

# Pengendalian Dua *Joint* Ujung dan *End Effector* Manipulator dengan Lima Derajat Kebebasan Menggunakan Perangkat *Smartphone*

Yusnadi Aunur Ramadhan Wahyudin<sup>1\*</sup>, Decy Nataliana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia  
Email : yusnadi.aunur@gmail.com

*Received* 24 01 2024 | *Revised* 31 01 2024 | *Accepted* 31 01 2024

## ABSTRAK

*Dalam lingkungan kerja yang berbahaya, pengendalian robot lengan konvensional dengan koneksi kabel menjadi tidak fleksibel dan berpotensi membahayakan operator. Untuk meningkatkan fleksibilitas pengendalian robot lengan dalam lingkungan berbahaya, perlu dilakukan pengendalian nirkabel, yang memungkinkan operasi yang lebih bebas. Hal ini akan memberikan kemampuan operator untuk mengendalikan robot dengan jarak yang lebih aman memberikan keleluasaan dalam bergerak di lingkungan yang berbahaya. Penelitian ini mengimplementasikan pengendalian manipulator (robot lengan) dengan lima derajat kebebasan (Degree of Freedom) melalui penggunaan smartphone sebagai kendali eksternal, dan mikrokontroler ESP32 dengan motor servo MG996R dan SG90 sebagai penggerakannya. Hasil pengujian rancangan menunjukkan bahwa nilai akurasi terbesar pada bagian wrist roll adalah  $-1,5^\circ$  sampai  $1,5^\circ$ , sedangkan nilai presisi terbesar adalah  $-0,662^\circ$  sampai  $0,662^\circ$ . Pada bagian wrist pitch, nilai akurasi sebesar  $-4,691^\circ$  sampai  $4,691^\circ$  dengan nilai presisi  $-0,773^\circ$  sampai  $0,773^\circ$ . Selain itu, end effector mampu menggenggam benda hingga 6,325 cm. Sistem ini berfungsi optimal pada rentang jarak pengendalian 1-12 meter.*

**Kata kunci:** akurasi, derajat kebebasan, kendali eksternal, robot lengan, presisi

## ABSTRACT

*In hazardous work environments, conventional cable-controlled robotic arm systems become inflexible and potentially hazardous to operators. To enhance the flexibility of controlling robotic arms in such environments, wireless control is necessary, allowing for more liberated operation. This enables operators to control the robot from a safer distance. This research implements the control of a manipulator (robotic arm) with five degrees of freedom (DOF) using a smartphone as an external controller and an ESP32 microcontroller with MG996R and SG90 servo motors as actuators. The test results indicate that the highest accuracy value for the wrist roll is within  $-1.5^\circ$  to  $1.5^\circ$ , while the highest precision value is within  $-0.662^\circ$  to  $0.662^\circ$ . As for the wrist pitch, the accuracy ranges from  $-4.691^\circ$  to  $4.691^\circ$ , with precision values between  $-0.773^\circ$  to  $0.773^\circ$ . Furthermore, the end effector is capable of gripping objects up to 6.325 cm. This system operates optimally within a control range of 1-12 meters*

**Keywords:** accuracy, degrees of freedom, external control, robotic arm, precision

## 1. PENDAHULUAN

Industri saat ini berusaha meningkatkan efisiensi produksinya dengan menghindari penggunaan tenaga kerja manusia, karena manusia rentan terhadap kelemahan dan kelelahan dalam menjalankan tugas. Di industri elektronik, manipulator digunakan untuk menempatkan komponen elektronik dengan presisi tinggi, sehingga efektivitas pembuatan perangkat seperti telepon genggam dan laptop meningkat **(Siegward R, 2004)**.

Robot manipulator adalah robot manual buatan manusia (*arm robot*) untuk berbagai keperluan dalam peningkatan produksi, terdiri dari lengan lengan kaku yang dihubungkan secara seri dan memiliki sendi yang dapat bergerak berputar (rotasi) atau membentang/memendek (translasi atau prismatic). Salah satu ujung lengan, yang disebut pangkal, biasanya ditanam pada permukaan atau meja yang diam, sedangkan ujung lainnya, yang disebut ujung efektor (*end effector*) dapat dilengkapi dengan alat khusus tergantung pada tugas robot. Di dalam dunia mekanik, manipulator ini terdiri dari dua bagian yaitu tangan atau lengan (*arm*) dan pergelangan tangan (*wrist*) **(Paulus, 2017)**. Robot manipulator konvensional biasanya menggunakan dua jenis sendi untuk bergerak. Sendi revolusi memungkinkan putaran, seperti sendi siku, sedangkan sendi prismatic memungkinkan pergerakan maju-mundur, seperti ketika kita mendorong atau menarik sesuatu **(Barri,2017)**. Umumnya tool yang digunakan pada end effector adalah gripper yang dapat difungsikan sebagai penjepit atau pencengkeram objek yang akan diambil. Selain itu pergerakan robot lengan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan, baik itu sudut putaran robot lengan atau pun jarak jangkauan lengan robot **(Balza, 2009)**.

