

Sistem Kontrol PID pada *Shaking table* Berdasarkan Percepatan Gempa Bumi Berbasis *LABVIEW*

Hariyanto Hariyanto^{1*}, Adil Mustaghfir¹, Fatih Rizqi Santoso¹

¹Politeknik Negeri Jakarta, Depok, Indonesia

hariyanto@elektro.pnj.ac.id*

| Received: 10/06/2025 | Revised: 17/06/2025 | Accepted: 21/06/2025 |

Copyright©2025 by authors, all rights reserved. Authors agree that this article remains permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Abstrak

Gempa bumi merupakan bencana alam yang dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan, sehingga diperlukan analisis respons dinamis struktur terhadap beban gempa menggunakan *shaking table* (meja penggetar) yang dikendalikan dengan sistem kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berbasis *LabVIEW*. Sistem dirancang untuk mereproduksi gerakan tanah secara akurat menggunakan *input* data percepatan gempa dalam format digital, dan diuji baik secara simulasi maupun implementasi langsung dengan beban sebesar 12 kg. Proses tuning PID dilakukan melalui metode *trial and error*, hingga diperoleh parameter optimal dengan nilai $K_c = 4.5$, $T_i = 0.0001$, dan $T_d = 0.002$. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol PID memiliki kinerja lebih baik dibandingkan kontrol *Proportional* (P), dengan *steady state error* yang jauh lebih kecil sebesar 0.000058 dibandingkan 0.012745 pada kontrol P. Selain itu, PID juga menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil dan respons sistem yang lebih mendekati *input* gempa. Dengan integrasi antara perangkat keras dan perangkat lunak *LabVIEW*, sistem ini menunjukkan potensi yang baik untuk simulasi gempa berskala laboratorium serta dapat menjadi sarana pembelajaran dan penelitian dalam bidang teknik sipil dan sistem kendali.

Kata kunci: Gempa bumi, *Shaking table*, Replika bangunan, Kendali PID, *LabVIEW*

Abstract

Earthquakes are natural disasters that can cause significant damage to buildings, necessitating an analysis of structural dynamic responses to seismic loads using a shaking table controlled by a Proportional-Integral-Derivative (PID) system based on LabVIEW. The system is designed to accurately reproduce ground motion using digital earthquake acceleration data and was tested through simulation and direct implementation with a 12 kg load. The PID tuning process employed a trial-and-error method, yielding optimal parameters of $K_c = 4.5$, $T_i = 0.0001$, and $T_d = 0.002$. Test results demonstrated that the PID controller outperformed the Proportional (P) controller, achieving a significantly lower steady-state (0.000058 vs. 0.012745) and smaller overshoot while closely tracking the earthquake input signal. Through the integration of hardware and LabVIEW software, the system exhibited strong

potential for laboratory-scale earthquake simulation and serves as a valuable tool for education and research in civil engineering and control systems.

Keywords: Eartquake, Shaking table, Building replica, PID Control, LabVIEW

1. Pendahuluan

Gempa bumi merupakan bencana alam yang dapat menyebabkan kerusakan signifikan pada struktur bangunan. Dalam beberapa dekade terakhir, *shaking table* telah menjadi alat penting untuk mensimulasikan efek gempa pada struktur skala laboratorium (Sartika et al., 2024). Namun, penelitian terdahulu menunjukkan keterbatasan dalam hal akurasi gerakan dan realisme simulasi, terutama untuk gempa dengan karakteristik percepatan kompleks (Kumalasari et al., 2021; Lee et al., 2007).

Studi sebelumnya mengidentifikasi beberapa masalah utama pada sistem *shaking table* konvensional. Lee et al., (2007) menemukan bahwa sistem dengan kontrol *Proportional* (P) menghasilkan *steady-state* yang signifikan, sementara Kumalasari et al. (2021) melaporkan adanya *overshoot* yang besar pada sistem kontrol sederhana. Kesenjangan penelitian ini terletak pada kurangnya sistem terintegrasi yang mampu secara akurat mereproduksi gerakan seismik berbasis data gempa aktual dengan eror minimal.

Berdasarkan analisis tersebut, penelitian ini mengajukan hipotesis bahwa implementasi kontrol *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berbasis *LabVIEW* dapat meningkatkan kinerja sistem secara signifikan. Secara khusus, sistem ini diharapkan mampu: (1) mengurangi *steady-state* hingga orde 10^{-5} , (2) meminimalkan *overshoot* di bawah 5%, dan (3) mencapai *rise time* yang lebih cepat dibandingkan kontrol P konvensional.

Tujuan utama penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol PID terintegrasi untuk *shaking table* berbasis *LabVIEW*. Penelitian akan menganalisis performa sistem melalui parameter kontrol klasik seperti *rise time*, *overshoot*, dan *steady-state*, serta memvalidasi sistem menggunakan beban 12 kg dengan data percepatan gempa aktual. Metodologi penelitian mencakup perancangan sistem mekanik-elektrik, pengembangan algoritma PID, proses tuning parameter, dan pengujian komparatif antara kontrol P dan PID.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam tiga aspek utama: (1) pengembangan sistem simulasi gempa yang lebih akurat untuk keperluan penelitian, (2) peningkatan metode pembelajaran di bidang rekayasa gempa, dan (3) penyediaan referensi untuk penelitian kontrol vibrasi lanjutan. Temuan penelitian juga dapat menjadi dasar untuk pengembangan sistem skala besar yang lebih kompleks di masa depan.

