

Implementasi *Forward Kinematics* pada Prototipe Robot Lengan Pembuat Kopi

Mutiarani^{1,*}, Muhammad Ikhsan²

^{1,2}Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan, Indonesia

Article Info

Article history:

Received January 24, 2026
Accepted February 23, 2026
Published February 24, 2026

Keywords:

Robot lengan,
Forward Kinematics,
Kopi,
Prototipe,
Denavit-Hartenberg

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan *Forward Kinematics* pada robot lengan 4-DOF untuk pembuatan kopi otomatis. Prototipe menggunakan Arduino Uno, PCA9685, servo MG996R/MG90S, relay, dan pompa air mini. Gerakan diprogram dengan *teach mode* dan disimpan di EEPROM dengan kontrol *open-loop*. Metode *Forward Kinematics* dengan parameter Denavit-Hartenberg digunakan untuk menghitung posisi *end effector* dan divalidasi melalui pengukuran fisik pada 30 titik uji. Hasil menunjukkan error rata-rata 1,36 cm dengan tingkat keberhasilan 83% dan waktu eksekusi rata-rata 29,47 detik per siklus. Penelitian ini membuktikan metode *Forward Kinematics* dengan parameter DH efektif untuk validasi akurasi posisi robot lengan *open-loop* pada aplikasi F&B, serta prototipe dapat meningkatkan otomasi produksi skala kecil di industri F&B.



Corresponding Author:

Mutiarani,
Ilmu Komputer, Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Sumatera Utara Medan,
Jl. Lap. Golf No. 120, Kp. Tengah, Kec Pancur Batu, Kab. Deli Serdang 20353, Indonesia.
Email: tatayaa10@gmail.com

1. PENGANTAR

Salah satu minuman yang sedang sangat diminati di semua negara, termasuk Indonesia saat ini adalah minuman kopi [1]. Menurut data Kementerian Pertanian, konsumsi kopi di Indonesia akan mengalami peningkatan dari 4,45 juta kantong pada tahun 2020-2021 kemudian naik menjadi 4,8 juta kantong pada tahun 2024-2025 [2]. Angka konsumsi yang meningkat ini menunjukkan peminat kopi setiap tahun akan semakin meningkat. Di Indonesia sendiri banyak terlihat kedai kopi baru setiap saat di berbagai tempat. Toffin melakukan penelitian secara mandiri dan menemukan bahwa pada tahun 2019 bulan Agustus Indonesia memiliki lebih dari 2.950 kedai kopi sementara pada tahun 2016 tercatat ada sekitar 1.083 kedai kopi. Tahun 2019 telah menunjukkan peningkatan hampir tiga kali lipat dibandingkan tahun 2016 lalu [3]. Tahun 2023, Asosiasi Pengusaha Kopi dan Cokelat Indonesia (APKCI) memprediksi jumlah kedai kopi di Indonesia akan mencapai hingga 10.000 kedai kopi [4]. Banyak peminat kopi membuat para pelaku usaha yang terlibat dalam bidang minuman kopi diharuskan untuk bisa meningkatkan produksi serta mempunyai inovasi baru agar mempermudah proses pembuatan kopi [5]. Untuk itu, inovasi dalam pembuatan minuman kopi diperlukan untuk bisa sejalan dengan besarnya peningkatan peminat kopi saat ini, khususnya agar bisa menghemat waktu pembuatan dan memudahkan barista jika mendapat pesanan minuman kopi sederhana. Realitanya, pada saat ini barista kewalahan membuat kopi sederhana. Realitanya, pada saat ini barista kewalahan membuat kopi sederhana secara manual dalam jumlah banyak serta rentan terjadinya perbedaan rasa kopi dikarenakan kesalahan manual [6].

Beberapa penelitian terdahulu telah mengeksplorasi penerapan robot lengan dalam berbagai konteks menggunakan pendekatan kinematika. Penelitian terdahulu dengan judul “Mathematical and 3D Mechanical System of Arm Robot Modelled as Double Pendulum” memodelkan robot lengan sebagai sistem pendulum

ganda dengan pendekatan persamaan Lagrange dan membandingkan hasil simulasi matematis dengan simulasi sistem mekanik 3D menggunakan MATLAB dan Simscape [7]. Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis perilaku osilasi manipulator dan belum mencakup penerapan pada prototipe fisik maupun aplikasi fungsional yang spesifik. Penelitian terdahulu selanjutnya mengembangkan model *Forward Kinematics* dan *Inverse Kinematics* untuk robot manipulator 3-DOF dengan servo AX-12A menggunakan metode Denavit-Hartenberg dan pendekatan geometrik [8]. Penelitian tersebut menggunakan simulasi MATLAB dengan *toolbox Robotic, Vision, and Control* (RVC) dan memperoleh error rata-rata 1,04% untuk FK dan 0,76% untuk IK. Namun, implementasi tersebut terbatas pada validasi simulasi dengan lima posisi uji tanpa aplikasi fungsional spesifik, serta tidak mengeksplorasi *repeatability* dan konsistensi gerakan robot dalam skenario penggunaan berulang.

Penelitian terdahulu lainnya merancang robot lengan untuk memindahkan lembaran material dengan kontrol motor stepper berbasis Arduino dan CNC *shield* [9]. Penelitian tersebut berfokus pada efisiensi kecepatan pemindahan material dengan kapasitas 300 siklus per jam menggunakan *suction cup* sebagai *end effector*. Namun, penelitian tersebut tidak mengimplementasikan analisis kinematika untuk validasi posisi *end effector*, serta tidak menyediakan data error posisi yang penting untuk aplikasi yang memerlukan akurasi tinggi. Kinematika maju atau *Forward kinematics* (FK) adalah metode matematika yang digunakan untuk menghitung posisi ujung lengan berdasarkan sudut tiap *joint* dan panjang tiap bagian robot lengan. Dalam penelitian ini, FK diterapkan untuk validasi ketepatan posisi robot lengan. Metode FK banyak digunakan dalam robotika untuk validasi posisi *end effector*, namun Sebagian besar penelitian terdahulu fokus pada simulasi atau sistem kontrol kompleks dengan *closed-loop feedback*. Berdasarkan tinjauan literatur, terdapat gap penelitian dalam implementasi sistem robot lengan sederhana dengan kontrol *open-loop* berbasis *teach mode* yang divalidasi menggunakan *Forward Kinematics* dengan parameter Denavit-Hartenberg untuk aplikasi pembuatan kopi otomatis pada skala industri kecil, yang memerlukan akurasi posisi tinggi dan *repeatability* konsisten.