Dalam pengembangannya robot manipulator konvensional sering menghadapi sejumlah masalah yang perlu diatasi. Salah satunya adalah keterbatasan panjang kabel dalam pengendalian. Robot konvensional sering mengandalkan koneksi kabel ke kotak kontrolnya, yang membatasi jarak antara operator dan robot. Ini bisa menjadi kendala serius jika perlu mengoperasikan robot dalam ruang yang besar atau sulit dijangkau oleh kabel. Hal ini mengakibatkan pembatasan mobilitas yang signifikan. Masalah lainnya adalah penggunaan yang kurang ramah. Keterbatasan panjang kabel dan kebutuhan untuk mengendalikan robot dari ruang kontrol yang terpisah sering kali mengharuskan operator untuk mempelajari penggunaan alat kontrol yang kompleks. Ini memerlukan waktu dan bisa menghambat produktivitas. Terakhir, masalah terkait kesehatan operator manusia juga menjadi isu penting. Di lingkungan kerja yang kotor atau berbahaya, operator manusia yang mengendalikan robot dapat terpapar risiko kesehatan serius. Robot sering digunakan dalam situasi berbahaya, seperti pengelasan, pemotongan logam, atau di lingkungan beracun di mana manusia tidak aman untuk beroperasi **(Mikell,2008)**.

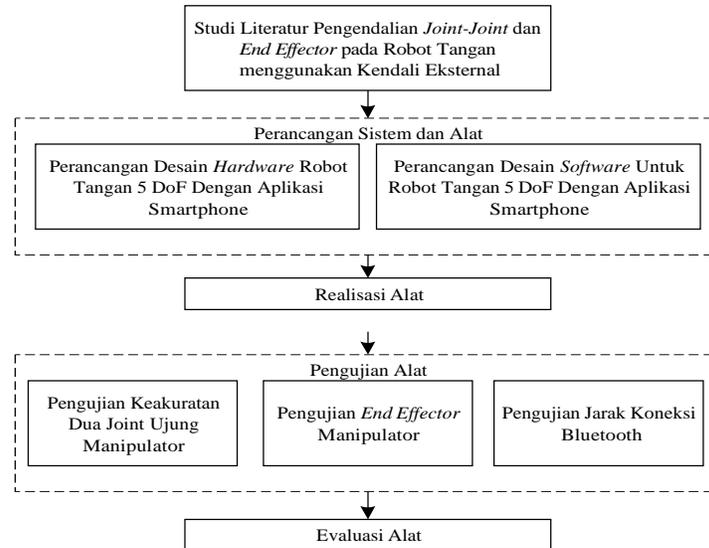
Meskipun robot lengan memiliki banyak keuntungan dan manfaat dalam meringankan pekerjaan manusia robot lengan seringkali mengalami permasalahan antara lain kecelakaan dalam hal ini robot tidak dioperasikan dengan baik bisa mengakibatkan kecelakaan yang serius **(Uhrowi,2019)**. Selain itu, pada metode konvensional robot harus dioperasikan dari dalam ruang kontrol dan terbatas oleh panjang kabel karena pengendali konvensional menggunakan koneksi kabel ke kotak kontrol robot. Hal ini tidak begitu ramah pengguna. Begitu juga, lingkungan tempat robot beroperasi mungkin tidak cocok untuk kesehatan operator manusia karena adanya kotoran atau bahan-bahan lain dalam ruang kerja. Dengan demikian, pada penelitian ini pengguna dapat memanfaatkan kemampuan mengoperasikan perangkat dengan menggunakan komunikasi nirkabel yang mungkin terjadi karena adanya aplikasi yang terintegrasi di smartphone.

