

Kendali PID Digital: Implementasi Pada Sistem Tertanam menggunakan Metode Pengolahan Terdistribusi

Rida Hudaya¹, Farrah Vauzia², Taufik Irfan³, Muhamad Rafhi Rihadatus Syawal⁴, Julian Harith Al Banny Hudaya⁵

¹²³⁴⁵Politeknik Negeri Bandung, Indonesia
rida_hudaya@polban.ac.id

Abstrak

Pengembangan perangkat didaktik sistem kendali PID umumnya terbatas pada pembelajaran teoritis dan praktikum langsung di laboratorium. Perangkat Didaktik Kendali PID tradisional membatasi mahasiswa pada instruksi teoritis dan eksperimen laboratorium, yang mengharuskan kehadiran fisik di laboratorium untuk menggunakan sumber daya tersebut. Hal ini menjadi masalah ketika akses laboratorium terbatas atau diperlukan pembelajaran jarak jauh. Alat yang ada seringkali hanya mengajarkan prinsip dasar kendali PID tanpa membahas skenario yang lebih kompleks atau nyata. Kondisi ini menciptakan kebutuhan akan sumber daya pendidikan yang lebih fleksibel, yang dapat digunakan dalam berbagai lingkungan pembelajaran, termasuk pengaturan jarak jauh dan simulasi. Penelitian ini menggunakan metode eFora Agile V-Model untuk mengembangkan sistem kendali PID modular yang mencakup komponen perangkat keras dan perangkat lunak, sehingga dapat disesuaikan dengan berbagai kebutuhan tahap pembelajaran. Sistem ini dilengkapi dengan pengendali PID digital paralel, sistem pemrosesan terdistribusi yang menggunakan beberapa mikrokontroler, dan protokol komunikasi *Row Index Data Access Matrix* (rida-M) untuk pengelolaan sinyal yang efisien. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengendalikan kecepatan motor DC dengan setpoint sebesar 25000 RPM. Respon kendali menunjukkan *overshoot* yang tinggi sebesar 12%, waktu naik sebesar 0,8 detik, dan *error steady-state* sebesar 15000 RPM, yang menunjukkan perlunya optimasi lebih lanjut pada parameter PID. Hasil tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan usaha untuk dapat mengecilkan margin kesalahan agar dapat digunakan oleh pengguna akhir.

Kata kunci: sistem kendali PID, didaktik, model-v efora, pemrosesan paralel

Abstract

The development of didactic devices for PID control systems is generally limited to theoretical learning and direct laboratory practice. Traditional PID Control Didactic Devices restrict students to theoretical instruction and laboratory experiments, requiring physical presence in the laboratory to utilize these resources. This becomes problematic when laboratory access is limited or when distance learning is required. Existing tools often teach only the basic principles of PID control without addressing more complex or real-world scenarios. This situation creates a need for more flexible educational resources that can be used in various learning environments, including remote settings and simulations. This research employs the eFora Agile V-Model method to develop a modular PID control system that includes both hardware and software components, making it adaptable to diverse educational needs. The system is equipped with a parallel digital PID controller, a distributed processing system utilizing multiple microcontrollers, and the Row Index Data Access Matrix (rida-M) communication protocol for efficient signal management. Test results show that the developed system is capable of controlling the speed of a DC motor with a setpoint of 25,000 RPM. The control response exhibited a high overshoot of 12%, a rise time of 0.8 seconds, and a significant steady-state error of 15,000 RPM, indicating the need for further optimization of the PID parameters. These results show that efforts are still needed to be able to reduce the margin of error so that it can be used by end users.

Keywords: pid control system, didactic, efora agile v-model, parallel processing.

I. PENDAHULUAN

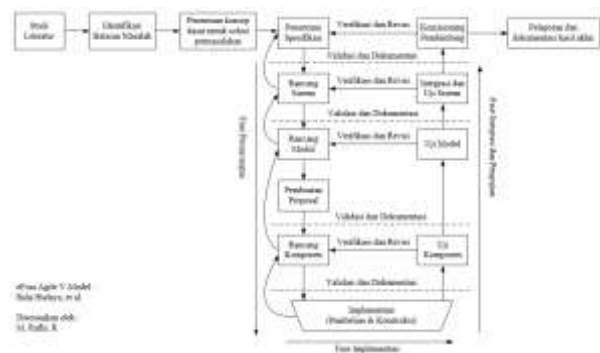
Secara historis, perangkat edukasi untuk sistem kontrol PID terbatas pada instruksi teoritis dan praktik laboratorium langsung. Perangkat Didaktik Sistem Kontrol PID Konvensional biasanya membatasi siswa pada pembelajaran di kelas dan eksperimen di tempat. Kendala ini mengharuskan kehadiran fisik di laboratorium untuk mengakses sumber daya ini, yang menjadi tantangan ketika ketersediaan laboratorium terbatas atau pembelajaran jarak jauh diperlukan. Perangkat saat ini sering kali hanya berfokus pada prinsip-prinsip dasar kontrol PID, mengabaikan aplikasi yang lebih maju atau praktis. Situasi ini menyoroti perlunya materi edukasi yang lebih serbaguna yang dapat digunakan di berbagai lingkungan pembelajaran, termasuk pengaturan dan simulasi jarak jauh. Adaptasi semacam itu akan meningkatkan aksesibilitas dan fleksibilitas pendidikan kontrol PID, yang memenuhi berbagai persyaratan pendidikan yang lebih luas [1]–[3]. Untuk mengatasi keterbatasan ini, pendekatan pendidikan yang inovatif dapat menggabungkan laboratorium virtual dan simulasi interaktif yang mereplikasi skenario kontrol PID di dunia nyata [4]. Alat-alat digital ini dapat memberi siswa pengalaman langsung dalam menerapkan teknik kontrol PID tingkat lanjut, bahkan dalam lingkungan pembelajaran jarak jauh. Selain itu, pengembangan sumber daya daring yang komprehensif dan platform pembelajaran adaptif dapat membantu menjembatani kesenjangan antara pengetahuan teoritis dan aplikasi praktis, memastikan siswa memperoleh pemahaman yang lebih holistik tentang prinsip-prinsip kontrol PID dan implementasinya di dunia nyata [5][6].

