

Implementasi Sistem *Inverse Kinematics* Pada Robot Arm Untuk Pemindahan Dan Penempatan Gelas

Implementation of Inverse Kinematics System in Robotic Arm for Glass Pick and Place Operations

Adi Kurniawan Saputro*
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
adi.kurniawan@trunojoyo.ac.id

Diana Rahmawati
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
diana.rahmawati@trunojoyo.ac.id

Iftitah Febriana
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
iftitahfebriana@gmail.com

Achmad Fiqhi Ibadillah
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
fiqhi.ibadillah@trunojoyo.ac.id

Miftachul Ulum
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
miftachul.ulum@trunojoyo.ac.id

Haryanto
Teknik Elektro
Universitas Trunojoyo Madura
Bangkalan, Indonesia
haryanto@trunojoyo.ac.id

Diterima : November 2024
Disetujui : Desember 2024
Dipublikasi : Januari 2025

Abstrak— Dalam era modernisasi, teknologi robotika menjadi esensial untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas di berbagai sektor, termasuk industri. Salah satu aplikasi yang umum digunakan adalah robot arm dalam tugas pick and place. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan robot arm dengan empat derajat kebebasan (DoF). Robot arm ini dirancang untuk menempatkan gelas ke dalam kotak pengemas. Penelitian ini menggunakan prinsip *inverse kinematics* dan *software* pengendali robot arm yang dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python. Robot arm akan dikendalikan dengan sensor proximity untuk membaca jarak atau letak objek. Proses pengemasan akan dioptimalkan melalui perencanaan gerakan pengambilan gelas dari konveyor ke posisi kardus secara akurat dan efisien. Skenario uji coba akan dilakukan dengan menguji kemampuan robot arm dalam menempatkan gelas ke dalam kotak pengemas dengan akurasi tinggi. Hasil uji coba dilakukan sebanyak 30 kali dalam waktu 10 menit menggunakan robot arm dalam mengambil gelas untuk koordinat x-y sebesar 99,9%. Tingkat akurasi robot arm dalam meletakkan gelas ke dalam kotak pengemas untuk koordinat x sebesar 100% sedangkan untuk koordinat y sebesar 99,9%. Perbedaan dalam keakuratan sudut robot terjadi karena ketidaktepatan dalam pengukuran sudut pada robot. Ketidaktepatan ini disebabkan oleh ketidakpastian dalam menentukan titik referensi utama dari motor stepper, yang berfungsi sebagai acuan untuk pergerakannya.

Kata Kunci— *Inverse Kinematics*; Robot arm 4 DoF; Sensor Proximity; Pick and Place

Abstract— *In the modern era, robotic technology becomes essential for increasing efficiency and productivity in various sectors, including industry. One common robot application is the robot arm for pick-and-place tasks. This research aims to develop a robot arm with four degrees of freedom (DoF). The robot arm is*

designed to place glasses into packaging boxes. This research uses the principle of inverse kinematics and robot arm control software developed using Python programming language. The robot arm will be controlled using proximity sensors to read object distances or locations. The packaging process will be optimized through accurate and efficient movement planning from the conveyor to the cardboard position. Trial scenarios will be conducted to test the robot arm's ability to place glasses into packaging boxes with high accuracy. The trials were conducted 30 times within a 10-minute duration, achieving an accuracy of 99.9% for the x-y coordinates when the robotic arm picked up glasses. The accuracy of the robotic arm in placing glasses into the packaging box was 100% for the x-coordinate and 99.9% for the y-coordinate. The discrepancies in the robot's angular accuracy are attributed to inaccuracies in angle measurement, caused by uncertainties in determining the primary reference point of the stepper motor, which serves as the basis for its movement.

Keywords— *Inverse Kinematics; Arm Robot 4 Dof; Proximity Sensor; Pick And Place*

I. PENDAHULUAN

Penerapan teknologi robotika di zaman modern ini menjadi semakin esensial untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas di berbagai sektor, salah satunya di dalam dunia industri. Robot arm atau robot manipulator dirancang untuk memindahkan objek secara efisien melalui pergerakan yang telah diprogram untuk mengeksekusi berbagai tugas [1]. Robot arm atau lengan robot adalah sebuah mekanikal terprogram yang berbentuk lengan dan dirancang untuk meniru atau memperagakan gerakan lengan manusia [2][3]. Biasanya terdiri dari serangkaian segmen yang disebut link atau lengan dihubungkan oleh sendi [4].

Dalam dunia industri, tugas-tugas manual yang repetitif, memakan waktu, dan berisiko tinggi sering kali menjadi hambatan dalam mencapai produktivitas maksimal. Salah satu contohnya adalah proses pengemasan barang, di mana kecepatan, akurasi, dan konsistensi dalam memindahkan objek sangat penting. Namun, manusia memiliki keterbatasan dalam hal kecepatan, ketahanan fisik, dan kemampuan untuk menghindari error, sehingga solusi otomatisasi berbasis *robot arm* menjadi alternatif yang sangat menarik.[5][6].

