

Perancangan Lengan Robot SCARA 3 DOF dengan Motor DC dan Kontrol PID

Bayu Nugraha Suparto
School of Electrical Engineering
Telkom University

Bandung, Indonesia
bayunugrahasuparto@student.telkomuniversity.ac.id

Erwin Susanto
School of Electrical Engineering
Telkom University

Bandung, Indonesia
erwinelektro@telkomuniversity.ac.id

Irham Mulkan Rodiana
School of Electrical Engineering
Telkom University

Bandung, Indonesia
irhammulkan@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) dengan tiga derajat kebebasan (3 DOF) dirancang untuk aplikasi otomasi sederhana yang membutuhkan akurasi dan stabilitas pergerakan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun lengan robot SCARA yang dikendalikan oleh motor DC dan metode kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative). Sistem kontrol menggunakan mikrokontroler STM32F407 yang menerima input koordinat kartesian dan mengubahnya menjadi sudut pergerakan tiap joint melalui inverse kinematics. Encoder incremental digunakan sebagai umpan balik posisi untuk mengatur kendali tertutup pada setiap motor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontrol PID mampu mengatur posisi sudut secara presisi pada masing-masing joint, bahkan saat mengangkat beban dengan variasi massa 100g, 200g, dan 300g. Sistem berhasil mencapai rata-rata error posisi yang rendah: $0,073^\circ$ pada sumbu θ_1 , $0,2267^\circ$ pada sumbu θ_2 , dan $0,0277$ cm pada sumbu Z. Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi motor DC, encoder, dan kontrol PID memberikan hasil yang optimal untuk kontrol posisi lengan robot SCARA.

Kata kunci— Encoder, DOF 3, Inverse Kinematik, Kontrol PID, Lengan Robot SCARA

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi robotika mendorong transformasi di sektor industri, terutama dalam manufaktur dan logistik, dengan tujuan meningkatkan produktivitas dan efisiensi. Salah satu solusi yang banyak diterapkan adalah penggunaan robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) dengan tiga derajat kebebasan (3 DOF), yang banyak digunakan dalam aplikasi otomasi skala kecil karena kemampuannya melakukan gerakan presisi dan cepat. Penggunaan motor DC sebagai aktuator, dipadukan dengan encoder untuk umpan balik posisi dan kontrol PID, telah terbukti efektif untuk memastikan stabilitas dan akurasi pergerakan pada robot SCARA 3 DOF.

Namun, meskipun kontrol PID sudah efektif untuk mengatur posisi motor DC, tantangan utama adalah mengoptimalkan parameter PID untuk mengatasi kesalahan posisi dan ketidakstabilan pergerakan, terutama saat beban berubah atau kecepatan sistem bervariasi dalam aplikasi industri [1]. Berbagai penelitian telah mengembangkan algoritma tuning PID yang lebih canggih, tetapi pengaturan manual masih memerlukan penyesuaian teliti dan simulasi kompleks untuk mencapai performa optimal [2][3][4]. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun lengan robot SCARA 3 DOF yang dikendalikan oleh motor

DC dan kontrol PID, dengan fokus pada pengembangan struktur mekanik dan tuning PID untuk mencapai posisi yang akurat dan respon yang cepat, serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem otomasi yang lebih efisien di sektor industri.

II. KAJIAN TEORI

Pada bab ini, akan dijelaskan berbagai teori yang mendasari penelitian ini. Penjelasan ini mencakup konsep-konsep dan metode yang digunakan untuk mendukung pengembangan dan implementasi dalam penelitian:

A. SCARA Robot

Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) adalah robot lengan yang dirancang untuk aplikasi otomatisasi dengan tingkat presisi dan kecepatan tinggi, cocok untuk tugas industri seperti perakitan, pengelasan, dan penanganan material [1]. Robot ini memiliki keunggulan dalam melakukan gerakan horizontal dengan fleksibilitas tinggi, mempertahankan stabilitas dan akurasi meskipun dengan beban bervariasi [5]. SCARA 3 DOF yang digunakan dalam penelitian ini dilengkapi dengan kontrol PID untuk mencapai gerakan presisi, serta mekanisme suction vacuum untuk mengambil dan melepaskan objek, dikendalikan melalui mikrokontroler STM32 Blackpill, membuatnya efisien dalam aplikasi industri yang membutuhkan presisi tinggi dan stabilitas [6][7].

