

Simulasi *Disturbance Observer* pada Sistem Kendali Aliran Cairan Berbasis Mikrokontroler

Dede Irawan Saputra ^{1*)}, Dadang Lukman Hakim ²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Jenderal Achmad Yani
Jalan Terusan Jend. Sudirman PO.BOX 148 Cimahi, Indonesia

²⁾Departemen Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Pendidikan Indonesia
Jl. Dr. Setiabudhi No. 207 Bandung, Indonesia

^{*)}Korespondensi : dedeirawan.saputra@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas desain dan implementasi sistem kendali aliran cairan berbasis pengendali PID yang dilengkapi dengan *Disturbance Observer* (DOB). Sistem ini dirancang untuk mengkompensasi pengaruh gangguan eksternal yang dapat mengganggu performa kendali. Proses desain dimulai dengan memodelkan dinamika sistem menggunakan persamaan matematis, diikuti oleh perancangan kontroler PID untuk mengatur aliran sesuai setpoint yang diinginkan. DOB dirancang dengan memanfaatkan model *invers* sistem untuk memperkirakan gangguan yang terjadi dan mengkompensasi efeknya pada sinyal kontrol secara real-time. Simulasi dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem dengan dan tanpa DOB dalam menghadapi gangguan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dengan DOB memiliki performa yang lebih baik, dengan respons yang lebih stabil, waktu pemulihan lebih cepat, dan kesalahan *steady-state* yang lebih kecil dibandingkan sistem tanpa DOB. Hal ini menegaskan keefektifan DOB dalam meningkatkan *robustnes* sistem kendali terhadap gangguan eksternal.

Kata kunci : Kendali aliran cairan, Disturbance observer, Kendali PID

Abstract

This research discusses the design and implementation of a PID controller-based liquid flow control system equipped with a Disturbance Observer (DOB). The system is designed to compensate for the influence of external disturbances that can interfere with control performance. The design process starts with modeling the system dynamics using mathematical equations, followed by designing a PID controller to regulate the flow according to the desired setpoint. The DOB is designed by utilizing the inverse model of the system to estimate the disturbances that occur and compensate for their effects on the control signals in real-time. Simulations were conducted to compare the performance of the system with and without DOB in the face of disturbances. The results show that the system with DOB has better performance, with more stable response, faster recovery time, and smaller steady-state error than the system without DOB. This confirms the effectiveness of DOB in improving the robustness of the control system against external disturbances.

Keywords : Liquid flow control, Disturbance observer, PID

I. PENDAHULUAN

Salah satu tantangan utama dalam desain sistem kendali adalah kemampuan sistem untuk bertahan terhadap gangguan eksternal yang dapat mempengaruhi kinerja. Gangguan ini bisa berupa gangguan konstan, seperti bias pada sensor, maupun gangguan yang bervariasi, seperti perubahan beban atau fluktuasi lingkungan. Dalam sistem kontrol konvensional, seperti pengendali PID [1],

kemampuan untuk menahan gangguan sering kali menjadi indikator utama keberhasilan desain. Namun, pada praktiknya, banyak sistem yang hanya efektif terhadap gangguan tertentu atau memiliki

Info Makalah:

Dikirim : 01-18-2025;
Revisi 1 : 01-22-2025;
Revisi 2 : mm-dd-yy;
Diterima : 01-22-2025.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-896-2300-1126
e-mail : dedeirawan.saputra@lecture.unjani.ac.id

keterbatasan dalam menghadapi gangguan dinamis yang berubah-ubah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan tambahan untuk meningkatkan *robustnes* sistem agar dapat tetap stabil dan akurat dalam berbagai kondisi [2].

Salah satu teknik yang efektif untuk menghalau gangguan adalah *Disturbance Observer* (DOB) [3]. DOB bekerja dengan memperkirakan besarnya gangguan secara real-time menggunakan model sistem, sehingga gangguan tersebut dapat dikompensasi langsung pada sinyal kontrol. Prosedur utama dalam desain DOB melibatkan tiga langkah utama [4]: pertama, menentukan model matematis sistem yang akan digunakan sebagai basis estimasi; kedua, merancang filter yang digunakan untuk memisahkan gangguan dari sinyal kontrol; dan ketiga, mengimplementasikan kompensasi gangguan dalam algoritma pengendalian. DOB memiliki kelebihan dalam hal fleksibilitas, karena dapat diterapkan pada berbagai jenis pengendali, termasuk PID, dan efektivitasnya telah terbukti dalam berbagai aplikasi industri [5]. Dengan DOB, sistem kendali tidak hanya lebih *robust*, tetapi juga mampu mempertahankan performa optimal [6] meskipun menghadapi gangguan yang kompleks dan tidak terprediksi [7].

Pada penelitian ini, dilakukan simulasi pada sebuah skema sistem kendali untuk proses pendistribusian cairan yang memerlukan laju aliran sesuai dengan yang diharapkan dan mampu bertahan terhadap berbagai jenis gangguan. Sistem ini dapat terdiri dari komponen utama seperti sensor aliran yang berfungsi mengukur laju aliran cairan secara real-time, pompa sebagai aktuator untuk mendistribusikan cairan, dan mikrokontroler sebagai pengendali utama. Mikrokontroler dirancang untuk mengimplementasikan pengendali PID yang dilengkapi dengan DOB guna meningkatkan *robustnes* sistem terhadap gangguan eksternal.

