

Pendekatan Geometri untuk Perhitungan *Inverse Kinematics* Gerakan Lengan Robot 4 Derajat Kebebasan

Ilham Defra Nugraha^{1,a)} dan Putu Mahayana Santika^{2,b)}

^{1,2)}Program Studi Teknik Mesin ITI,
Jl. Raya Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan-Banten, Indonesia, 15320

^{a)} ilhamdefran@gmail.com (corresponding author), ^{b)} putumsantika190851@gmail.com

Abstrak

Dalam penelitian ini telah berhasil dikembangkan sebuah robot lengan empat derajat kebebasan yang mampu bergerak dalam ruang tiga dimensi. Gerakan robot dalam lingkungan dimodelkan dengan cara menetapkan posisi ujung bagian robot dalam sistem koordinat kartesius yang terdiri dari sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z. Robot bergerak dengan memutar sendi-sendi nya, maka besarnya sudut putaran sendi tersebut harus dihitung agar ujung robot dapat bergerak mencapai koordinat posisi yang diinginkan. *Inverse Kinematics* adalah proses matematis yang dapat menghitung besarnya sudut sendi robot dari diketahui koordinat posisi ujung robot. Dalam penelitian ini rumus *Inverse Kinematics* untuk menghitung sudut sendi menggunakan pendekatan geometri. Rumus *Inverse Kinematic* digunakan untuk menyusun program kontroler agar kontroler dapat mengkalkulasi sudut putar sendi dari diinput data koordinat posisi tujuan gerak yang diinginkan, kemudian kontroler mengirim sinyal memutar motor listrik yang memutar sendi tersebut, dimana besar sudut putarnya sesuai hasil kalkulasi. Prototipe robot yang dibuat memiliki empat sendi putar, di ujung bagian robot terdapat modul *gripper* yang dapat mencengkram benda, dan bentangan maksimumnya adalah 31,85cm. Hasil pengujian gerak menunjukkan rata-rata kesalahan koordinatnya adalah 9,415mm.

Kata kunci: Robot, Sendi, Gerak, Putar, Sudut, Koordinat, Posisi, Kinematika.

Abstract

In this research has developed a 4 degree of freedom robot arm prototype capable moving in three-dimensional space. Robot movement in environment is modeled by position of the end effector in a Cartesian coordinate system consisting of the x-axis, y-axis, and z-axis. Robot move by rotating its joint, then joint angle rotation value must be calculated in order to make its end effector move and reach desired coordinate position. Inverse Kinematics is a mathematical process that can calculate the value of robot joint angle from desired coordinates of the robot end effector position. In this paper Inverse Kinematics formula for calculating joint angles uses geometric approach. The Inverse Kinematic formula is used to compile the controller program so it can calculate the joint rotation angle from inputted data of end effector desired position, then the controller sends a signal to rotate the electric motor that drive the joint which rotation angle value based on calculated joint angle. The robot prototype has four rotary joints, at the end of the robot part there is a gripper module, and its maximum span is 31.85cm. The results of the motion test shown that the average coordinate error is 9,415mm.

Keywords: Robot, Joint, Motion, Rotation, Angle, Coordinate, Position, Kinematics.

I. PENDAHULUAN

Robot adalah suatu perangkat mekanik yang dapat melakukan pekerjaan fisik, baik dikendalikan ataupun berjalan secara otomatis dengan serangkaian program kecerdasan buatan. Robot dibuat dengan tujuan membantu pekerjaan manusia [1]. Jenis robot yang umumnya digunakan untuk pekerjaan adalah jenis manipulator lengan yang sering dijumpai pada sektor industri [2].

Robot adalah sistem mekanis yang tersusun dari rantai kinematik, dalam rantai kinematik tersebut bagian yang bebas bergerak disebut sendi atau *joint*, dan anggota bagian kaku (*rigid body*) disebut *link* [3]. Dalam rantai kinematik robot bagian ujung atau *link* terakhir dari robot biasa disebut dengan *end effector*. Dalam pengertian yang lebih luas, *end-effector* dapat didefinisikan sebagai

bagian dari robot yang berinteraksi dengan lingkungan kerja, di sinilah alat kerja (*tools*) dipasang. Contoh dari alat kerja (*tools*) pada robot adalah capit untuk mencengkram dan memindahkan benda, las, *spindle*, bahkan alat bedah pada robot medis, dan lain sebagainya.

Gerakan robot umumnya didefinisikan dengan menetapkan posisi tujuan gerak atau lintasan gerak dari *end effector* robot di lingkungan dengan sistem koordinat kartesius (sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z). Robot bergerak dengan cara memutar sendi-sendinya, yang dimana sendinya diputar oleh aktuator yang biasanya berjenis motor listrik, putaran motor listrik tersebut dikontrol oleh kontroler elektronik. Agar gerakan robot terkoordinasi perlu susunan program yang tepat untuk mengontrol putaran motor penggerak sendi robot tersebut. Maka, program untuk mengontrol dan

menggerakkan robot dapat disusun jika besarnya sudut putaran sendi tersebut bisa dihitung. *Inverse Kinematics* adalah proses matematis yang dapat memberikan solusi perhitungan besarnya sudut putar sendi robot yang diperlukan dalam rangka *end effector* robot dapat bergerak mencapai posisi yang diinginkan.

