

Artikel Penelitian

Optimasi PID Kontrol BLDC Menggunakan Metode Ziegler-Nichols

Muhammad Nabel Al Fayyed ^{1*}, Rifdah Mayhasna Nur Alayya ², Wildan Abu Bakar Sidiq ³, dan Tatyantoro Andrasto⁴

¹ Teknik Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang; email : muhammadnabel70@students.unnes.ac.id

² Teknik Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang; email : rifdahmayhasnaa@students.unnes.ac.id

³ Teknik Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang; email : wildanzstd@students.unnes.ac.id

⁴ Teknik Komputer, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang; email : tatyantoro@mail.unnes.ac.id

* Korespondensi: Muhammad Nabel Al Fayyed

Abstract: This research focuses on optimising precise Brushless DC (BLDC) motor speed control using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller. The fundamental problem lies in the performance of PID control, which is highly dependent on the accuracy of determining its gain parameters (K_p , K_i , K_d), where manual tuning methods often do not provide satisfactory results. Therefore, the objective of this study is to apply the Ziegler-Nichols systematic method to the PID control tuning process for BLDC motors and then evaluate the performance of the resulting system based on key response time parameters such as rise time, settling time, overshoot, and steady-state error. The proposed method involves designing a mathematical model of the BLDC motor and applying the Ziegler-Nichols technique, specifically the Ultimate Oscillation Method, to systematically derive the values of K_u and P_u which are then used to calculate K_p (5.1), K_i (22.7), and K_d (0.29). The main findings show a dramatic performance improvement in the BLDC speed control system after the implementation of the tuned PID; the rise time is significantly reduced from 0.3728 seconds (without PID) to 0.0041 seconds, the settling time improves from 0.6642 seconds to 0.0073 seconds, and most importantly, the steady-state error of 45.38% is eliminated to 0%. The main idea synthesis is that the Ziegler-Nichols method provides an effective and practical approach to PID parameter optimization, resulting in a highly responsive, accurate and stable BLDC motor control system. In conclusion, this study successfully demonstrates that applying a PID controller with parameters determined via the Ziegler-Nichols method significantly improves the speed control quality of a BLDC motor, overcoming the steady-state error problem and substantially improving the transient response characteristics.

Keywords: BLDC Motor; PID Controller; Ziegler-Nichols; Speed Control.

Abstrak: Penelitian ini berfokus pada optimasi kontrol kecepatan motor Brushless DC (BLDC) yang presisi, menggunakan pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID). Permasalahan mendasar terletak pada kinerja kontrol PID yang sangat bergantung pada akurasi penentuan parameter gain-nya (K_p , K_i , K_d), di mana metode tuning manual seringkali kurang memberikan hasil yang memuaskan. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menerapkan metode sistematis Ziegler-Nichols pada proses tuning kontrol PID untuk motor BLDC, kemudian mengevaluasi kinerja sistem yang dihasilkan berdasarkan parameter-parameter waktu respons kunci seperti rise time, settling time, overshoot, dan error steady-state. Metode yang diusulkan melibatkan perancangan model matematis motor BLDC dan penerapan teknik Ziegler-Nichols, khususnya Ultimate Oscillation Method, untuk secara sistematis menurunkan nilai K_u dan P_u yang kemudian digunakan untuk menghitung K_p (5,1), K_i (22,7), dan K_d (0,29). Temuan utama menunjukkan peningkatan performa yang dramatis pada sistem kontrol kecepatan BLDC setelah implementasi PID yang di-tuning; rise time berkurang signifikan dari 0,3728 detik (tanpa PID) menjadi 0,0041 detik, settling time membaik dari 0,6642 detik menjadi 0,0073 detik, dan yang terpenting, steady-state error sebesar 45,38% berhasil dieliminasi

Diterima: Mei 05, 2025
Direvisi: Mei 19, 2025
Diterima: Juni 02, 2025
Diterbitkan: Juni 04, 2025
Versi sekarang: Juni 04, 2025



Hak cipta: © 2025 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

sepenuhnya menjadi 0%. Sintesis gagasan utama adalah bahwa metode Ziegler-Nichols menyediakan pendekatan yang efektif dan praktis untuk optimasi parameter PID, menghasilkan sistem kontrol motor BLDC yang sangat responsif, akurat, dan stabil. Kesimpulannya, penelitian ini berhasil mendemonstrasikan bahwa penerapan kontroler PID dengan parameter yang ditentukan melalui metode Ziegler-Nichols secara signifikan meningkatkan kualitas kontrol kecepatan motor BLDC, mengatasi masalah error steady-state dan memperbaiki karakteristik respons transien secara substansial.

