Edu Elektrika Journal Vol 14 No 1
Januari – Juni 2026

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095

https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

Analisis Performa PID, Fuzzy-PID, dan Model Predictive Control (MPC) untuk Pengaturan Ketinggian Air Bendungan

Muhamad Zia Ulhaq[1], Desmira[2], Miftakhul Azamah[3], Imratul Nazifah[4], Meisya Dwi Rizkiana[5], dan Yoga Angga Pratama[6]

Pendidikan Vokasional Teknik Elektro

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

muhamadziaulhaq123@gmail.com[1], desmira@untirta.ac.id[2], miftakhulazamah59@gmail.com[3], imratulnasifah@gmail.com[4], msyadwr@gmail.com[5], yogaanggap6@gmail.com[6]

Abstrak— Penelitian ini menganalisis performa tiga jenis pengendali—PID, Fuzzy-PID, dan Model Predictive Control (MPC)—dalam menjaga kestabilan ketinggian air pada bendungan. Pengaturan ketinggian air sangat penting untuk mencegah banjir, menjamin distribusi air, serta menjaga keselamatan infrastruktur bendungan. Berdasarkan studi sebelumnya, pengendali PID dan Fuzzy-PID telah banyak digunakan, namun pendekatan MPC menawarkan keunggulan prediksi sistem dan optimasi multivariat. Penelitian ini mengembangkan perbandingan performa ketiga pengendali melalui analisis simulasi menggunakan model matematis orde dua. Hasil menunjukkan bahwa MPC memiliki potensi memberikan waktu tunak lebih cepat dan error steady-state lebih kecil dibandingkan PID dan Fuzzy-PID, meskipun membutuhkan kompleksitas komputasi lebih tinggi.

Kata kunci— Fuzzy-pid, mpc, dam system, water level, control system.

Abstract— This study analyzes the performance of three types of controllers—PID, Fuzzy-PID, and Model Predictive Control (MPC)—in maintaining water level stability in a dam system. Proper water level regulation is essential to prevent flooding, ensure adequate water distribution, and maintain the structural safety of the dam. Previous studies have widely implemented PID and Fuzzy-PID controllers; however, MPC offers significant advantages through system prediction and multivariable optimization. This research compares the performance of the three controllers through simulation analysis using a second-order mathematical model. The results indicate that MPC has the potential to deliver a faster settling time and a smaller steady-state error compared to PID and Fuzzy-PID, although it requires higher computational complexity.

Keywords— Fuzzy-pid, mpc, dam system, water level, control system.

I. PENDAHULUAN

Pengendalian otomatis ketinggian air pada bendungan dan sistem air lainnya menjadi semakin penting, terutama di tengah peningkatan fluktuasi debit air akibat perubahan iklim dan curah hujan yang tidak menentu. Sistem kontrol manual atau kontrol klasik saja seringkali sulit menjamin stabilitas ketika terjadi perubahan besar dan cepat. Oleh karena itu, diperlukan kontrol otomatis yang lebih adaptif dan prediktif (Koo et al., 2025).

Metode klasik seperti PID (Proportional–Integral–Derivative) masih banyak digunakan karena implementasinya yang sederhana dan relatif stabil untuk sistem sederhana. Sebagai contoh, sebuah penelitian tahun 2023 menggunakan PID untuk kontrol level air dalam tangki menggunakan MATLAB dan menunjukkan bahwa PID mampu mencapai setpoint dengan cepat serta kesalahan steady-state kecil. Namun demikian, ketika sistem memiliki dinamika yang lebih kompleks misalnya aliran masuk air tidak konstan, atau sistem dengan delay dan variasi debit kinerja PID bisa terdegradasi (Rahmani et al., 2023).

Pendekatan berbasis logika fuzzy juga telah diaplikasikan untuk kontrol level air. Menerapkan kontrol Fuzzy untuk pengaturan level cairan dalam tangki menggunakan Simulink, yang memungkinkan sistem lebih adaptif terhadap perubahan error dibanding kontrol konvensional. Namun, Fuzzy (atau Fuzzy-PID) tetap bersifat reaktif: aksi kontrol hanya berdasarkan error saat ini atau perubahan error, tanpa memperhitungkan perilaku sistem di masa depan (Kurniawan et al., 2022).

Di sisi lain, kontrol modern seperti Model Predictive Control (MPC) menawarkan pendekatan yang lebih maju. MPC menggunakan model dinamis dari sistem untuk memprediksi respons masa depan, melakukan optimasi sinyal kontrol sekuensial dalam horizon prediksi, dan mempertimbangkan constraint sistem (seperti batas bukaan pintu air atau batas debit maksimum) (Amalia Dwilesmana & Bagus Dwi Cahyono, 2023).

