

Penalaan Pengontrol PID untuk Kecepatan Kecepatan Motor DC pada Robot Pengangkat Anak Timbangan

PID Controller Tuning of DC Motor Speed for Weighing-Scale Lifting Robot Arm

¹Irawati Dewi Syahwir, ¹Cenneth Paolo Anderson Bai Adoe, ²Era Purwanto, ³Prasetyo Wibowo Yunanto,
⁴Muhammad Wahyudi, ¹Nandang Gunawan Tunggal Waras

¹Akademi Metrologi dan Instrumentasi, 45362, Sumedang, Indonesia

²Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, 60111, Surabaya, Indonesia

³Universitas Negeri Jakarta, 12980, Jakarta Selatan, Indonesia

⁴Universitas Gadjah Mada, 55281. Yogyakarta, Indonesia

*) *corresponding email: irawatidewisyahwir@gmail.com*

Abstrak

Perkembangan teknologi yang semakin pesat memungkinkan pekerjaan manusia tergantikan oleh teknologi robot. Robot yang paling sering digunakan dalam industri adalah robot lengan. Robot lengan dapat meniru ciri-ciri lengan manusia sehingga sering digunakan untuk membantu manusia mengangkat dan memindahkan barang. Dengan prinsip tersebut, robot lengan dapat digunakan sebagai robot pengangkat beban untuk membantu kalibrasi timbangan elektronik. Penelitian ini menganalisis pengontrolan motor DC pada bagian alas robot pengangkat anak timbangan dengan melakukan minimisasi overshoot dengan kontrol PID (Proporsional – Integral – Derivatif). Hasil pengujian Kontrol PID pada pengontrolan kecepatan motor DC tunak pada putaran 100 rpm dengan kesalahan tunak sebesar 0%. Respon sistem terhadap motor DC mempunyai *settling time* sebesar 1,26s, dan overshoot sebesar 2%.

Kata Kunci: Motor DC, kontrol PID, pneumatik, lengan robot.

Abstract

The rapid development of technology allows human work to be replaced by robot technology. The most frequently used robot in industry is the robot arm. The robot arm can imitate the human arm's characteristics, so it is often used to help humans lift and move goods. With this principle, the robot arm can be used as a weight-lifting robot to aid in calibrating electronic scales. This paper analyzes the control of the DC motor on a weighing-scale lifting robot arm by optimizing the overshoot with PID (Proportional - Integral - Derivative) control. The PID Control test results on the DC motor rotation are stable at 100 rpm with a steady state error of 0%. The system's response to the DC motor has a settling time of 1,26 s and an overshoot of 2%.

Keywords: DC motor, PID control, pneumatic, arm robot.

Makalah diterima 14 Februari 2025 – makalah direvisi 10 April 2025– disetujui 29 April 2025

Karya ini adalah naskah akses terbuka dengan lisensi [CC BY-SA](#).



1 Pendahuluan

Motor DC (*Direct Current*) banyak digunakan sebagai penggerak pada bidang industri dan robotika, namun memiliki kecepatan putaran yang tidak stabil sehingga diperlukan suatu pengontrol untuk menstabilkan kecepatan putarannya [1]. Motor DC digunakan sehari-hari karena berbagai kelebihanannya, dan sudah menjadi kebutuhan penting dalam aktivitas manusia. Motor DC dengan efisiensi pengoperasian yang tinggi dan kontrol kecepatannya stabil merupakan aktuator yang baik [2]. Masalah utama pada motor DC adalah bagaimana mengendalikan kecepatannya sesuai referensi tertentu [3]. Untuk itu, digunakan Pengontrol PID yang dikenal mudah diimplementasikan di berbagai sistem. Tantangan utama yang sering dibahas pada kontrol motor DC menggunakan PID adalah penyesuaian parameter yaitu penentuan nilai parameter Penguatan Proporsional (K_p), Penguatan Integral (K_i), dan Penguatan Derivatif (K_d) untuk memperoleh kinerja sistem yang optimal [4].

