

Analisis Sistem Kendali Anti-Sway pada Gantry Crane Menggunakan Linear Quadratic Regulator (LQR) dan PID

Naufal Hibban¹, Mat Syai'in², Aulia Rahma Annisa³, Imam Sutrisno⁴, Didik Sukoco⁵, Ii Munadhif⁶
e-mail: naufal.hibban@student.ppns.ac.id¹, matsyai'in@ppns.ac.id², auliaannisa@ppns.ac.id³,
imam_sutrisno@ppns.ac.id⁴, didikskc@ppns.ac.id⁵, iimunadhif@ppns.ac.id⁶

^{1,2,3,4,5,6}Jurusan Teknik Otomasi, Politeknik Negeri Perkapalan Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 16 Mei 2025

Direvisi 30 Juli 2025

Diterbitkan 31 Juli 2025

Kata kunci:

Anti-sway
Gantry crane
Linear Quadratic Regulator
(LQR)
Matlab

Keywords:

Anti-sway
Gantry crane
Linear Quadratic Regulator
(LQR)
Matlab

ABSTRAK

Penelitian ini membandingkan efektivitas metode kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Linear Quadratic Regulator (LQR) dalam meredam ayunan beban (sway) pada sistem gantry crane dua dimensi. Dengan simulasi MATLAB menggunakan variasi beban 0,1 hingga 1,3 kg, hasil menunjukkan bahwa kendali LQR mampu menjaga kestabilan posisi troli dengan waktu naik (rise time) antara 1,56 hingga 1,96 detik dan overshoot rendah sekitar 2,66%–3,24%, serta berhasil mengurangi overshoot ayunan beban dari 37,41% menjadi 28,18%. Sebaliknya, kendali PID meskipun menunjukkan rise time dan overshoot lebih kecil secara numerik, mengalami ketidakstabilan pada grafik respons posisi yang mengindikasikan divergensi sistem secara fisik. Temuan ini menegaskan keunggulan LQR dalam mengendalikan gantry crane dengan dinamika kompleks dan variasi beban, sehingga lebih cocok untuk aplikasi industri yang menuntut kestabilan dan keamanan tinggi.

ABSTRACT

This study compares the effectiveness of Proportional-Integral-Derivative (PID) and Linear Quadratic Regulator (LQR) control methods in suppressing load sway on a two-dimensional gantry crane system. MATLAB simulations with load variations from 0.1 to 1.3 kg demonstrate that the LQR controller maintains trolley position stability with rise times between 1.56 and 1.96 seconds and low overshoot ranging from 2.66% to 3.24%, while effectively reducing load sway overshoot from 37.41% to 28.18%. In contrast, although the PID controller shows smaller numerical rise time and overshoot, it exhibits instability in the position response graph indicating physical system divergence. These findings confirm the superiority of LQR in controlling gantry cranes with complex dynamics and varying loads, making it more suitable for industrial applications demanding high stability and safety.

Penulis Korespondensi:

Naufal Hibban,
Teknik Kelistrikan Kapal, Program Studi Teknik Otomasi
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Kampus ITS Sukolilo Jl. Teknik Kimia, Keputih, Sukolilo, Surabaya, Indonesia, Kode Pos 60111.
Email: naufal.hibban@student.ppns.ac.id
Nomor HP/WA aktif:

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195



1. PENDAHULUAN

Gantry crane merupakan salah satu alat angkat dan angkut yang penting dalam berbagai sektor industri seperti pelabuhan, manufaktur, dan konstruksi karena kemampuannya dalam memindahkan beban berat secara efisien dalam skala besar [1]. Namun, permasalahan utama dalam pengoperasian gantry crane adalah fenomena ayunan (sway) beban, terutama saat troli bergerak secara horizontal. Ayunan ini dapat menyebabkan penurunan akurasi penempatan beban serta meningkatkan risiko kecelakaan kerja [2], [3], [4].

Pengendalian ayunan beban yang efektif sangat penting untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi operasional gantry crane. Berbagai metode pengendalian telah dikembangkan, mulai dari pengendali klasik seperti PID [3], [5] hingga metode kendali adaptif dan cerdas seperti fuzzy logic [2], [6] serta sliding mode control [7]. Namun, karakteristik dinamis gantry crane yang nonlinier dan underactuated membuat pengendalian menjadi tantangan tersendiri (Khatoon, Gupta, dan Das, 2014; Nishimoto dan Kikuuwe, 2023).

Metode Linear Quadratic Regulator (LQR) muncul sebagai teknik kendali optimal yang dapat menghasilkan feedback gain yang meminimalkan fungsi biaya kuadratik yang melibatkan kesalahan sistem dan usaha kontrol [8], [9]. LQR telah banyak diaplikasikan pada sistem gantry crane dan overhead crane dengan hasil yang menjanjikan dalam meredam ayunan beban dan meningkatkan performa dinamis [5], [10], [11].

