

Pemodelan dan Desain Kendali Torsi Menggunakan Metode Sistem Identifikasi untuk Meningkatkan Kenyamanan Penumpang pada Trem Otonom

Azarya Pramayudo¹, Arief Syaichu Rohman² Bambang Riyanto Trilaksono³
^{1,2,3} Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Badung

Email: 23220364@std.stei.itb.ac.id

Informasi Artikel:	ABSTRAK
<i>Received:</i> 20 Desember 2025 <i>Accepted:</i> 27 April 2026 <i>Available:</i> 20 Mei 2026	<i>Trem</i> merupakan kendaraan transportasi yang masuk kategori <i>Light Rail Vehicle</i> (LRV) atau kereta api ringan yang beroperasi di daerah perkotaan dan menghubungkan satu daerah dengan daerah lain yang masih dalam satu lingkungan kota besar. Jalur trem berbeda dengan kereta api konvensional dengan jalur <i>trem</i> biasanya merupakan jalur khusus yang berada di jalan raya ataupun berdampingan dengan jalan raya yang dilengkapi dengan pembatas tertentu. Kondisi tersebut memunculkan tantangan baru karena trem otonom harus mampu beradaptasi dengan lingkungan dinamis tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk membangun sistem kendali yang mempertimbangkan kenyamanan penumpang terutama saat melakukan pengereman atau perlambatan ketika dihadapkan pada situasi dan kondisi tertentu. Metode <i>System Identification</i> dipilih untuk mengenali respons real sistem terhadap suatu <i>input</i> tertentu agar hasil identifikasi tersebut digunakan untuk mendesain pengendali. Hasil identifikasi dan rancangan kendali kemudian di uji menggunakan aplikasi Matlab untuk melihat kemampuan sistem kendali yang sudah dirancang dalam memberikan penurunan kecepatan yang nyaman bagi penumpang. Hasil perancangan menunjukkan kendali mampu mengatur perubahan nilai torsi yang menjaga akselerasi dan laju perubahannya tetap di bawah batas aman.
Kata Kunci:	ABSTRACT
<i>Autonomous tram, system identification regenerative braking.</i>	<i>Trams are transportation vehicles that fall under the category of Light Rail Vehicles (LRV), operating in urban areas and connecting different regions within a large metropolitan environment. Tram tracks differ from conventional railways, as they typically consist of dedicated lanes located on or adjacent to roadways, often with specific barriers in place. This condition presents a new challenge, as autonomous trams must be able to adapt to this dynamic environment. This study aims to develop a control system that considers passenger comfort, particularly during braking or deceleration in specific situations and conditions. The System Identification method is chosen to analyze the system's real response to a given input, with the identification results used to design the controller. The identification results and control design were then tested using MATLAB to evaluate the performance of the designed control system in providing a comfortable deceleration experience for passengers. The design results indicate that the control system can regulate torque variations while maintaining acceleration and its rate of change within safe limits.</i>

jtrm.polman-bandung.ac.id

1 PENDAHULUAN

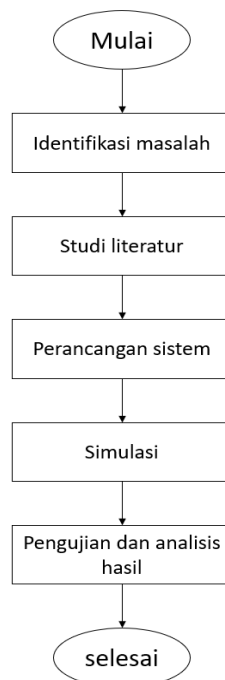
Trem merupakan kendaraan transportasi yang masuk kedalam kategori *Light Rail Vehicle* (LRV) atau kereta api ringan yang beroperasi di daerah perkotaan dan menghubungkan satu daerah dengan daerah lain yang masih dalam satu lingkungan kota besar. Jalur trem berbeda dengan kereta api konvensional. Jalur tram biasanya merupakan jalur khusus yang berada di jalan raya ataupun berdampingan dengan jalan raya yang dilengkapi dengan pembatas tertentu. Penelitian Sejarah yang dilakukan oleh Muhammad Hadian Saputra [1] tentang perkembangan trem batavia tahun 1869-1930 mengungkapkan bahwa kehadiran transportasi trem di Indonesia pertama kali terjadi pada masa penjajahan belanda dan pertama kali hadir di kota Batavia atau yang saat ini kita kenal dengan nama Jakarta. Operasional trem di Indonesia berhenti pada tahun 1954 akibat dianggap kurang cocok dengan tata kota pada masa itu. Pada masa kini, Indonesia kembali merencanakan kehadiran trem dengan sistem operasional yang canggih supaya trem tersebut akan dioperasikan secara otonom.