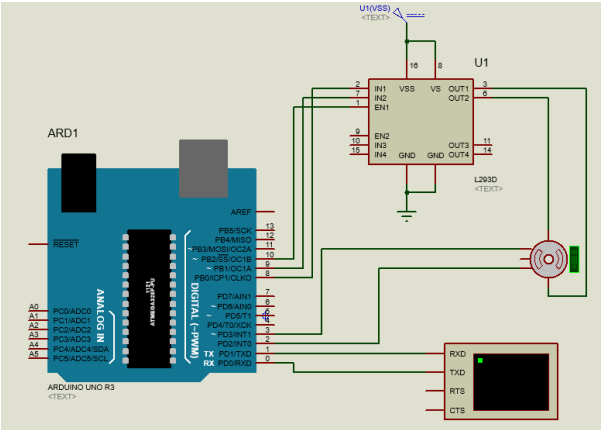
Dalam skema ini, DOB digunakan untuk memperkirakan gangguan yang mempengaruhi performa sistem, baik yang bersifat konstan maupun yang bervariasi, seperti perubahan beban kerja pompa atau fluktuasi aliran cairan. Gangguan-gangguan tersebut akan disimulasikan dan dianalisis pengaruhnya terhadap sistem dengan dan tanpa DOB menggunakan perangkat lunak proteus. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas DOB dalam meningkatkan stabilitas sistem karena sistem dengan pengendali PID saja sudah cukup untuk mengendalikan [8] agar sistem sesuai dengan yang diharapkan. Peningkatan performa seperti dapat menghalau gangguan yang bervariasi akan menjadi kelebihan lain dari sistem dinamik seperti mempertahankan laju aliran yang diinginkan, dan meminimalkan kesalahan *steady-state* meskipun dihadapkan pada gangguan yang dinamis. Hasil simulasi akan menunjukkan perbandingan performa sistem, sehingga dapat disimpulkan peran penting DOB dalam memastikan keberlanjutan proses distribusi cairan yang andal dan presisi.

II. METODE

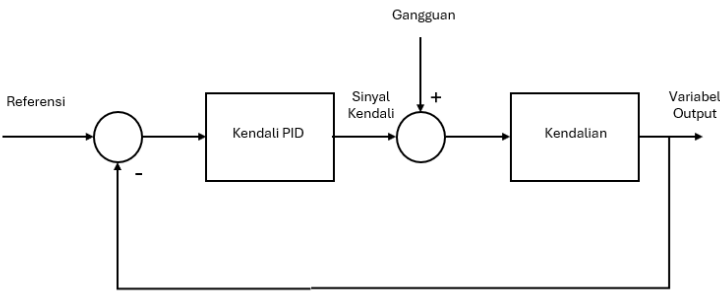
A. System Development Life Cycle

Perancangan sistem kendali aliran cairan menggunakan pendekatan *System Development Life Cycle* (SDLC) dimulai dari tahap perencanaan. Pada tahap ini, tujuan utama sistem adalah meningkatkan kinerja kendali aliran cairan dengan menggunakan DOB yang mampu mengatasi berbagai jenis gangguan baik dari sisi sinyal kendali atau gangguan fluktuasi dari luar yang mempengaruhi laju aliran sebagai gangguan dinamis. Perangkat lunak yang digunakan adalah Proteus 8.6 yang dapat mensimulasikan sensor aliran berbasis rotary encoder, pompa untuk aktuasi, driver motor L293D, dan mikrokontroler dengan papan Arduino sebagai pengendali utama. Selain itu, software seperti Proteus dipilih untuk mendukung simulasi awal seperti pemodelan dan identifikasi sistem serta validasi desain. Berikut skematik sistem yang digunakan untuk mensimulasikan pengendalian cairan yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Tahap berikutnya adalah analisis. Pada tahap ini, kebutuhan sistem diidentifikasi, termasuk model matematis atau fungsi alih sistem pendistribusian cairan yang mencakup hubungan antara *input*, *output*, dan dinamika sistem secara *open-loop* maupun *closed-loop* yang ditunjukkan pada Gambar 2. Analisis dilakukan untuk memahami karakteristik objek kendali yang dapat dipengaruhi oleh komponen lain seperti sensor yang membaca *variable output*, atau fluktuasi beban pompa yang diakibatkan menerima sinyal kendali, sehingga sistem dapat dirancang agar kokoh terhadap berbagai gangguan. Parameter-parameter DOB dan kendali PID disesuaikan untuk memenuhi kebutuhan sistem