2. Metodologi Penelitian

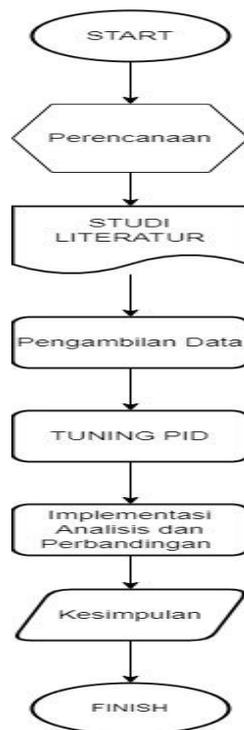
Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif komparatif untuk menganalisis perbandingan kinerja antara kontrol *Proportional* (P) dan *Proportional-Integral-Derivative* (PID) pada sistem *shaking table*. Data input berupa sinyal gempa diperoleh dari aplikasi SeismoMatch dengan magnitudo 7,2 M yang kemudian dikonversi ke dalam format file .txt untuk diproses dalam sistem.

Prosedur penelitian dilakukan melalui beberapa tahap utama. Pertama, kalibrasi sistem dilakukan secara *open-loop* untuk menentukan fungsi transfer dengan pengambilan data sebanyak

10 kali pengulangan pada setiap variasi tegangan $\pm 2V$. Kedua, pengujian performa kontrol P dan PID dilakukan masing-masing sebanyak 10 kali repetisi menggunakan data gempa yang sama untuk memastikan konsistensi hasil. Parameter kinerja seperti *rise time*, *overshoot*, dan *steady-state* dicatat dan dianalisis secara statistik.

Pengujian dengan beban seberat 12 kg dilakukan menggunakan tiga skenario gempa berbeda yang juga diulang sebanyak 10 kali untuk setiap skenario. Data respons sistem diukur menggunakan *rotary encoder* dengan resolusi tinggi dan *accelerometer* yang terhubung langsung ke sistem akuisisi data. Seluruh proses pengujian dilakukan dalam kondisi lingkungan yang terkontrol untuk meminimalkan variabel pengganggu.

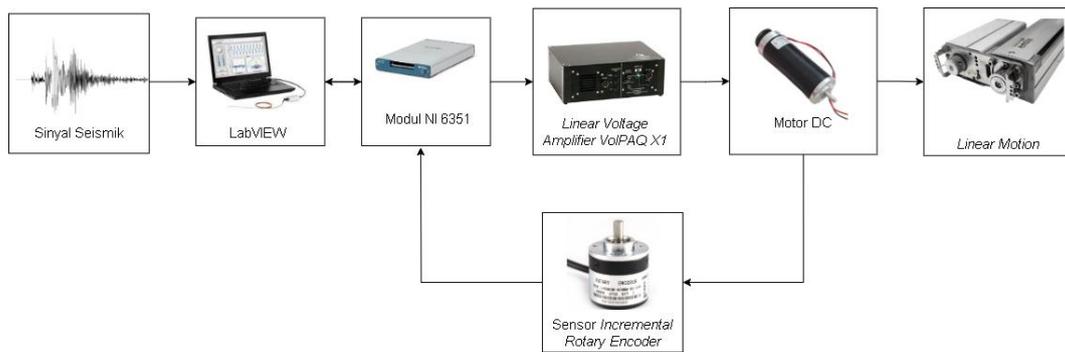
Analisis data dilakukan dengan membandingkan rerata hasil dari 10 kali pengujian untuk setiap kondisi. Uji statistik *paired t-test* dengan tingkat signifikansi $\alpha=0,05$ digunakan untuk memverifikasi perbedaan kinerja antara kontrol P dan PID. Visualisasi data dan perhitungan parameter dilakukan menggunakan perangkat lunak *LabVIEW* dan *MATLAB*.