Motor DC banyak digunakan pada sistem robot lengan di industri manufaktur untuk membantu perusahaan meningkatkan tingkat produksinya. Namun, kekhawatiran terbesar dalam lengan robot adalah keakuratan robot dalam mengangkat suatu objek, yang bergantung pada pengontrol yang dirancang [5]. Pengontrol PID

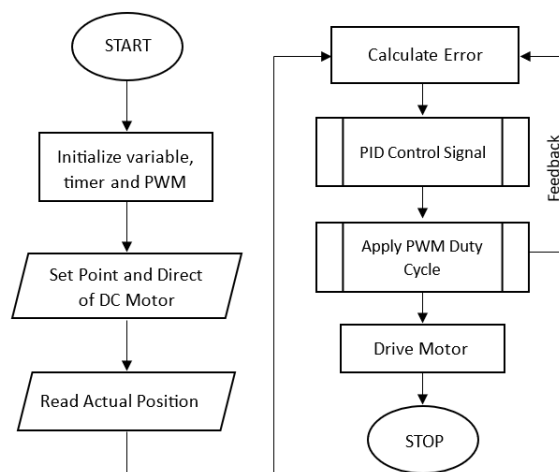
merupakan pilihan terbaik untuk pengoperasian lengan robot karena memungkinkan modifikasi parameter dinamis untuk pelacakan lintasan yang tepat pada pergerakan lengan robot industri [6]. Kesulitan dalam penggunaan pengontrol ini adalah pada penalaan parameter kontrol karena masih menggunakan metode *trial and error* untuk mencari konstanta parameter PID yaitu K_p , K_i , dan K_d . Pengontrol PID untuk kontrol robot perlu didesain untuk mengurangi kesalahan tunak sehingga meningkatkan akurasi dan presisi [7],[10],[12],[14], juga untuk meningkatkan kecepatan respon serta meminimumkan *overshoot* [8]. Terdapat berbagai upaya penalaan parameter PID pada motor DC, antara lain metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) [4]. Metode optimasi algoritma genetika (GA) diimplementasikan untuk menyetel parameter penguatan pengendali orde fraksional FO-PID dan PID [11], [16] Metode Ziegler-Nichols bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pengontrol PID, termasuk penguatan proporsional, integral, dan turunan [13]. Pengoptimalan keseimbangan sebagai teknik optimasi yang efektif untuk penyetelan parameter pengontrol PID yang optimal [17].

Lengan robot digunakan untuk meniru gerakan torsional, yang diperlukan untuk tugas sehari-hari seperti membuka pintu atau mengambil benda, yang biasa dilakukan oleh lengan bawah manusia [15]. Lengan robot dirancang untuk berputar pada bagian dasar, serta mengangkat atau menurunkan lengan. Pada robot pneumatik, gerakan berputar pada bagian alas menggunakan aktuatur motor listrik, sedangkan pergerakan lengan menggunakan aktuatur pneumatik [19]. Robot pneumatik menggunakan tekanan udara masukan dan koordinat akhir, dan keakuratan model dapat diverifikasi melalui eksperimen [20].

Penelitian ini membahas lengan robot yang berfungsi mengangkat anak timbangan dan meletakkannya ke timbangan elektronik, sebagai alat bantu dalam proses kalibrasi timbangan elektronik. Untuk mengangkat anak timbangan, digunakan mekanisme vakum pada ujung lengan robot. Untuk menggerakkan lengan robot, digunakan penggerak pneumatik, dan untuk memutar bagian alas robot digunakan motor listrik. Penelitian ini fokus pada optimasi penalaan parameter kontrol PID untuk kecepatan putar motor DC sebagai pemutar bagian alas lengan robot agar dihasilkan kesalahan tunak yang rendah, juga osilasi yang rendah.

2 Metode

Mekanisme umpan balik digunakan dalam sistem kontrol robot lengan pneumatik untuk mengangkat beban. Penggunaan lengan robot ini banyak digunakan dalam kontrol industri dengan menghitung nilai 'kesalahan' sebagai selisih antara posisi lengan yang terukur dengan posisi lengan yang diinginkan. Pengontrol akan berusaha meminimalkan kesalahan dengan mengatur nilai masukan kontrol pada aktuatur. Diagram alir pengontrol PID ditunjukkan pada Gambar 1.

