

Pemodelan dan simulasi kinematika robot SCARA 3 derajat kebebasan menggunakan MATLAB

Risky Odang Sanjaya¹, Novian Fajar Satria², Himmawan Sabda Maulana³

e-mail: ¹riskyodang@me.student.pens.ac.id, ²ovinmeka@pens.ac.id, ³himmawan@pens.ac.id

^{1,2,3}Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mekatronika, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 7 Januari 2025

Direvisi 7 September 2025

Diterbitkan 28 Oktober 2025

Kata kunci:

Kinematika maju

Kinematika terbalik

MATLAB

SCARA

ABSTRAK

Zaman yang serba canggih di semua aspek kehidupan sudah menggunakan bantuan teknologi. Seperti contoh dalam hal produksi barang di dalam industri yang hampir semua sektor sudah memakai bantuan teknologi. Untuk memperhitungkan pergerakan dari robot SCARA dibutuhkan perhitungan kinematika pada robot SCARA. Pemodelan kinematika untuk robot SCARA memberikan visualisasi fisik robot dalam model matematika. Penelitian ini bertujuan untuk menguji dan membuktikan teorema pemodelan kinematika maju (*forward kinematics*) dan kinematika terbalik (*inverse kinematics*) dalam simulasi serta pengujian *lifting* dan pengujian aktual langsung dengan robot SCARA. Simulasi kinematika pergerakan robot SCARA menggunakan perangkat lunak MATLAB. Penelitian terdahulu telah dirancang robot SCARA menggunakan konfigurasi *revolute-translational-revolute* dengan tidak menggunakan simulasi. Hasil dari pengujian kinematika maju menunjukkan bahwa rata-rata *error* pada nilai aktual pengukuran $\theta_1 = 3,76\%$ dan $\theta_2 = 2,98\%$, dengan nilai paling tinggi pada selisih 3° pada setiap pengukuran sudut. Serta hasil pengujian gerakan *lifting* pada SCARA memiliki *error* maksimal sebesar $2,72\%$ dan *error* minimal sebesar $0,01\%$. Dengan rata-rata *error* yang dihasilkan adalah $0,64\%$ dan pengujian dilakukan sebanyak 10 kali pecobaan dalam setiap parameter.

ABSTRACT

Keywords:

Forward kinematics

Inverse kinematics

MATLAB

SCARA

In today's advanced era, technology is integrated into all aspects of life. For instance, in the production of goods within industries, nearly all sectors have adopted technological assistance. To calculate the movements of a SCARA robot, kinematic calculations are essential. The kinematic modelling of a SCARA robot provides a physical visualization of the robot in a mathematical model. This study aims to test and validate the theorems of forward kinematics and inverse kinematics modelling through simulations and to examine the lifting mechanism as well as conduct direct practical testing with the SCARA robot. The kinematic simulations of the SCARA robot's movements are performed using MATLAB software. In previous studies, the SCARA robot was designed using a revolute-translational-revolute configuration without simulation. The results of forward kinematics testing indicate that the average error in actual measurement values is 3.76% for θ_1 and 2.98% for θ_2 , with the highest deviation being 3° for each angle measurement. Additionally, the results of the lifting mechanism testing on the SCARA robot showed a maximum error of 2.72% and a minimum error of 0.01%, with an average error of 0.64% based on 10 trials for each parameter.

Penulis Korespondensi:

Risky Odang Sanjaya

Teknik Mekatronika,

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

Jl. Raya ITS – Kampus PENS, Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

Email: riskyodang@me.student.pens.ac.id

1. PENDAHULUAN

Zaman yang serba canggih seperti sekarang ini, hampir semua aspek kehidupan sudah menggunakan bantuan teknologi. Seperti contoh dalam hal produksi barang di dalam industri yang hampir semua sektor sudah memakai bantuan teknologi. Meskipun tidak semua namun hampir seluruhnya sudah menggunakan bantuan seperti *mobile robot* ataupun *manipulator robot* contohnya robot SCARA. Tujuan produksi dengan kecepatan tinggi, biaya yang rendah, dan juga memiliki tingkat kesalahan yang rendah sudah menjadi sangat penting dalam hal daya saing [1][2]. Robot SCARA adalah robot yang sering digunakan di dalam industri dengan tipe konfigurasi planar pada setiap *joint* yang dimiliki [3]. Robot SCARA memiliki berbagai variasi derajat kebebasan, dengan minimal 2 derajat kebebasan yang terdapat pada lengan 1 dan lengan 2. Jika memiliki 3 derajat kebebasan, tambahan gerakan biasanya berupa mekanisme *lifting* untuk keperluan pick and place. Perhitungan kinematika diperlukan untuk menganalisis pergerakan robot SCARA. Kinematika robot SCARA memodelkan visualisasi fisik robot dalam bentuk representasi matematika [4]. Pemodelan kinematika dapat dibagi menjadi 2 yaitu pemodelan kinematika maju (*forward kinematics*) dan pemodelan kinematika terbalik (*inverse kinematics*) [4]. Pemodelan kinematik maju untuk SCARA diformulasikan untuk menghasilkan posisi *end effector* dengan sudut sendi sebagai input [4]. Oleh karena itu, pemodelan kinematik maju dapat diterapkan untuk menghasilkan perencanaan posisi bagi robot SCARA [4]. Kinematika terbalik atau *inverse kinematics* daripada robot SCARA manipulator robot dengan input sudut lengan yang dibentuk yang luarannya ada posisi dari *end effector* [5][6][7].

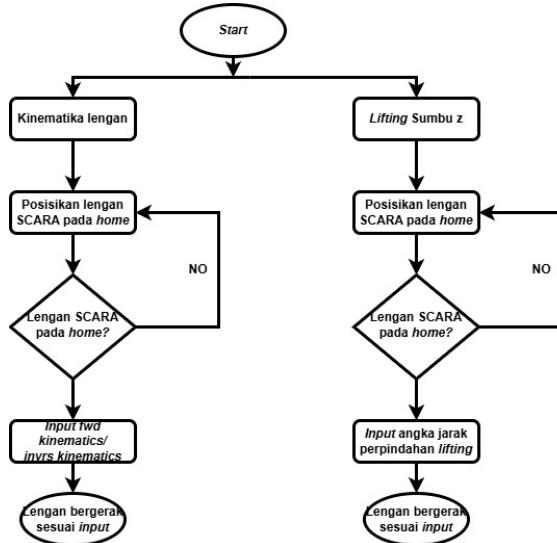
SCARA atau *Selective Compliance Assembly Robotic Arm* banyak digunakan dalam industri untuk pengoperasian *pick and place*, penyisipan *part* dan pengoperasian yang serupa [8]. Robot SCARA, yang awalnya dirancang untuk gerakan planar berkecepatan tinggi di sepanjang sumbu X dan Y, telah mengalami peningkatan adopsi dalam tugas-tugas yang membutuhkan presisi yang lebih tinggi, seperti penempatan komponen SMD, perakitan PCB, dan perbaikan serta dipergunakan untuk bahan modul ajar yang edukatif [7][9]. Penelitian teknologi terkini telah mengoptimalkan strategi kontrolnya, memungkinkan robot ini menggantikan manusia dalam pekerjaan yang berisiko, rumit, atau monoton [10]. Desain dan pembuatan robot SCARA dalam studi ini menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam aspek presisi, efisiensi, dan fleksibilitas [11]. Teknologi 3D *printing* digunakan untuk memproduksi komponen utama dari robot SCARA, memberikan keuntungan berupa fleksibilitas dalam desain, pembuatan prototipe yang cepat, dan efisiensi biaya [11]. Dengan menggunakan transmisi gerak *pulley* sehingga robot SCARA menggunakan prinsip (RTR) yaitu *revolute-translation-revolute* [12]. Pemodelan matematis robot SCARA sangat penting karena memungkinkan untuk menganalisis perilaku kinematik dan dinamiknya. Pada penelitian ini, karena kedua robot memiliki karakteristik dan dimensi yang sama, maka hanya satu robot yang akan dianalisis. Posisi *end-effector* yang dianalisis ditentukan secara analitis dan dibandingkan dengan hasil simulasi [13]. Hasil menunjukkan bahwa simulasi memiliki korelasi yang baik dengan perhitungan analitis [14]. Perbedaan pada penelitian ini dengan penelitian robot SCARA yang sudah ada terletak pada spesifikasi daripada robot SCARA. Selain itu, penelitian ini membandingkan *error* posisi yang dihasilkan oleh pergerakan aktual robot SCARA dengan simulasi pada *software MATLAB*.