II. METODE PENELITIAN

A. eFora Agile V-Model

Studi ini menggunakan eFora Agile V-Model sebagai metodologi penelitiannya. Pendekatan ini menggabungkan siklus berulang yang memfasilitasi peningkatan berkelanjutan di seluruh tahap pengembangan. Setiap fase desain mencakup proses verifikasi dan revisi, memastikan bahwa semua langkah yang diambil sesuai dengan spesifikasi dan persyaratan yang telah ditentukan sebelumnya. Fleksibilitas model memungkinkan masukan dan modifikasi selama pengembangan, membuatnya mudah beradaptasi dan responsif terhadap kebutuhan yang berubah [7]. Metodologi Agile V-Model eFora dapat diterapkan untuk mengembangkan dan menyempurnakan sumber daya daring untuk

pendidikan pengendalian PID, yang memungkinkan peningkatan berulang berdasarkan masukan dan hasil pembelajaran siswa. Pendekatan ini akan memungkinkan pendidik untuk terus meningkatkan konten dan fungsionalitas platform pembelajaran adaptif, memastikan platform tersebut tetap selaras dengan kebutuhan siswa dan persyaratan industri yang terus berkembang. Dengan menggabungkan proses verifikasi dan revisi di setiap tahap, metodologi ini akan membantu menjaga kualitas dan relevansi sumber daya pendidikan, yang pada akhirnya berkontribusi pada jembatan yang lebih efektif antara pengetahuan teoritis dan aplikasi praktis dalam pendidikan pengendalian PID[8].



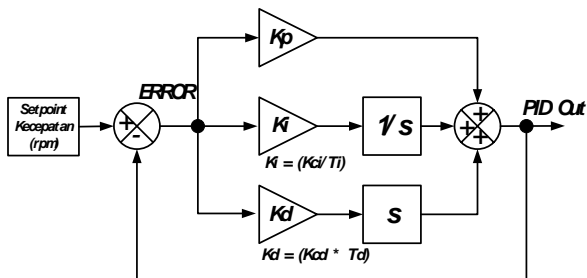
Gambar 1. Strategi pelaksanaan penelitian [7].

Seperti yang digambarkan dalam Gambar 1, Model Agile V eFora untuk pengembangan produk dimulai dengan tinjauan pustaka untuk mengumpulkan informasi. Ini diikuti dengan mendefinisikan kendala masalah dan menetapkan konsep solusi fundamental. Persyaratan teknis sistem kemudian ditetapkan dan dirancang melalui proses verifikasi dan revisi berulang. Selanjutnya, fase desain difokuskan pada modul dan komponen, dengan persiapan proposal bila diperlukan. Tahap implementasi mencakup pengadaan dan konstruksi perangkat keras dan perangkat lunak, yang menjalani validasi dan dokumentasi. Sistem yang dikembangkan kemudian diintegrasikan dan diuji secara ketat sebelum ditugaskan dengan pengawasan pengawas untuk memastikan kesiapan sistem. Proses diakhiri dengan dokumentasi dan pelaporan yang komprehensif dari hasil akhir.

B. Paralel PID Digital

Kontroler PID paralel adalah varian kontrol PID yang menggunakan tiga jalur berbeda dan bersamaan untuk kontrol proporsional (P), integral (I), dan turunan (D). Masing-masing jalur ini memberikan

kontribusi otonom terhadap sinyal kontrol akhir [9], [10]. Arsitektur pengontrol PID paralel memungkinkan penyetelan independen dari setiap jalur kontrol, memungkinkan penyesuaian karakteristik respons sistem yang lebih tepat. Desain ini dapat menawarkan peningkatan kinerja dan fleksibilitas dibandingkan dengan implementasi PID seri tradisional, terutama dalam sistem dengan dinamika kompleks atau beberapa tujuan kontrol [11].



Gambar 2. Diagram kendali PID Paralel [9].

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2, komponen P, I, dan D berfungsi secara mandiri. Memodifikasi satu koefisien secara eksklusif memengaruhi besarnya tindakan yang sesuai tanpa memengaruhi elemen lainnya. Struktur paralel memastikan bahwa perubahan dalam satu jalur tidak secara langsung memengaruhi jalur lainnya, sehingga memudahkan penyesuaian dan pemeliharaan stabilitas sistem [1], [9], [12]. Struktur PID paralel memungkinkan penyetelan independen untuk setiap tindakan kontrol, yang memungkinkan teknisi mengoptimalkan aspek tertentu dari respons sistem tanpa mengorbankan aspek lainnya. Fleksibilitas yang ditingkatkan ini dapat sangat bermanfaat dalam menangani proses atau sistem non-linier dengan konstanta waktu yang bervariasi di berbagai kondisi operasi. Lebih jauh lagi, sifat modular dari pengontrol PID paralel memudahkan penerapan strategi kontrol tingkat lanjut, seperti penjadwalan penguatan atau teknik kontrol adaptif, untuk lebih meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.