Kebebasan gerak robot dalam lingkungan diukur dari jumlah derajat kebebasan *end effector*-nya. Derajat kebebasan sering disingkat DOF (*degree of freedom*). Desain robot yang paling sempurna adalah mencakup kebebasan gerak pada segala sumbu. Terdapat enam derajat kebebasan pada sebuah benda, gerak translasi pada sumbu x , y , dan z , serta gerak rotasi pada sumbu x , y , dan z [4]. Robot yang *end effector*-nya mampu bergerak mencakup ruang atau bidang tiga dimensi minimal harus memiliki 3 DOF, lebih tepatnya memiliki kebebasan gerak translasi pada sumbu x , y , dan z . Pada penelitian ini robot yang dibuat memiliki 4 DOF, artinya *end effector* robot mampu bebas bergerak translasi pada ketiga arah sumbu serta kebebasan gerak rotasi pada satu sumbu.

Terdapat dua jenis solusi kinematik, *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. *Forward kinematics* adalah perhitungan posisi ujung rantai kinematik dari diketahui ukuran *link*, jumlah sendi, dan besarnya sudut sendi. Sementara *inverse kinematics* adalah perhitungan mencari besarnya setiap sudut sendi dari diketahui ukuran *link*, jumlah sendi, dan posisi ujung rantai kinematik [1].

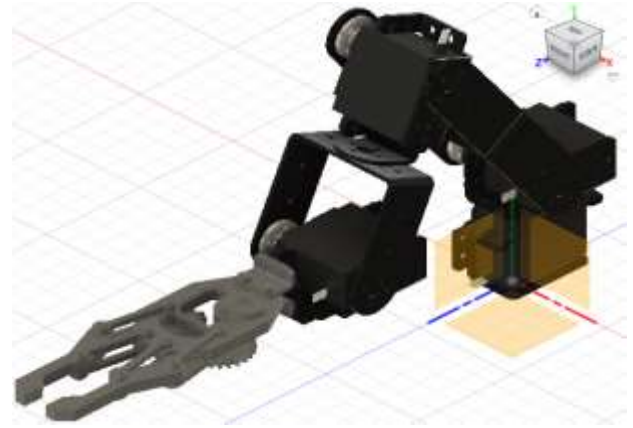
Untuk membuat gerakan robot yang terkoordinasi maka metode *Inverse Kinematics* lebih tepat daripada *Forward Kinematics*, karena koordinat posisi gerak adalah variabel tetapnya, variabel bebasnya adalah sudut putar sendi. Kemudian solusi menghitung variabel bebas tersebut (sudut putar sendi) menggunakan prinsip geometri.

II. LANDASAN TEORI

A. Inverse Kinematics Putaran Sudut Sendi Lengan Robot

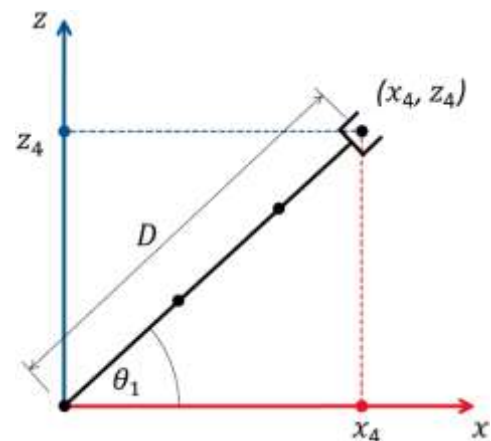
Inverse kinematics adalah sebuah metode untuk menghitung besarnya sudut-sudut pada *joint* manipulator lengan dalam rangka mencapai posisi yang diinginkan [5]. Karenanya terdapat beberapa cara untuk menyelesaikan permasalahan *inverse kinematics*. Terdapat tiga metode paling terkenal untuk memecahkan masalah kinematika ini, yang pertama metode numerik, kemudian metode aljabar, dan metode geometrik. Metode geometrik biasa digunakan untuk robot dengan jumlah derajat kebebasan yang sedikit. Metode ini didasarkan pada pencarian jumlah hubungan geometris yang mencukupi dari koordinat posisi *end-effector* robot [6].

Pada penelitian ini persamaan atau rumus *Inverse Kinematics* menggunakan pendekatan geometri untuk menghitung sudut setiap sumbu gerak atau sendi lengan robot agar *end effector* dapat mencapai posisi yang dituju. Untuk memudahkan proses analisa dan perhitungan masalah dalam sudut pandang tiga dimensi (3D) dipecah menjadi sudut pandang dua dimensi (2D) [7]. Ilustrasi untuk memperjelas proses analisa dari sudut pandang 3D ditunjukkan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Sudut Pandang 3D Robot pada Bidang Koordinat x (Garis Merah), y (Garis Hijau), dan z (Garis Biru).

Pemecahan solusi *inverse kinematics* pertama yaitu skema lengan robot seolah dilihat dari atas, atau dari arah sumbu- y , yaitu menampilkan bidang (x, z) . Koordinat target *end-effector* pada sumbu- x disebut x_4 , dan koordinat pada sumbu- z disebut z_4 , maka besarnya sudut yang harus diputar oleh motor serta panjang bentangan lengan agar *end-effector* dapat mencapai koordinat posisi yang ditargetkan disimbolkan oleh (θ_1) untuk sudut putar dan (D) untuk panjang bentangan lengan. Untuk memperjelas pembahasan ditunjukkan oleh Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Sudut Pandang 2D Tampak Atas, atau Bidang Koordinat (x, z) .