Salah satu jenis *robot arm* yang umum digunakan adalah *robot arm pick and place*, di mana dirancang untuk melakukan tugas *pick and place* (mengambil dan meletakkan). Memiliki kemampuan untuk mengambil objek dari satu lokasi (*pick*) dan meletakkannya di lokasi lain (*place*) sesuai program yang telah ditentukan [7]. Dalam pembahasan ini, dengan keunggulan fleksibilitas gerak pada robot arm, memberikan fleksibilitas dalam memadai untuk menangani tugas-tugas seperti *pick and place* gelas ke dalam kotak pengemasan. Dalam dunia industri, *fleksibilitas robot arm* berperan penting dalam menghindari potensi kesalahan atau *error* sebab manusia memiliki keterbatasan yang dapat mempengaruhi keakuratan dan efisiensi dalam menjalankan tugas.

Meskipun *robot arm* memiliki potensi besar, tantangan utama masih terletak pada optimasi pergerakannya. Fungsi utama robot arm ini adalah memindahkan gelas dan menempatkannya ke dalam kotak pengemas, dengan menerapkan prinsip *inverse kinematics* sebagai solusi matematis untuk masalah yang kompleks. Prinsip *inverse kinematics* bertujuan menghitung sudut-sudut sendi yang diperlukan agar robot arm dapat mencapai posisi atau orientasi tertentu sesuai keinginan. [8] Selain memberikan informasi tentang sudut-sudut sendi yang dibutuhkan, *inverse kinematics* juga memungkinkan sistem kendali untuk mengatur gerakan robot arm dengan presisi tinggi, sehingga target dalam proses pengemasan dapat dicapai secara efisien.

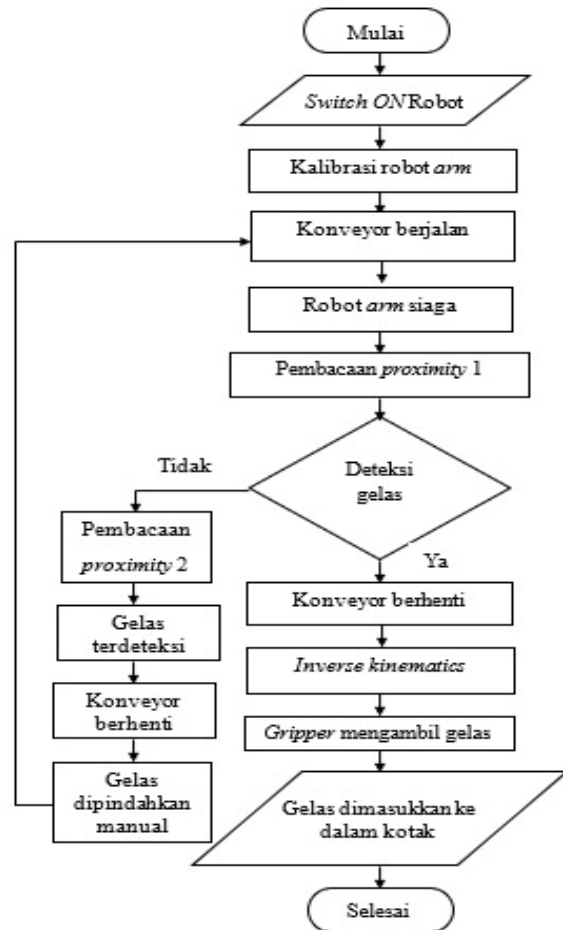
Penelitian ini menggunakan kombinasi mikro Arduino Mega2560 sebagai pemroses pergerakan bersama dengan perangkat lunak berbasis Python untuk pengendalian robot, serta penerapan *inverse kinematics* dalam metode pengenalan sudut. Dibandingkan dengan penelitian serupa, pendekatan ini memungkinkan pemrograman gerakan yang lebih fleksibel dan dinamis, serta memanfaatkan kemampuan Python dalam merencanakan jalur dan pengendalian robot secara lebih efisien. Penggunaan *inverse kinematics* memberikan kemampuan akurasi tinggi dalam mengendalikan posisi sendi-sendi robot secara lebih presisi. Selain itu, penggunaan algoritma perencanaan gerakan berbasis Python membuka potensi untuk pengembangan lebih lanjut dalam pengendalian robot yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan dan pergerakan rintangan.

II. METODE

A. Tahap Penelitian

Pada *flowchart* Gambar 1, proses dimulai dengan konveyor yang dinyalakan pada kondisi pertama dan menyalakan robot dengan menekan tombol *on* (*switch on*) lalu konveyor akan berjalan. Pada saat konveyor berjalan, *robot arm* melakukan kalibrasi hingga robot berada diposisi siaga atau siap untuk bekerja, kemudian gelas akan dibawa konveyor sampai melewati titik yang ditentukan.