Kata kunci: Motor BLDC; Kontroler PID; Ziegler-Nichols; Kontrol Kecepatan.

1. Pendahuluan

Kemajuan teknologi dalam bidang kendali dan otomatisasi saat ini telah mendorong penggunaan motor listrik yang semakin canggih dan efisien, baik di dunia industri maupun komersial. Salah satu motor listrik yang banyak diminati adalah motor Brushless DC (BLDC). Motor BLDC terkenal karena kemampuannya dalam menghasilkan efisiensi yang tinggi, torsi yang besar, dan daya tahan yang lama. Selain itu, motor ini memiliki keunggulan dibandingkan motor DC konvensional atau motor induksi, misalnya dalam hal respons yang lebih cepat, pengopresian yang senyap, dan desain yang ringkas dengan rasio torsi terhadap ukuran yang lebih baik. Hal ini membuat motor BLDC menjadi pilihan ideal untuk berbagai industri yang memerlukan presisi tinggi dan kecepatan responsif, seperti pada peralatan rumah tangga, otomotif, penerbangan, alat medis, hingga sistem otomatisasi industri [1], [2].

Diperkirakan bahwa pada tahun 2025 nilai pasar global untuk motor BLDC akan menembus USD 15,2 miliar, naik signifikan dari USD 9,6 miliar pada tahun 2020. Peningkatan ini sejalan dengan semakin banyaknya penggunaan motor BLDC di sektor otomotif dan robotika industri [3], [4]. Kenaikan ini tak lepas dari kebutuhan industri akan motor yang lebih efisien, ringan, dan dapat diandalkan untuk mendukung aplikasi aplikasi berteknologi tinggi. Berbeda dari motor DC konvensional yang masih menggunakan sikat (brush), BLDC motor memanfaatkan komputasi elektronik yang dikendalikan oleh sensor atau algoritma sensorless. Teknologi ini memungkinkan motor beroperasi pada kecepatan tinggi dengan performa yang stabil dan daya tahan tinggi [5]. Karena itulah, BLDC motor semakin diandalkan sebagai solusi penggerak yang efisien dan handal di tengah tuntutan industri modern yang terus berkembang.

Kontrol kecepatan yang presisi pada motor (BLDC) memegang peranan krusial dalam berbagai aplikasi modern yang menuntut respons dinamis tinggi, seperti pada kendaraan listrik yang memerlukan akselerasi dan deselerasi halus, drone yang membutuhkan stabilitas terbang akurat, serta robotika industri yang mengandalkan gerakan presisi dan terkoordinasi. Di antara berbagai metode kontrol yang ada, pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) menjadi salah satu pendekatan yang paling umum dan luas diimplementasikan karena kesederhanaan struktur dan kemampuannya dalam memberikan kinerja kontrol yang baik. Meskipun demikian, efektivitas dan performa optimal dari kontrol PID sangatlah bergantung pada ketepatan dalam menentukan parameter gain-nya, yaitu konstanta Proportional (Kp), Integral (Ki), dan Derivative (Kd), yang secara langsung mempengaruhi stabilitas, kecepatan respons, dan akurasi sistem kontrol kecepatan motor BLDC.

Metode tuning PID secara manual seringkali menghasilkan parameter yang kurang optimal, sehingga kinerja sistem menjadi kurang memuaskan. Dalam praktik industri, pendekatan sistematis seperti Ziegler-Nichols banyak dipilih. Oleh karena itu, metode sistematis seperti Ziegler-Nichols banyak digunakan sebagai solusi dalam dunia industri untuk memperoleh nilai parameter PID yang mendekati optimal [6]. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode Ziegler-Nichols pada kontrol PID BLDC, kemudian mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan parameter parameter waktu respon seperti rise time, settling time, overshoot, dan error steady-state.

