

Sistem Kontrol Lengan Robot Menggunakan Rekaman Gerakan

Muhammad Ramdani^a, Mohammad Mujirudin^a, Yohannes Dewanto^b
Mohd Haris Md Khir^c, Harry Ramza^a

^aProgram Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA
Jalan Tanah Merdeka No.6, Ciracas, Kp Rambutan, Jakarta 13820, INDONESIA
E-mail : muhammadramdani@uhamka.ac.id; mujirudin@uhamka.ac.id; hramza@uhamka.ac.id

^bJurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik
Universitas Dirgantara Marsekal Suryadarma
Jalan Protokol Halim Perdanakusuma, Komplek Bandara, Jakarta 13810 INDONESIA
E-mail : dewantoandreas@yahoo.com

^cDepartment of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering
Universitas Teknologi PETRONAS
32610, Seri Iskandar Campuss, Perak Darul Ridzuan, MALAYSIA
E-mail : harisk@utp.edu.my

Abstrak

Keberadaan teknologi robotika pada saat ini sangat membantu aktivitas manusia untuk mempermudah melakukan pekerjaan. Salah satu teknologi robotika saat ini yaitu lengan robot. Lengan robot merupakan jenis robot yang menyerupai lengan manusia yang dapat memindahkan suatu barang dari satu tempat ke tempat lainnya. Namun ketika lengan robot akan digunakan untuk mengangkat sesuatu maka dibutuhkan perhitungan yang khusus agar barang dapat berpindah tempat, maka lengan robot tersebut harus dilengkapi sistem rekaman gerakan agar dapat terkendali sesuai keinginan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang lengan robot yang memiliki 6 derajat kebebasan dan mampu merekam gerakan yang sudah dikerjakannya secara terus menerus dengan menentukan kepresisian maksimum dan nilai waktu tunda. Lengan robot dirancang menggunakan mikrokontroler ATMEGA 2560 dimana mikrokontroler tersebut sudah memiliki fitur yang langsung berhubungan dengan pengendali motor stepper. Lengan robot memiliki enam buah motor stepper untuk menggerakkan masing-masing sumbu berdasarkan enam bagian yaitu; putaran dasar, siku, bahu, putaran pergelangan tangan, pergelangan serta sebagai *end-effectors* adalah penggenggam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa lengan robot mampu merekam jejak gerakan dengan jangkauan maksimum pergerakan robot sejauh 30 cm dengan nilai rata-rata maksimum SWP (Waktu Sikap Perjalanan) 18.08 detik dan LP (Latensi Penggerak) dengan nilai maksimum yaitu 20.21 detik. Untuk nilai KP (keakuratan peletakan) dengan perpindahan maksimum untuk semua percobaan memiliki nilai sebesar 0.35 cm dan PP (Kemampuan posisi pengulangan) yang paling besar nilai 0.41 cm.

Kata kunci : Lengan Robot, 6 DOF, rekaman gerakan, Motor Stepper, Mikrokontroler, Arduino Mega 2560

Abstract

The present existence of robotic technology is the most contributing to human activities for making it easier to do daily jobs. One of the robotic technologies that are well known is the arm robot. The arm robot is the robotic type that similar to the human arm and also can move the material from a particular position to the other position. However, when using the robot arm to lift something, special calculations are required to allow goods to move. Therefore, the robot arm needs to be fitted with a motion recording system so it can be operated as desired. The goal of the research is to build a robot arm that has six degrees of freedom and ability to continuously record robot movements by determining the maximum precision and the value of delay time. The robot arm is designed by using microcontroller ATMEGA 2560, whereas the microcontroller has features that directly relate to the driver circuit of the stepper motor. The robot arm has six of the motor stepper to move each axis based on the six parts such as; base rotates, elbow, shoulder, wrist rotate and, wrist and roll as well as the end-effectors is a gripper. The research result shows that the arm robot able to record the tracking movement with the maximum range of robot movement is 30 cm with the maximum of average value of the pose travel time (SWP) amount 18.08 second and the maximum value of the actuation latency (LP) amount of 20.21 second. In position accuracy (KP) with maximum movement for all the robot movement experiment has been value amount 0.35 cm and the biggest value of the position repeatability is 0.41 cm.