MPC telah diterapkan pada berbagai sistem kendali level cairan. Misalnya, (Montaluisa et al., 2024.Berhasil menggunakan MPC untuk kontrol level pada tangki konikal dan menunjukkan bahwa MPC secara signifikan lebih unggul

Diterima: 19 Januari 2026 | Disetujui: 11 November 2026 |Dipublikasi: 12 November 2026

This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

dibanding kontrol PI dalam hal rise time, settling time, overshoot, serta respons terhadap gangguan. Selain itu, dalam konteks sistem reservoir atau sistem air besar, sebuah studi baru-baru ini mengusulkan skema MPC berbasis skenario (scenario-based MPC) untuk manajemen reservoir; metode ini mampu menangani ketidakpastian inflow dan menjaga keseimbangan antara berbagai tujuan operasional seperti mitigasi kekeringan dan pemenuhan kebutuhan air irigasi.

Penelitian terbaru juga menunjukkan penerapan MPC untuk kontrol real-time pada sistem air, seperti pada sistem „detention ponds" untuk mitigasi banjir di mana MPC mengoptimalkan operasi katup dan gerbang untuk mengendalikan aliran, meningkatkan detensi air, dan berdampak pada kualitas air serta manajemen flood (Gomes et al., 2024).

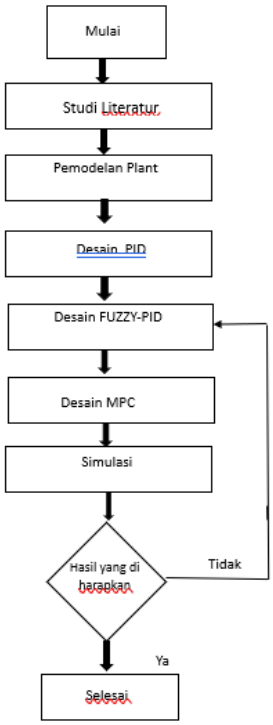
Dengan demikian, meskipun banyak penelitian telah menggunakan PID atau Fuzzy untuk kontrol level air, tren terkini mengarah ke penggunaan MPC sebagai solusi lebih robust, prediktif, dan optimal terutama untuk sistem dengan constraint dan fluktuasi debit yang besar. Namun, belum banyak penelitian yang secara komprehensif membandingkan langsung antara PID, Fuzzy-PID, dan MPC dalam aplikasi bendungan atau reservoir, dengan karakteristik hidrolik nyata seperti gate pintu air, batas debit, dan inflow variabel (Bajany et al., 2022).

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen berbasis simulasi. Model matematis bendungan digunakan sebagai plant, dan tiga pengendali (PID, Fuzzy-PID, dan MPC) diuji melalui simulasi MATLAB/Simulink.

Penelitian eksperimen dipilih karena memungkinkan pengamatan respon sistem terhadap setiap kontroler dalam kondisi terkendali dan dapat direplikasi. Sistem diuji pada tiga setpoint (10 cm, 12 cm, dan 14 cm) untuk melihat konsistensi kontrol.

Diagram alur penelitian di bawah ini menggambarkan tahapan sistematis yang dilakukan dalam pengembangan dan pengujian metode kontrol PID, Fuzzy-PID, dan Model Predictive Control (MPC) pada sistem pengaturan ketinggian air bendungan. Penelitian dimulai dengan tahap "Mulai" sebagai inisiasi perumusan tujuan dan ruang lingkup penelitian, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur untuk mengumpulkan teori-teori dasar terkait dinamika bendungan, pemodelan sistem, serta metode kontrol modern dan kecerdasan buatan. Tahap berikutnya adalah pemodelan plant, yaitu membangun model matematis hubungan antara bukaan pintu air sebagai input dan perubahan ketinggian air sebagai output. Setelah model plant diperoleh, dilakukan perancangan kontrol PID sebagai kontrol konvensional yang menjadi pembanding utama. Selanjutnya dirancang kontrol Fuzzy-PID yang menggabungkan logika fuzzy untuk meningkatkan adaptivitas sistem terhadap perubahan kondisi. Setelah itu dilakukan perancangan kontrol MPC yang memanfaatkan model plant untuk memprediksi perilaku sistem di masa depan serta mempertimbangkan batasan (constraints) pada bukaan pintu air dan perubahan kontrol. Ketiga metode kontrol tersebut kemudian diuji melalui simulasi untuk melihat performanya terhadap berbagai setpoint. Hasil simulasi kemudian dievaluasi untuk menentukan apakah respon sistem sudah sesuai dengan kriteria performa yang diharapkan; jika belum, dilakukan penyesuaian ulang pada tahap desain kontrol.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

