

Simulasi Kontrol Pid Pada Pengendali Kecepatan Kereta Api Menggunakan Sistem Miniatur Kereta Api Skala *Half O*

1st Reza Setyawan

Direktorat kampus Purwokerto

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

rezasetyawan@student.telkomuniversit
y.ac.id

2nd Yulian Zetta Maulana, S.T., M.T

Direktorat kampus Purwokerto

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

yulianm@telkomuniversity.ac.id

3rd Gunawan Wibisono, S.T., M.T

Direktorat kampus Purwokerto

Universitas Telkom Purwokerto

Purwokerto, Indonesia

gwibisono@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kereta api miniatur skala HO (1:87) tidak hanya digunakan sebagai hobi, tetapi juga sebagai media edukasi dan penelitian dalam bidang sistem kontrol. Pengendalian kecepatan yang stabil dan responsif penting untuk memastikan performa optimal terhadap perubahan beban dan kondisi jalur. Penelitian ini mensimulasikan pengendali PID (Proportional-Integral-Derivative) pada sistem kecepatan kereta miniatur guna menguji kestabilan dan efektivitas kontrol. Proses dimulai dari perancangan sistem, identifikasi model transfer function berdasarkan data tegangan dan kecepatan, hingga implementasi simulasi menggunakan MATLAB/Simulink. Penyetelan parameter PID dilakukan melalui metode autotuning (PID Tuner) dan trial-and-error. Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu tanpa kontrol dan dengan kontrol PID. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan PID mempercepat rise time menjadi 0,0106 detik, menurunkan settling time menjadi 0,0161 detik, menghasilkan overshoot sebesar 1,531%, serta meminimalkan steady-state error hingga 0,00004%. Sistem menjadi lebih cepat, stabil, dan akurat terhadap set point. Penelitian ini membuktikan bahwa kontrol PID efektif dalam pengaturan kecepatan kereta miniatur dan memiliki potensi untuk diterapkan dalam sistem kendali kereta api skala penuh.

Kata kunci— PID, kereta api miniatur skala HO, motor DC, Simulink, kontrol kecepatan

I. PENDAHULUAN

Kereta api skala HO (1:87) merupakan model populer yang digerakkan motor DC dan digunakan tidak hanya sebagai hobi, tetapi juga sebagai media edukasi dan penelitian di bidang teknik [1]. Model ini menjadi platform ideal untuk menguji sistem kontrol, seperti pengendalian kecepatan yang stabil dan responsif, sebelum diterapkan pada sistem kereta api skala penuh.

Sistem kontrol kecepatan yang efektif sangat penting dalam menjaga performa kereta api agar dapat berjalan sesuai dengan kecepatan yang diinginkan dan meningkatkan efisiensi energi. Tanpa kontrol kecepatan yang tepat, kereta api dapat mengalami ketidakstabilan, seperti keadaan roda kereta api mengalami slip [2], kecepatan yang berfluktuasi atau ketidakmampuan menyesuaikan diri dengan perubahan kondisi jalur, yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan keselamatan dan efisiensi operasi [3].

Sementara itu, sistem kontrol kecepatan pada lokomotif diesel-electric nyata, seperti lokomotif di Indonesia, menggunakan kombinasi antara *governor* elektronik, *throttle notch*, dan sistem kontrol berbasis mikroprosesor (seperti

EM2000) [4][5]. Sistem ini terbukti andal dan stabil dalam operasi jangka panjang. Namun demikian, beberapa studi menyebutkan bahwa sistem konvensional seperti *governor* cenderung terlalu konservatif, karena lebih memprioritaskan kestabilan RPM daripada efisiensi energi atau respons terhadap kondisi dinamis seperti perubahan beban atau medan [6].

Meskipun sistem kontrol kecepatan pada lokomotif modern telah menggunakan mikroprosesor yang andal dan tetapi bersifat tertutup [7], penelitian ini dilakukan sebagai bentuk pengembangan dengan menerapkan algoritma PID pada sistem miniatur. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi performa kontrol secara terbuka dan dapat dimodifikasi, yang bermanfaat untuk kebutuhan penelitian, pendidikan, maupun sistem kereta dalam skala terukur.

Metode kontrol berbasis PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan salah satu metode yang paling populer dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi sistem kontrol, termasuk pada sistem pengaturan kecepatan. Dengan mengatur parameter proporsional, integral, dan derivatif yang tepat, sistem kontrol PID mampu merespons perubahan dinamis dengan cepat serta meminimalkan *error* atau deviasi antara kecepatan aktual dan kecepatan referensi [8].

Simulasi PID pada kereta api model skala HO memberikan peluang untuk menguji sistem kontrol dalam skala kecil sebelum diterapkan pada kereta api nyata. Pengendalian kecepatan ini memungkinkan evaluasi kinerja PID terhadap berbagai kondisi operasi seperti perubahan beban dan gangguan jalur [9]. Penelitian ini bertujuan mensimulasikan dan menganalisis sistem kontrol kecepatan berbasis PID menggunakan MATLAB/Simulink, dengan harapan dapat berkontribusi pada pengembangan teknologi kontrol otomatis di bidang transportasi.

II. KAJIAN TEORI

A. Kereta Api

Kereta api adalah moda transportasi massal terestrial. Kereta berjalan sendiri (traksi diesel atau dengan tenaga (traksi listrik) di jalur pemandu baja khusus yang ditentukan oleh dua rel paralel. Kereta api mengangkut penumpang dan kargo. Kereta api diklasifikasikan sebagai listrik, diesel, turbin gas [10].

Lokomotif adalah kendaraan bertenaga yang digunakan untuk menarik atau mendorong rangkaian kereta di atas rel. Lokomotif berfungsi sebagai sumber daya utama dalam

sistem kereta api dan biasanya dilengkapi dengan mesin diesel, listrik, atau uap yang menggerakkan roda melalui sistem mekanik atau listrik [11]. Adapun dimensi fisik dari lokomotif Indonesia, panjang lokomotif adalah 14.134 mm, dengan lebar 2.642 mm, dan tinggi maksimum 3.636 mm [12].

Kendaraan trailer (gerbong penumpang) tidak bergerak sendiri, mereka dirancang untuk mengangkut orang atau barang [10]. Adapun dimensi gerbong penumpang memiliki panjang 20.920 mm, lebar 2.990 mm, dan tinggi 3.815 mm [12].