Untuk menghitung panjang bentangan lengan robot (D) dan besarnya sudut (θ_1) yang harus diputar motor servo untuk mencapai koordinat posisi tujuan gerak *end effector* menggunakan rumus berikut:

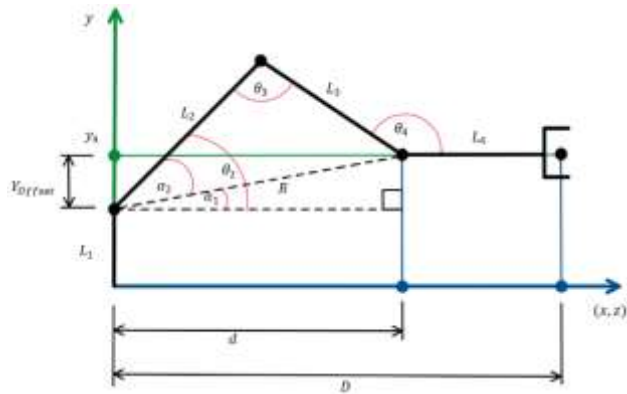
$$D = \sqrt{(x_4)^2 + (z_4)^2} \quad (1)$$

$$\frac{z_4}{x_4} = \tan(\theta_1) \quad (2)$$

Dengan menggunakan fungsi inverse, maka (θ_1) dapat ditemukan dengan persamaan berikut:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left(\frac{z_4}{x_4} \right) \quad (3)$$

Kemudian pemecahan solusi *inverse kinematics* berikutnya yaitu menghitung sudut putar ketiga sendi yang tersisa (θ_2 , θ_3 , dan θ_4) dengan cara seolah skema robot dilihat dari tampak samping seperti ditunjukkan oleh Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Sudut Pandang 2D Tampak Samping.

Skema lengan robot dari sudut pandang samping, yang menampilkan sumbu-y dan sumbu horizontalnya adalah bidang permukaan, atau bidang (x, z) . Koordinat target *end-effector* secara vertikal yaitu koordinat pada sumbu-y disebut y_4 dan koordinat target pada sumbu horizontalnya (bidang koordinat (x, z)) adalah besarnya panjang bentangan (D), maka perhitungan *Inverse Kinematics* dengan geometri untuk menemukan besarnya sudut sendi θ_2 , θ_3 , dan θ_4 yang harus diputar oleh motor dapat diselesaikan dengan rumus-rumus berikut:

$$d = D - L_4 \quad (4)$$

Dari Gambar 3 yang ditunjukkan sebelumnya membentuk bidang segi tiga siku-siku dengan sisi (d , Y_{offset} , dan R), dimana, Y_{offset} adalah selisih jarak antara koordinat sumbu-y *end-effector* (y_4) dengan posisi sumbu gerak ke dua (L_1).

$$Y_{offset} = y_4 - L_1 \quad (5)$$

Dengan menggunakan aturan pythagoras dan aturan cosinus R dan α_1 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$R = \sqrt{(d)^2 + (Y_{offset})^2} \quad (6)$$

$$\frac{d}{R} = \cos(\alpha_1) \quad (7)$$

Dengan menggunakan fungsi inverse untuk mencari α_1 maka persamaannya menjadi seperti berikut:

$$\alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{d}{R}\right) \quad (8)$$

Dari Gambar 3 yang ditunjukkan sebelumnya membentuk bidang segi tiga dengan sisi (L_2 , L_3 , dan R), dengan menggunakan aturan cosinus α_2 dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$(L_3)^2 = (L_2)^2 + (R)^2 - 2 \times L_2 \times R \times \cos(\alpha_2) \quad (9)$$

Dengan menggunakan fungsi inverse untuk menghitung α_2 maka persamaannya menjadi seperti berikut:

$$\alpha_2 = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + R^2 - L_3^2}{2 \times L_2 \times R}\right) \quad (10)$$

Kemudian untuk menyelesaikan θ_2 adalah penjumlahan α_1 dan α_2 , yaitu sebagai berikut.

$$\theta_2 = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (11)$$

Untuk menghitung θ_3 juga dapat menggunakan aturan cosinus berdasarkan bidang segitiga yang terbentuk pada gambar 3 sebelumnya dengan sisi (L_2 , L_3 , dan R), yaitu persamaannya sebagai berikut:

$$R^2 = (L_2)^2 + (L_3)^2 - 2 \times L_2 \times L_3 \times \cos(\theta_3) \quad (12)$$

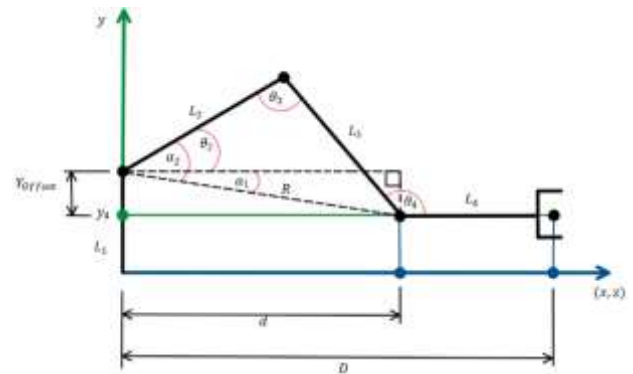
Dengan menggunakan fungsi inverse untuk menghitung θ_3 maka persamaannya menjadi seperti berikut:

$$\theta_3 = \cos^{-1}\left(\frac{L_2^2 + L_3^2 - R^2}{2 \times L_2 \times L_3}\right) \quad (13)$$

