

# PERANCANGAN DAN PENGENDALIAN MANIPULATOR ROBOT 4-DOF DENGAN GRIPPER BERBASIS INVERSE KINEMATICS DAN TRAJECTORY PLANNING DENGAN ROS

Ahmad Didik Setiyadi<sup>\*)</sup>, Iwan Setiawan dan Hadha Afrisal

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: didik@student.undip.ac.id

## Abstrak

Penyebaran virus korona terjadi dari manusia ke manusia melalui droplet dan udara, kontak fisik atau jarak dekat manusia ke manusia merupakan penyebab utama penularan virus korona meskipun dengan penggunaan alat perlindungan diri (APD), ini dibuktikan dengan meninggalnya lebih dari 1400 tenaga medis karena terpapar COVID-19 per tanggal Juli 2021 di Indonesia. Penelitian ini dirancang robot manipulator 4 DOF (RPRR) dengan sistem ROS menggunakan penggerak motor stepper Nema 17 serta dengan sistem pengendalian inverse kinematics dan trajectory planning dengan fungsi sigmoid yang bekerja pada joint space. Untuk mengurangi osilasi pada pergerakan robot ditambah kontrol proporsional dengan nilai  $KP=10$  yang dihasilkan dengan metode *trial and error*. Robot dirancang untuk memindahkan tabung reaksi. Dari hasil rancangan robot yang dibangun robot dapat melakukan pergerakan dengan presisi ditunjukkan dengan pengujian kinematika balik dengan galat rata-rata pada sumbu x sebesar 0,62 mm, pada sumbu y sebesar 0,55 mm, dan pada sumbu z sebesar 0,36 mm. Performa dari trajectory planning pada joint space saat mencapai koordinat tujuan joint 1 memiliki galat  $0,20^\circ$ , joint 2 sebesar  $0,20^\circ$ , pada joint 3 sebesar  $0,17^\circ$ , dan pada joint 4 sebesar  $0,18^\circ$ . Robot manipulator 4 DOF saat melakukan tugas pick and place tabung reaksi memiliki galat rata-rata 1,46 mm.

*Kata kunci: kontrol torsi mesin, logika fuzzy, mesin pengapian busi*

## Abstract

*The spread of the corona virus from human to human through droplets and air, physical contact or close human-to-human distance is the main cause of corona virus transmission even though with the use of personal protective equipment (PPE), this is evidenced by the death of more than 1400 medical personnel due to exposure to COVID-19. 19 as of July 2021 in Indonesia. This study designed a 4 DOF manipulator robot (RPRR) with a ROS system using a Nema 17 stepper motor as well as an inverse kinematics control system and trajectory planning with a sigmoid function that works on the joint space. To reduce oscillations in the movement of the robot plus proportional control with a value of  $KP = 10$  which is generated by the trial and error method. The robot is designed to move test tubes. From the results of the design of the robot that was built the robot can perform movements with precision shown by the reverse kinematics test with an average error on the x-axis of 0.62 mm, on the y-axis of 0.55 mm, and on the z-axis of 0.36 mm. The performance of trajectory planning in the joint space when it reaches the destination coordinates of joint 1 has an error of  $0.20^\circ$ , joint 2 is  $0.20^\circ$ , at joint 3 is  $0.17^\circ$ , and at joint 4 is  $0.18^\circ$ . The 4 DOF manipulator robot when performing the pick and place task of test tubes has an average error of 1.46 mm.*

*Keywords: Manipulator robot, Invers kinematics, trajectory planning, ROS*

## 1. Pendahuluan

Penyebaran virus korona terjadi dari manusia ke manusia melalui droplet dan udara, kontak fisik atau jarak dekat manusia ke manusia merupakan penyebab utama penularan virus korona meskipun dengan pemanfaatan lengkap alat perlindungan diri (APD), ini dibuktikan dengan meninggalnya lebih dari 1400 tenaga medis karena terpapar COVID-19 per tanggal Juli 2021. Sehingga diperlukan sebuah inovasi untuk mengatasi masalah ini.

Teknologi robot berpotensi untuk diterapkan di tenaga medis. Untuk membangun robot diperlukan perhitungann kinematika robot.