B. Motor DC dan Encoder

Motor DC mengubah energi listrik arus searah menjadi energi mekanik, dengan kemampuan torsi tinggi dan kontrol kecepatan yang mudah dan ekonomis, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan gerakan akurat dan responsif, seperti dalam robot industri, kendaraan listrik, dan mesin kontrol numerik [5]. Pada motor DC, encoder digunakan untuk memberikan umpan balik posisi dan kecepatan, dengan incremental encoder yang menghasilkan pulsa digital setiap kali poros berputar, memungkinkan pembacaan posisi yang akurat. Dalam penelitian ini, encoder incremental digunakan untuk mengukur rotasi motor DC dan mengonversinya ke satuan derajat berdasarkan jumlah pulsa per rotasi (PPR), rasio gearbox, dan pulley, mendukung sistem SCARA dengan desain kompak dan biaya rendah yang mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler STM32 [8][9][10][11].

C. Inverse Kinematics

Inverse Kinematics (IK) adalah metode untuk menentukan posisi end effector pada robot SCARA 3 DOF berdasarkan posisi yang diinginkan di ruang kerja. Metode ini menghitung sudut yang perlu digerakkan oleh sendi robot untuk mencapai posisi tersebut, yang lebih kompleks dibandingkan dengan forward kinematics karena melibatkan penyelesaian persamaan non-linear, terutama saat banyak sendi digunakan [12]. Dengan menggunakan persamaan kinematika terbalik, posisi end effector (x, y, z) digunakan untuk menghitung sudut rotasi pada sendi pertama (θ_1), kedua (θ_2), dan translasi pada sendi ketiga (z_0), memastikan robot SCARA bergerak presisi menuju posisi yang diinginkan [1][12].

D. Kontrol PID

Kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID) adalah metode pengendalian yang digunakan untuk mengatur kecepatan, posisi, dan torsi motor dengan menyesuaikan keluaran sistem berdasarkan perbedaan antara setpoint dan nilai aktual. PID banyak digunakan di industri karena memberikan presisi tinggi dan kemudahan dalam penyesuaian parameter K_p , K_i , dan K_d . Tuning PID dapat dilakukan dengan metode seperti Trial and Error, Ziegler-Nichols, atau Machine Learning untuk mencapai respon yang diinginkan [13].

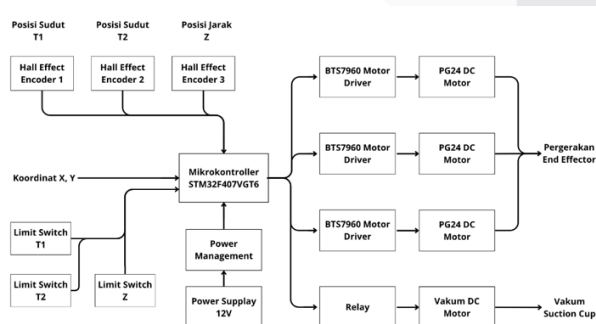
Kontrol PID dapat dirumuskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Kontrol PID mengatur respons motor berdasarkan umpan balik posisi dari encoder, yang membandingkan posisi aktual dengan setpoint yang dihitung dari inverse kinematics. Parameter PID K_p (proportional), K_i (integral), dan K_d (derivative) berfungsi untuk mengatasi kesalahan, mengurangi error steady state, dan meredam osilasi atau overshoot, sehingga memastikan pergerakan motor presisi dan stabil. Meskipun efektif dalam sistem kendali closed loop, PID tidak optimal jika terjadi ketidakpastian dalam sistem [5][13].

III. METODE

Dibawah ini merupakan Diagram Perancangan Lengan Robot SCARA 3 DOF dengan Motor DC dan Kontrol PID:



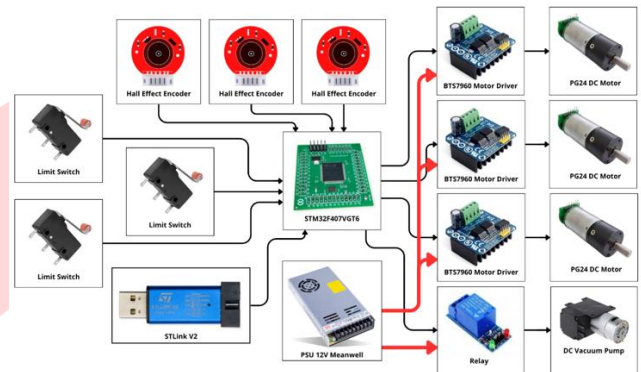
GAMBAR 1 Diagram Perancangan Lengan Robot SCARA 3 DOF dengan Motor DC dan Kontrol PID