B. Miniatur Kereta Api Skala HO

Skala HO, yang merupakan singkatan dari “setengah O”, adalah salah satu ukuran skala kereta api yang paling populer. Skala ini memiliki rasio skala 1:87, yang berarti bahwa model kereta api berukuran 1/87 ukuran kereta api yang sebenarnya. Ukuran skala kereta api mengacu pada rasio dimensi kereta api model dengan dimensi kereta api dalam kehidupan nyata yang diwakilinya [13].

Rel jaringan kereta api mini ini dihubungkan ke sumber daya listrik yang memadai [10]. Sistem analog tampaknya merupakan cara untuk menangani kereta model. Rel diberi daya 0÷14V DC oleh catu daya tegangan variabel. Kecepatan kereta analog bergantung pada nilai tegangan, dan rasa perjalanan bergantung pada polaritasnya [13].

Kecepatan motor disesuaikan dengan menggunakan pengontrol tegangan jangkar. Tegangan jangkar 4V telah ditemukan sebagai nilai minimum di mana gerakan kondisi tunak kereta melalui kurva tercapai. Kecepatan model kereta pada tegangan jangkar minimum dan maksimum (4 dan 12 V) masing-masing sama dengan sekitar 0,10 dan 0,58 m/s. Jika mengacu pada kereta skala penuh, kecepatan model kereta yang diperkecil masing-masing setara dengan 31,32 dan 181,65 km/jam [14].

C. PID (*Proportional, Integral, Deverative*)

PID telah menjadi tulang punggung keberhasilan pengontrolan beragam variabel proses industri. Kontrol PID dapat dijumpai hampir pada setiap industri yang bergerak dalam bidang proses. Menurut sebuah survey dinyatakan bahwa 97 % industri yang bergerak dalam bidang tersebut menggunakan PID dalam pengontrolannya [15].

D. System Identification Matlab

Identifikasi sistem adalah proses membangun model yang merepresentasikan perilaku suatu proses nyata mungkin. Kualitas model biasanya diukur berdasarkan fungsi *error* antara *output* proses (yang mungkin terganggu oleh *noise*) dan *output* model. *Error* ini kemudian digunakan untuk menyesuaikan parameter model [16].

E. Method Autotuning

Autotuning dalam konteks kontrol adalah proses penalaan (*tuning*) otomatis dari sebuah pengendali yang dilakukan secara *online* pada interval waktu yang telah ditentukan, atau sebagai respons terhadap perintah pengguna atau peristiwa pemicu tertentu [17].

F. Skala

Skala adalah konsep penting dalam geografi yang memungkinkan kita memahami dunia di sekitar kita. Skala mengacu pada rasio antara ukuran objek di permukaan bumi dan ukurannya saat direpresentasikan pada peta [18].

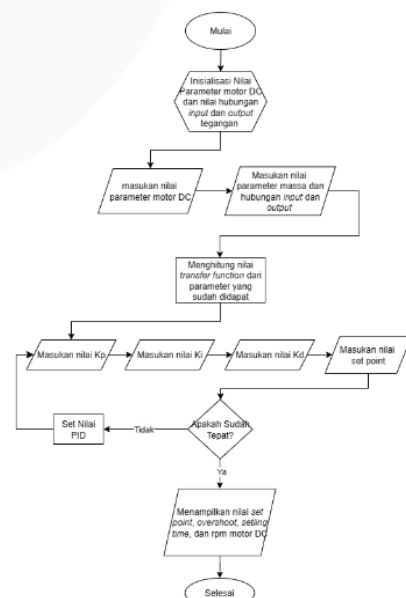
III. METODE

A. Flowchart Sistem



GAMBAR 1
(FLOWCHART SISTEM)

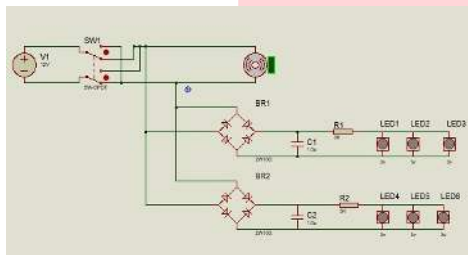
Pada gambar 3.5 *Flowchart* sistem menjelaskan terkait cara kerja dari sistem kontrol miniatur kereta api dan simulasi implementasi pengendali PID pada kecepatan miniatur kereta api. Sistem kontrol miniatur kereta api bekerja dengan sumber tegangan AC diubah ke DC oleh adaptor 12V sebelum menjadi *input* tegangan kontroler. Pada Kontroler terdapat potensiometer sebagai pengatur variasi tegangan dengan besar nilai tegangan yang terpantau pada voltmeter LED. Kecepatan laju miniatur kereta menyesuaikan tegangan yang keluar dari putaran potensiometer pada PWM.



GAMBAR 2 (A)
(FLOWCHART SIMULASI)

Pada gambar 2 (B) menjelaskan tentang kerja simulasi pada MATLAB yang diawali dengan pemberian nilai tegangan *input* dan Rpm motor DC sebagai nilai *transfer function* motor dc, data nilai hubungan *input* tegangan dan *output* tegangan pada saat motor dc sebagai mesin miniatur kereta api melaju 1 putaran penuh guna menghitung dan menetapkan nilai *function transfer*. Sistem akan lanjut dengan menunggu proses pemberian nilai parameter PID (K_p , k_i , dan K_d) dan nilai *setpoint* sebagai ambang batas pergerakan kecepatan motor DC. Nilai hasil pengendalian PID seperti nilai *set point*, *overshoot*, *settling*, dan rpm motor DC itu yang akan menjadi *output* atau data yang akan dianalisis.

B. Rangkaian Skematik Sistem

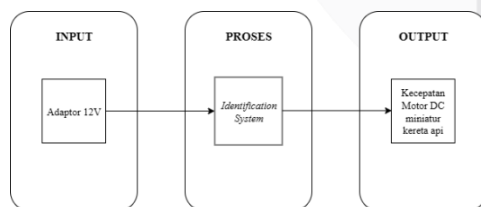


GAMBAR 3
(SKEMATIK SISTEM)

Pada rangkaian skematik sistem kontrol miniatur kereta api skala HO menggunakan adaptor 12 VDC sebagai *supply*, terdapat rangkaian PWM sebagai pengatur kecepatan mesin penggerak (motor DC), dan terdapat *toggle switch* guna mengubah polaritas atau sebagai pengubah arah maju atau mundur laju kereta api sebelum tegangan terhubung dengan rel. Kemudian voltmeter sebagai indikator nilai tegangan yang akan diberikan ke beban motor DC dan lampu LED.

C. Blok Diagram

Blok diagram sistem menjelaskan terkait proses perancangan blok diagram sistem yang mencakup *input*, proses, dan juga *output* dari penelitian ini.