2. Tinjauan Literatur

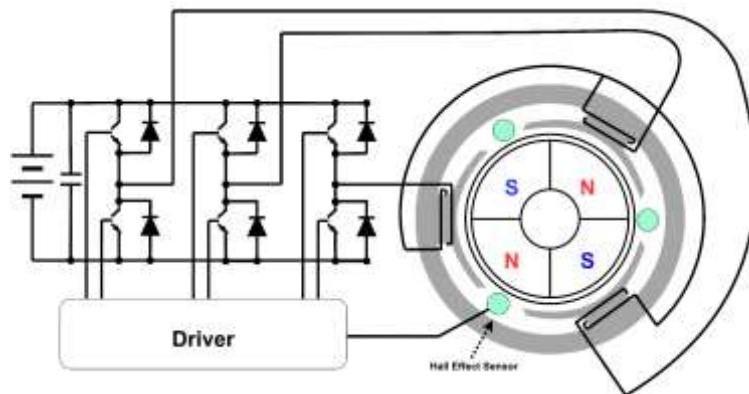
2.1. Motor BLDC

Motor BLDC adalah jenis motor yang menggunakan sistem kontrol elektronik untuk mengatur aliran arus listriknya. Sistem ini menggantikan peran sikat (brush) dan komutator mekanis yang biasanya ada pada motor DC konvensional. Motor BLDC terdiri dari dua komponen utama, yaitu rotor yang menggunakan magnet permanen dan stator, menghasilkan gaya gerak listrik (EMF) yang pada akhirnya menciptakan arus listrik untuk memutar motor [7], [8].

Motor BLDC memiliki ciri khas yang membedakannya dari motor konvensional, salah satunya adalah cara kerjanya yang menggunakan sistem komutasi enam langkah (six-step commutation). Proses ini bisa dilihat pada gambar 1, dimana komutasi atau pengaturan aliran arus ke kumparan stator diatur secara elektronik oleh inverter tiga fasa. Inverter ini akan mengontrol kapan arus mengalir ke setiap fasa stator, yang ditentukan berdasarkan informasi posisi rotor yang didapatkan dari sensor Hall-effect. Sensor ini membaca posisi rotor secara real-time, lalu mengirimkan sinyal ke inverter untuk mengatur penyalan arus ke stator. Dengan cara ini, medan magnet yang dihasilkan oleh stator akan selalu menyesuaikan pergerakan rotor, sehingga motor dapat berputar dengan torsi yang stabil dan halus [9]. Pengembangan lebih lanjut mengarah pada teknik tanpa sensor untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi biaya [10].

Jika dilihat dari motor DC biasa, BLDC menawarkan banyak kelebihan yang membuatnya banyak dipakai di berbagai bidang. Salah satu keunggulannya adalah efisiensi energinya yang tinggi, karena motor ini tidak memiliki gesekan akibat sikat (brush) dan komutator. Selain itu, motor BLDC juga punya rasio torsi terhadap berat yang besar, artinya motor ini mampu memberikan performa tinggi meskipun berukuran kecil dan ringan. Kemampuannya untuk merespons perubahan kecepatan dan arah putaran juga sangat baik, sehingga motor ini cocok untuk aplikasi yang memerlukan respons cepat.

Tidak hanya itu, motor BLDC juga bekerja dengan senyap dan tanpa percikan api, karena tidak ada sikat yang bergesekan, sehingga lebih aman dan nyaman digunakan. Karena tidak ada komponen yang mudah mengalami kerusakan akibat gesekan, motor ini juga lebih awet dan memerlukan perawatan yang minim. Hal ini membuatnya sangat ideal untuk digunakan pada perangkat yang memerlukan keandalan tinggi dan biaya operasional yang rendah, termasuk dalam aplikasi otomotif [11].



Gambar 1. BLDC Motor Schematic Diagram

2.2. Kontrol PID

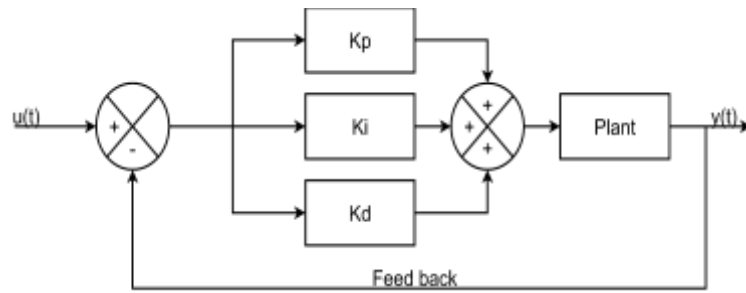
Kontrol PID adalah salah satu metode kontrol umpan balik yang sangat populer dalam sistem otomatisasi karena stabilitas, serta kemampuannya untuk memperbaiki respon sistem. PID terdiri dari tiga komponen pengendali proporsional (P), integral (I), dan derivative (D), yang masing-masing berfungsi untuk mengatur kecepatan sistem mencapai nilai set point, menghilangkan error steady-state, dan meredam overshoot [12]. Selain kontrol PID standar untuk kecepatan, teknik kontrol lanjutan seperti kontrol torsi langsung (Direct Torque Control, DTC) juga telah dikembangkan untuk meningkatkan respons torsi dan mengurangi riak torsi pada motor BLDC [13], [14]. Implementasi digital dari strategi kontrol ini juga menjadi fokus penting [15]. Transfer fungsi PID dalam domain Laplace dinyatakan sebagai berikut (1):