Gambar diatas menunjukkan sistem kontrol dengan STM32 sebagai mikrokontroler. sistem ini dirancang untuk menggerakkan lengan robot sesuai dengan koordinat yang

ditentukan dengan mengkonversikan koordinat kartesian (x, y, z) menjadi sudut pada setiap joint lengan robot. Menggunakan perhitungan inverse kinematics, yang digerakkan dengan motor DC dilengkapi encoder pada tiap motor berfungsi untuk umpan balik posisi ke mikrokontroller. Penggunaan PID pada setiap motor dapat mengurangi nilai error pada setiap joint sehingga posisi joint dapat mencapai sudut yang presisi.

A. Skematik Rangkaian Elektronik Arm Robot SCARA 3 DOF

Dibawah ini merupakan Desain Skematik Rangkaian Elektronik Arm Robot SCARA 3 DOF:

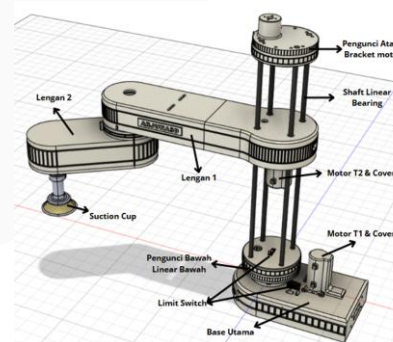


GAMBAR 2 Desain Skematik Rangkaian Elektronik Arm Robot SCARA 3 DOF

Gambar ini menunjukkan rangkaian elektronika robot SCARA 3 DOF, dengan STM32F407 sebagai mikrokontroler utama yang mengontrol motor DC dan memproses data encoder. Motor driver BTS7960 mengatur motor, sementara encoder mengukur rotasi dan limit switch berfungsi sebagai pengamanan. PSU Meanwell menyediakan daya, relay mengontrol aliran listrik, dan ST-Link untuk pemrograman. Motor pompa R385 digunakan untuk sistem vakum.

B. Skematik Mekanik Arm Robot SCARA 3 DOF

Di bawah ini merupakan desain mekanik lengan robot:



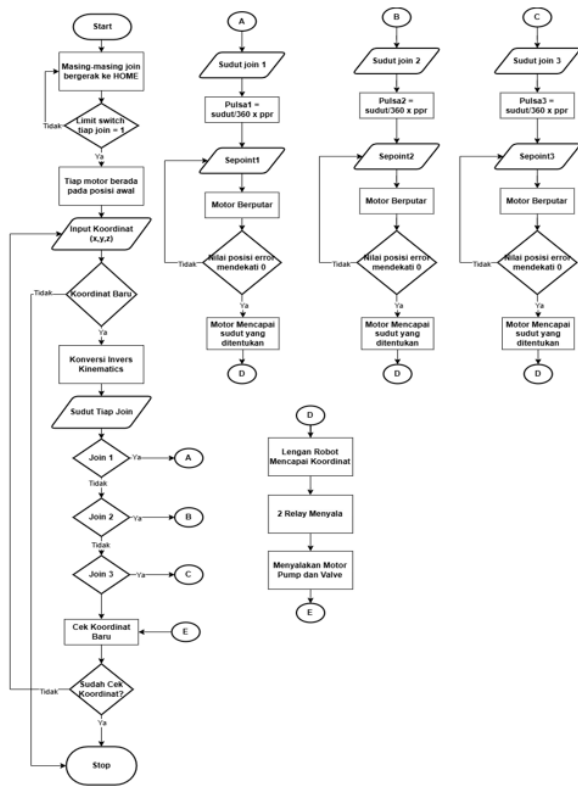
GAMBAR 3 Skematik Mekanik Arm Robot SCARA 3 DOF

Gambar ini menunjukkan desain lengan robot SCARA 3 DOF yang terdiri dari base utama, lengan 1, dan lengan 2, dengan mekanisme rotasi horizontal dan translasi vertikal. Sistem ini menggunakan motor DC PG24, encoder, pulley, thrust bearings, dan leadscrew untuk memastikan pergerakan presisi dan stabil, bahkan dengan variasi beban. Lengan 2 dilengkapi dengan suction pump sebagai end-effector untuk mengambil objek, dan seluruh sistem

dikendalikan dengan kontrol PID melalui mikrokontroler STM32.

