

Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Kontroler PID Adaptif Berbasis Model Reference Adaptive Control (MRAC)

Syalman Al Farizi¹, Wahyudi²

^{1,2} Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia 50275
e-mail: syalmanalfarizi@students.undip.ac.id

Abstrak—Motor DC banyak digunakan dalam industri karena keunggulannya dalam pengendalian kecepatan, namun tantangan utama yang dihadapi adalah ketidakpastian parameter yang dapat mempengaruhi kinerja sistem kontrol. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan sistem kontrol adaptif yang dapat menyesuaikan diri dengan perubahan parameter secara *real-time*. Penelitian ini bertujuan untuk merancang kontroler PID adaptif berbasis *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) dengan *MIT Rule* untuk pengendalian kecepatan motor DC. Metode yang digunakan adalah menggabungkan kontroler PID dengan MRAC, yang memungkinkan penyesuaian parameter kontroler PID berdasarkan perbandingan antara keluaran *plant* dan model referensi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontroler yang dirancang dapat mengendalikan motor DC dengan baik, meskipun terjadi perubahan pada konstanta parameter motor. Nilai γ yang optimal ditemukan melalui metode *trial and error*, dan kontroler PID adaptif dapat menjaga keluaran *plant* agar tetap sesuai dengan model referensi pada berbagai kondisi operasional. Kesimpulannya, kontroler PID adaptif berbasis MRAC dengan *MIT Rule* efektif dalam mengatasi ketidakpastian parameter dan memastikan kinerja yang stabil pada sistem pengendalian motor DC.

Kata kunci: Motor DC, PID Adaptif, Model Reference Adaptive Control (MRAC), MIT Rule, Pengendalian Kecepatan

Abstract—DC motors are extensively used in various industries due to their advantages in speed control. However, a major challenge is the uncertainty of parameters, which can impact the performance of the control system. To address this issue, an adaptive control system is required that can adjust to parameter variations in real time. This study aims to design an adaptive PID controller based on Model Reference Adaptive Control (MRAC) with the MIT Rule for DC motor speed regulation. The approach integrates the PID controller with MRAC, allowing for the adjustment of PID parameters by comparing the system's output with the reference model. Simulation results demonstrate that the proposed controller can effectively regulate the DC motor, even with changes in motor parameters. The optimal values are determined using the trial and error method, and the adaptive PID controller successfully keeps the system output aligned with the reference model under various operating conditions. In conclusion, the MRAC-based adaptive PID controller with the MIT Rule is effective in overcoming parameter uncertainties and ensuring stable performance in DC motor control systems.

Keywords: DC Motor, Adaptive PID, Model Reference Adaptive Control (MRAC), MIT Rule, Speed Control

I. PENDAHULUAN

Motor DC memiliki keunggulan dalam pengendalian kecepatan dibandingkan motor AC, sehingga banyak diterapkan dalam berbagai industri meskipun memiliki biaya perawatan yang lebih tinggi [1]. Namun, salah satu tantangan utama dalam sistem pengendalian motor DC adalah kebutuhan akan model matematis yang akurat atau pengetahuan penuh mengenai dinamika sistem untuk mengatasi ketidakpastian pada parameter, yang berpotensi memengaruhi performa kontrol secara optimal [2]. Dari ketidakpastian tersebut diperlukan desain sistem

kontrol dengan mekanisme identifikasi parameter agar sistem dapat menyesuaikan perubahan parameter yang terjadi pada *plant*.

Teknik kontrol adaptif adalah suatu metode yang secara otomatis menyesuaikan *controller* secara *real-time* untuk mencapai atau mempertahankan tingkat kinerja sistem kontrol yang diinginkan, terutama ketika parameter model dinamik *plant* tidak teridentifikasi dan/atau berubah seiring waktu [3]. *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) merupakan salah satu metode dalam kontrol adaptif, yang bekerja dengan membandingkan keluaran *plant*

dengan model referensi untuk menyesuaikan parameter kontroler secara terus-menerus [4], [5].

Teknik MRAC dapat dikombinasikan dengan kontrol PID untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan performa optimal pada berbagai kondisi operasi. Dalam pendekatan ini, parameter PID dapat diperbarui secara otomatis berdasarkan perubahan yang terdeteksi melalui MRAC dan MIT Rule, yang dirancang untuk mempercepat respons adaptif dalam kondisi operasi yang bervariasi [6], [7].

Pada prinsip MRAC-PID, parameter PID diperbarui berdasarkan teknik kontrol MRAC dan MIT Rule, dengan tujuan agar *plant* dapat mengikuti model referensi yang diharapkan secara efisien [8]. Keberhasilan pendekatan ini sangat bergantung pada akurasi model adaptif serta kualitas data eksperimen dari model referensi [9]. Pendekatan ini sangat penting dalam pengendalian motor DC karena kemampuannya yang adaptif dalam menyesuaikan parameter kontroler secara *real-time* sesuai dengan perubahan kondisi operasi. Hal ini memungkinkan sistem untuk mempertahankan performa yang stabil dan optimal di berbagai situasi, menjadikannya solusi yang efektif untuk pengendalian yang dinamis.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang kontroler PID adaptif berbasis MRAC dengan MIT Rule pada pengendalian kecepatan motor DC. Melalui penerapan MRAC dengan MIT Rule, kecepatan motor DC dapat stabil dalam berbagai kondisi operasional.