2. METODE PENELITIAN

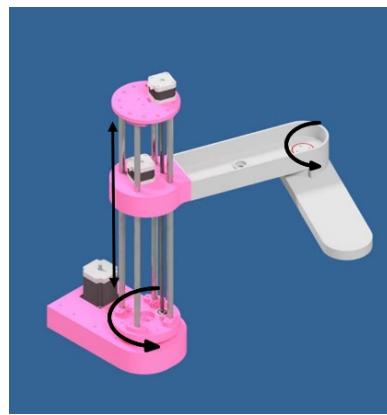
Sistem kerja robot SCARA memiliki dua mode: pergerakan kinematika lengan dan pergerakan *lifting* sumbu Z. Pada mode kinematika lengan, posisi awal adalah home, di mana lengan 1 dan 2 sejajar dengan sumbu X. Kinematika maju berjalan jika input berupa sudut, sedangkan kinematika terbalik berjalan jika input berupa titik koordinat. Pada mode *lifting* sumbu Z, posisi awal lengan berada di titik 0, 10 cm di bawah limit switch. Ketika jarak perpindahan *lifting* dimasukkan, stepper motor memutar leadscrew untuk mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan translasi, sesuai ilustrasi pada Gambar 1.

2.1 Desain SCARA

Robot SCARA yang dirancang memiliki 3 derajat kebebasan: rotasi lengan 1, rotasi lengan 2, dan gerakan *lifting* pada sumbu Z. Lengan 1 memiliki panjang 33,2 cm, dan lengan 2 memiliki panjang 25,4 cm, diukur dari poros motor hingga titik tengah ujung lengan. Material utama adalah PLA hasil cetakan 3D, dengan penyangga *lifting* berupa batang stainless steel berdiameter 12 mm dan leadscrew. Sistem penggerak menggunakan 3 motor stepper: NEMA 23 untuk rotasi lengan 1, serta NEMA 17 untuk rotasi lengan 2 dan *lifting* sumbu Z.



Gambar 1. Flowchart sistem kerja



Gambar 2. Derajat kebebasan robot SCARA

2.2 Perhitungan kinematika SCARA

Apabila variabel θ diketahui yaitu besar sudut yang terbentuk, maka untuk mendapatkan kedudukan ujung lengan dinyatakan sebagai $P(x,y)$, dengan menggunakan analisis kinematika maju. Maka persamaan kinematika maju sebagai berikut.

Persamaan nilai x:

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

Persamaan nilai y:

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

Sedangkan untuk mencari persamaan kinematika balik (*Inverse Kinematic*) yang besar sudut θ_1 dan θ_2 didapat dari persamaan 3 dan persamaan 4 dengan mengkuadratkan dan menjumlahkan keduanya dengan menggunakan rumus eliminasi, didapatkan persamaan sebagai berikut.

Persamaan nilai θ_2 :

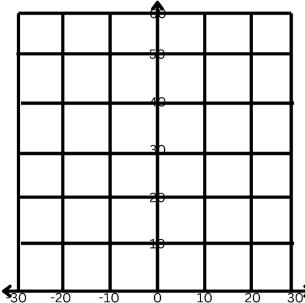
$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (3)$$

Persamaan nilai θ_1 :

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y(l_1 + l_2 \cos \theta_2) - xl_2 \sin \theta_2}{x(l_1 + l_2 \cos \theta_2) + yl_2 \sin \theta_2} \right) \quad (4)$$

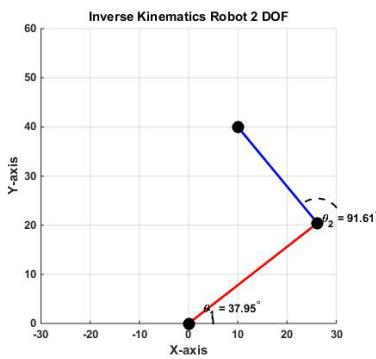
Analisis gerak robot dapat diselesaikan melalui kinematika, seperti pada robot lengan SCARA yang digunakan untuk menentukan posisi end-effector. Setelah kinematika dihitung, robot diprogram untuk

mengatur sudut setiap joint guna mencapai posisi end-effector yang diinginkan. Semakin banyak parameter kinematika yang dihitung, semakin halus gerakan robot. Berdasarkan batasan, objek berada pada koordinat $x = x (-30 \leq x \leq 30)$ dan $y = y (0 \leq y \leq 60)$.



