

Pengaruh Variasi *Trajectory Planning* terhadap Waktu Pemandahan Barang pada Robot Manipulator 3-DOF

Akhmad Wahyudin Sidik¹⁾, Ikhwan Taufik²⁾, Herru Santosa Budiono³⁾.

^{1,2,3)}Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

E-mail: ¹⁾wahyudinsidik276@gmail.com

Abstrak

Trajectory planning merupakan salah satu faktor yang memengaruhi efisiensi kerja robot manipulator, khususnya pada aplikasi *pick-and-place*. Namun, kajian eksperimental mengenai pengaruh variasi lintasan terhadap waktu pemandahan pada robot manipulator 3-DOF masih relatif terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tiga variasi *trajectory planning* terhadap waktu pemandahan barang menggunakan robot manipulator 3-DOF. Penelitian dilakukan secara eksperimen menggunakan robot manipulator berbasis Arduino Mega 2560 dengan tiga variasi *trajectory planning*. Beban yang dipindahkan sebesar 25 gram dan setiap variasi diuji sebanyak 10 kali. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji homogenitas *Levene*, dan *One-Way ANOVA*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *trajectory planning* 1 menghasilkan waktu pemandahan tercepat dengan rata-rata 42,996 s, diikuti *trajectory planning* 2 sebesar 44,690 s dan *trajectory planning* 3 sebesar 49,758 s. Hasil uji *One-Way ANOVA* menunjukkan bahwa variasi *trajectory planning* berpengaruh signifikan terhadap waktu pemandahan barang ($p < 0,05$). *trajectory planning* 1 mampu mengurangi waktu pemandahan sebesar 3,79% dibandingkan *trajectory planning* 2 dan sebesar 13,60% dibandingkan *trajectory planning* 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lintasan yang lebih sederhana mampu meningkatkan efisiensi waktu operasi robot manipulator dan dapat dijadikan acuan dalam pemilihan *trajectory planning* pada aplikasi robot *pick-and-place*.

Kata Kunci: 3-DOF, ANOVA, robot manipulator, *trajectory planning*, waktu pemandahan,

Abstract

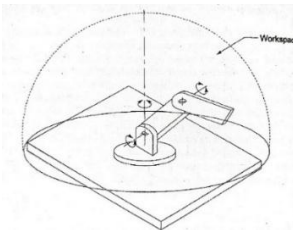
Trajectory planning is one of the important factors that affect the efficiency of a manipulator robot in the process of moving goods. However, experimental evaluation of the effect of *trajectory planning* variations on the transfer time of a 3-DOF manipulator robot is still relatively limited. This study aims to analyze the effect of three *trajectory planning* variations on the transfer time of goods using a 3-DOF manipulator robot. The robot was designed using three stepper motors, one servo motor as a gripper, and an Arduino Mega 2560 microcontroller. Testing was carried out experimentally with a load of 25 grams, using three *trajectory planning* variations (*trajectory planning* 1, *trajectory planning* 2, and *trajectory planning* 3), each with 10 repetitions. The parameter analyzed was the time required for the robot to move an object from the starting point to the destination point. The results showed that *trajectory planning* 1 produced the fastest average transfer time of 42.996 s, followed by *trajectory planning* 2 at 44.690 s, and *trajectory planning* 3 at 49.758 s. These results indicate that *trajectory planning* patterns influence the efficiency of moving time, with trajectories with simpler paths reducing robot operating time. These findings provide recommendations for selecting more efficient trajectories for 3-DOF manipulator robot applications in *pick-and-place* processes.

Keywords: 3 DoF, ANOVA, manipulator robot, *trajectory planning*, moving time.

1. PENDAHULUAN

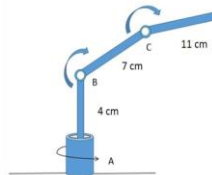
Robot manipulator merupakan salah satu sistem otomasi yang banyak diterapkan pada proses industri modern, terutama untuk aplikasi *pick-and-place*, perakitan (*assembly*), pengelasan (*welding*), dan penanganan material (*material handling*)[1]. Kemampuan robot manipulator dalam memindahkan objek secara cepat, presisi, dan berulang menjadikannya komponen penting dalam peningkatan produktivitas sistem manufaktur[2][3]. Salah satu faktor yang mempengaruhi performa robot manipulator adalah perencanaan lintasan (*trajectory planning*), karena lintasan yang dipilih akan menentukan panjang jalur, perubahan sudut setiap joint, serta waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan suatu tugas [4]–[6].