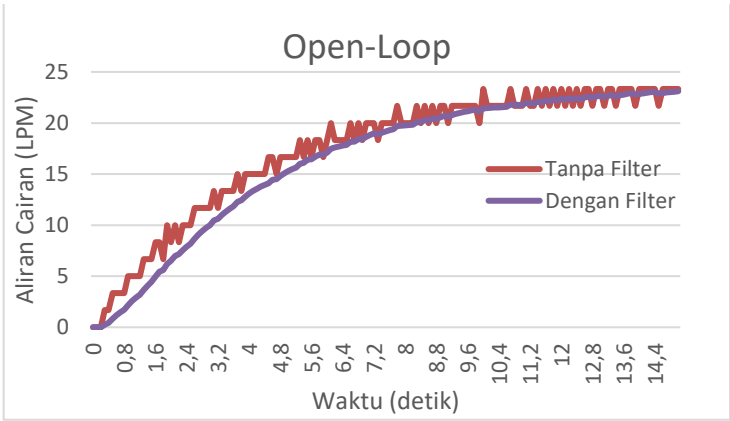


Gambar 1 Skematik sistem pengendali laju cairan



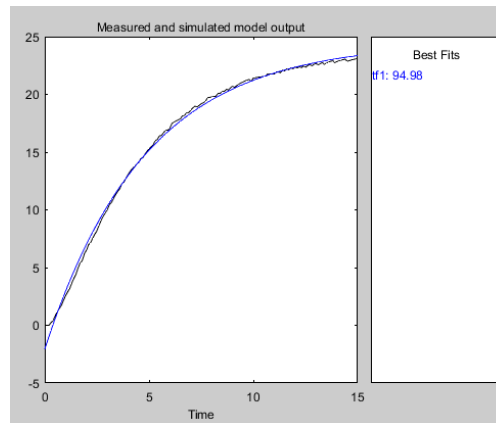
Gambar 2 Diagram blok sistem *closed-loop*

Pada tahap desain, model sistem fisik dikembangkan, baik dalam bentuk fungsi alih berdasarkan pengamatan sistem *open-loop*. Ketika sistem diberikan input berupa tegangan pada motor kemudian motor memompa cairan, laju cairan tersebut dapat diukur dan diolah menjadi fungsi alih. Adapun spesifikasi motor yang digunakan adalah pompa 12V DC, dengan sensor aliran cairan yang memiliki spesifikasi 48 pulsa/revolusi dengan faktor kalibrasi 7.5 untuk konversi ke dalam satuan liter/menit. Berikut tanggapan sistem secara *open-loop* yang ditunjukkan pada Gambar 3. Setelah didapatkan tanggapan sistem. Terlihat pada Gambar 3 hasil pembacaan sensor masih terdapat fluktuasi yang disebabkan oleh derau pada sensor sehingga diperlukan *filter*. Adapun *filter* yang digunakan adalah jenis *low-pass filter* dengan frekuensi *cut-off* 10 Hz. Hasil tanggapan setelah menggunakan *filter* dapat terlihat jelas dan menunjukkan tanggapan yang lebih halus tanpa adanya fluktuasi yang diakibatkan oleh derau.



Gambar 3 Tanggapan sistem *open-loop*

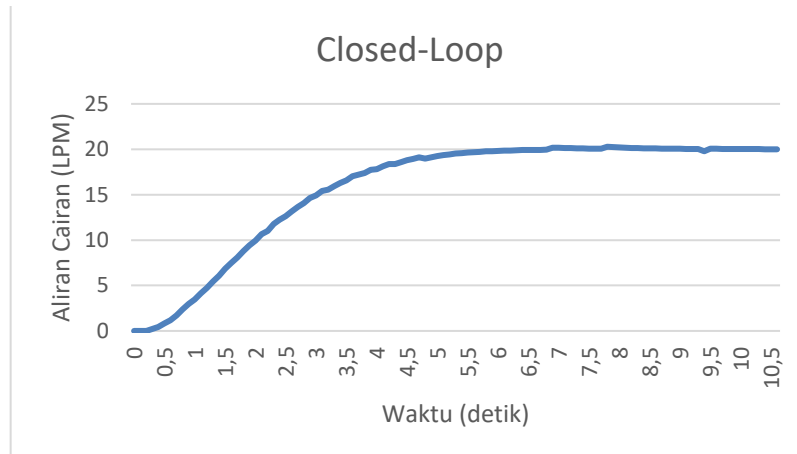
Dengan menggunakan perangkat lunak Matlab dapat ditentukan estimasi model matematis dari sistem. Tanggapan sistem secara *open-loop* tidak menunjukkan adanya *overshoot* sehingga sistem dapat diestimasi dengan sistem orde pertama. Adapun hasil estimasi menggunakan perangkat lunak Matlab [9] didapatkan fungsi alih yang ditunjukkan pada persamaan 1 dengan *best fits* sebesar 94,98% yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Estimasi pemodelan dan identifikasi sistem dengan Matlab

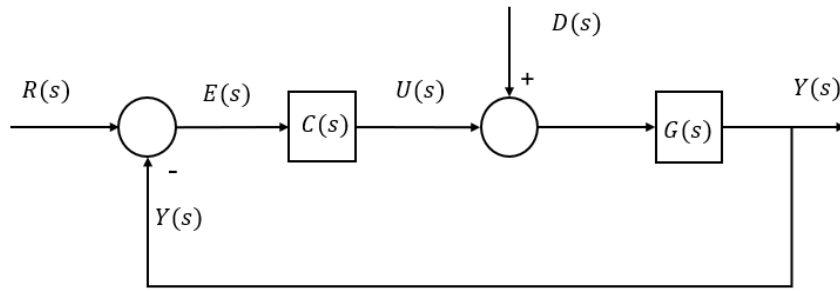
$$G_n(s) = \frac{0,02008}{s+0,2088} \quad (1)$$

Pengendali PID dirancang secara *tuning* berdasarkan identifikasi awal bahwa sistem *closed-loop* masih memiliki kesalahan *steady-state* yang besar sehingga diperlukan integrator. Agar sistem lebih kuat dan mengurangi *overshoot* ditambahkan pula pengendali *derivative*. Berikut hasil tanggapan sistem secara *closed-loop* dengan pengendali PID yang ditunjukkan pada Gambar 5 dengan referensi sebesar 20 LPM.