Salah satu inovasi pembuatan kopi sederhana yang akan diangkat di penelitian ini adalah robot lengan pembuat kopi. Gerakan robot akan diprogramkan ke dalam mikrokontroler serta disimpan di EEPROM. Untuk memastikan ketepatan posisi tiap gerakan robot maka digunakan metode kinematika maju atau *Forward Kinematics* dengan parameter DH. Metode ini akan bertugas sebagai validasi posisi tiap-tiap posisi ujung lengan (*end effector*) pada setiap gerakan robot. Robot lengan sendiri adalah perangkat mekanik yang terdiri dari beberapa bagian yang dihubungkan dengan sendi (*joint*), dirancang untuk meniru gerakan lengan manusia [10]. Dalam penelitian ini, FK diterapkan untuk validasi ketepatan posisi robot lengan dengan cara membandingkan hasil hitung matematis dan hasil pengukuran fisik. FK juga sangat mendukung penelitian dikarenakan target atau posisi bahan/alat seperti sendok, bubuk, pengaduk berada di tempat yang tidak berubah (tetap). Sementara itu, cara robot lengan bergerak tanpa umpan balik (*open loop*) artinya adalah tiap gerakan robot langsung dieksekusi tanpa diperiksa terlebih dahulu oleh program. Robot lengan juga menggunakan pendekatan *teach mode* yaitu merekam gerakan yang diinginkan sekali di awal setelahnya gerakan akan disimpan di EEPROM dan berjalan berulang secara otomatis [11]. Dari permasalahan di atas, maka prototipe robot lengan perlu dirancang dan diuji coba untuk mengetahui keefektifannya dalam proses pembuatan minuman kopi sederhana secara otomatis [12]. Fokus penelitian ini adalah pada penerapan dan validasi kinematika maju untuk memastikan ketepatan posisi robot lengan pembuat kopi serta pengembangan cara gerak robot lengan *open loop* dengan pendekatan *teach mode* dan disimpan di EEPROM yang dikhususkan pada aplikasi industri kecil. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan prototipe robot lengan 4-DOF untuk pembuatan kopi otomatis, menerapkan metode *Forward Kinematics* dengan parameter DH untuk menghitung posisi teoritis *end effector*, memvalidasi akurasi posisi robot dengan membandingkan hasil perhitungan FK terhadap pengukuran fisik, dan mengevaluasi kinerja sistem dalam hal error posisi dan waktu eksekusi.

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan pada penerapan *Forward Kinematics* secara langsung pada prototipe robot lengan 4-DOF yang menggunakan parameter Denavit-Hartenberg (DH) untuk aplikasi fungsional spesifik yaitu pembuatan kopi otomatis. Berbeda dari penelitian sebelumnya yang hanya melakukan simulasi sistem pendulum ganda tanpa implementasi prototipe fisik [7], serta penelitian lain yang terbatas pada validasi simulasi MATLAB dengan lima posisi uji tanpa aplikasi spesifik [8], penelitian ini mengintegrasikan validasi FK melalui perbandingan sistematis antara hasil perhitungan matematis dan pengukuran fisik posisi *end effector* pada 30 titik uji dalam konteks aplikasi nyata pembuatan kopi. Sistem gerakan robot ditentukan dengan *teach mode* berbasis *open-loop control* yang disimpan di EEPROM untuk eksekusi berulang, berbeda dengan penelitian lain yang fokus pada kecepatan pemindahan material tanpa analisis kinematika dan validasi akurasi posisi [9]. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada kombinasi metode FK dengan parameter DH, sistem *teach mode*, dan implementasi pada aplikasi spesifik pembuatan kopi dengan validasi error posisi yang komprehensif. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan otomasi minuman kopi serta menjadi inovasi di bidang F&B.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini disusun dengan pendekatan *Research and Development* (R&D) model Borg dan Gall yang disederhanakan menjadi 7 tahap yaitu, potensi dan masalah, pengumpulan data, desain produk, validasi desain, revisi desain, uji coba produk, dan revisi produk akhir [13].

2.1. Perancangan Sistem Robot Lengan

Perancangan mekanik robot lengan, kalibrasi servo, validasi menggunakan perhitungan metode FK menjadi tantangan besar dalam penelitian ini. Kemudian waktu yang panjang untuk bisa mencapai hasil *teach mode* yang diharapkan. Data yang dikumpulkan yakni data dimensi link robot lengan, posisi objek/target, sudut tiap *joint* (*base*, *shoulder*, *elbow*, dan *wrist*), panjang *link* (tiap panjang badan robot) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Data dimensi link robot lengan ini kemudian diolah untuk menghitung FK dengan Denavit-Hartenberg menggunakan bantuan matriks transformasi homogen, serta data hasil pengukuran fisik robot lengan.