Keywords : arm-robot, 6 degree of freedom, record movement, stepper motor, microcontroller, Arduino Mega 2560.

Received 26 Juli 2020; Accepted 28 Juli 2020

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi saat ini robotika sangat membantu dan mempermudah aktifitas manusia dalam melakukan pekerjaannya. Salah satu teknologi saat ini yaitu robotika lengan robot atau biasa disebut juga dengan lengan robot manipulator.

Lengan robot terdiri dari beberapa gabungan penghubung yang dibagi menjadi enam *joint* yaitu putaran dasar (*base rotate*), Bahu (*shoulder*), Siku (*elbow*), Putaran pergelangan tangan (*wrist rotate*), Pergelangan tangan dan gulungan (*Roll*) [1]. Lengan robot manipulator merupakan alat mekanik yang menggantikan pekerjaan manusia yang berhubungan dengan pekerjaan fisik rentan terjadinya *human error* akibat pekerjaan yang dilakukan sifatnya berulang-ulang, mempunyai resiko yang sangat tinggi untuk mengangkat barang dari satu tempat ke tempat lain seperti barang berat, barang berbahaya, melakukan pekerjaan dengan cepat, presisi dan membutuhkan daya tahan serta konsentrasi yang sangat tinggi sehingga dapat berpotensi membahayakan keselamatan kerja [2].

Lengan robot yang akan dibuat terdiri sebagai berikut:

1. Dikendalikan oleh mikrokontroler
2. Menggunakan sistem rekaman gerakan padalengan robot.
3. Menggunakan 6 buah motor stepper dengan seri nema17hs2408 untuk aktuator dan driver motor dengan tipe A4988.
4. Gripper sebagai end effector dengan servo Motor.
5. Mekanik keseluruhan lengan robot terbuat dari teknologi 3D printer dengan bahan filament PLA.

2. Dasar Teori

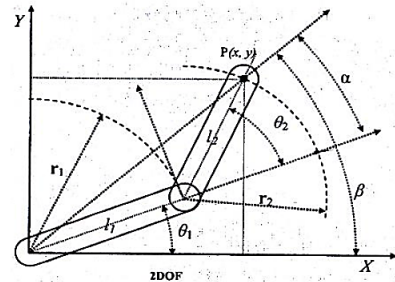
2.1. Lengan Robot

Lengan robot memiliki tiga bagian utama yaitu struktur bagian mekanik, bagian penggerak (actuator), dan bagian elektrik. Bagian mekanik merupakan bagian yang terdiri dari susunan rangka lengan robot yang terhubung satu sama lain oleh *joint* (sendi) dan *link* (penghubung tiap *joint*).

Lengan robot dapat bergerak menggunakan 6 buah motor stepper sebagai aktuatornya yang bergerak berdasarkan 6 bagian yaitu *base rotate*, *shoulder*, *elbow*, *wrist rotate*, *wrist* dan *roll* serta sebagai *end-effector* adalah *gripper*. Derajat kebebasan (*Degree of Freedom*) adalah sambungan pada lengan yang dapat diputar maupun digeser. Derajat kebebasan digunakan untuk mengetahui cara robot bergerak dan jumlah aktuator lengan robot yang digunakan.

Kinematika dalam robotika adalah suatu pernyataan berisi tentang deskripsi matematik geometri dari struktur robot. Dari persamaan kinematika diperoleh hubungan antara konsep geometri ruang sendi pada robot dengan konsep koordinat yang sering dipakai untuk menentukan kedudukan dari objek benda dengan model kinematika, dapat ditentukan konfigurasi tinjauan input yang harus diumpun ketiap aktuator agar robot dapat menggerakkan seluruh sendi (*simultan*) untuk mencapai posisi yang dikehendaki [3].

Kinematika lengan robot 2 sendi ditunjukkan pada Gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Kinematika Lengan Robot 2 sendi [3].