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Dimana:

- : Gain proporsional (mempercepat respon sistem)
- : Gain integral (mengurangi steady state error)
- : Gain derivative (mengurangi overshoot)

(1)



Gambar 2. Diagram Blok PID

2.3. Metode Ziegler-Nichols

Metode Ziegler-Nichols adalah salah satu teknik penyetelan parameter PID yang paling terkenal dan digunakan secara luas di dunia industri. Dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942, metode ini menyediakan pendekatan sistematis untuk menentukan nilai K_p , K_i , K_d dari pengendali PID berdasarkan karakteristik respon sistem [16].

Terdapat dua pendekatan utama dalam metode Ziegler-Nichols, pendekatan pertama yaitu Step Response Method, digunakan sistem yang memiliki respons tipe S-shaped atau sigmoid[17]. Metode ini menghitung parameter PID berdasarkan kemiringan maksimum dan waktu tunda sistem. Kedua Ultimate Oscillation Method, Metode ini sangat efektif untuk sistem yang tidak memiliki model matematis yang pasti Caranya adalah dengan mendorong sistem menuju kondisi marginally stable, yaitu kondisi berosilasi berkelanjutan di mana amplitudo tidak bertambah maupun berkurang [18], [19].

Dalam penelitian ini, Ultimate Oscillation Method diterapkan dengan langkah-langkah berikut Pertama, sistem dikonfigurasi sebagai kontrol proporsional murni (proportional-only), tanpa komponen integral maupun derivatif. Selanjutnya, nilai gain proporsional (K_p) dinaikkan secara bertahap hingga sistem mulai menunjukkan osilasi kontinu. Pada titik ini, nilai gain dicatat sebagai K_u (ultimate gain), dan periode osilasi yang terjadi dicatat sebagai P_u (ultimate period) [20]. Terakhir, parameter PID dihitung berdasarkan tabel empiris Ziegler-Nichols, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tuning PID Ziegler-Nichols (Ultimate Oscillation Method)

Tipe Kontrol	K_p	K_i	K_d
P	$0.50 \times K_u$	-	-
PI	$0.45 \times K_u$	$\frac{P_u}{1.2}$	-
PID	$0.60 \times K_u$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$

3. Metode

3.1. Perancangan Model BLDC

Pada tahap ini, dilakukan perancangan model motor Brushless DC (BLDC) berbasis pendekatan matematis melalui transfer function yang merepresentasikan dinamika sistem motor secara linier. Model BLDC ini dirancang untuk kebutuhan simulasi pengendalian kecepatan berbasis kontrol PID. Berikut Parameter-parameter yang digunakan pada motor BLDC yang digunakan dalam pemodelan ini:

Tabel 2. Parameter BLDC Motor

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Rotor inertia	j	0.00061	kg.m
Voltage Constant	K_e	0.637	V/(rad/s)
Torque Constant	K_t	0.2663	Nm/A
Armature Resist	R_a	0.6187	Ω

Armature induct	L_a	2.62	mH
Friction Coefficient	B	0.0291	N/(rad/s)

Model dinamik BLDC dapat dinyatakan melalui hubungan antara tegangan input dan kecepatan sudut output. Persamaan transfer fungsi diperoleh dari gabungan hukum Kirchoff (elektrik) dan hukum Newton pada (mekanik). Transfer fungsi BLDC diberikan sebagai berikut (2),(3),(4):

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K_t}{(Js + B)(L_a s + R_a) + K_e K_t} \tag{2}$$

Substitusikan nilai parameter ke dalam persamaan, diperoleh:

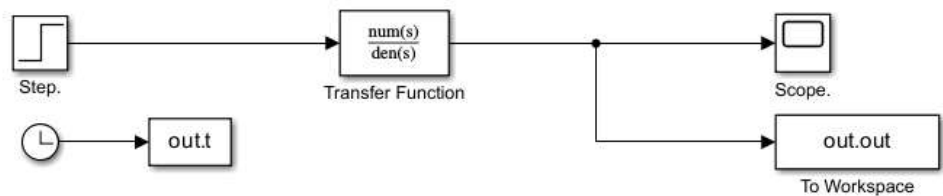
$$G(s) = \frac{0.2663}{(0.00061s + 0.0261)(0.00262s + 0.6187) + 0.1695971} \tag{3}$$

Disederhanakan menjadi:

$$G(s) = \frac{0.2663}{1.5982 \times 10^{-6}s^2 + 0.0023708s + 0.017763} \tag{4}$$

3.2. Perancangan PID Menggunakan Metode Ziegler-Nichols

Sebelum merancang kontroler PID, dilakukan serangkaian pengujian pada motor BLDC tanpa kontrol. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengidentifikasi parameter-parameter kunci yang akan digunakan dalam proses tuning PID.



Gambar 3. Diagram Blok PID



Gambar 4. Diagram Blok PID

Tabel 3. Tanggapan Sistem Tanpa PID

Parameter	Nilai	Satuan
Overshoot	0	s
Rise Time	0.3728	s
Settling Time	0.6642	s
Peak	1.4538×10^4	rpm
Peak Time	5.3980	s
Steady State Error	45.38	%

Setelah mengamati respon sistem open loop tanpa kontrol PID, langkah selanjutnya adalah merancang kontroler PID menggunakan metode Ziegler-Nichols. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam menentukan parameter PID secara sistematis berdasarkan karakteristik dinamik sistem yang telah diidentifikasi sebelumnya.

Untuk tuning PID metode Ziegler-Nichol, pertama menentukan nilai batas gain, kemudian nilai gain proporsional dinaikan secara bertahap. Peningkatan gain proporsional (K_p) dilanjutkan hingga sistem mencapai kondisi marginally stable, yang ditandai dengan munculnya osilasi berkelanjutan pada keluaran sistem. Pada kondisi ini, nilai gain proporsional (K_p) yang digunakan dan periode osilasi yang teramati dicatat sebagai gain kritis (K_u atau Ultimate Gain) dan periode osilasi kritis (T_u atau Ultimate Periode). Nilai K_u dan T_u ini kemudian digunakan untuk menghitung parameter PID optimal berdasarkan tabel 1.

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan critical gain (ku) 8.5 dan periode osilasi kritis (Tu) 0.45s. Parameter PID kemudian dihitung menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan rumusan sebagai berikut (5), (6):

$$\begin{aligned}
 K_p &= 0.6 k_u \\
 K_i &= \frac{2K_p}{T_u} \\
 K_d &= \frac{K_p T_u}{8}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Subtitusikan nilai menjadi:

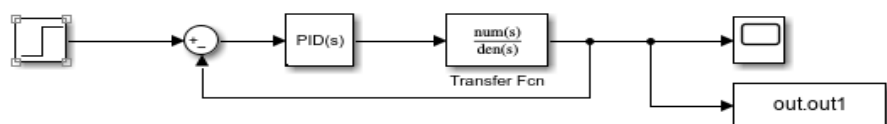
$$\begin{aligned}
 K_p &= 0.6 k_u(8.5) = 5.1 \\
 K_i &= \frac{2(5.1)}{0.45} = 22.7 \\
 K_d &= \frac{5.1(0.45)}{8} = 0.29
 \end{aligned} \tag{6}$$

Jadi fungsi transfer pengendali PID dalam domain laplace:

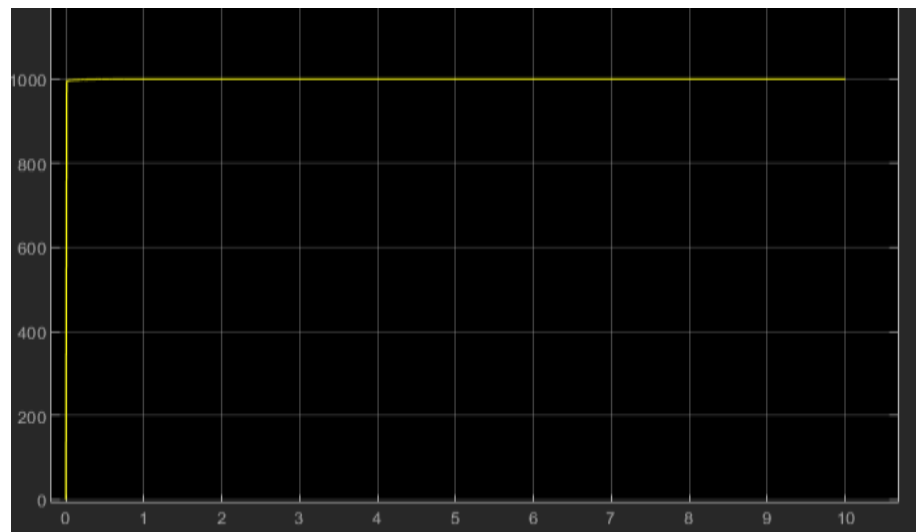
$$G_{PID}(s) = 5.1 + \frac{22.7}{s} + 0.29s \tag{7}$$

4. Hasil dan Pembahasan

Setelah parameter pengendali PID diperoleh melalui metode Ziegler-Nichols ($K_p = 5.1$, $K_i = 22.7$, dan $K_d = 0.29$), pengendali tersebut diimplementasikan pada sistem motor BLDC dalam konfigurasi closed loop. Tujuan utama dari penerapan ini adalah untuk meningkatkan performa sistem yang sebelumnya menunjukkan error steady-state yang signifikan dan respons yang relatif lambat.



Gambar 5. Diagram Blok Sistem BLDC Dengan PID



Gambar 6. Respon Sistem BLDC Dengan PID

Tabel 4. Tanggapan Sistem Dengan PID

Parameter	Nilai	Satuan
Overshoot	0	s
Rise Time	0.0041	s
Settling Time	0.0073	s
Peak	1.000e + 03	rpm
Peak Time	6.700	s
Steady State Error	0	%

Simulasi tersebut mengungkapkan bahwa waktu naik turun sistem menghasilkan nilai yang jauh lebih kecil dari 0,3728 menjadi 0,0041 detik setelah implementasi PID, yang membuktikan bahwa sistem dapat dengan cepat mencapai nilai referensi, yang secara khusus melambangkan respons yang lebih aktif. Simulasi juga memberikan waktu setting, atau dikenal sebagai waktu tunak yang panjang, yang membuktikan perilaku sistem segera mencapai kondisi steady state atau respon erosional dengan cepat, hanya memerlukan waktu 0,0073 detik dibandingkan sebelumnya yaitu 0,6642 detik. Error steady-state yang tadinya 45,38% berhasil dieliminasi sepenuhnya menjadi 0% sejak menerapkan PID. Hal tersebut membuktikan bahwa motor BLDC secara akurat dan stabil dalam mengontrol kecepatan dan dapat mencapai nilai referensi tanpa penyimpangan sistem.

Keadaan lain dari hasil simulasi adalah sebelum dan setelah pid yang sistem tidak mengalami overshoot, ini merupakan indikasi bahwa pengaturan PID menggunakan metode ziegler -nichols mencegah osilasi berlebihan dan stabilitas sistem. Selain itu, nilai puncak kecepatan sistem juga berubah dari 14,538 rpm untuk sistem loop terbuka dan 1000 rpm untuk sistem loop tertutup. Perubahan puncak tersebut menerangkan bahwa sistem mampu beradaptasi dengan sangat baik hanya untuk mencapai kecepatan yang dikehendaki.

Sistem memperlihatkan peningkatan yang telah diambil pengendali PID dengan metode Ziegler-Nichols. Sistem ini telah menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam membuat sistem menjadi lebih responsif, akurat, dan stabil. Ini telah ditunjukkan dalam waktu naik dan tunak yang sudah tidak seberapa, sistem ini telah menunjukkan kesiapan dalam mengatasi perubahan masukan secepat mungkin dan dapat stabil dalam waktu singkat. Dengan mengeliminasi steady state error hingga 0%, system telah menunjukkan keunggulan karena sistem ini tidak memiliki error pengamat. Ini sangat penting dalam aplikasi industri, seperti kendaraan listrik, drone, dan robotika, yang memerlukan presisi tinggi.