Penggunaan algoritma optimasi seperti Particle Swarm Optimization (PSO), Genetic Algorithm (GA), dan Simulated Annealing (SA) untuk tuning parameter LQR juga telah banyak diteliti guna meningkatkan performa kendali [10], [11], [12]. Selain itu, penggabungan LQR dengan metode fuzzy logic atau PID adaptif memberikan robustnes lebih terhadap perubahan beban dan gangguan eksternal (Dwilaksono, Rusimamto, dan Asto, 2021; Shamrooz Aslam dan Zhao, 2022).

Beberapa studi juga mengembangkan kendali anti-sway menggunakan pendekatan input shaping yang terbukti efektif dalam meredam osilasi pada crane [4]. Penggunaan kontrol prediktif model nonlinear (NMPC) dan linear (MPC) juga dilakukan dengan mengikutsertakan operator secara langsung untuk sistem overhead crane [13]. Pendekatan vision-based control juga mulai diterapkan untuk meningkatkan akurasi pemindahan beban [14].

Perkembangan teknologi IoT dan komunikasi juga memudahkan monitoring dan kontrol crane secara real-time berbasis wireless dan protokol MQTT [15], [16], yang dapat mendukung implementasi kendali cerdas pada gantry crane [17].

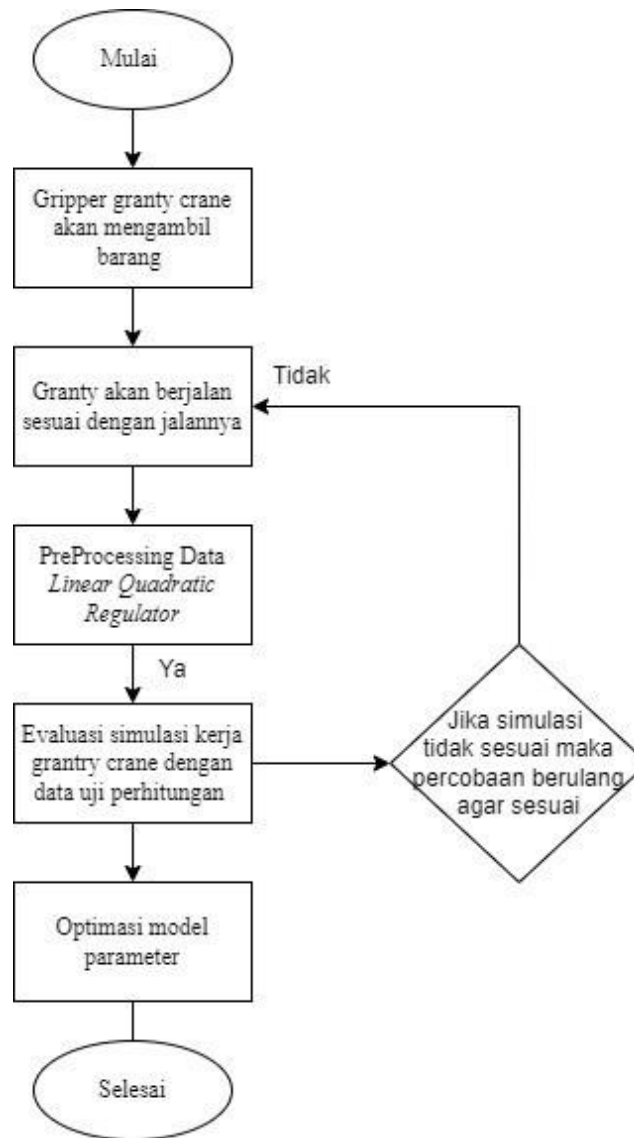
Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan menganalisis sistem kendali anti-sway berbasis LQR pada model gantry crane dua dimensi dengan simulasi menggunakan MATLAB, serta menguji performa dan ketahanan kendali terhadap variasi beban [18]. Hasil diharapkan dapat memberikan kontribusi untuk sistem pemindahan material yang lebih aman dan efisien.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui dua pendekatan utama dalam pengendalian ayunan beban pada sistem gantry crane, yaitu dengan menggunakan metode Proportional-Integral-Derivative (PID) dan Linear Quadratic Regulator (LQR). Metode PID digunakan sebagai pendekatan dasar untuk mengendalikan posisi troli dengan menyesuaikan parameter K_p , K_i , dan K_d secara manual guna mendapatkan respons sistem yang stabil. Sementara itu, metode LQR diterapkan sebagai teknik kendali optimal yang dirancang berdasarkan pemodelan matematika sistem gantry crane dalam bentuk state-space. Model tersebut dilinierisasi di sekitar titik kesetimbangan, kemudian digunakan untuk merancang pengendali LQR dengan menentukan matriks pembobot Q dan R guna meminimalkan fungsi biaya kuadratik. Kedua metode diuji dan dianalisis melalui simulasi menggunakan MATLAB/Simulink, dengan fokus pada performa peredaman ayunan, kestabilan sistem, serta efisiensi waktu stabilisasi beban.