Tabel 1. Data Dimensi Link Robot Lengan

Link	Deskripsi	Nilai (cm)
L ₁	Tinggi <i>base</i>	15
L ₂	Panjang lengan atas (<i>elbow</i>)	9
L ₃	Panjang lengan bawah (<i>wrist</i>)	7
L ₄	Panjang <i>end effector</i>	8

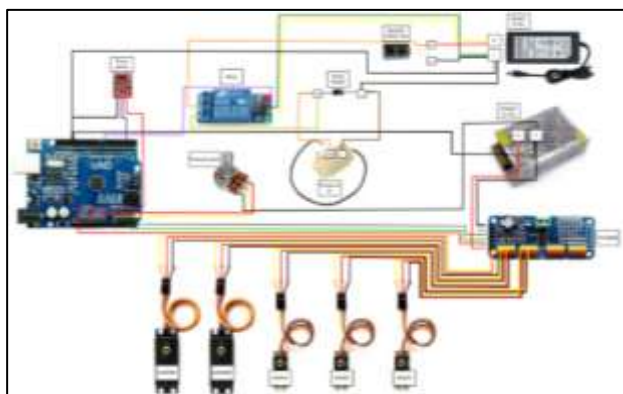
Berdasarkan Tabel 1, robot lengan memiliki tinggi *base* sebesar 15 cm dari permukaan alas, dengan panjang link pada *shoulder* (L₂) sebesar 9 cm, *elbow* (L₃) sebesar 7 cm, dan *end effector* (L₄) sebesar 8 cm. Dimensi ini menentukan *workspace* maksimal robot lengan dalam sumbu X, Y, dan Z yang dapat dijangkau untuk proses pembuatan kopi. Dalam proses pembuatan kopi, robot lengan harus dapat menjangkau berbagai posisi objek/target seperti gelas, bubuk kopi, sendok pengaduk, dan pompa air mini. Koordinat posisi setiap objek dalam *workspace* robot lengan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Koordinat Objek dalam *Workspace*

Objek	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	Ket.
Sendok	10	19,5	10	Area persiapan
Bubuk kopi	28	1	4	Area bahan
Cangkir	17	-18,5	8	Area penyajian
Pengaduk	7	-23,2	17	Area alat

Berdasarkan Tabel 2 semua objek berada dalam jangkauan *workspace* robot dengan koordinat X berkisar 7 cm hingga 28 cm, koordinat Y berkisar antara -23,2 cm hingga 19,5 cm, dan koordinat Z antara 4 cm hingga 17 cm. Posisi-posisi ini ditentukan berdasarkan kebutuhan proses pembuatan kopi dan kemampuan jangkauan robot lengan.

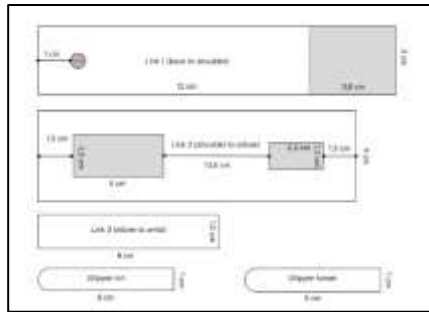
Tahapan awal proses mendesain adalah menganalisis kebutuhan. Dalam penelitian ini terdapat komponen utama yang harus dimiliki. Pertama, mikrokontroler yakni menggunakan jenis Arduino Uno R3, *chip* ATmega328P [14]. Kedua, motor servo yaitu aktuator yang dikendalikan melalui sinyal listrik [15]. Ketiga, PCA9685 yaitu modul pengendali sinyal PWM secara bersamaan di banyak perangkat (servo) [16]. Terakhir, *touch* sensor TTP223 digunakan sebagai *input* untuk memicu proses pembuatan kopi aktif. Konfigurasi *wiring* sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Wiring* prototipe robot lengan

Berdasarkan Gambar 1, Arduino Uno berkomunikasi dengan PCA9685 untuk mengendalikan lima servo secara bersamaan. Relay dan *touch sensor* terhubung untuk mengaktifkan sistem.

Robot lengan juga memerlukan perancangan struktur mekanik berupa *body* untuk menempatkan servo atau aktuator. Rancangan desain *body* mekanik robot lengan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rancangan struktur *body* robot lengan

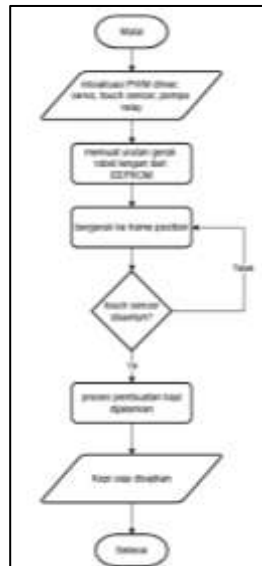
Berdasarkan Gambar 2, struktur *body* robot terdiri dari tiga segmen utama yang bertugas menampung servo MG996R dan MG90S. Struktur *body* ini berbeda dengan dimensi link robot pada Tabel 1 yang digunakan untuk perhitungan *Forward Kinematics*. Sementara itu, prototipe robot lengan dibuat menggunakan material triplek kayu yang dipilih karena terjangkau, mudah dipotong, dan kokoh. Material ini juga ringan sehingga tidak membebani torsi servo. Desain awal prototipe robot lengan beserta hasil implementasi fisik ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain awal robot lengan

Berdasarkan Gambar 3, desain robot sebelah kiri menunjukkan konfigurasi ideal dengan posisi servo dan *gripper*, sedangkan implementasi fisik yang berada di sebelah kanan menunjukkan prototipe yang telah dirakit dengan material triplek. Prototipe ini kemudian digunakan untuk validasi metode FK dan pengujian sistem pembuatan kopi.

Sistem kerja robot lengan dirancang dengan pendekatan *teach mode* dimana operator merekam gerakan sekali dan disimpan di EEPROM untuk eksekusi berulang. Alur kerja sistem dari inisialisasi hingga penyelesaian proses pembuatan kopi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Flowchart alur kerja sistem

Gambar 4 menunjukkan bahwa sistem dimulai dengan inisialisasi komponen kemudian memuat gerakan dari EEPROM dan menunggu *input touch sensor*. Setelah *touch sensor* diaktifkan, robot lengan menggerakkan *end effector* ke posisi target berulang hingga tahapan selesai dan kopi siap disajikan.