# Pengendalian Dua *Joint* Ujung dan *End Effector* Manipulator dengan Lima Derajat Kebebasan Menggunakan Perangkat *Smartphone*

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1. Deskripsi Umum Sistem

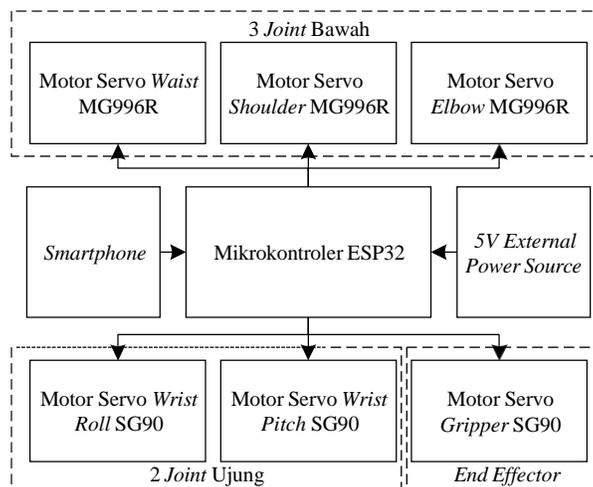
Dalam perancangan alat ini dibutuhkan metode pelaksanaan yang ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Metode Penelitian Robot Lengan Lima Derajat Kebebasan

### 2.2 Perancangan Sistem

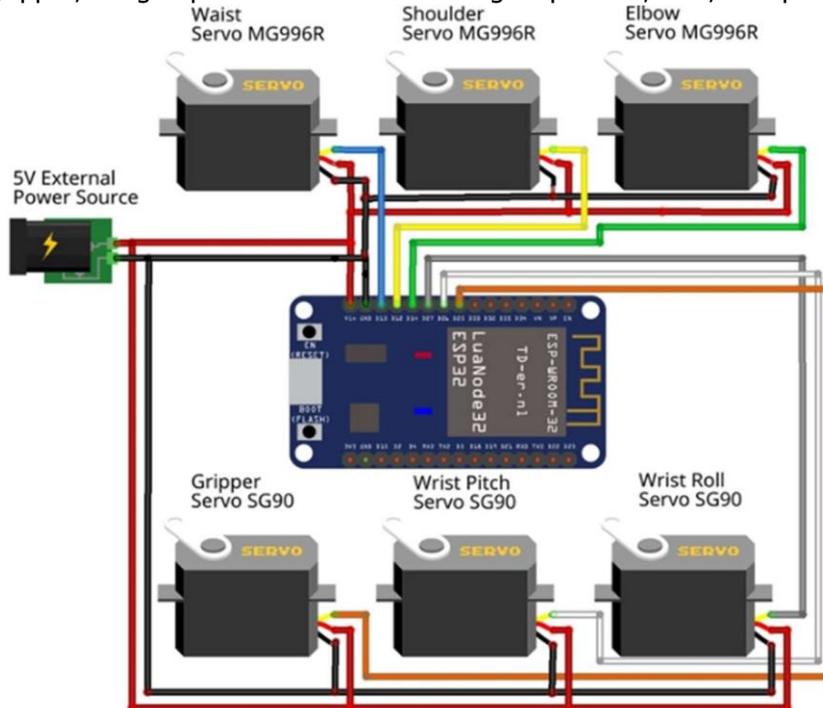
Gambar 2 menunjukkan diagram blok perancangan sistem robot lengan lima derajat kebebasan. Pada penelitian ini motor servo digunakan sebagai penggerak utama. Motor servo MG995R dipilih untuk digunakan pada bagian bawah manipulator karena memiliki torsi yang cukup kuat yang diperlukan untuk menggerakkan bagian atas manipulator. Sementara itu, servo SG90 dipilih untuk digunakan pada dua *joint* ujung dan *gripper* manipulator karena memiliki bobot yang ringan, yang membantu menghindari memberikan tekanan berlebihan pada joint bagian bawah. Untuk ESP32 dipilih karena memiliki fitur Bluetooth yang memungkinkan pengendalian eksternal yang fleksibel. Hal ini memungkinkan pengguna untuk dengan mudah mengendalikan sistem robot lengan ini melalui perangkat eksternal yaitu dengan koneksi Bluetooth.