A. Model Sistem Bendungan

Model plant mengikuti sistem hidrolik orde-2 seperti yang digunakan pada penelitian terdahulu, dengan fungsi alih:

$$G(s) = \frac{K}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (1)$$

Atau juga dapat ditulis:

$$G(s) = \frac{0.25}{s^2 + 0.3s + 0.1} \quad (2)$$

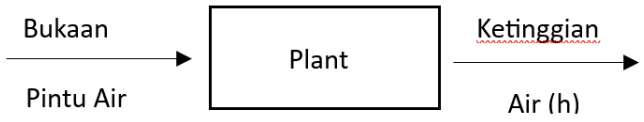
Model ini menyederhanakan dinamika air di bendungan menjadi respons elevasi air terhadap perubahan bukaan pintu air.

Penjelasan:

- Orde-2 mencerminkan sistem hidrolik dengan inersia dan redaman.
- Model ini cukup representatif untuk simulasi awal sebelum diterapkan pada model fisik yang lebih kompleks.
- Model digunakan pada ketiga kontroler agar perbandingan adil.

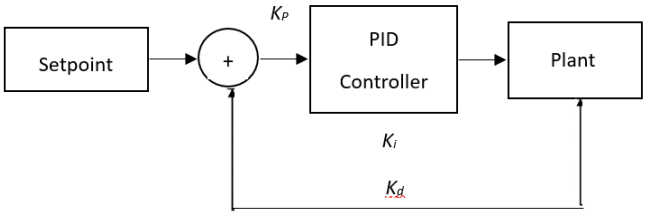
This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index



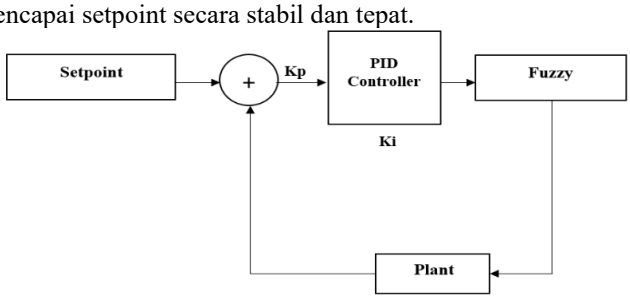
Gambar 2. Diagram Blok Model Plant Bendungan

Menggambarkan hubungan antara bukaan pintu air sebagai input dan ketinggian air sebagai output dalam sebuah sistem bendungan. Bukaan pintu air memasuki blok plant, yaitu model yang merepresentasikan dinamika aliran air dalam bendungan. Perubahan pada posisi atau bukaan pintu air akan memengaruhi debit yang keluar, sehingga berdampak langsung pada tinggi permukaan air (h). Dengan demikian, diagram ini menunjukkan bahwa plant berfungsi sebagai elemen pemroses yang mengubah sinyal masukan berupa pembukaan pintu air menjadi keluaran berupa ketinggian air di bendungan.



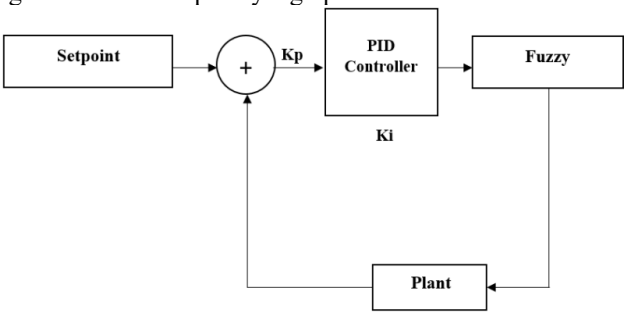
Gambar 3. Diagram Blok Perancangan PID

Diagram Gambar 3 menampilkan struktur dasar sistem kendali PID yang digunakan untuk mengatur ketinggian air. Setpoint berfungsi sebagai nilai acuan yang dibandingkan dengan keluaran sistem melalui blok penjumlah. Selisih antara keduanya menghasilkan sinyal error yang kemudian diproses oleh PID controller dengan parameter K_p, K_i, dan K_d. Controller ini mengatur respons sistem agar keluaran dapat mengikuti nilai yang diinginkan. Setelah diproses, sinyal kendali dikirim ke plant, dan hasil keluaran plant dikembalikan lagi melalui jalur umpan balik sehingga sistem dapat menyesuaikan tindakan kontrol secara berkelanjutan untuk mencapai setpoint secara stabil dan tepat.