Gambar 3. Objek koordinat kinematika

Gambar 3 menunjukkan total 36 kotak, masing-masing berukuran 10 cm x 10 cm. Dengan 6 kotak dari ujung ke ujung, dimensi totalnya adalah 60 cm x 60 cm.



Gambar 4. End effector berada pada P(10,40)

Pada gambar tersebut, end-effector diharapkan berada di titik P(10,40) dengan $x = 10$ dan $y = 40$. Panjang lengan pertama (l_1) adalah 33,2 cm, dan panjang lengan kedua (l_2) adalah 25,4 cm. Perhitungan diperlukan untuk menentukan sudut θ_1 dan θ_2 yang harus dicapai oleh masing-masing lengan, dengan rincian sebagai berikut:

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x^2+y^2-l_1^2-l_2^2}{2l_1l_2}\right) \quad (5)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{10^2+40^2-(33,2)^2-(25,4)^2}{2 \cdot 33,2 \cdot 25,4}\right) \quad (6)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{100+1600-1102,24-645,16}{2 \cdot 33,2 \cdot 25,4}\right) \quad (7)$$

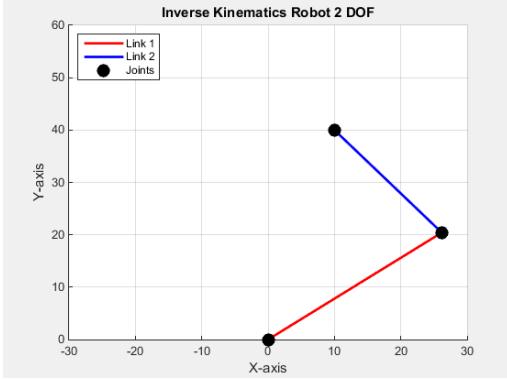
$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{-47,4}{1686,56}\right) \quad (8)$$

$$\theta_2 = \cos^{-1}(-0,0281) \quad (9)$$

Jadi sudut dari setiap *joint* yang perlu dibentuk untuk menentukan posisi dari *end effector* di titik P(10,40) berdasarkan perhitungan adalah, $\theta_1 = 37,95^\circ$ dan untuk $\theta_2 = 91,61^\circ$.

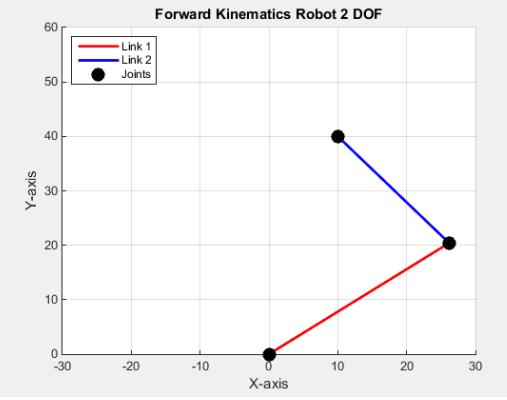
2.3 Simulasi kinematika SCARA

Berdasarkan perhitungan kinematika sebelumnya, simulasi diperlukan untuk menentukan sudut posisi lengan 1 dan 2. Simulasi menggunakan MATLAB memungkinkan pemrograman dan visualisasi robot SCARA dengan konfigurasi RTDS. Dalam pengujian *inverse kinematics*, titik koordinat $x = 10$ dan $y = 40$ digunakan, dengan panjang lengan 1 sebesar 33,2 cm dan lengan 2 sebesar 25,4 cm. Hasilnya menunjukkan sudut $\theta_1 = 37,95^\circ$ dan $\theta_2 = 91,61^\circ$, yang divisualisasikan menggunakan MATLAB pada gambar berikut.



Gambar 5. Plot inverse kinematics pada MATLAB

Gambar 5 menunjukkan dua garis yang merepresentasikan lengan robot, dengan garis merah untuk lengan 1 dan garis biru untuk lengan 2. Simulasi *forward kinematics* dengan sudut $\theta_1 = 37,95^\circ$ dan $\theta_2 = 91,61^\circ$ menghasilkan hasil yang sesuai dengan perhitungan inverse kinematics. Visualisasi simulasi ditampilkan pada Gambar 6 menggunakan MATLAB.