2.1. Block Diagram Sistem



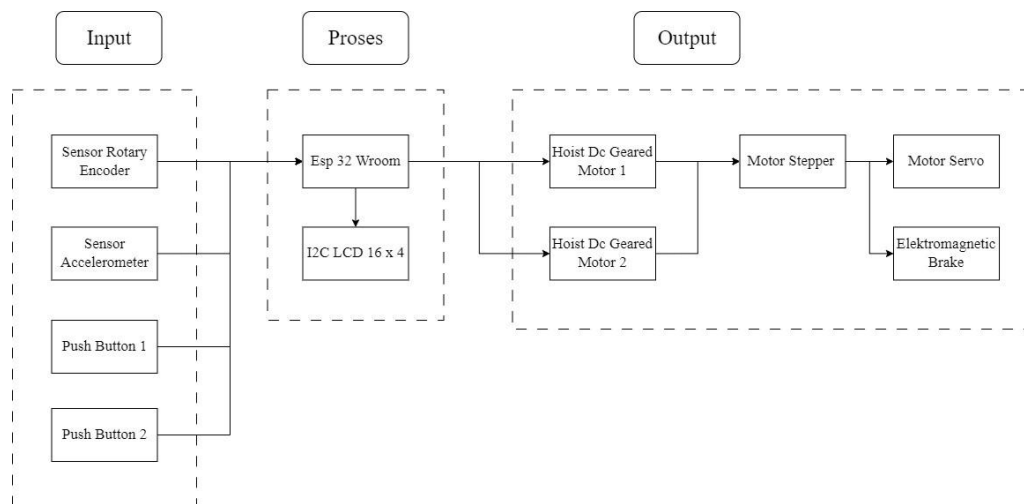
Gambar 1 : Blok Diagram Sistem

Proses diawali dengan perintah untuk memulai sistem. Langkah pertama yang dilakukan adalah Gripper pada Gantry Crane mengambil barang yang akan dipindahkan. Setelah itu, Gantry Crane mulai berjalan sesuai jalur yang telah ditentukan. Sebelum melakukan pengendalian, dilakukan proses Preprocessing Data yang berisi pengolahan dan persiapan data masukan yang dibutuhkan oleh algoritma Linear Quadratic Regulator (LQR).

Setelah data diproses, sistem akan masuk ke tahap evaluasi simulasi kerja Gantry Crane, di mana hasil dari simulasi dibandingkan dengan data pengujian atau perhitungan sebagai acuan. Jika hasil simulasi tidak sesuai dengan harapan atau nilai referensi, maka proses akan diulang hingga menghasilkan performa sistem yang sesuai. Jika hasilnya sudah sesuai, maka dilakukan optimasi model parameter untuk menyempurnakan performa dan stabilitas sistem kendali. Setelah semua tahap berhasil diselesaikan, proses diakhiri.

Adapun untuk system gantry crane input, proses dan output dapat terlihat pada Gambar 2 berikut.





Gambar 2 : Blok Diagram Sistem

Sistem dimulai dari bagian input, yang terdiri dari beberapa komponen penting. Sensor rotary encoder digunakan untuk mendeteksi posisi atau putaran mekanik, sedangkan sensor accelerometer bertugas mengukur percepatan menghentikan proses pengangkatan dan pergerakan. Semua sinyal input ini dikirim ke modul mikrokontroler ESP32 Wroom, yang berfungsi sebagai pusat pemrosesan data.

Selanjutnya pada bagian proses, ESP32 memproses data dari sensor dan tombol, serta menampilkan informasi penting seperti kecepatan, posisi, atau status sistem pada LCD I2C 16x4. Hasil pemrosesan ini digunakan untuk mengatur berbagai aktuatur pada bagian output.

Di bagian output, dan ayunan dari beban Gantry Crane. Dua push button digunakan sebagai kontrol manual untuk mengaktifkan atau terdapat dua hoist motor DC geared (motor pengangkat) yang dikendalikan untuk mengangkat dan menurunkan beban. Kemudian, motor stepper digunakan untuk mengatur posisi lateral gerakan crane secara presisi. Motor servo digunakan untuk penyesuaian sudut atau posisi tertentu, sedangkan elektromagnetik brake (rem elektromagnetik) berfungsi untuk mengunci posisi beban secara aman ketika pergerakan dihentikan.