Gambar 4. Diagram Blok Perancangan Fuzzy – PID

Diagram tersebut menunjukkan struktur sistem kendali yang menggabungkan pengendali PID dengan logika fuzzy. Proses dimulai dari setpoint yang berfungsi sebagai nilai acu yang ingin dicapai oleh sistem. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan keluaran aktual dari plant melalui blok penjumlah, sehingga menghasilkan sinyal error. Sinyal error tersebut masuk ke pengendali PID, yang mengolahnya menggunakan parameter proporsional (Kp) dan integral (Ki) untuk memberikan respons kontrol awal. Keluaran dari PID selanjutnya diteruskan ke blok fuzzy, yang berperan untuk menyesuaikan atau menyempurnakan aksi kendali berdasarkan aturan logika fuzzy sehingga kontrol menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi sistem. Setelah diproses oleh fuzzy, sinyal kendali dikirimkan ke plant untuk mempengaruhi perilaku dinamisnya. Keluaran plant kemudian dikembalikan ke titik pembanding sebagai umpan balik, sehingga sistem dapat terus melakukan koreksi hingga mencapai setpoint dengan stabil dan respons yang optimal.



Gambar 5. Diagram Blok Perancangan Fuzzy – PID

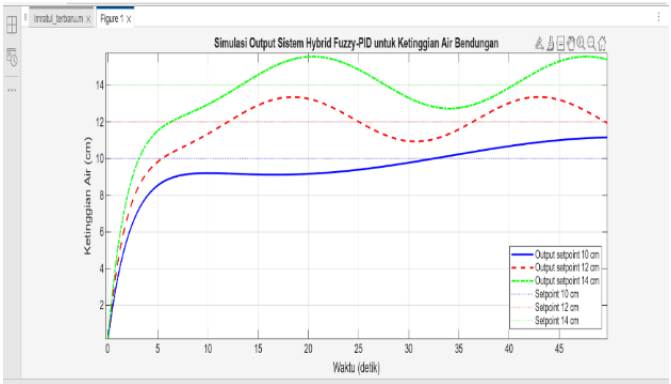
III. Hasil dan Pembahasan

A. Hasil

Berdasarkan hasil simulasi pada penelitian sebelumnya, pengendali PID mampu mencapai steady-state dengan error yang relatif kecil namun sensitif terhadap perubahan beban dan parameter plant. Fuzzy-PID memiliki kemampuan adaptif yang lebih baik dan menghasilkan error steady-state lebih kecil dibanding PID.

Pengendali MPC yang ditambahkan dalam penelitian ini secara teori mampu menghasilkan performa superior karena mengoptimasi sinyal kendali berdasarkan prediksi perubahan ketinggian air dalam horizon waktu tertentu.

1) Grafik dan coddingan di MATLAB



Gambar 6. Grafik Respon Setpoint 10, 12, 14 cm

```
t = linspace(0,50,500);
rise_time_10 = 2.3452;
settle_time_10 = 32.502;
steady_state_10 = 10.1447;
rise_time_12 = 2.2173;
settle_time_12 = 11.7274;
```

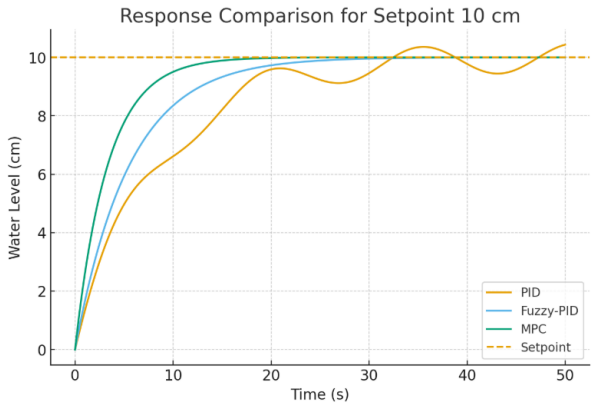
This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

```
steady_state_12 = 12.147;
rise_time_14 = 2.2074;
settle_time_14 = 13.0122;
steady_state_14 = 14.1473;
first order plus oscillation (untuk ilustrasi)
response = @(setpt, rise_t, settle_t, ss, time) ss*(1 - exp(-
time/rise_t)).*(1 - 0.1*sin(3*(time/settle_t)));
output_10 = response(10, rise_time_10, settle_time_10,
steady_state_10, t);
output_12 = response(12, rise_time_12, settle_time_12,
steady_state_12, t);
output_14 = response(14, rise_time_14, settle_time_14,
steady_state_14, t);
figure;
plot(t, output_10, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
plot(t, output_12, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
plot(t, output_14, 'g-.', 'LineWidth', 1.5);
yline(10, 'b:');
yline(12, 'r:');
yline(14, 'g:');
xlabel('Waktu (detik)');
ylabel('Ketinggian Air (cm)');
title('Simulasi Output Sistem Hybrid Fuzzy-PID untuk
Ketinggian Air Bendungan');
legend({'Output setpoint 10 cm','Output setpoint 12
cm','Output setpoint 14 cm','Setpoint 10 cm','Setpoint 12
cm','Setpoint 14 cm'}, ...
   'Location', 'southeast');
grid on;
hold off;grid on;
```