Invers Kinematik lengan robot dua sendi pada gambar 1 dapat dijabarkan menggunakan rumus trigonometri secara forward kinematika. Kedudukan ujung lengan dinyatakan sebagai $P(x,y)$, dengan [3]:

$$P(x,y) = f(\theta_1, \theta_2)$$

Jika p diasumsikan sebagai vektor penjumlahan yang terdiri dari vektor r_1 lengan r_1 dan r_2 lengan r_2 , yaitu :

$$r_1 = [l_1 \cos(\theta_1) \quad l_1 \sin(\theta_1)] \quad (1)$$

$$r_2 = [l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)] \quad (2)$$

Maka,

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

Persamaan (3) dan (4) dapat diperoleh menggunakan analisis kinematika maju dengan hukum identitas trigonometri [3]:

$$\cos(a + b) = \cos(a)\cos(b) - \sin(a)\sin(b) \quad (5)$$

$$\sin(a + b) = \sin(a)\cos(b) + \sin(b)\cos(a) \quad (6)$$

maka didapatkan:

$$P_x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) - l_2 \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \quad (7)$$

$$P_y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) + l_2 \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) \quad (8)$$

Dari Persamaan (7) dan (8) serta menggunakan analisis kinematika balik, maka akan didapatkan:

$$\theta_2 = \cos^{-1} \left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \right) \quad (9)$$

Sedangkan sudut θ_1 dapat dicari melalui,

$$\tan \alpha = \frac{l_2 \sin(\theta_2)}{l_2 \cos(\theta_2) + l_1} \text{ dan } \tan \beta = \frac{y}{x} \quad (10)$$

sudut dapat dicari melalui θ_1 dapat dicari melalui

$$\theta_1 = \beta - \alpha \quad (11)$$

Dengan hukum identitas trigonometri :

$$\tan(a + b) = \frac{\tan a + \tan b}{1 - \tan a \tan b} \quad (12)$$

didapatkan:

$$\tan(\theta_1) = \frac{y \cdot l_1 + l_2 \cos \theta_2 - x \cdot l_2 \sin \theta_2}{x \cdot l_1 + l_2 \cos \theta_2 - y \cdot l_2 \sin \theta_2} \quad (13)$$

Sehingga

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y \cdot l_1 + l_2 \cos \theta_2 - x \cdot l_2 \sin \theta_2}{x \cdot l_1 + l_2 \cos \theta_2 - y \cdot l_2 \sin \theta_2} \quad (14)$$

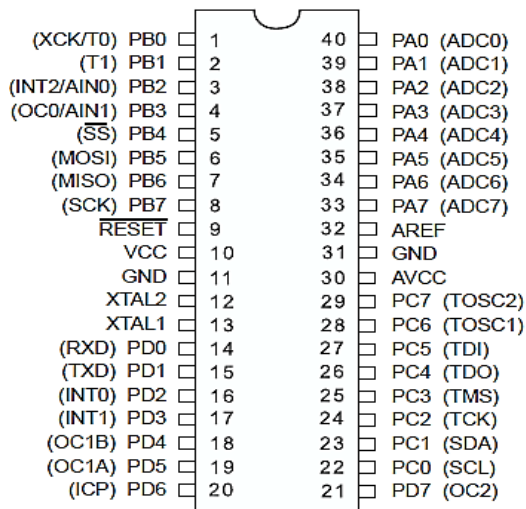
Dengan penjabaran trigonometri maka persamaan (1) sampai (14) merupakan persamaan dari invers kinematika lengan robot dua sendi[3].

2. 2. Microcontroller ATMEGA16

Mikrokontroler Atmega merupakan seri mikrokontroler CMOS 8-bit buatan Atmel, berbasis arsitektur RISC (*Reduced Instruction Set Computer*). Hampir semua instruksi dieksekusi dalam satu siklus waktu. AVR mempunyai 32 register *general-purpose, timer atau counter* fleksibel dengan mode *compare, interrupt internal* dan *eksternal*, serial UART, *programmable Watchdog Timer*, dan mode *power saving, ADC* dan PWM internal.