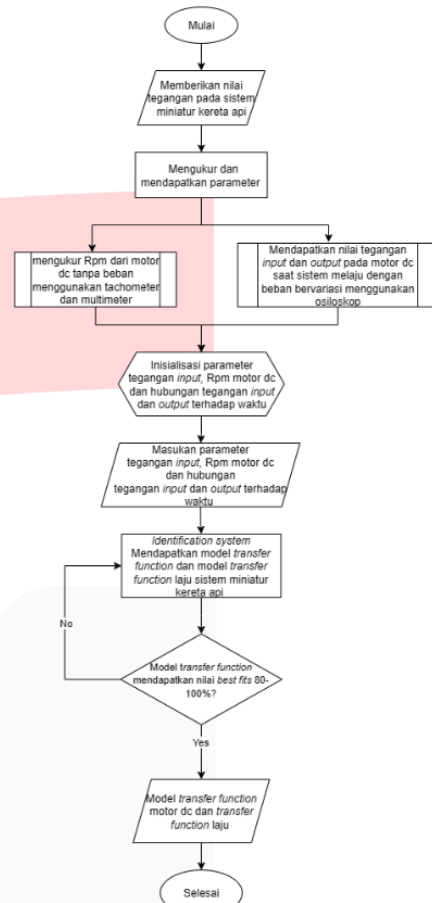


GAMBAR 4 (C)
(BLOK DIAGRAM)

Pada gambar 4 () *blok diagram* sistem menjelaskan mengenai sistem pada penelitian ini dengan rancang bangun miniatur kereta api dan simulasi pengendali PID. Adaptor 12V berperan sebagai *input* nilai tegangan konstan dari sistem kontrol miniatur kereta api. Potensiometer berperan mengubah variasi tegangan yang akan menjalankan motor dc di dalam mesin miniatur kereta api guna laju kecepatan. Kecepatan motor DC sebagai *output* pada sistem, dimana

motor dc mendapatkan tegangan *input* untuk menggerakkan miniatur kereta api.

Pada gambar 5 (C) *flowchart* proses menjelaskan bagaimana proses untuk mendapatkan nilai parameter model *transfer function* untuk pengujian yang dilakukan melalui simulasi pada Matlab dan mendapatkan hasil *output* kecepatan kereta api model skala HO.



GAMBAR 5

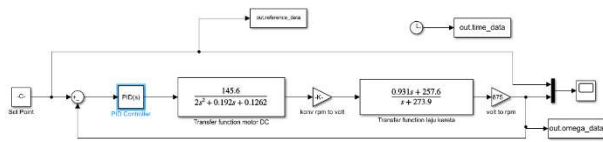
(FLOWCHART PROSES IDENTIFICATION SYSTEM)

Pada *flowchart* ini *identification system* menjadi alat sistem estimasi nilai model *transfer function* yang akan digunakan pada pengujian melalui simulasi Matlab, sebelum proses *identification system*, pengujian menggunakan tachometer mendapatkan parameter tegangan *input* dan Rpm *output* motor dc sebagai mesin untuk diproses dalam *identification system* mendapatkan model *transfer function* motor dc dan pengujian menggunakan osiloskop digital untuk mendapatkan parameter selanjutnya yaitu hubungan tegangan *input* dan *output* motor dc terhadap waktu sebagai mesin melaju selama 1 putaran penuh menggunakan 5 variasi beban. Model *transfer function* yang didapat pada proses *identification system* melalui beberapa tahap proses penyempurnaan untuk model mendapatkan nilai *best fit* yang baik.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini berisi paparan objektif peneliti terhadap hasil-hasil penelitian berupa penjelasan dan analisis terhadap penemuan-penemuan penelitian, penjelasan serta penafsiran dari data dan hubungan yang diperoleh, serta pembuatan

generalisasi dari penemuan. Apabila terdapat hipotesis, maka pada bagian ini juga menjelaskan proses pengujian hipotesis beserta hasilnya.



GAMBAR 6
(DESAIN SIMULINK)

Pada gambar menunjukkan desain sistem PID yang akan digunakan sebagai pengendali kecepatan miniatur kereta api, dengan menggunakan set point nilai referensi tegangan *input* dan *output* rpm motor dc dan dengan 2 blok *transfer function* dimana blok 1 digunakan sebagai *transfer function* sistem motor dc dan blok 2 digunakan sebagai *transfer function* yang menggambarkan data hubungan tegangan *input* dan *output* motor dc melaju didalam 1 putaran penuh, nilai dari *transfer function* blok 2 akan berubah sesuai dengan 5 variasi. Pada blok gain digunakan sebagai konversi nilai rpm yang keluar dari *transfer function* motor DC dan gain setelah *transfer function* laju sebagai konversi nilai tegangan *output* ke rpm sebagai *feedback* dan tujuan penelitian ini. Blok diagram *scope* digunakan untuk melihat grafik dari hasil PID. Adapun model matematika motor DC dan model matematika hubungan dinamis antara *input* (tegangan) dan *output* (tegangan) yang digunakan pada sistem

$$\frac{145,6}{2s^2 + 0,192s + 0,1262}$$

Persamaan 4.1 merupakan model matematika motor DC yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 2. Dengan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 94.67%.

$$\frac{0,9593s^2 + 5,735s + 58,06}{s^2 + 5,952 + 57,81}$$

Persamaan 4.2 merupakan model matematika dengan beban 376 gram yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 2. Dengan menggunakan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 94.67%.

$$\frac{0,99s^3 + 1,26s^2 + 162,8s - 0,2851}{s^3 + 0,3521s^2 + 158,5 + 0,002007}$$

Persamaan 4.2 merupakan model matematika dengan beban 476 gram yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 3. Dengan menggunakan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 88,86%.

$$\frac{0,9554s^3 - 0,01354s^2 + 0,2639s + 0,0503}{s^3 + 0,1729s^2 + 0,3071s + 0,0531}$$

Persamaan 4.2 merupakan model matematika dengan beban 576 gram yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 3. Dengan menggunakan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 92,48%.

$$\frac{0,9291s^2 + 121,6s + 0,2136}{s^2 + 127,1s + 2,85e - 08}$$

Persamaan 4.2 merupakan model matematika dengan beban 676 gram yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 2. Dengan menggunakan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 85.52%.

$$\frac{0,9498s^2 + 125,3s + 11,61}{s^2 + 132,6s + 12,29}$$

Persamaan 4.2 merupakan model matematika dengan beban 776 gram yang didapatkan pada sistem dengan sistem Laplace orde 2. Dengan menggunakan *system identification* pada *software* MATLAB dengan *best fit* yang didapatkan sebesar 86,24%.