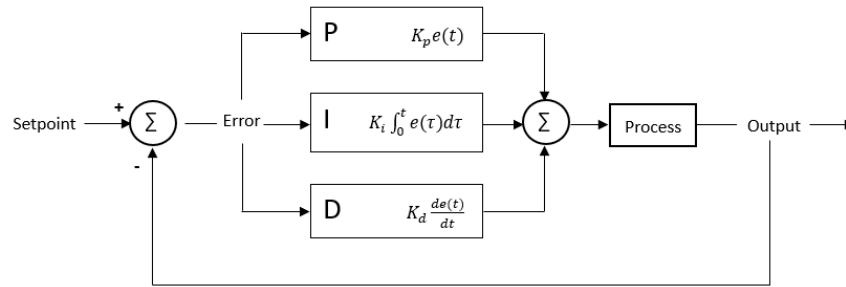


Gambar 1. Flowchart perhitungan pengontrol PID.

Perancangan pengontrol PID pada robot lengan untuk mengangkat anak timbangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan PID untuk mendapatkan sinyal kontrol untuk motor DC yaitu:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Dari persamaan 1, $e(t)$ adalah selisih nilai kesalahan posisi antara sudut yang diinginkan (*set point*) dengan sudut keluaran terukur, $u(t)$ adalah sinyal PWM untuk motor DC dan $y(t)$ adalah sudut sebenarnya. Nilai K_p , K_i , dan K_d merupakan nilai Penguatan Proporsional, Integral, dan Diferensial dari pengontrol PID yang digunakan.

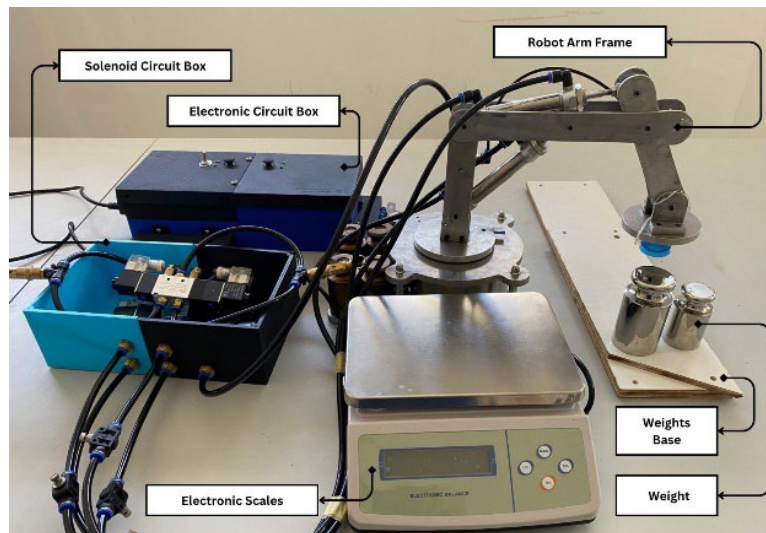


Gambar 2. Kontrol posisi *loop* tertutup motor DC menggunakan kontroler PID

Diagram pada Gambar 2 menunjukkan bahwa Penguatan Proporsional (K_p) merupakan pengali kesalahan (*error*) secara proporsional. Meski proses memiliki *error* yang signifikan, namun posisi motor akan terkompensasi cukup besar. Penguatan Integral (K_i) merupakan pengali bagi akumulasi kesalahan, sehingga efeknya dapat menghilangkan kesalahan tunak. Penguatan Derivatif (K_d) merupakan pengali laju perubahan kesalahan, sehingga efeknya memperkecil simpangan posisi maksimum (*overshoot*). Total aksi PID akan dikonversi menjadi sinyal PWM untuk mengaktifkan motor DC yang selanjutnya menggerakkan lengan robot [18].

