

Desain Sistem Kontrol Tekanan Dinamis pada Pipa Distribusi Berbasis Mikrokontroler

^{1*} Benriwati Maharmi, ¹ Ardiansyah Sudarmadi, ¹ Engla Harda Arya, ² Zulfatri Aini

¹ Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Pekanbaru

² Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

¹benriwati@gmail.com, ²ardiansyah.sudarmadi@gmail.com, ³englahardaarya@gmail.com,

⁴zulfatri_aini@uin-suska.ac.id

Article Info

Keyword:

PID control
Arduino Uno
Pressure sensor

Copyright © 2025 -SNTE
All rights reserved

ABSTRACT

Abstrak—Pengendalian tekanan pada sistem perpipaan fluida merupakan aspek krusial dalam menjamin keselamatan dan efisiensi operasi, terutama pada infrastruktur pipa minyak yang telah berumur. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem kontrol tekanan berbasis *Proportional-Integral-Derivative* (PID) yang terintegrasi dengan *pressure sensor* dan *servo valve*. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dan diuji dalam kondisi simulasi mendekati operasi nyata. Proses tuning parameter PID dilakukan secara eksperimental menggunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan performa kendali yang optimal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi parameter PID terbaik adalah $K_p = 1$, $K_i = 0,045$, dan $K_d = 0,021$. Sistem ini mampu mengurangi *overshoot* dari 13,6% menjadi 2,4%, serta menurunkan nilai *error steady-state* hingga 1,7%. Selain itu, waktu tunda dan waktu naik yang diperoleh masing-masing sebesar 10,2 detik dan 19,3 detik. Temuan ini menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tekanan dengan respons yang cepat dan akurat, serta berpotensi diterapkan sebagai solusi efisien untuk sistem perpipaan minyak yang membutuhkan peningkatan keandalan dan keselamatan operasional.

Corresponding Author:

Benriwati Maharmi,
Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknologi Pekanbaru, Pekanbaru,
Jl. Dirgantara No. 4, Arengka Raya, Pekanbaru.
Email: benriwati@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Dalam industri perminyakan, jaringan perpipaan memegang peranan krusial sebagai jalur utama dalam proses pengangkutan minyak dari lokasi produksi menuju fasilitas pengolahan atau distribusi. Dibandingkan dengan moda transportasi lainnya, pipa menawarkan sejumlah keunggulan seperti kapasitas angkut yang besar, efisiensi biaya operasional, dan dampak lingkungan yang relatif lebih kecil [1], [2]. Meski demikian, kinerja sistem ini sangat bergantung pada pengelolaan tekanan yang tepat selama proses alirannya [3], [4]. Ketidakteraturan tekanan, apabila tidak segera ditangani, bisa berujung pada kerusakan serius, termasuk potensi kebakaran, kebocoran, hingga ledakan yang dapat mengganggu operasi dan membahayakan keselamatan [5], [6]. Tekanan tinggi yang muncul akibat penyumbatan katup atau kegagalan struktural lainnya berpotensi memicu kerusakan mekanis pada sistem perpipaan [7][8]. Selain itu, tekanan yang tidak dikontrol dengan baik juga dapat menyebabkan terbentuknya endapan lilin di dalam pipa, yang akan menghambat aliran fluida dan menurunkan efisiensi sistem secara keseluruhan [9]. Oleh karena itu,

pemantauan tekanan fluida secara kontinu menjadi hal yang sangat penting untuk menjamin proses transportasi minyak berjalan dengan aman dan optimal.

Inspeksi berkala terhadap kondisi pipa juga merupakan langkah penting dalam memastikan keandalan sistem perpipaan. Standar seperti API 570 memberikan panduan teknis dalam melakukan evaluasi tekanan, inspeksi visual, serta prosedur perbaikan dan modifikasi agar sistem tetap beroperasi dalam kondisi aman [10], [11]. Saat ini, berbagai metode inspeksi telah tersedia mulai dari penggunaan *pipeline inspection gauge* (PIG), teknologi berbasis magnetik, hingga pendekatan berbasis risiko yang mempertimbangkan faktor-faktor seperti ketebalan dinding pipa, korosi, serta kondisi lingkungan [10], [12]–[17]. Beberapa area, seperti bagian siku pipa, diketahui lebih rentan mengalami tegangan tinggi dan kerusakan [18], [19]. Sementara itu, fluktuasi tekanan yang terjadi dalam waktu singkat tetapi tidak terdeteksi bisa menyebabkan kerusakan mendadak dan meningkatkan beban biaya perawatan [20]–[23].

Seiring berkembangnya teknologi, penggunaan sistem kontrol otomatis untuk mengelola tekanan dalam pipa menjadi solusi yang semakin banyak diterapkan, khususnya pada jaringan pipa yang sudah berumur. Sistem seperti *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), PLC (*Programmable Logic Controller*), dan HMI (*Human-Machine Interface*) memungkinkan pemantauan dan pengendalian tekanan secara *real-time*, sehingga meningkatkan efisiensi dan keselamatan operasional [24]–[29]. Salah satu pendekatan kontrol yang paling umum digunakan dalam sistem fluida adalah pengendali PID (*Proportional-Integral-Derivative*), yang dirancang untuk menjaga tekanan fluida tetap stabil pada nilai *setting* yang telah ditentukan. Pengendali ini berperan penting dalam mencegah terjadinya lonjakan tekanan dan menjaga kestabilan sistem secara menyeluruh [30]–[36].