A. HASIL PENGUJIAN

Pengujian pada bagian ini akan menjelaskan hasil yang didapatkan dari sistem yang sudah dirancang. Adapun parameter yang akan dianalisis berupa hasil penalaan tanpa pengendali dan menggunakan pengendali, analisis respon sistem, serta membandingkan hasil yang didapatkan menggunakan data *real* dengan simulasi Matlab.

1. Pengujian Tegangan *Input* Pada Rel dan Pengujian Laju Kecepatan Miniatur Kereta Api

Pada sub bab ini pengujian dilakukan untuk memastikan tegangan yang keluar dari adaptor sesuai dengan tegangan yang mengalir pada seluruh rel miniatur kereta api menuju motor dc miniatur kereta api dan mendapatkan nilai kecepatan miniatur sesuai dengan kecepatan referensi



GAMBAR 7
(PENGUJIAN TEGANGAN PADA REL)



GAMBAR 8
(PENGUJIAN KECEPATAN LINIER MENGGUNAKAN 4,04V)

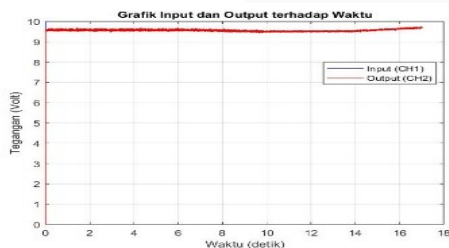


GAMBAR 9
(PENGUJIAN KECEPATAN LINIER MENGGUNAKAN 12 V)

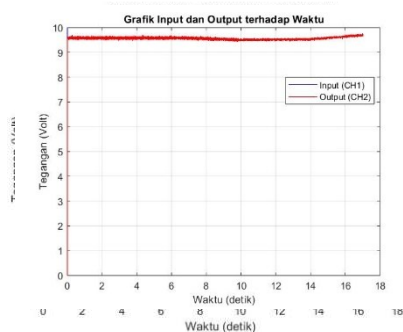
Pada gambar 7 didapatkan hasil tegangan pada rel sesuai dengan *output* adaptor yaitu 9,96 Volt, dengan hasil tegangan yang sesuai pengujian kecepatan motor dc akan mendapatkan nilai kecepatan yang sesuai dengan nilai sumber tegangan *input*. Pada pengujian kecepatan lokomotif kereta api menggunakan 4,04 Volt didapat hasil waktu tempuh 14,43 detik untuk waktu tempuh 150 cm dan 12,2 Volt didapat hasil waktu tempuh 3,23 detik untuk waktu tempuh 150 cm. Pada hasil pengujian kecepatan linier didapat hasil yang sesuai dengan kecepatan referensi miniatur kereta api yaitu (4 – 12 volt) dengan kecepatan (0,10 m/s – 0,58 m/s).

2. Pengujian Sistem Hubungan *Input* dan *Output* Tegangan Laju

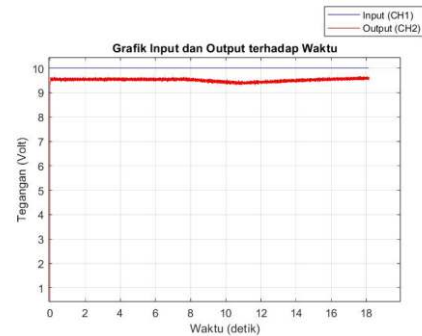
Pada sub bab ini akan menganalisis gangguan laju pada hasil grafik yang didapat ketika miniatur kereta api melaju dengan beban bervariasi saat diberikan sumber dc murni menggunakan adaptor *supply*, hasil dari pengujian ini akan menjadi nilai *transfer function* faktor pengaruh laju kecepatan pada miniatur kereta api skala HO.



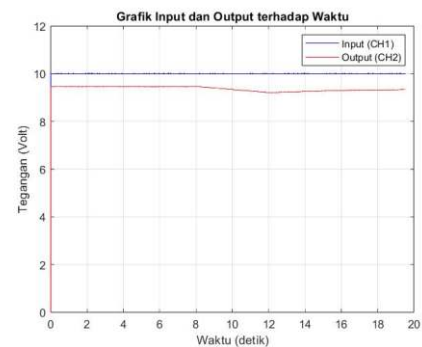
GAMBAR 10 (GRAFIK HUBUNGAN *INPUT* DAN *OUTPUT* TEGANGAN TERHADAP WAKTU (BEBAN 376 GRAM))



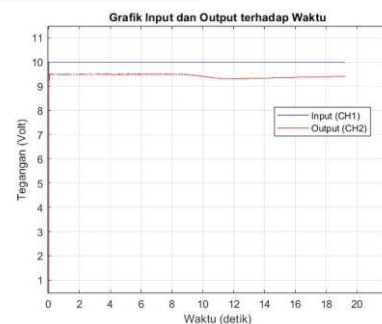
GAMBAR 11
(GRAFIK HUBUNGAN *INPUT* DAN *OUTPUT* TEGANGAN TERHADAP WAKTU (BEBAN 476 GRAM))



GAMBAR 12
(GRAFIK HUBUNGAN *INPUT* DAN *OUTPUT* TEGANGAN TERHADAP WAKTU (BEBAN 576 GRAM))



GAMBAR 13
(GRAFIK HUBUNGAN *INPUT* DAN *OUTPUT* TEGANGAN TERHADAP WAKTU (BEBAN 676 GRAM))



GAMBAR 14
(GRAFIK HUBUNGAN *INPUT* DAN *OUTPUT* TEGANGAN TERHADAP WAKTU (BEBAN 776 GRAM))