Gambar 6. Plot forward kinematics pada MATLAB

Dapat disimpulkan bahwa *forward kinematics* dan *inverse kinematics* akan menghasilkan visualisasi yang identik jika nilai inputnya sesuai dengan hasil perhitungan masing-masing. Pada *forward kinematics*, hasil perhitungannya berupa titik koordinat (x,y), sedangkan pada *inverse kinematics*, hasilnya berupa sudut yang terbentuk di setiap joint, yaitu sudut θ_1 dan θ_2 dalam kasus ini.

2.4 Mekanisme *lifting* sumbu z

Selain pergerakan *inverse* dan *forward kinematics*, robot SCARA memiliki mekanisme *lifting* untuk gerakan naik turun. Mekanisme ini terletak pada pelat sumbu z (*z-axis mounting plate*) dan menggunakan *leadscrew* M8 dengan *pitch* 2 mm, yang terhubung dengan ulir dalam di bawah pelat. Visualisasi mekanisme ini ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Pasangan *leadscrew* M8 pada bagian *Z axis mounting plate*

Gerak *lifting* yaitu naik dan turunnya lengan 1 dan lengan 2 dengan menggunakan *leadscrew* (atau *shaft* dengan ulir luar). *Leadscrew* dari mesin *lathe*, yang tersedia sebagai suku cadang digunakan dalam robot

[8]. *Pitch* dari *leadscrew* adalah 1 inci, sehingga untuk setiap *step* dari *stepper motor*, akan terjadi kemajuan sebesar [8]:

$$\frac{1 \text{ inch} * 25,4 * 1,8^0}{360^0} = 0,127 \text{ mm} \quad (10)$$

Dapat disimpulkan bahwa persamaan tersebut harus dikonversi ke dalam satuan milimeter terlebih dahulu dengan ditandai 1 inch * 25,4 yang hasilnya sudah menjadi konversi sebagai milimeter dengan catatan spesifikasi *stepper motor* dengan satu *step* bergerak sebanyak $1,8^0$. Maka jika mempunyai *leadscrew* dengan *pitch* yang mempunyai satuan milimeter dapat dirumuskan kembali dengan persamaan [8].

$$\frac{\text{Pitch (mm)} . 1,8^0}{360^0} = \text{Panjang Perpindahan (mm)} \quad (11)$$

Berdasarkan persamaan yang telah dijabarkan maka, perhitungan *lifting* untuk jarak perpindahan 10 cm adalah sebagai berikut:

$$\frac{\text{Pitch (mm)} . x}{360^0} = 10 \text{ mm} \quad (12)$$

$$\frac{2 . x}{360^0} = 10 \text{ mm} \quad (13)$$

$$2x = 10 . 360 \quad (14)$$

$$x = \frac{10 . 360}{2} \quad (15)$$

$$x = 1800^0 \quad (16)$$

$$\text{Step required} = \frac{1800}{1,8} \quad (17)$$

$$\text{Step required} = 1000 \quad (18)$$

Dengan demikian, jika perpindahan *lifting* pada sumbu z dinyatakan dalam satuan milimeter, yaitu sebesar 10 milimeter (1 cm), maka jumlah langkah yang diperlukan oleh stepper motor adalah 1000 langkah. Pada mekanisme *lifting* terjadi perubahan jenis gerakan, di mana gerakan rotasi yang dihasilkan oleh *stepper motor* diubah menjadi gerakan translasi melalui pergerakan ulir *leadscrew*. Kecepatan gerak *lifting* dapat diatur dengan menghitung jarak perpindahan *lifting* dan waktu yang diperlukan untuk bergerak dari posisi awal ke posisi akhir. Berikut adalah perhitungan kecepatan *lifting* untuk contoh jarak perpindahan 10 cm (setara dengan 1000 langkah) berdasarkan persamaan 3.20, dengan periode pulsa sebesar 1000 mikrodetik.

$$T = 1000 . 1000 \quad (19)$$

$$T = 1000000 \mu\text{s} \quad (20)$$

$$T = 1\text{s} \quad (21)$$

Dari perhitungan tersebut, diperoleh bahwa waktu yang diperlukan untuk perpindahan jarak 1 cm adalah 1 detik. Langkah berikutnya adalah menghitung kecepatan perpindahan *lifting* untuk jarak 1 cm.