Gambar 5 Tanggapan sistem *closed-loop*

Langkah berikutnya adalah desain DOB yang mencakup model sistem nominal $G_n(s)$, model *invers* $G_n^{-1}(s)$, dan *filter* DOB untuk estimasi gangguan. Perancangan DOB dapat diamati dari perilaku sistem secara *closed-loop* yang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

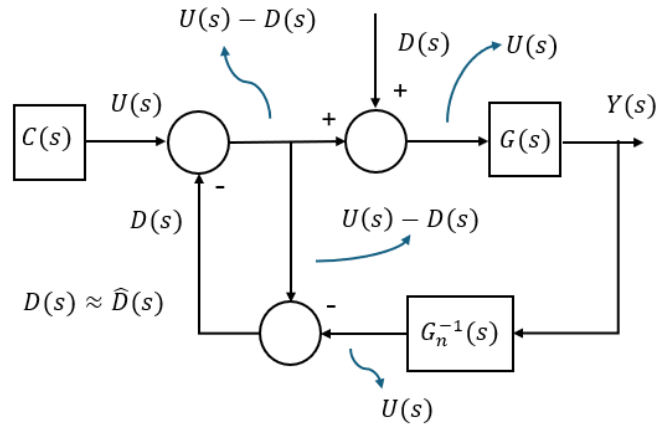


Gambar 6 diagram blok sistem *closed-loop*

Struktur sistem *closed-loop* tersebut dapat ditulis jika $D(s) = 0$ dapat dihitung keluaran sistem $Y(s)$ sistem sebagai berikut.

$$Y(s) = Y(s) = \frac{G(s)C(s)R(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

Dengan mempertimbangkan kalkulasi gangguan dari luar, dapat dibentuk diagram blok sebagai berikut [4], [10]. Jika $R(s) = 0$ dapat dihitung estimasi gangguan sebagai bagian dari dinamika sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Ide utama DOB

Dengan mengimplementasikan *low-pass filter* sistem secara *closed-loop* yang terintegrasi dengan DOB dapat ditulis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8. Jika $\hat{D}(s) \approx D(s)$ dapat dituliskan persamaan hubungan antara masing-masing keluaran terhadap gangguan jika $R(s) = 0$ dan keluaran terhadap input referensi jika $D(s) = 0$. DOB akan mengintegrasikan estimasi gangguan sehingga persamaan utama dapat dihitung sebagai berikut.

$$Y(s) = G(s)(D(s) + U(s) - \hat{D}(s)) \quad (2)$$

Jika sinyal kendali $U(s) = C(s)E(s)$ dan $E(s) = R(s) - Y(s)$, dapat ditentukan bahwa $U(s) = C(s)(R(s) - Y(s))$. Berdasarkan persamaan tersebut, estimasi gangguan dapat dituliskan seperti yang ditunjukkan pada persamaan 3 dan 4.

$$\hat{D}(s) = -Q(s)(U(s) - \hat{D}(s)) + Q(s)G_n^{-1}(s)Y(s) \quad (3)$$

$$\hat{D}(s) = \frac{Q(s)G_n^{-1}(s)Y(s)}{1-Q(s)} - \frac{Q(s)U(s)}{1-Q(s)} \quad (4)$$

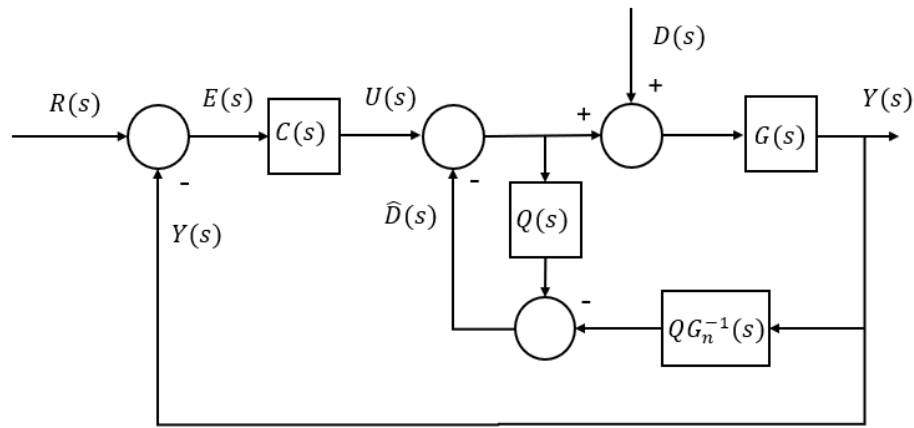
Apabila dikombinasikan antara sistem yang memiliki referensi tertentu dan terdapat gangguan pada sistem tersebut sehingga perlu dibentuk sebuah persamaan yang mencakup keduanya seperti yang ditunjukkan pada persamaan 5-7. Fungsi alih masing-masing keluaran terhadap referensi dan terhadap gangguan menjadi penting karena hal tersebut yang akan diolah pada mikrokontroler.

$$Y(s) = W_D(s)D(s) + W_R(s)R(s) \quad (5)$$

$$W_D(s) = \frac{G_n(s)G(s)(1-Q(s))}{G_n(s)(1+G(s)C(s))+Q(s)(G(s)-G_n(s))} \quad (6)$$

$$W_R(s) = \frac{G_n(s)G(s)C(s)}{G_n(s)(1+G(s)C(s))+Q(s)(G(s)-G_n(s))} \quad (7)$$

Filter Q dipilih sebagai *low-pass filter* hal tersebut menunjukkan bahwa DOB dapat mengestimasi gangguan secara akurat jika frekuensi gangguan berada pada rentang *low-pass filter bandwidth* tersebut. Hal tersebut menjelaskan bahwa konsekuensinya adalah bandwidth dari filter harus ditentukan setinggi mungkin.