Salah satu tantangan yang menjadi perhatian dalam membangun sistem otonom pada kendaraan trem ialah kemampuan sistem dalam melakukan persepsi dan pengambilan keputusan dalam menghindari tabrakan namun tetap memperhatikan aspek kenyamanan penumpang pada lingkungan *mix traffic*. Pada penelitian dan implementasi yang telah dilakukan oleh Khansa Salsabila Suhaimi dkk. [2] dengan sistem pengambilan keputusan telah di implementasikan pada trem otonom milik PT INKA.

Pada penelitian ini, akan dibangun sistem kendali torsi yang memperhatikan aspek kenyamanan penumpang pada lingkungan *mix traffic*. Studi mengenai kenyamanan penumpang pada kendaraan transportasi umum telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya [3]. Penelitian yang dilakukan oleh Bernd de Graff dan Willem Van Weperen pada penumpang yang berdiri pada kereta bawah tanah menyarankan dengan laju perubahan percepatan $0,5-0,6 \text{ m/s}^3$ atau maksimal 1 m/s^3 [4]. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Jenny Eriksson dan Lars Svensson pada penumpang dalam kendaraan roda 4 merekomendasikan percepatan 2 m/s^2 dengan laju perubahan percepatan $0,9 \text{ m/s}^3$.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mendesain sistem kendali torsi yang memanfaatkan metode *system identification* untuk melakukan pengenalan sistem kendali torsi yang sudah ada pada *platform* trem otonom. Tahapan yang dilakukan disusun ke dalam bentuk *flowchart* seperti pada Gambar 1 berikut:

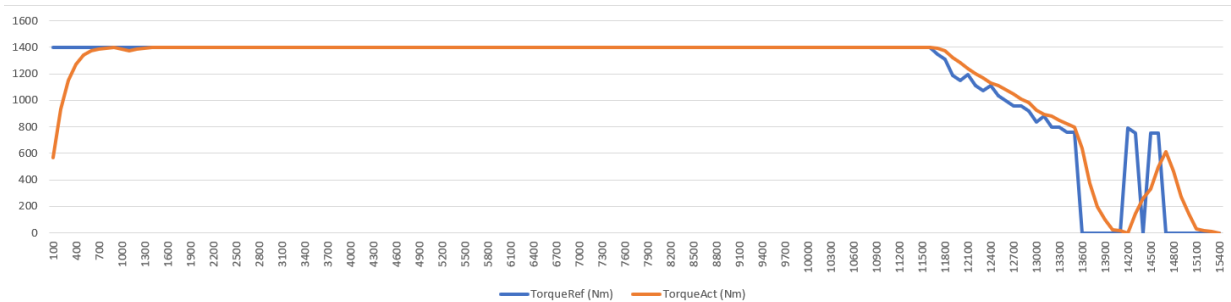


Gambar 1 Diagram alir tahapan penelitian

3 HASIL

3.1 Identifikasi Sistem

sistem kendali torsi pada platform trem akan diidentifikasi menggunakan metode *system identification* dengan pendekatan *black-box*, yakni informasi struktur internal sistem tidak diketahui. Identifikasi dilakukan dengan melihat hubungan matematis *input* dan *output* sistem. Informasi *input* dan *output* sistem kendali torsi diperoleh melalui log data yang dimiliki *vehicle control unit* kendaraan trem. Data yang diperoleh kemudian diambil sampelnya sebanyak 155 baris data pasangan *input* dan *output*. Data *input* yang digunakan adalah data torsi referensi yang merupakan *set point* torsi yang ingin dicapai, sedangkan data *output* yang digunakan ialah data torsi actual yang merupakan nilai torsi yang sedang dialami oleh motor penggerak pada waktu tertentu. Grafik data *input* dan *output* yang digunakan divisualisasikan ke dalam Gambar 2 berikut.

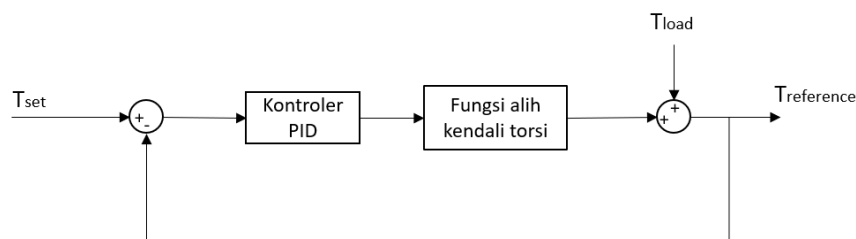


Gambar 2 Grafik data *input* dan *output* torsi

Dengan menggunakan *tools system identification* pada aplikasi *matlab*, diperoleh bentuk fungsi alih dari sistem kendali torsi yang dimodelkan kedalam bentuk sistem orde-2. Fungsi alih yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$\frac{0.1917s + 0.6571}{s^2 + 1.402s + 0.6593} \quad (1)$$

Dari hasil fungsi alih yang sebelumnya diperoleh, dirancang pengendali PID. Gambar 3 menunjukkan diagram alir kendali yang dirancang.