Berdasarkan hasil data pengujian yang ditampilkan pada Gambar terlihat grafik hubungan dinamis antara *input* dan *output* tegangan saat miniatur kereta api melaju selama satu putaran tanpa menggunakan pengendali PID. Tegangan *input* yang diberikan berupa tegangan DC murni sebesar 10 volt, dengan kecepatan motor tanpa beban mencapai 8545 rpm. Pengujian dilakukan dengan variasi beban yang terdiri dari bobot lokomotif dan gerbong, dimulai dari beban 376 gram hingga 776 gram. Pada beban 376 gram, tegangan *output* rata-rata yang tercatat sebesar 9,528 volt, dengan penurunan

tegangan terjadi pada detik ke-5 akibat kereta memasuki jalur menanjak setinggi 3 cm pada bagian lintasan horizontal sepanjang 75 cm, dan kembali meningkat saat meluncur pada detik ke-11. Saat beban ditingkatkan menjadi 476 gram, tegangan *output* rata-rata menurun menjadi 9,374 *volt*, dan penurunan juga mulai terjadi pada detik ke-5 di lokasi tanjakan yang sama. Hal serupa terjadi pada beban 576 gram, dengan *output* rata-rata sebesar 9,136 *volt* dan penurunan pada waktu yang sama. Untuk beban 676 gram, nilai tegangan *output* rata-rata tercatat sebesar 9,105 *volt*, sementara pada beban terbesar yaitu 776 gram, *output* rata-rata mencapai 9,021 *volt*. Penurunan tegangan pada waktu yang konsisten mengindikasikan bahwa semakin besar beban yang ditarik oleh kereta, maka semakin besar pula penurunan tegangan yang terjadi saat menghadapi jalur tanjakan. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa sistem pengendali seperti PID, sistem tidak mampu mempertahankan kestabilan tegangan *output* ketika terjadi perubahan beban dan kontur lintasan

3. Pengujian Simulasi Dengan Pengendali PID (Metode *Autotuning*)

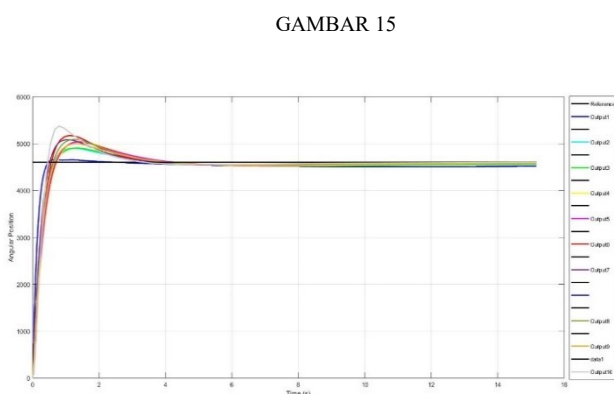
Pengujian sistem dilakukan dengan menerapkan pengendali PID menggunakan metode *autotuning* melalui fitur *PID Tuner* pada MATLAB. Nilai parameter Kp, Ki, dan Kd diperoleh dari proses penalaan dan diterapkan pada lima variasi beban untuk menganalisis kinerja kontrol kecepatan kereta.

Simulasi dilakukan selama satu putaran (15 detik) dengan set point sebesar 4602 rpm. Pada pengujian pertama dengan beban 376 gram, waktu tempuh tercatat sebesar 15,27 detik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan *output* cenderung menurun saat melintasi jalur menanjak, namun sistem dengan PID mampu menjaga kestabilan kecepatan

PID				Error Steady State %	Rise Time (s)	Time Settling (s)	Overshoot %
KP	KI	KD	N				
0,0273	0,0013	0,105	818,1	0,264	1,1765	12,341	67,09
0,02986	0,0031	0,0556	470,76	0,4162	2,8377	6,5362	27,0453
0,0259	0,0027	0,0506	429,34	0,4538	2,9722	6,6604	30,6308
0,0255	0,0038	0,0418	357,11	0,5084	3,3757	9,62	16,821
0,027	0,0043	0,0439	373,9	0,4857	3,3076	9,6815	14
0,036	0,0068	0,047	37,63	0,3954	3,0395	11,6	6,5798
0,0476	0,0097	0,058	492,95	0,3657	2,8	10,4	3,8055
0,0349	0,0063	0,0481	410,02	0,4354	3	11	8
0,0295	0,004	0,0482	410,02	0,4531	3	8,77	14,66
0,05	0,011	0,051	14,34	0,3156	2,61	16,8	2,55

lebih baik dibandingkan tanpa pengendali.

TABEL 1
(NILAI PARAMETER PID DAN HASIL ANALISIS RESPON)

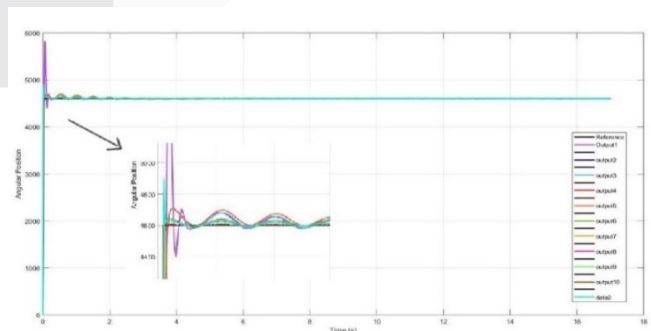


(PENGUJIAN LAJU MINIATUR KERETA API MENGGUNAKAN BEBAN 376 GRAM)

Pengujian dilakukan dengan menggunakan 10 variasi parameter PID yang diatur melalui *PID Tuner* MATLAB untuk menganalisis respons laju kereta. Salah satu konfigurasi terbaik diperoleh pada parameter Kp = 0,0476, Ki = 0,0097, Kd = 0,058, dan N = 492,95. Hasil pengujian menunjukkan *time rise* tercepat sebesar 0,264 detik dan maksimum 0,5084 detik, menandakan respons awal sistem yang cepat. Rata-rata *settling time* yang diperoleh adalah 2,9119 detik, dengan nilai tercepat 1,1765 detik. Dibandingkan tanpa PID, perbedaan antara *input* dan *output* tegangan mencapai 0,3 V, serta waktu stabilisasi lebih lama. Penggunaan *PID Tuner* juga menunjukkan bahwa pergeseran parameter ke kiri memberikan respons lebih cepat namun rentan *overshoot* (contoh: P = 0,0273, I = 0,0013, D = 0,105, N = 818,1), sedangkan ke kanan menghasilkan respons lebih lambat namun stabil. Rata-rata *overshoot* yang diperoleh sebesar 8,728%, dan *steady-state error* rendah sebesar 2,55%, yang menunjukkan bahwa sistem mampu mencapai *set point* dengan akurasi tinggi dan osilasi minimum. Pada pengujian kedua menggunakan beban 476 gram yaitu sebuah lokomotif yang membawa rangkaian gerbong 100 gram mendapatkan waktu tempuh 17,023 detik. Pada pengujian hubungan *input* dan *output* tegangan pada saat melaju di jalur didapati tegangan yang *output* yang jauh dari tegangan *input* dan menurun ketika menanjak. Pada pengujian yang dilakukan dengan simulasi pada Matlab menampilkan hasil penalaan dari sistem dengan pengendali PID menggunakan metode *auto tuning* dan *trial error* dengan nilai parameter yang diperoleh dari *PID Tuner* dan nilai *set point* 4602 Rpm.