Gambar 2. Diagram Blok Robot Lengan Lima Derajat Kebebasan

### 2.3 Perancangan Hardware

Gambar 3 menampilkan skema robot lengan dengan 5 derajat kebebasan. Dalam skema ini, semua motor servo terhubung secara paralel ke sumber daya 5V pada mikrokontroler. Dua jenis servo digunakan dalam sistem ini: servo MG996R dan SG90. Tiga servo MG996R menggerakkan bagian base, shoulder, dan elbow, dengan pin PWM servo terhubung ke pin D13, D12, D14 pada ESP32. Sedangkan tiga servo SG90 menggerakkan bagian wrist roll, wrist pitch, dan gripper, dengan pin PWM servo terhubung ke pin D27, D26, D25 pada ESP32.

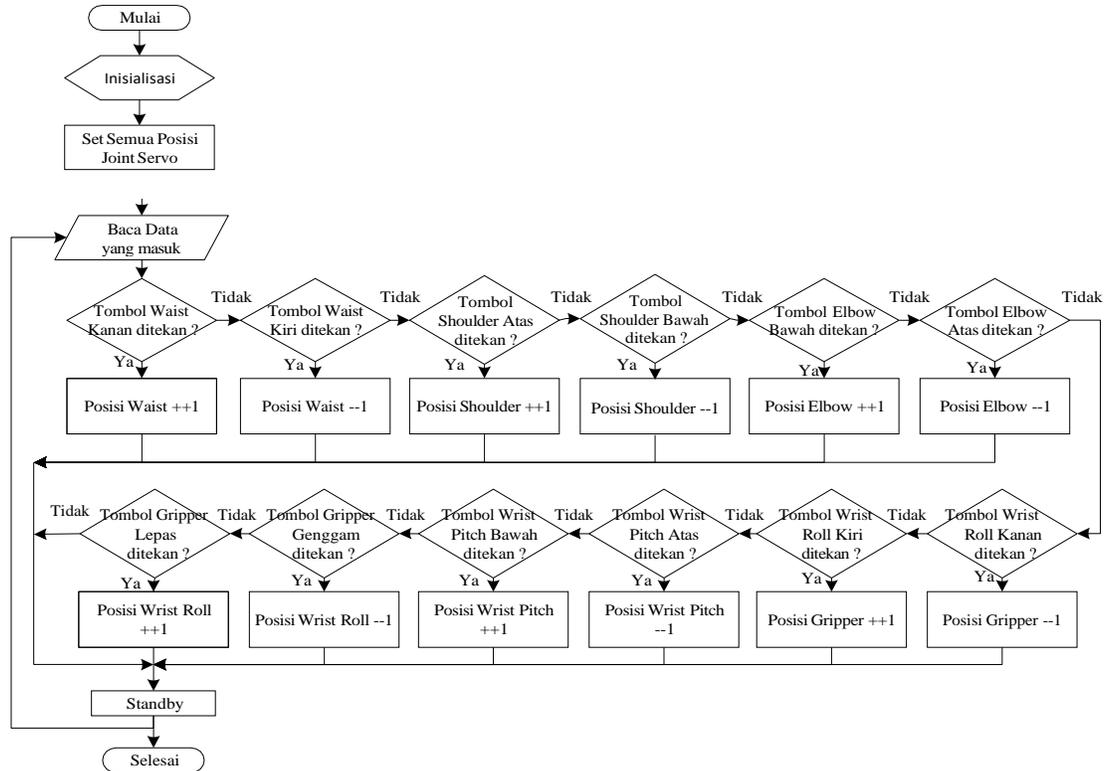


Gambar 3. Skema Robot Lengan Lima Derajat Kebebasan

### 2.4 Perancangan Software

Gambar 4 menggambarkan *flowchart* sistem yang dimulai dengan inisiasi servo, Bluetooth, dan variabel yang digunakan untuk menyimpan posisi servo serta langkah-langkah dalam mode otomatis. Robot kemudian menggerakkan servo ke posisi awal yang telah ditentukan. Pada tahap ini, dalam loop, robot terus memeriksa data yang diterima dari aplikasi smartphone. Data ini dikirim dalam bentuk angka dan digunakan sebagai perintah untuk menggerakkan motor servo ke posisi tertentu. Masing-masing tombol pada aplikasi terhubung dengan angka tertentu sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Pengguna juga memiliki fleksibilitas untuk mengatur kecepatan pergerakan servo melalui slider yang disediakan dalam aplikasi. Selain itu, robot memiliki kemampuan untuk menyimpan posisi servo saat tombol "save" ditekan, memungkinkan pengguna merekam gerakan robot.