Tahapan berikutnya yaitu kalibrasi servo. Servo MG996R dan servo MG90S perlu dikalibrasi terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan FK dikarenakan akan terjadi perbedaan yang tidak masuk akal terkait sudut *joint* jika tidak melakukan kalibrasi. Tahapan kalibrasi dalam penelitian ini menggunakan potensiometer, tiap servo dikalibrasikan nilai PWM-nya dengan membuat patokan sudut posisi awal (*home position*). Sementara itu, *offset* diperlukan untuk konversi ke sudut kinematika. Hasil kalibrasi untuk setiap *joint* ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kalibrasi Servo Tiap *Joint*

<i>Joint</i>	Rentang Aman	Offset ($\theta_i = 0^\circ$)	Posisi Awal
<i>Base</i>	$0^\circ - 155^\circ$ (rotasi terbalik)	75°	75°
<i>Shoulder</i>	$80^\circ - 155^\circ$	118°	155°
<i>Elbow</i>	$2^\circ - 155^\circ$ (rotasi terbalik)	36°	20°
<i>Wrist</i>	$50^\circ - 155^\circ$	5°	5°

Berdasarkan Tabel 3, setiap *joint* memiliki rentang gerak yang berbeda disesuaikan dengan kebutuhan *workspace* pembuatan kopi. Nilai *offset* berfungsi untuk mengkalibrasi posisi awal (*home position*) setiap servo agar sesuai dengan sistem koordinat kinematika yang digunakan dalam perhitungan *Forward Kinematics*. Setelah itu, maka dilakukan konversi ke sudut kinematika dengan rumus (1).

$$\theta_i = \text{nilai PWM} - \text{offset} \quad (1)$$

Arah rotasi servo dapat terbalik (berlawanan arah jarum jam) sehingga memerlukan penyesuaian dalam perhitungan sudut. Konversi sudut untuk servo dengan arah terbalik ditunjukkan pada rumus (2).

$$\theta_i = \text{offset} - \text{nilai PWM} \quad (2)$$

Kinematika maju atau *Forward Kinematics* (FK) yaitu metode matematis yang menentukan posisi ujung lengan (*end effector*) dalam penelitian ini yang berdasarkan parameter Denavit Hartenberg [15]. Untuk Denavit Hartenberg sendiri yaitu parameter untuk membantu FK menghitung titik x, y, dan z (*end effector*) pada robot lengan [17]. Sebelum menghitung posisi *end effector* menggunakan FK, terlebih dahulu dilakukan konversi nilai PWM servo ke rentang sudut kinematika untuk setiap *joint*. Rentang nilai PWM servo dan hasil konversi ke sudut kinematika ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konversi ke Rentang Sudut Kinematika

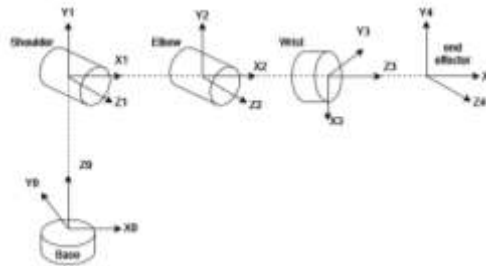
Joint	Rentang Aman Sudut PWM Servo	Konversi Sudut Kinematika
Base	0° – 155°	-80° – 75°
Shoulder	80° – 155°	-38° – 37°
Elbow	2° – 155°	-119° – 34°
Wrist	50° – 155°	0° – 150°

Tabel 5 menunjukkan bahwa setiap *joint* memiliki rentang PWM dan sudut kinematika yang berbeda, sehingga diperlukan konversi untuk memastikan perhitungan FK sesuai dengan posisi fisik robot. Parameter Denavit-Hartenberg (DH) yang terdiri dari θ_i (sudut *joint*), d_i (*offset* link), a_i (panjang link), dan α_i (sudut antara sumbu z) untuk setiap *joint* pada posisi *home* ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 6. Parameter DH Robot Lengan *Home Position*

Joint	θ_i (°)	d_i (cm)	a_i (cm)	α_i (°)
1	0	15	0	+90
2	37	0	9	0
3	16	0	7	0
4	0	0	8	0

Berdasarkan Tabel 5, link pertama memiliki *offset* $d_1 = 15$ cm sebagai tinggi *base* dengan $\alpha_1 = 90^\circ$ karena perubahan orientasi dari vertikal ke horizontal, sedangkan link berikutnya memiliki $\alpha = 0^\circ$ karena berada pada bidang yang sama. Untuk memperjelas orientasi dan hubungan antar *joint*, diagram benda bebas robot lengan dengan sistem koordinat Denavit-Hartenberg (DH) ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram benda bebas robot lengan

Gambar 5 dapat dilihat bahwa sistem koordinat setiap *joint* mengikuti konvensi DH dengan sumbu Z sebagai sumbu rotasi *joint* dan sumbu X menunjuk arah link menuju *joint* berikutnya, sehingga matriks transformasi homogen untuk mendapatkan posisi *end effector* (x, y, z) dari *joint* i-1 ke *joint* i dihitung menggunakan rumus (3) [8].

$$T^i_{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Rumus (3) merepresentasikan transformasi koordinat dari *frame* i-1 ke *frame* i yang terdiri dari rotasi dan translasi berdasarkan parameter DH. Matriks ini diterapkan secara berurutan dari *joint base* sampai *joint wrist* untuk mendapatkan posisi akhir *end effector*. Akhir dari hasil perhitungan matriks tersebut diambil dari kolom akhir, baris pertama untuk nilai titik x, baris kedua untuk nilai y, dan baris ketiga untuk nilai z. Maka ketiga nilai yang didapatkan tersebut disebut *end effector*.