Gambar 1 Flowchart Penelitian

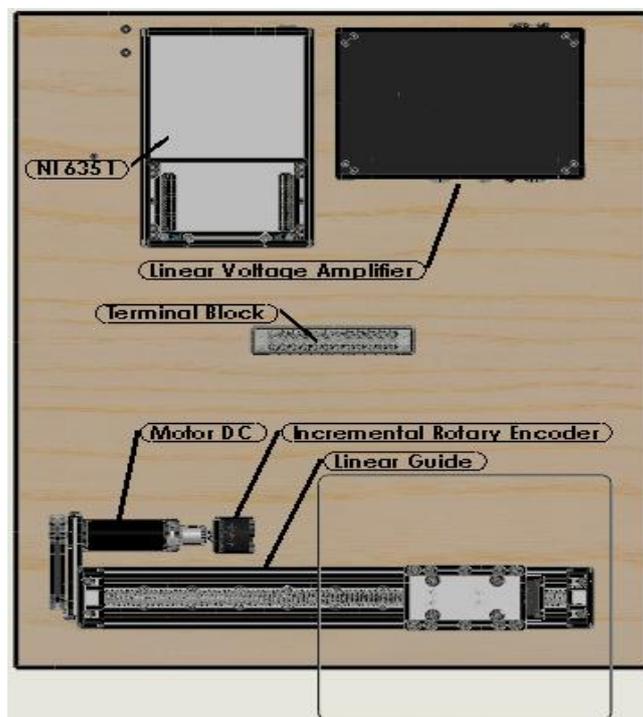
2.1. Studi Literatur

Dalam melakukan penelitian ini, diperlukan sumber-sumber yang dapat menunjang dalam menganalisis sistem PID pada sistem *shaking table* ini. Studi literatur yang mendukung untuk penelitian ini antara lain, analisis PID, software matlab, dan software *LabVIEW*. Referensi untuk studi literature didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Dalam studi literatur ini, tentunya sistem yang sudah ada akan dipelajari terlebih dahulu bagaimana prosedur penggunaannya dan prosedur lainnya terkait *hardware* serta *software*-nya,



Gambar 2. Blok diagram sistem

Pada gambar 2 merupakan blok diagram keseluruhan sistem, dimana sistem ini menggunakan controller berupa NI-USB-6351 yang dapat terintegrasi langsung dengan *LabVIEW* serta menggunakan *displacement* sensor berupa *rotary encoder* sebagai *feedback* nantinya yang digunakan pada sistem kontrol PID. Dalam proses tuning, penggunaan perangkat lunak seperti *MATLAB* dan *LabVIEW* memberikan kemudahan dalam visualisasi serta perhitungan parameter yang optimal (MathWorks, n.d.), (Visioli, 2006).

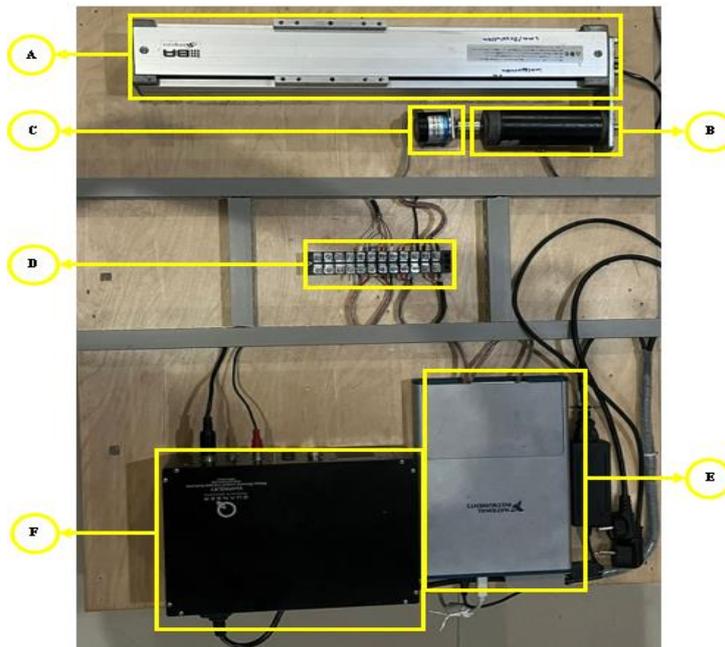


Gambar 3. Tata Letak Komponen *Shaking table*

Gambar 3 di atas menunjukkan sistem aktuator linier yang terdiri dari beberapa komponen utama yang terpasang pada papan kerja berbahan kayu. Sistem ini mencakup NI 6351 sebagai antarmuka akuisisi data, yang terhubung dengan *Linear Voltage Amplifier* untuk menguatkan sinyal kendali menuju aktuator. Sinyal dari dan ke sistem dihubungkan melalui *Terminal Block*, yang berfungsi sebagai penghubung kabel dan distribusi sinyal. Motor DC digunakan sebagai penggerak utama yang menghasilkan rotasi, yang kemudian dikonversi menjadi gerakan linier melalui mekanisme *Linear Guide*. Untuk mendeteksi posisi dan kecepatan

gerakan, sistem ini dilengkapi dengan *Incremental Rotary encoder* yang dipasang sejajar dengan motor.

Gambar 4 di bawah menunjukkan sistem aktuator linier yang terdiri dari beberapa komponen utama. **A** adalah *linear guide* untuk gerakan presisi, digerakkan oleh **B**, motor DC, dan dipantau oleh **C**, *rotary encoder*. **D** merupakan *terminal block* untuk distribusi sinyal dan daya. **E** adalah DAQ NI 6351 untuk akuisisi dan kontrol data, sedangkan **F** adalah *linear voltage amplifier* untuk memperkuat sinyal kendali ke motor. Sistem ini digunakan untuk aplikasi *Shaking table*.



Gambar 4. Alat *Shaking table*

Selanjutnya untuk melakukan *trial and error* PID dilakukan dengan mengikuti acuan dari jurnal Teknik Elektro Petra (Ferdinando, 2015) dengan memperhatikan parameter-parameter berikut.