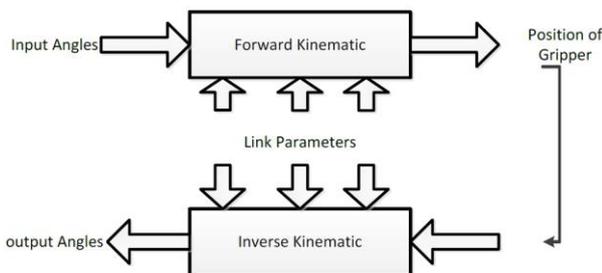
Metode kinematika robot merupakan sebuah studi mengenai pergerakan (kinematika) pada robot [1]. Dalam analisa kinematika, posisi dari semua link diperhitungkan tanpa mempertimbangkan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Analisa kinematika pada posisi manipulator, terdapat dua permasalahan terpisah untuk

dipecahkan: *forward kinematics* dan *inverse kinematics* [2][3].

Perhitungan posisi dan orientasi dari sebuah end effector melalui variabel sudut disebut sebagai *forward kinematics*. Untuk mendapatkan *forward kinematics* sebagai mekanisme robot secara sistematis, diperlukan menggunakan model kinematika yang sesuai. Metode Denavit-Hartenberg (DH) yang menggunakan empat parameter merupakan metode yang paling umum untuk menggambarkan kinematika robot [4]. Selain kinematika robot untuk membangun robot manipulator diperlukan *trajectory planning* agar pergerakan robot menjadi lebih terkendali dan halus [5][6].

## 2. Metode

### 2.1. Kinematika Robot



Gambar 1. Skema *forward kinematic* dan *inverse kinematic*

Dalam analisa kinematika, posisi dari semua link diperhitungkan tanpa mempertimbangkan gaya yang menyebabkan pergerakan tersebut. Analisa kinematika pada posisi manipulator, terdapat dua permasalahan terpisah untuk dipecahkan yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics* [7]. Skema *forward kinematics* dan *inverse kinematics* terdapat pada Gambar 1. Pada skema tersebut ditunjukkan bahwa *forward kinematics* mengubah dari sistem koordinat polar menjadi sistem koordinat kartesian, sedangkan *inverse kinematics* sebaliknya.

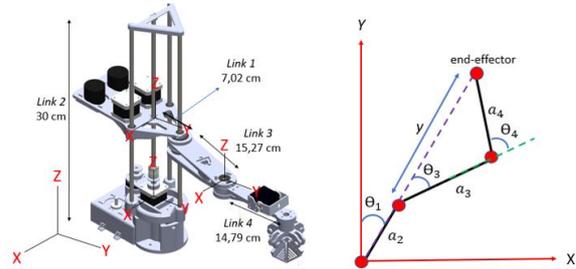
#### 2.1.1. Forward Kinematics Robot

Perhitungan posisi dan orientasi dari sebuah end effector melalui variabel sudut disebut sebagai *forward kinematics*. Untuk mendapatkan *forward kinematics* sebagai mekanisme robot secara sistematis, diperlukan menggunakan model kinematika yang sesuai. Metode Denavit-Hartenberg (DH) yang menggunakan empat parameter merupakan metode yang paling umum untuk menggambarkan kinematika robot [8].

#### 2.1.2. Inverse Kinematics Robot

*inverse kinematics* merupakan kebalikan dari kinematika maju. Kinematika balik merupakan perhitungan dari *cartesian space* menjadi *joint space*. Dengan kata lain dengan kinematika balik kita mampu menghitung sudut-

sudut setiap joint agar end effector dari robot sesuai dengan yang diharapkan baik dari posisi maupun orientasi [9]. Dari konfigurasi robot 4-DOF pada Gambar 2 didapatkan DH parameter sebagaimana terlihat pada Tabel 1.



Gambar 2. Konfigurasi *Joint* dan *Link* Robot Manipulator 4 DOF

Tabel 1. DH Parameter Robot Manipulator 4 DOF

| Link | $a_i$ (cm) | $\alpha_i$ (cm) | $d_i$ (cm) | $\theta_i$ (cm) |
|------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| 1    | 0          | 0               | 0          | $\theta_1^*$    |
| 2    | 7,02       | 0               | $d_2^*$    | 0               |
| 3    | 15,27      | 0               | 0          | $\theta_3^*$    |
| 4    | 14,79      | 0               | 0          | $\theta_4^*$    |

$a_i$  : jarak dari  $z_i$  ke  $z_{i+1}$  sepanjang  $x_i$

$\alpha_i$  : sudut antara  $z_i$  dan  $z_{i+1}$  terhadap poros  $x_i$

$d_i$  : jarak dari  $x_{i+1}$  ke  $x_i$  sepanjang  $z_i$

$\theta_i$  : sudut antara  $x_i$  dan  $x_{i-1}$  terhadap poros  $z_i$ .