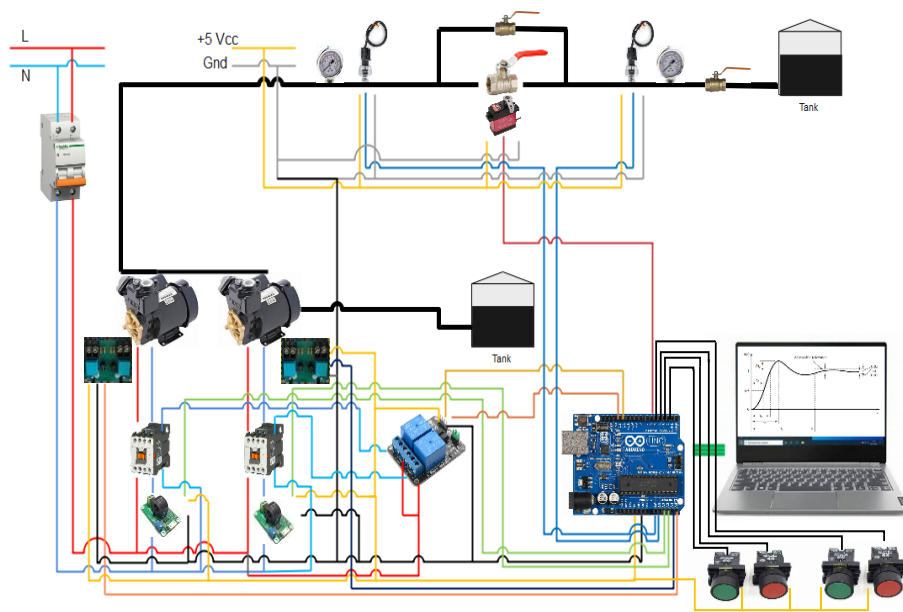
Umumnya, sistem pengendali PID bekerja dengan mengintegrasikan *pressure sensor*, pompa, dan *servo valve* sebagai aktuator utama. Belakangan ini, beberapa pengembangan juga memperkenalkan *quasi-servo valve* sebagai alternatif yang lebih kecil dan ringan serta hemat biaya, namun tetap menjaga tingkat akurasi dalam pengaturan tekanan [37], [38]. Disamping itu, penerapan teknologi sensor berbasis serat optik memungkinkan pendeteksian tekanan dan potensi kebocoran secara *real-time*, yang dapat meningkatkan kecepatan respons terhadap perubahan kondisi [39], [40]. Peran HMI juga tidak kalah penting karena memfasilitasi operator dalam melakukan pemantauan dan penyesuaian sistem secara lebih efisien [41].

Meskipun pengendali PID telah lama digunakan dalam sistem perpipaan, sebagian besar penerapannya belum sepenuhnya merepresentasikan dinamika operasi di lapangan maupun mengintegrasikan sensor dan aktuator secara *real-time* untuk menjaga kestabilan tekanan hulu pada pipa minyak berusia lanjut [24]–[28], [42], [43]. Menanggapi keterbatasan tersebut, penelitian ini merancang model simulasi pengendalian tekanan berbasis PID yang terhubung langsung dengan *pressure sensor* dan *servo valve*, dirancang adaptif terhadap perubahan cepat pada tekanan, sekaligus efisien dari sisi biaya dan mudah diimplementasikan pada sistem yang sudah ada [42], [43]. Pendekatan ini tidak hanya relevan bagi pemeliharaan jaringan pipa berumur panjang, tetapi juga memberikan kontribusi pada pengembangan *state-of-the-art* metode kontrol fluida industri yang presisi, responsif, dan berdaya guna [42], [43].

II. METHODOLOGI

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental untuk merancang sekaligus menguji kinerja sistem pengendalian tekanan pada jaringan perpipaan fluida [1]–[3]. Rangkaian utama sistem terdiri atas pompa sebagai sumber tekanan, *pressure sensor* untuk akuisisi data, *servo valve* sebagai aktuator, dan pipa sebagai media alir fluida. Parameter rancangan disesuaikan dengan sifat fisik fluida minyak, meliputi viskositas, massa jenis, dan batas tekanan operasi yang aman [4], [5].

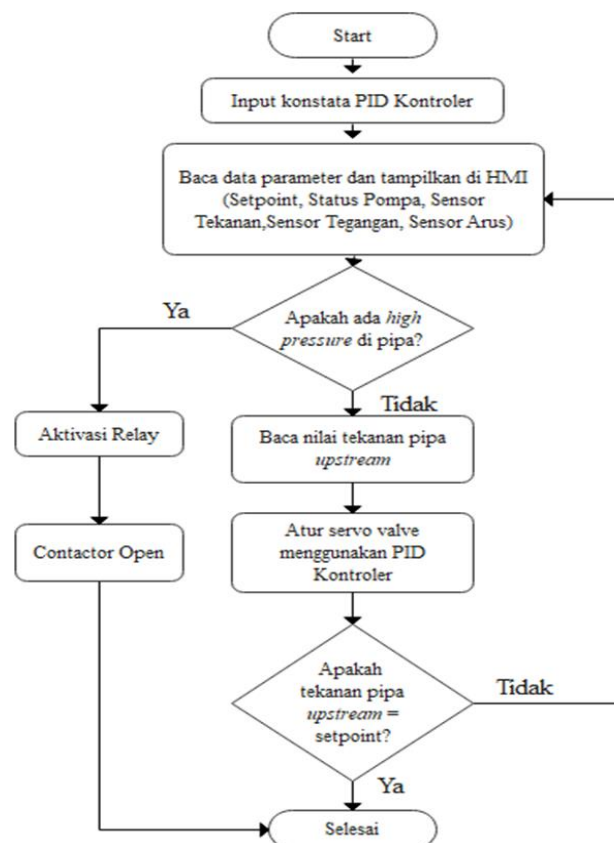
Sumber daya sistem dirancang menggunakan dua kategori tegangan yang memiliki fungsi berbeda, yakni AC 220 Volt dan DC 5–10 Volt [6], [7]. Tegangan AC digunakan untuk mengoperasikan komponen berdaya besar seperti pompa, kontaktor, adaptor, sensor tegangan, dan sumber daya eksternal, sedangkan tegangan DC 5 Volt dialokasikan untuk perangkat elektronik berdaya rendah, seperti mikrokontroler Arduino Uno [44][45], modul relay, *pressure sensor* 1,2 MPa, sensor arus RDD AFE 005, serta sensor tegangan ZMPT101B [8], [9]. Adapun tegangan DC 10 Volt digunakan secara khusus untuk menggerakkan motor servo tipe DS3225 SG [10]. Pada gambar. 1 memperlihatkan desain model sistem kontrol tekanan pada jaringan perpipaan fluida.



Gambar. 1 Desain model sistem kontrol tekanan pada jaringan perpipaan fluida

Untuk memastikan suplai daya stabil, jalur DC dibagi menjadi dua, melalui adaptor dan *power supply* eksternal untuk meningkatkan efisiensi distribusi serta menghindari *voltage drop* yang dapat mengganggu performa sistem [11]. Distribusi listrik AC diatur untuk mengendalikan kedua pompa melalui rangkaian kontaktor yang menerima perintah dari Arduino Uno melalui sinyal modul relay, sehingga pompa hanya beroperasi ketika diperlukan [12], [13]. Selain itu, sistem dilengkapi sensor arus dan tegangan untuk memantau kondisi kelistrikan pompa secara *real-time*, sehingga memudahkan deteksi dini terhadap anomali beban maupun tegangan [14][15].