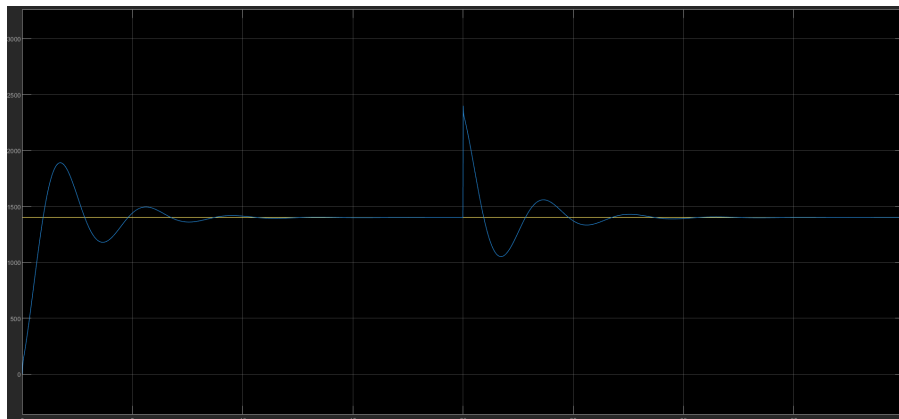


Gambar 3 Diagram alir kendali PID yang dirancang

Penambahan torsi *load* merepresentasikan *disturbance* yang dihasilkan oleh sitem pengereman *pneumatic* yang dimiliki oleh *platform* trem. Pengereman tersebut mempengaruhi nilai aktual torsi yang terbaca pada data log VCU.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan bantuan Matlab, *tuning parameter* PID dilakukan dengan bantuan PID tuner. Skenario dilakukan dengan memberikan *input* step berisi nilai 1400 yang meniru pemberian *set point* torsi pada sistem trem otonom saat akan melakukan perlambatan ataupun pengereman. Panjang waktu simulasi untuk setiap pengujian adalah 40 detik. Pada detik ke 20 dilakukan pemberian nilai *torque load* sebesar 1.000 Nm yang memodelkan keadaan torsi tambahan ketika sistem pengereman *pneumatic* braking dilakukan. Parameter K, Ki, dan Kd yang diperoleh adalah sebagai

berikut, $K_p=3.6284$, $K_i=1.6538$, $K_d=0.10345$. hasil grafik respons sistem dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.



Gambar 4 Respons sinyal output sisem kendali PID

Sinyal berwarna biru menunjukkan *output* sistem sedangkan sinyal berwarna kuning menunjukkan set point torsi yang diatur sebagai *input*. Dengan menggunakan data *output* sinyal yang kemudian diolah pada jendela *command Matlab* , diperoleh informasi ressspon sistem pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Data respons sinyal kendali PID

<i>Rise Time</i> (<i>sec</i>)	<i>Transient Time</i> (<i>sec</i>)	<i>Settling Time</i> (<i>sec</i>)	<i>Overshoot</i> (<i>%</i>)	<i>Peak Time</i> (<i>sec</i>)
0.7811	27.7041	27.7041	71.2970	20

Dengan menggunakan persamaan garis lurus, torsi dengan kecepatan trem memiliki hubungan *linear*, dapat dibuat tabel pemetaan data estimasi kecepatan trem berdasarkan *output set* nilai torsi yang dihasilkan kendali. Tabel 2 menunjukkan data estimasi kecepatan trem, akselerasi, dan laju perubahan akselerasi berdasarkan nilai *output* sinyal kendali yang telah dirancang dan di sampling setiap 1 detik.