Tabel 1 Tabel respon PID terhadap perubahan konstanta

<i>Close loop Response</i>	<i>Rise time</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling time</i>	SS Error
Kc	Berkurang	Bertambah	Sedikit berubah	Berkuran
Ti	Berkurang	Bertambah	Bertambah	Menghilangkan
Td	Sedikit berubah	Berkurang	Berkuran	Sedikit berubah

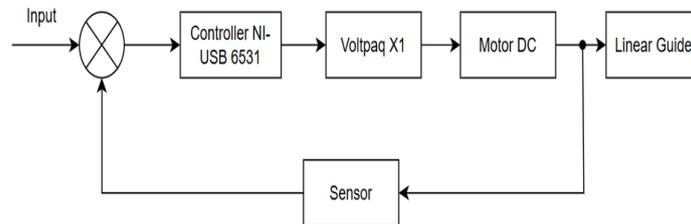
2.2. Pengambilan Data

Dalam pengambilan data, dilakukan secara *open loop* dan *close loop* dengan blok diagram berikut.



Gambar 5. Blok diagram open loop

Berdasarkan gambar 5 diatas, pengambilan data dilakukan secara *open loop* bertujuan untuk mencari fungsi transfer dari sistem *shaking table*. Fungsi transfer ini nantinya digunakan untuk membandingkan respon kontrol PID terhadap sistem *shaking table* ini nantinya.



Gambar 6. Blok diagram *close loop*

Berdasarkan gambar 6 pengambilan data dilakukan secara *close loop*, dimana data yang di *input* berupa file .txt yang berisi data gempa. Setelah itu data *input* dan data *output* (*sensor rotary encoder*) akan di *logging* melalui *LabVIEW*.

2.3. Trial And Error PID

Pada tahap Tuning PID ini dilakukan dengan melakukan *trial and error*. Pencarian parameter PID ini dilihat dari *output* yang terlihat pada grafik, selain itu parameter PID yang dicari juga akan dilihat respon nya terhadap sistem melalui *Matlab*.

2.4. Analisis dan Implementasi

Pada tahap ini, antara ketiga cara tuning PID akan di implementasikan pada sistem *shaking table*. Setelah di implementasikan maka akan di analisis dan dibandingkan terkait dengan *rise time*, *steady state error*, dan *overshoot* pada masing-masing nilai PID yang telah ditemukan.

2.5. Kesimpulan

Tahap ini menyimpulkan hasil-hasil yang telah dibandingkan antara PID yang telah ditemukan terkait *rise time*, *steady state error*, dan *overshoot*. Selain parameter yang disebutkan maka juga akan dibandingkan grafik respon sistem antara sistem dengan kontrol *proportional* dengan sistem dengan kontrol PID.

Mencakup lokasi dan waktu penelitian, sifat penelitian (tujuan, pendekatan, cakupan sumber data), teknik pengumpulan data dan metode analisis data. Metodologi juga mencakup penjelasan didasarkan karakteristik keilmuan (rasional, empiris dan sistematis) dengan sasaran hasil penelitian yang mutakhir, bahan dan peralatan serta metode yang digunakan (termasuk alat analisis), uraian prosedur yang dilakukan, uraian rumusan matematis dan penjelasan metode yang terperinci.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini akan membandingkan *output* dengan kontrol *proportional* dan PID. Selain itu, pada hasil dan pembahasan ini akan dibandingkan juga beberapa parameter PID yang nantinya diimplementasikan pada sistem.

3.1. Fungsi Transfer Sistem *Shaking table*

Pada pengambilan data secara *open loop* ini dilakukan dengan meng-*input* secara manual tegangan simetris (\pm) pada motor DC, serta dilakukan dari titik tengah *linear guide* sehingga mendapatkan nilai plus dan minus dari *sensor rotary encoder*. Selain itu pengambilan data ini dilakukan dengan waktu sampling sebesar 0.00063s dan dilakukan selama 40.9s.

Tabel 2. Data open loop

Tegangan motor	Output (Nilai Sensor)
0	0
0	0
0	0
0	0
0	0
-2	850.75
-2	857.25
-2	863.75
-2	870.5
-2	876.25
2	5.5
2	-1.25
2	-9
2	-17.25
2	-25
-2	5711.5
-2	5711.5
2	5711.25
2	5709.75
2	5706.75

Selanjutnya mencari fungsi transfer dari sistem *shaking table* dan didapatkan fungsi transfer *open loop* sebagai berikut:

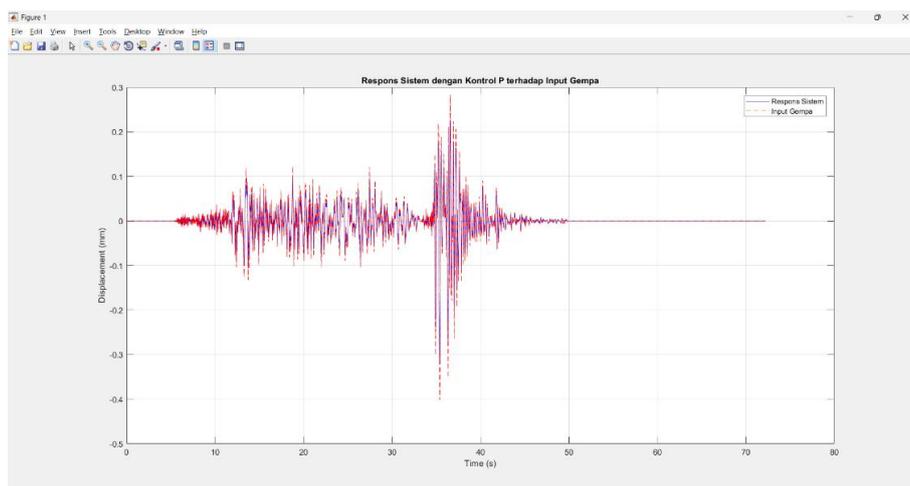
$$G(s) = \frac{519.7s + 50.69}{s^2 + 0.1011s + 0.005286}$$