C. Desain Perangkat Lunak

Di bawah ini terdapat *flowchart* dari desain perangkat lunak:



GAMBAR 4 Desain Perangkat Lunak

Penelitian ini menggunakan mikrokontroler STM32F407 untuk mengendalikan lengan robot SCARA 3 DOF, yang menerima input koordinat kartesian (x dan y) dan memprosesnya melalui algoritma inverse kinematics untuk menghitung sudut setiap joint. Hasil perhitungan digunakan sebagai setpoint untuk kontrol PID yang memastikan pergerakan motor mencapai posisi target dengan akurasi tinggi. Encoder incremental memberikan umpan balik posisi untuk mengatur setiap motor. Setiap joint diuji dengan variasi beban (100g, 200g, dan 300g) untuk mengevaluasi error posisi pada tiga sumbu: θ_1 , θ_2 , dan z_0 . Sistem diuji untuk memastikan bahwa robot dapat mencapai koordinat target secara tepat dan stabil, dengan diagram alur menunjukkan langkah-langkah mulai dari pengecekan posisi awal hingga mencapai posisi yang diinginkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, dijelaskan hasil-hasil yang diperoleh dari penelitian ini, termasuk analisis terhadap pengaruh parameter PID terhadap akurasi dan kestabilan sistem. Hasil tersebut disajikan dengan menggunakan grafik, tabel, dan deskripsi untuk memberikan pemahaman yang jelas tentang performa sistem yang diuji.

A. Pengujian Encoder dan Motor

Pengujian encoder dan motor ini memiliki 3 pergerakan sendi, yaitu gerakan translasi sendi z_0 , rotasi sendi θ_1 , rotasi sendi θ_2 . Pada pengujian sumbu Z, jumlah pulsa encoder untuk satu rotasi dihitung 22 PPR, dan setelah penambahan

gearbox 64:1, total pulsa menjadi 1408 PPR, dengan 1760 pulsa diperlukan untuk pergerakan 1 cm. Pengujian manual sejauh 5 cm menghasilkan rata-rata 8773,7 pulsa dengan error 37,7 pulsa, menunjukkan performa sistem yang cukup baik meskipun ada sedikit selisih akibat keterbatasan akurasi pengukuran manual. Dengan menggunakan nilai teoritis 8800 pulsa, rata-rata pembacaan aktual adalah 4,99 cm dengan error 0,02 cm, menunjukkan akurasi yang sangat baik dalam mendeteksi pergerakan linear pada sumbu Z.

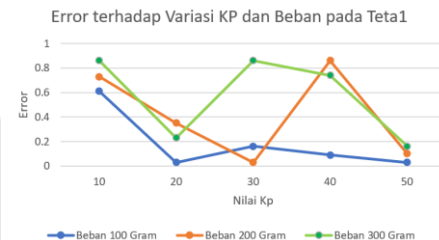
Pada pengujian sumbu θ_1 lengan robot, encoder dengan 22 PPR dikombinasikan dengan gearbox berasio 64:1 dan pulley gear berasio 4:1, sehingga total pulsa untuk satu rotasi penuh sumbu mencapai 5.632 PPR. Untuk mengukur akurasi pergerakan, dilakukan pengujian dengan memutar sumbu θ_1 secara manual hingga mencapai sudut 90° , proses ini diulang sebanyak 10 kali sehingga didapatkan rata-rata 1.395 pulsa, dan perhitungan secara teoritis setara dengan 1.408 pulsa. Sehingga didapatkan rata-rata error 13,1 pulsa.

Pengujian pada sumbu θ_2 lengan robot dilakukan untuk mengukur akurasi sistem dalam mencapai sudut tertentu berdasarkan pembacaan encoder. Encoder yang digunakan memiliki resolusi 22 PPR, ditambah gearbox berasio 64:1 dan pulley berasio 3:1, sehingga menghasilkan total 4.224 pulsa untuk satu rotasi penuh (360°). Untuk pengujian, sumbu θ_2 diputar secara manual hingga mencapai sudut 180° , proses ini diulang sebanyak 10 kali sehingga didapatkan rata-rata 2.113 pulsa, dan perhitungan secara teoritis setara dengan 1.408 pulsa. Sehingga didapatkan rata-rata error 6,8 pulsa.