$$v = \frac{s}{t} \quad (22)$$

$$v = \frac{1 \text{ cm}}{1 \text{ s}} \quad (23)$$

$$v = 1 \text{ cm/s} \quad (24)$$

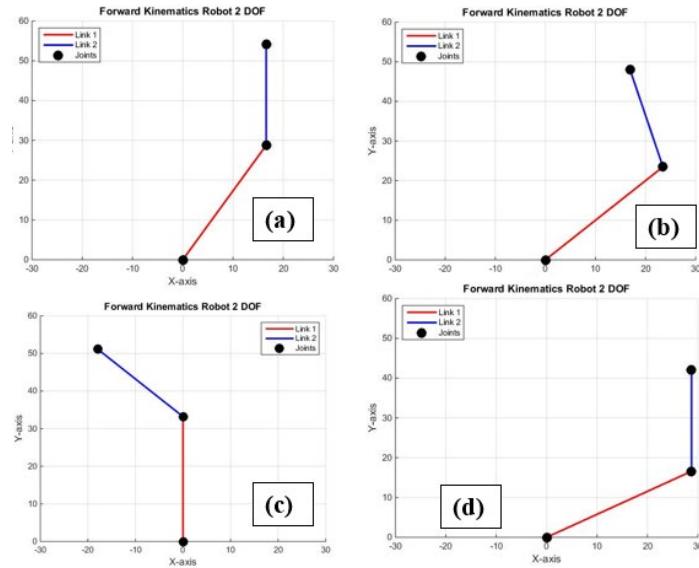
Maka dari perhitungan tersebut dapat ditentukan kecepatan dari *lifting* sumbu z adalah 1 cm/s.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian *forward kinematics*, *inverse kinematics*, dan pergerakan *lifting* telah dilakukan dan didapatkan beberapa hasil data pengujian. Pengujian dilakukan dengan menggunakan robot SCARA aktual yang telah dirancang dan dimanufaktur.

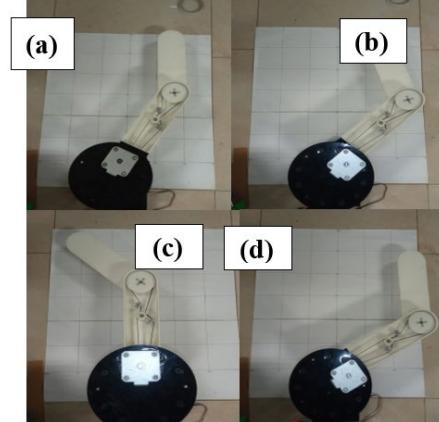
3.1 Pengujian forward kinematics

Pengujian *forward kinematics* dilakukan setelah memperhitungkan dan menyimulasikan lengan robot dengan metode *forward kinematics*. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menghitung *error* yang dihasilkan dari pengukuran sudut θ_1 dan θ_2 dan membuktikan persamaan dari *forward kinematics* yang memiliki *input* sudut θ_1 dan θ_2 , *output* titik koordinat. Dapat dilihat pada gambar berikut.



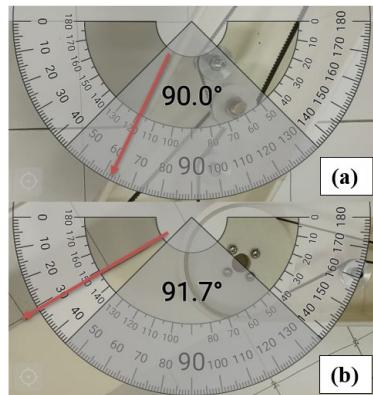
Gambar 8. Simulasi *forward kinematics* pada MATLAB, (a) $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 30^\circ$, (b) $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 60^\circ$, (c) $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (d) $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 60^\circ$

Selanjutnya adalah pengujian secara aktual pada robot yang telah dibuat. Memiliki *input* besaran sudut parameter yang sama dengan simulasi. Dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 9. Pengujian *forward kinematics* pada SCARA aktual, (a) $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 30^\circ$, (b) $\theta_1 = 45^\circ, \theta_2 = 60^\circ$, (c) $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 45^\circ$, (d) $\theta_1 = 30^\circ, \theta_2 = 60^\circ$