Robot manipulator terdiri atas beberapa joint dan link yang digerakkan aktuator sehingga *end-effector* dapat mencapai posisi tertentu sesuai lintasan yang telah direncanakan. Pada aplikasi industri, robot manipulator banyak digunakan untuk proses *pick-and-place*, pengelasan, pengecatan, dan perakitan. Dengan *tool* pergelasan yang khusus struktur sendi-lengan cocok digunakan untuk menjangkau daerah kerja yang sempit dengan sudut jangkauan yang ragam[7][8]. Konfigurasi sendi-lengan terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konfigurasi sendi lengan

Robot manipulator ditunjukkan pada Gambar 1.2. Pada putaran penggerak/motor menciptakan sudut atau orientasi robot dan sudut-sudut tersebut dinamakan θ_1 , θ_2 , θ_3 [4].



Gambar 1. 1 Robot manipulator 3 DoF

Perencanaan lintasan (*trajectory planning*) adalah salah satu masalah mendasar dalam desain dan pengembangan manipulator. Lintasan biasanya ditentukan untuk memenuhi kriteria tertentu secara optimal. Performa optimal memiliki arti seperti waktu minimum, energi kinetik minimum, dan penghindaran rintangan[6], [9], [10]. Untuk robot manipulator dapat bergerak, diperlukan mikrokontroler seperti Arduino Mega sebagai otak dari yang menggerakkan motor. Arduino adalah perangkat elektronik open source berdasarkan perangkat keras dan perangkat lunak yang mudah digunakan. Contoh mikrokontroler adalah Arduino Mega 2560 [11]. Mikrokontroler Arduino Mega2560 karena menyediakan kontrol operasi yang cepat dan andal dengan mencakup 54 pin I/O digital empat belas disediakan output PWM [12].

Berbagai penelitian telah mengembangkan robot manipulator menggunakan pendekatan kinematika, inverse kinematics, maupun *trajectory planning* untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi gerak. Beberapa penelitian berfokus pada pengembangan desain mekanik robot, sedangkan penelitian lainnya

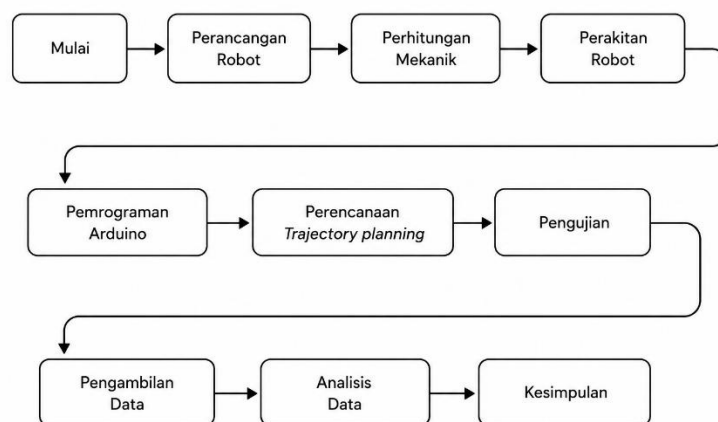
menitikberatkan pada optimasi kendali maupun perencanaan lintasan menggunakan berbagai metode. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian lebih banyak mengevaluasi aspek akurasi posisi atau pergerakan joint, sedangkan kajian eksperimental mengenai pengaruh variasi lintasan terhadap waktu pemindahan objek pada robot manipulator 3-DOF masih relatif terbatas [13][14].

Berdasarkan kajian tersebut, masih terdapat kesenjangan penelitian (research gap) mengenai evaluasi eksperimental pengaruh variasi lintasan terhadap efisiensi waktu operasi robot manipulator 3-DOF pada proses pemindahan barang. Padahal, pemilihan lintasan yang tepat berpotensi meningkatkan produktivitas robot tanpa memerlukan perubahan pada desain mekanik maupun sistem kendali.