2.2. Metode LQR Dengan Granty Crane

Metode Linear Quadratic Regulator (LQR) merupakan salah satu pendekatan kendali optimal yang digunakan untuk menstabilkan sistem dinamis linier. Pada sistem gantry crane, LQR sangat berguna untuk mengurangi efek sway (goyangan) beban yang tergantung saat crane bergerak, serta mengoptimalkan perpindahan troli secara halus dan cepat. Tujuan utama LQR adalah meminimalkan fungsi biaya kuadratik dari keadaan sistem dan sinyal kendali, sehingga diperoleh kendali yang efisien dan stabil.

Model matematika gantry crane dapat direpresentasikan dalam bentuk ruang keadaan (state-space). Misalnya, sistem memiliki empat variabel keadaan yaitu posisi troli x , kecepatan troli $\dot{x}$, sudut ayunan θ , dan kecepatan sudut ayunan $\dot{\theta}$. Matriks keadaan dan input sistem biasanya diperoleh melalui linearisasi model dinamika crane menggunakan hukum Newton atau Lagrange.

Persamaan Umum LQR

Fungsi biaya yang diminimalkan dalam LQR adalah:

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (1)$$

dengan:

- x = vektor keadaan
- u = input kendali
- Q = matriks bobot keadaan
- R = matriks bobot kendali



Solusi optimal diperoleh dari hukum umpan balik keadaan:

$$u = -Kx \quad (2)$$

dengan K adalah matriks gain hasil dari solusi Riccati:

$$K = R^{-1}B^TP \quad (3)$$

di mana P adalah solusi dari persamaan Riccati:

$$A^TP + PA - PBR^{-1}B^TP + Q = 0 \quad (4)$$

- Massa troli M=1.0kg
- Massa beban m=0.1kg
- Panjang tali l=0.5m
- Gravitasi g=9.81m/s²

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{g}{l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{(M+m)g}{lm} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.981 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 21.852 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1/(lm) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$P = \begin{bmatrix} 11 & 12 & 13 & 14 \\ 12 & 22 & 23 & 24 \\ 13 & 23 & 33 & 34 \\ 14 & 24 & 34 & 44 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Hitung masing-masing suku:

- A^TP
- PA
- $PBR^{-1}B^TP = (PB)(PB)^T$
- Tambahkan semua dan cocokkan terhadap $-Q$

Jika kamu sudah menentukan P dengan asumsi numerik misalnya:

$$P = \begin{bmatrix} 100 & 50 & 100 & 10 \\ 50 & 20 & 10 & 5 \\ 100 & 10 & 200 & 30 \\ 10 & 5 & 30 & 10 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$K = R^{-1}B^TP \quad (11)$$

$$K1 = 0 * 100 + 1 * 50 + 0 * 100 + (-2) * 10 = 50 - 20 = 30$$

$$K2 = 0 * 50 + 1 * 20 + 0 * 10 + (-2) * 5 = 20 - 10 = 10$$

$$K3 = 0 * 100 + 1 * 10 + 0 * 200 + (-2) * 30 = 10 - 60 = -50 \quad (12)$$

$$K4 = 0 * 10 + 1 * 5 + 0 * 30 + (-2) * 10 = 5 - 20 = -1$$

Jadi Rumus LQR

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (13)$$



$$u = -Kx = -[30x_1 + 10x_2 - 50x_3 - 15x_4] \quad (14)$$

Artinya, sinyal kontrol u yang dikirim ke aktuator troli merupakan kombinasi linier dari posisi troli x_1 , kecepatan troli x_2 , sudut ayunan x_3 , dan kecepatan ayunan x_4 dengan bobot penalti tertentu.

Jadi hasilnya, metode LQR ini mampu menghasilkan gain kontrol yang dapat digunakan untuk menstabilkan sistem gantry crane dan mengurangi ayunan beban secara signifikan. Dengan parameter yang telah dipilih dan diperhitungkan secara manual, sistem menjadi lebih responsif dan terkendali, meskipun tanpa bantuan perangkat lunak simulasi seperti MATLAB.

2.3. Metode PID Dengan Gantry Crane

Metode PID (Proportional-Integral-Derivative) adalah salah satu teknik pengendalian klasik yang banyak digunakan dalam sistem kontrol industri karena strukturnya yang sederhana namun cukup efektif. PID bekerja dengan menghitung besarnya kesalahan (error) antara nilai referensi (setpoint) dengan nilai aktual, lalu mengoreksi sistem berdasarkan tiga komponen utama: proporsional, integral, dan turunan dari error tersebut.

Pada sistem gantry crane, penerapan PID difokuskan untuk mengendalikan posisi troli agar mencapai posisi yang diinginkan dengan cepat dan akurat, sekaligus meminimalkan ayunan beban yang tergantung. Meski PID bukan kontrol optimal seperti LQR, dalam kondisi tertentu PID dapat menghasilkan performa yang cukup baik jika parameter disetel (tuning) dengan tepat.