Pengendalian Dua *Joint* Ujung dan *End Effector* Manipulator dengan Lima Derajat Kebebasan Menggunakan Perangkat *Smartphone*



Gambar 4. Flowchart Sistem Robot Lengan Lima Derajat Kebebasan

## 2.5 Metode Pengujian Sistem

### 1. Pengujian keakuratan dua *joint* ujung manipulator

Tujuannya adalah untuk mengukur akurasi dan presisi dua joint ujung manipulator. Pengujian dimulai dengan menghubungkan robot lengan ke Arduino IDE melalui kabel USB. Referensi awal ( $0^\circ$ ) ditentukan sebagai posisi awal servo. Goniometer plastik dipasang pada joint yang akan diukur sudutnya, dengan satu kaki goniometer pada *link* yang tetap dan yang lainnya pada *link* yang bergerak. Pengukuran dilakukan dengan melakukan 10 pengukuran berulang pada setiap perubahan sudut sebesar  $30^\circ$  menggunakan serial monitor. Data hasil pengukuran dibandingkan dengan nilai sudut yang terpantau melalui serial monitor.

### 2. Pengujian *End Effector*

Dalam pengujian *end effector*, robot tangan ditempatkan dengan ketinggian *mounting* sekitar 2,7 cm dari permukaan meja penempatan objek. Pengujian *end effector* ini mencakup dua tahap, yaitu pencapitan dan pengangkatan objek menggunakan gripper. Pada pengujian ini, posisi sudut joint diatur *waist*  $45^\circ$ , *shoulder*  $30^\circ$ , *elbow*  $-20^\circ$ , *wrist roll*  $0^\circ$ , dan *wrist pitch*  $-10^\circ$ . Objek yang akan dicapit ditempatkan di bawah gripper, dan saat objek sudah terenggam oleh gripper, sudut servo gripper ditambahkan  $10^\circ$  agar objek terenggam dengan kuat. Setelah pencapitan objek berhasil, dilanjutkan dengan pengujian pengangkatan. Pada tahap ini, sudut servo *shoulder* digeser menjadi  $0^\circ$  untuk melakukan uji pengangkatan objek.

### 3. Pengujian jarak koneksi Bluetooth

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui berapa jarak optimal aplikasi *smartphone* mampu mengendalikan robot tangan. Setiap pengukuran dilakukan dengan jarak 1 meter, di mana saat setiap 1 meter jarak ditempuh, pengendalian gerakan robot tangan dilakukan menggunakan aplikasi *smartphone* yang ditempatkan pada lantai untuk menggerakkan *joint wrist roll* dan *wrist pitch* dari  $-90^\circ$  hingga  $90^\circ$ .

## 4. Hasil Pengujian dan Pembahasan

### 3.1 Hasil Pengujian Keakuratan Dua *joint* Ujung Manipulator

Setelah memperoleh data hasil 10 percobaan berulang, langkah-langkah berikut dapat dilakukan untuk menganalisis keakuratan dari dua *joint* ujung manipulator. Pertama, rata-rata dari data pengukuran dihitung dengan menggunakan Persamaan (1).

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} \quad (1)$$

Dimana  $x_1$  adalah nilai pengukuran pertama,  $x_2$  adalah nilai pengukuran kedua dan  $n$  adalah banyaknya proses pengukuran. Selanjutnya, standar deviasi dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

dimana:

$S$  = standar deviasi

$x$  = nilai yang terukur

$\bar{x}$  = nilai rata-rata

$n$  = banyaknya data uji

$i$  = data ke- $i$

Untuk menghitung nilai standar error dengan menggunakan rumus Persamaan (3).

$$\text{standar error} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Selanjutnya, nilai ketidakpastian ( $\Delta x$ ) dihitung dengan menggunakan Persamaan (4).

$$\text{Ketidakpastian } (\Delta x) = \text{faktor pengali} \times \text{standar error} \quad (4)$$

Dimana untuk nilai faktor pengali didapatkan dari tabel confidence level (CL) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Pengendalian Dua *Joint* Ujung dan *End Effector* Manipulator dengan Lima Derajat Kebebasan Menggunakan Perangkat *Smartphone*