TABEL 2
(NILAI PARAMETER PID DAN HASIL ANALISIS RESPON)

PID				Time Rise (s)	Time Settling (s)	Overshoot %	Error Steady State %
KP	KI	KD	N				
1	0,021	1	50	0,0247	0,1743	26,557	3,2344
1	0,021	1	700	0,0257	0,1193	2,2838	2,7468
10	9	20	7000	0,0012	0,0022	0,1158	0,1612
1	0,9	1	700	0,0257	0,574	2,3546	0,0868
1	0,9	2	700	0,012	0,0208	0,9642	0,0571
2	0,9	3	700	0,0075	0,0119	0,8283	0,0414
2	1	3	700	0,0075	0,0119	0,8285	1,8214
2,05	0,9	3,05	700	0,0073	0,0117	0,8333	0,0864
2,05	0,91	3,05	700	0,0073	0,0117	0,8333	0,0041
2,05	0,91	3,05	400	0,0072	0,0215	6,4504	0,3541



GAMBAR 16
(PENGUJIAN LAJU MINIATUR KERETA API MENGGUNAKAN BEBAN 476 GRAM)

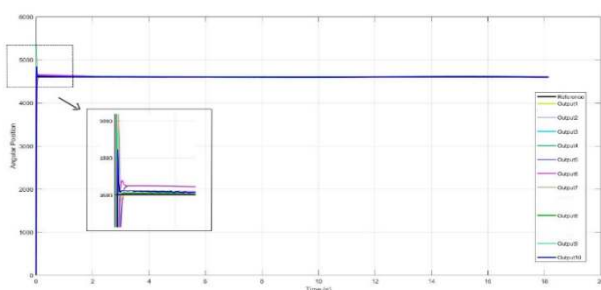
Pengujian dilakukan dengan menggunakan 10 variasi parameter PID untuk menganalisis respons laju sistem selama 17,023 detik. Nilai parameter diperoleh melalui *PID Tuner*

MATLAB, dan salah satu konfigurasi terbaik adalah $K_p = 2,05$, $K_i = 0,91$, $K_d = 3,05$, dan $N = 400$. Hasil grafik menunjukkan bahwa sistem memiliki respons awal yang cepat dengan *rise time* minimum 0,0012 detik dan maksimum 0,0257 detik. *Settling time* tercepat tercatat sebesar 0,0022 detik dengan parameter $N = 7000$. Meskipun nilai N yang terlalu tinggi hanya menunjukkan performa baik pada simulasi, secara aktual dapat menimbulkan masalah pada sistem fisik. Tanpa PID, perbedaan tegangan *input-output* mencapai 0,4 V dan waktu stabilisasi lebih lama. Rata-rata *overshoot* relatif besar, namun terdapat konfigurasi dengan *overshoot* rendah sebesar 0,8285%, menunjukkan kemampuan kontrol yang baik. *Steady-state error* juga sangat rendah, yaitu 0,0041%, menandakan tingkat akurasi yang tinggi dalam pencapaian set *point* dan kestabilan sistem yang lebih baik dibandingkan tanpa pengendali.

Pada pengujian ketiga menggunakan beban 576 gram yaitu sebuah lokomotif yang membawa rangkaian gerbong 200 gram. Pada pengujian hubungan *input* dan *output* tegangan pada saat melaju di jalur didapati tegangan yang *output* yang jauh dari tegangan *input* dan menurun ketika menanjak. Pada pengujian yang dilakukan dengan simulasi pada Matlab menampilkan hasil penalaan dari sistem dengan pengendali PID menggunakan metode *auto tuning* dan *trial error* dengan nilai parameter yang diperoleh dari PID *Tuner* dan nilai set *point* 4602 Rpm.

TABEL 3
NILAI PARAMETER PID DAN HASIL ANALISIS RESPON

PID				Rise Time (s)	Time Settling (s)	Overshoot %	Error Steady State %
KP	KI	KD	N				
10	9	20	7000	0.0013	0.0024	0.472	0.0097
12	11	12	7000	0.0278	0.0042	0.491	0.0137
4	2.6	3	400	0.0072	0.0217	5.851	0.0492
10	9	10	700	0.0024	0.0110	15.69	0.0249
1	0,9	1	700	0,0278	0,0468	0,501	0,2131
1	0,9	1	200	0,0221	0,0338	1,531	0,2128
1	0,9	2	200	0,0111	0,0360	9,341	0,1028
1	0,9	2	300	0,0114	0,0292	3,646	0,1076
2	0,9	2	300	0,0114	0,0305	3,646	0,0277
3	1	2,6	300	0,0086	0,0269	6,98	0,0101
3	1	2,6	350	0,0088	0,0249	4,737	0,0330



GAMBAR 17
(GRAFIK PENGUJIAN LAJU MINIATUR KERETA API
MENGUNAKAN BEBAN 526 GRAM)

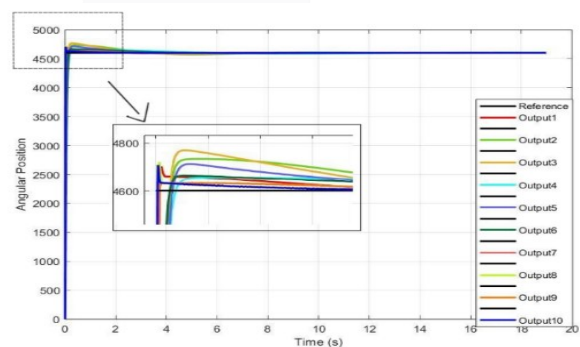
Pengujian dilakukan dengan menggunakan 10 variasi parameter PID untuk menganalisis respons laju motor DC. Nilai parameter diperoleh melalui *PID Tuner* MATLAB, dengan salah satu konfigurasi terbaik yaitu $K_p = 10$, $K_i = 9$, $K_d = 20$, dan $N = 7000$. Grafik hasil penalaan menunjukkan bahwa sistem memiliki respons awal yang cepat, dengan *rise time* berkisar antara 0,0013 hingga 0,0278 detik. *Settling time* tercepat tercatat sebesar 0,0024 detik, meskipun dicapai

dengan nilai N yang sangat tinggi, yang secara praktis dapat menimbulkan kendala pada sistem fisik. Tanpa pengendali PID, selisih antara *input* dan *output* tegangan mencapai 0,5 V dan waktu stabilisasi berlangsung selama satu putaran penuh. Sementara itu, penggunaan PID menghasilkan *overshoot* sebesar 15,69%, yang lebih tinggi dibandingkan tanpa pengendali, namun tetap menunjukkan kestabilan sistem yang baik dengan osilasi kecil. *Steady-state error* yang rendah sebesar 0,0249% mengindikasikan bahwa pengendali PID memiliki akurasi tinggi dalam mencapai set *point*.