Berikut adalah persamaan umum untuk PID paralel adalah:

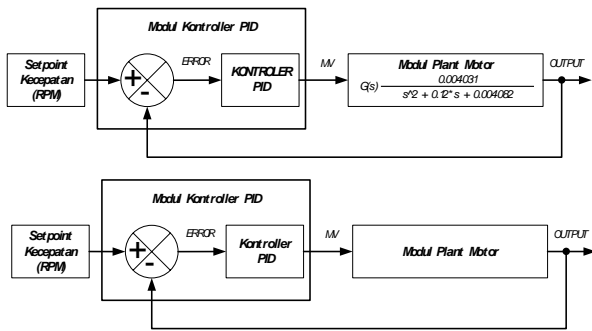
$$u(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) E(s) \quad (1)$$

Komponen dalam Persamaan (1) terdiri dari $u(s)$ yang mewakili sinyal kontrol, $E(s)$ yang menunjukkan kesalahan, K_p yang menandakan penguatan proporsional, T_i yang menunjukkan konstanta waktu integral, dan T_d yang mewakili konstanta waktu derivatif. Persamaan ini menunjukkan bagaimana elemen kontrol Proporsional, Integral, dan Derivatif

secara terpisah memengaruhi sinyal kontrol yang dihasilkan. Metode ini kemudian diubah menjadi Persamaan (2), yang telah mengalami diskritisasi menggunakan waktu sampel 10 ms [9]. Struktur PID paralel memungkinkan penyetelan independen untuk setiap istilah kontrol, yang memungkinkan pengoptimalan respons pengontrol yang sangat teliti terhadap berbagai jenis gangguan atau perubahan titik setel. Kemandirian ini dapat menghasilkan respons transien dan akurasi kondisi stabil yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi PID seri tradisional. Selain itu, struktur paralel memfasilitasi penerapan skema anti-windup yang lebih mudah dan transfer tanpa hambatan antara mode kontrol manual dan otomatis, yang selanjutnya meningkatkan ketahanan dan kepraktisan sistem kontrol secara keseluruhan.

$$u(k) = K_p \cdot e[k] + K_i + \sum_{i=0}^k e[i] \cdot T_s + K_D \cdot \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (2)$$

Persamaan (2) menunjukkan bahwa $u[k]$ adalah keluaran kontrol pada langkah waktu ke- k , dan $e[k]$ adalah kesalahan pada langkah waktu ke- k . T_s adalah waktu sampel, dan K_p , K_i , dan K_D adalah konstanta untuk komponen proporsional, integral, dan turunan, masing-masing. Struktur PID paralel juga menawarkan keuntungan dalam skenario kontrol adaptif, di mana penguatan individual dapat disesuaikan secara *real-time* berdasarkan perubahan dinamika proses atau kondisi operasi. Fleksibilitas ini memungkinkan kontrol yang lebih efisien dan responsif dalam sistem kompleks dengan karakteristik yang bervariasi atau perilaku nonlinier. Lebih jauh, konfigurasi paralel menyederhanakan proses penjadwalan penguatan, memungkinkan transisi yang lebih lancar antara titik operasi yang berbeda dan meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan di berbagai kondisi operasi yang lebih luas. Persamaan ini menghitung output kontrol secara diskrit dengan memperbarui nilai kontrol berdasarkan kesalahan saat ini, akumulasi kesalahan sebelumnya, dan laju perubahan kesalahan, memungkinkan implementasi kontrol PID yang tepat dalam sistem tertanam dengan waktu sampel tertentu, seperti 10 ms [5] [8].



Gambar 3. Diagram Sistem Kendali .

Diagram sistem kontrol pada Gambar 3 memperlihatkan beberapa elemen kunci: Input kecepatan yang diinginkan, diukur dalam RPM (Revolutions Per Minute), disediakan oleh titik setel. Kontroler PID menangani kesalahan dengan membandingkan umpan balik RPM yang difilter (PVf) dengan input kecepatan target. Sistem ini menggabungkan penggerak motor DC dan motor DC itu sendiri sebagai entitas yang dikendalikan. Umpan balik dihasilkan oleh sensor kecepatan yang menghasilkan nilai RPM, yang kemudian diproses melalui filter digital. Nilai yang difilter ini berfungsi sebagai umpan balik output kontrol PID untuk tujuan perbandingan. Diagram sistem kontrol menggambarkan mekanisme umpan balik loop tertutup untuk pengaturan kecepatan motor DC yang presisi. Kontroler PID memainkan peran penting dalam meminimalkan kesalahan antara kecepatan motor yang diinginkan dan aktual, terus-menerus menyesuaikan sinyal kontrol untuk mencapai kinerja yang optimal. Penyertaan filter digital dalam loop umpan balik membantu mengurangi kebisingan dan meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan, memastikan kontrol kecepatan yang lebih akurat dan responsif.

C. Konversi Pulsa ke RPM

"Revolusi Per Menit," disingkat RPM, adalah satuan pengukuran yang menggambarkan berapa banyak putaran penuh yang diselesaikan oleh suatu objek, seperti poros motor, dalam jangka waktu 60 detik. Dalam konteks motor listrik, RPM digunakan untuk menunjukkan kecepatan putaran motor [14].

$$rpm = \left(\frac{\text{jumlah pulsa} * 60.0 * 1000.0}{\text{waktu berlalu}} \right) \quad (3)$$

Perhitungan kecepatan putar motor dalam Revolusi Per Menit (RPM) diilustrasikan oleh Persamaan 3. Rumus ini menggunakan kuantitas sinyal yang diterima dari perangkat penginderaan, seperti enkoder putar atau sensor jarak, bersama dengan durasi waktu untuk menerima sinyal-sinyal ini. Persamaan ini

mengalikan jumlah sinyal dengan faktor konversi 60,0 dan 1000,0, mengubah satuan waktu dari milidetik menjadi menit, sehingga menghasilkan kecepatan putar dalam RPM. Perhitungan ini penting untuk aplikasi yang menuntut pengukuran kecepatan yang akurat, seperti sistem pengaturan kecepatan motor berdasarkan Pengontrol Logika Terprogram (PLC). Metode perhitungan ini dapat diterapkan pada berbagai jenis motor, termasuk motor DC, AC, dan stepper, yang menyediakan pendekatan standar untuk pengukuran kecepatan di berbagai teknologi motor. Keakuratan perhitungan RPM bergantung pada presisi perangkat penginderaan dan resolusi pengukuran waktu, yang dapat ditingkatkan dengan menggunakan enkoder atau sensor berkualitas tinggi dan rangkaian pengaturan waktu yang canggih. Selain itu, rumus ini dapat dengan mudah diimplementasikan dalam sistem berbasis mikrokontroler, memungkinkan pemantauan dan kontrol kecepatan secara *real-time* dalam berbagai aplikasi industri dan robotik [15].