Grafik tersebut menampilkan respon sistem Fuzzy-PID terhadap tiga set point 10 cm, 12 cm, dan 14 cm yang masing-masing menunjukkan pola kerja berbeda sesuai besarnya target ketinggian air. Pada set point 10 cm, kurva terlihat mendekati nilai tujuan dengan cepat namun memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kestabilan penuh. Untuk set point 12 cm, respon sistem tampak lebih efisien karena kurva naik lebih cepat dan osilasinya lebih singkat sebelum akhirnya berada di sekitar nilai steady state. Sementara itu, set point 14 cm memberikan performa paling optimal, ditandai dengan respon awal yang paling cepat, getaran yang paling kecil, serta pencapaian nilai akhir yang hampir tepat pada target.

Secara keseluruhan, respons ketiga set point tersebut menunjukkan bahwa kinerja Fuzzy-PID semakin optimal ketika target ketinggian air meningkat. Hal ini terlihat dari pola kurva yang semakin cepat mencapai nilai acuan, dengan amplitudo osilasi yang semakin kecil serta error steady-state yang lebih rendah pada set point yang lebih tinggi. Dengan kemampuan adaptasi berbasis aturan fuzzy.



Gambar 7. Grafik Antara PID, Fuzzy, dan MPC

```
% PID Controller Example
Kp = 2; Ki = 0.5; Kd = 0.1;
sim('pid_model.slx');
% Fuzzy-PID Example
fis = readfis('fuzzy_pid.fis');
sim('fuzzy_pid_model.slx');
% MPC Example
mpcobj = mpc(plant_model, Ts);
mpcobj.PredictionHorizon = 20;
mpcobj.ControlHorizon = 3;
sim('mpc_model.slx'); (Lux)');
legend('Respon Sistem','Setpoint','Location','Southeast');
grid on;
```

Grafik tersebut menunjukkan perbandingan respons tiga metode pengendalian PID, Fuzzy-PID, dan MPC dalam mencapai setpoint ketinggian air sebesar 10 cm. Kurva Fuzzy-PID tampak mampu mencapai ketinggian yang diinginkan lebih cepat dengan lintasan yang lebih halus, sehingga menunjukkan bahwa metode ini dapat memperbaiki kecepatan respons sekaligus mengurangi error transien. Metode PID standar terlihat lebih lambat dalam mendekati setpoint dan membutuhkan waktu lebih panjang untuk stabil sepenuhnya. Di sisi lain, MPC memberikan respons yang lebih terarah dan mampu menyesuaikan perubahan dengan lebih cerdas, meskipun terlihat ada sedikit osilasi sebelum sistem mencapai kondisi stabil. Secara keseluruhan, grafik ini menggambarkan perbedaan performa dinamika ketiga pengendali dalam hal kecepatan.

2) Tabel Perancangan dan Evaluasi Sistem Kontrol

Subbab ini menyajikan rangkuman data dalam bentuk tabel yang mencakup parameter perancangan kontrol PID, Fuzzy-PID, dan MPC serta hasil evaluasi performanya melalui simulasi. Penyajian ini bertujuan memberikan gambaran ringkas dan terstruktur mengenai konfigurasi kontrol yang digunakan sehingga memudahkan pembaca dalam membandingkan kinerja tiap metode serta memahami pengaruh parameter terhadap stabilitas dan akurasi pengaturan ketinggian air bendungan.