2.2. Validasi dan Pengukuran

Validasi desain dilakukan untuk memastikan rancangan robot lengan sudah memenuhi kebutuhan dan tujuan penelitian melalui pemeriksaan dimensi link, verifikasi rentang gerak *joint*, dan pengujian konektivitas komponen elektronik. Setelah prototipe selesai dirakit, dilakukan pengukuran posisi *end effector* menggunakan penggaris untuk koordinat X, Y, Z dan busur derajat untuk sudut *joint*, kemudian hasil pengukuran fisik dibandingkan dengan hasil perhitungan *Forward Kinematics* untuk mengevaluasi akurasi metode yang diterapkan.

3. HASIL DAN ANALISIS

Prototipe robot lengan yang telah dirancang dan dihitung menggunakan FK kemudian diuji untuk mengevaluasi proses pembuatan kopi secara nyata. Evaluasi yang dilakukan meliputi tingkat keberhasilan tiap percobaan pembuatan kopi, konsistensi gerakan robot lengan, waktu proses dari awal sampai selesai, serta perbandingan dengan metode pembuatan kopi manual.

3.1. Pengujian Sistem

Validasi metode *Forward Kinematics* dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan posisi *end effector* dengan pengukuran fisik menggunakan penggaris dan busur derajat pada empat posisi berbeda dalam *workspace* robot. Error untuk setiap sumbu (X, Y, dan Z) dihitung dengan rumus (4).

$$E_i = |i(FK) - i(fisik)| \quad (4)$$

Dimana $i = X, Y, Z$ adalah sumbu koordinat, $i(FK)$ adalah nilai kalkulasi *Forward Kinematics* pada sumbu i , dan $i(fisik)$ adalah nilai pengukuran fisik pada sumbu i . Total error posisi *end effector* dihitung menggunakan rumus (5).

$$E_{total} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} \quad (5)$$

Total error dari keempat posisi uji kemudian dirata-ratakan untuk mengevaluasi akurasi keseluruhan sistem. Error rata-rata dihitung dengan rumus (6).

$$\bar{E} = \frac{\sum E_{total}}{n} \quad (6)$$

Untuk mengevaluasi konsistensi pengukuran dari keempat posisi uji, standar deviasi error dihitung menggunakan rumus (7).

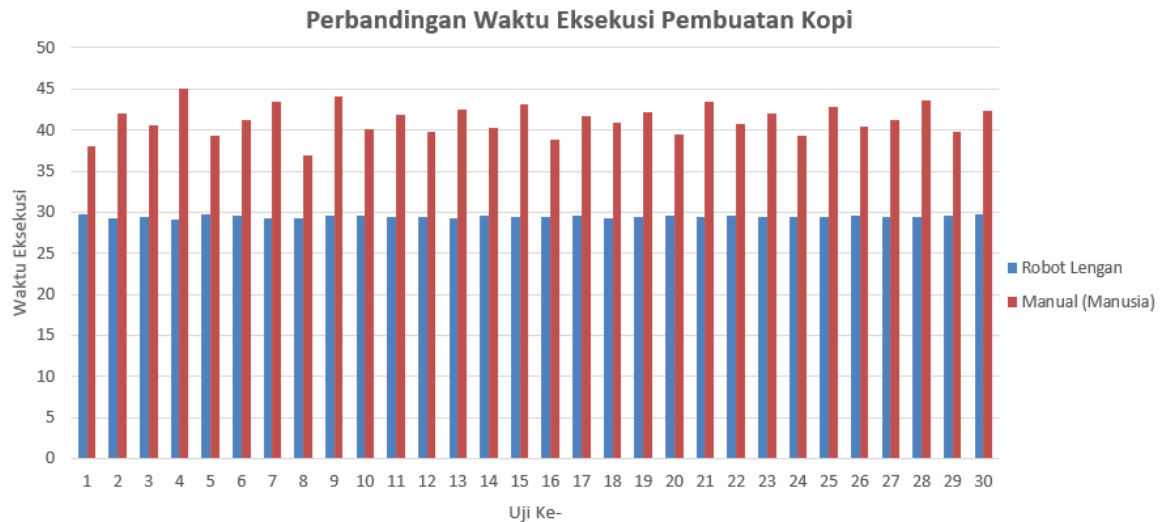
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (E_{total} - \bar{E})^2}{(n-1)}} \quad (7)$$

Dimana E_{total} adalah total error untuk setiap posisi uji, $\bar{E}$ adalah error rata-rata, dan n adalah jumlah posisi uji. Selanjutnya, validasi akurasi *Forward Kinematics* dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan teoritis dengan pengukuran fisik menggunakan penggaris dan busur derajat pada empat posisi berbeda. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Perhitungan FK dengan Hasil Pengukuran Fisik

Posisi	X (cm)		Y (cm)		Z (cm)		Error (cm)		
	FK	Fisik	FK	Fisik	FK	Fisik	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
Home position	16,21	15	0	0	32,40	32,50	1,21	0	0,1
Lengan lurus (maksimal)	19,17	18	0	0	29,44	30	1,17	0	0,56
Rotasi base ke kanan	6,21	6,5	23,18	23,10	15	15	0,29	0,08	0
Rotasi base ke kiri	4,17	1,5	-23,64	-23,50	15	15	2,67	0,14	0

Berdasarkan Tabel 6, error posisi pada setiap sumbu koordinat menunjukkan variasi yang berbeda untuk setiap posisi uji dengan error maksimum pada sumbu X sebesar 2,67 cm, sumbu Y sebesar 0,14 cm, dan sumbu Z sebesar 0,56 cm. Total error untuk setiap posisi dihitung menggunakan rumus (5), kemudian diperoleh error rata-rata sebesar 1,36 cm dengan standar deviasi 0,98 cm. Error minimum sebesar 0,30 cm terjadi pada posisi rotasi *base* ke kanan, sedangkan error maksimum sebesar 2,67 cm terjadi pada posisi rotasi *base* ke kiri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *Forward Kinematics* dengan parameter Denavit-Hartenberg dapat diterapkan dengan akurasi yang memadai untuk aplikasi pembuatan kopi.