Sistem perpipaan pada penelitian ini menggunakan pipa PVC tipe AW berdiameter 1 inci yang memiliki kapasitas tekanan hingga 145 psi, namun untuk menjaga keamanan operasi, batas tekanan kerja ditetapkan tidak melebihi 35 psi [1][2]. Komponen utama sistem terdiri atas pompa, *pressure sensor*, manometer, serta servo valve yang merupakan integrasi antara motor servo dan *ball valve*. Dua unit *pressure sensor* ditempatkan pada sisi hulu dan hilir katup dengan tujuan memperoleh gambaran kondisi tekanan di kedua titik secara terus-menerus. Penempatan ini memungkinkan deteksi perbedaan tekanan secara langsung, sehingga mempermudah identifikasi perubahan aliran maupun potensi anomali pada sistem [3]. Data tekanan dari sisi hulu berfungsi sebagai masukan utama bagi pengendali PID, yang selanjutnya mengatur posisi bukaan *servo valve* untuk mempertahankan tekanan sesuai nilai *setting* yang ditentukan pengguna [4].



Gambar 2. Flowchart Pemrograman Sistem Kontrol

Berdasarkan diagram alir pemrograman pada Gambar 2, proses dimulai dengan pengaturan nilai konstanta parameter kontroler PID. Selanjutnya, sistem membaca berbagai parameter operasional, termasuk setpoint, status pompa, serta data dari *pressure sensor* (hulu dan hilir), sensor tegangan, dan sensor arus. Informasi ini kemudian ditampilkan pada layar. Sistem mampu secara otomatis mendeteksi tekanan tinggi melalui *pressure sensor* dan apabila kondisi ini terjadi, sinyal akan dikirim untuk mematikan pompa melalui mekanisme relay dan kontaktor. Proses berlanjut dengan pembacaan tekanan aktual di sisi hulu yang dibandingkan dengan setpoint. Dengan bantuan kontroler PID, sistem mengatur bukaan servo valve secara otomatis agar tekanan aktual mendekati nilai *setpoint*. Penyesuaian dilakukan secara berkelanjutan sehingga sistem dapat merespons perubahan setpoint maupun gangguan dengan cepat, sehingga kestabilan tekanan terjaga. Akurasi pengendalian sangat bergantung pada ketepatan penetapan konstanta PID dalam pengaturan sistem.

III. HASIL DAN DISKUSI

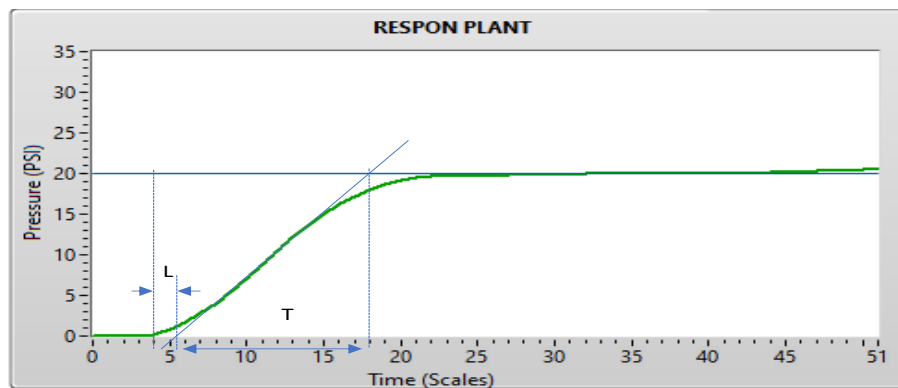
Pengujian terhadap karakteristik dinamik *plant* dilakukan untuk memperoleh data respon sistem terhadap perubahan masukan. Informasi mengenai respon ini sangat penting guna merancang sistem pengendali yang sesuai dengan perilaku *plant* yang diuji. Dalam penelitian ini, pengujian dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu secara *open loop* (kendali terbuka) dan *close loop* (kendali tertutup).

A. Pengujian Open Loop

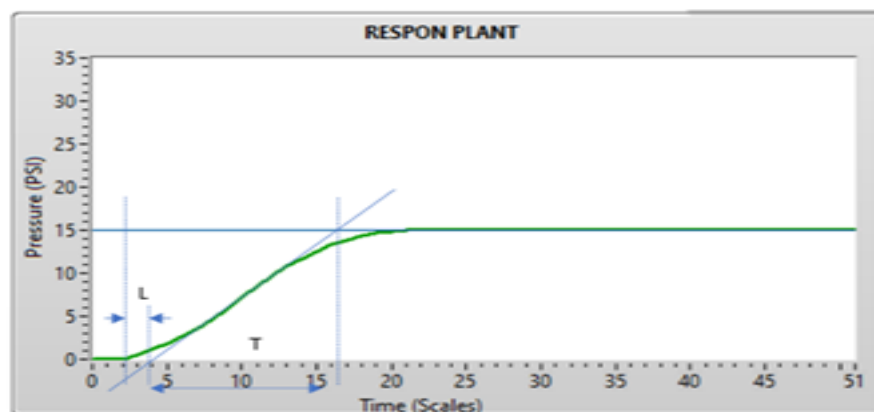
Pada pengujian *open loop*, posisi *servo valve* di *setting* pada nilai tertentu guna menghasilkan tekanan pada pipa distribusi ketika pompa diaktifkan. Data respon sistem diperoleh dari perubahan tekanan yang terjadi sejak pompa mulai bekerja hingga tekanan mencapai keadaan tunak. Proses ini dilakukan sepenuhnya secara manual, tanpa penerapan parameter pengendalian, sehingga memenuhi karakteristik sistem kendali terbuka.

Rentang tekanan operasi pipa distribusi dalam pengujian ini berada antara 0 hingga 35 Psi. Berdasarkan hal tersebut, pengamatan dilakukan pada tiga titik tekanan, yaitu 10 Psi, 15 Psi, dan 20 Psi. Penentuan nilai *duty cycle* untuk masing-masing tekanan dilakukan berdasarkan hasil uji pendahuluan terhadap *servo valve*, dengan nilai sekitar 80% untuk 10 Psi, 84% untuk 15 Psi, dan 87% untuk 20 Psi.