Meskipun simulasi telah menunjukkan performa yang sangat baik, perlu diingat bahwa pengujian dilakukan sepenuhnya di lingkungan simulasi. Aplikasi nyata pada perangkat keras motor BLDC mungkin akan menghadapi tantangan tambahan seperti efek non-linearitas

sistem, gesekan mekanis, dan gangguan eksternal yang dapat mempengaruhi performa. Oleh karena itu, penting untuk melakukan validasi eksperimen langsung menggunakan perangkat keras BLDC agar keandalan dan kinerja sistem kendali ini bisa dipastikan secara menyeluruh.

Selain itu, meskipun metode Ziegler-Nichols terbukti efektif dan praktis, metode ini tidak selalu menjadi yang terbaik untuk semua kriteria performa. Tuning ini juga tidak selalu memberikan parameter PID yang ideal untuk setiap sistem, tetapi memberikan kesetimbangan antara kestabilan dan kecepatan respons. Maka dari itu, penelitian selanjutnya sebaiknya mempertimbangkan untuk membandingkan hasil tuning Ziegler-Nichols dengan metode optimasi lain, seperti Particle Swarm Optimization (PSO), algoritma genetika (GA), atau logika fuzzy. Pendekatan yang lebih adaptif ini diharapkan dapat menghasilkan parameter kontrol yang lebih sesuai untuk beragam aplikasi BLDC yang kompleks.

Secara umum, penelitian ini membuktikan bahwa metode tuning PID Ziegler-Nichols yang diterapkan pada kontrol kecepatan motor BLDC telah berhasil memberikan hasil yang signifikan dalam peningkatan kecepatan, kinerja kecepatan respons, kestabilan, dan presisi kontrol. Oleh karena itu, metode tuning ini secara signifikan akan memperkaya acuan dalam pengawasan servo motor BLDC yang jauh lebih presisi dan tanggap, sekaligus membuka peluang untuk mengembangkan metode tuning yang lebih canggih dan adaptif di masa depan.

5. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil menerapkan metode Ziegler-Nichols dengan menerapkan parameter kontroler PID guna optimasi sistem kontrol kecepatan motor BLDC. Hasil utama menunjukkan bahwa implementasi kontroler PID yang telah di-tuning menggunakan metode Ziegler-Nichols (dengan $K_p = 5,1$, $K_i = 22,7$, dan $K_d = 0,29$) secara signifikan meningkatkan kinerja sistem dibandingkan dengan kondisi tanpa kontrol (open-loop). Bukti peningkatan ini terlihat jelas pada parameter respons sistem, di mana rise time berkurang drastis dari 0,3728 detik menjadi 0,0041 detik, settling time membaik dari 0,6642 detik menjadi hanya 0,0073 detik, dan steady-state error yang sebelumnya mencapai 45,38% berhasil dieliminasi sepenuhnya menjadi 0%.

Temuan ini secara langsung menjawab tujuan penelitian, yaitu menerapkan metode Ziegler-Nichols pada kontrol PID BLDC dan mengevaluasi kinerjanya berdasarkan parameter waktu respons. Peningkatan performa yang substansial, terutama dalam hal kecepatan respons dan eliminasi error steady-state, mendukung argumen bahwa metode Ziegler-Nichols merupakan pendekatan yang efektif untuk memperoleh parameter PID yang mendekati optimal untuk kontrol kecepatan motor BLDC. Implikasi dari penelitian ini adalah penegasan kembali manfaat metode Ziegler-Nichols sebagai teknik tuning PID yang sistematis dan praktis dalam aplikasi industri yang memerlukan kontrol kecepatan presisi pada motor BLDC, seperti pada kendaraan listrik, drone, dan robotika industri. Kontribusi penelitian ini terletak pada demonstrasi empiris keberhasilan optimasi kontrol BLDC menggunakan metode tuning PID klasik, yang menghasilkan sistem yang jauh lebih responsif dan akurat.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, evaluasi kinerja dilakukan sepenuhnya melalui simulasi, sehingga implementasi pada perangkat keras motor BLDC riil mungkin menunjukkan hasil yang sedikit berbeda akibat adanya faktor-faktor non-ideal yang tidak dimodelkan. Kedua, metode Ziegler-Nichols, meskipun efektif, mungkin tidak selalu menghasilkan parameter PID yang paling optimal untuk semua kriteria kinerja jika dibandingkan dengan metode optimasi heuristik atau adaptif yang lebih kompleks. Parameter BLDC yang digunakan dalam pemodelan bersifat spesifik, sehingga hasil tuning mungkin memerlukan penyesuaian untuk jenis motor BLDC dengan karakteristik yang berbeda.