Gambar 8. Sistem *closed-loop* dengan DOB

Tahap implementasi mencakup pembuatan program mikrokontroler yang mengintegrasikan algoritma PID dan DOB. Program ini dirancang untuk menampilkan data penting, seperti sinyal gangguan, sinyal kendali, dan keluaran sensor. Simulasi dijalankan di Proteus untuk menguji algoritma dengan gangguan yang telah dimodelkan. Gangguan yang akan diberikan pada sistem adalah sinyal yang dapat pada pompa Fluktuasi beban periodik yang berbentuk gelombang sinusoidal dengan amplitudo 10 dan periode terkait dengan faktor 1500. Dengan persamaan sebagai berikut.

$$D(t) = 10 \sin \frac{t}{1500} + \frac{\text{random}(-30,30)}{10} \quad (8)$$

Gangguan berikutnya adalah gangguan seperti kebocoran atau penambahan aliran cairan yang dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut.

$$D(t) = \pm 2 \sin \frac{t}{1500} + 1 \quad (9)$$

Data hasil pengujian dianalisis untuk mengukur kinerja dan performa sistem kinerjanya dipantau untuk memastikan keberlanjutan operasional. Terakhir, pada tahap pemeliharaan, sistem diperiksa secara berurutan dari gangguan yang diberikan untuk memastikan semua sistem bekerja dengan baik, dan algoritma kendali diperbarui jika diperlukan agar tetap sesuai dengan kondisi sistem yang mungkin berubah.

B. Perancangan DOB Pada Mikrokontroler

Persamaan 3 menunjukkan cara bagaimana mengimplementasikan DOB, agar dapat mengimplementasikan dalam mikrokontroler, persamaan tersebut dirancang untuk mengestimasi gangguan yang mempengaruhi sistem berdasarkan model nominal $G_n(s)$. Persamaan 3 dapat dimodifikasi menjadi persamaan 10.

$$\hat{D}(s) = (1 - Q(s))U(s) + Q(s)\hat{D}(s) \quad (10)$$

Fungsi ini membandingkan sinyal kendali nominal (berdasarkan model ideal $G_n(s)$) dengan sinyal kendali aktual $U(s)$ untuk mendeteksi gangguan eksternal. Hasil estimasi gangguan diperbarui menggunakan *filter* yang memberikan respons yang halus terhadap perubahan. Dengan pendekatan ini, kendali dapat

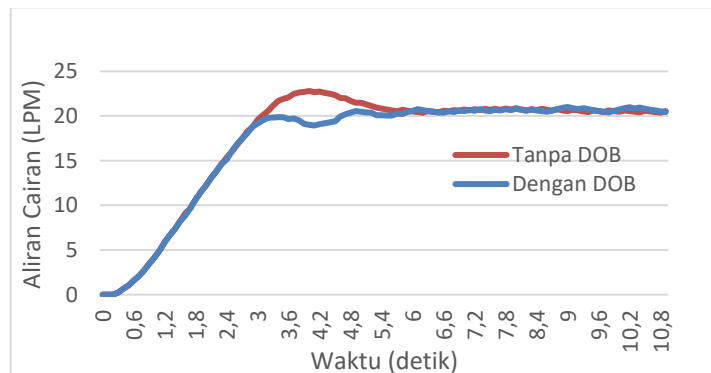
dikompensasi untuk meminimalkan efek gangguan pada sistem. Berikut merupakan fungsi DOB yang digunakan pada mikrokontroler.

```
void DisturbanceObserver() {  
    // Hitung  $G_n^{-1}(s)$  sebagai filter diskrit  
    float G_inv_xn = u; // input saat ini  
    float G_inv_yn = (Gn_gain_inv / (1 + Gn_tau / deltaT)) * (G_inv_xn - G_inv_xn1)  
        + (Gn_tau / (Gn_tau + deltaT)) * G_inv_yn1;  
    u_nominal = G_inv_yn; // aksi kendali nominal dari  $G_n^{-1}(s)$   
    // Update nilai sebelumnya dari  $G_n^{-1}(s)$   
    G_inv_xn1 = G_inv_xn;  
    G_inv_yn1 = G_inv_yn;  
    // Estimasi gangguan dengan filter  $Q(s)$   
    dEst = (1 - Q_alpha) * (u_nominal - u) + Q_alpha * dPrev;  
    // Update estimasi gangguan sebelumnya  
    dPrev = dEst;  
}
```