Berdasarkan research gap tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh tiga variasi trajectory planning terhadap waktu pemindahan barang pada robot manipulator 3-DOF melalui pengujian eksperimental menggunakan beban 25 gram. Hasil penelitian diharapkan menjadi acuan dalam pemilihan lintasan yang lebih efisien pada aplikasi robot manipulator sederhana.

Penelitian ini menawarkan pendekatan berupa evaluasi tiga variasi trajectory planning pada robot manipulator 3-DOF yang dirancang menggunakan Arduino Mega 2560 melalui pengujian eksperimental dengan kondisi operasi yang sama. Kontribusi penelitian tidak hanya menunjukkan lintasan dengan waktu pemindahan tercepat, tetapi juga memberikan dasar pemilihan trajectory planning yang lebih efisien untuk aplikasi pick-and-place sederhana.

2. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir penelitian

a. Alat dan Bahan

Robot manipulator dikendalikan menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 yang mengontrol tiga motor *stepper* sebagai aktuator utama dan satu motor servo sebagai *gripper*. Catu daya menggunakan power supply DC 24 V. Struktur mekanik robot dibuat dari akrilik dengan ketebalan 3 mm. Pemrograman dilakukan menggunakan Arduino IDE. Pengukuran waktu dilakukan menggunakan *stopwatch* digital.

b. Variabel

1. Variabel Bebas :

Perancangan robot manipulator 3 (tiga) *Degree of Freedom* (DoF) pemindah barang dengan variasi lintasan (*trajectory*) terhadap waktu pemindahan barang (Akhmad Wahyudin Sidik)

Variabel ini disebut variabel pengaruh karena fungsinya untuk mempengaruhi variabel yang lain. Variabel dalam penelitian ini yaitu lintasan /trajectory planning robot memindahkan barang.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat ini adalah variabel yang dipengaruhi oleh variabel lain, karenanya juga disebut variabel terpengaruhi. Variabel terikat pada penelitian ini adalah waktu eksekusi pemindahan barang.

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang membatasi (sebagian kendali). Variabel kontrol disebut pembanding hasil eksperimen yang dilakukan. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah massa benda, kecepatan motor, titik awal, titik akhir, program Arduino, jenis motor, dan catu daya kecepatan putar pada motor.

c. Prosedur Penelitian

1. Analisis Kebutuhan Perancangan

Mencari referensi sebelum melakukan perancangan robot manipulator 3 DoF dan menganalisis alat dan bahan yang digunakan.

2. Perhitungan yang diperlukan

- Mencari gaya vertikal searah sumbu Y lengan 3

$$F_y = m \cdot g \cdot f_c$$

$$F_y = (0,025 + 0,114) \times 9,81 \times 1,5$$

$$F_y = 0,139 \times 9,81 \times 1,5$$

$$F_y = 2,045 \text{ N}$$

- Mencari gaya vertikal searah sumbu Y lengan 2

$$F_y = m \cdot g \cdot f_c$$

$$F_y = (0,164 + 0,41 + 0,192) \times 9,81 \times 1,5$$

$$F_y = 11,271 \text{ N}$$

- Mencari gaya horizontal searah sumbu Z

$$F_z = m \cdot a \cdot f_c$$

$$F_z = m \cdot \frac{v}{t} \cdot f_c$$

$$F_z = m \cdot \frac{\omega \cdot r}{t} \cdot f_c$$

$$F_z = m \cdot \frac{\left(\frac{\theta_1}{t_1}\right) \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_{pemberat})}{t} \cdot f_c$$

$$F_z = m \cdot \frac{\left(\frac{\text{sudut} \cdot \frac{\pi}{180}}{t^1}\right) \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_{pemberat})}{t} \cdot f_c$$

$$F_z = 1,097 \cdot \frac{\left(\frac{180^\circ \cdot \frac{\pi}{180}}{0,7}\right) \cdot (0,115 + 0,24 + 0,22092 + 0,09210)}{0,7} \cdot 1,5$$