D. Filter Digital (Infinite impulse Response)

Berbagai perangkat elektronik sering kali mengandung derau saluran listrik, yang dapat dihilangkan secara efektif menggunakan metode pemrosesan sinyal yang dikenal sebagai filter digital IIR (Infinite Impulse Response). Teknik ini khususnya berguna untuk menghilangkan derau dalam berbagai perangkat elektronik [10]. Pendekatan penyaringan ini dapat ditingkatkan lebih lanjut dengan menerapkan algoritme adaptif yang secara dinamis menyesuaikan koefisien penghalusan berdasarkan karakteristik sinyal, sehingga meningkatkan kinerjanya di berbagai lingkungan derau. Fleksibilitas filter IIR meluas melampaui pemrosesan suatu perangkat elektronik hingga tugas analisis berbagai sinyal lainnya. Penyaringan waktu nyata sangat penting untuk diagnosis dan pemantauan yang akurat. Selain itu, prinsip-prinsip yang mendasari teknik penyaringan ini dapat diterapkan ke bidang lain yang memerlukan pemrosesan sinyal, seperti teknik audio dan telekomunikasi, yang menunjukkan penerapannya yang luas dalam berbagai domain teknologi. Fleksibilitas metode perhitungan RPM meluas ke berbagai jenis dan aplikasi motor, menjadikannya alat yang berharga dalam bidang-bidang seperti teknik otomotif, otomasi industri, dan robotika. Implementasi lanjutan dari teknik ini dapat menggabungkan algoritma adaptif untuk memperhitungkan variasi kinerja motor dalam berbagai kondisi operasi, yang selanjutnya meningkatkan akurasi dan keandalannya. Filter IIR menawarkan keuntungan seperti kompleksitas komputasi yang lebih rendah dan kemampuan untuk

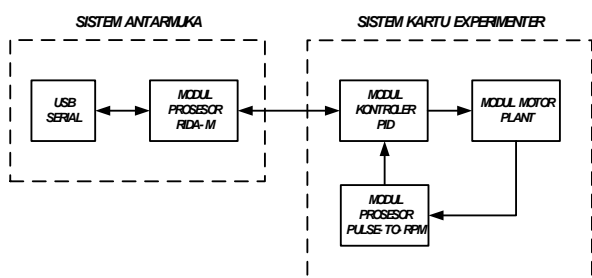
mencapai frekuensi batas yang lebih tajam dibandingkan dengan filter respons impuls terbatas (FIR), yang membuatnya sangat cocok untuk aplikasi waktu nyata dalam berbagai perangkat elektronik.

Filter ini berfungsi dengan menggabungkan keluaran yang telah difilter sebelumnya dengan sinyal yang masuk, menggunakan faktor penghalusan α untuk mengendalikan dampak setiap komponen. Pendekatan penyaringan seperti itu dapat secara efektif mengurangi gangguan frekuensi tertentu, seperti interferensi 50 Hz yang umum terjadi pada sinyal berbagai perangkat elektronik, sambil mempertahankan karakteristik penting dari bentuk gelombang yang diinginkan [16].

$$filter = \alpha \times output_{rpm} + (1 - \alpha) \times filter \quad (4)$$

Seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (4), faktor penghalusan α ditetapkan pada 0,01. Perhitungan keluaran sinyal baru melibatkan campuran keluaran sinyal yang baru diterima ($output_{rpm}$) dan nilai filter sebelumnya. Dengan nilai α yang rendah, filter memprioritaskan hasil sebelumnya, yang menghasilkan efek penghalusan atau peredaman pada derau sambil tetap responsif terhadap perubahan yang lebih substansial. Metode ini secara efektif mengurangi derau frekuensi tinggi, seperti interferensi 50 Hz, sambil mempertahankan karakteristik penting dari sinyal primer [16]. Pendekatan penyaringan ini membantu menjaga integritas sinyal dengan mengurangi fluktuasi yang tidak diinginkan sekaligus mempertahankan fitur bentuk gelombang utama yang penting. Karakteristik penyaringan *low-pass* dari metode ini sangat efektif dalam meredam variasi cepat dan jangka pendek yang mungkin mengaburkan sinyal utama yang mendasarinya. Selain itu, sifat adaptif dari teknik penghalusan ini memungkinkannya untuk menyesuaikan diri dengan perubahan bertahap pada garis dasarsinyal utama, memastikan bahwa tren jangka panjang dalam sinyal ditangkap secara akurat.

E. Pemroses Terdistribusi

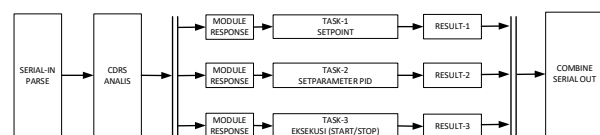


Gambar 4. Pemroses Terdistribusi.

Pemrosesan paralel mikrokontroler menggunakan beberapa mikrokontroler yang beroperasi secara bersamaan untuk menjalankan berbagai komponen tugas, sehingga mengurangi waktu eksekusi secara keseluruhan. Operasi sistem didistribusikan di antara dua atau lebih mikrokontroler, dengan masing-masing secara independen mengelola bagian tertentu dari tugas. Konsep dasar pemrosesan paralel bertujuan untuk mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan tugas dengan mengalokasikan beban kerja di beberapa prosesor yang berfungsi secara bersamaan [17]. Pemrosesan paralel dalam sistem terdistribusi dapat meningkatkan kinerja secara signifikan dengan memungkinkan eksekusi subtugas secara simultan di beberapa mikrokontroler. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi waktu pemrosesan secara keseluruhan tetapi juga memungkinkan pemanfaatan sumber daya yang lebih efisien dan skalabilitas sistem yang lebih baik. Selain itu, pemrosesan terdistribusi dapat memberikan toleransi kesalahan yang lebih baik, karena kegagalan satu mikrokontroler tidak selalu mengakibatkan kegagalan sistem secara menyeluruh.