Sasaran dari kontrol PID dalam gantry crane adalah:

- Memindahkan troli ke posisi target dengan cepat dan minim overshoot.
- Menjaga beban agar tidak berayun berlebihan selama dan setelah pergerakan troli.

Rumus umum pengendali PID:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (15)$$

dimana:

- $e(t) = r(t) - y(t)$ adalah error
- $r(t)$ adalah nilai referensi (posisi target troli)
- $y(t)$ adalah posisi aktual troli
- K_p , K_i , dan K_d masing-masing adalah konstanta proporsional, integral, dan turunan

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{s} \quad (16)$$

Misal:

- Massa troli $M = 1$ kg
- Koefisien gesek $2b = 2$

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{s^2 + 2} \quad (17)$$

Misalnya dari eksperimen tuning didapat:

- **Ku** = 60 (ultimate gain)
- **Pu** = 0.8 detik (ultimate period)

$$\begin{aligned} K_p &= 0.6 \times Ku = 0.6 \times 60 \\ &= \frac{2 \times 36}{0.8} = 90 \\ K_d &= K_p \times Pu / 8 = 90 \times \frac{0.8}{8} = 9 \end{aligned} \quad (18)$$

Hasil Tuning PID:

$K_p = 36$

$K_i = 90$

$K_d = 3.6$

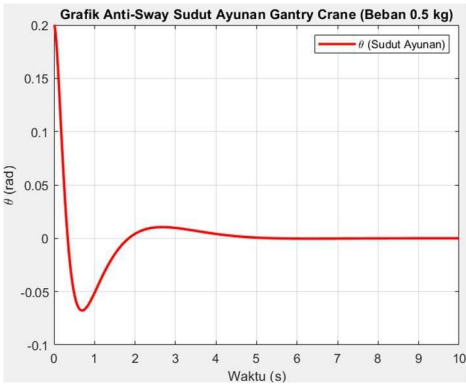
$$u(t) = 36(t) + 90 \int e(t) dt + 3.6 \frac{d}{dt} e(t) \quad (17)$$



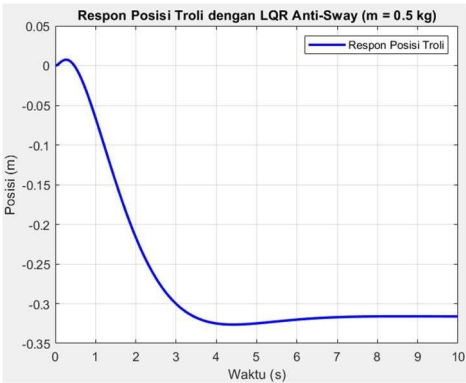
Jadi hasilnya, metode PID memberikan alternatif yang lebih sederhana dibandingkan LQR untuk mengendalikan sistem gantry crane. Dengan tuning parameter yang tepat seperti melalui metode Ziegler-Nichols, pengendali PID dapat mengarahkan posisi troli dengan cepat dan responsif. Namun, untuk sistem dengan dinamika kompleks dan interaksi nonlinier seperti ayunan beban, efektivitas PID tetap terbatas jika dibandingkan dengan metode kendali optimal seperti LQR.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Menggunakan LQR



Gambar 3 : Pengujian Menggunakan LQR Sudut Ayunan



Gambar 4 : Pengujian Menggunakan LQR Respon posisi Troli

Tabel I: Pengujian Data LQR

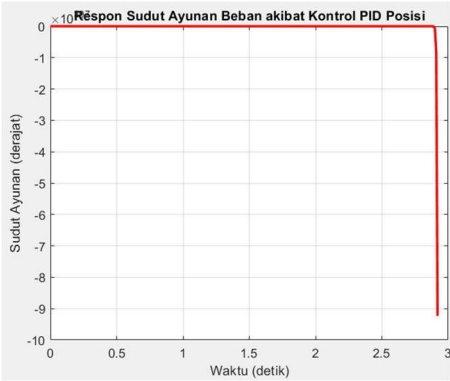
No	Contoller	Berat Massa	Rise Time	Settltting Time	Peak Time	Overshoot
1	Position	0,1 Kg	1,557	4,256	3,64	2,66%
2		0,5 Kg	1,691	4,676	3,90	2,89%
3		0,8 Kg	1,792	4,988	4,10	3,03%
4		1,0 Kg	1,859	5,194	4,23	3,12%
5		1,3 Kg	1,958	5,498	4,42	3,24%
No	Contoller	Berat Massa	Rise Time	Settltting Time	Peak Time	Overshoot
1	Sway	0,1 Kg	0,236	0,700	3,83	37,41%
2		0,5 Kg	0,236	0,690	3,98	34,70%
3		0,8 Kg	0,234	0,690	4,14	31,52%
4		1,0 Kg	0,232	0,680	4,220	30,11%
5		1,3 Kg	0,230	0,680	4,318	28,18%



