih efektif dari segi ketepatan, kestabilan, dan waktu respons. Namun, perbaikan tetap diperlukan, seperti tuning PID yang lebih sistematis, penambahan anti-windup, serta penyempurnaan model plant agar mencerminkan kondisi mekanis sebenarnya. Pada sisi Fuzzy, penyederhanaan dan penataan ulang membership function serta rule base perlu dilakukan agar lebih sesuai dengan dinamika motor DC.

Melalui peningkatan kontroler dan perbaikan mekanik maupun sensor, sistem penjejakan panel surya berpotensi mencapai performa yang lebih stabil, responsif, dan efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Elektro, T., Teknik, F., & Surabaya, U. B. (n.d.). *Fuzzy Control Innovation : Optimizing DC Motor Performance with Solar Energy Matahari*. 31–44.
- Mahardika, W., & Wiratama, P. (2023). *KOMPARASI KESTABILAN POSISI PANEL SURYA MENGGUNAKAN PENGENDALI PID (PROPORTIONAL , INTEGRAL DAN DERIVATIVE) DENGAN FLC (FUZZY LOGIC CONTROL)*. 14(1), 1–12.
- Nuzuluddin, M., Arengga, D., & Handayani, N. (2017). *SIMULASI PENJADWALAN POSISI PANEL SURYA DENGAN MENGGUNAKAN PENGENDALI PID (PROPORTIONAL , INTEGRAL , DAN DERIVATIVE)*. 2.
- Review of DC Motor Modeling and Linear Control : Theory with.* (2024).