**Tabel 1. Confidence Level**

	Confident Level					
	90%	95%	98%	99%	99.80%	99.90%
	Level of Significance					
2 Tailed	0.100	0.050	0.020	0.010	0.002	0.001
1 Tailed	0.050	0.025	0.010	0.005	0.001	0.001

df						
1	6.320	12.690	31.810	63.670	-	-
2	2.912	4.271	6.816	9.520	19.650	26.300
3	2.352	3.179	4.525	5.797	9.937	12.390
4	2.132	2.776	3.744	4.596	7.115	8.499
5	2.015	2.570	3.365	4.030	5.876	6.835
6	1.094	2.447	3.143	3.707	5.201	5.946
7	1.895	2.365	2.999	3.500	4.783	5.403
8	1.860	2.306	2.897	3.356	4.500	5.039
9	1.833	2.262	2.822	3.250	4.297	4.780
10	1.813	2.228	2.764	3.170	4.144	4.556
11	1.796	2.201	2.719	3.106	4.025	4.437

Pada penelitian ini presentase tingkat kepercayaan (CL) yang digunakan adalah sebesar 95% dengan jumlah pengulangan pengukuran sebanyak 10 kali. Oleh karena itu nilai df (degree of freedom) yang digunakan adalah 9 (df = n - 1), sehingga didapatkan nilai faktor pengali sebesar 2,262. Kemudian, presisi alat dihitung menggunakan Persamaan (5).

$$\Delta Presisi = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta ref^2} \quad (5)$$

Dimana  $\Delta ref$  merupakan nilai ketidakpastian dari alat ukur referensi, pada kasus ini alat ukur referensi yang digunakan adalah goniometer yang memiliki nilai ketidakpastian sebesar  $0,5^\circ$ . Untuk menghitung nilai akurasi dengan menggunakan rumus Persamaan (6).

$$\Delta Akurasi = \Delta Presisi + | \bar{x} - x | \quad (6)$$

Tabel 2 menunjukkan hasil dari pengujian *joint wrist roll* dengan nilai ketidakpastian terbesar adalah  $-0,369^{\circ}$  sampai  $0,369^{\circ}$  dengan nilai presisi terbesar  $-0,662^{\circ}$  sampai  $0,662^{\circ}$  dan nilai akurasi terbesar adalah  $-1,500^{\circ}$  sampai  $1,500^{\circ}$ .

**Tabel 2. Hasil Pengukuran *Wrist Roll***

No	Sudut [°]	Rata-rata Percobaan 1-10 [°]	Standar Deviasi	Standar Error	Ketidakpastian (CL 95%)	Presisi [°]	Akurasi [°]
1	-90	-89.3	0.483	0.153	0.346	0.608	1.308
2	-60	-59.3	0.483	0.153	0.346	0.608	1.308
3	-30	-29.2	0.422	0.133	0.302	0.584	1.384
4	0	1	0	0	0	0.5	1.5
5	30	30.4	0.516	0.163	0.369	0.622	1.022
6	60	60.4	0.516	0.163	0.369	0.622	1.022
7	90	90.6	0.516	0.163	0.369	0.622	1.222
Nilai Maksimum					0.369	0.622	1.5

Tabel 3 memperlihatkan hasil dari pengujian untuk bagian *joint wrist pitch*, dengan nilai ketidakpastian terbesar mencapai  $-0,589^{\circ}$  sampai  $0,589^{\circ}$ , presisi  $-0,773^{\circ}$  sampai  $0,773^{\circ}$ , dan akurasi  $-4,691^{\circ}$  sampai  $4,691^{\circ}$ .

**Tabel 3. Hasil Pengukuran *Wrist Pitch***

No	Sudut [°]	Rata-rata Percobaan 1-10 [°]	Standar Deviasi	Standar Error	Ketidakpastian (CL 95%)	Presisi [°]	Akurasi [°]
1	-90	-89	0	0	0	0.5	1.5
2	-60	-59.1	0.316	0.1	0.226	0.549	1.449
3	-30	-29	0.471	0.149	0.337	0.603	1.603
4	0	4	0.667	0.211	0.477	0.691	4.691
5	30	28.7	0.823	0.26	0.589	0.773	2.073
6	60	61.4	0.699	0.221	0.5	0.707	2.107
7	90	89.5	0.707	0.224	0.506	0.711	1.211
Nilai Maksimum					0.589	0.773	4.691