Dengan mengetahui konfigurasi kinematika robot *inverse kinematics* dapat dihitung menggunakan trigonometri [10]. Dari Gambar 2 didapatkan perhitungan *invers kinematics* robot 4 DOF sebagaimana terlihat pada persamaan 1 hingga persamaan 4.

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{x}{y} \quad (1)$$

$$\theta_2 = \frac{z}{300} \times 360 \quad (2)$$

$$\theta_3 = -\tan^{-1} \left( \frac{a_4 \cos(\theta_4) + a_3}{a_4 \sin(\theta_4)} \right) \quad (3)$$

$$\theta_4 = \cos^{-1} \left( \frac{y^2 + x^2 - a_3^2 - a_4^2}{2 x a_3 x a_4} \right) \quad (4)$$

dimana

$\theta_1$  = sudut joint 1

$\theta_2$  = sudut joint 2

$\theta_3$  = sudut joint 3

$\theta_4$  = sudut joint 4, dengan

$a_2$  = panjang link 1 sebesar 7,02 cm

$a_3$  = panjang link 3 sebesar 15,27 cm

$a_4$  = panjang link 4 sebesar 14,79 cm

$x$  = posisi end effector pada sumbu x

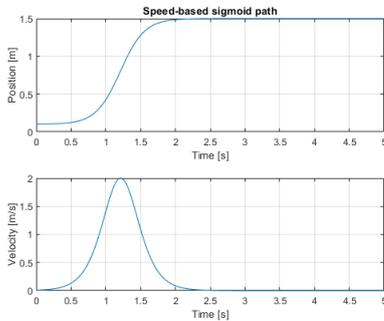
$y$  = posisi end effector pada sumbu y

$z$  = posisi end effector pada sumbu z

## 2.2. Trajectory Planning Robot

Fungsi dari *trajectory planning* adalah memperhalus pergerakan robot. Umumnya metode untuk perhitungan

trajectory planning menghasilkan perhitungan kurva-s [11]. Dalam penelitian ini menggunakan speed based sigmoid function dalam perhitungan trajectory planning. Grafik dari hasil speed based sigmoid function seperti kurva-s sebagaimana terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pergerakan Speed Based Sigmoid Function

Perhitungan speed based sigmoid function pada penelitian ini terlihat pada persamaan 5.

$$v(t) = (x_f - x_0) \frac{be^{-b(t-c)}}{(1+e^{-b(t-c)})^2} \quad (5)$$

dimana

- $v(t)$  = kecepatan pada waktu ke-t, dengan
- $x_f$  = sudut tujuan
- $x_0$  = sudut awal
- $e$  = 2,718281828
- $b$  =  $\frac{4|v_{max}|}{x_f - x_0}$
- $c$  =  $\frac{1}{b} \ln \left( \frac{1-\lambda}{\lambda} \right)$
- $v_{max}$  = kecepatan maksimal
- $\lambda$  = lamda

Trajectory planning pada penelitian ini bekerja pada joint space sehingga secara langsung mengontrol secara langsung pergerakan setiap joint robot. Hal ini dilakukan untuk mengatur kecepatan pergerakan joint tidak melewati batas [12]. Selain untuk membatasi kecepatan pergerakan joint robot joint space trajectory planning memiliki komputasi yang lebih ringan dari cartesian space [13].

### 2.3. Kontrol Robot Manipulator dengan ROS

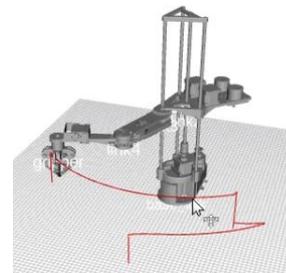
ROS merupakan middleware robot open-source untuk pengembangan sistem robot skala besar [14][15]. ROS dalam bidang robotika merupakan sebuah standar baru dalam membangun robot baik skala kecil maupun skala besar. Di dalam mendesain sistem ROS program dengan tugas masing-masing dapat dijadikan sebuah node yang saling terhubung dengan node lain melalui sebuah topic

yang berisi message. Sistem kontrol robot manipulator 4 DOF memiliki dua buah masukan yaitu sensor encoder yang diolah menjadi sudut setiap joint robot dan koordinat dari titik tujuan. Secara umum desain kontrol robot sebagaimana terlihat pada Gambar 4.