Pada titik tersebut sensor proximity 1 akan mendeteksi adanya objek berupa gelas, sehingga dari hasil pembacaan tersebut konveyor akan berhenti [9]. Disaat robot akan melakukan pergerakan-pergerakannya, terjadilah proses *inverse kinematics*. Setelah itu dikirimkan perintah ke *robot arm* untuk bergerak mencapit pada titik tersebut dan kemudian memindahkan ke dalam kotak pengemas yang sudah disiapkan pada bagian samping robot.

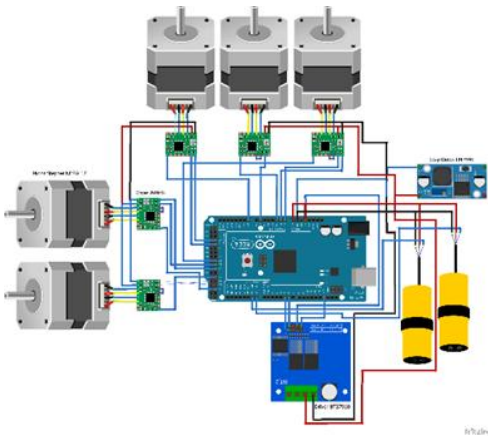


Gambar 1. Diagram Flowchart Penelitian

Kondisi lain yaitu ketika sensor proximity 1 tidak mendeteksi gelas, maka sensor proximity 2 akan melakukan pembacaan untuk menghentikan konveyor sehingga konveyor akan berhenti dan gelas akan dipindahkan secara manual, setelah dipindahkan konveyor akan berjalan kembali dan melakukan pengulangan pada tugasnya.

B. Perancangan Hardware

Desain rangkaian *hardware* (perangkat keras) yang digunakan sistem pengendalian robot arm 4 DoF. Rangkaian ini mencakup komponen utama seperti Arduino Mega2560, motor stepper NEMA17, driver A4988, serta sensor proximity.



Gambar 2. Rangkaian *Hardware*

Masing-masing komponen yang di tunjukkan pada Gambar 2 antara lain. Arduino Mega2560 sebagai modul I/O utama untuk mengontrol dan mengatur sudut putaran motor stepper. Arduino Mega2560 dipilih karena memiliki jumlah pin I/O yang banyak, mendukung pemrosesan lebih kompleks, dan kompatibel dengan berbagai modul. Sebagai "otak" kerja sistem, Arduino Mega2560 menggerakkan robot arm 4 DoF dengan presisi tinggi.

Motor stepper yang digunakan adalah NEMA17, sebanyak lima unit, masing-masing dilengkapi dengan driver motor A4988. Motor stepper NEMA17 dipilih karena memiliki resolusi yang tinggi, torsi yang cukup untuk menggerakkan robot arm, dan kompatibilitasnya dengan driver A4988. Driver A4988 mendukung kontrol mikrostepping, yang memastikan gerakan motor stepper halus dan akurat.

Selain itu, sistem dilengkapi dengan sensor proximity yang berfungsi untuk mendeteksi posisi atau letak objek. Sensor ini dipilih karena kemampuannya memberikan pembacaan posisi secara cepat dan andal, yang penting untuk memastikan akurasi dalam pengendalian robot arm. Pada Gambar 2 merupakan rangkaian *hardware* (perangkat keras). Rangkaian Arduino Mega2560 sebagai I/O untuk mengontrol dan mengendalikan sudut putaran motor stepper. Arduino Mega2560 sebagai otak kerja sistem untuk menggerakkan robot arm 4 DoF. Motor stepper yang digunakan adalah NEMA17 sebanyak 5 beserta driver motor A498N. Sensor proximity yang digunakan berfungsi sebagai pembacaan posisi atau letak objek.

C. Inverse Kinematics

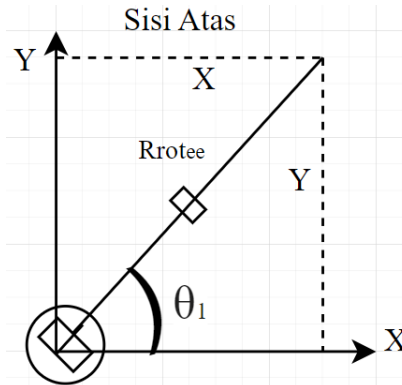
Inverse kinematics atau kinematika balik merupakan pendekatan yang digunakan untuk menemukan sudut variabel (*joint*) pada robot, yang dapat menentukan posisi serta orientasi *end-effector*. Proses ini melibatkan persamaan gerak robot yang menentukan posisi akhir atau parameter sambungan yang dapat menghasilkan posisi yang diinginkan pada ujung efektor [10].