F. Protokol Komunikasi Row Index Data Access – Matrix (rida-M)

Algoritma rida-M (*Row Index Data Access Matrix*) adalah metode dalam pemrosesan sinyal yang digunakan untuk mengatur transmisi berbagai sinyal perintah dan status dalam volume besar dalam sistem kontrol [18]. Pendekatan pemrosesan paralel ini dapat sangat bermanfaat dalam sistem kontrol yang kompleks di mana respons waktu nyata sangat penting. Algoritma rida-M semakin meningkatkan efisiensi sistem terdistribusi dengan mengoptimalkan akses data dan pola komunikasi. Dengan memanfaatkan teknik pengindeksan baris, rida-M dapat memfasilitasi pengambilan dan transmisi elemen data tertentu dengan cepat, berpotensi mengurangi latensi dan meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan.



Gambar 5. Proses protokol komunikasi rida-M.

Algoritma yang digambarkan pada Gambar 5 menunjukkan metode untuk mengatur dan mengelompokkan sinyal menurut urutan memori (termasuk Setpoint, konfigurasi parameter PID, dan eksekusi kontrol PID) dan posisi masing-masing dalam kerangka pemrograman. Pendekatan ini memungkinkan administrasi sinyal yang lebih efektif

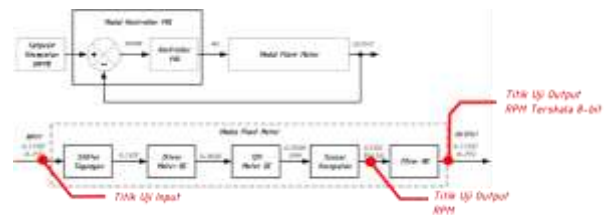
dan adaptif. Konsep yang mendasarinya bergantung pada korelasi antara posisi baris dalam sistem pemrograman dan urutan memori, yang selanjutnya digunakan untuk menyediakan pengindeksan dinamis untuk sinyal. Hal ini memfasilitasi pengaturan dan pemrosesan sinyal tanpa perlu perhitungan ulang lokasi variabel secara manual. Mikrokontroler menerapkan algoritma ini untuk meningkatkan penanganan data perintah dan status, serta untuk menyederhanakan proses desain, implementasi, pemeliharaan, dan pemecahan masalah sistem kontrol. [18], [19]. Kemampuan pengindeksan algoritma dinamis memungkinkan manajemen sinyal yang efisien, memungkinkan pembaruan dan modifikasi yang lancar pada sistem kontrol tanpa intervensi manual yang ekstensif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kelancaran sistem tetapi juga mengurangi kemungkinan kesalahan yang terkait dengan pengaturan ulang lokasi variabel secara manual. Lebih jauh, korelasi antara posisi baris dan urutan memori menyediakan struktur logistik yang menghubungkan keseluruhan sistem arsitektur, sehingga memudahkan petugas untuk memahami dan bekerja dengan kerangka dasar sistem kontrol.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

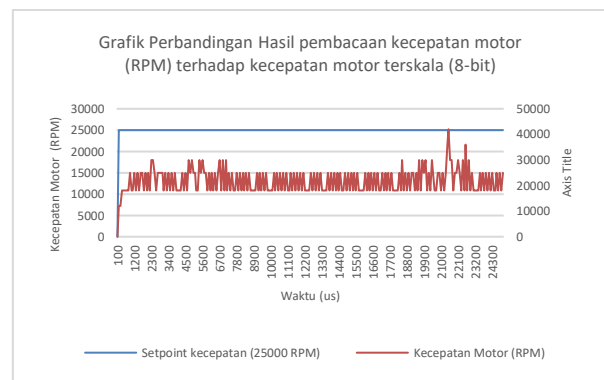
A. Pengujian Processor *Pulse-to-RPM*

Tujuan evaluasi ini adalah untuk mengevaluasi nilai kecepatan terukur dari motor plant, menganalisis hasil RPM yang dikonversi ke skala 8-bit untuk perhitungan PID, dan mengidentifikasi filter pengurangan derau yang paling sesuai. Proses penskalaan memastikan bahwa perhitungan pengendali PID setara dengan presisi 8-bit, yang memungkinkan keluaran 8-bit diubah kembali menjadi kecepatan RPM oleh Modul Pengendali PID (Gambar 6). Kemampuan pengindeksan dinamis dan manajemen sinyal yang efisien dari algoritma berkontribusi pada sistem kontrol yang lebih tangguh dan adaptif. Fleksibilitas yang ditingkatkan ini memungkinkan penyesuaian dan pengoptimalan waktu nyata, yang berpotensi meningkatkan kinerja dan respons sistem secara keseluruhan. Selain itu, arsitektur sistem yang disederhanakan yang dihasilkan dari struktur logis posisi baris dan urutan memori dapat memfasilitasi pemecahan masalah dan pemeliharaan sistem kontrol yang lebih mudah. Evaluasi ini juga bertujuan untuk menilai keakuratan dan keandalan pengukuran kecepatan motor plant di berbagai kondisi operasi. Dengan menganalisis hasil RPM yang dikonversi ke skala 8-bit, peneliti dapat memperoleh wawasan tentang presisi sistem dan keterbatasan potensial dalam merepresentasikan

berbagai kecepatan motor. Selain itu, identifikasi filter pengurangan noise yang paling sesuai sangat penting untuk meningkatkan kualitas sinyal kecepatan dan meminimalkan kesalahan dalam loop kontrol PID.