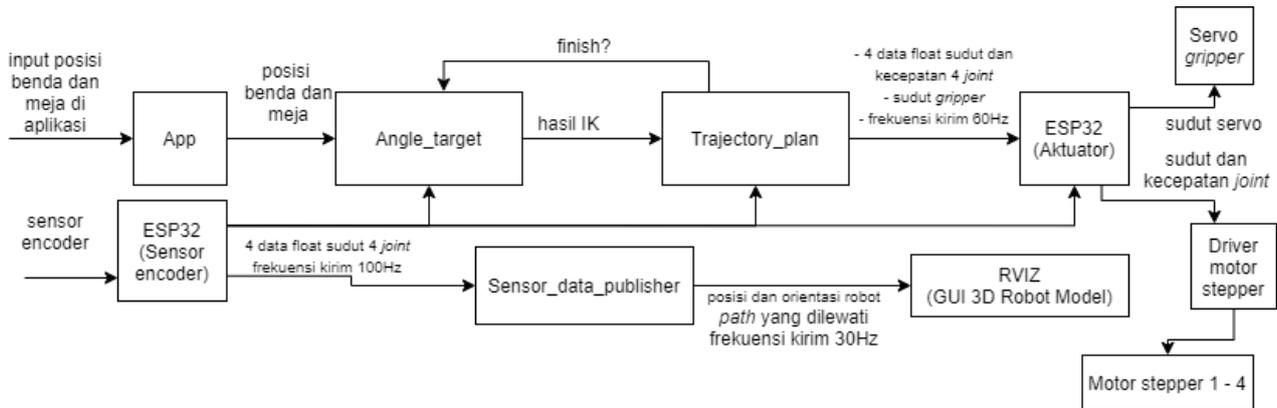
Gambar 4. Diagram Abstrak Robot Manipulator 4 DOF

Algoritma keseluruhan robot manipulator 4 DOF sebagaimana terlihat pada Gambar 6. Node 'App' menerima data dari pengguna yang selanjutnya diteruskan ke node 'Angle\_target'. Di node 'Angle\_target' dilakukan perhitungan inverse kinematics dengan persamaan 1 hingga persamaan 4 dengan masukan dari node 'App'. Hasil dari perhitungan invers kinematics dikirim ke node 'Trajectory\_plan' di sini dilakukan perhitungan trajectory planning menggunakan speed based sigmoid function dengan persamaan 5. Hasil dari perhitungan trajectory planning dikirim ke node 'ESP32(Aktuator)' dengan kecepatan 60Hz, di sini dilakukan pengontrolan motor stepper nema 17 yang merupakan aktuator penggerak joint robot.



Gambar 5. Visualisasi Robot Manipulator dengan RVIZ

Di sisi node 'ESP32(Aktuator)' juga dilakukan pengontrolan pergerakan motor stepper dengan kontrol proporsional dengan nilai  $KP=10$   $max\ error = 0,5$  derajat yang aktif jika error di bawah 5 derajat dengan mengambil error dari perbedaan sudut aktual yang terbaca sensor encoder dan sudut setpoint. Di sisi node 'ESP32(sensor encoder)' mengakuisisi data sensor encoder yang selanjutnya dikirim ke node lain dengan kecepatan 100Hz. Node 'Angle\_target' dan node 'Trajectory\_plan' mengambil data sensor guna memastikan apakah posisi aktual sudah menjapai target. Selain digunakan untuk sistem kendali, data sensor juga digunakan visualisasi posisi robot secara real time melalui perangkat lunak RVIZ dari ROS dengan kecepatan update data 30Hz sebagaimana terlihat pada Gambar 5.