$$F_z = 7,03 \text{ N}$$

- Mencari momen/ torsi sumbu Y lengan 3

$$M_C = T_C = F_y \times (l_3)$$

$$M_C = T_C = 2,413 \times (0,22092)$$

$$M_C = T_C = 0,533 \text{ Nm}$$

- Mencari momen/ torsi sumbu Y lengan 2

$$M_C = T_C = F_y \text{ (titik B dan C)} \times (l_2 + l_3)$$

$$M_C = T_C = 13,684 \times (0,46092)$$

$$M_C = T_C = 6,307 \text{ Nm}$$

- Mencari momen arah sumbu Z lengan 1,2, dan 3

$$M_{Az} = F_z \times (l_1 + l_2 + l_3)$$

$$M_{Az} = 7,03 \times (0,115 + 0,24 + 0,22092)$$

$$M_{Az} = 4,048 \text{ Nm}$$

- Mencari momen/torsi adah sumbu Z lengan 1,2, dan 3

$$M_{Az} = F_z \times (l_1 + l_2 + l_3)$$

$$M_{Az} = 7,03 \times (0,115 + 0,24 + 0,22092)$$

$$M_{Az} = 4,048 \text{ Nm}$$

- Mencari momen/torsi adah sumbu Z lengan 2 dan 3

$$M_{Bz} = F_z \times (l_2 + l_3)$$

$$M_{Bz} = 7,03 \times (0,24 + 0,22092)$$

$$M_{Bz} = 3,24 \text{ Nm}$$

- Mencari momen/torsi adah sumbu Z lengan 3

$$M_{Cz} = F_z \times (l_3)$$

$$M_{Cz} = 7,03 (0,22092)$$

$$M_{Cz} = 1,610 \text{ Nm}$$

- Mencari momen/torsi adah sumbu Z lengan pemberat

$$M_{Dz} = F_z \times (l_{pemberat})$$

$$M_{Dz} = 7,03 (0,09210)$$

$$M_{Dz} = 0,647 \text{ Nm}$$

- Torsi sumbu Z

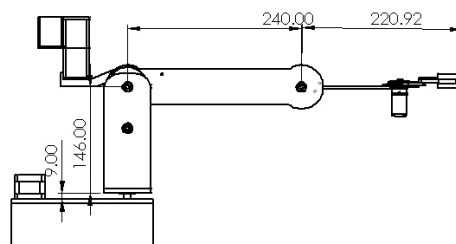
$$T_{Az} = F_z \cdot (l_1 + l_2 + l_3 + l_{pemberat})$$

$$T_{Az} = 7,03 \cdot (0,115 + 0,24 + 0,22092 + 0,09210)$$

$$T_{Az} = 4,69 \text{ Nm}$$

3. Pembuatan Desain robot 3 DoF

Pembuatan robot manipulator 3 DoF dengan mencetak desain yang dibuat menggunakan akrilik, kemudian rangka yang dicetak dirangkai sesuai desain, dan terakhir memasukan bahan yang ada pada robot manipulator 3 DoF.



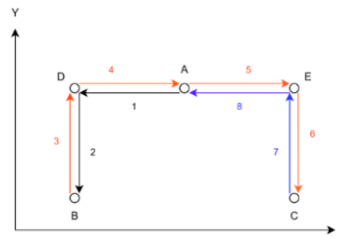
Gambar 2. Desain Robot 3 DoF

4. Perencanaan trajectory planning

trajectory planning dilakukan menggunakan metode point-to-point movement dengan koordinat target yang telah ditentukan. Pergerakan end-effector mengikuti urutan titik yang berbeda pada setiap variasi trajectory planning sehingga menghasilkan panjang lintasan yang berbeda. Ketiga trajectory planning dirancang dengan titik awal dan titik akhir yang sama, sedangkan perbedaannya hanya terletak pada jalur perpindahan end-effector[15][5].

- trajectory planning 1

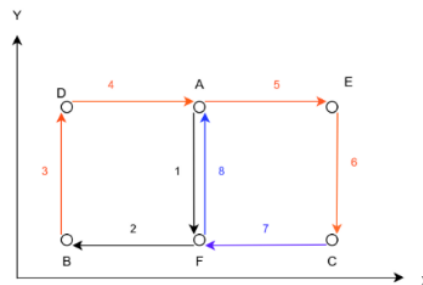
Gambar 3. merupakan pandangan vertikal terhadap sumbu Y. *trajectory planning* 1 difungsikan *end effector* untuk menemuh titik A-D-B-D-A-E-C-E-A[16].