II. METODE

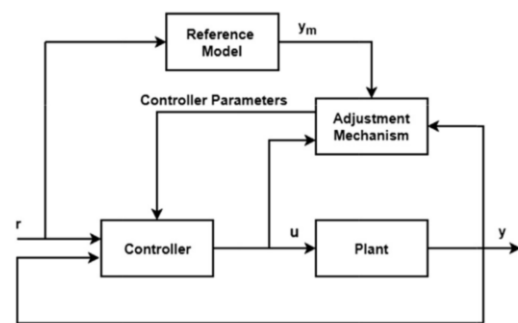
A. Kontrol PID

Tiga jenis mekanisme kontrol yaitu kontrol proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D) digabungkan dalam sistem kontrol PID. Kontrol PID banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri karena kemampuannya yang mengintegrasikan fungsi dari masing-masing jenis kontrol tersebut. Dalam pengendalian PID, *output* pengendali dihitung berdasarkan tiga komponen utama, yaitu nilai *error* saat ini, integral dari nilai *error*, dan turunan dari nilai *error*. Persamaan matematis untuk menggambarkan perilaku kontrol PID ini dapat dilihat pada persamaan (1), di mana T_i adalah waktu integral, T_d adalah konstanta waktu turunan, dan C adalah nilai awal dari kontroler. Kombinasi ketiga komponen ini memungkinkan pengendali PID untuk menghasilkan respons yang lebih akurat dan stabil, baik dalam kondisi sistem yang konstan maupun dinamis [10], [11], [12].

$$c(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + C \quad (1)$$

B. Model Reference Adaptive Control (MRAC)

MRAC merupakan salah satu metode kontrol adaptif, yang memberikan umpan balik dan aturan kontrol untuk mengendalikan sistem dengan ketidakpastian parameter serta kemampuan pelacakan yang baik. Gambar 1 menunjukkan diagram blok MRAC. Dalam MRAC, penguatan kontroler diperbarui berdasarkan perbandingan antara keluaran *plant* dan keluaran model referensi, sehingga respons *plant* dapat menyesuaikan respons model referensi dengan baik. Model referensi adalah model dari respons yang diharapkan dari keluaran *plant* pada *loop* tertutup. Mekanisme penyesuaian parameter dilakukan dengan dua metode, yaitu metode penurunan gradien (MIT rule) dan penerapan metode kestabilan [13], [14]. Diagram blok sistem MRAC diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem MRAC.

MRAC dimulai dengan mendefinisikan nilai *error* e seperti pada persamaan (2). Pada Gambar 1, y merupakan keluaran *plant*, sedangkan y_m adalah keluaran dari model referensi:

$$e = y - y_m \quad (2)$$

Untuk menerapkan aturan MIT rule, kita menggunakan sistem tertutup (*closed-loop*) di mana kontroler hanya memiliki satu parameter yang dapat disesuaikan, yaitu θ . Persamaan (3) menunjukkan fungsi *error cost* dari parameter θ .

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (3)$$

Tujuan utama dari MIT rule ini adalah untuk membuat nilai J mendekati nol, yang berarti *error* antara keluaran sistem dan model referensi menjadi sekecil mungkin. Hal tersebut dapat dirumuskan dalam persamaan (4)

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (4)$$

Sinyal kontrol u , yang terdapat pada persamaan (5), terdiri dari sinyal kontrol u_c dan parameter θ yang didefinisikan pada persamaan (5) dan (6).

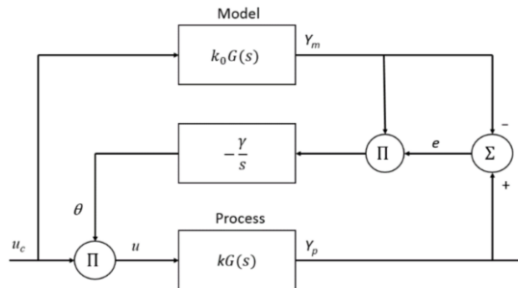
$$u = \theta u_c \quad (5)$$

$$\theta = \frac{k_0}{k} \quad (6)$$

Persamaan (7) merupakan persamaan *MIT rule* untuk hukum melakukan penyesuaian parameter dalam sistem MRAC [15]:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma Y_m e \quad (7)$$

Di mana γ adalah gain penyesuaian, Y_m adalah *output* dari model referensi, dan e adalah *error* antara keluaran *plant* dan model referensi. Diagram blok MRAC untuk penyesuaian *feedforward gain* berdasarkan MIT rule diperlihatkan pada Gambar 2.



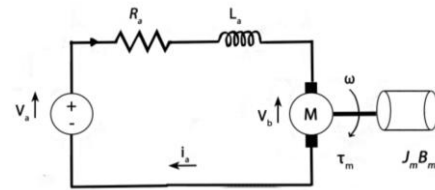
Gambar 2. Diagram blok MRAC untuk penyesuaian *feedforward gain* berdasarkan MIT rule.