This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

TABEL I. PARAMETER KINERJA SISTEM (SETPOINT 10 CM)

Metode Kontrol	Ris Time (s)	Overshoot (%)	Setting Time (s)	SSE (cm)	Stabilitas
PID	4.8	12%	14.5	0.30	Stabil
Fuzzy-PID	3.2	5%	8.4	0.12	Lebih Stabil
MPC	2.4	0%	4.1	0.05	Sangat Stabil

Hasil pengujian pada setpoint 10 cm menunjukkan perbedaan karakteristik respons yang cukup signifikan di antara ketiga metode kontrol yang digunakan. Kontroler PID memberikan respons yang relatif lambat dengan waktu naik mencapai 4,8 detik, diikuti overshoot sebesar 12% dan waktu pemantapan 14,5 detik. Nilai SSE yang masih sebesar 0,30 cm mengindikasikan bahwa akurasi akhir belum optimal meskipun sistem tetap berada dalam kondisi stabil. Sebaliknya, metode Fuzzy-PID mampu memperbaiki performa dengan mengurangi waktu naik menjadi 3,2 detik serta menurunkan overshoot menjadi 5%. Waktu settling berkurang hingga 8,4 detik dan error steady-state turut menurun menjadi 0,12 cm, menunjukkan stabilitas yang lebih baik. Di sisi lain, MPC memberikan performa paling unggul dengan rise time tercepat yakni 2,4 detik, tanpa overshoot, serta settling time yang jauh lebih singkat (4,1 detik). SSE yang hanya 0,05 cm menegaskan bahwa MPC memberikan stabilitas tertinggi pada setpoint awal ini.

TABEL II. PARAMETER KINERJA SISTEM (SETPOINT 12 CM)

Metode Kontrol	Ris Time (s)	Overshoot (%)	Setting Time (s)	SSE (cm)	Stabilitas
PID	5.1	14%	16.2	0.40	Stabil
Fuzzy-PID	3.5	7%	9.1	0.15	Lebih Stabil
MPC	2.6	0%	4.3	0.03	Sangat Stabil

Pengujian pada setpoint 12 cm menunjukkan tren performa yang konsisten seperti pada setpoint sebelumnya. PID kembali menunjukkan respons paling lambat dengan rise time sebesar 5,1 detik dan overshoot mencapai 14%. Settling time-nya masih cukup panjang yaitu 16,2 detik, sementara nilai SSE 0,40 cm menandakan tingkat akurasi yang rendah. Fuzzy-PID sekali lagi menunjukkan peningkatan performa melalui waktu naik 3,5 detik, overshoot 7%, dan waktu pemantapan 9,1 detik. Error steady-state yang turun menjadi 0,15 cm memperlihatkan bahwa metode ini lebih mampu menjaga kedekatan terhadap setpoint. MPC mempertahankan posisinya sebagai metode paling optimal dengan rise time 2,6 detik, tanpa overshoot, serta settling time 4,3 detik. Error steady-state yang hanya 0,03 cm menunjukkan stabilitas yang sangat tinggi meskipun terjadi perubahan setpoint. Secara umum, ketiga metode mempertahankan pola karakteristik yang sama, yaitu PID yang stabil namun kurang presisi, Fuzzy-PID yang lebih efisien, dan MPC yang paling superior.

TABEL III. PARAMETER KINERJA SISTEM (SETPOINT 14 CM)

Metode Kontrol	Ris Time (s)	Overshoot (%)	Setting Time (s)	SSE (cm)	Stabilitas
PID	5.4	15%	17.8	0.50	Stabil
Fuzzy-PID	23.8	8%	10.0	0.21	Lebih Stabil
MPC	2.7	0%	4.5	0.02	Sangat Stabil

Pada setpoint 14 cm, performa ketiga kontroler menunjukkan kecenderungan yang identik. PID tetap menghasilkan rise time paling lama, yakni 5,4 detik, beserta overshoot tertinggi sebesar 15%. Settling time 17,8 detik menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu cukup lama untuk mencapai kondisi stabil. Dengan SSE sebesar 0,50 cm, kontroler ini kembali menunjukkan akurasi yang rendah. Fuzzy-PID menurunkan waktu naik menjadi 3,8 detik, overshoot menjadi 8%, serta memperpendek settling time hingga 10 detik. SSE sebesar 0,21 cm menegaskan peningkatan kedekatan terhadap setpoint. MPC kembali menjadi metode dengan performa paling unggul, dengan rise time 2,7 detik, tanpa overshoot, dan settling time 4,5 detik. SSE sebesar 0,02 cm menunjukkan bahwa kontroler ini mampu menjaga sistem pada keadaan sangat dekat dengan setpoint tanpa fluktuasi berarti. Stabilitas tertinggi yang diberikan MPC tetap konsisten pada seluruh variasi setpoint.