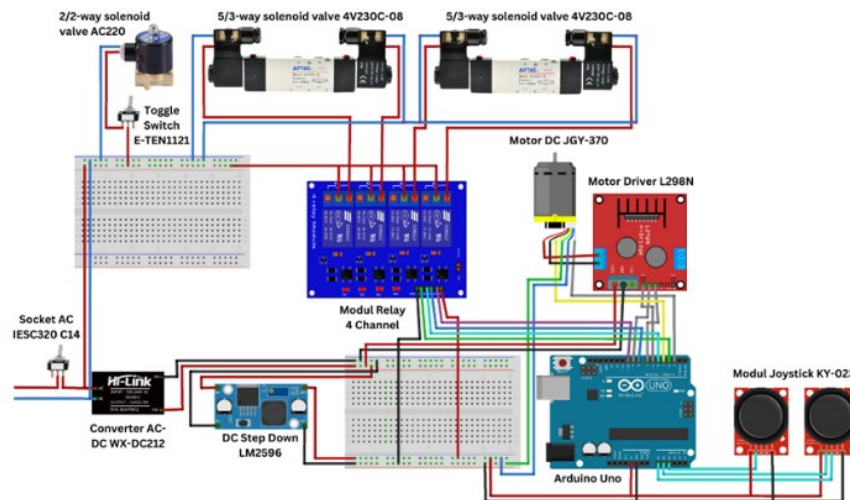
3 Hasil dan Diskusi

Robot lengan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3. Bagian-bagian robot ini adalah *Robot arm frame*, *solenoid circuit box*, *electronic circuit box*, *weights base* dan *electronic scales*. Pada rangka robot terdapat motor DC, katrol, sabuk, dan bantalan yang memutar bagian alas robot. Silinder pneumatik berfungsi sebagai aktuator gerakan naik-turun lengan robot. Ejektor vakum ditempatkan pada *end effector* untuk mengaktifkan penghisap vakum yang menghisap dan mengangkat anak timbangan. Robot selanjutnya bergerak dengan tiga derajat kebebasan (berputar pada landasan, mengangkat lengan dan pergelangan) untuk memindahkan anak timbangan dari *weight base* ke *electronic scales*.



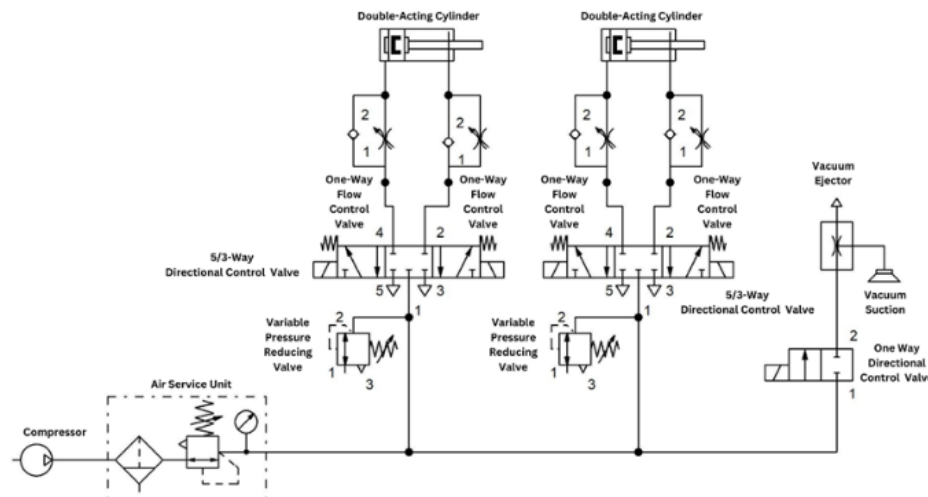
Gambar 3. Robot motor DC pneumatik pengangkat anak timbangan.

Komponen motor DC dan pneumatik pada lengan robot meliputi: Soket AC IES320 C14, Konverter AC-DC WX-DC212, DC step down LM2596, Arduino Uno, Modul Joystick KY-023, Driver Motor L298N, Motor DC JGY-370, Modul *relay 4 channel*, katup *solenoid 5/3* arah, katup *solenoid 2/2* arah, dan saklar E-TEN112.1. Skema hubungan seluruh komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian robot motor DC – pneumatik.