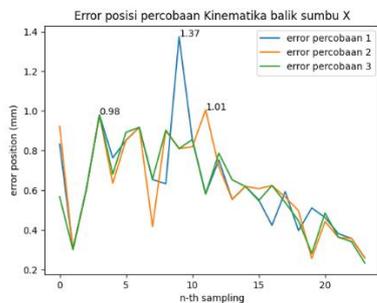


Gambar 6. Diagram Konten Robot Manipulator 4 DOF

### 3. Hasil dan Analisa

#### 3.1. Hasil dan Analisa Pengujian *inverse Kinematics*

Pengujian *inverse kinematics* dilakukan pada masing-masing sumbu, yaitu: sumbu x, sumbu y, dan sumbu z. pengujian *inverse kinematics* pada masing-masing sumbu dilakukan perulangan sebanyak tiga kali dan masing-masing perulangan mempunyai 24 *data sampling*. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu x dilakukan dari titik (250,0,0) mm ke titik (365,0,0) mm. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu y dilakukan dari titik (0,250,0) mm ke titik (0,365,0) mm. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu z dilakukan dari titik (0,270,10) mm ke titik (0,270,125) mm.

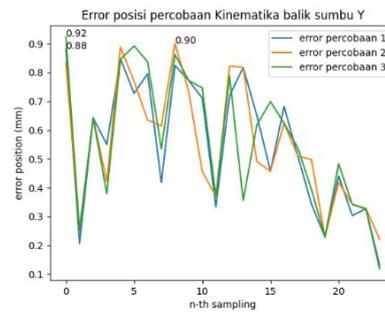


Gambar 7. Galat Posisi *Inverse Kinematics* Sumbu X

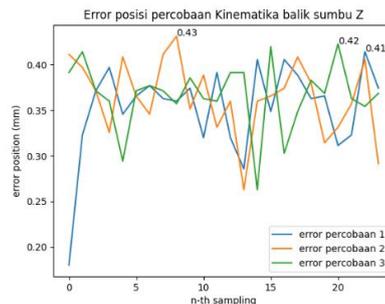
Hasil pengujian *inverse kinematics* pada sumbu x sebagaimana terlihat pada Gambar 7 memiliki galat yang kecil dengan galat maksimal pada percobaan pertama sebesar 1,37 mm. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu x menggunakan *Mean Absolute Error* (MAE) didapatkan galat rata-rata 0,62 mm.

Hasil pengujian *inverse kinematics* pada sumbu y sebagaimana terlihat pada Gambar 8 memiliki galat yang lebih kecil dari pengujian pada sumbu x. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu y didapatkan galat maksimal pada percobaan ketiga dengan galat sebesar 0,92 mm. pada pengujian *inverse kinematics* pada sumbu y dengan MAE didapatkan galat rata-rata sebesar 0,55 mm. Hasil ini lebih

kecil dari pengujian pada sumbu x dengan galat rata-rata sebesar 0,62 mm dikarenakan pergerakan pada sumbu y melibatkan *joint* robot yang lebih sedikit yang mana setiap *joint* robot memiliki toleransi *error* 0,5 derajat yang dikontrol dengan kontrol proporsional.



Gambar 8. Galat Posisi *Inverse Kinematics* Sumbu Y



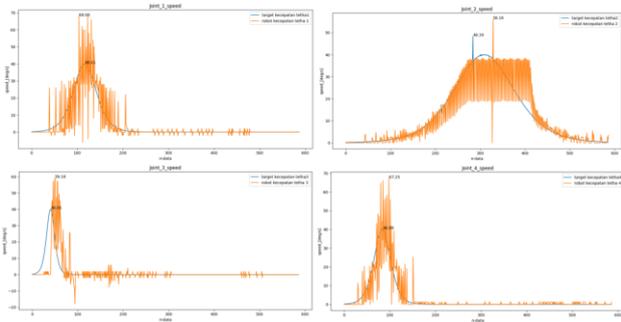
Gambar 9. Galat Posisi *Inverse Kinematics* Sumbu Z

Hasil pengujian *inverse kinematics* pada sumbu z sebagaimana terlihat pada Gambar 9 memiliki galat posisi lebih kecil dari sumbu x dan sumbu y dengan galat maksimal pada percobaan kedua sebesar 0,43 mm. pengujian *inverse kinematics* pada sumbu z juga memiliki galat rata-rata yang lebih kecil dari pengujian *inverse kinematics* pada sumbu x dan sumbu y. Pengujian *inverse kinematics* pada sumbu z dengan MAE didapatkan nilai galat rata-rata sebesar 0,36 mm yang mana lebih kecil dari galat rata-rata pada pengujian sumbu x sebesar 0,62 mm

dan pengujian pada sumbu y 0,55 mm. Hasil pengujian *inverse kinematics* pada sumbu z memiliki galat yang lebih kecil karena pada pergerakan sumbu z hanya melibatkan satu *joint* robot dengan *error max* 0,5°.