Gambar 6. Perbandingan waktu eksekusi pembuatan kopi

Gambar 6 dapat dilihat bahwa robot lengan menunjukkan waktu eksekusi yang lebih cepat dan konsisten dengan rata-rata 29,47 detik, sedangkan metode manual memiliki waktu yang lebih lama dengan rata-rata 41,25 detik dan variasi yang lebih besar. Robot lengan menunjukkan efisiensi waktu 28,5% lebih cepat dibandingkan metode manual dengan standar deviasi 0,15 detik berbanding 1,87 detik pada metode manual, membuktikan konsistensi untuk aplikasi tugas repetitif.

Validasi akurasi posisi dilakukan dengan membandingkan posisi *end effector* hasil perhitungan *Forward Kinematics* dengan hasil pengukuran langsung menggunakan penggaris. Pengukuran dilakukan pada tujuh posisi berbeda dalam proses pembuatan kopi untuk memastikan robot dapat mencapai target dengan akurat. Hasil perbandingan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Validasi Akurasi Posisi

Posisi	FK	Posisi Aktual	Error X	Error Y	Error Z	Total Error
<i>Home position</i>	(16.2, 0, 32.4)	(15.1, 0, 32.3)	1,1	0	0,1	1,10
Ambil sendok	(23.9, 21, 14.8)	(23.8, 20, 15)	0,1	1	0,2	1,02
Ambil bubuk	(22.5, 8.2, 14.8)	(22.5, 6.5, 15)	0	1,7	0,2	1,71
Bubuk part 2	(10, 21.4, 19)	(10, 21.3, 19)	0	0,1	0	0,10
Aduk part 1	(16.7, -16.7, 12.2)	(15, -16.7, 13)	1,7	0	0,8	1,88
Ambil pengaduk	(9.8, -21, 20.5)	(8, -21, 20.5)	1,8	0	0	1,80
Aduk back	(9.7, -20.8, 17.3)	(7.8, -20.8, 17.5)	1,9	0	0,2	1,91

Berdasarkan Tabel 7, total error untuk setiap posisi dihitung menggunakan rumus (5). Dari tujuh posisi uji diperoleh error rata-rata sebesar 1,36 cm dengan error minimum 0,10 cm pada posisi Bubuk part 2 dan error maksimum 1,91 cm pada posisi Aduk back. Error per sumbu menunjukkan bahwa sumbu X memiliki error terbesar hingga 1,9 cm, sumbu Y hingga 1,7 cm, dan sumbu Z hingga 0,8 cm. Hasil validasi menunjukkan bahwa akurasi posisi robot lengan memadai untuk aplikasi pembuatan kopi dengan sebagian besar error berada di bawah 2 cm.

Pengujian fungsionalitas robot lengan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan proses pembuatan kopi secara otomatis. Pengujian menggunakan metode *teach mode* dimana *sequence* gerakan yang telah direkam disimpan di EEPROM untuk eksekusi berulang. Proses pembuatan kopi meliputi beberapa tahapan yaitu posisi awal (*home*), mengambil gelas kosong, menuang bubuk kopi, mengambil sendok pengaduk, mengaduk kopi, dan mengaktifkan pompa air. Dokumentasi proses pengujian ditunjukkan pada Gambar 7, 8, dan 9.



Gambar 7. Tampak atas uji coba dan posisi awal robot lengan

Gambar 7 menunjukkan posisi awal (*home position*) robot lengan sebelum memulai *sequence* pembuatan kopi. Pada posisi ini, semua *joint* berada pada sudut kalibrasi awal dan *gripper* dalam keadaan terbuka siap untuk memulai proses pengambilan sendok.



Gambar 8. Posisi mengambil sendok dan bubuk kopi

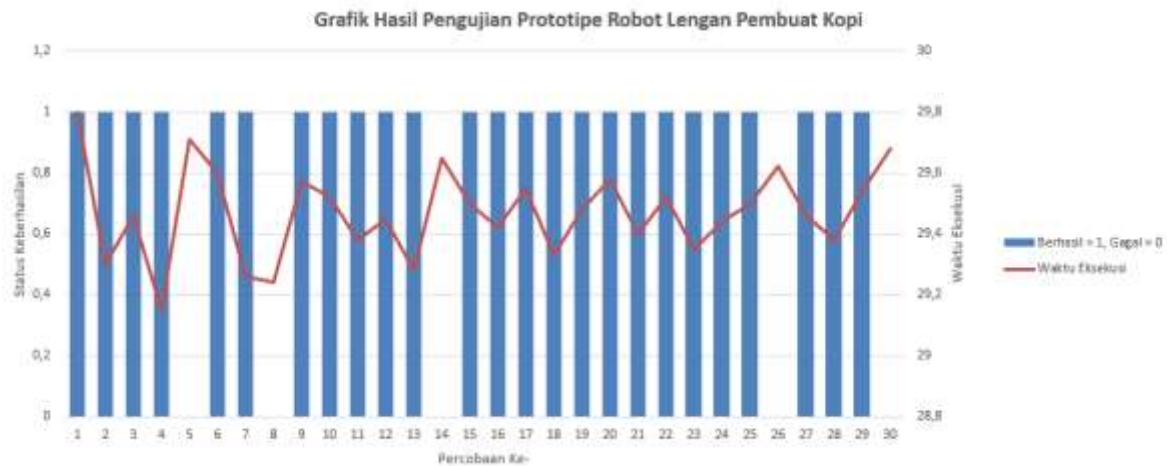
Gambar 8 menunjukkan robot lengan dalam posisi mengambil sendok (kiri) dan mengambil bubuk kopi (kanan) yang setelahnya ditaruh ke dalam gelas. *Gripper* berhasil mencekam sendok dan menuangkan bubuk kopi ke dalam gelas.