Gambar 3. *trajectory planning* 1

- *trajectory planning* 2

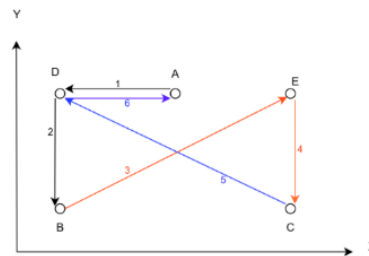
Gambar 4. merupakan pandangan vertikal terhadap sumbu Y. *trajectory planning* 2 difungsikan *end effector* untuk menemuh titik A-F-B-D-A-E-C-F-A[16].



Gambar 1. *trajectory planning* 2

- *trajectory planning* 3

Gambar 5. merupakan pandangan vertikal terhadap sumbu Y. *trajectory planning* 3 difungsikan *end effector* untuk menemuh titik A-D-B-E-C-D-A[16].



Gambar 2. *trajectory planning* 3

5. Pemrograman

Pemrograman menggunakan perangkat lunak arduino IDE, karena mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Mega2560. Setelah rangka robot dibuat kemudian di program untuk mengambil benda dari satu titik ke titik yang lainnya.

6. Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi waktu yang diperlukan robot manipulator dalam memindahkan benda dari titik awal menuju titik tujuan menggunakan tiga variasi *trajectory planning*. Massa benda dijaga konstan sebesar 25 gram, sedangkan kecepatan putaran motor, posisi awal, posisi akhir, serta program kendali dipertahankan tetap selama seluruh pengujian. Setiap variasi *trajectory planning* diuji sebanyak 10 kali untuk meningkatkan reliabilitas data.

Waktu pemindahan diukur sejak robot mulai bergerak hingga benda berhasil diletakkan pada posisi tujuan.

7. Analisis statistik

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan perangkat lunak statistik. Analisis diawali dengan perhitungan statistik deskriptif berupa nilai rata-rata dan standar deviasi waktu pemindahan untuk setiap variasi *trajectory planning*. Selanjutnya dilakukan uji homogenitas varians menggunakan uji Levene. Perbedaan rata-rata waktu pemindahan antar tiga variasi *trajectory planning* dianalisis menggunakan uji *One-Way Analysis of Variance* (ANOVA) pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$). Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka analisis dilanjutkan dengan uji lanjut (*post hoc*) Tukey HSD untuk mengetahui pasangan kelompok yang berbeda secara signifikan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian diambil data waktu pemindahan benda dan ketepatan posisi benda yang dipindahkan. Berat benda yang dipindahkan seberat 25 gram dengan perbedaan lintasan *trajectory planning* 1, *trajectory planning* 2, dan *trajectory planning* 3. Data waktu pemindahan benda disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian terhadap waktu pemindahan benda

No	<i>trajectory planning</i> 1 (s)	<i>trajectory planning</i> 2 (s)	<i>trajectory planning</i> 3 (s)
1	42.79	44.68	50.69
2	43.12	45.26	49.81
3	42.75	44.75	49.37
4	42.92	44.49	50.15
5	42.83	44.64	49.34
6	43.19	44.61	50.31
7	43.06	44.89	49.16
8	42.45	44.47	49.43
9	43.06	44.50	49.65
10	43.79	44.61	49.67
\bar{x}	42.996	44.69	49.758

Tabel 1. merupakan hasil pengujian robot manipulator memindahkan benda terhadap lama waktu yang dibutuhkan untuk memindahkan benda tersebut.

Tabel 2. Rata-rata dan standart deviasi hasil

Variasi <i>trajectory planning</i>	n	Mean (s)	SD (s)
<i>trajectory planning</i> 1	10	42,996	0,354
<i>trajectory planning</i> 2	10	44,690	0,238
<i>trajectory planning</i> 3	10	49,758	0,488

Berdasarkan hasil pengujian robot terhadap waktu pemindahan barang, didapatkan rata-rata nilai dari data tersebut. Nilai rata-rata waktu pemindahan benda yaitu pada Tabel 2. *trajectory planning* 1 menghasilkan waktu pemindahan paling singkat karena lintasan yang ditempuh *end-effector* relatif lebih sederhana dan memiliki perubahan arah yang lebih sedikit dibandingkan *trajectory planning* lainnya. Jalur yang lebih sederhana menyebabkan perpindahan sudut pada setiap