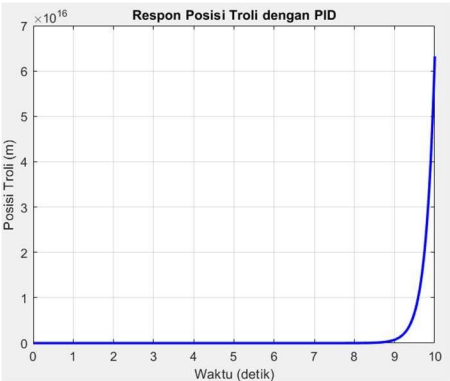
Berdasarkan hasil pengujian terhadap sistem Gantry Crane dengan variasi berat beban, dapat disimpulkan bahwa kontrol LQR menunjukkan performa yang konsisten dan efektif baik dalam mengatur posisi troli maupun dalam meredam sudut ayunan beban (anti-sway). Pada pengendalian posisi troli, peningkatan massa dari 0.1 kg hingga 1.3 kg berbanding lurus dengan kenaikan nilai rise time, settling time, dan peak time. Hal ini menunjukkan bahwa beban yang lebih besar memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kestabilan akibat meningkatnya inersia sistem. Meskipun demikian, overshoot tetap terkendali dengan kenaikan yang relatif kecil, dari 2,66% menjadi 3,24%, menandakan bahwa respon sistem tetap stabil dan dapat dikendalikan dengan baik.

Sementara itu, pada pengujian kontrol sudut ayunan (anti-sway), LQR memberikan hasil yang lebih menarik. Meskipun rise time dan settling time tetap konstan di kisaran 0,23 detik dan 0,68–0,70 detik, nilai overshoot justru menurun signifikan dari 37,41% menjadi 28,18% seiring bertambahnya massa beban. Penurunan ini mengindikasikan bahwa sistem menjadi lebih mudah dikendalikan secara dinamis ketika beban yang digerakkan lebih berat, karena efek redaman alami terhadap ayunan meningkat. Secara keseluruhan, kontrol LQR terbukti mampu mengatasi perubahan dinamika sistem akibat variasi beban dengan tetap menjaga stabilitas, responsivitas, dan efektivitas kontrol, baik pada aspek posisi maupun sudut ayunan.

3.2. Pengujian Menggunakan PID



Gambar 5: Pengujian Menggunakan PID Sudut Ayunan



Gambar 6: Pengujian Menggunakan PID Posisi Troli

Tabel II : Pengujian Data LQR						
No	Contoller	Berat Massa	Rise Time	Settltling Time	Peak Time	Overshoot
1	Position	0,1 Kg	0,0177	0,0293	0,0819	1,10%
		0,5 Kg	0,0177	0,0292	0,2597	1,20%
		0,8 Kg	0,0177	0,0292	0,2558	1,36%
		1,0 Kg	0,0177	0,0292	0,2558	1,47%



		1,3 Kg	0,0177	0,0292	0,2558	1,63%
No	Contoller	Berat Massa	Rise Time	Settling Time	Peak Time	Overshoot
1	Sway	0,1 Kg	0,0177	0,0293	0,0831	1,11%
2		0,5 Kg	0,0177	0,0292	0,2597	1,34%
3		0,8 Kg	0,0177	0,0292	0,2558	1,57%
4		1,0 Kg	0,0177	0,0292	0,2558	1,73%
5		1,3 Kg	0,0177	0,0291	0,2519	1,95%

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian performa kontrol PID pada sistem gantry crane, diperoleh bahwa respon posisi troli menunjukkan adanya ketidakstabilan yang signifikan. Hal ini terlihat dari grafik respon yang mengalami pertumbuhan eksponensial hingga mencapai nilai yang tidak realistis secara fisik (orde 10^{16} meter), menandakan bahwa sistem mengalami divergensi akibat parameter kendali yang terlalu agresif atau model yang tidak sepenuhnya representatif. Sementara itu, respon sudut ayunan beban juga memperlihatkan gejala serupa, di mana sudut ayunan melonjak drastis hingga ± 10 derajat dalam waktu singkat. Meskipun demikian, data numerik pada tabel performa seperti rise time, settling time, peak time, dan overshoot justru menunjukkan nilai yang konsisten dan terkontrol, dengan waktu naik di kisaran 0.0177 detik dan overshoot maksimum hanya 1.95%. Ketidaksesuaian antara hasil numerik dan grafik ini mengindikasikan adanya inkonsistensi dalam pemodelan atau penerapan feedback pada sistem. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi ulang terhadap parameter kontrol PID, serta penyesuaian model dinamis agar mencerminkan kondisi aktual dari sistem gantry crane secara lebih akurat. Penyesuaian ini penting untuk menghindari respon sistem yang tidak stabil dan memastikan bahwa kontrol posisi troli tidak menimbulkan ayunan beban yang berlebihan.