Salah satu contoh pengukuran pada parameter (a) yaitu $\theta_1 = 60^\circ, \theta_2 = 30^\circ$ memiliki selisih pengukuran sebesar 3° untuk pengukuran sudut θ_1 sedangkan θ_2 memiliki selisih pengukuran sebesar 1° . Dalam pengukuran yang sudah dilakukan θ_{1_act} memiliki sudut sebesar 63° . Untuk θ_{2_act} memiliki sudut sebesar 31° . Dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 10. Pengukuran menggunakan busur digital, (a) $\theta_{1_act} = 63^\circ$, (b) $\theta_{2_act} = 31^\circ$

Tabel 1. Hasil pengujian *forward kinematics*

<i>Input Forward Kinematics</i> (derajat/degree)		<i>Output (Inverse Kinematics)</i> (cm)			
θ_1	θ_2	x	y	$\theta_{1\ act}$	$\theta_{2\ act}$
60	30	16.6	54.15	63	31
45	60	16.9	48.01	47	63
90	45	- 17.96	51.16	92.5	46
30	60	28.75	42	32.3	62
60	90	-5.4	41.45	60	91

Rata-rata *error* pada nilai aktual pengukuran $\theta_1 = 3,76\%$ dan $\theta_2 = 2,98\%$, dengan nilai paling tinggi pada selisih 3° pada setiap pengukuran sudut. Terdapat beberapa faktor penyebab *error* pada pengukuran, sebagai contoh alat ukur yang tidak dapat dipastikan keakuratannya serta tempat pengujian yang memungkinkan *base* dari SCARA terjadi selip sehingga nilai dapat berubah-ubah.

3.2 Pengujian *lifting* sumbu z

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menghitung *error* yang dihasilkan dari pengukuran jarak perpindahan *lifting* dari titik awal ke titik akhir. Metode yang digunakan adalah dengan pengukuran aktual dengan menggunakan *marker* seperti spidol untuk menandai titik awal dan untuk pengukuran perpindahan dari titik awal ke titik akhir menggunakan jangka sorong sebagai alat ukur. Jangka sorong memiliki ketelitian 0,1 mm sehingga dapat menjadi acuan nilai aktual. Dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

Gambar 11. Pengukuran hasil uji pergerakan *lifting*

Gambar 11 menunjukkan hasil pengukuran perpindahan naik turun lengan 1 dan 2 pada robot SCARA. Pengujian *lifting* bertujuan menguji gerakan vertikal lengan SCARA, di mana lengan-lengan tersebut terhubung dengan Z Axis Mounting Plate yang didukung oleh empat *shaft* M12 dan bergerak melalui *leadscrew* M8. Hasil pengujian gerak *lifting* disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 2. Tabel hasil pengujian pergerakan *lifting*

<i>Set Point Perpindahan Lifting</i> (cm)	<i>Rata-rata Jarak Perpindahan Lifting</i> (cm)	<i>Error (%)</i>
1	1,028	2,72
5	5,001	0,02
10	9,947	0,53
15	14,998	0,01
20	19,876	0,62
25	25,004	0,02
30	29,838	0,54

Berdasarkan Tabel 2, hasil uji menunjukkan *error* dari pengukuran aktual. Sebelum pengujian *lifting*, *stepper motor* diprogram sesuai jumlah *step* yang dihitung menggunakan Persamaan 12 dan dimasukkan ke mikrokontroler. Panjang perpindahan aktual diukur menggunakan jangka sorong dan penggaris.

Data menunjukkan *error* maksimal 2,72%, minimal 0,01%, dan rata-rata 0,64% dari 10 uji per parameter. Berat total lengan 1 dan 2 adalah 0,142 kg, belum termasuk komponen tambahan seperti motor dan gripper, yang memengaruhi hasil pengujian. Jika dikonversi dalam gaya maka:

$$F = m \cdot g \quad (25)$$

$$F = 0,142 \cdot 9,81 \quad (26)$$

$$F = 1,39 N \quad (27)$$

Dengan gaya 1,39 N didapatkan *error* maksimal yaitu sebesar 2,72% dan dengan rata-rata *error* adalah 0,64% dan pengujian yang dilakukan sebanyak 10 kali uji. Tabel dan grafik dapat dilihat dengan lengkap jelas pada tautan sebagai [berikut](#).