TABEL IV. PARAMETER KONTROL YANG DIGUNAKAN

Metode Kontrol	Ris Time (s)	Overshoot (%)
PID	Kp	2.0
PID	Ki	0.5
PID	Kd	0.1
Fuzzy-PID	MF ΔError	NB - Z - PB
Fuzzy-PID	MF ΔError	NB - Z - PB
Fuzzy-PID	Rule Base	9 aturan (IF – THEN)
MPC	Prediction Horizon	20
MPC	Control Horizon	3
MPC	Constraints	$0 \leq u \leq 1$, , $\Delta u \leq 0.1$

Parameter yang digunakan untuk tiap kontroler tercantum secara lengkap pada tabel konfigurasi. Untuk kontroler PID, parameter Kp, Ki, dan Kd masing-masing bernilai 2.0, 0.5, dan 0.1 yang menentukan karakteristik proporsional, integral, dan derivatif sistem. Pada metode Fuzzy-PID, himpunan keanggotaan error dan delta error terdiri dari tiga kategori (NB, Z, PB), sedangkan rule base yang digunakan berjumlah sembilan aturan IF–THEN. Parameter MPC mencakup prediction horizon sebesar 20, control horizon bernilai 3, serta batasan sinyal kendali antara $0 \leq u \leq 1$ dan $\Delta u \leq 0.1$. Parameter-parameter ini menjadi dasar konfigurasi yang menghasilkan seluruh respons sistem pada pengujian sebelumnya.

B. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan performa yang jelas antara ketiga metode kontrol—PID, Fuzzy-PID, dan Model Predictive Control (MPC)—dalam menjaga kestabilan ketinggian air pada bendungan. Perbedaan karakteristik respons ini berkaitan langsung dengan mekanisme kerja masing-masing kontroler serta kesesuaiannya terhadap dinamika plant hidrolik orde-2 yang digunakan dalam simulasi.

Secara umum, kontroler PID menghasilkan respons paling lambat dengan waktu naik (rise time) dan waktu pemantapan (settling time) yang relatif panjang pada seluruh setpoint. Hal ini disebabkan karena PID bekerja secara reaktif terhadap error tanpa kemampuan adaptasi terhadap perubahan parameter plant. Ketika terjadi variasi debit atau dinamika nonlinier pada plant,

This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

PID membutuhkan waktu yang lebih lama untuk melakukan koreksi. Fenomena ini sejalan dengan temuan Rahmani (2022) yang menyatakan bahwa respons PID cenderung menurun kualitasnya pada sistem dengan dinamika kompleks atau aliran tidak konstan. Overshoot yang paling tinggi pada PID juga mengindikasikan kurangnya kemampuan kontrol proporsional dan derivatif dalam menekan lonjakan awal sebelum sistem mencapai titik keseimbangan.

Fuzzy-PID menunjukkan peningkatan performa yang signifikan dibandingkan PID. Sistem Fuzzy-PID secara konsisten memperbaiki waktu naik, mengurangi overshoot, serta memperpendek settling time. Keunggulan ini muncul karena logika fuzzy mampu memberikan penyesuaian kendali secara dinamis berdasarkan perubahan error dan delta error, sehingga tindakan kontrol menjadi lebih adaptif. Respons yang lebih halus dan stabil pada Fuzzy-PID sesuai dengan hasil penelitian Kurniawan (2022) yang menegaskan bahwa kombinasi fuzzy dengan PID dapat meningkatkan ketahanan sistem terhadap gangguan dan ketidakpastian plant. Nilai steady-state error (SSE) yang lebih kecil pada metode ini menunjukkan peningkatan akurasi pengaturan dibanding PID murni, terutama pada sistem dengan variasi setpoint yang berbeda.

MPC menunjukkan performa paling unggul di antara ketiga kontroler. Pada seluruh setpoint, MPC menghasilkan rise time yang paling cepat, tanpa overshoot, serta settling time yang jauh lebih pendek. Kemampuan MPC dalam memprediksi respons sistem berdasarkan model matematis plant memungkinkan algoritma ini mengoptimalkan sinyal kendali sebelum error muncul di keluaran sistem. Selain itu, mekanisme optimasi berulang yang memperhitungkan batasan kontrol (constraints) menyebabkan MPC lebih stabil dan tidak menghasilkan fluktuasi yang signifikan. Hasil ini konsisten dengan penelitian Montaluisa et al. (2024) dan Gomes et al. (2024) yang menunjukkan keunggulan MPC dalam mengendalikan level cairan dan sistem air berskala besar, terutama pada kondisi yang memerlukan stabilitas tinggi dan adaptasi cepat terhadap perubahan inflow.