Tabel 2 Estimasi kecepatan trem berdasarkan *output* set nilai torsi

indeks waktu	<i>output value</i>	kecepatan (<i>m/s</i>)	Akselerasi (<i>m/s²</i>)	laju perubahan percepatan (<i>m/s³</i>)
1	14.807	4.120	4.120	n/a
2	18.369	5.109	0.990	3.130
3	13.157	3.662	1.448	0.458
4	12.124	3.375	0.287	1.161
5	14.425	4.014	0.639	0.352
6	14.762	4.107	0.094	0.546
7	13.781	3.835	0.273	0.179
8	13.688	3.809	0.026	0.247
9	14.106	3.925	0.116	0.090
10	14.125	3.930	0.005	0.111
11	13.948	3.881	0.049	0.044
12	13.949	3.882	0.001	0.049
13	14.023	3.902	0.021	0.020
14	14.019	3.901	0.001	0.019
15	13.988	3.892	0.009	0.008
16	13.991	3.893	0.001	0.008
17	14.005	3.897	0.004	0.003

Pemodelan Dan Desain Kendali Torsi Menggunakan Metode Sistem Identifikasi Untuk Meningkatkan Kenyamanan Penumpang Pada Trem Otonom

18	14.002	3.896	0.001	0.003
19	13.997	3.895	0.001	0.001
20	23.998	6.673	2.778	2.777
21	13.423	3.735	2.938	0.159
22	10.879	3.029	0.707	2.231
23	14.601	4.063	1.034	0.327
24	15.339	4.268	0.205	0.829
25	13.696	3.811	0.456	0.251
26	13.455	3.744	0.067	0.389
27	14.156	3.939	0.195	0.128
28	14.222	3.957	0.018	0.176
29	13.923	3.874	0.083	0.065
30	13.910	3.871	0.004	0.079
31	14.036	3.906	0.035	0.031
32	14.036	3.906	0	0.035
index waktu	output value	kecepatan (m/s)	Akselerasi (m/s^2)	laju perubahan percepatan (m/s^3)
33	13.982	3.891	0.015	0.015
34	13.985	3.892	0.001	0.014
35	14.008	3.898	0.006	0.006
36	14.005	3.897	0.001	0.006
37	13.996	3.895	0.003	0.002
38	13.997	3.895	0	0.002
39	14.001	3.896	0.001	0.001
40	14.001	3.896	0	0.001

Berdasarkan Tabel 2, dapat dilihat bahwa pada 4 detik pertama saat sistem kendali merespons perubahan sinyal *input*, sistem kendali sedikit gagal menjaga kenyamanan, hal ini terlihat dari laju perubahan akselerasi awal yang melebihi batas. Meskipun perubahan ekstrem hanya terjadi 1-2 detik di awal saja dari total 10 detik respons sistem hingga mencapai *steady state*. Rata-rata akselerasi pada detik ke 1-10 dan 20-30 ialah $0.786 m/s^2$ dan rata-rata laju perubahan akselerasi ialah $0.752 m/s^3$. Total akselerasi dan laju perubahannya dari hasil simulasi secara berurut ialah $0.416 m/s^2$ dan $0.358 m/s^3$.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mendesain kendali torsi yang memperhatikan kenyamanan penumpang saat melakukan perlambatan. Hal ini terlihat dari total akselerasi dan laju perubahannya yang tetap berada di bawah batas kenyamanan yang telah ditetapkan. Kendali PI dan PID yang dirancang mampu menjaga perubahan nilai akselerasi dan laju perubahannya tetap dibatas kenyamanan penumpang. Pengembangan desain kendali masih perlu ditingkatkan untuk mengurangi respons *overshoot* yang berlebihan sehingga nilai *toque reference* tidak terlalu jauh melebihi nilai *set point*-nya yang mana hal tersebut juga akan mempengaruhi akselerasi dan laju perubahan akselerasi kendaraan.

5 REFERENSI

- [1] Saputra, M. H. (2022). Perkembangan trem batavia tahun 1869-1930. *Mozaik: Kajian Ilmu Sejarah*, 13(1).
- [2] Suhaimi, K. S., Subki, M. S., Trilaksono, B. R., Rohman, A. S., Hadi, Y. W., Supeno, H., ... & Husna, D. N. (2023). *Architecture and Decision-Making for Autonomous Tram Development*. *IEEE Access*.
- [3] Graaf, B. D., & Van Weperen, W. (1997). The retention of balance: An exploratory study into the limits of acceleration the human body can withstand without losing equilibrium. *Human factors*, 39(1), 111-118.
- [4] Svensson, L., & Eriksson, J. (2015). Tuning for ride quality in autonomous vehicle: Application to linear quadratic path planning algorithm.

- [5] Hartwich, F., Beggiato, M., & Krems, J. F. (2018). Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving—effects of drivers' age and driving style familiarity. *Ergonomics*, 61(8), 1017-1032.
- [6] Elbanhawi, M., Simic, M., & Jazar, R. (2015). In the passenger seat: investigating ride comfort measures in autonomous cars. *IEEE Intelligent transportation systems magazine*, 7(3), 4-17
- [7] Bae, I., Moon, J., & Seo, J. (2019). Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus. *Electronics*, 8(9), 943.
- [8] Svensson, L., & Eriksson, J. (2015). Tuning for ride quality in autonomous vehicle: Application to linear quadratic path planning algorithm.