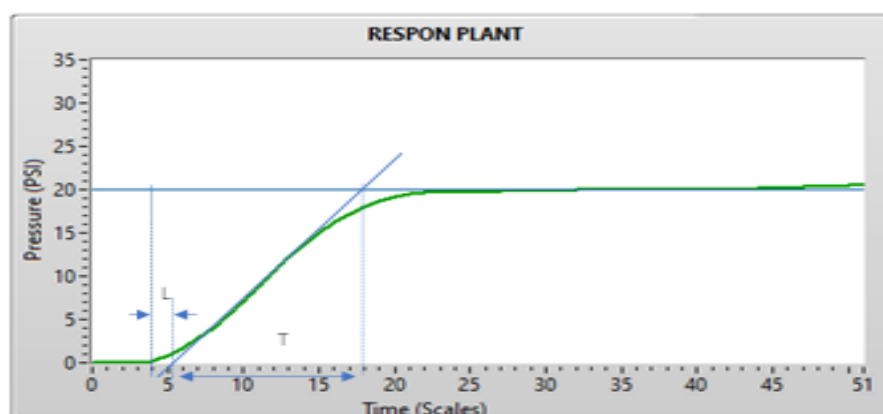
Untuk menggambarkan karakteristik respon *plant*, digunakan kurva dengan sumbu horizontal (x) merepresentasikan waktu, di mana setiap lima satuan mewakili satu detik, dan sumbu vertikal (y) menunjukkan nilai tekanan dalam satuan Psi. Gambar 3, 4 dan 5 berikut menyajikan hasil pengukuran respon sistem untuk masing-masing nilai setpoint yang telah ditentukan.



Gambar 3. Respon *Plant Open Loop* dengan Setpoint 10 Psi (*duty cycle* 80%)



Gambar 4. Respon *Plant Open Loop* dengan Setpoint 15 Psi (*duty cycle* 85%)



Gambar 5. Respon *Plant Open Loop* dengan Setpoint 20 Psi (*duty cycle* 87%)

Berdasarkan hasil pengujian tersebut diperoleh parameter waktu *delay time* (L) dan *time constant* (T) untuk masing-masing *setpoint* seperti ditunjukkan pada tabel 1.

TABEL I
HASIL PENGUJIAN RESPON PLANT OPEN LOOP

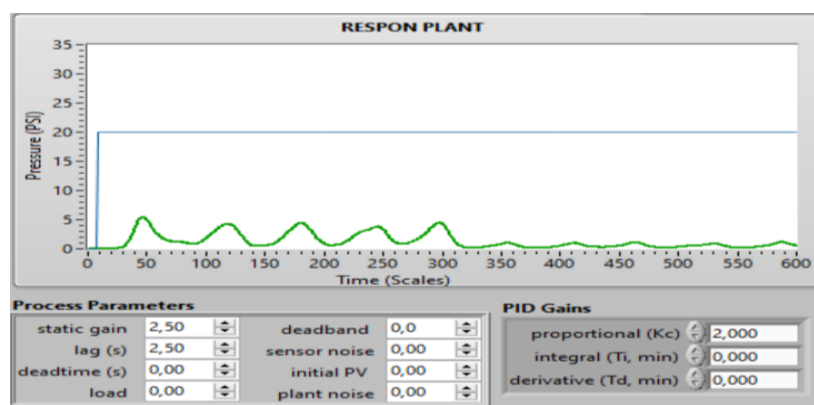
Setpoint (psi)	Duty Cycle (%)	T (s)	L (s)
10	80	2,6	0,2
15	84	2,5	0,38
20	87	2,5	0,3

B. Tuning Menggunakan Metode PID

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap dengan menggunakan beberapa *setpoint* untuk menentukan konstanta kontroler PID yang sesuai. Penilaian terhadap kombinasi konstanta PID dilakukan dengan mengamati berbagai parameter seperti waktu tunda, waktu naik, *overshoot*, osilasi, dan kesalahan saat kondisi stabil pada setiap percobaan. Untuk mendapatkan nilai konstanta kontroler PID yang tepat, dengan tahapan sebagai berikut:

B.1. Tuning Kontroler Proporsional (Kp)

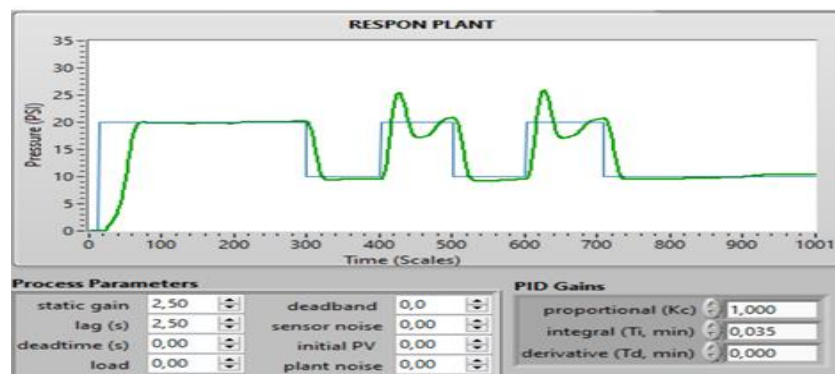
Pengujian sistem dilakukan dengan menerapkan beberapa nilai *setpoint* secara bertahap guna memperoleh parameter kontroler PID yang optimal. Penentuan kombinasi terbaik dari konstanta PID dilakukan dengan mengevaluasi beberapa karakteristik kinerja sistem, seperti *delay time*, *rise time*, *overshoot*, osilasi, serta *steady-state error* pada setiap pengujian. Proses penyetelan konstanta PID ini menggunakan metode *trial and error*. Pada tahap pertama, dilakukan penyetelan terhadap konstanta proporsional (Kp). Nilai Kp dinaikkan secara bertahap hingga sistem menunjukkan respons osilasi terhadap *setpoint* sebesar 20 Psi. Nilai Kp yang menghasilkan osilasi berlebihan dieliminasi, sedangkan nilai Kp yang menyebabkan osilasi berkurang dijadikan acuan. Berdasarkan hasil pengamatan (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6), osilasi sistem mulai mereda ketika Kp berada pada nilai 2. Oleh karena itu, nilai Kp referensi ditetapkan sebesar 2, dan nilai akhir Kp yang digunakan dalam proses tuning adalah setengah dari nilai tersebut, yaitu 1.