Kalibrasi robot dengan kinematika balik melibatkan memastikan robot berada pada posisi standar, mengukur dimensi robot, dan menggunakan kinematika maju untuk menghitung posisi *end-effector*. Kinematika balik digunakan untuk menentukan sudut sambungan yang diperlukan. Selain itu, perlu memeriksa apakah posisi tersebut dalam batasan area kerja robot, melakukan pengujian dan penyesuaian, serta memastikan sensor posisi terkalibrasi dengan baik untuk

akurasi pergerakan. Langkah-langkah ini memastikan robot dapat bergerak sesuai dengan posisi yang diinginkan.

Dalam penentuan koordinat *end-effector*, kinematika balik harus disesuaikan dengan batasan area kerja (*workspace*) yang dimiliki robot. Kinematika balik melibatkan perhitungan yang berkebalikan dengan kinematika maju. Kinematika maju digunakan agar bisa mendapatkan koordinat posisi (X, Y, Z). Jika sudut setiap sambungan diketahui, kinematika terbalik adalah perhitungan yang menentukan sudut sambungan variabel robot dan menentukan posisi serta orientasi efektor akhir [11].

Untuk menyelesaikan kinematika invers ini, kita perlu menggunakan hukum Pythagoras dan teorema kosinus.



Gambar 3. Koordinat (X, Y) Tampak Atas

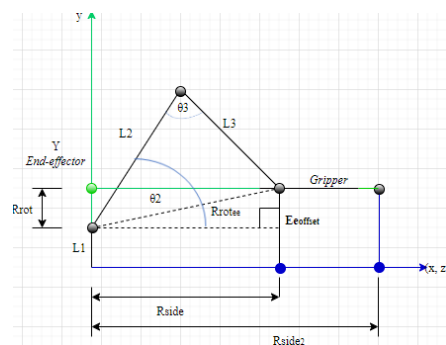
Untuk menentukan sudut (θ) yang perlu diputar oleh motor servo guna mencapai koordinat posisi yang menjadi tujuan gerak *end-effector*, digunakan rumus seperti persamaan berikut.

$$\theta_1 = \sin\left(\frac{x}{r_{rotee}}\right) \quad (1)$$

dimana

X = koordinat titik X (mm)

r_{rotee} = radius pandangan atas (mm)



Gambar 4. Koordinat (X, Y) Tampak Samping

Diagram skema lengan robot dilihat dari sudut pandang samping, menunjukkan sumbu-y dan sumbu horizontal sebagai bidang permukaan atau (x, z). Koordinat dari target *end-effector* secara *vertical* disebut y, dan koordinat pada bidang *horizontal* (x, z) diukur sebagai jarak dari *joint* 1 ke *end-effector*. Dengan demikian, perhitungan kinematika balik dengan pendekatan geometri untuk menemukan sudut sendi dengan pendekatan geometri untuk menemukan sudut sendi θ_2, θ_3 yang harus diputar oleh motor dapat diselesaikan

dengan penggunaan rumus-rumus berikut seperti persamaan berikut.

$$r_{side} = \sqrt{r_{rot}^2 + z^2} \quad (2)$$

$$r_{side_2} = r_{side}^2 \quad (3)$$

dimana

r_{side} = radius dari pandangan samping

r_{side_2} = radius dari pandangan samping ke-2

r_{rot} = radius dari pandangan atas dikurangi *offset* dari *end-effector*

Z = koordinat titik Z

Gambar 4. menggambarkan pembentukan bidang segitiga siku-siku. Dalam konteks ini, Y mengacu pada selisih jarak antara koordinat sumbu- y *end-effector* (R_{rot}) dan posisi sumbu gerak kedua (L_1) dapat menggunakan perhitungan dengan persamaan berikut [11].

$$r_{rot_{ee}} = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

$$r_{rot} = r_{rot_{ee}} - e_{offset} \quad (5)$$

dimana

$r_{rot_{ee}}$ = radius dari pandangan atas (mm)

e_{offset} = selisih jarak *base* dengan *end-effector* (mm)

R_{rot} = radius dari pandangan atas dikurangi *offset* dari *end-effector* (mm)

X = koordinat titik X (mm)

Y = koordinat titik Y (mm)

Gambar 4. pada sisi L_2 , L_3 , dan $r_{rot_{ee}}$ membentuk bidang segitiga menggunakan aturan kosinus yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$low_2 = low^2 \quad (6)$$

$$high_2 = high^2 \quad (7)$$

$$\theta_2 = \left(\pi - \cos^{-1} \left(\frac{low_2 + high_2 - r_{side_2}}{2 \times low \times high} \right) \right) + \theta_3 \quad (8)$$

dimana

low = panjang lengan bawah (mm)

$high$ = panjang lengan atas (mm)

low_2 = panjang segmen bawah ke-2 (mm)

$high_2$ = panjang segmen atas ke-2 (mm)

r_{side_2} = radius dari pandangan samping ke-2 (mm)

Untuk menyelesaikan θ_3 dapat menggunakan persamaan berikut.