Gambar 6. Bagian Uji Prosesor *Pulse-to-RPM*.



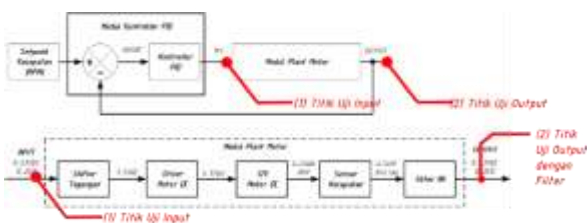
Gambar 7. Grafik perhitungan *Pulse-to-RPM* motor DC.

Seperti yang digambarkan pada Gambar 7, transformasi Pulse ke RPM menunjukkan variabilitas yang cukup besar, sehingga menghasilkan hasil pengukuran yang tidak dapat diandalkan. Diagram pengujian (Gambar 6) mengungkapkan puncak 42.000 RPM yang terjadi pada 21.500 μ s. Fluktuasi ini dapat menyebabkan perhitungan PID yang tidak menentu dan tidak dapat diprediksi karena nilai kesalahan yang terus berubah. Konversi *Pulse-to-RPM* yang tidak konsisten menimbulkan tantangan yang signifikan untuk kontrol motor yang tepat dan evaluasi kinerja. Variabilitas ini dapat dikaitkan dengan faktor-faktor seperti derau sensor, getaran mekanis, atau gangguan listrik dalam sistem pengukuran. Untuk mengatasi masalah ini, penerapan teknik penyaringan sinyal atau penggunaan metode penginderaan yang lebih kuat mungkin diperlukan untuk mendapatkan pengukuran RPM yang lebih stabil dan andal untuk kontrol PID yang efektif. Analisis lebih lanjut dari fluktuasi RPM dapat melibatkan analisis domain frekuensi untuk mengidentifikasi setiap komponen periodik dalam derau. Penerapan filter rata-rata bergerak atau filter Kalman dapat membantu memperhalus pengukuran RPM, memberikan masukan yang lebih stabil untuk pengontrol PID. Selain itu, penyelidikan terhadap

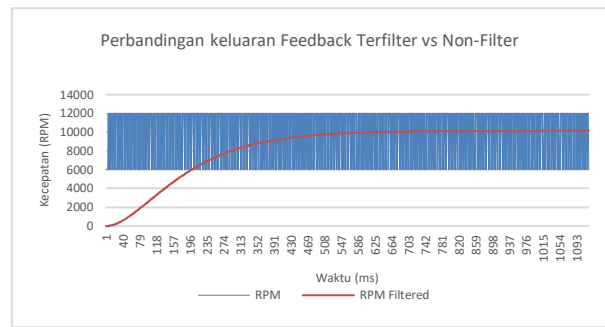
kemungkinan adanya resonansi mekanis atau harmonik listrik dalam sistem dapat mengarah pada peningkatan yang ditargetkan pada desain perangkat keras dan algoritma kontrol.

B. Pengujian Processor Filter Feedback Motor DC

Percobaan ini melibatkan penerapan input langkah dengan nilai Setpoint puncak sebesar 255 (8-bit). Modul *Pulse-to-RPM* menghasilkan sinyal analog dari fungsi pin DAC (*Digital-to-Analog*), yang berfungsi sebagai umpan balik halus untuk Modul Pengontrol PID (Gambar 8). Teknik penyaringan ini dapat dilengkapi dengan strategi kontrol adaptif yang secara otomatis menyesuaikan parameter PID berdasarkan kondisi operasi sistem saat ini. Menjelajahi penggunaan algoritma kontrol tingkat lanjut, seperti kontrol prediktif model atau kontrol logika Fuzzy, dapat menawarkan peningkatan kinerja dalam menangani dinamika nonlinier sistem motor. Lebih jauh lagi, melakukan proses identifikasi sistem yang komprehensif dapat memberikan wawasan berharga tentang perilaku motor di berbagai rentang operasi, yang memungkinkan penyetelan sistem kontrol yang lebih tepat. Investigasi lebih lanjut tentang karakteristik nonlinier motor dapat dilakukan untuk mengoptimalkan kinerja sistem kontrol di berbagai kondisi operasi. Implementasi teknik estimasi parameter waktu nyata dapat memungkinkan adaptasi algoritma kontrol secara terus-menerus terhadap dinamika sistem yang berubah. Selain itu, eksplorasi integrasi algoritma pembelajaran mesin berpotensi meningkatkan kemampuan sistem untuk memprediksi dan mengkompensasi gangguan, sehingga menghasilkan kontrol motor yang lebih kuat dan efisien.



Gambar 8. Bagian Uji Prosesor Filter Feedback.



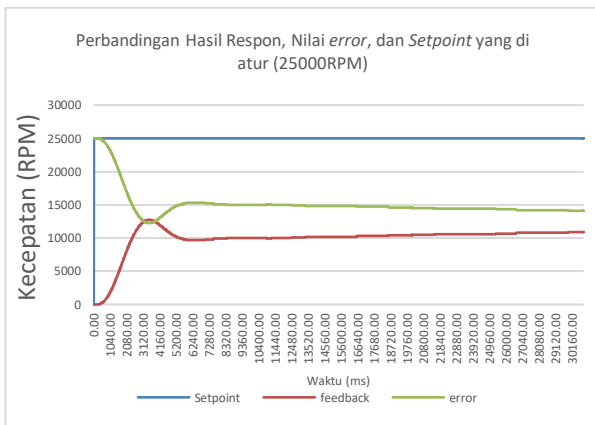
Gambar 9. Hasil Feedback terfilter dengan tanpa filter.