Komponen sistem pneumatik yang diimplementasikan pada robot ini adalah kompresor, *air service unit*, katup pengurang tekanan variabel, katup pengatur arah 5/3 arah, katup kontrol 2/2 arah, katup pengatur aliran satu arah, silinder kerja ganda, ejektor vakum, dan penghisap vakum yang ditunjukkan pada Gambar 5. Kompresor berfungsi sebagai penyedia udara tekan untuk keseluruhan sistem, *Air Service Unit* berfungsi sebagai alat yang menyiapkan, mengatur dan menjaga kualitas udara tekan pada kompresor. *Variable Pressure Reducing Valve* berfungsi untuk menurunkan tekanan udara yang diberikan kompresor. Katup solenoid 5/3 arah berfungsi sebagai pengatur aliran udara untuk menggerakkan silinder pneumatik yang mengatur pergerakan lengan robot. Katup solenoid 2/2 arah berfungsi sebagai pengatur aliran udara untuk ejektor vakum, Katup pengatur aliran satu arah sebagai pengatur kecepatan gerak lengan robot dengan cara mengendalikan aliran udara yang masuk ke dalam silinder pneumatik, Silinder Kerja Ganda merupakan silinder pneumatik yang berfungsi untuk menggerakkan lengan robot ke depan dan ke belakang, Ejektor vakum berfungsi untuk mengubah tekanan positif dari kompresor menjadi tekanan vakum yang diperlukan penghisapan vakum.



Gambar 5. Skema sistem pneumatik.

Untuk pergerakan bagian alas robot, motor DC yang digunakan telah terintegrasi dengan sensor *encoder*. Sensor ini akan mengirimkan sinyal perputaran bagian alas robot ke mikroprosesor untuk perhitungan aksi kontrol PID.

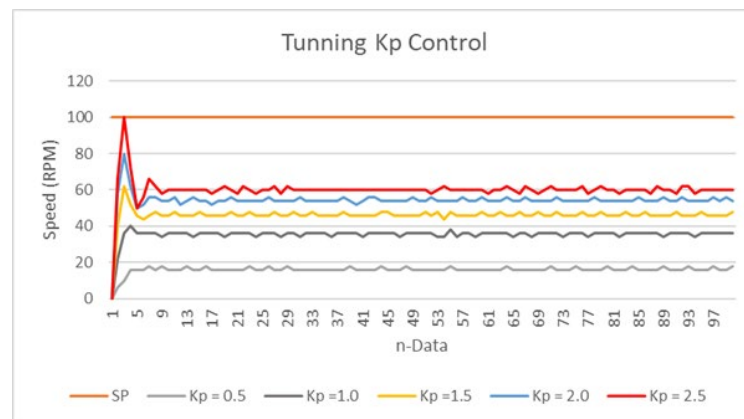
Untuk pergerakan naik turun lengan robot, *joystick* akan memberi masukan pada *relay* untuk membuka dan menutup katup solenoid 5/3 arah yang mengatur masuknya udara ke penggerak lengan robot. Ketika katup solenoid diberi input, maka udara yang tersedia pada kompresor akan dialirkan ke katup solenoid, kemudian udara tersebut diteruskan ke aktuatur pneumatik. Aktuatur pneumatik pada lengan robot prototipe ini terdiri dari silinder pneumatik hasta, silinder pneumatik pergelangan, dan ejektor vakum. Udara yang dilewatkan

pada silinder pneumatik hasta akan menggerakkan bagian hasta robot. Udara yang dilewatkan pada silinder pneumatik pergelangan akan menggerakkan bagian pergelangan robot.

Untuk penghisap vakum, saklar memberikan masukan untuk mengendalikan katup solenoid 2/2 arah. Pada saat yang sama, udara yang diteruskan ke ejektor vakum akan mengaktifkan penghisap vakum untuk menghisap dan mengangkat anak timbangan.

3.1 Penalaan Kontrol Proporsional

Pengujian kontrol PID bertujuan untuk mengontrol kecepatan motor DC agar mencapai nilai *set point* dengan stabil seperti ditunjukkan pada Gambar 6. *Set point* yang ditentukan untuk pengoperasian robot ini adalah 100 rpm. Rumus pengontrol PID diimplementasikan langsung dalam kode program pengujian penyetelan PID. Pengujian penalaan PID dilakukan dengan menggunakan waktu sampel 60 ms, dengan pengambilan 100 data untuk satu nilai konstanta pengontrol. Penalaan PID dilakukan dengan metode *trial & error*. Uji penalaan PID dilakukan secara bertahap dimulai dari penentuan nilai konstanta proporsional (K_p).