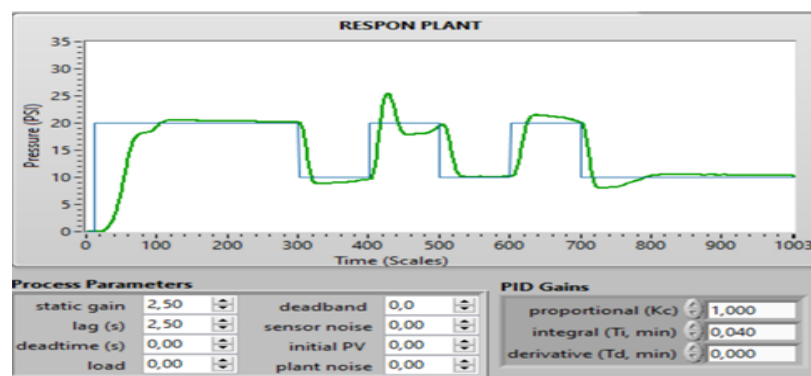
Gambar 6. Respon *Plant* dengan nilai Kp referensi 2

B.2. Tuning Kontroler Integral (Ki)

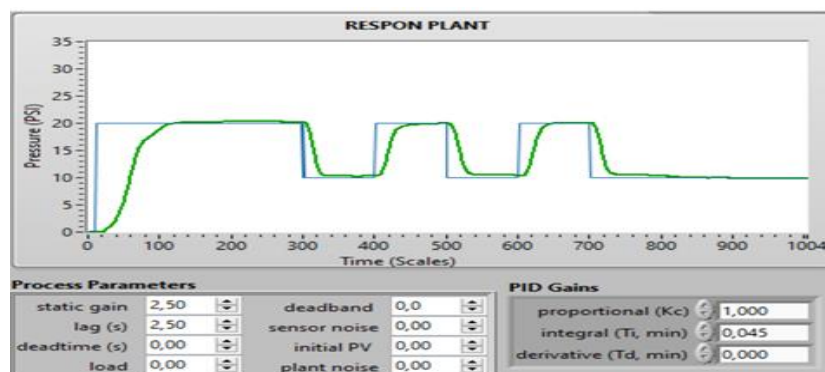
Setelah nilai konstanta Kp untuk kontroler proporsional diperoleh, maka *tuning* manual dilakukan kembali untuk mendapatkan nilai kontroler integral. Konstanta Ki digunakan untuk mengurangi *rise time* dan menghilangkan nilai *error steady state*. *Setpoint* yang digunakan untuk menguji konstanta Ki adalah 20 Psi dan 10 Psi. Hasil pengujian beberapa konstanta Ki mampu memberikan perubahan pada nilai *rise time* dan *error steady state* seperti yang terlihat gambar 7 - 11 sebagai berikut.



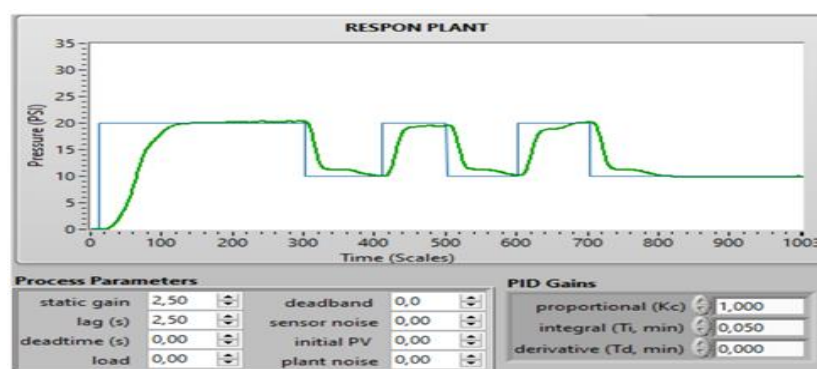
Gambar 7. Respon Plant dengan Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.035$



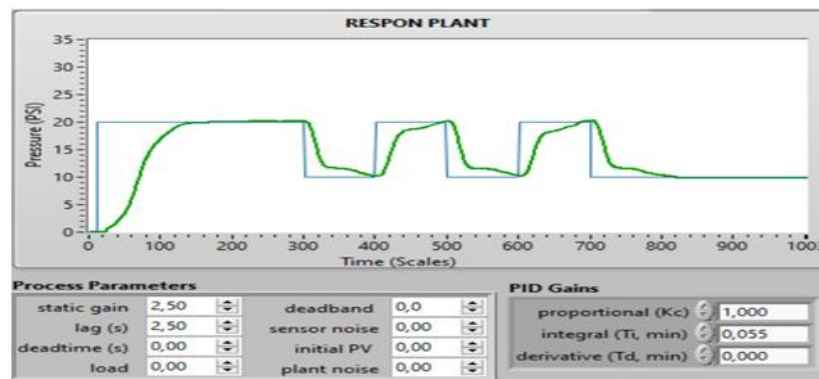
Gambar 8. Respon Plant dengan Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.040$



Gambar 9. Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.045$



Gambar 10. Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.050$



Gambar 11. Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.055$

Gambar 5-11 memperlihatkan perubahan respons plant ketika konstanta kontroler integral diubah. Pengujian dilakukan dengan setpoint awal sebesar 20 Psi yang kemudian diturunkan menjadi 10 Psi. Stabilitas terbaik diperoleh pada konstanta integral K_i sebesar 0,045. Hasil pengujian lengkap untuk konstanta K_p dan K_i dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini:

TABEL 2
HASIL PENGUJIAN KONSTANTA K_p DAN K_i

K_p	K_i	K_d	Delay Time t_d (s)	Rise Time t_r (s)	Maximum Peak (%)	Error (%)
1	0,035	0	7,8	11,8	30	4%
1	0,040	0	8,7	18,8	28,5	2%
1	0,045	0	9,8	21	3	1,7%
1	0,050	0	11,3	22,2	5	1,3%
1	0,055	0	11,8	23,9	10	1,7%