Pengujian yang dilakukan dengan nilai Setpoint maksimum 255 (8-bit) menggunakan input bertahap diilustrasikan dalam Gambar 9. Modul *Pulse-to-RPM* menghasilkan sinyal analog melalui fungsi pin DAC (*Digital-to-Analog*), yang berfungsi sebagai umpan balik yang lancar untuk Modul Pengontrol PID. Hasil pengujian yang digambarkan dalam Gambar 9 memberikan perbandingan visual antara respons umpan balik yang difilter dan tidak difilter. Perbandingan ini memungkinkan evaluasi efektivitas filter dalam menghaluskan sinyal umpan balik dan berpotensi meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan. Penggunaan nilai *Set point* maksimum 255 (8-bit) dalam pengujian input bertahap menunjukkan kemampuan sistem untuk menangani rentang penuh nilai input yang memungkinkan, memastikan evaluasi komprehensif perilaku pengontrol di seluruh spektrum operasionalnya. Respons umpan balik yang difilter menunjukkan lintasan yang lebih mulus dibandingkan dengan umpan balik yang tidak difilter, yang menunjukkan efektivitas filter dalam mengurangi derau dan fluktuasi mendadak dalam sinyal. Efek penghalusan ini berpotensi menghasilkan kontrol yang lebih stabil dan peningkatan kinerja sistem, khususnya dalam aplikasi yang sensitif terhadap perubahan atau osilasi yang cepat. Lebih jauh lagi, perbandingan antara respons umpan balik yang difilter dan yang tidak difilter memberikan wawasan berharga mengenai *trade-off* antara responsivitas dan stabilitas, yang memungkinkan para insinyur untuk menyempurnakan parameter filter demi perilaku sistem yang optimal.

C. Pengujian Processor PID Paralel digital

Percobaan ini melibatkan penerapan sinyal langkah dengan Setpoint puncak 25.000 RPM. Untuk pengontrol PID, parameter berikut digunakan: Penguatan Proporsional (K_p) sebesar 1, Penguatan Integral (K_i) sebesar 1, dan Penguatan Turunan (K_d) sebesar 1. Respons umpan balik yang difilter tidak hanya meningkatkan stabilitas sistem tetapi juga

meningkatkan keandalan dan umur panjang sistem kontrol secara keseluruhan dengan mengurangi keausan mekanis yang disebabkan oleh fluktuasi yang cepat. Efek penghalusan ini dapat sangat bermanfaat dalam aplikasi seperti mesin presisi, robotika, atau kendaraan otonom, di mana kontrol gerakan yang konsisten dan dapat diprediksi sangat penting. Selain itu, perbandingan antara respons yang difilter dan tidak difilter dapat berfungsi sebagai alat yang berharga untuk identifikasi sistem, yang memungkinkan para insinyur untuk lebih memahami karakteristik dinamis dari proses yang dikontrol dan mengoptimalkan strategi kontrol yang sesuai. Penerapan umpan balik yang difilter dalam sistem kontrol PID tidak hanya meningkatkan stabilitas tetapi juga memberikan wawasan berharga tentang perilaku sistem. Dengan menganalisis perbedaan antara respons yang difilter dan tidak difilter, teknisi dapat mengidentifikasi potensi sumber kebisingan atau gangguan dalam sistem, yang mengarah pada pemecahan masalah dan pengoptimalan kinerja yang lebih efektif. Lebih jauh lagi, tindakan kontrol yang lebih lancar yang dihasilkan dari umpan balik yang difilter dapat berkontribusi pada efisiensi energi dalam sistem yang digerakkan motor, karena mengurangi konsumsi daya yang tidak perlu yang terkait dengan fluktuasi cepat dalam sinyal kontrol.



Gambar 10. Hasil Respon dan Analisis Transien.

Gambar 10 menunjukkan hasil awal perbandingan nilai output PID dengan error dalam mengendalikan kecepatan motor yang diberikan input maksimum. Pada awal waktu, terlihat bahwa kecepatan motor (*feedback*) meningkat dengan cepat dari 0 RPM, dengan *error* yang mulai dari nilai tinggi dan kemudian berkurang seiring waktu. Respon *Plant* mengalami *overshoot*(%) sebesar 12.0% disertai dengan *risetime*(s) sebesar 0.8s. Respon membutuhkan waktu untuk mencapai keadaan *steady* dibutuhkan *settling time*(s) sebesar 14.0s. terjadi *steady-state error* sebesar 15000RPM.

Hasil kontrol tahap awal menunjukkan bahwa respons plant memiliki *overshoot* yang cukup tinggi, di atas 10%, dengan waktu naik mendekati 1 detik, dengan kesalahan *steady-state* sebesar sekitar 15.000 RPM, Hal ini akan menjadi bagian dari optimasi parameter PID.

Berdasarkan penjelasan diatas maka terdapat hal-hal baru dibanding dengan teknik implementasi yang telah dilaksanakan, dimana perbandingannya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan implementasi Teknik PID yang diusulkan dengan yang telah ada.

Teknik yang ada	Teknik yang diusulkan
Proses data dilakukan secara tunggal oleh sebuah mikrokontroller	Proses data dilakukan secara terdistribusi untuk mengelohan sinyal input, pemroses PID dan sinyal output. Hal ini menambah kecepatan proses dan sistem menjadi modular dan terdistribusi
Tidak menggunakan teknik rida-M	Menggunakan teknik rida-M, sehingga tingkat kesulitan relatif linear dengan tingkat kompleksitas sinyal.
Waktu delay proses meningkat dengan kompleksitas sinyal.	Waktu delay relatif konstan dengan kenaikan kompleksitas sinyal.

Realisasi dari produk ini seperti yang ditampilkan pada Gambar 11, sebuah produk prototype TKT 9.