Sendi terakhir, yaitu θ_4 dapat dihitung berdasarkan besarnya sudut yang harus dibentuk oleh putaran motor servo antara L_3 terhadap L_4 . Perlu diperhatikan orientasi *gripper* sejajar dengan permukaan (bidang koordinat (x, z)) agar cengkaman objek optimal. Dengan menggunakan aturan bahwa jumlah sudut bidang segitiga tidak melebihi 180° maka persamaan untuk menghitung θ_4 sebagai berikut:

$$\theta_4 = 180^\circ - \{[180^\circ - (\alpha_2 + \theta_3)] - \alpha_1\} \quad (14)$$

Untuk beberapa kasus jika ketinggian *end-effector* (posisi y_4) lebih rendah dari posisi sendi 2, perhitungan θ_2 dan θ_4 memerlukan persamaan atau metode perhitungan yang berbeda. Untuk posisi y_4 lebih rendah dari posisi sendi 2 skema robot ditunjukkan oleh Gambar 4 berikut.



Gambar 4. Sudut Pandang 2D Tampak Samping Saat Posisi Sumbu-y End-Effector di Bawah Posisi Sendi 2.

Gambar 4 menunjukkan skenario gerak saat posisi sumbu-y *end-effector* di bawah posisi sendi 2 maka ada selisih jarak pada sumbu-y antara *end-effector* dengan posisi sendi 2. Selisih jarak ini disimbolkan dengan Y_{offset} . Sehingga perhitungan untuk θ_2 adalah sebagai berikut:

$$\theta_2 = \alpha_2 - \alpha_1 \quad (15)$$

Untuk menghitung α_1 masih menggunakan prinsip aturan pythagoras dan aturan cosinus pada segitiga siku-siku yang sama seperti pada persamaan (8) sebelumnya. Perhitungan α_2 menggunakan prinsip cosinus yang sama seperti pada persamaan (10) sebelumnya. Kemudian untuk menghitung θ_4 adalah sebagai berikut:

$$\theta_4 = 180^\circ - \{[180^\circ - (\alpha_2 + \theta_3)] + \alpha_1\} \quad (16)$$

Perlu diperhatikan titik nol (*zero reference*) koordinat lingkungan ditetapkan berdasarkan posisi sendi 1 dari robot. Karena arah poros putar sendi 1 pada sumbu y, maka sendi 1 itulah acuan atau referensi titik nol sumbu x

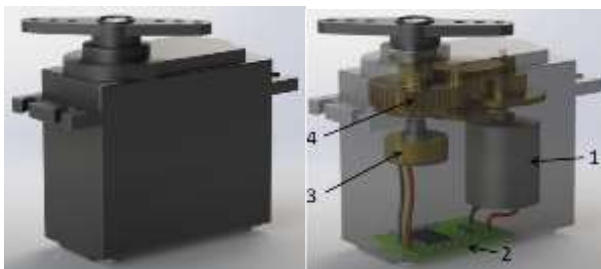
dan z lingkungan. Titik nol dari sumbu y adalah permukaan kerja yang ditetapkan terhitung hingga pusat poros putar sendi 2, dimana sendi 2 arah putar porosnya tegak lurus terhadap sendi 1.

Rumus *Inverse Kinematics* dengan pendekatan geometri yang disusun tersebut kebebasan gerak rotasi dari *end effector* memungkinkan untuk orientasi cengkraman *gripper* tetap sejajar dengan permukaan tanah jika dibandingkan dengan robot 3 DOF, hanya mampu bergerak translasi mencakup ruang 3 dimensi, namun tidak memiliki kebebasan menetapkan orientasi dari *end effector*-nya.

B. Motor Servo

Servo adalah mekanisme kontrol aktuator baik linear maupun rotasi yang memungkinkan dikontrol secara akurat dan presisi dari posisi sudut atau linier. Pada penelitian ini pembahasan spesifik pada aktuator jenis rotasi, yaitu motor servo. Motor servo pada hakikatnya adalah motor listrik yang biasa kita kenal namun memiliki mekanisme loop tertutup yang menggabungkan umpan balik (*feedback*) posisi untuk mengontrol kecepatan dan posisi angular rotasi. Motor dikendalikan dengan sinyal listrik, baik analog maupun digital, yang menentukan jumlah gerakan yang mewakili posisi perintah akhir poros [8].

Motor servo yang digunakan pada penelitian ini berjumlah 5, 4 untuk sendi dan 1 untuk mekanisme capit pada *gripper*. Motor servo yang digunakan adalah TowerPro MG996R sebanyak 3 buah dan JX PDI-6221-MG-180 sebanyak 2 buah. Motor servo yang digunakan memiliki bentuk serta gambaran bagian dalam seperti ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Motor Servo Beserta Bagiannya. (1) Motor DC, (2) Sirkuit Kontrol, (3) *Potentiometer*, (4) *gearbox*.

Potentiometer pada motor servo sebagai pemberi *feedback* yang membaca data sudut putaran poros pada dunia nyata (kondisi aktual), sirkuit kontrol membandingkan data antara aktual dengan input yang kemudian akan mengoreksi *error*-nya (selisih nilai aktual dengan nilai input) agar kondisi aktual mendekati nilai input, sehingga motor listrik dengan sistem servo mampu memberikan hasil sudut putaran yang akurat dan presisi sesuai input [8]. Maka dari itu, motor servo cocok digunakan sebagai penggerak sendi robot.