B. Pengujian Posisi Lengan Robot Pada θ_1

1. Hasil Pengujian θ_1 dengan Variasi Kp dan Beban

Pengujian ini dilakukan untuk melihat pengaruh nilai Kp terhadap akurasi posisi sudut θ_1 pada tiga beban berbeda (100 g, 200 g, 300 g) dengan setpoint tetap $110,23^\circ$, menggunakan lima variasi Kp: 10, 20, 30, 40, dan 50. Dibawah ini merupakan gambar nilai error terhadap variasi Kp dan Beban pada θ_1 :



GAMBAR 5 Gambar nilai error terhadap variasi Kp dan Beban pada θ_1

Berdasarkan grafik pada Gambar diatas, pada beban 100 gram, error stabil dan kecil pada Kp = 20 dan 50. Pada beban 200 gram, error terkecil terjadi pada Kp = 30. Pada beban 300 gram, error fluktuatif tinggi pada Kp = 30 dan 40, namun menurun signifikan pada Kp = 50.

Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 1 Rata - rata Error θ_1 untuk Variasi Kp

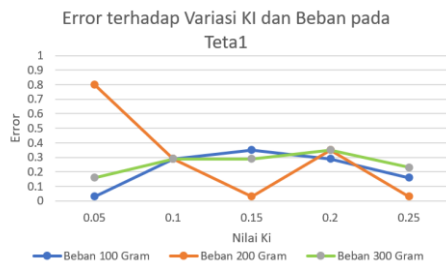
No	KP	Rata-rata error
1	10	0,733333333
2	20	0,203333333
3	30	0,35
4	40	0,563333333
5	50	0,096666667

Hasil menunjukkan bahwa Kp = 50 memberikan rata-rata error terbaik sebesar 0,097°, sementara Kp = 10 menghasilkan error terbesar sebesar 0,73°.

2. Hasil Pengujian θ_1 dengan Variasi Ki dan Beban

Pengujian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh nilai Ki terhadap akurasi posisi, dengan Kp tetap berdasarkan

pengujian sebelumnya. Nilai K_i divariasikan antara 0,05 hingga 0,25, dan hasil pengujian serta rata-rata error ditunjukkan pada gambar dibawah ini:



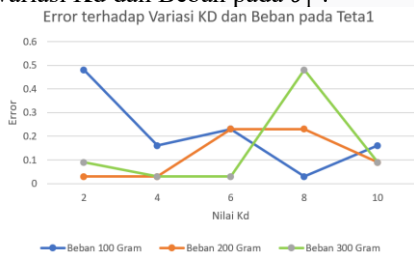
GAMBAR 6 Gambar nilai error terhadap variasi K_i dan Beban pada θ_1
 Berdasarkan grafik Gambar 4.5, $K_i = 0,25$ memberikan performa terbaik untuk beban 200 gram dan 300 gram, dengan error yang kecil dan stabil. Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 2 Rata - rata Error θ_1 untuk Variasi K_i

No	K_i	Rata-rata error
1	0,05	0,33
2	0,1	0,29
3	0,15	0,223333333
4	0,2	0,33
5	0,25	0,14

Hasilnya menunjukkan $K_i = 0,25$ menghasilkan rata-rata error terkecil 0,14°, sementara nilai K_i yang terlalu kecil cenderung meningkatkan error.

3. Hasil Pengujian θ_1 dengan Variasi K_d dan Beban
 Pengujian ini memvariasikan nilai K_d antara 2 hingga 10 dengan selisih 2 untuk mengurangi osilasi dan meningkatkan stabilitas. Dibawah ini merupakan gambar nilai error terhadap variasi K_d dan Beban pada θ_1 :



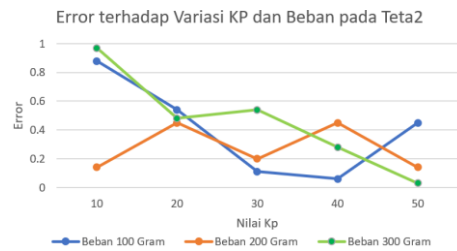
GAMBAR 7 Gambar nilai error terhadap variasi K_d dan Beban pada θ_1
 Berdasarkan grafik, error pada sumbu θ_1 fluktuatif terhadap variasi K_d , terutama pada beban 300 gram. Secara keseluruhan, $K_d = 4$ menghasilkan rata-rata error terkecil. Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 3 Rata - rata Error θ_1 untuk Variasi K_d

No	K_d	Rata-rata error
1	2	0,2
2	4	0,073333333
3	6	0,163333333
4	8	0,246666667
5	10	0,113333333

Nilai PID terbaik untuk sumbu θ_1 adalah $K_p = 50$, $K_i = 0,25$, dan $K_d = 4$, dengan rata-rata error terkecil 0,0733° pada akumulasi beban.