Perancangan robot manipulator 3 (tiga) *Degree of Freedom* (DoF) pemindah barang dengan variasi lintasan (*trajectory*) terhadap waktu pemindahan barang (Akhmad Wahyudin Sidik)

joint menjadi lebih efisien sehingga robot memerlukan waktu yang lebih singkat untuk mencapai titik tujuan. Sebaliknya, *trajectory planning* 3 memiliki lintasan yang lebih kompleks sehingga robot harus melakukan lebih banyak perubahan posisi dan orientasi sebelum mencapai titik akhir. Kondisi tersebut menyebabkan waktu pemindahan meningkat dibandingkan *trajectory planning* 1 maupun *trajectory planning* 2.

Tabel 3. Hasil uji homogenitas

Levene Statistic	df1	df2	Sig.
1,821	2	27	0,181

Berdasarkan Tabel 3. uji homogenitas menggunakan Levene menghasilkan nilai signifikansi sebesar 0,181 ($p > 0,05$). Hasil tersebut menunjukkan bahwa varians antar kelompok bersifat homogen sehingga asumsi untuk melakukan uji *One-Way ANOVA* telah terpenuhi.

Tabel 3. Hasil uji ANOVA

Sumber Variasi	JK (SS)	df	KT (MS)	F	Sig.
Antar Kelompok	247,596	2	123,798	885,679	<0,001
Dalam Kelompok	3,774	27	0,140		
Total	251,370	29			

Selanjutnya, uji *One-Way ANOVA* menghasilkan nilai F sebesar 885,679 dengan nilai signifikansi $p < 0,001$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan pada rata-rata waktu pemindahan barang di antara ketiga variasi *trajectory planning*.

Perbandingan	Selisih Mean (s)	p-value	Kesimpulan
<i>trajectory planning</i> 1 vs <i>trajectory planning</i> 2	1,694	<0,001	Berbeda signifikan
<i>trajectory planning</i> 1 vs <i>trajectory planning</i> 3	6,762	<0,001	Berbeda signifikan
<i>trajectory planning</i> 2 vs <i>trajectory planning</i> 3	5,068	<0,001	Berbeda signifikan

Untuk mengetahui pasangan *trajectory planning* yang berbeda secara signifikan, dilakukan uji lanjut Tukey HSD. Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh pasangan *trajectory planning* memiliki perbedaan yang signifikan ($p < 0,001$). *trajectory planning* 1 memiliki waktu pemindahan rata-rata 1,694 s lebih cepat dibandingkan *trajectory planning* 2 dan 6,762 s lebih cepat dibandingkan *trajectory planning* 3. Sementara itu, *trajectory planning* 2 juga lebih cepat sebesar 5,068 s dibandingkan *trajectory planning* 3. Hasil ini mengindikasikan bahwa pemilihan lintasan memberikan pengaruh nyata terhadap efisiensi waktu operasi robot manipulator 3-DOF.

Secara teoritis, waktu operasi robot manipulator dipengaruhi oleh panjang lintasan yang ditempuh *end-effector*, perubahan sudut setiap *joint*, serta jumlah titik lintasan yang harus dilalui selama proses pemindahan objek. Semakin panjang lintasan dan semakin banyak perubahan arah yang dilakukan, semakin besar pula waktu yang dibutuhkan robot untuk menyelesaikan satu siklus pemindahan. Oleh

karena itu, *trajectory planning* yang memiliki jalur lebih ringkas cenderung menghasilkan waktu operasi yang lebih rendah[6], [10], [17].

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian mengenai *trajectory planning* pada robot manipulator yang menyatakan bahwa pemilihan lintasan berpengaruh terhadap efisiensi gerakan robot. Perencanaan lintasan yang lebih optimal mampu mengurangi waktu siklus (*cycle time*) tanpa mengubah konfigurasi mekanik robot. Dengan demikian, hasil penelitian ini memperkuat bahwa optimasi *trajectory planning* merupakan salah satu pendekatan yang efektif untuk meningkatkan performa robot manipulator pada aplikasi *pick-and-place*[1], [18], [19].