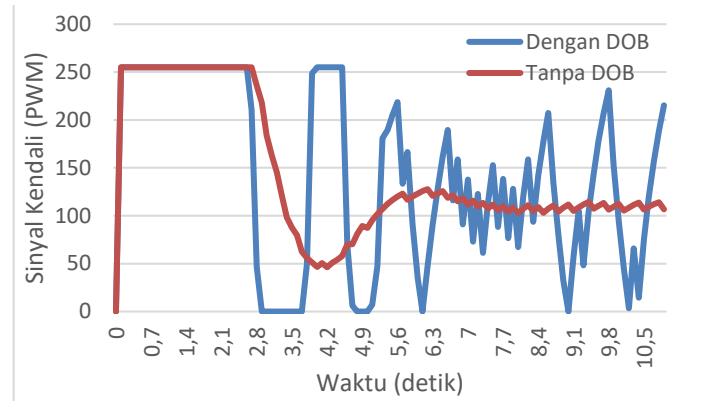
Error saat ini dihitung sebagai selisih antara nilai setpoint dan nilai yang terukur *filtered flow*. Sinyal kendali nominal dihitung berdasarkan gain statis *invers* $G_n^{-1}(s)$ dan keluaran terukur *filtered flow*. Gangguan *dEst* diestimasi menggunakan filter $Q(s)$, di mana Q_{alfa} adalah koefisien filter seperti yang terdapat pada persamaan 10. Filter ini mencampurkan perubahan kontrol nominal dengan gangguan yang telah diestimasi sebelumnya. Nilai gangguan sebelumnya *dPrev* dan *error* sebelumnya *ePrev* diperbarui untuk digunakan pada iterasi berikutnya.

III. HASIL DAN DISKUSI

Pada sistem kendali aliran cairan ini, gangguan merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi performa. Dua jenis gangguan utama yang dianalisis adalah gangguan pada output sistem (*output disturbance*) dan gangguan pada pompa (*input disturbance*). Hasil perbandingan dilakukan untuk mengidentifikasi kemampuan sistem dalam mengatasi gangguan tersebut, baik pada kondisi tanpa DOB maupun dengan DOB. Berikut hasil perbandingan sistem dengan dan tanpa menggunakan DOB tanpa adanya gangguan yang ditunjukkan pada Gambar 9 dan sinyal kendalinya pada Gambar 10.



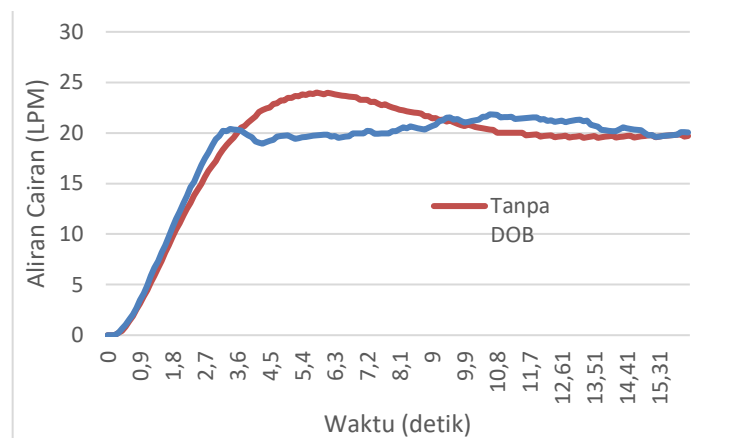
Gambar 9 Tanggapan waktu sistem *closed-loop* dengan dan tanpa DOB



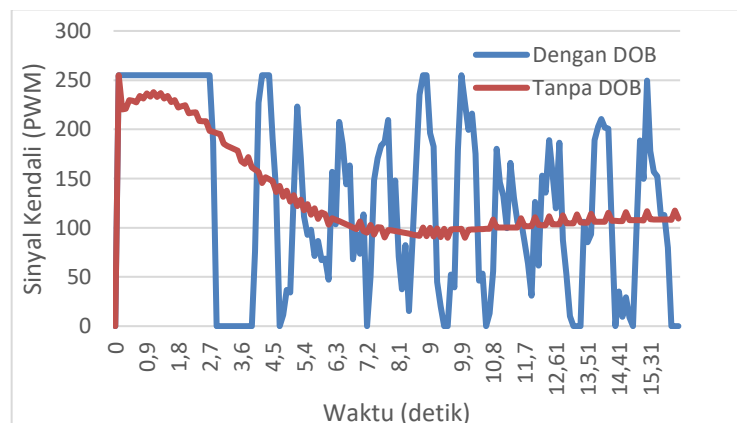
Gambar 10 Sinyal kendali sistem *closed-loop* dengan dan tanpa DOB

Sistem *closed-loop* tersebut menggunakan kendali PID dengan masing-masing konstanta $K_p = 10$, $K_i = 5$, dan $K_d = 3$. Sistem dengan DOB akan terus mengestimasi dan melakukan kalkulasi terhadap gangguan sehingga menghasilkan sinyal kendali yang berbeda sekalipun sistem tersebut tidak ada gangguan. Kedua skema yang disajikan menghasilkan *error steady-state* = 0 akan tetapi sistem dengan DOB relatif memiliki overshoot yang sangat kecil apabila dibandingkan dengan sistem tanpa DOB.