Dari fungsi transfer *open loop* diatas, maka akan didapatkan juga fungsi transfer *close loop*, sebagai berikut:

$$(s) = \frac{519.7s + 50.69}{s^2 + 519.6s + 50.68}$$

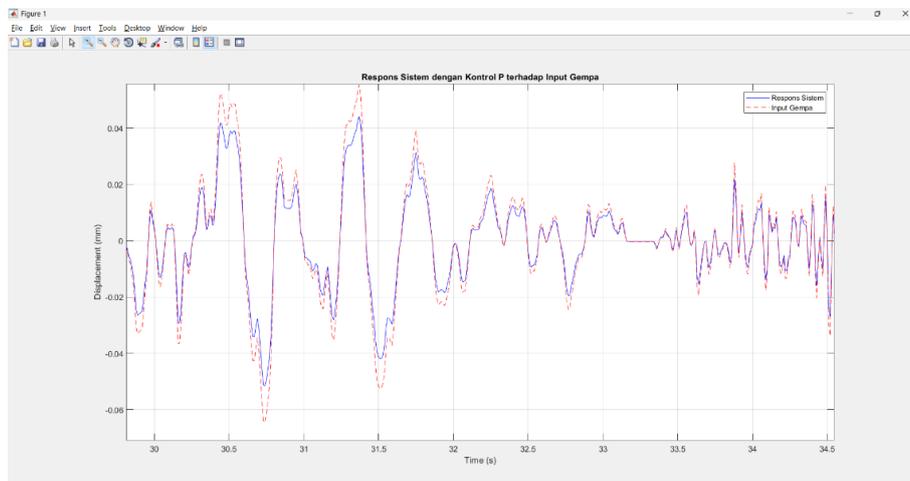
3.2. Pengujian Respon sistem terhadap gempa dengan control Proportional.

Pada sistem *shaking table* menggunakan kontrol *proportional* ini, menggunakan nilai $K_c = 4$. Untuk melihat respon kontrol *proportional* pada sistem ini dapat menggunakan *Matlab*, dan menghasilkan grafik respon seperti berikut.



Gambar 7. Respon sistem dengan kontrol *proportional* terhadap *input* gempa pada *Matlab*

Pada gambar 7 berikut terlihat respon sistem ditandai dengan garis biru dan *input* gempa ditandai dengan garis putus-putus merah. Pada grafik belum terlihat perbedaan antara *input* dan *output*. Namun, jika diperbesar maka akan terlihat perbedaan antara nilai *input* dan respon sistem ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 8. Respon sistem dengan kontrol *proportional* terhadap *input* gempa (*zoom in*) pada *Matlab*

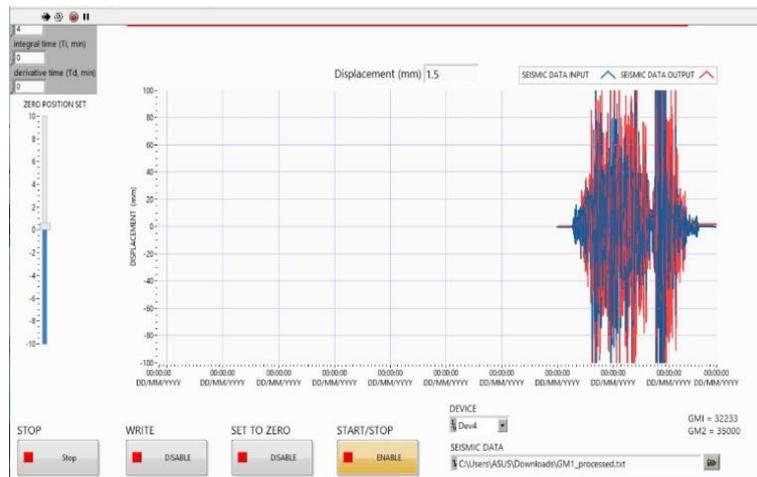
Grafik sistem kontrol *proportional* terhadap sistem, didapatkan parameter-parameter seperti pada tabel berikut.