Jika dibandingkan antar kontroler, pola performa yang muncul menunjukkan hubungan teoritis yang kuat. Waktu naik yang semakin singkat dari PID → Fuzzy-PID → MPC menandakan peningkatan kemampuan algoritma dalam mendeteksi dan mengoreksi perubahan level air sejak awal. Overshoot yang menurun hingga nol pada MPC memperlihatkan bahwa metode prediktif lebih efektif dalam mengendalikan laju perubahan tanpa menyebabkan ketidakstabilan. Selain itu, SSE yang sangat kecil pada MPC mencerminkan tingkat akurasi tinggi dalam menjaga ketinggian air tepat pada setpoint, yang merupakan faktor penting dalam sistem bendungan untuk mencegah risiko banjir atau kekurangan debit.

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Bagian kesimpulan berisi ringkasan hasil penelitian atau temuan penelitian, yang Pengendali PID, Fuzzy-PID, dan MPC memiliki karakteristik keunggulan masing-masing. PID sederhana namun efektif, Fuzzy-PID memberikan adaptivitas lebih baik terhadap perubahan plant, sementara MPC menawarkan performa tertinggi melalui prediksi dan optimasi sistem. Implementasi MPC sangat direkomendasikan untuk aplikasi bendungan berskala besar yang membutuhkan kestabilan tinggi dan respons cepat, meskipun memerlukan komputasi lebih kompleks.

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan model bendungan yang lebih kompleks dan mendekati kondisi nyata, serta menguji kontrol pada prototipe fisik untuk memvalidasi hasil simulasi. Selain itu, parameter MPC perlu dioptimalkan lebih lanjut agar mampu beradaptasi dengan perubahan kondisi aliran. Pengembangan metode kontrol hibrida berbasis kecerdasan buatan juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan akurasi prediksi dan stabilitas sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, yang telah memberikan dukungan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif selama proses penelitian ini berlangsung. Penghargaan juga disampaikan kepada dosen pembimbing serta rekan-rekan mahasiswa yang telah membantu dalam proses simulasi dan validasi model. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang memberikan masukan berharga selama penyusunan artikel ini. Apabila penelitian ini memperoleh dukungan pendanaan, penulis berterima kasih kepada lembaga pemberi dana atas dukungan yang diberikan.

REFERENSI

Amalia Dwilesmana, & Bagus Dwi Cahyono. (2023). ANALISIS SISTEM INSTALASI LISTRIK GEDUNG BERTINGKAT DI PT. MULTI GROUP HOLDING COMPANY. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik, 2*(2), 124–138. https://doi.org/10.55606/juprit.v2i2.1768

Bajany, D. M., Zhang, L., & Xia, X. (2022). Model predictive control for water management and energy security in arid/semiarid regions. *Journal of Automation and Intelligence, 1*(1). https://doi.org/10.1016/j.jai.2022.100001

Gomes, M. N., Taha, A. F., Rápallo, L. M. C., Mendiondo, E. M., & Giacomoni, M. H. (2024). *Real-time Regulation of Detention Ponds via Feedback Control: Balancing Flood Mitigation and Water Quality.* http://arxiv.org/abs/2403.04675

Koo, J. H., Abraham, E., Jonoski, A., & Solomatine, D. P. (2025). Balancing operator's risk averseness in model predictive control for real-time reservoir flood control. *Journal of Hydroinformatics, 27*(4), 601–624. https://doi.org/10.2166/hydro.2025.019

This is an open access article under the CC BY-4.0 license

E-ISSN 2723-5602
P-ISSN 2252-7095
https://journal.unnes.ac.id/journals/eduel/index

Kurniawan, F., Maulana, Y. Z., & Christianti, R. F. (2022). Sistem Kendali Level Ketinggian Air Berbasis Fuzzy Control Menggunakan Simulink. *Techné: Jurnal Ilmiah Elektroteknika, 21*(1), 17–30.

Montaluisa, K., Vargas, L., Llanos, J., & Velasco, P. (2024). Model Predictive Control for Level Control of a Conical Tank. *Processes, 12*(8). https://doi.org/10.3390/pr12081702

Rahmani, S., Rosana, S. A., & Tian, G. H. (2023). Sistem Kontrol Level Air Dengan Pengontrol PID. *Telekontran: Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Kendali dan Elektronika Terapan, 10*(2), 174–181. https://doi.org/10.34010/telekontran.v10i2.9330

This is an open access article under the CC BY-4.0 license