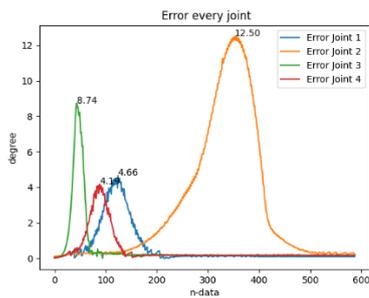
**3.2. Hasil dan Analisa Pengujian Trajectory Planning**

Pengujian *joint space trajectory planning* dengan *speed based sigmoid function* dilakukan dari titik titik (0,250,100) mm ke titik (220,220,0) mm. Penelitian ini menggunakan batas kecepatan maksimum (Vmax) sebesar 40°/s. Kecepatan pergerakan *joint* robot membentuk kurva parabola sebagaimana terlihat pada Gambar 10.



**Gambar 9. Kecepatan Joint Robot**

Pada pengujian *trajectory planning* terlihat galat kecepatan yang bervariasi hal ini dikarenakan pergerakan *joint* robot menggunakan aktuator motor stepper memerlukan waktu tunda di setiap step pergerakannya, sehingga terjadi *lagging*. *Lagging* pergerakan aktual robot terhadap *setpoint* yang diberikan menyebabkan galat posisi *joint* robot disaat *joint* robot bergerak sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Galat terbesar pada saat *joint* robot bergerak terjadi pada *joint* 2 dengan galat sebesar 12,5°.



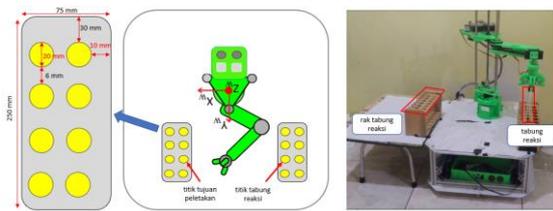
**Gambar 10. Galat Real Time Joint Robot**

Didapatkan galat yang besar disaat *joint* robot bergerak dikarenakan kontrol proporsional tidak mengontrol galat yang diakibatkan waktu tunda yang dibutuhkan motor stepper untuk bergerak. Kontrol proporsional bekerja disaat galat posisi setiap *joint* robot kurang dari 5° dari posisi tujuan yang bertujuan untuk menggantikan kontrol *on off* pada saat *joint* robot bergerak. Galat posisi *joint*

robot disaat robot bergerak tidak menjadi masalah utama dalam penelitian ini, hal ini dikarenakan penelitian ini difokuskan pada kecepatan pergerakan robot yang halus sebagaimana terlihat pada Gambar 9 dan ketelitian posisi *end effector* robot sesuai titik posisi yang diberikan yang mana sudah dibahas dalam sub-bab hasil dan Analisa pengujian *inverse kinematics*.

**3.3. Hasil dan Analisa Pengujian Pick and Place**

Pengujian *pick and place* ditugaskan untuk memindahkan tabung reaksi dengan diameter 15 mm dan Panjang 150 mm. Pengujian *pick and place* dilakukan sebanyak lima kali percobaan dengan titik tabung reaksi dan tujuan peletakan yang sama. Posisi tabung reaksi pada koordinat kartesian (-198,279,76) mm dan posisi tujuan peletakan tabung reaksi adalah (236,179,80) mm sehingga *setup* dari pengujian *pick and place* sebagaimana terlihat pada Gambar 11. Dari *setup* tersebut ditentukan titik singgah robot dalam menyelesaikan tugas *pick and place* tabung reaksi sebagaimana terlihat pada Tabel 2.