Dibandingkan dengan *trajectory planning 2*, penggunaan *trajectory planning 1* mampu menurunkan waktu pemindahan sebesar 3,79%, sedangkan dibandingkan *trajectory planning 3* penurunan waktu mencapai 13,60%. Hasil ini menunjukkan bahwa pemilihan lintasan yang lebih sederhana memberikan peningkatan efisiensi waktu operasi robot manipulator secara nyata. Pengurangan waktu operasi tersebut berpotensi meningkatkan produktivitas sistem *pick-and-place* terutama pada aplikasi dengan siklus kerja berulang[14].

Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis pada pengembangan sistem robot manipulator untuk aplikasi *pick-and-place*. Pemilihan *trajectory planning* yang lebih efisien dapat meningkatkan produktivitas proses pemindahan barang tanpa memerlukan modifikasi pada desain mekanik maupun sistem kendali robot. Dengan demikian, optimasi lintasan dapat menjadi salah satu pendekatan yang sederhana namun efektif untuk meningkatkan performa robot manipulator pada lingkungan industri maupun laboratorium.

Meskipun hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan *trajectory planning* berpengaruh signifikan terhadap waktu pemindahan, masih terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil penelitian ini. Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian hanya dilakukan pada satu variasi massa benda (25 gram) dan satu kecepatan motor sehingga pengaruh perubahan beban maupun kecepatan aktuator belum dapat dievaluasi. Selain itu, evaluasi kinerja masih difokuskan pada waktu pemindahan tanpa mengukur konsumsi energi, akurasi posisi, maupun getaran sistem. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan analisis tersebut untuk memperoleh evaluasi performa robot manipulator yang lebih komprehensif.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa variasi *trajectory planning* berpengaruh signifikan terhadap waktu pemindahan barang pada robot manipulator 3-DOF. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *trajectory planning 1* menghasilkan waktu pemindahan tercepat dengan rata-rata sebesar 42,996 s, diikuti *trajectory planning 2* sebesar 44,690 s, dan *trajectory planning 3* sebesar 49,758 s. Hasil uji *One-Way ANOVA* menunjukkan bahwa perbedaan waktu pemindahan antar ketiga *trajectory planning* signifikan secara statistik ($p < 0,05$), sehingga pemilihan lintasan terbukti memengaruhi efisiensi operasi robot manipulator.

trajectory planning 1 mampu mengurangi waktu pemindahan sebesar 3,79% dibandingkan *trajectory planning 2* dan sebesar 13,60% dibandingkan *trajectory planning 3*. Hasil ini menunjukkan bahwa lintasan dengan perubahan arah yang lebih sederhana mampu meningkatkan efisiensi waktu operasi robot. Temuan

Perancangan robot manipulator 3 (tiga) Degree of Freedom (DoF) pemindah barang dengan variasi lintasan (*trajectory*) terhadap waktu pemindahan barang (Akhmad Wahyudin Sidik)

