



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

Muhamad Zia Ulhaq^{1*}, Desmira², Miftakhul Azamah³, Imratul Nazifah⁴, Meisya Dwi Rizkiana⁵, Yoga Angga Pratama⁶

¹⁻⁶Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Korespondensi penulis: Muhamadziaulhaq123@gmail.com

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.*

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, dan System, Water Level, Control System.

1. LATAR BELAKANG

Pengendalian ketinggian air pada bendungan dan sistem pengelolaan sumber daya air lainnya merupakan aspek vital dalam menjaga keamanan, keberlanjutan, dan efektivitas operasional. Tantangan dalam pengelolaan ini semakin meningkat seiring dengan perubahan iklim yang menyebabkan pola curah hujan tidak menentu serta fluktuasi debit air yang signifikan. Kondisi tersebut menuntut sistem kendali yang mampu merespons perubahan secara cepat dan akurat agar risiko banjir, kekeringan, maupun kerusakan infrastruktur dapat diminimalkan (Koo et al., 2025).

Pada praktiknya, sistem kontrol manual maupun kontrol klasik sering kali kurang mampu menjamin kestabilan level air ketika menghadapi gangguan besar atau perubahan inflow yang terjadi secara mendadak. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan kemampuan kontrol konvensional dalam mengantisipasi dinamika sistem yang kompleks dan bersifat

nonlinier. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol otomatis yang tidak hanya reaktif terhadap gangguan, tetapi juga memiliki kemampuan adaptif dan prediktif.

Metode kontrol PID masih menjadi pilihan utama dalam berbagai aplikasi industri karena strukturnya yang sederhana serta kemudahan implementasinya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa PID mampu memberikan respons yang cepat dan kesalahan steady-state yang kecil pada sistem level air sederhana. Namun, pada sistem berskala besar seperti bendungan atau reservoir, yang memiliki variasi debit masuk, keterlambatan sistem, serta batasan operasional yang ketat, performa PID cenderung menurun dan sulit mempertahankan stabilitas optimal (Rahmani et al., 2023). Sebagai alternatif, kontrol berbasis logika fuzzy mulai banyak diterapkan karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan nonlinieritas sistem dengan pendekatan berbasis aturan linguistik. Meskipun demikian, kontrol fuzzy maupun Fuzzy-PID umumnya masih bekerja secara reaktif, sehingga belum mampu mengoptimalkan kinerja sistem dengan mempertimbangkan perilaku sistem di masa mendatang.

Seiring perkembangan teknologi kontrol, metode kontrol modern seperti Model Predictive Control (MPC) mulai mendapatkan perhatian luas dalam pengendalian sistem air. MPC menawarkan kemampuan prediksi dan optimasi dengan mempertimbangkan berbagai constraint sistem, sehingga dinilai lebih sesuai untuk aplikasi bendungan dan reservoir yang memiliki kompleksitas tinggi. Namun demikian, kajian yang secara langsung membandingkan kinerja PID, Fuzzy-PID, dan MPC pada sistem bendungan dengan karakteristik hidrolis nyata masih relatif terbatas. Kondisi ini membuka peluang penelitian lebih lanjut untuk mengevaluasi dan membandingkan efektivitas ketiga metode kontrol tersebut.

2. KAJIAN TEORITIS

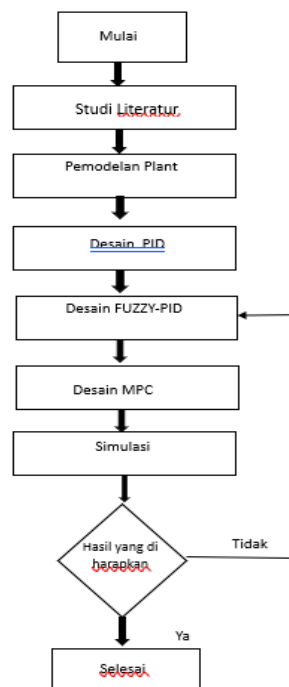
Pengendalian level air merupakan salah satu permasalahan klasik dalam bidang sistem kontrol yang melibatkan dinamika nonlinier, gangguan eksternal, serta keterbatasan fisik sistem. Pendekatan kontrol konvensional seperti PID bekerja dengan mengoreksi selisih antara nilai aktual dan nilai yang diinginkan melalui kombinasi aksi proporsional, integral, dan derivatif. Pendekatan ini terbukti efektif pada sistem dengan karakteristik sederhana dan parameter yang relatif konstan, namun menjadi kurang optimal ketika diterapkan pada sistem dengan variasi debit dan gangguan yang signifikan.