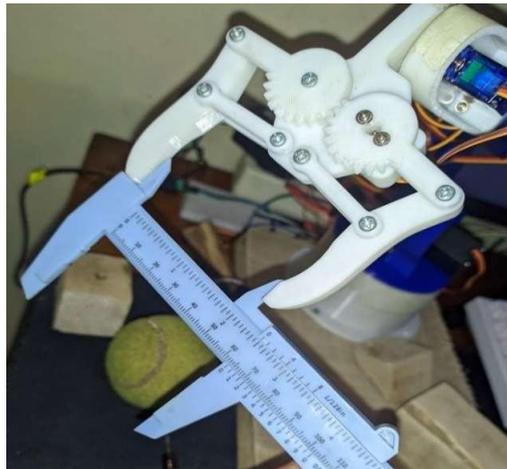
Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi nilai presisi dan akurasi pengukuran di antaranya: ketidakpastian alat ukur dapat mempengaruhi akurasi hasil pengukuran pada pengujian ini menggunakan goniometer yang mempunyai ketidakpastian sebesar  $-0,5^{\circ}$  sampai  $0,5^{\circ}$  jadi jika alat ukur memiliki ketidakpastian yang tinggi, maka hasil pengukuran akan memiliki tingkat ketidakpastian yang tinggi yang di mana akan mempengaruhi nilai presisi dan akurasinya. Selanjutnya pada Tabel 3 hasil pengukuran wrist pitch menunjukkan presisi maksimum  $-0,773^{\circ}$  sampai  $0,773^{\circ}$  akurasi maksimum  $-4,691^{\circ}$  sampai  $4,691^{\circ}$  berbeda dengan wrist roll nilai presisi maksimum sebesar  $-0,662^{\circ}$  sampai  $0,662^{\circ}$  dan akurasi maksimum sebesar  $-1,5^{\circ}$  sampai  $1,5^{\circ}$ . Perbedaan ini dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti pemasangan joint dengan servo kurang tepat. Jika pemasangan tidak presisi, misalnya terjadi simpangan pada joint wrist pitch, maka dapat menyebabkan pergeseran dan menghasilkan pengukuran yang tidak akurat. Selain itu berat end effector mempengaruhi nilai presisi dan akurasi pengukuran jadi berat end effector yang tinggi dapat menyebabkan pergeseran pada wrist pitch.

### 3.2 Hasil Pengujian *End Effector*

**Tabel 4. Hasil Pengujian Menjepit dan Mengangkat Barang**

No	Benda	Ukuran [cm]	Bahan	Berat [gram]	Menjepit	Mengangkat
1	Kayu Silinder	2,3 x 6	Kayu	12	Berhasil	Berhasil
2	Kayu Segitiga	4,2 x 4,2 x 5,9	Kayu	20	Berhasil	Berhasil
3	Bola Karet	4	Karet	21	Berhasil	Berhasil
4	Kayu Kubus	4,2 x 4,2 x 4,2	Kayu	25	Berhasil	Berhasil
5	Isolasi Tape	1,2 x 6,5	Plastik	50	Berhasil	Berhasil
6	Kayu Persegi Panjang	8 x 4,2 x 4,2	Kayu	51	Berhasil	Berhasil
7	Kapasitor Tabung	3,5 x 6,2	Plastik	62	Berhasil	Gagal
8	Bola Kasti	6,2	Wool	65	Berhasil	Gagal
9	Baterai Tipe C	3,4 x 6	Besi	90	Berhasil	Gagal
10	Air Gelas Kemasan	6,3 x 9	Plastik	200	Berhasil	Gagal

Tabel 4 menampilkan hasil pengujian menjepit dan mengangkat beberapa barang. Dapat dilihat bahwa semua benda yang dibawah bukaan maksimal *gripper* berhasil dijepit meskipun sedikit licin dikarenakan gripper berbahan plastik. Seperti pada gambar 5 bukaan maksimal dari gripper adalah 6,325cm.



**Gambar 5 Pengukuran Maksimal Bukaan Gripper**

Selanjutnya ketika melakukan pengujian pengangkatan, terdapat perbedaan dalam hasilnya. Barang-barang seperti kayu silinder, kayu segitiga, bola karet, kayu kubus, isolasi tape, dan kayu persegi panjang berhasil diangkat. Tetapi terdapat beberapa barang lain seperti kapasitor tabung, bola kasti, baterai tipe C, dan air gelas kemasan yang tidak dapat diangkat.