Gambar 6. Penalaan parameter kontrol proporsional K_p .

Nilai K_p yang cukup besar mempengaruhi penurunan nilai kesalahan tunak (*steady state error*), namun belum mampu mencapai nilai *set point*. Pada $K_p = 2,5$ diperoleh kesalahan tunak sebesar 40%. Namun osilasi menjadi sangat besar pada $K_p = 2,5$ yaitu 67%, sehingga *settling time* meningkat. Tabel 1 merangkum perbandingan ini. Karena nilai kesalahan tunak pada $K_p = 2,5$ lebih kecil dibandingkan nilai K_p lainnya, meskipun *settling time* meningkat, nilai $K_p = 2,5$ dipilih sebagai nilai K_p optimal.

Tabel 1. Respon Sistem Kontrol Proporsional

K_p	K_i	K_d	Settling Time (n)	Overshoot (%)	Steady State Error (%)
0,5	0	0	6	0	82
1,0	0	0	6	11	64
1,5	0	0	7	19	52
2,0	0	0	7	48	46
2,5	0	0	9	67	40

3.2 Penalaan Pengontrol Integral

Pada pengujian pengontrol PI dengan nilai K_i yang bervariasi, kecepatan motor DC sudah mencapai nilai *set point*, namun masih terdapat sedikit *overshoot*. Gambar 7 menunjukkan nilai K_i mampu menghilangkan kesalahan tunak hingga nol. Tabel 2 menunjukkan penalaan pengontrol integral dari $K_i = 0,1$ sampai $K_i = 0,5$. Pada nilai $K_i = 0,5$ dihasilkan *settling time* paling singkat, yaitu $17 \times 60 \text{ ms} = 1,02 \text{ s}$.



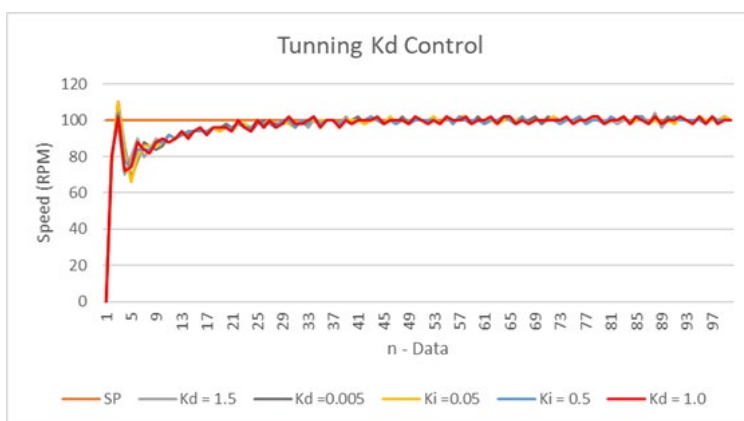
Gambar 7. Penalaan Parameter Kontrol Integral K_i .

Tabel 2. Respon Sistem Pengontrol Proporsional Integral

K_p	K_i	K_d	Settling Time (n)	Overshoot (%)	Steady State Error (%)
2,5	0,1	0	97	2	5
2,5	0,2	0	33	4	0
2,5	0,3	0	29	6	0
2,5	0,4	0	21	6	0
2,5	0,5	0	17	8	0

3.3 Penalaan Pengontrol Derivatif

Pada pengujian kontrol derivatif, kecepatan motor DC mencapai set point dan overshoot lebih kecil, meskipun tidak ada perubahan *rise time* yang signifikan. Nilai $K_d = 1,0$ menghasilkan overshoot sebesar 4%. Sedangkan pada $K_d = 1,5$ diperoleh overshoot sebesar 2%. Kedua variasi K_d menghasilkan respon sistem yang sangat baik. Berdasarkan respon sistem yang diperoleh, $K_d = 1,0$ memungkinkan motor DC mencapai nilai set point dan keadaan tunak lebih cepat. Sedangkan $K_d = 1,5$ memungkinkan motor DC memperoleh overshoot yang lebih kecil.