$$\theta_3 = \begin{cases} z < 0, \pi - \sin^{-1} \left(\frac{r_{rot}}{r_{side}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{low_2 - high_2 + r_{side_2}}{2 \times low \times r_{side}} \right) \\ z > 0, \cos^{-1} \left(\frac{z}{r_{side}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{low_2 - high_2 + r_{side_2}}{2 \times low \times r_{side}} \right) \end{cases} \quad (9)$$

dimana

z = koordinat Z (mm)

r_{side} = radius dari pandangan samping (mm)

r_{side_2} = radius dari pandangan samping ke-2 (mm)

r_{rot} = radius dari sudut pandang atas (mm)

low = panjang segmen bawah bernilai (mm)

$high$ = panjang segmen atas (mm)

low_2 = panjang segmen bawah ke-2 (mm)

$high_2$ = panjang segmen atas ke-2 (mm)

D. Robot

Robot Institute America (RIA) menyatakan secara resmi istilah robot yang merupakan sebuah manipulator yang memiliki banyak fungsi yang dapat memiliki kemampuan memindahkan alat, material, atau suatu perangkat yang dikhususkan dalam program untuk mengerjakan beberapa tugas. Robot memiliki daya tarik di lingkungan industri, seperti penurunan biaya tenaga kerja, tingkat presisi barang yang dipindah, dan lainnya yang dapat dibandingkan dengan tenaga manusia dalam lingkungan kerja tertentu.

Terdapat dua jenis robot, yaitu robot bergerak (*mobile robot*) dan robot manipulator (*non mobile robot*). Robot *arm* atau robot lengan termasuk dalam kategori robot *non mobile* yang tidak memiliki kemampuan berpindah. Robot *non mobile* ini terfokus pada pergerakan sejumlah bagian tubuhnya tanpa kemampuan untuk berpindah tempat. Robot *arm* adalah elemen atau perangkat pada robot yang mirip dengan lengan manusia dan berfungsi untuk melaksanakan berbagai tugas fisik. Tujuan utama dari rancangan robot *arm* adalah untuk mengambil dan memindahkan objek dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Robot *arm* memiliki beberapa bagian diantaranya dasar (*base*), lengan (*link*), dan sendi (*joint*) [12].

E. Motor Stepper

Motor stepper memungkinkan kontrol langsung melalui komputer atau mikrokontroler. Fitur yang unik dari motor stepper ialah kemampuan untuk memutar poros keluaran dalam interval atau langkah sudut yang berbeda. Satu langkah diambil setiap terdapat pulsa perintah diterima. Seiring dengan penyediaan sejumlah pulsa, poros kemudian berputar melalui sudut yang sudah diketahui. Keunikan tersebut membuat motor stepper sangat cocok untuk digunakan dalam pengendalian posisi loop terbuka [13].

Mayoritas motor stepper memiliki penampilan yang serupa dengan motor tradisional. Sebagai pedoman umum, dapat diasumsikan bahwa torsi dan kekuatan motor stepper sebanding dengan torsi serta kekuatan motor tradisional yang memiliki dimensi dan rentang kecepatan yang sama. Sudut langkah biasanya berkisar antara $1,8^\circ$ hingga 90° , dengan torsi berkisar dari $1\mu\text{Nm}$ (seperti pada motor arloji berdiameter 3 mm) hingga mungkin mencapai 40 Nm pada motor berdiameter 15 cm yang sesuai untuk aplikasi peralatan berada di antara batas-batas ini, dan motor stepper yang nyaman dapat dipegang oleh tangan [14].

F. Sensor Proximity

Sensor proximity adalah perangkat sensor yang berperan dalam mendeteksi keberadaan objek dengan karakteristik mendeteksi benda dalam jarak yang dekat. Sensor ini dapat menangkap keberadaan objek tanpa menyentuhnya secara fisik, mengubah informasi mengenai gerakan atau keberadaan objek menjadi sinyal listrik yang bersifat digital. Dengan demikian, sensor proximity memiliki kemampuan untuk mendeteksi objek yang berada di sekitarnya tanpa memerlukan kontak fisik [15].

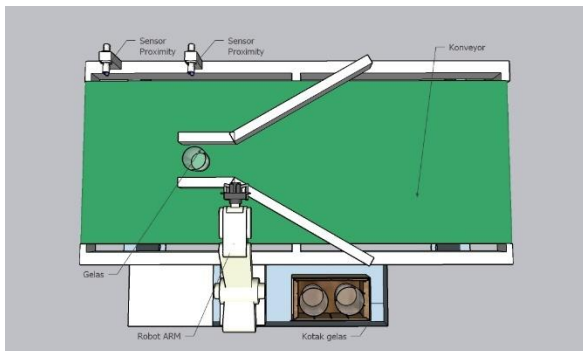
G. Arduino

Arduino adalah platform open-source yang terkemuka secara global, yang meliputi perangkat keras dan perangkat lunak, dengan tujuan memberdayakan siapa pun untuk berinovasi dalam teknologi. Dengan menyediakan berbagai perangkat keras, perangkat lunak, dan dokumentasi, Arduino memfasilitasi kreativitas dalam pengembangan teknologi yang terintegrasi (*IDE, Integrated Development Environment*) [16].