(a) Perangkat Kendali PID TKT 9



(b) Plant uji terap



(c) Sistem Tertanam Terdistribusi

Gambar 11. Realisasi Produk Kendali dan Plant Uji Terap.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan sistem kontrol PID yang memanfaatkan metode eFora Agile V-Model, yang mencakup komponen perangkat keras dan perangkat lunak serta mendukung proses pembelajaran campuran. Sistem ini mampu mengendalikan kecepatan motor DC dengan setpoint 25.000 RPM. Hasil yang diperoleh pada tahap awal menunjukkan respons kontrol dengan *overshoot* 12%, waktu naik 0,8 detik, dan kesalahan *steady-state* sebesar 15.000 RPM. Hal ini menunjukkan bahwa diperlukan tindakan optimalisasi lebih lanjut terhadap parameter PID untuk mencapai kinerja yang diharapkan. Pengembangan perangkat ini menunjukkan potensi besar dalam mendukung pembelajaran kontrol PID yang lebih fleksibel, cocok untuk pengaturan laboratorium dan pembelajaran jarak jauh.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada pihak P3M Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi penelitian ini melalui kegiatan penelitian Skema Penelitian Peningkatan Kapasitas Laboratorium (PPKL) Nomor: B/1.10/PL1.R7/PG.00.03/2024

REFERENSI

- [1] W. L. Luyben, "Tuning proportional-integral-derivative controllers for integrator/deadtime processes," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 35, no. 10, pp. 3480–3483, 1996. doi: 10.1021/ie9600699.
- [2] T. V. Moghaddam, N. Bigdeli, and K. Afshar, "A new hybrid method for tuning fractional order proportional-integral-derivative (PID) controllers in frequency domain," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 6, no. 34, pp. 7699–7708, 2011, doi: 10.5897/IJPS11.601.
- [3] P. Shrivastava, S. Surendra, R. K. Ranjan, A. Shrivastav, and B. Priyadarshini, "PI, PD and PID Controllers Using Single DVCCTA," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. 43, no. 3, pp. 673–685, 2019, doi: 10.1007/s40998-019-00180-z.
- [4] S. Ardi, N. Indah, and A. Lestari, "Design of Monitoring and Control of SCADA Systems on Curing Machine using PLC and HMI Wonderware InTouch," pp. 200–206, 2020.
- [5] K. 'Ulya, Y. C. Arif, and L. P. S. Raharja, "Monitoring and Control Design of Automatic Transfer Switch-Automatic Main Failure with Human Machine Interface (HMI)," *J. Ilm. Tek. Elektro Komput. dan Inform.*, vol. 8, no. 3, p. 475, 2022, doi: 10.26555/jiteki.v8i3.23750.
- [6] H. Meddeb, Z. Abdellaoui, and O. Ezzine, "HUMAN MACHINE INTERFACE DESIGN OF INDUSTRIAL AUTOMATED MACHINE USING SIMATIC SCADA SYSTEM," *Int. J. Ind. Eng. Theory Appl. Pract.*, vol. 30, no. 2, pp. 435–450, 2023, doi: 10.23055/ijietap.2023.30.2.8561.
- [7] R. Hudaya, R. Wahyu Tri Hartono, M. R. R. Syawal, and J. H. A. B. Hudaya, "ARSITEKTUR JARINGAN IoT SECARA HIRARKI TERDISTRIBUSI TANPA SERVER MENGGUNAKAN KOMPUTER TEPI-ke-KABUT UNTUK DAERAH TERPENCIL," 2023
- [8] J. Vappou *et al.*, "Development of Human Machine Interface (HMI) Training Kit as A Learning Media for Industrial Automation Engineering Practical Courses Development of Human Machine Interface (HMI) Training Kit as A Learning Media for Industrial Automation Engineering P", doi: 10.1088/1742-6596/1737/1/012047.
- [9] J. Crowe *et al.*, *PID Control New Identification and Design Methods*. 2005.
- [10] A. Visioli, "Research trends for PID controllers," *Acta Polytech.*, vol. 52, no. 5, pp. 144–150, 2012, doi: 10.14311/1656.
- [11] A. K. Gupta, R. K. Singh, and U. Mitra, "A Study of Real-Time Human Machine Interface for Scheduling Smart Microgrids," in *2022 International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences, ICETEMS 2022*, IEEE, 2022, pp. 135–140. doi: 10.1109/ICETEMS56252.2022.10093329.
- [12] Z. Wu, Y. Chen, J. Viola, Y. Luo, Y. Q. Chen, and D. Li, "Fractional order [proportional integral derivative] controller design with specification constraints: More flat phase idea," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 3650–3656, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.2047.
- [13] H. Youness, M. Moness, and M. Khaled, "MPSoCs and multicore microcontrollers for embedded PID control: A detailed study," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2122–2134, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2355036.
- [14] D. D. Aryanto and S. Sukir, "Comparison of DC Motor Speed Calculation Efficiency between Inductive Proximity Sensor and Rotary Encoder," *Elinvo (Electronics, Informatics, Vocat. Educ.)*, vol. 8, no. 1, pp. 19–25, 2023, doi: 10.21831/elinvo.v8i1.55750.
- [15] S. Fitriani and Y. Sofyan, "Simulator Human Machine Interface (HMI) using visual basic on the SCADA system," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/830/3/032016.
- [16] A. Rahmatillah and Ataulkarim, "IIR digital filter design for powerline noise cancellation of ECG signal using arduino platform," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 853, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1742-6596/853/1/012009.
- [17] P. Harrington and W. P. Ng, "Investigation of the speed-up of a dual microcontroller parallel processing system in the execution of a mathematical operation," no. June, pp. 25–26, 2012.
- [18] R. Hudaya, "Penerapan Algoritma Row Index Data Access Matrix Pada Sistem Perangkat Lunak Antarmuka Data Digital Perintah/Status Yang

- Heterogen,” in *Prosiding Seminar Teknik Elektro & Informatika*, Bandung: IRWNS, 2014, p. 5.
- [19] D. Nurdin Bagenda and R. Hudaya, “Pengaruh Struktur Pemrograman Dan Compiler Pada Kecepatan Operasi Menggunakan Arduino Uno,” in *Prosiding Seminar Teknik Elektro & Informatika*, Bandung: IRWNS, 2016, pp. 1–6.