Kontrol berbasis logika fuzzy dikembangkan untuk memberikan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam menghadapi ketidakpastian sistem. Dengan menggunakan aturan berbentuk linguistik, kontrol fuzzy mampu meniru cara pengambilan keputusan manusia dalam menyesuaikan aksi kontrol terhadap kondisi sistem. Pada sistem pengendalian level air, kontrol fuzzy dan Fuzzy-PID menunjukkan kemampuan yang lebih adaptif dibandingkan kontrol PID konvensional. Namun demikian, karena tidak memiliki mekanisme prediksi, pendekatan ini masih bergantung pada kondisi error saat ini dan belum mampu mengoptimalkan respons sistem secara menyeluruh. Model Predictive Control merupakan pendekatan kontrol modern yang mengintegrasikan prediksi, optimasi, dan penanganan constraint dalam satu kerangka kendali. Dengan memanfaatkan model matematis sistem, MPC mampu memprediksi respons sistem pada beberapa langkah ke depan dan menentukan sinyal kontrol yang optimal berdasarkan hasil prediksi tersebut. Keunggulan ini menjadikan MPC sangat sesuai untuk pengendalian sistem air yang memiliki batasan operasional ketat dan inflow yang berfluktuasi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa MPC mampu memberikan performa yang lebih baik dalam hal stabilitas, waktu respons, serta kemampuan meredam gangguan dibandingkan metode kontrol konvensional. Dalam konteks pengelolaan bendungan dan reservoir, penerapan MPC juga memungkinkan integrasi berbagai tujuan operasional, seperti pengendalian banjir, pemenuhan kebutuhan air, dan perlindungan infrastruktur. Meskipun hasil penelitian terdahulu menunjukkan potensi besar MPC, kajian komparatif yang membandingkan langsung performa PID, Fuzzy-PID, dan MPC pada sistem bendungan dengan kondisi hidrolis nyata masih terbatas. Oleh karena itu, kajian teoritis ini menjadi dasar penting dalam merumuskan penelitian yang bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan ketiga metode kontrol tersebut secara komprehensif.

3. METODE PENELITIAN

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 3.1 Diagram Alur Penelitian

Model Sistem Bendungan

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

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

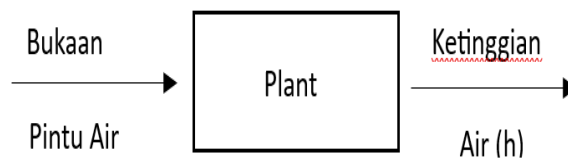
Atau juga dapat ditulis:

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

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

Penjelasan:

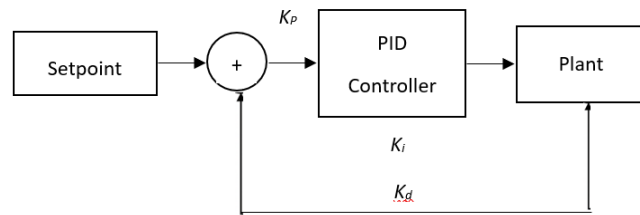
- A. Orde-2 mencerminkan sistem hidrolik dengan inersia dan redaman.
- B. Model ini cukup representatif untuk simulasi awal sebelum diterapkan pada model fisik yang lebih kompleks.
- C. Model digunakan pada ketiga kontroler agar perbandingan adil.



Gambar 3.2 Diagram Blok Model Plant Bendungan

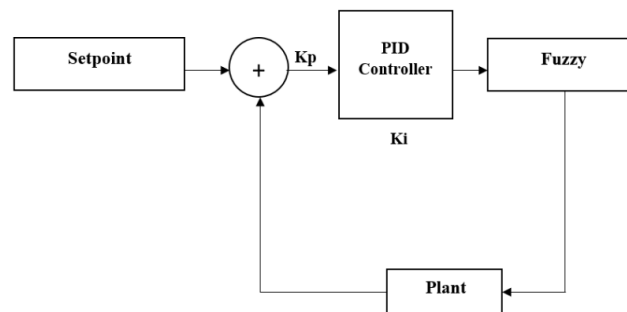
Menggambarkan hubungan antara bukaan pintu air sebagai input dan ketinggian air sebagai output dalam sebuah sistem bendungan. Bukaan pintu air memasuki blok plant, yaitu model yang merepresentasikan dinamika aliran air dalam bendungan. Perubahan pada posisi atau bukaan pintu air akan memengaruhi debit 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 3.3 Diagram Blok Perancangan PID

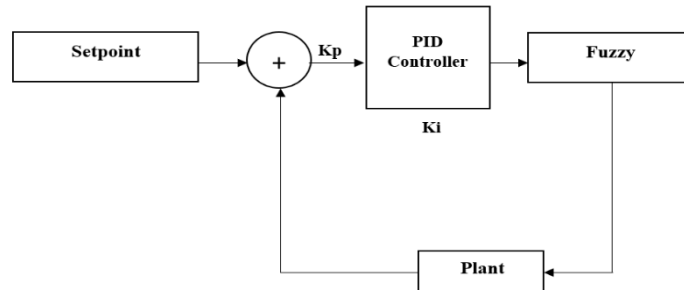
Diagram Gambar 3.3 menampilkan struktur dasar sistem kendali PID yang digunakan untuk mengatur ketinggian air. Setpoint berfungsi sebagai nilai acuan yang dibandingkan dengan keluaran sistem melalui blok penjumlah. Selisih antara keduanya menghasilkan sinyal error yang kemudian diproses oleh PID controller 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 3.4 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 acuan 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 (K_p) dan integral (K_i) 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.