3.3. Analisis LQR dan PID

Hasil simulasi sistem Gantry Crane menggunakan dua pendekatan kendali, yakni PID dan LQR, memperlihatkan perbedaan performa yang cukup mencolok. Penerapan kontrol PID menunjukkan adanya ketidakstabilan sistem, terutama pada pergerakan troli yang mengalami peningkatan ekstrem hingga mencapai skala 10^{16} meter. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sistem tidak terkendali akibat konfigurasi parameter PID yang terlalu agresif atau kesalahan dalam struktur umpan balik yang digunakan. Respon sudut ayunan beban juga mengalami fluktuasi tajam dengan amplitudo mencapai ± 10 derajat dalam waktu singkat. Walaupun parameter performa numerik seperti rise time, settling time, dan overshoot terlihat terjaga dengan baik — masing-masing berada di bawah 0,03 detik dan overshoot di bawah 2% — ketidaksesuaian dengan grafik menunjukkan bahwa sistem belum berjalan sesuai ekspektasi. Oleh karena itu, pendekatan PID pada skenario ini masih perlu dievaluasi, khususnya dalam hal tuning parameter dan representasi model fisiknya agar menghasilkan respon yang realistis dan stabil.

Di sisi lain, kontrol LQR menunjukkan performa yang lebih unggul dan stabil dalam menghadapi dinamika sistem yang berubah akibat variasi massa beban. Respon posisi troli tetap terkendali meskipun terjadi peningkatan waktu respon seiring bertambahnya beban, yang merupakan konsekuensi logis dari meningkatnya inersia sistem. Tingkat overshoot tetap rendah dan hanya mengalami kenaikan marginal dari 2,66% ke 3,24%. Lebih lanjut, dalam pengendalian sudut ayunan beban, metode LQR memberikan hasil yang mengesankan dengan tren penurunan overshoot dari 37,41% menjadi 28,18% seiring bertambahnya massa. Penurunan ini mencerminkan bahwa massa beban yang lebih besar turut memberikan efek redaman alami terhadap ayunan. Secara keseluruhan, kontrol LQR terbukti lebih adaptif dan efektif dibandingkan PID, baik dalam menjaga kestabilan posisi troli maupun dalam meredam ayunan beban pada sistem Gantry Crane.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan dan pengendalian sistem Gantry Crane memerlukan pemilihan strategi kontrol yang sesuai agar mampu menjawab dinamika sistem yang kompleks dan sensitif terhadap perubahan beban. Temuan utama dari studi ini mengindikasikan bahwa kontrol PID konvensional memiliki keterbatasan dalam menjaga stabilitas sistem secara menyeluruh, khususnya ketika sistem menghadapi