C. Kontroler Arduino UNO

Arduino UNO adalah papan mikrokontroler *open source* berbasis *microchip* ATmega328P dan

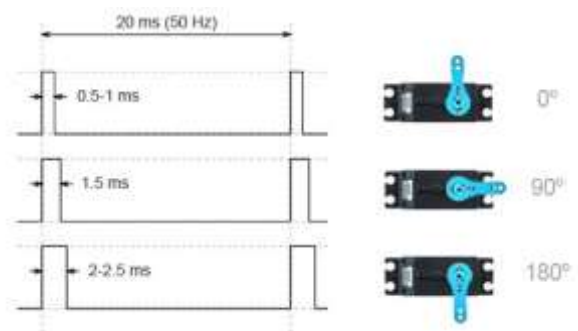
dikembangkan oleh Arduino [9]. Bentuk dari kontroler Arduino jenis UNO ditunjukkan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Papan Sirkuit Kontroler Arduino UNO.

Pada penelitian ini kontroler Arduino digunakan untuk mengatur putaran motor penggerak (motor servo) dengan cara mengirimkan sinyal listrik dalam bentuk digital. Sinyal tersebut mengandung data atau informasi besarnya sudut putaran motor servo.

Motor servo berputar dengan cara merespon lebar sinyal digital dari kontroler, lebarnya sinyal tersebut merepresentasikan besarnya putaran sudut servo, metode ini disebut *Pulse-width Modulation* atau sering disingkat PWM [8]. Untuk mempermudah pembahasan cara kerja sinyal yang merepresentasikan besarnya sudut putar motor servo ditunjukkan pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Lebar Sinyal Digital yang Direspon Motor Servo Merepresentasikan Besar Sudut Putar Porosnya.

Namun besarnya sudut putar yang kontroler kirimkan sinyalnya ke motor servo harus dihitung terlebih dahulu. Maka dari itu pentingnya perhitungan *Inverse Kinematics* untuk menghitung besarnya sudut putar setiap motor servo. Jika rumus atau persamaan *Inverse Kinematics* tidak dipelajari maka program untuk menggerakkan robot pun tidak bisa dibuat, karena kita tidak tahu berapa besarnya sudut setiap joint harus berputar agar dapat bergerak mencapai posisi yang diinginkan.

III. METODE PENELITIAN/EKSPERIMEN

Pada penelitian ini merakit sebuah lengan robot dengan 4 sendi yang masing-masing digerakkan oleh motor servo dan dikontrol oleh papan kontroler elektronik Arduino jenis UNO. Prototipe robot tersebut sebagai media eksperimen penerapan *Inverse Kinematics* dan pengujian keakuratan gerakannya. Bagian tubuh *link*-nya adalah *bracket* aluminum yang disusun dengan cara sambungan baut. *Bracket* aluminum ini bisa dirakit menjadi model robot sesuai konfigurasi dan ukuran yang diinginkan. Gambaran bentuk komponen *bracket* aluminum sebagai rangka robot ditunjukkan pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Komponen Rangka Robot yang Membentuk *Link* dan *Joint*.

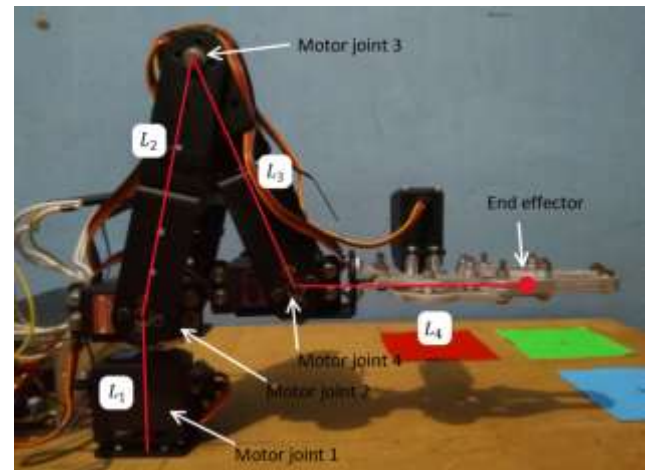
Tiga komponen rangka pada Gambar 8 di atas (dari kiri ke kanan) adalah *L-Bracket* sebanyak dua buah, *Servo Mount* sebanyak 4 buah, dan *U-Bracket* sebanyak tiga buah yang kemudian dirakit membentuk lengan robot.

Bentuk kontroler elektronik yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 6 sebelumnya dan motor penggerak sendi robot ditunjukkan pada Gambar 9 berikut.



Gambar 9. Motor Servo TowerPro MG996R Beserta Aksesorisnya.

Lengan robot secara keseluruhan dirakit seperti ditunjukkan pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Lengan Robot yang Sudah Dirakit. Bagian *Link* Ditandai dengan L1, L2, L3, dan L4.

Panjang L1 = 64mm, L2 = 105mm, L3 = 98,5mm, dan L4 = 115mm. Jika dijumlahkan maka panjang bentangan maksimum lengan adalah 318,5mm, atau 31,85cm.

Kegiatan penelitian dimulai dengan studi literatur terutama berfokus pada studi kinematika. Kemudian menetapkan variabel tetap atau tujuan, yaitu koordinat posisi tujuan gerak *end effector*. Gunakan rumus *Inverse Kinematics* untuk menghitung sudut putar sendi robot. Rumus tersebut disusun pada program kontroler. Setelah itu lakukan kegiatan eksperimen atau percobaan gerakan robot yang besar sudut putaran sendinya dari hasil kalkulasi rumus *Inverse Kinematics*, untuk membuktikan apakah rumus geometri *Inverse kinematics* mampu membuat lengan robot ini bergerak sesuai input keinginan pengguna. Maka, dalam kegiatan eksperimen melakukan pengukuran koordinat posisi aktual dari *end effector* robot.