C. Pengujian Posisi Lengan Robot Pada θ_2
 1. Hasil Pengujian θ_2 dengan Variasi K_p dan Beban
 Pengujian ini menganalisis pengaruh K_p terhadap error posisi sudut θ_2 dengan setpoint 42,16° dan tiga kondisi beban (100 g, 200 g, 300 g). Variasi K_p diuji antara 10 hingga 50. Dibawah ini merupakan gambar nilai error terhadap variasi K_p dan Beban pada θ_2 :



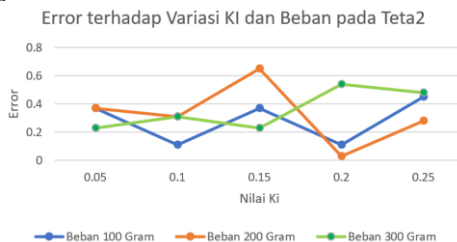
GAMBAR 8 Gambar nilai error terhadap variasi K_p dan Beban pada θ_2
 Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABLE I Rata - rata Error θ_2 untuk Variasi K_p

No	K_p	Rata-rata error
1	10	0,663333333
2	20	0,49
3	30	0,283333333
4	40	0,263333333
5	50	0,206666667

$K_p = 50$ memberikan hasil error terendah dan paling konsisten untuk semua beban, meskipun sedikit naik pada beban 100 gram. Nilai ini direkomendasikan sebagai K_p terbaik untuk sumbu θ_2

2. Hasil Pengujian θ_2 dengan Variasi K_i dan Beban
 Pengujian ini menganalisis pengaruh K_i terhadap kestabilan dan ketepatan sistem kendali dengan nilai K_i divariasikan antara 0,05 hingga 0,25, menggunakan K_p terbaik dari pengujian sebelumnya dan $K_d = 0$. Dibawah ini merupakan gambar nilai error terhadap variasi K_i dan Beban pada θ_2 :



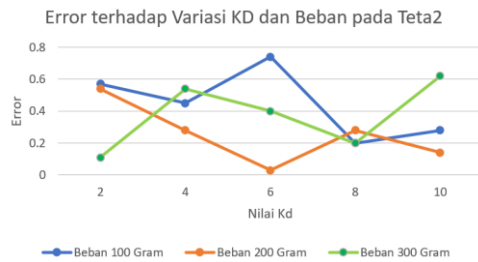
GAMBAR 9 Gambar nilai error terhadap variasi K_i dan Beban pada θ_2
 Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 4 Rata - rata Error θ_2 untuk Variasi K_i

No	K_i	Rata-rata error
1	0,05	0,323333333
2	0,1	0,243333333
3	0,15	0,416666667
4	0,2	0,226666667
5	0,25	0,403333333

Berdasarkan grafik, $K_i = 0,2$ memberikan error terkecil pada beban 100 g dan 200 g, dengan peningkatan error sedikit pada $K_i = 0,25$. Beban 300 g stabil, namun terjadi peningkatan tajam pada $K_i = 0,2$ dan 0,25. Secara keseluruhan, $K_i = 0,2$ memberikan performa terbaik untuk beban ringan dan sedang, meskipun perlu perhatian pada fluktuasi error di beban 300 g.

3. Hasil Pengujian θ_2 dengan Variasi K_d dan Beban
 Pengujian ini memvariasikan nilai K_d dari 2 hingga 10 untuk menguji pengaruhnya terhadap redaman osilasi dan kestabilan sistem, dengan menggunakan K_p dan K_i terbaik dari pengujian sebelumnya.