Arduino dilengkapi dengan komponen-komponen seperti pin, mikrokontroler, dan konektor. Selain itu, Arduino menggunakan bahasa pemrograman yang dikenal sebagai *Arduino Language*, yang memiliki kemiripan dengan bahasa pemrograman C++ [17].

H. Skenario Pengujian

Tujuan penelitian ini adalah otomatisasi proses penempatan gelas ke dalam kotak pengemas menggunakan robot arm sebagai pengganti tangan manusia. Sensor proximity digunakan untuk mendeteksi posisi gelas yang berada di atas konveyor [18].



Gambar 5. Desain Alat

Saat gelas telah terdeteksi sensor proximity 1, konveyor akan berhenti dan robot akan bergerak untuk mengambil gelas tersebut. Gelas dipindahkan ke dalam kotak pengemas yang mana satu kotak berisi dua gelas. Setelah memindahkan gelas ke dalam kotak pengemas, konveyor akan berjalan kembali, proses ini akan berulang sampai semua gelas dikemas secara lengkap. Apabila gelas tidak terdeteksi oleh sensor proximity 1, konveyor akan terus berjalan dan sensor proximity 2 akan bekerja. Sensor proximity 2 akan mendeteksi gelas yang tidak terdeteksi sensor sebelumnya, dan konveyor akan berhenti. Akan tetapi, pengemasan pada gelas akan dilakukan secara manual [19].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan alat untuk pick and place gelas pada penelitian ini menggunakan *robot arm* 4 DoF dilengkapi dengan *gripper* yang bertugas mengambil dan memindahkan gelas ke posisi tertentu dengan menggunakan inverse

kinematics. Selain itu, alat ini dilengkapi dengan konveyor yang berukuran 80 cm (p) x 30 cm (l) x 60 cm (t), yang berfungsi menjalankan gelas yang nantinya akan diambil oleh robot arm yang memiliki panjang lengan 1 dan 2 14 cm, dan lengan 3 5,5 cm.



Gambar 6. Hasil Alat

Pada Gambar 6 menampilkan hasil dari alat yang telah selesai dirancang, yang mencakup *robot arm* yang diposisikan di atas konveyor. Alat ini dilengkapi dengan sensor proximity untuk mendeteksi gelas yang akan diambil oleh robot arm dan ditempatkan ke dalam kotak pengemas.

Terdapat 2 pengujian yang akan dilakukan diantaranya adalah pengujian pengambilan gelas dan pengujian peletakan gelas. Data yang akan ditampilkan adalah pengukuran posisi dengan penggaris, pengukuran posisi dengan sistem, besaran sudut, hasil pengambilan dan hasil peletakan.



Gambar 7. Pengukuran Gelas dengan Penggaris

Dari Gambar 7 terlihat bahwa posisi gelas diukur menggunakan penggaris. Dari pengukuran menggunakan penggaris akan dibandingkan dengan posisi yang telah dimasukkan ke dalam sistem.



Gambar 8. Pengukuran Sudut inverse

Gambar 8 merupakan pengukuran sudut pada robot menggunakan busur saat peletakan gelas. Pengukuran sudut

dengan busur akan dibandingkan dengan perhitungan *inverse kinematics* untuk memastikan keakurasian pergerakan robot. Pengukuran di lakukan saat robot bergerak. Data di ambil dengan menghentikan robot sementara saat proses pengambilan gelas.

TABEL 1. PERBANDINGA PENGUKURAN IVERESE DAN ALAT UKUR

Urutan Robot	Pengukuran Posisi dengan Penggaris (mm)		Pengukuran Posisi dengan Sistem (mm)	
	X	Y	X	Y
1	-13	270	-13	270
2	-13	270	-13	270
3	-13	270	-13	270
4	-13	270	-13	270
5	-13	270	-13	270
6	-13	270	-13	270
7	-13	270	-13	270
8	-13	270	-13	270
9	-13	270	-13	270
10	-13	270	-13	270

Pada Tabel 1 merupakan pengujian pengambilan gelas. Pengukuran posisi dengan penggaris adalah posisi gelas di atas konveyor diletakkan pada koordinat (-13, 270) dari posisi robot. Pengukuran posisi dengan sistem adalah posisi gelas yang dimasukkan ke dalam pemrograman dan disesuaikan dengan pengukuran posisi dengan penggaris.