Gambar 9. Posisi mengambil pengaduk dan mengaduk kopi

Gambar 9 menunjukkan tahap akhir proses pembuatan kopi dimana robot lengan mengambil sendok pengaduk (kiri) dan melakukan gerakan mengaduk kopi di dalam gelas (kanan). Gerakan mengaduk dilakukan dengan kombinasi rotasi *wrist* dan rotasi *base* yang telah direkam menggunakan *teach mode* untuk memastikan pencampuran bubuk kopi yang merata. Proses pengadukan dijalankan bersamaan dengan mengaktifkan pompa air melalui relay yang akan menuangkan air panas ke dalam gelas dan proses pembuatan kopi selesai.

Pengujian dilakukan sebanyak 30 kali percobaan untuk mengevaluasi tingkat keberhasilan dan konsistensi sistem. Pengujian dibagi menjadi dua kategori yaitu *dry test* (percobaan 1-15) yang dilakukan tanpa memasukkan air ke cangkir kopi untuk menguji *sequence* gerakan robot, dan *wet test* (percobaan 16-30) yang dilakukan dengan memasukkan air ke cangkir untuk menguji fungsionalitas penuh sistem pembuatan kopi. Hasil pengujian pembuatan kopi ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil pengujian prototipe robot lengan pembuat kopi

Berdasarkan Gambar 10 menunjukkan grafik dari 30 kali percobaan terdapat 25 kali percobaan yang berhasil dan 5 kali percobaan yang gagal. Kegagalan terjadi terutama pada proses pengambilan sendok dan pengaduk dan pengembalian pengaduk dimana *gripper* tidak dapat mencekam objek dengan stabil. Tingkat keberhasilan sistem dihitung menggunakan rumus (8).

$$\text{Tingkat keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah berhasil}}{\text{Total percobaan}} \times 100\% \quad (8)$$

Rumus (8) diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 83% (25 berhasil dari 30 percobaan) dengan waktu rata-rata pembuatan kopi 29,47 detik. Meskipun tingkat keberhasilan belum mencapai 100%, sistem menunjukkan konsistensi waktu yang baik pada percobaan yang berhasil. Kegagalan yang terjadi dapat diperbaiki dengan meningkatkan kekuatan cekaman *gripper* dan menambahkan sensor untuk deteksi objek.

Pengujian dilakukan sebanyak 30 kali percobaan yang dibagi menjadi *dry test* (percobaan 1-15) dan *wet test* (percobaan 16-30), dengan total 5 kegagalan dari 30 percobaan. Kegagalan tersebut terjadi pada tahap pengambilan objek yang disebabkan oleh beberapa faktor. Pertama, wadah pengaduk dan wadah sendok tidak tepat berada di titik yang sudah ditetapkan dikarenakan wadah sedikit bergeser dan di area sempit. Kemudian dijumpai masalah ketidakstabilan servo *wrist*, dimana servo pada *joint wrist* menunjukkan kinerja yang tidak konsisten. Pada beberapa percobaan, servo gagal mencapai sudut target atau bergerak lebih lambat dari yang diharapkan, sehingga menyebabkan orientasi sendok atau pengaduk tidak tepat saat mengambil atau meletakkan objek. Serta masalah terakhir yakni *gripper* yang kurang optimal, dimana *gripper* tidak memegang erat bahan yang sedang diambilnya, hal ini mirip seperti yang terjadi pada *wrist*. Kombinasi ketiga masalah ini secara bersama-sama menyebabkan tingkat kegagalan yang tinggi pada pengujian awal. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem memiliki potensi untuk beroperasi dengan baik, namun konsistensi masih belum sempurna akibat kombinasi keterbatasan akurasi *hardware* (servo standar, material kayu yang *flexing*) dan ukuran objek yang terlalu kecil relatif terhadap error sistem. Sebelumnya dilakukan berkali-kali perbaikan untuk bisa mencapai hasil percobaan di atas. Perbaikan yang dilakukan yaitu penggantian servo *shoulder* yang sebelumnya menggunakan MG90S menjadi MG996R, penguatan *wiring* pada bagian *wrist* agar tidak mudah putus atau kontak, serta penataan kabel agar tidak mengganggu gerakan robot.

Hasil pengujian operasional membuktikan bahwa error rata-rata 1,36 cm memiliki dampak yang berbeda tergantung pada dimensi objek yang dimanipulasi. Pengujian awal dengan wadah bubuk berdiameter 5 cm menunjukkan kegagalan tinggi pada tahap pengambilan bubuk karena sendok sering meleset dari wadah. Wadah kemudian diperbesar menjadi 11 cm dan tingkat kegagalan pada tahap ini berkurang signifikan, membuktikan bahwa untuk sistem dengan error $\pm 1,36$ cm, dimensi minimum objek target yang dapat ditangani dengan andal adalah sekitar 10-11 cm atau sekitar delapan hingga sembilan kali lipat dari error maksimal. Temuan ini merupakan data yang berharga untuk pengembangan robot lengan berbiaya rendah, memberikan panduan praktis tentang batas kemampuan sistem dengan tingkat akurasi tertentu.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mengimplementasikan metode *Forward Kinematics* berbasis parameter Denavit-Hartenberg pada robot lengan 4-DOF untuk aplikasi pembuatan kopi otomatis menggunakan Arduino Uno dengan pendekatan *open-loop control* dan metode *teach mode*. Validasi akurasi menunjukkan error rata-rata posisi *end effector* sebesar 1,36 cm dengan error maksimum 1,91 cm dan minimum 0,10 cm, dimana error