C. Model Dinamik Motor DC

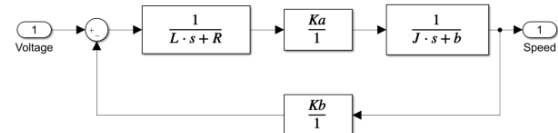
Motor DC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik dengan cara memanfaatkan interaksi antara medan magnet yang dihasilkan oleh kutub-kutub magnet dan arus yang mengalir pada inti armature. Motor ini menghasilkan torsi yang secara langsung memberikan gerak rotasi sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik. Ketika dihubungkan dengan roda atau drum dan kabel, motor ini dapat menghasilkan gerak translasi. Rangkaian ekuivalen motor DC ditunjukkan pada Gambar 3 dan nilai-nilai parameter motor DC yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1, persamaan diferensial yang menggambarkan dinamika fisik dan perilaku elektrik dari motor ini dapat diubah ke domain frekuensi menggunakan transformasi Laplace. Fungsi alih motor DC diperlihatkan pada persamaan (8) [16]:

$$\frac{w(s)}{v_a(s)} = \frac{K_a}{(sL_a + R_a)(sJ_m + B_m) + K_a K_b} \quad (8)$$

Diagram blok fungsi alih dari motor DC ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Representasi skematik dari motor DC



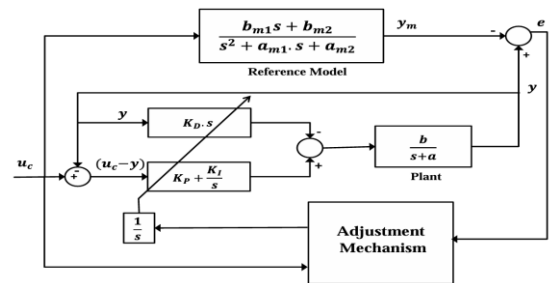
Gambar 4. Diagram Blok Motor DC.

Tabel 1. Parameter motor DC.

Parameter	Nilai
Momen inersia	$J_m = 0,000052 \text{ kg/m}^2$
Koefisien gesekan	$B_m = 0,01 \text{ N.ms}$
Konstanta GGL	$K_b = 0,235 \text{ V/rad} \cdot \text{s}^{-1}$
Konstanta torsi	$K_a = 0,235 \text{ Nm/A}$
Resistansi listrik	$R_a = 2 \text{ ohm}$
Induktansi listrik	$L_a = 0,23 \text{ H}$
Tegangan armature	V_a
Tegangan GGL	V_b
Arus armature	i_a
Torsi yang dihasilkan	τ_m
Sudut poros motor	θ
Torsi beban	T_L
Kecepatan motor	w

D. Algoritma Tuning PID menggunakan MRAC untuk Motor DC

Algoritma PID yang akan dirancang adalah PID adaptif di mana nilai *gain* proporsional, integral, dan derivatif secara otomatis diperbarui sedemikian rupa sehingga keluaran sistem (*plant*) dapat mengikuti keluaran model referensi. Gambar 5 menunjukkan diagram blok dari algoritma *tuning* PID menggunakan MRAC [17].



Gambar 5. Diagram blok algoritme *Tuning* PID menggunakan MRAC.

Dimisalkan *plant* merupakan sistem orde dua dengan persamaan (9).

$$G(s) = \frac{b}{s+a} \quad (9)$$

Sinyal kontrol didapat seperti persamaan (10).

$$u(t) = K_P[u_c - y] + \frac{K_I}{s}[u_c - y] - K_D \cdot s \cdot y \quad (10)$$

Setelah beberapa perhitungan matematis, diperoleh persamaan (11).

$$\frac{y(s)}{u_c(s)} = \frac{b(K_P s + K_I)}{(1+bK_D)s^2 + (a+bK_P)s + bK_I} \quad (11)$$

Untuk menghitung parameter persamaan dari kontrol PID, pendekatan dengan persamaan (12).

$$s^2 + \frac{(a+bK_P)}{(1+bK_D)}s + \frac{bK_I}{(1+bK_D)} \approx s^2 + a_{m1}s + a_{m2}s \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan (9) dan (10), model referensi dapat diperoleh sebagai persamaan (13).

$$\frac{y_m(s)}{u_m(s)} = \frac{b_{m1}s + b_{m2}}{s^2 + a_{m1}s + a_{m2}} \quad (13)$$

Untuk menentukan persamaan *tuning* parameter PID menggunakan MIT Rule, persamaan tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{dK_P}{dt} = -\gamma_P \frac{\partial \psi}{\partial K_P} = -\gamma_P \frac{\partial \psi}{\partial e} \times \frac{\partial e}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial K_P} \quad (14)$$

$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_I \frac{\partial \psi}{\partial K_I} = -\gamma_I \frac{\partial \psi}{\partial e} \times \frac{\partial e}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial K_I} \quad (15)$$

$$\frac{dK_D}{dt} = -\gamma_D \frac{\partial \psi}{\partial K_D} = -\gamma_D \frac{\partial \psi}{\partial e} \times \frac{\partial e}{\partial y} \times \frac{\partial y}{\partial K_D} \quad (16)$$

Dari persamaan (13), (14), (15), dan (16) diperoleh persamaan *tuning* PID akhir pada persamaan (17) – (19).

$$\frac{dK_P}{dt} = -\gamma_P e \frac{bs[u_c - y]}{(1+bK_D)s^2 + (a+bK_P)s + bK_I} \quad (17)$$