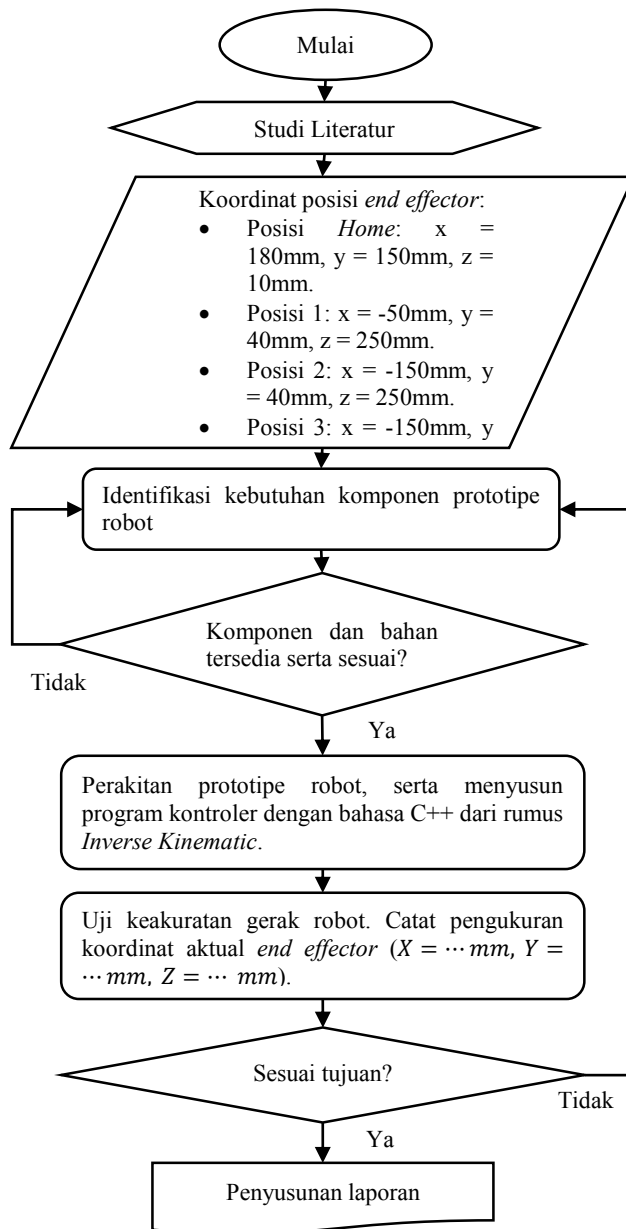
Dalam penelitian ini ditetapkan tiga data koordinat posisi tujuan gerak untuk percobaan, masing-masing gerakan dilakukan 10 kali pengulangan. Catat data hasil pengukurannya, kemudian bandingkan dengan koordinat yang ditetapkan. Sehingga penelitian ini akan menghasilkan data *error* gerakan robot, yaitu kesalahan atau melesetnya koordinat posisi aktual dengan data yang ditetapkan. Perhitungan *error* antara koordinat yang ditetapkan dengan koordinat pengukuran menggunakan prinsip jarak terdekat antar dua titik, yaitu dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$R = \sqrt{(\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta z)^2})^2 + (\Delta y)^2}$$

dimana:

- Δx : Selisih nilai sumbu-*x* target dengan nilai hasil pengukuran.
- Δz : Selisih nilai sumbu-*z* target dengan nilai hasil pengukuran.
- Δy : Selisih nilai sumbu-*y* target dengan nilai hasil pengukuran.

Kegiatan penelitian ini digambarkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Alir Tahapan Kegiatan Penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari kegiatan penelitian ini adalah pengukuran akurasi posisi *end effector* gerak lengan robot. Sebelumnya, seluruh komponen dirakit terlebih dahulu, dan kontroler Arduino perlu diprogram agar bisa memutar motor servo.

Rumus-rumus *inverse kinematics* pada landasan teori sebelumnya ditulis ke dalam bahasa komputer (bahasa C++) sebagai program Arduino. Rumus-rumus *inverse kinematic* tersebut dibuat menjadi bahasa komputer agar kontroler dapat melakukan kalkulasi besarnya sudut yang harus diputar oleh motor servo. Bentuk bahasa komputer C++ dari rumus-rumus *inverse kinematic* ditulis pada aplikasi/software Arduino yang ditunjukkan melalui

screenshot antarmuka aplikasi Arduino pada Gambar 12 berikut.

```

D = sqrt(pow(X_End_Effector,2) + pow(Z_End_Effector,2));
Theta_1 = (atan(X_End_Effector/Z_End_Effector))* (180.00/PI);
theta_0 = L4;
offset = Y_End_Effector - L1;
R = sqrt(pow(d,2) + pow(offset,2));
alpha1 = (atan(d/R))* (180.00/PI);
alpha2 = (atan((pow(L2,2) + pow(L1,2) - pow(L3,2)) / (2*L2*L1)) * (180.00/PI));
Theta_2 = (alpha1 + alpha2);
Theta_3 = (acos((cos(alpha2) * pow(L1,2) + pow(L3,2) - pow(theta_2,2)) / (2*L1*L3)) * (180.00/PI));
Theta_4 = 180.00 - (180.00 - (alpha3 + Theta_3)) - alpha1;
  
```

Gambar 12. Rumus *Inverse Kinematics* Dalam Bentuk Bahasa C++ yang Ditulis pada *Software* Arduino.