**Gambar 11. Setup Pengujian Pick and Place**

**Tabel 2. Titik init dan titik singgah pengujian pick and place**

| No. | X    | Y   | Z   | Keterangan          |
|-----|------|-----|-----|---------------------|
| 1   | 0    | 270 | 0   | Titik init awal     |
| 2   | 0    | 270 | 91  | Titik singgah 1     |
| 3   | -198 | 279 | 91  | Titik singgah 2     |
| 4   | -198 | 279 | 76  | Titik tabung reaksi |
| 5   | -198 | 279 | 156 | Titik singgah 3     |
| 6   | 236  | 245 | 160 | Titik singgah 4     |
| 7   | 236  | 245 | 80  | Titik tujuan        |
| 8   | 236  | 245 | 160 | Titik singgah 5     |
| 9   | 0    | 270 | 0   | Titik init awal     |

X : *setpoint* posisi *end effector* pada sumbu X

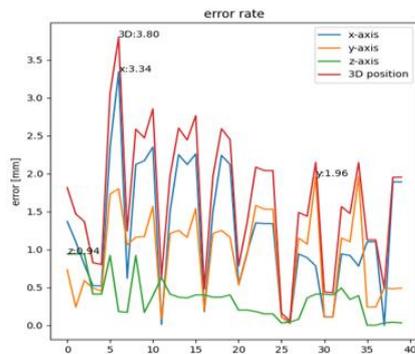
Y : *setpoint* posisi *end effector* pada sumbu Y

Z : *setpoint* posisi *end effector* pada sumbu Z

Dari lima kali percobaan didapatkan robot lima kali berhasil memindahkan tabung reaksi ke titik tujuan. Galat terbesar pengujian *pick and place* pada sumbu x sebesar 3,34 mm, galat terbesar pada sumbu y sebesar 1,96 mm, galat terbesar pada sumbu z sebesar 0,94 mm, dan galat terbesar posisi *euclidean* robot dari *setpoint* sebesar 3,80 mm. Galat posisi robot terlihat pada Gambar 12 yang menyajikan galat posisi dari percobaan pertama hingga percobaan terakhir.

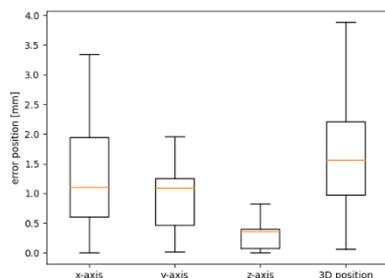
Pada pengujian *pick and place* menghasilkan galat yang identik dengan pengujian *inverse kinematics* yang mana

menghasilkan galat terbesar yang paling kecil pada sumbu z yang disusul oleh sumbu y dan sumbu x. Hal ini terjadi karena pergerakan sumbu z hanya melibatkan pergerakan satu *joint* saja, yaitu *joint* 2. Pergerakan sumbu y melibatkan dua *joint*, yaitu *joint* 3 dan *joint* 4, sedangkan pergerakan pada sumbu x melibatkan tiga *joint*, yaitu *joint* 3 dan *joint* 4 seperti sumbu y ditambah pergerakan *joint* 1.



Gambar 12. Galat Posisi Pengujian *Pick and Place*

Data persebaran galat pada pengujian *pick and place* juga membuktikan pergerakan sumbu z memiliki galat terkecil yang sebagaimana terlihat pada Gambar 13. Distribusi galat posisi pada sumbu x galat minimum 0 mm, quartil 1 (Q1) sebesar 0,6 mm, quartil 2 (Q2) atau median 1,1 mm, quartil 3 (Q3) sebesar 1,95 mm, dan galat maksimal sebesar 3,34 mm. Pada sumbu y dihasilkan galat minimum sebesar 0,02 mm, quartil 1 (Q1) sebesar 0,47 mm, quartil 2 (Q2) atau median 1,09 mm, quartil 3 (Q3) sebesar 1,25 mm, dan galat maksimal sebesar 1,96 mm. Pada sumbu z dihasilkan galat minimum sebesar 0 mm, quartil 1 (Q1) sebesar 0,08 mm, quartil 2 (Q2) atau median 0,36 mm, quartil 3 (Q3) sebesar 0,41 mm, dan galat maksimal sebesar 0,83 mm.



Gambar 13. Distribusi Galat Posisi Pengujian *Pick and Place*

Dari percobaan *pick and place* tabung reaksi dengan robot manipulator 4 DOF yang dilakukan sebanyak lima kali dihasilkan galat rata-rata pada sumbu x sebesar 1,21 mm, pada sumbu y sebesar 0,92 mm, pada sumbu z sebesar 0,3 mm, dan galat posisi (euclidean distance) end effector sebesar 1,46 mm.