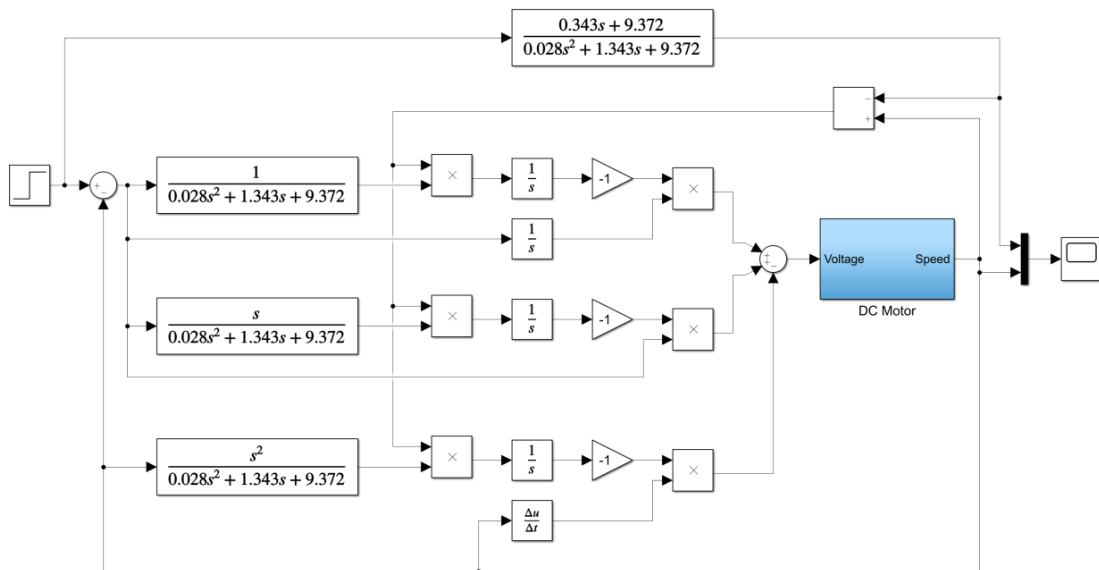
$$\frac{dK_I}{dt} = -\gamma_I e \frac{b[u_c - y]}{(1+bK_D)s^2 + (a+bK_P)s + bK_I} \quad (18)$$

$$\frac{dK_D}{dt} = \gamma_D e \frac{bs^2[y]}{(1+bK_D)s^2 + (a+bK_P)s + bK_I} \quad (19)$$

Persamaan (17), (18), dan (19) diimplementasikan ke model Simulink MATLAB untuk menjadi kontrol PID adaptif pada *plant* motor DC. Model Simulink tersebut ditunjukkan pada Gambar 6. Model referensi motor DC yang digunakan pada Gambar 6 merupakan model motor DC yang telah dikontrol menggunakan kontrol PID dan menghasilkan keluaran yang stabil dengan nilai $K_P = 0,1098$; $K_I = 3$; $K_D = 0$ [16]. Persamaan model referensi yang digunakan diperlihatkan pada persamaan (20).

$$\frac{w(s)}{v_a(s)} = \frac{0,343s + 9,372}{0,028s^2 + 1,343s + 9,372} \quad (20)$$

Model *plant* motor DC yang digunakan pada Gambar 6 merupakan model motor DC yang sesuai dengan persamaan (8) dengan nilai parameter yang terdapat pada Tabel 1.



Gambar 6. Diagram blok algoritma *tuning* PID menggunakan MRAC.

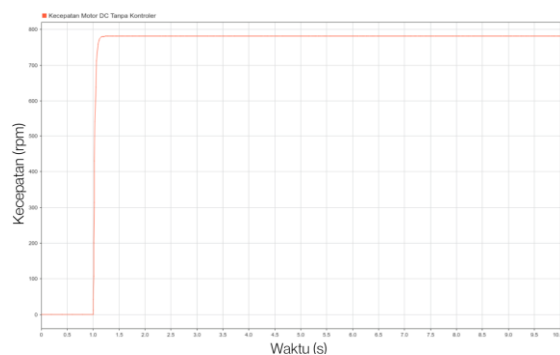
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini, dilakukan evaluasi kinerja sistem pengendalian kecepatan motor DC

menggunakan kontroler PID adaptif berbasis MRAC. Pengujian pertama dilakukan untuk melihat respons sistem tanpa kontroler dengan menguji *plant* motor DC secara langsung. Pada bagian B, pencarian nilai γ optimal dilakukan dengan memanfaatkan empat indikator kinerja, yaitu *Integral of Squared Error* (ISE), *Integral of Time-weighted Squared Error* (ITSE), *Integral of Absolute Error* (IAE), dan *Integral of Time-weighted Absolute Error* (ITAE). Nilai γ yang menghasilkan nilai paling minimum pada keempat indikator tersebut dipilih sebagai nilai γ optimal, yang dapat meminimalkan kesalahan antara keluaran sistem dengan model referensi. Selanjutnya, kontrol PID adaptif berbasis MRAC dengan variasi nilai γ dibandingkan dengan kontrol PID dengan nilai K_p , K_i , dan K_d yang sudah optimal, menggunakan indikator kinerja yang sama (ISE, ITSE, IAE, dan ITAE). Pada bagian C, pengujian dilakukan setelah mendapatkan nilai γ optimal, dengan mengaplikasikan kontroler pada *plant* motor DC dengan konstanta parameter yang bervariasi untuk menguji kemampuan adaptasi kontroler terhadap perubahan kondisi sistem. Setiap variasi parameter *plant* diuji menggunakan dua jenis kontroler, yaitu kontrol PID dan kontrol PID berbasis MRAC. Kedua kontroler tersebut kemudian dibandingkan dengan menggunakan indikator kinerja yang sama, dan hasil perbandingan akan dianalisis untuk mengevaluasi sejauh mana kedua kontroler mampu meminimalkan kesalahan dan mempertahankan kinerja optimal dalam berbagai kondisi *plant*.