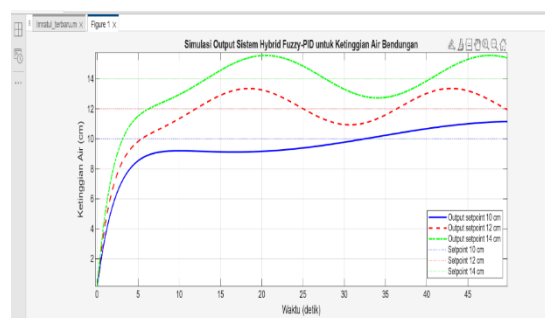
Gambar 3.5 Diagram Blok Perancangan Fuzzy – PID

4. 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.

Grafik dan Codingan di MATLAB



Gambar 4.1 Grafik Respon Setpoint 10, 12, 14 cm

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.

```
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;

steady_state_12 = 12.147;

rise_time_14 = 2.2074;

settle_time_14 = 13.0122;

steady_state_14 = 14.1473;

first order plus oscillation
(unter ilustrasi)

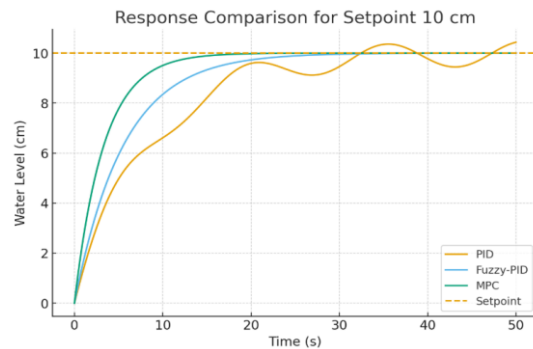
response = @(setpt, rise_t,
settle_t, ss, time) ss*(1 -
exp(-time/rise_t)).*(1 -
0.1*sin(3*(time/settle_t)));

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;
```



Gambar 4.2 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.

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.

Tabel 1. 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 2. 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 3. 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 4. Parameter Kontrol yang Digunakan

Metode Kontrol	Ris Time (s)	Overshoot (%)
PID	K_p	2.0
PID	K_i	0.5
PID	K_d	0.1
Fuzzy-PID	MF Δ Error	NB - Z - PB
Fuzzy-PID	MF Δ Error	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 K_p , K_i , dan K_d 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 hidrolis 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, 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.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

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.

DAFTAR REFERENSI

- Amalia Dwilesmana, & Cahyono, B. D. (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>
- Castelletti, A., Pianosi, F., & Soncini-Sessa, R. (2021). Multi-objective model predictive control for water reservoir systems under uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 141, 105058. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105058>
- García-Nieto, S., Alcorta-García, E., & Rodellar, J. G. (2021). Predictive control applied to water level regulation systems. *Control Engineering Practice*, 114, 104871. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2021.104871>
- 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. *arXiv preprint*. <https://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>
- 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.
- Litrico, X., & Fromion, V. (2021). *Modeling and control of hydrosystems* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58407-9>
- Liu, H., Liu, Z., & Xia, X. (2020). Data-driven model predictive control for water distribution systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 28(6), 2425–2437. <https://doi.org/10.1109/TCST.2019.2949795>
- Montaluisa, K., Vargas, L., Llanos, J., & Velasco, P. (2024). Model predictive control for level control of a conical tank. *Processes*, 12(8), 1702. <https://doi.org/10.3390/pr12081702>
- Nguyen, T., & De Schutter, B. (2020). Model predictive control for flood mitigation in urban drainage systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 40(3), 40–57. <https://doi.org/10.1109/MCS.2020.2976584>
- Pérez, R., Gómez, J., & De Prada, C. (2021). Predictive control of water systems: A comprehensive review. *Journal of Process Control*, 99, 36–54. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.01.003>
- 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>
- Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., & Diehl, M. (2020). *Model predictive control: Theory, computation, and design* (2nd ed.). Nob Hill Publishing.
- Schwanenberg, M., Becker, J., & Xu, H. (2021). Real-time control for flood management in river systems. *Journal of Hydroinformatics*, 23(4), 749–764. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.078>

- Solomatine, D. P., & Ostfeld, A. (2021). Data-driven modelling and computational intelligence in hydrology. *Water Resources Research*, 57(5), e2020WR028044. <https://doi.org/10.1029/2020WR028044>
- Van Overloop, P. J. (2021). Model predictive control on open water systems. Delft University of Technology.
- Wang, L. (2021). Model predictive control system design and implementation using MATLAB. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-72003-3>
- Xia, X., Zhang, L., & Bajany, D. M. (2023). Energy–water nexus optimization using predictive control. *Applied Energy*, 341, 120932. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120932>
- Zhao, T., Cai, X., & Lei, X. (2022). Model predictive control for reservoir operation under inflow uncertainty. *Water Resources Management*, 36(7), 2195–2211. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03064-9>