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan beberapa pengembangan. Validasi eksperimental menggunakan perangkat keras motor BLDC sesungguhnya sangat penting untuk mengkonfirmasi hasil simulasi. Selain itu, studi komparatif dengan metode tuning PID lainnya, seperti algoritma genetika atau logika fuzzy, dapat dilakukan untuk menemukan metode yang paling optimal untuk aplikasi spesifik.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: MN, RM, dan WA ; Metodologi: MN dan RM ; Simulasi: MN; Validasi: MN, RM dan WA; Kurasi data: MN, RM, dan WA; Penulisan persiapan draf asli: MN, RM dan WA; Peninjauan Penulisan: TA.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Kami bersedia untuk data makalah ini dipublikasi.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian/tulisan ini. Secara khusus, ucapan terima kasih ditujukan kepada Universitas Negeri Semarang atas dukungan administratif dan bantuan teknis yang sangat berharga selama proses penelitian.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Referensi

- [1] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- [2] Gamazo-Real, J. C., Vázquez-Sánchez, E., & Gómez-Gil, J. (2010). Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *Sensors*, 10(7), 6901–6947. <https://doi.org/10.3390/s100706901>
- [3] Hameed, H. S. (2018). Brushless DC motor controller design using MATLAB applications. In *2018 1st International Scientific Conference of Engineering Sciences - 3rd Scientific Conference of Engineering Science (ISCES)* (pp. 44–49). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCES.2018.8340526>
- [4] Kommula, B. N., & Kota, V. R. (2020). Direct instantaneous torque control of Brushless DC motor using firefly algorithm based fractional order PID controller. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32(2), 133.
- [5] Krishnan, R. (2010). *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420014235>
- [6] Laily, Z. (2016). Performance comparison of PID tuning by using Ziegler-Nichols and particle swarm optimization approaches in a water control system. *Journal of ICT*, 15(1), 203–224.
- [7] Liu, Y., Zhu, Z. Q., & Howe, D. (2005). Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 41(2), 599–608. <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.844853>
- [8] Lorenzini, C., Pereira, L. F. A., & Bazanella, A. S. (2018). A generalized forced oscillation method for tuning proportional resonant controllers. *arXiv preprint arXiv:1807.06518*. <https://arxiv.org/abs/1807.06518>
- [9] Mao, Q., Xu, Y., Chen, J., Chen, J., & Georgiou, T. (2023). Classical stability margins by PID control. *arXiv preprint arXiv:2311.11460*. <https://arxiv.org/abs/2311.11460>
- [10] Milani, M. M. R. A., Çavdar, T., & Aghjehkand, V. F. (2012). Particle swarm optimization—Based determination of Ziegler-Nichols parameters for PID controller of brushless DC motors. In *2012 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications* (pp. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INISTA.2012.6246984>
- [11] Miller, T. J. E. (1989). *Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives*. Clarendon Press.
- [12] Mohanraj, D., et al. (2022). A review of BLDC motor: State of art, advanced control techniques, and applications. *IEEE Access*, 10, 54833–54869. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3175011>
- [13] Ogata, K. (2010). *Modern control engineering* (5th ed.). Prentice Hall.
- [14] Padmaraja, Y. (2003). Brushless DC (BLDC) motor fundamentals. *Microchip Technology Inc.*, 20(1), 3–15.
- [15] Sen, P. C. (1990). Electric motor drives and control—Past, present, and future. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(6), 562–575. <https://doi.org/10.1109/41.103464>
- [16] Singh, B., & Singh, S. (2009). State of the art on permanent magnet brushless DC motor drives. *Journal of Power Electronics*, 9(1), 1–17.
- [17] Tashakori, A., Ektesabi, M., & Hosseinzadeh, N. (2011). Modeling of BLDC motor with ideal back-EMF for automotive applications. In *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011 (WCE 2011) (Vol. II)*. London, U.K.
- [18] Tibor, B., Fedák, V., & Durovský, F. (2011). Modeling and simulation of the BLDC motor in MATLAB GUI. In *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 1403–1407). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984365>
- [19] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 64(8), 759–765.