A. Pengujian Plant Motor DC tanpa Kontroler

Pada subbab ini, dilakukan pengujian terhadap *plant* motor DC tanpa menggunakan kontroler untuk mengamati respons sistem terhadap perubahan *input*. *Setpoint* yang diberikan berupa *input step* dengan nilai 250 dengan durasi waktu 10 detik (*stop time*). Gambar 7 menunjukkan hasil dari pengujian sistem tanpa adanya kontroler.



Gambar 7. Hasil pengujian *plant* motor DC tanpa kontroler.

Berdasarkan Gambar 7, sistem menghasilkan *final value* sebesar 781. Hasil ini menunjukkan bahwa

keluaran sistem pada pengujian ini melebihi nilai *setpoint*, yang mengindikasikan bahwa sistem belum mampu mengikuti perubahan *input* dengan akurat tanpa adanya kontroler.

B. Pengujian Nilai γ pada Kontrol PID Adaptif MRAC MIT Rule dengan Metode Trial dan Error

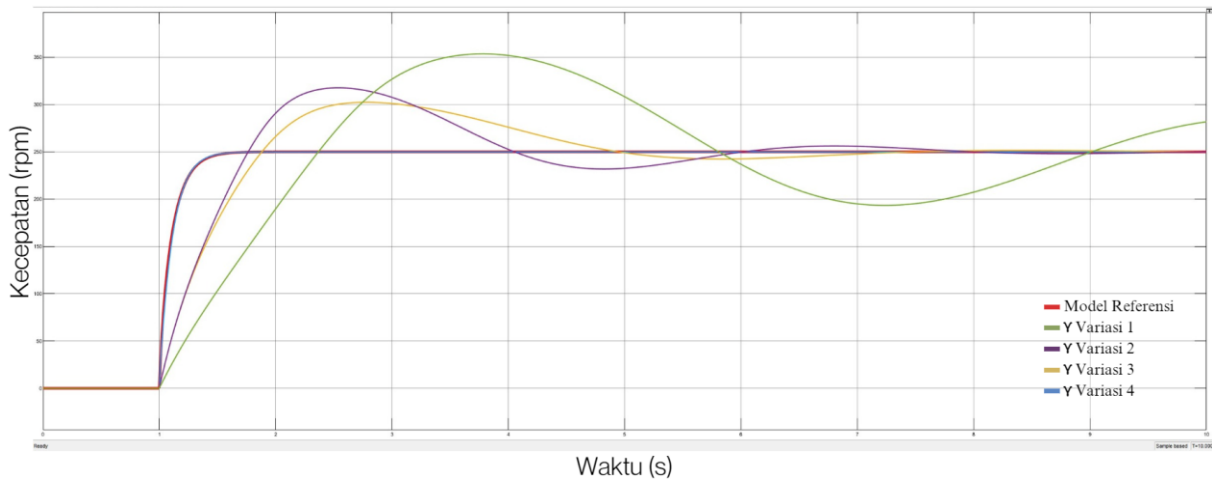
Pada subbab ini, dilakukan pencarian nilai γ yang optimal untuk kontroler PID adaptif berbasis MRAC. Proses ini bertujuan untuk menentukan parameter γ yang dapat meminimalkan kesalahan antara keluaran sistem dan model referensi, sehingga sistem dapat mengikuti respons yang diinginkan. Pencarian nilai γ optimal dilakukan dengan memanfaatkan indikator kinerja ISE, ITSE, IAE, dan ITAE. Setiap pengujian dilakukan dengan *input step* sebesar nilai 250, dan durasi *stop time* 10 detik. Nilai γ yang menghasilkan nilai minimum pada keempat indikator tersebut akan dipilih sebagai nilai γ optimal untuk diterapkan pada kontroler PID adaptif berbasis MRAC. Gambar 8 menunjukkan grafik keluaran model referensi dan keluaran *plant* motor DC pada berbagai nilai γ yang diuji. Setiap kurva mewakili respons sistem dengan parameter γ yang berbeda. Dari Gambar 8, dapat dilihat bahwa perubahan nilai γ mempengaruhi kemampuan sistem dalam mengikuti model referensi, baik dari *overshoot*, *rise time*, dan *settling time*. Tabel 2 dan Tabel 3 memperlihatkan perbandingan kinerja sistem pada masing-masing nilai γ . Tabel 2 menyajikan perbandingan nilai *overshoot*, *rise time*, dan *settling time* untuk setiap variasi γ yang diuji. Tabel 3 menunjukkan perbandingan kinerja antara kontrol PID adaptif dengan empat variasi nilai γ serta kontrol PID dengan nilai $K_p = 0,1098$, $K_i = 3$, dan $K_d = 0$ yang diperoleh dari Bab II Subbab D.