#### 4. Kesimpulan

Robot manipulator 4 DOF yang dibangun menghasilkan galat rata-rata yang kecil dengan galat pada sumbu x sebesar 0,62 mm pada sumbu y sebesar 0,5 mm, dan pada sumbu z sebesar 0,36 mm. *Speed based trajectory planning* menghasilkan pergerakan yang halus dengan kecepatan pergerakan *joint* kurva hiperbola. Robot manipulator 4 DOF mampu memindahkan tabung reaksi dengan pengujian 5 kali memiliki tingkat keberhasilan 100% dan galat rata-rata yang kecil yaitu 1,46 mm. Walaupun robot memiliki tingkat presisi yang tinggi robot masih belum mampu mengontrol galat *joint* robot disaat robot bergerak yang dihasilkan oleh waktu tunda di setiap pergerakan motor stepper, sehingga diperlukannya kontrol *trajectory planning* yang bekerja pada *cartesian space*.

#### Referensi

- [1]. S. Kucuk and Z. Bingul, *Robot Kinematics: Forward and Inverse Kinematics*, no. December. 2006.
- [2]. S. Muslimin, K. Salahuddin, and E. Prihatini, "Implementasi Inverse Kinematics Terhadap Pola Gerak Hexapod Robot 2 Dof," vol. 4, no. 2, pp. 142–146, 2017.
- [3]. R. V. v. Petrescu *et al.*, "Inverse Kinematics at the Anthropomorphic Robots, by a Trigonometric Method," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 394–411, 2017
- [4]. M. Kelemen, I. Virgala, T. Lipták, L. Miková, F. Filakovský, and V. Bulej, "A novel approach for a inverse kinematics solution of a redundant manipulator," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 11, Nov. 2018
- [5]. W. Honig, J. A. Preiss, T. K. S. Kumar, G. S. Sukhatme, and N. Ayanian, "Trajectory Planning for Quadrotor Swarms," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 34, no. 4, pp. 856–869, Aug. 2018
- [6]. J. Kim, M. Jin, S. H. Park, S. Y. Chung, and M. J. Hwang, "Task space trajectory planning for robot manipulators to follow 3-d curved contours," *Electronics (Switzerland)*, vol. 9, no. 9, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/electronics9091424.
- [7]. A. Z. Rahman, ST, MT and K. Jauhari, "Perhitungan Inverse Kinematics dan Pengukuran Akurasi Pergerakan pada Robot Manipulator Lengan," *Jurnal Teknik Mesin ITI*, vol. 3, no. 2, p. 53, 2019
- [8]. V. J. Santos and F. J. Valero-Cuevas, "Reported anatomical variability naturally leads to multimodal distributions of denavit-hartenberg parameters for the human thumb," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 2, pp. 155–163, Feb. 2006,
- [9]. W. C. Chen, C. S. Chen, F. C. Lee, and Y. S. Kung, "Digital hardware implementation of the forward/inverse kinematics for a SCARA robot manipulator," *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, ICASI 2018*, vol. 0, no. 4, pp. 54–57, 2018
- [10]. R. V. v. Petrescu *et al.*, "Inverse Kinematics at the Anthropomorphic Robots, by a Trigonometric Method," *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 10, no. 2, pp. 394–411, Feb. 2017

- [11]. Y. Fang, J. Hu, W. Liu, Q. Shao, J. Qi, and Y. Peng, "Smooth and time-optimal S-curve trajectory planning for automated robots and machines," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 137, pp. 127–153, Jul. 2019.
- [12]. J. Huang, P. Hu, K. Wu, and M. Zeng, "Optimal time-jerk trajectory planning for industrial robots," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 121, pp. 530–544, Mar. 2018
- [13]. Y. Lu and K. Wang, "Kinematics analysis and trajectory planning of polishing six-axis robot," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Jan. 2021, vol. 632, no. 5. doi: 10.1088/1755-1315/632/5/052074.
- [14]. Pagation and Cover, "Robot Operating System-The Complete Reference (Volume 4) Several authors," 2019. [Online]. Available: [www.cister-labs.pt](http://www.cister-labs.pt)
- [15]. W. Guan, S. Chen, S. Wen, Z. Tan, H. Song, and W. Hou, "High-Accuracy Robot Indoor Localization Scheme Based on Robot Operating System Using Visible Light Positioning," *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 2, Apr. 2020, doi: 10.1109/JPHOT.2020.2981485.