Mikrokontroler jenis ini juga mempunyai *In-System Programmable Flash on-chip* yang memungkinkan memori program untuk diprogram ulang dalam sistem menggunakan hubungan serial SPI. Atmega16 mempunyai *throughput* mendekati 1 MIPS per MHz membuat disainer sistem untuk mengoptimasi konsumsi daya untuk kecepatan proses[4].

Mikrokontroler Atmega16 memiliki 40 pin, 32 pin diantaranya adalah directional I/O yang terbagi dalam 4 port. Dapat dilihat pada gambar dibawah ini:



Gambar 2 Pin-pin Atmega16[4]

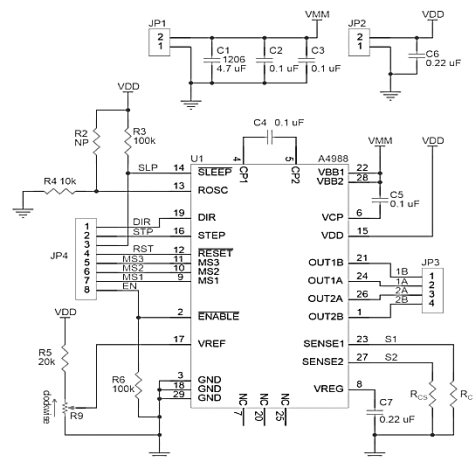
Konfigurasi pin Atmega16 dengan kemasan 40 pin DIP (*Dual In-line Package*) dapat dilihat pada gambar 2.1. Dari gambar tersebut diatas dapat dijelaskan fungsi dari masing-masing pin Atmega16 sebagai berikut [4]:

1. Vcc merupaka pin yang berfungsi sebagai masukan catu daya.
2. GND merupakan pin Ground.
3. Port A (PA0...7) merupakan pin input atau output dua arah dan pin masukan ADC.
4. Port B (PB0...7) merupakan pin input atau output dua arah dan pin dengan fungsi khusus seperti SPI, MISO, MOSI, SS, AINI/OCO, AIN0/INT2, TI, T0 T1/XCK.
5. Port C (PC0...7) merupakan pin input atau output dua arah dan pin dengan fungsi khusus seperti TOSC2, TOSC1, TDI, TD0, TMS, TCK, SDA, SCL.
6. Port D (PD0...7) merupakan pin input atau output dua arah dan pin fungsi khusus seperti RXD, TXD, INT0, INT1, OCIB, OCIA, ICPI

7. RESET meupakan pin yang digunakan untuk me-reset mikrokontroler
8. XTAL1 dan XTAL2 merupakan pin masukan clock eksternal
9. AVCC merupakan tegangan masukan pin ADC.
10. AREF merupakan pin masukan tegangan referensi ADC

2. 3. Pengendali (Driver) Motor Servo

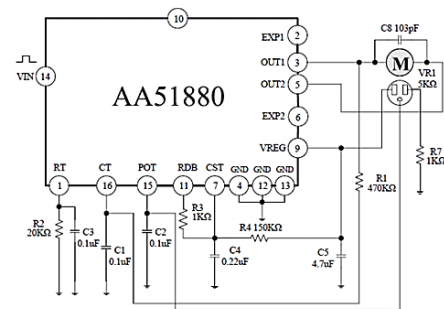
Pengendali stepper motor adalah *pengendali microstepping* motor yang dilengkapi dengan IC A4988. Kemampuan driver mengeluarkan tegangan hingga 35 V dan ± 2 Ampere. Arus yang dikeluarkan oleh IC A4988 dapat diatur sesuai spesfikasi motor yang digunakan. Skematik rangkaian pengendali stepper motor dapat dilihat seperti pada gambar 3 dibawah ini[5].