Tabel 2. Perbandingan kinerja sistem pada variasi nilai γ

Variasi	γ_p	γ_i	γ_d	Overshoot (%)	Rise Time (ms)	Settling Time (s)
1	1	1	1	-	748,403	-
2	0,5	1	0,1	74,138	286,578	9,870
3	0,5	0,5	0,1	53,030	387,122	9,770
4	8	0,1	0,1	0,994	233,980	1,770

Tabel 3. Perbandingan kinerja pada kontrol PID dan PID adaptif berbasis MRAC

Kontroler	ISE	ITSE	IAE	ITAE
PID	3.351	3.526	26,67	29,54
PID-MRAC 1	50.280	149.900	525,3	2165
PID-MRAC 2	18.010	30.370	211,5	553
PID-MRAC 3	16.880	27.480	197,7	501,3
PID-MRAC 4	3.429	3.621	28,51	35,57

Gambar 8. Keluaran model referensi dan keluaran *plant* Motor DC dengan berbagai variasi nilai γ .

Berdasarkan Tabel 2, nilai γ variasi keempat dengan nilai $\gamma_P = 8$; $\gamma_I = 0,1$; dan $\gamma_D = 0,1$ menunjukkan kinerja terbaik dibandingkan dengan variasi nilai γ lainnya. Pada nilai γ ini, sistem berhasil mencapai kinerja optimal dengan *overshoot* yang minimal, *rise time* yang lebih cepat, dan *settling time* yang lebih singkat. Berdasarkan Tabel 3, kontrol PID dan PID adaptif berbasis MRAC dengan variasi γ keempat menghasilkan nilai yang paling minimum. Hal ini menunjukkan bahwa variasi γ keempat memberikan performa terbaik dalam mengoptimalkan respons sistem, baik dalam hal akurasi maupun kecepatan respons. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variasi γ keempat merupakan pilihan yang paling optimal untuk sistem pengendalian kecepatan motor DC.

C. Pengujian Kontroler pada Plant Motor DC dengan Konstanta Parameter Berbeda

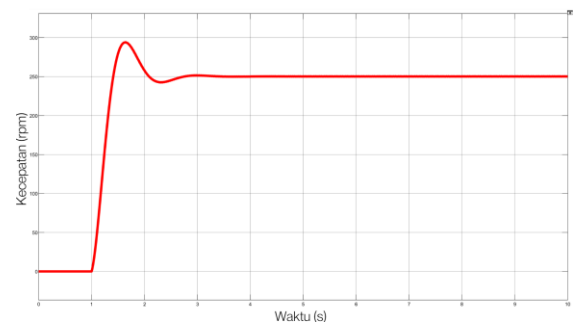
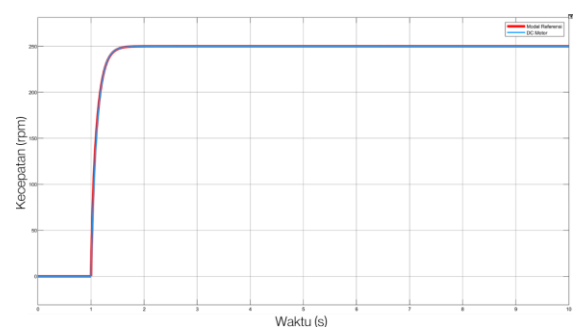
Pada subbab ini dilakukan pengujian kinerja kontrol PID dan kontrol PID adaptif berbasis MRAC pada *plant* motor DC dengan variasi konstanta parameter yang berbeda. Konstanta parameter *plant* motor DC diubah untuk melihat bagaimana kontrol PID adaptif dapat beradaptasi dan tetap memberikan kinerja yang baik, meskipun ada perubahan dalam karakteristik sistem. Kemudian akan dilihat juga bagaimana respons kontrol PID terhadap perubahan tersebut. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa kontrol PID adaptif yang dirancang dapat diterapkan secara luas pada *plant* motor DC dengan kondisi yang berbeda. Digunakan empat indikator kinerja untuk mengetahui kinerja dari kedua kontroler yang digunakan.

Pada pengujian ini, konstanta parameter tersebut akan diubah dengan menggunakan dua variasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Kontrol PID yang digunakan memiliki nilai $K_P = 0,1098$, $K_I = 3$, dan $K_D = 0$. Kontrol PID adaptif menggunakan nilai γ yang optimal dari uji coba subbab sebelumnya. Gambar 9 menunjukkan grafik keluaran *plant* motor

DC variasi 1 dengan kontrol PID, sedangkan Gambar 10 menunjukkan grafik keluaran *plant* yang sama menggunakan kontrol PID adaptif berbasis MRAC.