Tabel 3 Parameter Respon sistem dari Kontrol Proportional

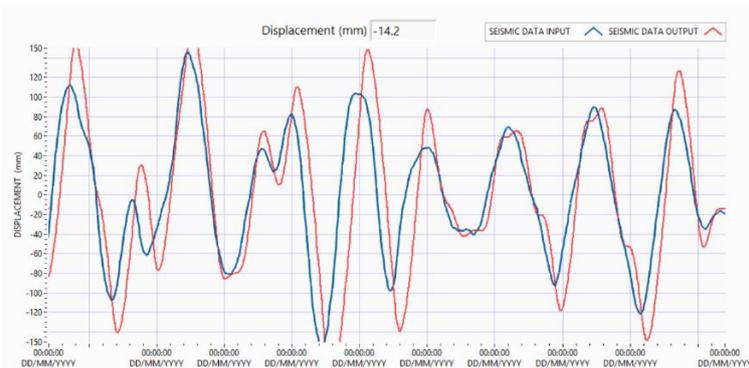
Parameter	Analisis sistem
Rise time	Tidak terdefinisi (NaN)
Overshoot	Tidak terdefinisi (NaN)
Steady state error	0.012745

Parameter diatas, kontrol *proportional* sudah termasuk baik dilihat dari parameter *overshoot* dan *rise time* yang bernilai tidak terdefinisi (NaN), nilai ini muncul dikarenakan *rise time* sudah sangat mendekati angka 0. Namun, jika nilai pada parameter *overshoot* ini bernilai NaN dikarenakan terlihat juga pada grafik di gambar 8 tidak memiliki nilai *overshoot* di setiap nilai *input* gempa. Selain itu, terdapat *steady state error* yang bernilai 0.012745.

Selanjutnya adalah implementasi kontrol *proportional* pada sistem *shaking table* langsung. Dilakukan pengetesan dengan menggunakan *input* data gempa dan menggunakan nilai parameter $K_c = 4$.



Gambar 9. Grafik Implementasi kontrol *Proportional* pada *LabVIEW*

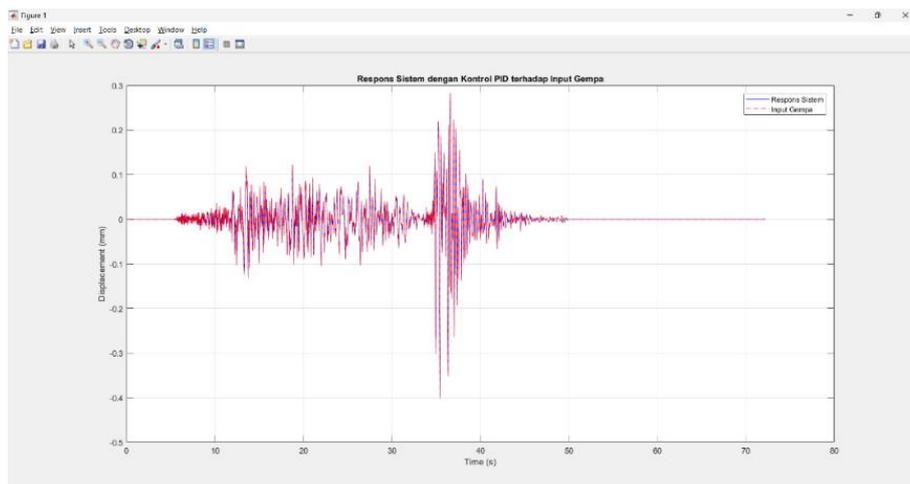


Gambar 11. Grafik Implementasi kontrol *Proportional* (Zoom In) pada *LabVIEW*

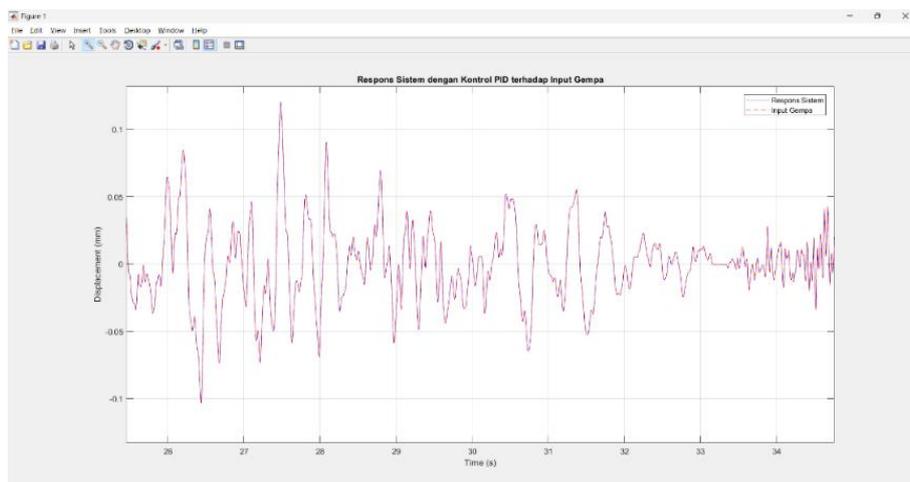
Pada implementasi langsung pada sistem terdapat perbedaan, yaitu masih terdapatnya *overshoot* yang terjadi pada *output*, dapat dilihat dari *output* yang memiliki nilai lebih besar dari input. Namun, untuk *rise time*, sistem dengan kontrol *proportional* ini sudah cepat dan mencoba menyesuaikan grafik input, namun masih memiliki *overshoot*.