### 4.3 Hasil Pengujian Jarak Koneksi Bluetooth Pada Robot Manipulator

**Tabel 5. Pengujian jarak koneksi bluetooth**

Jarak [m]	Status Bluetooth	Kondisi <i>Joint Wrist Roll</i>	Gerakan Sudut [°]	Kondisi <i>Joint Wrist Pitch</i>	Gerakan Sudut [°]
1	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
2	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
3	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
4	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
5	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
6	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
7	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
8	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
9	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
10	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
11	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
12	Terhubung	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
13	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
14	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
15	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
16	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
17	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
18	Terganggu	Bergerak	-90 sampai 90	Bergerak	-90 sampai 90
19	Terputus	Tidak Bergerak	Tidak Bergerak	Tidak Bergerak	Tidak Bergerak

Tabel 5 menampilkan hasil pengujian jarak koneksi Bluetooth pada robot tangan. Pada jarak 1 hingga 12 meter, status koneksi tetap terhubung dan pergerakan *joint Wrist Roll* dan *Wrist Pitch* berjalan lancar pada rentang sudut  $-90^{\circ}$  sampai  $90^{\circ}$ . Namun, pada jarak 13 meter, koneksi Bluetooth kadang-kadang terputus dan harus dikoneksikan kembali, meskipun robot masih dapat mengendalikan kedua jointnya. Pada jarak 19 meter, koneksi antara aplikasi smartphone dan mikrokontroler ESP32 pada robot tangan terputus dan tidak bisa digerakkan. Gangguan ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti hambatan fisik dan interferensi elektromagnetik.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari penelitian pengendalian dua *joint* ujung dan *end effector* manipulator (robot tangan) dengan 5 derajat kebebasan menggunakan kendali eksternal *smartphone* maka dapat disimpulkan Pengendalian 2 *joint* ujung dan *end effector* dengan kendali eksternal melalui aplikasi *smartphone* dapat berfungsi. Setiap tombol pada aplikasi terhubung dengan servo *joint* tertentu pada manipulator, sehingga ketika tombol ditekan aplikasi akan mengirimkan kode yang akan memerintahkan penambahan atau pengurangan nilai sudut pada *joint* tertentu. Nilai terbesar akurasi pada bagian *wrist roll* sebesar  $-1,500^{\circ}$  sampai  $1,500^{\circ}$ , nilai presisi sebesar  $-0,662^{\circ}$  sampai  $0,662^{\circ}$ , dan nilai ketidakpastian sebesar  $-0,369^{\circ}$  sampai  $0,369^{\circ}$ . Nilai terbesar akurasi pada bagian *wrist pitch* sebesar  $-4.691^{\circ}$  sampai  $4.691^{\circ}$ , nilai presisi sebesar  $-0,773^{\circ}$  sampai  $0,773^{\circ}$ , dan nilai ketidakpastian sebesar  $-0,589^{\circ}$  sampai  $0,589^{\circ}$ . Lalu untuk *End effector* mampu menggenggam semua benda yang ukurannya di bawah bukaan maksimumnya, sebesar 6,325 cm. Namun pada pengujian pengangkatan beberapa objek tidak dapat diangkat oleh manipulator. Pengendalian robot tangan menggunakan kendali eksternal melalui aplikasi *smartphone* bekerja optimal pada rentang jarak 1 sampai dengan 12 meter.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Balza. (2009). *Simulator Robot Lengan Enam Derajat Kebebasan Menggunakan OPENGL*. Tugas Akhir S1 Teknik Elektro UGM, Yogyakarta.
- Mikell P. Groover, Mitchell Weiss, dan Roger N. Nagel.(2008). *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*.New Delhi. Tata McGraw-Hill
- Muhammad Hablul Barri Ardaputra, Ryandika Ardani, dan Cesario Augie Widyotriatmo. (2017). Desain dan Kontrol Posisi dari Arm Manipulator Robot Sebagai Alat Rehabilitasi Pasien Pasca Stroke. *Juournals ITB*
- Paulus, Timothy Immanuel. (2017). Penerapan Kinematika Balik pada Prototype Modul Praktikum Robot Manipulator 4 DOF. *Jurnal Teknik Elektro FTEK-UKSW*
- Siegward, R., Nourbakhsh, I. R., & Sutjianto. Scaramuzza, D. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*, Massachusetts Institute of Technology. Search in.
- Uchrowi, Lasmadi, Sutjianto. (2019). Pemodelan Dan Simulasi Robot Lengan 3 DOF Menggunakan VREP, *AVITEC*