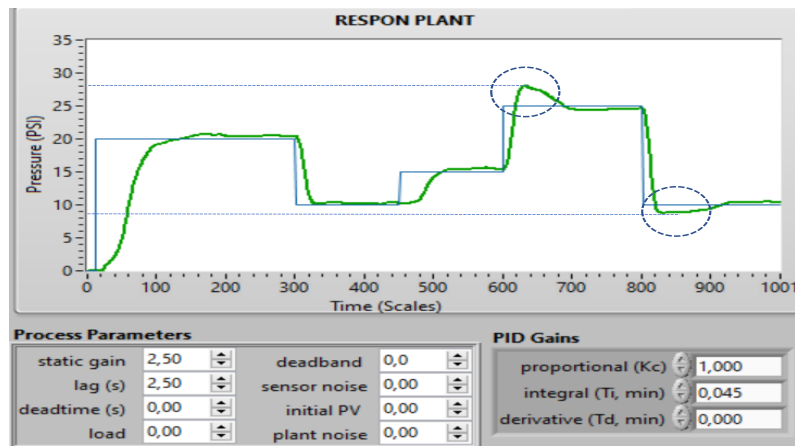
Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 2, konstanta integral kontroler sebesar $K_i = 0,045$ menunjukkan kinerja terbaik ketika dipadukan dengan konstanta proporsional $K_p = 1$. Kombinasi ini berhasil menjaga tekanan agar tetap mendekati setpoint dengan nilai Maximum Peak hanya sebesar 3%. Selain itu, *steady-state error* mengalami penurunan signifikan, dari sekitar 95% menjadi hanya 1,7%. Parameter lain seperti waktu tunda (*delay time*) dan waktu naik (*rise time*) juga menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan konstanta lainnya, yaitu masing-masing sebesar 9,8 detik dan 21 detik. Dengan mempertimbangkan kondisi tersebut, konstanta K_i sebesar 0,045 dipilih sebagai nilai integral kontroler yang tepat untuk sistem pengendalian tekanan pada pipa penyalur fluida.

B.3. Tuning Kontroler Derivative (K_d)

Setelah nilai konstanta K_p dan K_i diperoleh, tahap selanjutnya adalah melakukan *tuning* pada konstanta kontroler derivatif (K_d). Fungsi utama dari K_d adalah untuk mengurangi *overshoot*, *undershoot*, serta waktu settling pada sistem. Berdasarkan pengujian sebelumnya, kombinasi konstanta $K_p = 1$ dan $K_i = 0,045$ mampu menghasilkan *overshoot* yang relatif kecil pada *setpoint* 20 Psi dan 10 Psi. Namun demikian, konstanta derivatif masih diperlukan guna mencegah *overshoot* pada variasi *setpoint* lainnya. Untuk menentukan nilai K_d yang paling efektif, pengujian dilakukan dengan variasi *setpoint* secara berurutan pada 20 Psi, 10 Psi, 15 Psi, dan 25 Psi. Nilai K_d yang berhasil mengurangi *overshoot* secara signifikan akan dipilih sebagai konstanta kontroler derivatif.

Hasil pengujian dengan menggunakan $K_p = 1$ dan $K_i = 0,045$ pada variasi *setpoint* tersebut masih menunjukkan adanya *overshoot* dan *undershoot*, seperti yang terlihat pada Gambar12. Pada *setpoint* 25 Psi, tekanan mencapai puncak 28,4 Psi atau terjadi *overshoot* sebesar 13,6%. Sementara itu, saat *setpoint* diturunkan menjadi 10 Psi, tekanan menurun hingga 8,87 Psi atau mengalami *undershoot* sebesar -11,3%.

Meskipun kombinasi K_p dan K_i sebelumnya mampu menghasilkan respons dengan *overshoot* dan *undershoot* yang kecil pada *setpoint* tertentu, pengujian dengan variasi *setpoint* menunjukkan peningkatan nilai *overshoot* dan *undershoot* yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian menggunakan K_p dan K_i saja belum cukup stabil, sehingga penambahan kontroler derivatif sangat diperlukan untuk mencegah fenomena tersebut. Diharapkan, penambahan konstanta K_d dapat menghilangkan *overshoot* dan *undershoot* serta menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan.



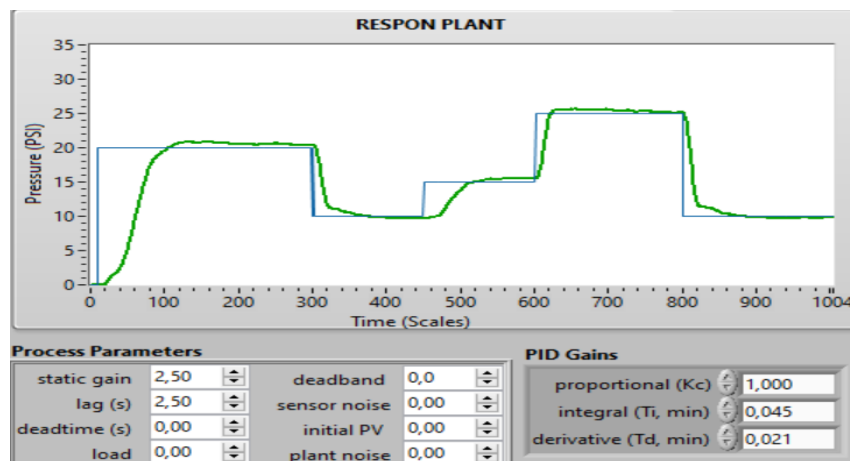
Gambar 12. Respon Plant Metode Trial and Error dengan Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.045$ dengan Variasi Setpoint

Berikut ini adalah tabel hasil pengujian kedua kombinasi kontroler *proportional* dan kontroler *integral* dengan penambahan konstanta kontroler *derivative*.