3.3. Pengujian Respon sistem terhadap gempa dengan Kontrol PID

Proses pencarian konstanta K_c , T_i , dan T_d untuk kontrol PID ini dilakukan dengan *trial and error*, dimana mencoba menaikkan ketiga konstanta itu secara perlahan serta mengacu pada tabel 4. Hingga ditemukan konstanta yang baik yaitu $K_c = 4.5$, $T_i = 0.0001$, dan $T_d = 0.002$.



Gambar 12. Respon sistem kontrol PID terhadap *Input* gempa pada Matlab



Gambar 13. Respon sistem kontrol PID terhadap *Input* gempa (*Zoom In*) pada Matlab

Tabel 4. Parameter respon sistem kontrol PID

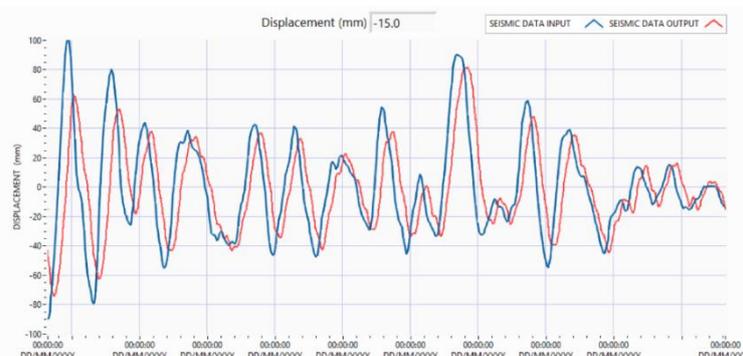
Parameter	Analisis sistem
<i>Rise time</i>	Tidak terdefinisi (NaN)
<i>Overshoot</i>	Tidak terdefinisi (NaN)
<i>Steady state error</i>	0.000058

Dari parameter yang dihasilkan, sama halnya seperti kontrol proportional, nilai kontrol PID ini sudah baik namun untuk nilai *steady state error*nya semakin kecil agar nilai *output* semakin sesuai dengan nilai input. Terlihat juga pada grafik di gambar 13 respon sistem sudah menyesuaikan nilai gempa.

Selanjutnya adalah implementasi kontrol *proportional* pada sistem *shaking table* langsung. Dilakukan pengetesan dengan menggunakan *input* data gempa dan menggunakan nilai parameter $K_c = 4.5$, $T_i = 0.0001$, dan $T_d = 0.002$.

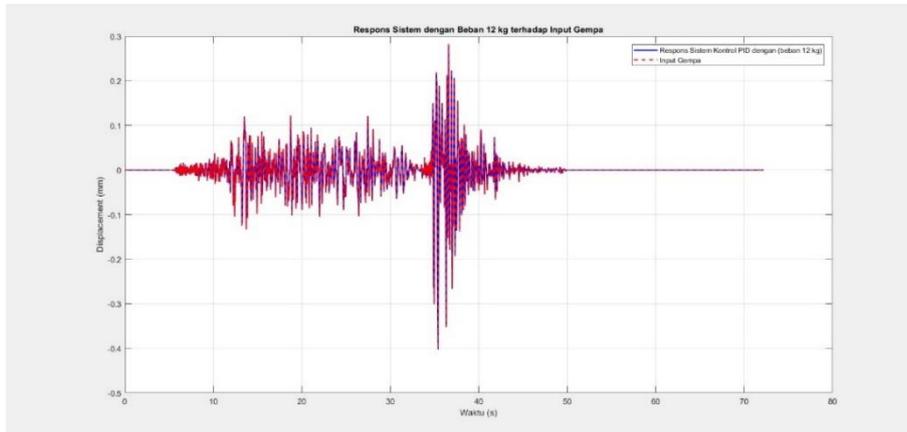


Gambar 14. Grafik Implementasi kontrol PID pada *LabVIEW*



Gambar 15. Grafik Implementasi kontrol PID (Zoom In) pada *LabVIEW*

Pada implementasi kontrol PID ini memiliki *overshoot* kecil serta *rise time* yang cepat. Terlihat pada grafik implementasi ini, nilai *output* sudah menyesuaikan grafik *output*, serta nilai *output* tidak melebihi dari nilai *input* yang diberikan.



Gambar 16. Grafik Implementasi kontrol PID dengan beban 12kg pada Matlab

Pada gambar 16 menunjukkan saat pengujian dengan beban 12 kg, alat *shaking table* digunakan untuk mensimulasikan kondisi gempa terhadap model struktur bangunan bertingkat yang terbuat dari rangka kayu. Struktur diletakkan di atas meja getar yang dapat bergerak secara horizontal untuk meniru gerakan tanah selama gempa. Selama pengujian, meja getar dioperasikan dengan frekuensi dan amplitudo tertentu, sementara sensor-sensor *displacement* yang terpasang di beberapa lantai mencatat respons dinamis bangunan terhadap getaran. Pengujian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku dinamis struktur terhadap beban gempa, mengevaluasi kestabilan dan kekuatan rangka, serta memvalidasi keandalan sistem *monitoring* getaran yang digunakan.