Program yang disusun tersebut kemudian diunggah ke papan kontroler Arduino, maka robot, atau motor servo akan berputar sesuai input nilai posisi x , y , dan z dari *end effector* yang diinginkan. Mengunggah program dengan cara menghubungkan perangkat PC atau laptop ke kontroler dengan kabel USB. Kemudian lakukan percobaan. Gambaran percobaan yang dilakukan ditunjukkan melalui Gambar 13 berikut.



Gambar 13. Dokumentasi Proses Percobaan Uji Gerak robot.

Robot memiliki posisi awal, yaitu posisi *home*. Kemudian percobaan dilakukan dengan menggerakkan *end effector* robot dari posisi *home* ke posisi tujuan, sebut saja 'posisi 1', 'posisi 2', dan 'posisi 3'. Data koordinat posisi *home* dan koordinat ke tiga posisi tujuan gerak terlampir pada diagram alir (Gambar 11) sebelumnya.

Setiap setelah mencapai posisi yang dituju segera ukur dan catat koordinatnya kemudian robot kembali ke posisi *home*, dilakukan 10 kali pengulangan untuk setiap posisi tujuan gerak, sehingga total ada 30 data pengukuran. Cara pengukuran dengan membandingkan koordinat aktual dari ujung pensil, dengan titik koordinat yang ditetapkan adalah tanda (+) pada permukaan kertas milimeter blok. Kegiatan percobaan menghasilkan data pengukuran yang ditunjukkan pada Tabel 1 hingga Tabel 3.

Tabel 1. Tabel Data *Error* Koordinat Tujuan Gerak Posisi 1.

No.	Koordinat Target (mm)			Koordinat Aktual (mm)			<i>Error</i> (mm)
	x	y	z	x	y	z	
1	-50	40	250	-42	37	246	9,433
2	-50	40	250	-44	36	245	8,774
3	-50	40	250	-45	37	247	6,557
4	-50	40	250	-48	37	246	5,385
5	-50	40	250	-47	39	245	5,916
6	-50	40	250	-47	38	245	6,164
7	-50	40	250	-50	39	248	2,236
8	-50	40	250	-47	38	248	4,123
9	-50	40	250	-48	38	249	3,000
10	-50	40	250	-43	37	246	8,602
Rata-rata							6,019

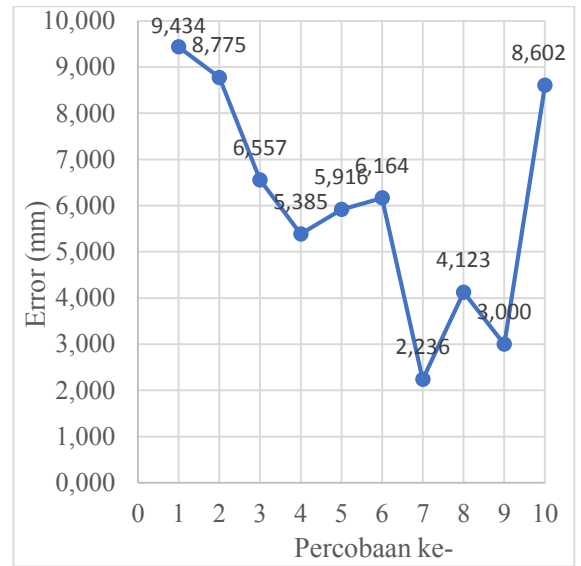
Tabel 2. Tabel Data *Error* Koordinat Tujuan Gerak Posisi 2.

No.	Koordinat Target (mm)			Koordinat Aktual (mm)			<i>Error</i> (mm)
	x	y	z	x	y	z	
1	-150	40	250	-138	37	251	12,409
2	-150	40	250	-136	38	250	14,142
3	-150	40	250	-136	39	255	14,899
4	-150	40	250	-137	38	257	14,899
5	-150	40	250	-136	39	256	15,264
6	-150	40	250	-137	38	255	14,071
7	-150	40	250	-136	40	252	14,142
8	-150	40	250	-137	39	251	13,076
9	-150	40	250	-138	40	251	12,041
10	-150	40	250	-138	39	251	12,083
Rata-rata							13,703

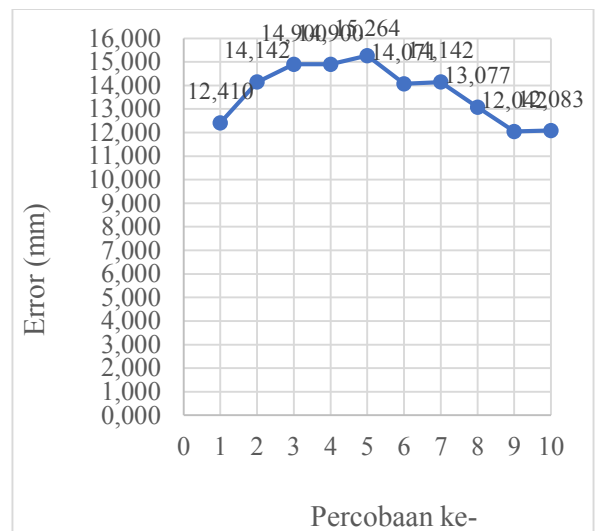
Tabel 3. Tabel *Data Error* Koordinat Tujuan Gerak Posisi 3.