Gambar 3. Skematik Driver Motor Stepper[5]

2. 4. Motor Servo

Motor servo adalah sebuah motor DC yang dilengkapi rangkaian kontrol dengan sistem umpan balik tertutup. Pada motor servo posisi dari motor akan diinformasikan kembali rangkaian kontrol yang ada di dalam motor servo [6]. Skematik rangkaian kontrol motor servo dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 4. Skematik Rangkaian Kontrol Elektrik Motor Servo [6]

3. Metodologi Penelitian

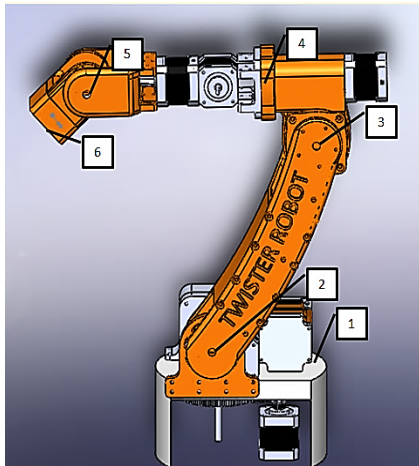
3. 1. Perancangan Lengan Robot

Dalam penelitian ini kerangka lengan robot akan dibuat menggunakan bahan Filament PLA dengan bantuan mesin

printer 3D. Pada perancangan lengan robot menggunakan 6 buah motor stepper sebagai actuator dan 1 buah motor servo sebagai penjepit (gripper).

Gambar 5 merupakan perancangan mekanik lengan robot dimana 6 bagian utama pada robot tersebut berperan sebagai penghubung (link), yang meliputi :

1. Bagian putar dasar (*Base rotate*)
2. Bagian bahu (*Shoulder*)
3. Bagian siku (*Elbow*)
4. Putaran pergelangan tangan (*wrist rotate*)
5. Bagian Pergelangan (*Wrist*)
6. Bagian gulungan (*Roll*) untuk *Gripper*



Gambar 5. Perancangan Mekanik Lengan Robot

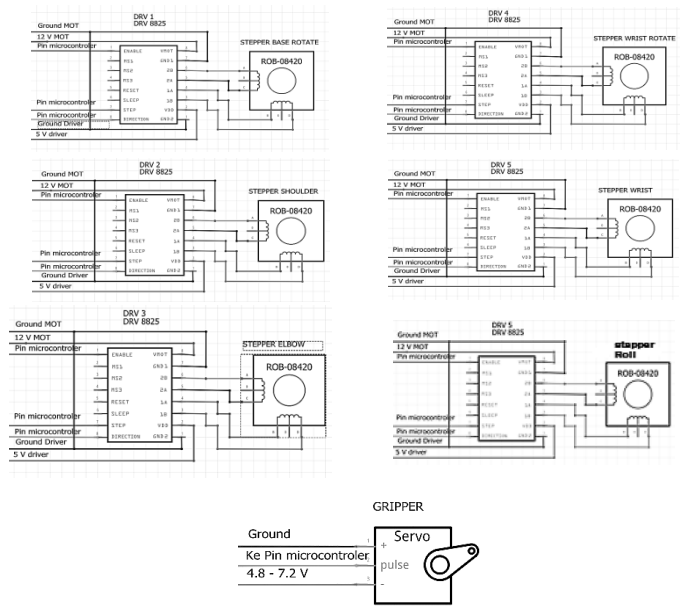
Tabel 1 dibawah ini merupakan nilai spesifikasi perancangan yang ditetapkan. Pada kolom ke 4 merupakan sensitifitas sudut yang didapat dari hasil ukur secara manual. Untuk kolom ke 5 merupakan sudut maksimum yang diperoleh dari hasil pengujian akhir.