terbesar terjadi pada sumbu X yaitu 1,9 cm yang mengindikasikan masalah *backlash* pada servo. Pengujian pembuatan kopi menghasilkan tingkat keberhasilan 83% dari 30 percobaan dengan waktu rata-rata 29,47 detik, lebih cepat 28,5% dibandingkan metode manual 41,25 detik dengan konsistensi yang jauh lebih baik. Hasil penelitian membuktikan bahwa untuk sistem dengan error $\pm 1,36$ cm, dimensi minimum objek yang dapat ditangani dengan andal adalah sekitar 10-11 cm, dimana wadah berdiameter 5 cm menghasilkan kegagalan tinggi namun setelah diperbesar menjadi 11 cm dapat ditangani dengan baik. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa data *baseline* untuk pengembangan robot lengan berbiaya rendah dengan pendekatan *open-loop control* yang dapat mencapai tingkat keberhasilan memadai untuk aplikasi tugas repetitif. Pengembangan lanjutan yang disarankan meliputi implementasi *Inverse Kinematics* untuk fleksibilitas sistem, penambahan sensor pada *gripper* untuk keandalan pengecekaman, penggunaan material lebih rigid untuk mengurangi *flexing*, serta peningkatan kualitas servo untuk mengurangi error pada sumbu X.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Widiastutie, C. S. D. Kusuma, A. Pradhanawati, and M. A. Sardjono, "Diplomasi Kopi Indonesia di Kancan Dunia," *Indonesian Perspective*, vol. 7, no. 2, pp. 180–204, 2022.
- [2] K. B. Andri, "Peluang dan Daya Saing Kopi Indonesia," Badan Standardisasi Instrumen Pertanian.
- [3] A. G. A. Poetro and T. I. Noor, "Analisis Preferensi Konsumen Kedai Kopi Di Kota Cirebon Analysis of Coffee Shop Consumer Preferences in Cirebon City," *Mimbar Agribisnis*, vol. 9, no. 2, pp. 2360–2369, 2023.
- [4] D. A. S. Putri, N. Salsabilla, N. Hanifah, and R. R. W. K. Widodasih, "Analisis Studi Kelayakan Bisnis pada UMKM Kedai Kopi 'Enigma Kopi' Setu Ditinjau dari Aspek Pemasaran, Aspek Manajemen Sumber Daya Manusia, dan Aspek Operasional," *Dinamika Kreatif Manajemen Strategis*, vol. 06, no. 4, pp. 61–73, 2024.
- [5] W. Dharmawan, "Pemasaran Kopi Secara Digital Dan Strategi Bisnis Dalam Pandemi Covid-19," *Jurnal Ekonomi dan Bisnis (EK&BI)*, vol. 5, no. 1, pp. 36–45, 2022, doi: 10.37600/ekbi.v5i1.437.
- [6] Abd. R. Yusuf and S. Rais, "Peranan Barista Dalam Menyajikan Minuman Kopi Berkualitas Di Cafe Excelso Vitka Point Tiban Kota Batam," *Jurnal Menata*, vol. 2, no. 1, pp. 44–49, 2023, doi: 10.59193/jmt.v2i1.182.
- [7] F. T. Putri, R. T. Indrawati, E. Safriana, W. I. Nugroho, T. A. Setiawan, and R. A. Rochmatika, "Mathematical and 3D Mechanical System Simulation of Arm Robot Modelled as Double Pendulum," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 3, pp. 495–504, 2023, doi: 10.32497/jrm.v18i3.5110.
- [8] A. Widyacandra, A. R. Al Tahtawi, and M. Martin, "Forward and inverse kinematics modeling of 3-DoF AX-12A robotic manipulator," *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 2, no. 2, pp. 139–150, 2022, doi: 10.35313/jitel.v2.i2.2022.139-150.
- [9] I. G. Widodo, H. Hartono, B. Tjahjono, E. Safriana, and T. Z. Amrullah, "Desain dan Analisis Model Lengan Robot untuk Memindahkan Material," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 18, no. 2, p. 313, 2023, doi: 10.32497/jrm.v18i2.4707.
- [10] F. M. T. Huda, Y. A. R. Pratama, F. R. Saputra, R. Hadiazzaka, and A. S. Priambodo, "Penerapan Kinematika Terbalik Pada Robot Lengan Lima Sendi (5 DOF) dengan Citra Digital," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 13, no. 1, pp. 231–242, 2025.
- [11] A.-N. Sharkawy, "Forward and Inverse Kinematics Solution of a Robotic Manipulator Using a Multilayer Feedforward Neural Network," *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, pp. 1–17, 2022, doi: 10.30464/jmee.00300.
- [12] S. Michalkova, K. Wojnarowsky, S. Kolenyak, M. Kantor, and J. Arm, "Automating the Handling Process of a Coffee Machine Using a Robotic Manipulator," in *2024 15th International Symposium on Industrial Electronics and Applications, INDEL 2024 - Proceedings*, 2024. doi: 10.1109/INDEL62640.2024.10772691.
- [13] L. Larasathi, O. K. Pritasari, A. Puspitorini, and B. Y. Wilujeng, "Pengembangan Media Pembelajaran Video Animasi pada Kompetensi Dasar Anatomi Fisiologi Rambut di SMK LABSCHOOL UNESA 1 Surabaya," *Ejurnal Unesa*, vol. 12, no. 2, pp. 241–248, 2023.
- [14] B. Kusumo, "Rancang Bangun Robot Penghempas Asap Menggunakan Arduino Uno R3," *Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran*, vol. 6 N0.4, no., pp. 3035–3045, 2023.
- [15] D. Herath and D. St-Onge, *Foundations of Robotics A Multidisciplinary Approach with Python and ROS*. 2022.
- [16] P. Paryanto, C. D. Saputra, and R. Rusnaldy, "Analisis Keterlambatan Gerak Lengan Robot Manipulator Berbasis Internet of Things," *Rotasi*, vol. 26, no. 1, pp. 78–90, 2024.
- [17] N. Correll, B. Hayes, C. Heckman, and A. Roncon, *Introduction to Autonomus Robots*. The MIT Press, 2021.