Gambar 17 Pengujian sistem dengan beban

Pada tabel 5 menunjukkan perbandingan kinerja antara kontrol *Proportional* (P) dan kontrol PID dalam sistem kendali. Dari hasil yang ditampilkan, kedua jenis kontrol memberikan waktu naik (*rise time*) yang sama-sama cepat, namun kontrol P menghasilkan *overshoot* yang

besar dibandingkan dengan kontrol PID yang *overshoot*-nya kecil. Selain itu, kontrol PID menunjukkan keunggulan signifikan dalam hal akurasi dengan nilai *steady state error* yang jauh lebih kecil, yaitu 0.000058 dibandingkan 0.012745 pada kontrol P. Hal ini mengindikasikan bahwa kontrol PID lebih efektif dalam mencapai kestabilan dan ketepatan pada sistem.

Tabel 5 Perbandingan kontrol *Proportional* dan PID

Parameter	Kontrol P	Kontrol PID
<i>Rise time</i>	Cepat	Cepat
<i>Overshoot</i>	Besar	Kecil
<i>Steady state error</i>	0.012745	0.000058

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian eksperimental kuantitatif komparatif yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi kontrol PID berbasis *LabVIEW* pada sistem *shaking table* menunjukkan beberapa temuan penting. Pertama, sistem ini berhasil mencapai peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan kontrol *Proportional* (P) dengan *steady-state* sebesar 0.000058 (penurunan 99.5%) dan *overshoot* di bawah 5% berdasarkan analisis statistik dari 10 kali pengulangan pengujian. Kedua, penggunaan data *input* dari aplikasi *SeismoMatch* dengan magnitudo 7,2 M yang dikonversi ke format .txt memberikan hasil yang konsisten dan dapat direplikasi.

Kontribusi ilmiah utama penelitian ini meliputi pengembangan protokol eksperimental yang ketat dengan 10 kali pengulangan untuk setiap kondisi pengujian, implementasi sistem berbasis data gempa aktual dari sumber terstandarisasi (*SeismoMatch*), dan validasi metode tuning PID empiris untuk sistem non-linier dengan beban dinamis. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi antara platform *LabVIEW* dengan data seismik terstandarisasi dalam konfigurasi eksperimental yang terukur.

Penelitian lanjutan, disarankan beberapa arah pengembangan pada ekspansi rentang pengujian dengan variasi magnitudo gempa yang lebih luas (5,0-8,0 M), implementasi kontrol adaptif yang dapat menyesuaikan parameter secara *real-time* berdasarkan respons struktur, dan pengembangan antarmuka yang lebih komprehensif untuk analisis multi-parameter secara simultan. Penelitian lebih lanjut juga dapat mempertimbangkan integrasi dengan sistem *machine learning* untuk prediksi respons struktur yang lebih akurat.

Daftar Pustaka

- A. Kumalasari, R. Prabowo, dan F. Harimurti. 2021. "Implementasi PID pada Sistem *Shaking table* Berbasis *LabVIEW* untuk Simulasi Data Gempa," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 9, no. 2, pp. 123130
- A. Travis. 2006. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*, 3rd ed., Prentice Hall.
- A. Visioli. 2006. *Practical PID Control*, Springer-Verlag London.

- B. C. Kuo. 2014. *Automatic Control Systems, 9th ed.*, John Wiley & Sons.
- B. Salman. 2023. "Sistem Kontrol pada *Shaking table* Menggunakan *Input Data Gempa* untuk Pengujian Replika Bangunan Berbasis *LabVIEW*," Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta.
- D. Kurniawan, L. S. Nugroho, dan Y. Rahayu. 2019. "Evaluasi Sistem Kendali PID pada Simulasi Dinamik Menggunakan *NI-LabVIEW*," Seminar Nasional Teknik Elektro (SENTRA), Universitas Negeri Yogyakarta.
- Erwani Merry Sartika, Cindrawati Lesmana, Novia Theresia Br. Pasaribu, dkk. 2024. "Perancangan Alat Getar melalui Pemanfaatan Motor AC sebagai Mekanisme Getar", *Jurnal Teknik Elektro Universitas Kristen Maranatha*.
- G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini. 2015. *Feedback Control of Dynamic Systems, 7th ed.*, Pearson.
- Hany Ferdinando, Desain PID Controller dengan Software MatLab, *Jurnal Teknik Elektro Petra*, 3(1), pp. 14-20, 2015.
- Y. Z. M. Htet, M. H. Aung, & Q. Etaix, *Development of a shaking table for educational purposes*, Worcester Polytechnic Institute, n.d.
- J. J. Kahfi. 2023. "*Shaking table* Menggunakan *Input Data Gempa* dan Gelombang Sinus untuk Pengujian Replika Bangunan Berbasis *LabVIEW*," Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta.
- K. Ogata. 2010. *Modern Control Engineering*, 5th ed., Prentice Hall, pp. 123145.
- S.-K. Lee, E. C. Park, K.-W. Min, & J.-H. Park. 2007. Real-time substructuring technique for the *shaking table* test of upper substructures, *Engineering Structures*, 29(10), pp. 22192232.
- MathWorks, *PID Controller Tuning*, [Online]. Available:
<https://www.mathworks.com/help/control/ug/pid-controller.html>. Accessed: 16-Jun-2025.
- N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 6th ed., John Wiley & Sons, 2011.