4. KESIMPULAN

Analisis kuantitatif *error* dalam penelitian ini menunjukkan adanya penyimpangan antara hasil simulasi dan hasil pengujian nyata pada robot SCARA. Pada pengujian kinematika maju, rata-rata *error* sudut θ_1 sebesar 3,76% dan θ_2 sebesar 2,98%, dengan selisih maksimal mencapai 3° . Penyebab utama penyimpangan ini diduga berasal dari keterbatasan akurasi alat ukur, kemungkinan selip pada base robot, serta toleransi mekanis dari komponen 3D print. Sementara itu, pada pengujian gerakan *lifting* sumbu Z, diperoleh *error* maksimal sebesar 2,72% dan *error* rata-rata 0,64%. Penyimpangan ini dapat dipengaruhi oleh beban lengan robot yang memberi tekanan pada sistem leadscrew dan toleransi dari komponen mekanik.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Tinoco, M. F. Silva, and F. Neves, “Benchmarking Controllers for Low-Cost Agricultural SCARA Manipulators,” pp. 1–25, 2025.
- [2] Y. Bensafia, A. Idir, and K. Khettab, “Reducing the Delay Time and Tracking Trajectory of the Robot SCARA Using the Fractional PID Controller,” vol. 5, no. 1, 2024.
- [3] Y. Wang, C. Zhao, D. Mei, G. Tang, L. Zhang, and D. Zhu, “Structural Design and Position Tracking of the Reconfigurable SCARA Robot by the Pre-Filter AFE PID Controller,” Appl. Sci., vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/app12031626.
- [4] S. H. Tay, W. H. Choong, and H. P. Yoong, “A Review of SCARA Robot Control System.” 4th IEEE Int. Conf. Artif. Intell. Eng. Technol. IICAIET 2022, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/IICAIET55139.2022.9936755.
- [5] R. Bouzid, H. Gritli, and J. Narayan, “ANN Approach for SCARA Robot Inverse Kinematics Solutions with Diverse Datasets and Optimisers,” Appl. Comput. Syst., vol. 29, no. 1, pp. 24–34, 2024, doi: 10.2478/acss-2024-0004.
- [6] Z. H. Rashid, R. A. Sarhan, and M. S. Hassan, “Arduino-Based Implementation of Kinematics for a 4 Dof Robot Manipulator Using Artificial Neural Network,” Diagnostyka, vol. 25, no. 1, 2024, doi: 10.29354/diag/184235.
- [7] N. Sanjeewa, V. M. Wathudura, and N. S. Kahatapitiya, “Real-Time Coordinate Estimation for SCARA Robots in PCB Repair Using Vision and Laser Triangulation,” pp. 1–19, 2025.
- [8] A. Misra, A. Sharma, G. Singh, A. Kumar, and V. Rastogi, “Design and Development of a Low-Cost CNC Alternative SCARA Robotic Arm,” in Procedia Computer Science, Elsevier B.V., 2020, pp. 2459–2468. doi: 10.1016/j.procs.2020.04.266.
- [9] A. Alfiansyah, “The Indonesian Journal of Computer Science,” vol. 13, no. 5, pp. 7198–7217, 2024.
- [10] G. Jin, X. Yu, Y. Chen, and J. Li, “SCARA+ System: Bin Picking System of Revolution-Symmetry Objects,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 71, no. 9, pp. 10976–10986, 2024, doi: 10.1109/TIE.2023.3344841.
- [11] M. E. Student, “Design and Fabrication of SCARA for Image Processing in Industry,” pp. 1–10, 2024, doi: 10.5504/IJSREM37833.
- [12] S. Suroso, S. Supriyadi, T. Dermawan, and A. Abimanyu, “Desain Sistem Mekanik Robot SCARA untuk Internet Nuclear Instrumentation Laboratory,” J. Pengawas. Tenaga Nukl., vol. 3, no. 2, pp. 7–13, 2023, doi: 10.53862/jupeten.v3i2.002.
- [13] C. Urrea, P. Sari, and J. Kern, “Hybrid System for Fault Tolerance in Selective Compliance Assembly Robot Arm: Integration of Differential Gears and Coordination Algorithms,” Technologies, vol. 13, no. 2, 2025, doi: 10.3390/technologies13020047.
- [14] A. Talli and D. Marebal, “End-Effector Position Analysis of SCARA Robot by Using MATLAB,” Lect. Notes Electr. Eng., vol. 750, pp. 25–33, 2021, doi: 10.1007/978-981-16-0336-5_3.