Pada pengujian terakhir yaitu menggunakan beban 676 gram yaitu sebuah lokomotif 376 gram yang membawa rangkaian gerbong 300 gram dengan waktu tempuh 18,897 detik. Pada pengujian hubungan *input* dan *output* tegangan pada saat melaju di jalur didapati tegangan yang *output* yang jauh dari tegangan *input* dan menurun ketika menanjak. Pada pengujian yang dilakukan dengan simulasi pada Matlab menampilkan hasil penalaan dari sistem dengan pengendali PID menggunakan metode *auto tuning* dan *trial error* dengan nilai parameter yang diperoleh dari PID *Tuner* dan nilai set *point* 4602 Rpm.

TABEL 4
NILAI PARAMETER PID DAN HASIL ANALISIS RESPON

PID				Time Rise (s)	Time Settling (s)	Overshoot %	Error Steady State %
KP	KI	KD	N				
1	0,9	1	200	0.0221	0.0583	2,577	0,00038
0,2	0,17	0,3	100	0.0786	1.6155	2,568	0.0074
0,27	0,17	0,3	100	0.0769	1.3601	3,646	0.0011
0,1	0,05	0,3	200	0.0906	0.1533	1,514	0.0656
0,2	0,05	0,3	200	0.0877	0.7341	2,577	0.0074
0,2	0,07	0,4	200	0.0657	0.1109	1,531	0.0216
1	0,9	1,4	400	0.0173	0.0286	0,491	0.0082
1	0,9	1,4	250	0.0162	0.0402	2,577	0.0059
1	0,9	1,4	376	0.0169	0.0281	0,505	0.0049
2,5	1	2,16	402	0.0105	1,7406	2,577	0.008



GAMBAR 18
(GRAFIK PENGUJIAN LAJU MINIATUR KERETA API
MENGUNAKAN BEBAN 676 GRAM)

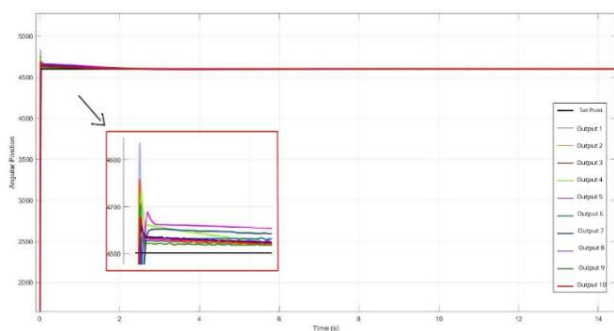
Dengan pengujian menggunakan 10 parameter PID Pengujian laju dilakukan menggunakan 10 variasi parameter PID yang diatur melalui *PID Tuner* MATLAB untuk menganalisis respons motor DC. Salah satu konfigurasi parameter terbaik adalah $K_p = 1$, $K_i = 0,9$, $K_d = 1,4$, dan $N = 376$. Hasil grafik menunjukkan bahwa sistem memiliki respons awal yang cepat terhadap perubahan set *point*, dengan *rise time* antara 0,0105 hingga 0,0906 detik. *Settling time* tercepat tercatat sebesar 0,0281 detik, menunjukkan kestabilan sistem yang baik. Tanpa pengendali PID, selisih tegangan *input* dan *output* mencapai 0,6 V dan sistem membutuhkan waktu satu putaran penuh untuk mencapai kestabilan. Meskipun *overshoot* pada pengujian ini lebih besar dibandingkan kondisi tanpa pengendali, sistem menunjukkan osilasi yang kecil dan stabil. Nilai parameter N

juga terbukti berpengaruh dalam mengurangi *overshoot*, seperti terlihat pada pengujian ke-7 dan ke-8. *Steady-state error* yang sangat rendah, yaitu sebesar 0,00038%, menunjukkan bahwa pengendali PID mampu mencapai set point dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi.

Pada pengujian terakhir yaitu menggunakan beban 776 gram yaitu sebuah lokomotif 376 gram yang membawa rangkaian gerbong 400 gram dengan waktu tempuh 19,524 detik. Pada pengujian hubungan *input* dan *output* tegangan pada saat melaju di jalur didapati tegangan yang *output* yang jauh dari tegangan *input* dan menurun ketika menanjak. Pada pengujian yang dilakukan dengan simulasi pada Matlab menampilkan hasil penalaan dari sistem dengan pengendali PID menggunakan metode *auto tuning* dan *trial error* dengan nilai parameter yang diperoleh dari PID *Tunner* dan nilai *setpoint* 4602 Rpm.

TABEL 5
(NILAI PARAMETER PID DAN HASIL ANALISIS RESPON)

PID				Error Steady State %	Rise Time (s)	Time Settling (s)	Overshoot %
KP	KI	KD	N				
3	1	2,6	350	0,0085	0,0255	4,737	0,0027
3	1,5	2,6	400	0,0086	0,0233	3,997	0,00739
3	2	2,6	400	0,0086	0,0233	3,646	0,0019
4	1,5	2	350	0,0113	0,0319	2,577	0,003
1	0,9	1	200	0,0223	0,0341	1,531	0,00017
1	0,9	1,4	300	0,0165	0,0265	0,505	0,0039
1,3	1	1,25	347	0,0192	0,0322	1,510	0,0033
1,3	1	1,7	347	0,0134	0,0210	0,505	0,0026
2	1	2,4	400	0,0095	0,0224	2,577	0,0008
2,3	1	2	400	0,0113	0,0174	1,531	0,0008
2,5	1	2,16	402	0,0106	0,0161	1,531	0,00004



GAMBAR 19
(GRAFIK PENGUJIAN LAJU MINIATUR KERETA API
MENGUNAKAN BEBAN 676 GRAM)

Pengujian laju dilakukan dengan menggunakan 10 variasi parameter PID yang disusun melalui *PID Tuner* MATLAB untuk mengevaluasi respons sistem motor DC. Salah satu konfigurasi terbaik diperoleh pada parameter $K_p = 2,5$, $K_i = 1$, $K_d = 2,16$, dan $N = 402$. Hasil penalaan sistem yang ditampilkan pada grafik menunjukkan respons awal yang cepat, dengan *rise time* berkisar antara 0,0085 hingga 0,0223 detik. *Settling time* tercepat tercatat sebesar 0,0161 detik, menunjukkan kemampuan sistem untuk mencapai kestabilan dalam waktu singkat. Sebaliknya, tanpa pengendali PID, perbedaan tegangan *input* dan *output* mencapai 0,7 V dengan waktu stabilisasi selama 19,524 detik (satu putaran penuh). Meskipun nilai *overshoot* yang dihasilkan lebih besar dibandingkan tanpa pengendali, sistem tetap menunjukkan

performa yang stabil dengan osilasi kecil. *Steady-state error* yang sangat rendah, yaitu 0,00004%, mengindikasikan bahwa pengendali PID memiliki tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam mencapai *set point*.