TABEL 2. POSISI SUDUT PENGAMBILAN

Urutan Robot	Sudut Robot (°)		Sudut Inverse Kinematics (°)	
	X	Y	X	Y
1	2,5	70	2,75	71,8
2	3	63	2,75	71,8
3	2,5	68	2,75	71,8
4	2,6	70	2,75	71,8
5	3	70	2,75	71,8
6	2,5	72	2,75	71,8
7	2,7	68	2,75	71,8
8	2,8	67	2,75	71,8
9	3	65	2,75	71,8
10	2,5	68	2,75	71,8
Error	0,056%		0,07%	
Akurasi	99,925%		99,943%	

Tabel 2 menunjukkan nilai dari besaran sudut pada robot. Sudut robot merupakan sudut yang diukur langsung pada robot seperti Gambar 8, sedangkan sudut *inverse kinematics* adalah sudut yang dihitung menggunakan rumus *inverse kinematics*. Dari kedua pengukuran sudut didapatkan nilai *error* pada koordinat X sebesar 0,056% dan koordinat Y sebesar 0,07%, sedangkan nilai keakurasian pada koordinat X sebesar 99,925% dan koordinat Y sebesar 99,943%.

TABEL 3. POSISI PELETAKAN GELAS

Urutan Robot	Pengukuran Posisi dengan Penggaris (mm)		Pengukuran Posisi dengan Sistem (mm)	
	X	Y	X	Y
1	-155	0	-155	0
2	-155	0	-155	0

3	-155	0	-155	0
4	-155	0	-155	0
5	-155	0	-155	0
6	-155	0	-155	0
7	-155	0	-155	0
8	-155	0	-155	0
9	-155	0	-155	0
10	-155	0	-155	0

Pada Tabel 3 merupakan pengujian pengambilan gelas. Pengukuran posisi dengan penggaris adalah posisi gelas di atas konveyor diletakkan pada koordinat (-155, 0) dari posisi robot. Pengukuran posisi dengan sistem adalah posisi gelas yang dimasukkan ke dalam pemrograman dan disesuaikan dengan pengukuran posisi dengan penggaris.

TABEL 4. POSISI SUDUT PELETAKAN ROBOT

Urutan Robot	Sudut Robot (°)		Sudut Inverse Kinematics (°)	
	X	Y	X	Y
1	90	101	90	101,04
2	90	77	90	76,52
3	90	101	90	101,04
4	90	76	90	76,52
5	90	103	90	101,04
6	90	76	90	76,52
7	90	106	90	101,04
8	90	75	90	76,52
9	90	102	90	101,04
10	90	72	90	76,52
Error	0%		0,025%	
Akurasi	100%		99,974%	

Tabel 4 menunjukkan nilai dari besaran sudut pada robot. Sudut robot merupakan sudut yang diukur langsung pada robot seperti Gambar 8, sedangkan sudut *inverse kinematics* adalah sudut yang dihitung menggunakan rumus *inverse kinematics*. Dari kedua pengukuran sudut didapatkan nilai *error* pada koordinat X sebesar 0 % dan koordinat Y sebesar 0,025%, sedangkan nilai keakurasian pada koordinat X sebesar 100% dan koordinat Y sebesar 99,974%.



Gambar 9. Gelas Miring saat Diangkat

Pada saat pengangkatan gelas, terjadi cengkeraman gripper yang kurang erat. Hal itulah menyebabkan gelas menjadi miring setelah proses pengambilan. Kegagalan terjadi sebanyak 2x, akan tetapi masalah tersebut dapat ditangani dengan menambahkan busa pada gripper.

Penelitian ini menunjukkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Dalam penelitian sebelumnya, akurasi robot arm sekitar 85% dengan

error 15% akibat akurasi servo yang kurang baik. Sementara pada penelitian ini, robot arm 4 DoF mencapai akurasi 100% pada koordinat x dan 99,9% pada koordinat y, meskipun ada sedikit ketidaktepatan pada sudut karena ketidakpastian motor stepper. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan motor stepper dan pengontrolan berbasis Python meningkatkan efisiensi dan akurasi pergerakan robot dibandingkan dengan teknologi sebelumnya.

IV. KESIMPULAN (HEADING 1)

Penelitian ini berhasil menerapkan metode inverse kinematics untuk meningkatkan akurasi pergerakan robot arm 4 DoF. Hasil pengujian menunjukkan tingkat keakuratan yang sangat tinggi, dengan persentase keakuratan pengambilan mencapai 99,925% untuk koordinat X dan 99,943% untuk koordinat Y, serta peletakan mencapai 100% untuk koordinat X dan 99,974% untuk koordinat Y. Error yang terdeteksi berada dalam rentang sangat kecil, yaitu 0,056% pada koordinat X dan 0,07% pada koordinat Y untuk pengujian pengambilan, serta 0% pada koordinat X dan 0,025% pada koordinat Y untuk pengujian peletakan. Robot arm juga berhasil menjalankan tugas pengambilan dan peletakan gelas secara presisi berdasarkan koordinat yang telah ditentukan, menunjukkan potensi besar untuk diimplementasikan dalam aplikasi industri, seperti pengemasan, penyortiran, dan perakitan otomatis. Meskipun hasil yang diperoleh sangat baik, masih terdapat ruang untuk pengembangan lebih lanjut, seperti integrasi teknologi penginderaan berbasis kamera dan penerapan algoritma kontrol cerdas untuk meningkatkan performa dalam lingkungan yang lebih dinamis dan kompleks.