Gambar 8. Penalaan Parameter Kontrol Derivatif K_d .

Pada robot lengan, nilai overshoot yang kecil sangat disukai. Hal ini bertujuan agar pada saat memindahkan beban, pergerakan robot tidak agresif akibat overshoot yang tinggi pada motor DC. Dengan demikian nilai K_d yang digunakan pada pengontrol PID adalah 1,5. Berdasarkan hasil penalaan yang dirangkum pada Tabel 4, didapatkan nilai K_p sebesar 2,5, nilai K_i sebesar 0,5, dan nilai K_d sebesar 1,5.

Tabel 3. Respon Sistem Pengontrol Proporsional Integral Derivatif (PID)

K_p	K_i	K_d	Settling Time (n)	Overshoot (%)	Steady State Error (%)
2,5	0,5	0,005	21	10	0
2,5	0,5	0,05	21	10	0
2,5	0,5	0,5	21	10	0
2,5	0,5	1,0	21	4	0
2,5	0,5	1,5	21	2	0

Apabila menggunakan penelitian Suseno dan Ma'arif [9] sebagai pembanding, proses penalaan yang menggunakan metode *Genetic Algorithm* menghasilkan dua pilihan nilai parameter kontrol yang menghasilkan overshoot sebesar 2% dan settling time sebesar 13,5. Nilai parameter PID untuk mutasi 1 adalah $K_p = 3,75$, $K_i = 1,32$, dan $K_d = 0,21$. Kemudian nilai parameter PID terbaik pada Crossover sebesar 0,4 yaitu $K_p = 4.21$, $K_i = 1.20$, dan $K_d = 0.25$, dengan nilai overshoot 2%, settling time = 1,08 s.

Pembanding lainnya adalah pengujian hardware pada penelitian Rahayu dkk [4], respon kecepatan motor yang stabil dihasilkan pada $K_p = 1,46$, $K_i = 1,31$, dan $K_d = 0,80$ adalah settling time sebesar 7.3 s dan overshoot sebesar 1% [4].

Penelitian ini menghasilkan kinerja yang setara pada $K_p = 2,5$, $K_i = 0,5$ dan $K_d = 1,5$, yang menghasilkan overshoot 2% dan settling time 21 x 60 ms = 1,26 s.

Kesimpulan

Hasil penalaan kontrol PID pada motor DC robot pengangkat anak timbangan menghasilkan respon kecepatan motor yang stabil dimana $K_p = 2,5$, $K_i = 0,5$, dan $K_d = 1,5$ dengan settling time sebesar 1,26 detik, overshoot sebesar 2%, dan kesalahan tunak sebesar 0%.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu penulisan makalah ini.

Referensi

- [1] R. Rikwan & A. Ma'arif, "DC motor rotary speed control with Arduino Uno based PID Control," *Control Systems and Optimization Letters*, vol 1(1), pp. 27-31, 2023. <https://doi.org/10.59247/csol.v1i1.6>
- [2] Y. Wang & H. Wang, "Research on control technology of brushless DC motor for robot," in *Proceedings of the 2024 8th International Conference on Control Engineering and Artificial Intelligence*, pp. 188-193, 2024. <https://doi.org/10.1145/3640824.3640854>
- [3] A. Ma'arif & N. R. Setiawan, "Control of DC motor using integral state feedback and comparison with PID : Simulation and Arduino implementation," *Journal of Robotics and Control*, vol 2(5), pp. 456-461, 2021. <https://doi.org/10.18196/jrc.25122>
- [4] E. S. Rahayu, A. Ma'arif, & A. Cakan, "Particle swarm optimization (PSO) tuning of PID control on DC motor," *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2022. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i2.476>
- [5] S. C. Suhaimin, N. L. Azmi, M. M. Rahman, & H. M. Yusof, "Analysis of point-to-point robotic arm control using PID controller," in *2019 7th International Conference on Mechatronics Engineering (ICOM)*, IEEE , pp. 1-6, 2019. <https://doi.org/10.1109/ICOM47790.2019.8952036>
- [6] P. Kulkarni, O. Kulkarni, , & J. K. Sayyad, "Tuning of a Robotic Arm using PID Controller for Robotics and Automation Industry," in *2024 6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE)* , IEEE , pp. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICEPE63236.2024.10668952>
- [7] P. Chotikunnan, & R. Chotikunnan, "Dual design PID controller for robotic manipulator application," *Journal of Robotics and Control*, vol 4(1), pp. 23-34, 2023. <https://doi.org/10.18196/jrc.v4i1.16990>
- [8] F. Moulahcene, H. Laib, & A. Merazga , "Angular position control of DC gear-motor using PID controllers for robotic arm," in *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, IEEE , pp. 1-6, 2022. <https://doi.org/10.1109/ICECET55527.2022.9872821>