GAMBAR 10 Gambar nilai error terhadap variasi Kd dan Beban pada θ_2

Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 5 Rata - rata Error θ_2 untuk Variasi Kd

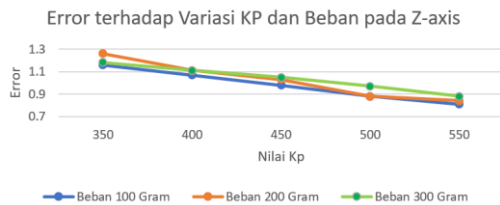
No	Kd	Rata-rata error
1	2	0,406666667
2	4	0,423333333
3	6	0,39
4	8	0,226666667
5	10	0,346666667

Berdasarkan grafik dan data pengujian, $K_d = 8$ memberikan hasil terbaik dengan rata-rata error $0,2267^\circ$ pada akumulasi beban, menunjukkan bahwa parameter ini efektif meredam error dan meningkatkan kestabilan sistem. Nilai PID terbaik untuk sumbu θ_2 adalah $K_p = 50$, $K_i = 0,2$, dan $K_d = 8$, dengan rata-rata error terkecil $0,2267^\circ$.

D. Hasil Pengujian z_0

1. Pengujian z_0 dengan Variasi K_p

Pengujian z_0 dilakukan untuk mengevaluasi kendali posisi vertikal dengan PID, dengan setpoint 7 cm dan variasi beban (100g, 200g, 300g). Pengujian pertama memvariasikan K_p antara 350 hingga 550 untuk mengoptimalkan error dan respon waktu, dimana peningkatan K_p diharapkan mempercepat respon namun berisiko menyebabkan overshoot.



GAMBAR 11 Gambar nilai error terhadap variasi K_p dan Beban pada z_0

Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

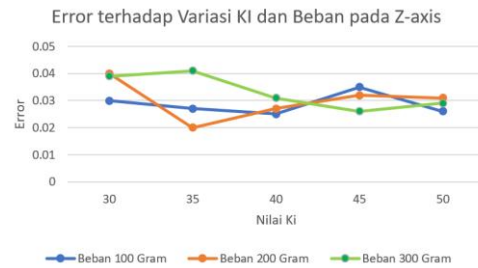
TABEL 6 Rata - rata Error z_0 untuk Variasi K_p

No	Kp	Rata-rata error
1	350	1,2
2	400	1,096666667
3	450	1,02
4	500	0,91
5	550	0,843333333

Berdasarkan grafik dan nilai error, nilai error menurun secara konsisten seiring peningkatan K_p dari 350 hingga 550 untuk semua beban. Peningkatan K_p mempercepat respon sistem dan mengurangi steady-state error pada Z-axis. Nilai $K_p = 550$ memberikan error terkecil rata-rata $0,843^\circ$, menjadikannya parameter K_p yang optimal.

2. Pengujian z_0 dengan Variasi K_i

Pengujian berikutnya memvariasikan K_i dari 30 hingga 50, dengan K_p terbaik dan $K_d = 0$, untuk mengevaluasi pengaruh penguatan integral terhadap akurasi posisi.



GAMBAR 12 Gambar nilai error terhadap variasi K_i dan Beban pada z_0

Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

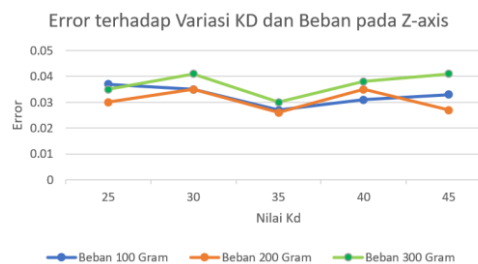
TABEL 7 Rata - rata Error z_0 untuk Variasi K_i

No	Ki	Rata-rata error
1	30	0,036333333
2	35	0,029333333
3	40	0,027666667
4	45	0,031
5	50	0,028666667

Error pada semua variasi beban sangat kecil, antara $0,02$ hingga $0,04$ derajat, yang menunjukkan performa integral yang baik. Nilai $K_i = 40$ menghasilkan error terkecil rata-rata $0,0277^\circ$, menjadikannya nilai optimal untuk koreksi error yang lebih cepat.

3. Pengujian z_0 dengan Variasi K_d

Parameter K_d diuji dengan variasi 25, 30, 35, 40, dan 45 untuk mengamati efek redaman terhadap osilasi dan kestabilan posisi z_0 , menggunakan K_p dan K_i terbaik.