TABEL 3
HASIL PENGUJIAN KONSTANTA K_p , K_i DAN K_d

K_p	K_i	K_d	Delay Time t_d (s)	Rise Time t_r (s)	Maximum Peak (%)	Error (%)
1	0,045	0,015	10	21	4,4	3,0%
1	0,045	0,020	10,2	19,3	4	2%
1	0,045	0,021	10,2	19,3	2,4	1,7%
1	0,045	0,025	10,6	17,9	5,2	1,6%

Data pada tabel 3 menunjukkan bahwa konstanta kontroler yang paling stabil setelah diuji dengan variasi *setpoint* adalah pada saat $K_p=1$, $K_i=0.045$ dan $K_d=0.021$. Kombinasi konstanta PID kontroler tersebut mampu mengurangi *overshoot* pada setiap nilai *setpoint*. Berdasarkan hasil pengujian, *overshoot* mampu diredam, dari sebelumnya 13,6% menjadi 2,4 %. Parameter *delay time* dan *rise time* memiliki angka yang kecil yaitu masing-masing 10,2 detik dan 19,3 detik, dimana jika dibandingkan dengan pengujian sebelumnya, penambahan konstanta kontroler *derivative* juga mampu menurunkan nilai *rise time* dari 21 detik menjadi 19,3 detik atau selisih sebesar 1,7 detik. Respon plant hasil pengujian konstanta kontroler PID dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Respon Plant Metode Trial and Error dengan Konstanta $K_p=1$, $K_i=0.045$ dan $K_d=0.021$

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sistem kontrol tekanan fluida berbasis PID yang dirancang secara terintegrasi dengan *pressure sensor* dan *servo valve* untuk menjaga kestabilan tekanan dalam jaringan perpipaan. Hasil tuning menggunakan metode *trial and error* menghasilkan parameter PID optimal, yaitu $K_p = 1$, $K_i = 0,045$, dan $K_d = 0,021$. Sistem ini terbukti mampu mengurangi overshoot dari 13,6% menjadi 2,4%, serta menurunkan steady-state error hingga 1,7%. Selain itu, waktu tunda (*delay time*) tercatat sebesar 10,2 detik dan waktu naik (*rise time*) sebesar 19,3 detik. Kinerja tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perubahan *setpoint* secara cepat dan stabil. Dengan desain yang kompak, responsif, dan efisien, sistem ini sangat potensial untuk diimplementasikan pada jaringan pipa minyak yang telah berumur guna meningkatkan keandalan operasional dan keselamatan sistem.

REFERENSI

- [1] Q. Zhuang, D. Liu, and Z. Chen, "Prediction on Failure Pressure of Pipeline Containing Corrosion Defects Based on ISSA-BPNN Model," *Energy Eng.*, vol. 121, no. 3, pp. 821–834, 2024.
- [2] M. A. Adegboye, A. Karnik, and W.-K. Fung, "Numerical study of pipeline leak detection for gas-liquid stratified flow," *J. Nat. gas Sci. Eng.*, vol. 94, p. 104054, 2021.
- [3] M. R. Davidson, Q. D. Nguyen, C. Chang, and H. P. Rønningsen, "A model for restart of a pipeline with compressible gelled waxy crude oil," *J. Nonnewton. Fluid Mech.*, vol. 123, no. 2–3, pp. 269–280, 2004.
- [4] P. D. Thuc, H. V Bich, T. C. Son, L. D. Hoe, and V. P. Vygovskoy, "The problem in transportation of high waxy crude oils through submarine pipelines at JV Vietsovpetro oil fields, offshore Vietnam," *J. Can. Pet. Technol.*, vol. 42, no. 06, 2003.
- [5] A. Ahmad Azmy, S. Karuppanan, and A. A. Wahab, "Failure pressure estimation of corroded pipeline with different depths of interacting defects subjected to internal pressure," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 393, pp. 1005–1010, 2013.
- [6] B. Hosseiny, J. Amini, H. Aghababaei, and G. Ferraioli, "Enabling High-Resolution Micro-Vibration Detection Using Ground-Based Synthetic Aperture Radar: A Case Study for Pipeline Monitoring," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 16, p. 3981, 2023.
- [7] A. Aswin and A. Hasnan, "Stress analysis evaluation and pipe support type on high-pressure and temperature steam pipe," *Int. J. Mech. Eng. Technol. Appl.*, vol. 4, no. 1, pp. 31–38, 2023.
- [8] R. E. Melchers, "Post-perforation external corrosion of cast iron pressurised water mains," *Corros. Eng. Sci. Technol.*, vol. 52, no. 7, pp. 541–546, 2017.
- [9] C. J. Li, X. Wu, W. L. Jia, and K. X. Liao, "Water Hammer Characteristics of Glass Reinforced Plastic Oil Transportation Pipeline," *Adv. Mater. Res.*, vol. 204, pp. 127–130, 2011.
- [10] H. Iqbal, S. Tesfamariam, H. Haider, and R. Sadiq, "Inspection and maintenance of oil & gas pipelines:

- a review of policies,” *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 13, no. 6, pp. 794–815, 2017.
- [11] J. Chen, M. F. Li, J. H. Wang, and X. L. Wang, “A study on the safety factor for corrosion assessment of oil and gas pipeline through in-line inspection,” *Key Eng. Mater.*, vol. 795, pp. 233–238, 2019.
- [12] H. Q. Pham *et al.*, “Highly sensitive planar Hall magnetoresistive sensor for magnetic flux leakage pipeline inspection,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 6, pp. 1–5, 2018.
- [13] W. J. S. Gomes and A. T. Beck, “Optimal inspection and design of onshore pipelines under external corrosion process,” *Struct. Saf.*, vol. 47, pp. 48–58, 2014.
- [14] H. P. Mobin, “Risk Level Assessment of Pipelines using a Combination of Analytical Network Process and Risk Based Inspection Methods,” 2018.
- [15] H. Hameed, Y. Bai, and L. Ali, “A risk-based inspection planning methodology for integrity management of subsea oil and gas pipelines,” *Ships offshore Struct.*, vol. 16, no. 7, pp. 687–699, 2021.
- [16] A. P. Putra, J. W. Soedarsono, A. I. Pangesty, A. Aprizal, and R. Ramadhan, “The risk identification on 3" GL BO3-52520 process pipelines using a risk-based inspection method,” *Teknomekanik*, vol. 5, no. 1, pp. 28–34, 2022.
- [17] M. I. Y. Asfar, J. W. Soedarsono, A. Wijaya, T. Aditiyawarman, D. Soelistiyono, and R. Ramadhan, “Quantitative Risk-Based Inspection on Gas Riser Pipelines at Offshore Facilities,” *Teknomekanik*, vol. 4, no. 2, pp. 78–84, 2021.
- [18] X. Y. Lu, Y. Zhou, S. Y. Chen, X. G. Li, and H. L. Zhu, “The establishment of ninety degree gas elbow pipes internal pressure distribution model,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 670, pp. 696–699, 2014.
- [19] X. Y. Lu, X. L. Lu, L. L. Huang, J. M. Liu, Y. Y. Liu, and Y. M. Xu, “Simulation of Influencing Parameters of the Inner Surface Pressure of Elbow Pipe and the Establishment of Pressure Formula,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 252, pp. 64–68, 2013.
- [20] P. J. Malppan and K. S. Sumam, “Pipe burst risk assessment using transient analysis in surge 2000,” *Aquat. Procedia*, vol. 4, pp. 747–754, 2015.
- [21] K. Zhai *et al.*, “Mechanical responses of bell-and-spigot joints in buried prestressed concrete cylinder pipe under coupled service and surcharge loads,” *Struct. Concr.*, vol. 22, no. 2, pp. 827–844, 2021.
- [22] X. Y. Lu, X. L. Lu, L. L. Huang, Y. M. Xu, and Y. Y. Liu, “The Analytical Model and Flow Parameter Influencing the Internal Pressure Distribution of Elbow Pipe,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 366, pp. 192–196, 2012.
- [23] W. Li, S. Lu, Y. Liu, R. Wang, Q. Huang, and J. Yan, “CFD simulation of the unsteady flow of a single coal log in a pipe,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 93, no. 11, pp. 2084–2093, 2015.
- [24] L. Miao, M. Yuan, and G. Li, “Design private cloud of oil and gas SCADA system,” *EAI Endorsed Trans. Scalable Inf. Syst.*, vol. 1, no. 3, 2014.
- [25] E. B. Priyanka, C. Maheswari, and S. Thangavel, “Remote monitoring and control of LQR-PI controller parameters for an oil pipeline transport system,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I J. Syst. Control Eng.*, vol. 233, no. 6, pp. 597–608, 2019.
- [26] C. Wang, M. Liu, A. Xu, and J. Zhang, “The application of PLC control system in oil and gas pipeline transportation,” *Mol. Cancer Ther.*, vol. 8, no. 12, p. 133, 2017.
- [27] E. B. Priyanka, C. Maheswari, and B. Meenakshipriya, “Parameter monitoring and control during petrol transportation using PLC based PID controller,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 14, no. 2, pp. 125–131, 2016.
- [28] V. Chmelko, M. Garan, M. Šulko, and M. Gašparík, “Health and structural integrity of monitoring systems: The case study of pressurized pipelines,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 17, p. 6023, 2020.
- [29] B. Maharmi, F. Ferdian, and F. Palaha, “Sistem akuisisi data solar cell berbasis mikrokontroler dan labview,” *SainETIn J. Sains, Energi, Teknol. Dan Ind.*, vol. 4, no. 1, pp. 19–24, 2019.
- [30] T. Hagiwara, K. Yamada, S. Aoyama, and A. C. Hoang, “The parameterization of all plants stabilized by a Proportional-Derivative controller,” in *The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011*, IEEE, 2011, pp. 585–588.
- [31] A. Aldemir and M. S. Anwer, “Determination of optimal PID control parameters by response surface methodology,” *Int. Adv. Res. Eng. J.*, vol. 4, no. 2, pp. 142–153, 2020.
- [32] A. Irawan and M. I. P. Azahar, “Cascade control strategy on servo pneumatic system with fuzzy self-adaptive system,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 31, no. 6, pp. 1412–1425, 2020.

-
- [33] E. Kurniawan, "Analysis and Simulation of Proportional Derivative and Proportional Integral Derivative Control Systems Using Xcos Scilab," *J. Technomaterial Phys.*, vol. 3, no. 1, pp. 36–44, 2021.
- [34] T. Hagiwara, K. Yamada, A. C. Hoang, and S. Aoyama, "The parameterization of all plants stabilized by a PID controller," *Key Eng. Mater.*, vol. 534, pp. 173–181, 2013.
- [35] M. A. Fellani and A. M. Gabaj, "PID controller design for two tanks liquid level control system using Matlab," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 5, no. 3, p. 436, 2015.
- [36] H. Maghfiroh, M. Nizam, and S. Praptodiyono, "PID optimal control to reduce energy consumption in DC-drive system," *Int J Pow Elec Dri Syst ISSN*, vol. 2088, no. 8694, p. 2165, 2020.
- [37] Y. Moriwake, S. Dohta, T. Akagi, and S. Shimooka, "Application of Pressure Control Type Quasi-Servo Valve to Force Control System," *J. Autom. Control Eng. Vol*, vol. 4, no. 3, 2016.
- [38] Y. Moriwake, T. Akagi, S. Dohta, and F. Zhao, "Development of low-cost pressure control type quasi-servo valve using embedded controller," *Procedia Eng.*, vol. 41, pp. 493–500, 2012.
- [39] K. Lim, L. Wong, W. K. Chiu, and J. Kodikara, "Distributed fiber optic sensors for monitoring pressure and stiffness changes in out-of-round pipes," *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 23, no. 2, pp. 303–314, 2016.
- [40] L. Wong *et al.*, "Leak detection in water pipes using submersible optical optic-based pressure sensor," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4192, 2018.
- [41] P. Y. Aisyah, A. I. Hija, and E. P. Hadi, "Pressure and Flow Control System to Prevent Drinking Water Pipe Leaks," *IPTEK J. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 116–120, 2023.
- [42] T. Jung and S. Yang, "Highly stable liquid metal-based pressure sensor integrated with a microfluidic channel," *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 11823–11835, 2015.
- [43] M.-C. Liu *et al.*, "Electrofluidic pressure sensor embedded microfluidic device: a study of endothelial cells under hydrostatic pressure and shear stress combinations," *Lab Chip*, vol. 13, no. 9, pp. 1743–1753, 2013.
- [44] B. Maharmi, R. E. Hartandy, A. Karnaidi, N. Nurhasnah, and S. Rini, "Sistem Deteksi Sinyal Handphone Di Dalam Kabin Pesawat Berbasis Mikrokontroler Atmega328," *SAINSTEK*, vol. 10, no. 2, pp. 117–123, 2022.
- [45] B. Maharmi, B. Widyastomo, and F. Palaha, "Water Flow Measurement-Based Data Acquisition Using Arduino Microcontroller and PLX-DAQ Software," *J. Ilm. Tek. Elektro Komput. dan Inform.*, vol. 8, no. 1, p. 107, 2022, doi: 10.26555/jiteki.v8i1.23637.