Tabel 4. Parameter motor DC dengan dua variasi

Parameter	Variasi 1	Variasi 2
Momen inersia	0,0001 kg/m^2	0,00025 kg/m^2
Koefisien gesekan	0,05 $N.ms$	0,0001 $N.ms$
Konstanta GGL	0,235 $V/rad \cdot s^{-1}$	0,05 $V/rad \cdot s^{-1}$
Konstanta torsi	0,235 Nm/A	0,05 Nm/A
Resistansi listrik	1 ohm	0,5 ohm
Induktansi listrik	0,5 H	0,0015 H

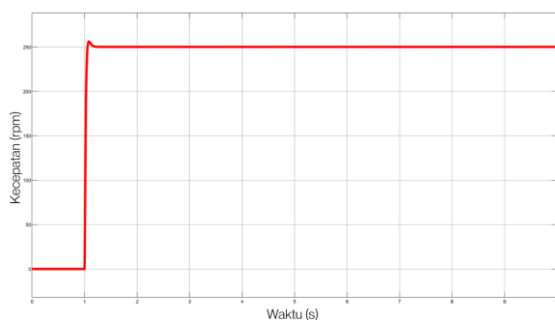
Gambar 9. Grafik keluaran *plant* Motor DC variasi 1 dengan kontrol PID.Gambar 10. Grafik keluaran *plant* motor DC variasi 1 dengan kontrol PID adaptif berbasis MRAC.

Perbandingan kinerja kontroler antara kedua kontroler menggunakan indikator kinerja ISE, ITSE, IAE, dan ITAE ditunjukkan pada Tabel 5.

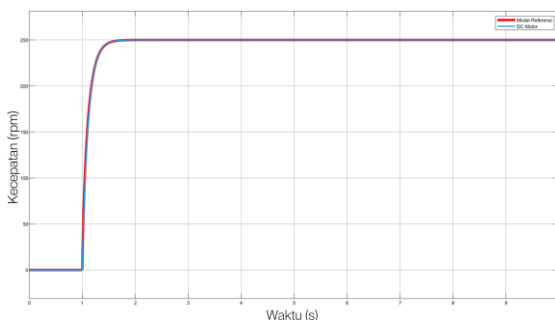
Tabel 5. Perbandingan kinerja pada kontrol PID dan PID adaptif berbasis MRAC dengan parameter motor DC variasi 1.

Kontroler	ISE	ITSE	IAE	ITAE
PID	9.798	11.120	73,21	97,55
PID-MRAC	3.466	3.661	29,04	37,76

Gambar 10 menunjukkan respons sistem yang lebih baik dibandingkan Gambar 9, dengan *settling time* yang lebih cepat tanpa adanya *overshoot* dan osilasi. Tabel 5 menunjukkan bahwa kontrol PID adaptif berbasis MRAC menghasilkan nilai yang lebih rendah pada keempat indikator kinerja dibandingkan dengan kontrol PID. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa kontrol PID adaptif lebih efektif dalam mengurangi *error* awal, menghasilkan respons cepat, dan mencapai nilai *setpoint* dengan efisien. Dengan demikian, kontrol PID adaptif berbasis MRAC memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kontrol PID konvensional pada *plant* motor DC dengan parameter variasi 1. Gambar 11 menunjukkan grafik keluaran *plant* motor DC variasi 2 dengan kontrol PID, sedangkan Gambar 12 menunjukkan grafik keluaran *plant* yang sama menggunakan kontrol PID adaptif berbasis MRAC.



Gambar 11. Grafik keluaran *plant* motor DC variasi 2 dengan kontrol PID.



Gambar 12. Grafik keluaran *plant* motor DC variasi 2 dengan kontrol PID adaptif berbasis MRAC.

Perbandingan kinerja kontroler antara kedua kontroler menggunakan indikator kinerja ISE, ITSE, IAE, dan ITAE ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Perbandingan kinerja pada kontrol PID dan PID adaptif berbasis MRAC dengan parameter motor DC variasi 2.

Kontroler	ISE	ITSE	IAE	ITAE
PID	729,9	736,3	5,09	5,197
PID-MRAC	3.461	3.655	27,87	31,38