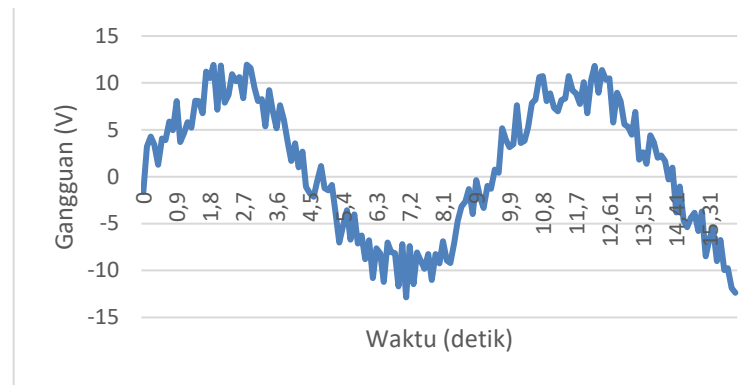
Perbandingan berikutnya adalah masing-masing skema akan diberikan gangguan yang bervariasi dengan persamaan gangguan 8. Representasi gangguan tersebut akan berakibat pada performa pompa dalam menerima sinyal kendali dari mikrokontroler. Berikut hasil pengujian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 11 dan perbandingan sinyal kendali pada Gambar 12.



Gambar 11 Tanggapan waktu sistem *closed-loop* dengan gangguan pada sinyal pompa

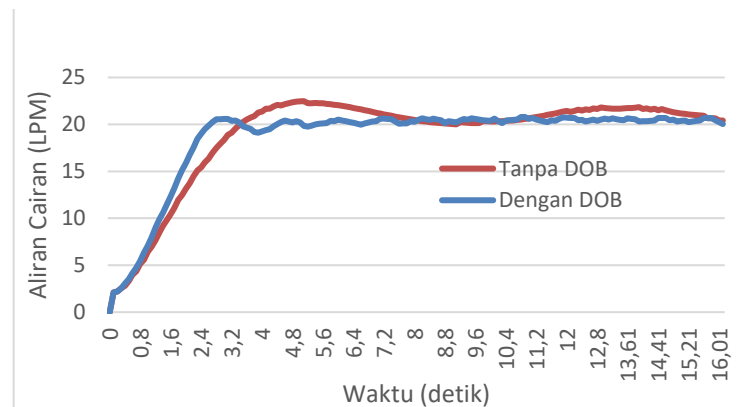


Gambar 12 Sinyal kendali sistem *closed-loop* dengan gangguan pada sinyal pompa

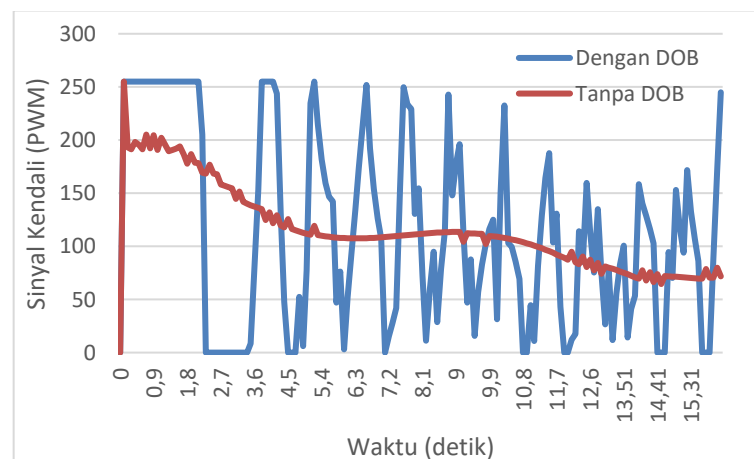


Gambar 13. Gangguan pada sinyal pompa

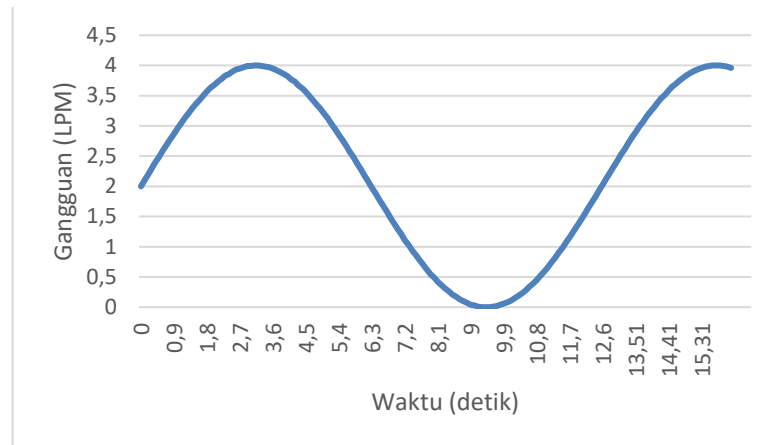
Pada sistem tanpa DOB, gangguan langsung mempengaruhi keluaran tanpa mekanisme kompensasi, sehingga laju aliran yang dihasilkan mengalami fluktuasi yang signifikan. Sebaliknya pada sistem dengan DOB dapat memberikan tanggapan yang cepat mengkompensasi gangguan. Proses kompensasi tersebut menghasilkan variasi sinyal kendali sesuai dengan algoritma pada DOB. Sistem dengan DOB akan memastikan tanggapan sistem sesuai dengan referensi sehingga menghasilkan sinyal kendali yang lebih agresif dibandingkan dengan tanpa algoritma DOB. Berikutnya sinyal gangguan yang diberikan adalah sesuai dengan persamaan 9 yang merepresentasikan pengisian dan pengosongan cairan sehingga mempengaruhi laju cairan. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 14-16.