penelitian ini memberikan dasar dalam pemilihan *trajectory planning* yang lebih efisien untuk aplikasi robot manipulator 3-DOF pada proses *pick-and-place* serta dapat menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan metode *trajectory planning* yang lebih optimal. Penelitian selanjutnya disarankan mengevaluasi pengaruh variasi beban, kecepatan aktuator, konsumsi energi, serta metode *trajectory planning* yang lebih kompleks untuk memperoleh optimasi performa robot manipulator secara menyeluruh.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Rafi *et al.*, “Small-scale Robot Arm Design with Pick and Place Mission Based on Inverse Kinematics,” vol. 2, no. 6, pp. 469–475, 2021, doi: 10.18196/jrc.26124.
- [2] I. Taufik, *Sistem Mechatronics Engineering di Era Revolusi Industri 4.0*. Surabaya: CV. Jagad Media Publishing, 2020.
- [3] T. Dewi, S. Nurmaini, P. Risma, Y. Oktarina, and M. Roriz, “Inverse kinematic analysis of 4 DOF pick and place arm robot manipulator using fuzzy logic controller,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 1376–1386, 2020, doi: 10.11591/ijece.v10i2.pp1376-1386.
- [4] H. A. Mumtaha and H. A. Khoiri, “Analisis Dampak Perkembangan Revolusi Industri 4.0 dan Society 5.0 Pada Perilaku Masyarakat Ekonomi (E-Commerce),” *PILAR Teknol.*, vol. 4, no. 2, pp. 55–60, 2019.
- [5] E. P. Sari, F. A. Fiolana, and D. A. W. Kusumastutie, “*trajectory planning* Pada Robot Lengan 3 DOF,” *J. Techno Bahari*, vol. 11, no. 2, pp. 59–64, 2024.
- [6] S. Ye, B. Jiang, Y. Zhang, L. Cai, L. Qi, and S. Fei, “Time-Optimal *trajectory planning* for Industrial Robots Based on Improved Fire Hawk Optimizer,” *Machines*, vol. 13, no. 764, pp. 1–23, 2025.
- [7] M. Aziz, A. Qadhar, A. Dwiharzandis, D. S. Kesuma, and A. U. Berli, “RANCANG BANGUN LENGAN ROBOT PICK AND PLACE 6 AXIS MENGGUNAKAN ARDUINO MEGA,” *Menara Ilmu*, vol. 19, no. 2, pp. 771–777, 2025.
- [8] T. R. Yansah, I. Maja, E. Engineering, and P. N. Sriwijaya, “Robotic Arm for Object Stacking Based on Inverse Kinematics Method,” vol. 5, no. 1, 2025.
- [9] T. Zhang, M. Zhang, and Y. Zou, “Time-optimal and Smooth *trajectory planning* for Robot Manipulators,” *Int. J. Control. Autom. Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 521–531, 2021, doi: 10.1007/s12555-019-0703-3.
- [10] D. U. Yuxiao and C. Yihang, “Time Optimal *trajectory planning* Algorithm for Robotic Manipulator Based on Locally Chaotic Particle Swarm Optimization,” *Chinese J. Electron.*, vol. 31, no. 5, 2022, doi: 10.1049/cje.2021.00.373.
- [11] I. Taufik, *Pengantar Mekatronika*. Magelang: Tidar Press, 2024.
- [12] S. J. Parmar, I. S. Thaker, M. S. Zala, and K. M. Solanki, “Design and Development of Stepper Motor Position Control using Arduino Mega 2560,” *Int. J. Sci. Technol. Eng.*, vol. 3, no. 09, pp. 77–82, 2017.
- [13] S. Luo, M. Zhang, Y. Zhuang, C. Ma, and Q. Li, “A survey of path planning of industrial robots based on rapidly exploring random trees,” *Front.*

- Nourorobotics*, vol. 17, 2019.
- [14] J. Liu, H. J. Yap, A. Salwa, and M. Khairuddin, "Review Article Review on Motion Planning of Robotic Manipulator in Dynamic Environments," vol. 2024, 2024, doi: 10.1155/2024/5969512.
- [15] A. D. Setiyadi and I. Setiawan, "PERANCANGAN DAN PENGENDALIAN MANIPULATOR ROBOT 4-DOF DENGAN GRIPPER BERBASIS INVERSE KINEMATICS DAN *TRAJECTORY PLANNING* DENGAN ROS," vol. 10, no. 4, 2021.
- [16] H. SUPRAPTO, "*TRAJECTORY PLANNING* PADA ROBOT MANIPULATOR MENGGUNAKAN INVERSE KINEMATIC," Institut Sains dan Teknologi Nasional, 2017.
- [17] B. Wei, C. Liu, X. Zhang, K. Zheng, Z. Cao, and Z. Chen, "Smooth and Time-Optimal *trajectory planning* for Robots Using Improved Carnivorous Plant Algorithm," *Machines*, vol. 12, no. 802, 2024.
- [18] D. F. Syahbana, B. T. Putra, and I. Arifin, "*trajectory planning* pada Case packer Delta Robot dengan Interpolasi Polinomial Kubik," 2026.
- [19] Z. Wang, C. Pang, J. Sui, G. Zhao, W. Wu, and L. Xu, "Time-optimal *trajectory planning* for a six-degree-of- freedom manipulator : a method integrating RRT and chaotic PSO," *Intell. Robot.*, vol. 4, no. 4, pp. 479–502, 2024, doi: 10.20517/ir.2024.28.