variasi parameter fisik dan kondisi operasi. Sebaliknya, penerapan kontrol optimal seperti LQR memberikan respons yang lebih adaptif dan terkontrol, tidak hanya dalam mengatur posisi troli, tetapi juga dalam menekan sudut ayunan beban secara signifikan. Keselarasan antara karakteristik respon sistem dan peningkatan kestabilan akibat perubahan massa beban memperkuat validitas penggunaan LQR dalam aplikasi industri berbasis beban dinamis. Gagasan lanjutan dari penelitian ini dapat diarahkan pada pengembangan metode hybrid antara PID dan LQR, atau integrasi dengan metode prediktif cerdas berbasis pembelajaran mesin untuk meningkatkan fleksibilitas, efisiensi energi, dan kinerja sistem dalam lingkungan operasi yang lebih kompleks dan real-time.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa hormat dan syukur, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Secara khusus, penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) sebagai institusi pendidikan yang telah memberikan fasilitas, bimbingan akademik, dan dukungan administratif selama proses penelitian berlangsung. Penghargaan yang sebesar-besarnya juga disampaikan kepada dosen pembimbing, Bapak Mat Syai'in dan Ibu Aulia Rahma Annisa, atas segala arahan, motivasi, dan ilmu yang telah diberikan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Tidak lupa, penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak lainnya yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu kelancaran penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Da Xu, S. Member, W. He, and S. Li, "9-REVIEW.pdf," vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014.
- [2] S. Bahri and F. A. Permana, "Perancangan Prototipe Sistem Kendali Gantry Crane Untuk Meredam Ayunan Secara Realtime Dengan Fuzzy Logic Controller," *Elektum*, vol. 14, no. 1, p. 23, 2017, doi: 10.24853/elektum.14.1.23-31.
- [3] F. Fahmi, E. Susanto, D. Ph, and A. S. Wibowo, "Sistem Kendali Anti Sway Gantry Crane Menggunakan Metode PID," vol. 6, no. 2, pp. 3053–3060, 2019.
- [4] J. Stergiopoulos, G. Konstantopoulos, and A. Tzes, "Experimental verification of an adaptive input shaping scheme for hoisting cranes," no. June, pp. 730–735, 2009, doi: 10.1109/med.2009.5164630.
- [5] S. Khatoun, D. Gupta, and L. K. Das, "PID & LQR control for a quadrotor: Modeling and simulation," *Proc. 2014 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics, ICACCI 2014*, pp. 796–802, 2014, doi: 10.1109/ICACCI.2014.6968232.
- [6] E. A. Esleman, G. Önal, and M. Kalyoncu, "Optimal PID and fuzzy logic based position controller design of an overhead crane using the Bees Algorithm," *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 10, 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04793-0.
- [7] L. X. Hai, T. H. Nguyen, T. G. Khanh, N. T. Thanh, B. T. Duong, and P. X. Minh, "Anti-Sway Tracking Control of Overhead Crane System Based on Pid and Fuzzy Sliding Mode Control," *Vietnam J. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 1, p. 116, 2017, doi: 10.15625/0866-708x/55/1/7920.
- [8] Q. P. Syahna, E. Yuniarti, and E. Kurniawan, "Analisis Respon Sistem Kendali LQR (Linear Quadratic Regulator) Pada Simulasi Gimbal Kamera Dua Sumbu," *Al-Fiziya J. Mater. Sci. Geophys. Instrum. Theor. Phys.*, vol. 2, no. 1, pp. 49–55, 2019, doi: 10.15408/fiziya.v2i1.11178.
- [9] Ü. Önen, "Anti-Swing Control of an Overhead Crane by Using Genetic Algorithm Based LQR," *Int. J. Eng. Comput. Sci.*, no. June, pp. 2–7, 2017, doi: 10.18535/ijecs/v6i6.12.
- [10] X. Guo, X. Yu, H. Wang, Z. Liu, N. Bai, and L. Cui, "Modeling, Design and Simulation of Crown Block Grab Anti-Swing Control Based on LQR and PSO Algorithm," *Adv. Transdiscipl. Eng.*, vol. 40, pp. 893–903, 2023, doi: 10.3233/ATDE230557.
- [11] S. Bandong, R. C. Kirana, Y. Y. Nazaruddin, and E. Joelianto, "Optimal Gantry Crane PID Controller Based on LQR with Prescribed Degree of Stability by Means of GA, PSO, and SA," *7th Int. Conf. Electr. Veh. Technol. ICEVT 2022 - Proceeding*, no. September, pp. 46–51, 2022, doi: 10.1109/ICEVT55516.2022.9925018.
- [12] M. I. Solihin, Wahyudi, M. A. S. Kamal, and A. Legowo, "Objective function selection of GA-based PID control optimization for automatic gantry crane," *Proc. Int. Conf. Comput. Commun. Eng. 2008, ICCCE08 Glob. Links Hum. Dev.*, no. September 2021, pp. 883–887, 2008, doi: 10.1109/ICCCE.2008.4580732.
- [13] M. Giacomelli, D. Colombo, M. Faroni, O. Schmidt, L. Simoni, and A. Visioli, "Comparison of Linear and Nonlinear MPC on Operator-In-the-Loop Overhead Cranes," *2019 IEEE 7th Int. Conf. Control. Mechatronics Autom. ICCMA 2019*, no. November, pp. 221–225, 2019, doi: 10.1109/ICCMA46720.2019.8988758.
- [14] A. OKUBANJO, O. OYETOLA, and O. ADEKOMAYA, "Vision Based Control of Gantry Crane System," *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. Appl. Sci. Eng.*, no. December, 2018, doi: 10.18038/aubtda.420980.
- [15] I. Harjanto, "IoT Gateway Menggunakan Protokol MQTT pada Perangkat Kendali Berbasis Modbus-RTU," *J. Ilm. Teknosains*, vol. 6, no. 1, pp. 12–19, 2020.



- [16] Z. Ahyadi, A. Amiennudin, E. Prasetyo, S. Saifullah, and I. Noor, "Sistem IoT Untuk Monitoring Penggunaan Energi Listrik Dengan Protokol MQTT," *Poros Tek.*, vol. 13, no. 1, pp. 52–58, 2021, [Online]. Available: <https://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/porosteknik/article/view/1050>
- [17] H. S. Idris, A. Saputra, and H. Mulyadi, "6415-Manuscript-22004-1-10-20231222 sistem scada berbasis iot," vol. 7, no. 2, 2023.
- [18] N. Hibban, M. Syai, and A. R. Annisa, "Analisis Sistem Kendali Anti-Sway pada Gantry Crane Menggunakan Linear Quadratic Regulator (LQR) dengan Matlab," vol. x, no. 9, pp. 1–5.

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195