Gambar 14 Tanggapan waktu sistem *closed-loop* dengan gangguan pada output



Gambar 15 Sinyal kendali sistem *closed-loop* dengan gangguan pada sinyal output



Gambar 16 Gangguan pada output

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada gangguan output yang bersifat variatif, DOB berhasil mempercepat waktu pemulihan sistem ke *set point* dibandingkan dengan sistem tanpa DOB. Sementara itu, pada gangguan input yang bervariasi, sistem dengan DOB menghasilkan aliran yang lebih stabil dengan kesalahan *steady-state* yang lebih kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa DOB mampu meningkatkan kekokohan sistem terhadap perubahan dinamis pada gangguan akan tetapi sinyal kendali dengan sistem dengan DOB memiliki sinyal kendali yang lebih agresif sehingga batasan yang ketat harus diantisipasi pada perangkat keras agar tidak terjadi kegagalan sistem secara fisik.

IV. KESIMPULAN

Hasil simulasi sistem kendali aliran cairan dengan dan tanpa *Disturbance Observer* (DOB) menunjukkan bahwa penggunaan DOB secara signifikan meningkatkan performa sistem dalam menghadapi gangguan. Pada sistem tanpa DOB, gangguan pada output maupun input menghasilkan fluktuasi besar pada laju aliran, dengan waktu pemulihan yang lebih lama. Sebaliknya, sistem dengan DOB mampu memperkirakan dan mengkompensasi gangguan secara real-time, menghasilkan keluaran yang lebih stabil dan mendekati nilai set point. Sinyal kendali pada sistem dengan DOB menunjukkan perbaikan respons terhadap gangguan, tetapi dalam beberapa kondisi tertentu, DOB cenderung menghasilkan sinyal kendali yang agresif, terutama saat menghadapi gangguan yang bervariasi secara cepat. Penggunaan filter DOB $Q(s)$ berperan penting dalam mengurangi sensitivitas terhadap gangguan frekuensi tinggi. Dengan pemilihan parameter $Q(s)$ yang tepat, DOB dapat memberikan keseimbangan antara estimasi gangguan yang akurat dan stabilitas sistem. Sehingga pada penelitian berikutnya dapat dikomparasikan berbagai parameter untuk filter tersebut. Sebagai potensi pengembangan berikutnya, metode untuk mengurangi agresivitas sinyal kendali dari DOB dapat dieksplorasi lebih lanjut, seperti menggunakan teknik saturasi kontrol atau perancangan filter DOB yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. I. Saputra, A. M. Ibrahim, K. Kusnandar, Z. Fakhri, and Y. B. Zainal, "Penalaan PID Pada Sistem Kendali Ketinggian Cairan Menggunakan Metode Cohen-Coon Berbasis Sistem Kendali Terdistribusi," *JITEL J. Ilm. Telekomun. Elektron. Dan List. Tenaga*, vol. 4, no. 1, pp. 83–94, May 2024, doi: 10.35313/jitel.v4.i1.2024.83-94.
- [2] E. Sariyildiz, H. Yu, and K. Ohnishi, "A Practical Tuning Method for the Robust PID Controller with Velocity Feed-Back," *Machines*, vol. 3, no. 3, pp. 208–222, Aug. 2015, doi: 10.3390/machines3030208.
- [3] W.-H. Chen, J. Yang, L. Guo, and S. Li, "Disturbance-Observer-Based Control and Related Methods—An Overview," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 2, pp. 1083–1095, Feb. 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2478397.
- [4] E. Sariyildiz and K. Ohnishi, "A Guide to Design Disturbance Observer," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 136, no. 2, p. 021011, Mar. 2014, doi: 10.1115/1.4025801.
- [5] P. Keadtipod, D. Banjerdpongchai, and P. Kittisupakorn, "Design of Disturbance Observer and Model Predictive Control for Non-Minimum Phase Time-Delay System With Application to Industrial Boilers," in *2017 56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Kanazawa: IEEE, Sep. 2017, pp. 1389–1394. doi: 10.23919/SICE.2017.8105733.

- [6] B. B. Alagoz, F. N. Deniz, C. Keles, and N. Tan, "Disturbance Rejection Performance Analyses of Closed Loop Control Systems by Reference to Disturbance Ratio," *ISA Trans.*, vol. 55, pp. 63–71, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.isatra.2014.09.013.
- [7] R. Garrido and J. L. Luna, "On the Equivalence Between PD+DOB and PID Controllers Applied to Servo Drives," *IFAC-Pap.*, vol. 51, no. 4, pp. 95–100, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.044.
- [8] B. S. Marta, I. Ferdiansyah, and F. Ardila, "Sistem Kendali Kecepatan Motor Pada Mobile Robot Menggunakan PID Dan Analisis Disturbance Berbasis Disturbance Observer," *JTT J. Teknol. Terpadu*, vol. 6, no. 2, Sep. 2018, doi: 10.32487/jtt.v6i2.461.
- [9] D. I. Saputra, I. Budiawan, and A. Jayanugraha, "Pemodelan dan Simulasi Sistem Kendali Volume Air Pada Process Plant Dengan Metode State Feedback," *J. Otomasi Kontrol Dan Instrumentasi*, vol. 14, no. 1, pp. 11–20, 2022, doi: 10.5614/joki.2022.14.1.2.
- [10] N. Saikumar, R. K. Sinha, and S. H. HosseinNia, "Resetting Disturbance Observers With Application in Compensation of Bounded Nonlinearities Like Hysteresis in Piezo-Actuators," *Control Eng. Pract.*, vol. 82, pp. 36–49, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.conengprac.2018.09.026.