No.	Koordinat Target (mm)			Koordinat Aktual (mm)			<i>Error</i> (mm)
	x	y	z	x	y	z	
1	-150	40	150	-143	39	156	9,273
2	-150	40	150	-144	39	154	7,280
3	-150	40	150	-144	38	155	8,062
4	-150	40	150	-141	38	156	11
5	-150	40	150	-142	38	155	9,643
6	-150	40	150	-148	38	150	2,828
7	-150	40	150	-144	38	155	8,062
8	-150	40	150	-143	38	155	8,831
9	-150	40	150	-142	39	156	10,049
10	-150	40	150	-142	38	156	10,198
Rata-rata							8,523

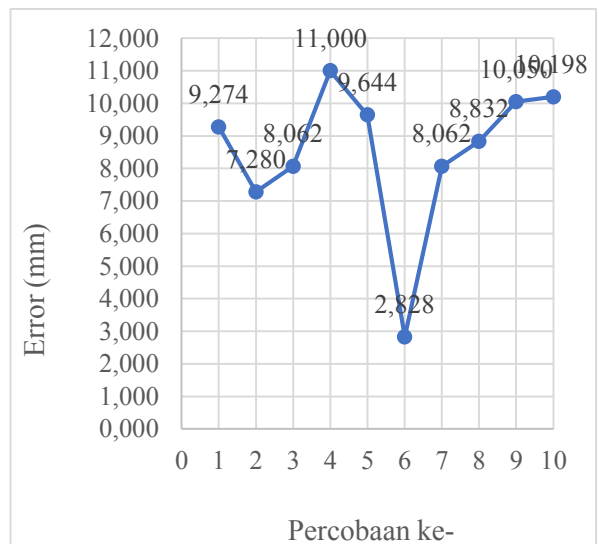
Gambar *error* gerakan *end effector* robot dari hasil percobaan dapat divisualisasikan dalam bentuk grafik. Grafik gerakan *end effector* robot dari kegiatan percobaan ditunjukkan pada Gambar 14 hingga Gambar 16 berikut.



Gambar 14. Grafik *Error* Gerakan Percobaan Menuju Posisi 1.



Gambar 15. Grafik *Error* Gerakan Percobaan Menuju Posisi 2.



Gambar 16. Grafik *Error* Gerakan Percobaan Menuju Posisi 3.

V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini bisa disimpulkan dalam beberapa poin berikut:

1. Telah dihasilkan prototipe lengan robotik 4 DOF yang mampu bergerak di bidang atau ruang 3 dimensi.
2. Motor servo pada ke empat *joint* berputar sesuai sudut hasil kalkulasi dari rumus *Inverse Kinematics* yang disusun. Putaran motor servo tersebut mampu membuat ujung (*end effector*) robot bergerak mencapai koordinat posisi yang ditetapkan, meskipun meleset (*error*) beberapa milimeter.
3. *Error* terkecil adalah pada percobaan ke 7 tujuan gerak posisi 1 dengan nilai 2,236mm.
4. *Error* terbesar adalah pada percobaan ke 5 tujuan gerak posisi 2 dengan nilai 15,264mm.
5. Rata-rata *error* terbesar adalah saat percobaan gerak tujuan posisi 2 yaitu sebesar 13,703mm, dan rata-rata terkecil saat percobaan gerak tujuan posisi 1 yaitu sebesar 6,019mm.
6. Rata-rata *error* koordinat dari seluruh gerakan percobaan adalah sebesar 9,415mm.
7. Melesetnya gerakan robot atau *error* terjadi karena adanya batas kemampuan komputasi kontroler yang tidak bisa menghasilkan hitungan koma dengan digit panjang, ditambah lagi *error* sinyal yang dikirimkan kontroler ke motor servo, serta *error* sudut putaran aktual poros motor servo mengakibatkan terjadinya penambahan *error* (*cumulative error*) pada posisi *end effector*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada berbagai pihak yang turut mendukung dan berkontribusi pada penelitian ini. Khususnya kepada Bapak Dr. Ing. Putu Mahayana Santika yang membimbing penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Tarun Pratap Singh, P. Suresh, Swet Chandan, Forward and inverse kinematic analysis of robotic manipulators, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 04, Issue 02, 2017, pp. 1459-1460.
- [2] Achmad Zaki Rachman, dkk., Inverse kinematics dan pengukuran akurasi pergerakan pada model robot manipulator lengan, *Jurnal Teknik Mesin ITI*, Vol. 3, No. 2, 2019, pp. 53.
- [3] Franz Reuleaux, *The Kinematics of machinery: outlines of a theory of machines*, University of Wisconsin – Madison, 2008.
- [4] Goldstein dan Herbert, *Classical mechanics* (2nd ed.), Addison–Wesley, 1980.
- [5] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and control*, Pearson Education Inc., 2008.
- [6] S. Gomez, dkk., Design of a 4-DOF robot manipulator with optimized algorithm for inverse kinematics, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering* Vol. 9, No. 6, 2015, pp. 908.
- [7] Ayush Gupta, dkk., A Geometric approach to inverse kinematics of a 3 DOF robotic arm, *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, Volume 6 Issue I, January 2018, pp. 3524-3525.
- [8] Wally Gastreich, What is A servo motor and how it works?', 2018, Website: <https://realpars.com/servo-motor/>, diakses tanggal 8 Februari 2021.
- [9] Arduino, What is Arduino?, 2018, Website: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction/>, diakses tanggal 8 Februari 2021.