Gambar 11 menunjukkan respons sistem yang lebih cepat dibandingkan Gambar 12, dengan *overshoot* yang lebih rendah dan *settling time* yang lebih cepat tanpa adanya osilasi. Tabel 6 menunjukkan bahwa kontrol PID menghasilkan nilai yang lebih rendah pada keempat indikator kinerja dibandingkan dengan kontrol PID adaptif berbasis MRAC. Hal tersebut terlihat dari grafik pada Gambar 11 dimana respons sistem menggunakan kontrol PID sangat cepat dengan sedikit *overshoot*. Dengan demikian, kontrol PID konvensional memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kontrol kontrol PID adaptif berbasis MRAC pada *plant* motor DC dengan parameter variasi 2. Berdasarkan Tabel 5 dan Tabel 6, kontrol PID adaptif yang dirancang dapat beradaptasi dengan baik terhadap perubahan keadaan motor DC. Hal tersebut terlihat dari keempat nilai-nilai indikator kinerja yang relatif sama pada kedua variasi motor. Sebaliknya, kontrol PID konvensional tidak dapat beradaptasi terhadap perubahan *plant*, yang terlihat dari perbedaan nilai keempat indikator kinerja yang signifikan antara kedua variasi motor. Dengan demikian, PID adaptif berbasis MRAC dapat menjaga kinerja yang optimal meskipun terjadi perubahan pada sistem, sementara PID konvensional tidak.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengevaluasi kinerja sistem pengendalian kecepatan motor DC dengan kontroler PID adaptif berbasis MRAC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol PID adaptif berbasis MRAC lebih efektif dibandingkan kontrol PID konvensional dalam mengendalikan kecepatan motor DC yang terdapat perubahan kondisi sistem. Pengujian tanpa kontroler menunjukkan bahwa sistem motor DC tidak dapat mengikuti *input* dengan akurat. Setelah dilakukan pencarian nilai γ yang optimal, ditemukan bahwa parameter $\gamma_P = 8$; $\gamma_I = 0,1$; dan $\gamma_D = 0,1$ memberikan kinerja terbaik. Perbandingan kinerja antara kontrol PID dan PID adaptif berbasis MRAC menunjukkan bahwa kontrol PID adaptif mampu beradaptasi lebih baik terhadap perubahan parameter motor DC, sementara kontrol PID konvensional tidak. Secara keseluruhan, kontrol PID adaptif berbasis MRAC yang di rancang memberikan respons yang stabil dan akurat, menjadikannya pilihan optimal untuk aplikasi pengendalian motor DC dalam berbagai kondisi operasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. I. Mosaad, "DC motor control using model reference adaptive control," *Yanbu Journal of Engineering and Science*, May 2023, doi: 10.53370/001c.74154.
- [2] K. Oh and J. Seo, "Online Tuning Rule Based Adaptive Speed Control Algorithm for DC Motors Using Recursive Least Squares with Forgetting," 2019, pp. 33–44. doi: 10.1007/978-3-030-17369-2_3.
- [3] S. Mallick and U. Mondal, "Comparative Performance Study of Lyapunov Based MRAC Technique and MRAC Augmented with PID Controller for Speed Control of a DC motor," in *2019 Second International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP)*, IEEE, Feb. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICACCP.2019.8882982.
- [4] S. Jingzhuo and W. Huang, "Model Reference Adaptive Iterative Learning Speed Control for Ultrasonic Motor," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181815–181824, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3029106.
- [5] E. Mathew, T. Pawar, and B. Jaganatha Pandian, "Control of a Coupled CSTR Process using MRAC-MIT Rule," in *2019 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, IEEE, Mar. 2019, pp. 1–5. doi: 10.1109/i-PACT44901.2019.8960078.
- [6] I. K. Mohammed, A. I. Abdulla, and J. M. Ahmed, "SPEED CONTROL OF DC MOTOR USING MRAC AND GENETIC ALGORITHM BASED PID CONTROLLER," 2020. [Online]. Available: <http://ijieeee.org.in>
- [7] P. Chen *et al.*, "Adaptive Internal Model Control Based on Parameter Adaptation," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 23, p. 3842, Nov. 2022, doi: 10.3390/electronics11233842.
- [8] S. Mallick and U. Mondal, "MRAC based intelligent PID controller design technique for a class of dynamical systems," *Sādhanā*, vol. 49, no. 2, p. 166, May 2024, doi: 10.1007/s12046-024-02457-4.
- [9] B. Nayak and S. Sahu, "Parameter estimation of DC motor through whale optimization algorithm," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 10, no. 1, p. 83, Mar. 2019, doi: 10.11591/ijpeds.v10.i1.pp83-92.
- [10] D. Debnath, P. Malla, and S. Roy, "Position control of a DC servo motor using various controllers: A comparative study," *Mater Today Proc*, vol. 58, pp. 484–488, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.008.
- [11] S. J. Hammoodi, K. S. Flayyih, and A. R. Hamad, "Design and implementation speed control system of DC Motor based on PID control and matlab simulink," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, vol. 11, no. 1, p. 127, Mar. 2020, doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp127-134.
- [12] Sami Hasan and Aya Moufak Ismael, "Implementable Self-Learning PID Controller Using Least Mean Square Adaptive Algorithm," *Iraqi Journal of Science*, pp. 148–154, Jan. 2021, doi: 10.24996/ijcs.2021.SI.1.20.
- [13] R. Rajesh and S. N. Deepa, "Design of direct MRAC augmented with 2 DoF PID controller: An application to speed control of a servo plant," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, vol. 32, no. 5, pp. 310–320, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jksues.2019.02.005.
- [14] S. MANNA, D. K. SINGH, and A. K. AKELLA, "Design and Implementation of MRAC & MRAC-PID Feedback for Turntable," *Gazi University Journal of Science*, vol. 36, no. 3, pp. 1171–1185, Sep. 2023, doi: 10.35378/gujs.1052850.
- [15] Munadi, M. A. Akbar, T. Naniwa, and Y. Taniai, "Model Reference Adaptive Control for DC motor based on Simulink," in *2016 6th International Annual Engineering Seminar (InAES)*, IEEE, Aug. 2016, pp. 101–106. doi: 10.1109/INAES.2016.7821915.
- [16] S. Sachit and B. R. Vinod, "MRAS Based Speed Control of DC Motor with Conventional PI Control — A Comparative Study," *Int J Control Autom Syst*, vol. 20, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2022, doi: 10.1007/s12555-020-0470-1.
- [17] B. Singh and V. Kumar, "Design and Simulation of Auto Tuning of PID Controller using MRAC Technique for Coupled Tanks System," 2013. [Online]. Available: www.ijrsr.net