V. KESIMPULAN

Parameter optimal kontroler PID berhasil ditentukan melalui metode *autotuning* (PID *Tuner*) dan pendekatan *trial and error*, yang keduanya menunjukkan pengaruh signifikan terhadap performa sistem. Dari sepuluh variasi pengujian yang dilakukan, diperoleh konfigurasi parameter PID terbaik, seperti $K_p = 2,5$; $K_i = 1$; $K_d = 2,16$; $N = 402$, yang mampu menghasilkan *rise time* sangat cepat sebesar 0,0106 detik, *overshoot* sebesar 1,531%, dan *steady-state error* yang sangat kecil yaitu 0,0004%. Beberapa konfigurasi lainnya memang berhasil menekan nilai *overshoot* dan *error* keadaan tunak, namun dengan konsekuensi waktu *settling* yang lebih panjang. Secara keseluruhan, pengujian sistem kontrol kecepatan berbasis PID melalui simulasi MATLAB/Simulink menunjukkan bahwa sistem mampu mengikuti kecepatan referensi dengan baik meskipun terdapat tahanan dan beban tambahan, dengan penyesuaian tegangan motor secara dinamis. Meskipun pengontrol PID tidak secara langsung mengatur waktu tempuh lintasan, hasil *tuning* yang baik mampu memberikan waktu *settling* hingga 0,0161 detik, yang memungkinkan kereta miniatur mencapai kecepatan optimal lebih cepat dan secara tidak langsung memperpendek waktu tempuh satu putaran.

REFERENSI

- [1] R. Pradana, A.S. Wibowo, A. Sugiana, "Perancangan Dan Simulasi Sistem Persinyalan Kereta Api Secara Nirkabel," e-Proceeding of Engineering, Vol.8, No.5, pp 4397-4408, 2021.
- [2] S.A. Yudistirani, E. Diniardi, H. Basri, A.I. Ramadhan, "Analisa Keausan Dan Faktor Keamanan Keluar Rel Pada Kereta Api Lokomotif," Jurnal Teknologi 13 (2), Vol.13, No.2, pp 209-216, 2021.
- [3] H. Zhao, X. Dai, & Y. Zhao, "Sliding-mode Adaptive Control for Multiple High-speed Trains With State Constraints and Input Saturation," Internasional journal of Control, Automation, and System, Vol.21, pp 3607 - 3616, 2023.
- [4] O. Arfiansyah & W. Puja, "Development of locomotive CC 203 Maintenance Strategy Using Risk-Based Reliability Centered Maintenance (RCM 3) Method," Jurnal rekayasa mesin, Vol.15, No.3, pp. 1709 - 1727, 2024.
- [5] A. Bogajevskiy, V. Dvadenko, S. Arhun, S. Ponikarovska, "Determining the Degree of Increasing Locomotive Diesel Economic Efficiency by Modernization of the Speed Controller," EAI Endorsed Transactions on Energi Web, Vol.7, No. 28, 2020.
- [6] M. Babel, M. Szkoda, "Diesel Locomotive Efficiency And Reliability Improvement As A Result Of Power Unit Load Control System Modernisation," Eksploatacja I Niezawodnosc – Maintenance And Reliability, Vol.18, No.1, pp. 38-49, 2016.
- [7] Elcon Inc, "EM2000 Microprocessor Control System Integration," <https://elconinc.net/products/ElconEM2000MicroprocessorControlSystemIntegration>.
- [8] S.R. Pillai, C.P. Selvan, S.R. Madara, "Design of PID Control to Improve Efficiency of Suspension System in Electric Vehicles," Proc. 2019 Int. Conf. Comput. Intell. Knowl. Econ. ICCIKE 2019, pp. 570–575, 2019.

- [9] G. GÎLCĂ & I. BORCOȘI, "The Control Of A Toy Train System Using The Pid Controller In Matlab / Simulink," *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability*, Vol.23, No.1, pp 271-276, 2019.
- [10] L. Caroles & P. B. Pamungkas, S.T, "Rekayasa Rel dan Kereta Api," *Wawasan Ilmu*, Kabupaten Banyumas, 2022.
- [11] S.P. Ekanto, R. Hanifi & B. Suhendra, "Analisa Sistem Kerja Motor Bakar Diesel Terhadap Fenomena Exhaust Flame Pada Lokomotif Kereta Api Seri Co'co' 201," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol.12, No.1, 2024.
- [12] PT INKA (Persero), "Lokomotif - PT INKA," PT INKA. <https://www.inka.co.id/lokomotif> (Diakses: 6 Jun. 2025).
- [13] M. Ursu, O. Novac, M. Oproescu, Gyöngyi Bujdosó, & Francisc Ioan Hathazi, "Comparative Study of the Analog and Digital Operation for Miniature Railway Systems," *International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, 2024.
- [14] F. Suzukian & K. Sasaki, "Experiments On Derailment Of A High Speed Train Using A Scaled Train Model," *Transportation and Logistics Division Japan Society of Mechanical Engineers (JSME)*, Vol.6, pp 16-19, 2009.
- [15] I. Setiawan, "Kontrol Pid Untuk Proses Industri," PT Elex Media Komputindo, Jakarta, 2008.
- [16] O. Nelles, "Nonlinear System Identification: From Classical Approaches to Neural Networks, Fuzzy Models, and Gaussian Processes," *University of Siegen Netphen, Germany: Springer Nature Switzerland AG*, 2020.
- [17] Y. Yan, A. Shehada, A.R Beig, and I. Boiko, "Auto-Tuning of PID Controller with Phase Margin Specification for Digital Voltage-Mode Buck Converter," *Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, Vol.53, No.2, pp 13390-13395, 2020.
- [18] A. Herod, Scale, London, UK: Routledge, 2011.