REFERENSI

- [1] S. Rolis, K. A. Wibisono, M. Ulum, R. Alfita, and K. Saputro, "Implementasi Sistem Pendeteksi Api 360 Derajat Dengan Metode Multiplexer Dan Logika Fuzzy Pada Robot Pemadam Api Beroda," vol. 5, no. 01, pp. 69–75, 2022.
- [2] A. Syahidutama *et al.*, "Implementasi Kinematika Robot Lengan Pemindah Barang Dua Sendi (2 DOF) dengan Koordinat dalam Pemindahan Sebuah Object," pp. 35–42, 2020.
- [3] J. Teknologi, "Sistem Kontrol Lengan Robot Menggunakan Rekaman Gerakan," vol. 2, no. 1, 2020.
- [4] I. H. Ayega, T. U. A. A. Tamba, and B. M. Arthaya, "Rancang Bangun Purwarupa Manipulator Lengan Robot Dengan Tiga Derajat Kebebasan," vol. 11, no. 3, pp. 796–810, 2023.
- [5] I. Sulaeman, A. W. Dani, T. Pangaribowo, and F. Sirait, "Analisa Inverse Kinematics Pada Prototype 3-DOF Arm Robot Dengan Metode ANFIS," vol. 13, no. 01, pp. 14–18, 2022, doi: 10.22441/jte.2022.v13i1.003.
- [6] H. A. Farouk Setiawan Muhammad, "Pemodelan dan Implementasi Gerak Robot Manipulator dengan Menggunakan Robotics System Toolbox pada MATLAB," no. 2020, pp. 12–19, 2023.
- [7] R. Zefani, A. Zurendra, R. Maulana, and H. Fitriyah, "Implementasi Inverse Kinematics Pada Robot Lengan Untuk Pengambilan Benda Dengan Koordinat Awal Acak," vol. 4, no. 2, 2020.
- [8] E. Setiawan, Agung Setia Budi, *Teori dan Praktik Kinematika Robot Lengan*. 2023.
- [9] M. H. Miftachul Ulum, Haryanto, Diana Rahmawati, Riza Alfita, Adi Kurniawan Saputro, *SENSOR & AKTUATOR MENGGUNAKAN SIMULASI ARDUINO*, 1st ed. Sleman-Jogjakarta: PENERBIT KBM INDONESIA, 2024.
- [10] M. Ali *et al.*, "INVERS KINEMATIK ROBOT ARM 4 DOF MENGGUNAKAN SENSOR LEAP MOTION PENDAHULUAN," vol. 6, no. 1, pp. 363–371, 2020.
- [11] I. D. Nugraha, "Pendekatan Geometri untuk Perhitungan Inverse Kinematics Gerakan Lengan Robot 4 Derajat Kebebasan," *J. Tek. Mesin ITI*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.31543/jtm.v5i1.572.
- [12] Y. Rahmawati, "Robot Mobile Beroda Berbasis Sensor Ultrasonik Dan Pir," no. 1, pp. 17–24, 2023.
- [13] T. Sutikno, *MOTOR STEPPER, MOTOR SINKRON DAN PENGENDALIANNYA*, 1st ed. yogyakarta, 2020.
- [14] W. Rahmat, "RANCANGBANGUN PERANGKAT KENDALI MOTOR STEPPER," vol. 7, no. April, 2022.
- [15] M. Said and A. Manshury, "APLIKASI ARDUINO DAN REMOTE DESKTOP UNTUK PRAKTIK SOGI JARAK JAUH," no. 1, pp. 34–39, 2021.
- [16] M. Lamatenggo and Z. Acc, "Perancangan Balancing Robot Beroda Dua Dengan Metode Pengendali PID Berbasis Arduino Nano," vol. 2, pp. 39–43, 2020.
- [17] A. R. H. R. Fiqhi Ibadillah Achmad, Kurniawan Saputro Adi, Ulum Miftachul, Joni Koko, *Pengenalan mikrokontroler berbasis Arduino*, 1st ed. jawa tengah: citra dharma cendekia, 2023.
- [18] P. P. Pada and W. Sanding, "SISTEM PERANCANGAN CONVEYOR MENGGUNAKAN SENSOR PROXIMITY PR18-8DN PADA WOOD SANDING MACHINE," vol. 8, no. 1, pp. 67–81, 2021.
- [19] C. Belt *et al.*, "CONVEYOR BELT DAN ALAT PENGHITUNG OTOMATIS BERBASIS," vol. 14, no. 1, pp. 87–99, 2024.