- [9] E. W. Suseno & A. Ma'arif, "Tuning of PID controller parameters with genetic algorithm method on DC motor," *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol 1(1), pp. 41-53, 2021. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v1i1.249>
- [10] R. Chotikunnan, K. Roongprasert, P. Chotikunnan, P. Imura, M. Sangworasil, & A. Srisirawat, "Robotic arm design and control using MATLAB/Simulink," *International Journal of Membrane Science and Technology*, vol 10(3), pp. 2448-2459, 2023. <https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.1974>
- [11] A. Eltayeb, G. Ahmed, I. H. Imran, N. M. Alyazidi & A. Abubaker, "Comparative analysis: fractional PID vs PID controllers for robotic arm using genetic algorithm optimization," *Automation*, vol 5(3), pp. 230-245, 2024. <https://doi.org/10.3390/automation5030014>
- [12] M. Shouran & M. Habil, "Tuning of PID controller using different optimization algorithms for industrial DC motor," in *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)*, IEEE, pp.756-759, 2021. <https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404616>
- [13] R. Nutenki and B. V. Varma, "PID Controller Design for DC Motor Speed Control," *2024 Fourth International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, pp. 1-6, 2024. <https://doi.org/10.1109/ICAECT60202.2024.10469124>
- [14] M. Ahmed, N. M. Tahir, A. Y. Zimit, M. Idi, K. A. Abubakar, & S. A. Jalo, "Improved PID controller for DC motor control," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1052 (1), 012058, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1052/1/012058>
- [15] Celal Onur Gökçe, "Automatizing Automatic Controller Design Process: Designing Robust Automatic Controller under High-Amplitude Disturbances Using Particle Swarm Optimized Neural Network Controller" *Applied Sciences*, vol 14 (17), pp 7859, 2024. <https://doi.org/10.3390/app14177859>
- [16] D. Baidya, S. Dhopte & M. Bhattacharjee, "Sensing system assisted novel PID controller for efficient speed control of DC motors in electric vehicles," *IEEE Sensors Letters*, vol 7(1), pp. 1-4, 2023. <https://doi.org/10.1109/LSSENS.2023.3234400>
- [17] I. D. Fajuke & A. Raji, "Optimal tuning of PID controller for speed control of DC motor using equilibrium optimizer," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol 30(1), pp. 89-101, 2023. <http://doi.org/10.11591/ijeecs.v30.i1.pp89-101>
- [18] D. Saputra, A. Ma'arif, H. Maghfiroh, P. Chotikunnan & S. N. Rahmadhia, "Design and application of PLC-based speed control for DC motor using PID with identification system and MATLAB tuner,". *International Journal of Robotics and Control Systems*, vol 3(2), pp. 233-244, 2023. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v3i2.775>
- [19] N. Oh, J. G. Lee & H. Rodrigue, . "Torsional pneumatic actuator based on pre-twisted pneumatic tubes for soft robotic manipulators," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol 28(6), pp. 3191-3201, 2023. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2023.3262235>
- [20] S. Luo, J. Wu, H. Xiao, , C. Y. Su, D. Sato, & J. She, "Motion analysis and modeling of pneumatic bellows robotic arm," in *2024 43rd Chinese Control Conference (CCC)* , IEEE, pp. 4334-4338, 2024. <https://doi.org/10.23919/CCC63176.2024.10662514>