GAMBAR 13 Gambar nilai error terhadap variasi K_d dan Beban pada z_0

Dengan rata-rata nilai error pada tabel dibawah ini:

TABEL 8 Rata - rata Error z_0 untuk Variasi K_d

No	Kd	Rata-rata error
1	25	0,034
2	30	0,037
3	35	0,027666667
4	40	0,034666667
5	45	0,033666667

Hasil pengujian error terhadap variasi K_d menunjukkan fluktuasi error rendah antara $0,027$ - $0,041$ derajat di semua beban. Nilai $K_d = 35$ memberikan performa terbaik dengan rata-rata error terkecil $0,0277^\circ$, menunjukkan kemampuannya dalam meredam osilasi dan mempertahankan kestabilan sistem meskipun ada variasi beban.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, desain dan implementasi sistem lengan robot SCARA 3 DOF yang dikendalikan dengan motor DC dan kontrol PID Lengan robot SCARA 3 DOF berhasil dirancang dengan memperhatikan aspek mekanik, elektronik, dan perangkat lunak, menggunakan motor DC, encoder, limit switch, dan suction vacuum. Pengujian menunjukkan robot dapat mengangkat dan memindahkan objek dengan beban 100g, 200g, dan 300g ke posisi yang ditentukan di ruang kerja 2D, mendukung

aplikasi otomasi sederhana. Sistem kontrol PID berhasil mengatur posisi setiap sumbu dengan akurat dan stabil, dengan parameter optimal: θ_1 ($K_p = 50$, $K_i = 0,25$, $K_d = 4$, error $0,073^\circ$), θ_2 ($K_p = 50$, $K_i = 0,2$, $K_d = 8$, error $0,227^\circ$), dan Z-axis ($K_p = 550$, $K_i = 40$, $K_d = 35$, error $0,0277$ cm). Pengujian dengan variasi beban menunjukkan sistem tetap presisi dan stabil, membuktikan bahwa tuning PID berpengaruh signifikan pada presisi gerakan. Pengembangan selanjutnya dapat menggunakan adaptive PID untuk mengurangi error akibat variasi beban, serta menerapkan metode tuning berbasis pemodelan seperti Ziegler-Nichols atau simulasi MATLAB untuk hasil tuning yang lebih presisi dan peningkatan performa sistem.

REFERENSI

- [1] A. Uchrowi, L. Lasmadi, and S. Soekarno, "Pemodelan dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan V-REP," *AVITEC*, vol. 1, no. 1, Aug. 2019, doi: 10.28989/avitec.v1i1.489.
- [2] W. War Naing, K. Zar Aung, and A. Thike, "Position Control of 3-DOF Articulated Robot Arm using PID Controller," 2018. [Online]. Available: www.ijsea.com
- [3] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, Jul. 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [4] T. Phyu Zin and A. Kyaw Nyein, "DC Gear-Motor Position Control for 3-DOF Articulated Painting Robot arm," Aug. 2019, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/335001054>
- [5] M. F. Mardiansah, "Pemodelan dan Analisis Dinamika Lengan Robot 3 DOF Menggunakan Kontrol PID," 2020.
- [6] C. Urrea, J. Cortés, and J. Pascal, "Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 396–404, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.jart.2016.09.005.
- [7] Z. Nurkholik, F. Alif, and D. Arie, "Rancangan Bangun Lengan Robot Arm Untuk Menggambar Menggunakan Inverse Kinematik," pp. 59–68, Nov. 2022, [Online]. Available: <http://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JUISI/page59>
- [8] Katsuhiko. Ogata, *Modern control engineering*. Prentice-Hall, 2010.
- [9] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems ThirTeenTh ediTion*. 2016.
- [10] A. S. . Sedra and K. C. . Smith, *Microelectronic circuits*. Oxford University Press, 2015.
- [11] H. Supriyanto *et al.*, "Implementasi Kontroler PID dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols dan Cohen-Coon pada Sistem Scada Kendali Level Air," *Jurnal Teknologi Terapan* |, vol. 8, no. 2, Sep. 2022.
- [12] J. J. Craig, P. Prentice, and P. P. Hall, "Introduction to Robotics Mechanics and Control Third Edition," 2005.
- [13] A. S. Mohamed, M. S. Zaky, A. S. Zein, E. Din, and H. A. Yasin, "Comparative Study of Sensorless Control Methods of PMSM Drives," vol. 2, no. 5, 2011, [Online]. Available: www.iiste.org