Tabel 1. Spesifikasi Perancangan Lengan Robot

| No | Lengan penghubung (joint) | Panjang semua bagian lengan robot | Sensitifitas sudut | Sudut maksimum yang dapat dijangkau |
|----|---|-----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 1 | Putaran dasar (<i>base rotate</i>) | 185 mm | 0° - 360° | 360° |
| 2 | Bahu (<i>shoulder</i>) | 240 mm | 0° - 120° | 120° |
| 3 | Siku (<i>Elbow</i>) | 60 mm | 0° - 110° | 110° |
| 4 | Pemutar pergelangan (<i>wrist rotate</i>) | 200 mm | 0° - 340° | 340° |
| 5 | Pergelangan (<i>wrist</i>) | 60 mm | 0° - 120° | 120° |
| 6 | Gulungan (<i>Roll</i>) | 30 mm | 0° - 180° | 180° |
| 7 | Penggenggam (<i>Gripper</i>) | 130 mm | 100° - 180° | 80° |

3.2. Perancangan Rangkaian Motor Stepper dan Motor Servo

Robot lengan manipulator menggunakan motor berjumlah 7 buah, 6 buah motor stepper untuk menggerakkan masing-masing lengan robot dan 1 buah motor servo untuk menggerakkan gripper. Skematik rangkaian motor stepper dan motor servo ditunjukkan pada gambar 6 dibawah ini.

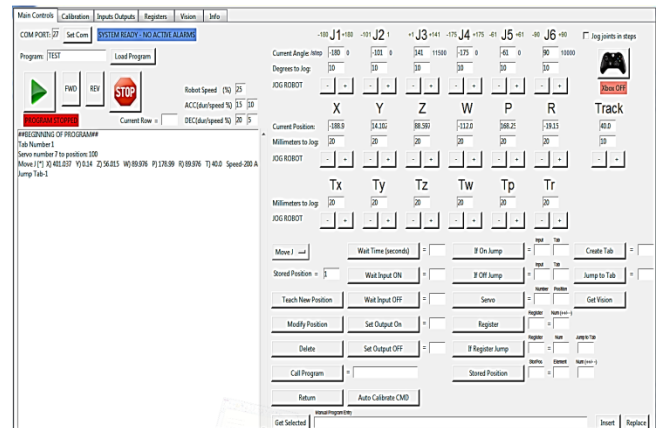


Gambar 6. Skematik Rangkaian Motor Stepper dan Motor Servo

3.3. Antarmuka Software Lengan Robot

Untuk menggerakkan lengan robot tersebut yaitu membutuhkan *Software* dengan melalui koneksi jaringan Nirkabel, penulis memanfaatkan *Software* yang sudah tersedia yang *Open Source*. Dengan kata kunci “AR2 AnninRobotics”, *Software* ini sebagai *remote control* untuk mengirimkan perintah ke lengan robot.

Software ini sudah dilengkapi dengan kinematik maju dan kinematik terbalik. Antarmuka untuk menggerakkan lengan robot dibuat seperti gambar 7 dibawah ini.



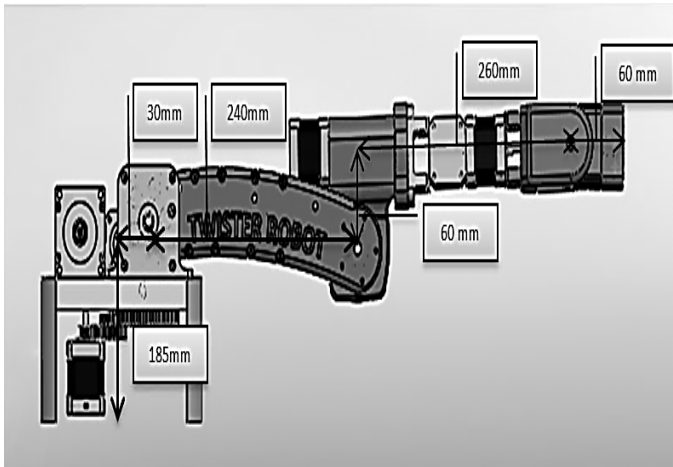
Gambar 7. Antarmuka Software untuk Rekaman Gerakan.

3.4. Menentukan DH Parameter Kinematika 6 DOF.

Kinematika robot bertujuan untuk menghitung pose efektor akhir dari posisi sendi. Pada kinematik maju kita memberikan nilai pada setiap sudut motor stepper dan mendapatkan posisi end-effector, sedangkan pada kinematik terbalik kita memberi masukan berupa posisi dan robot lengan akan mencari sudut pada tiap motor stepper agar

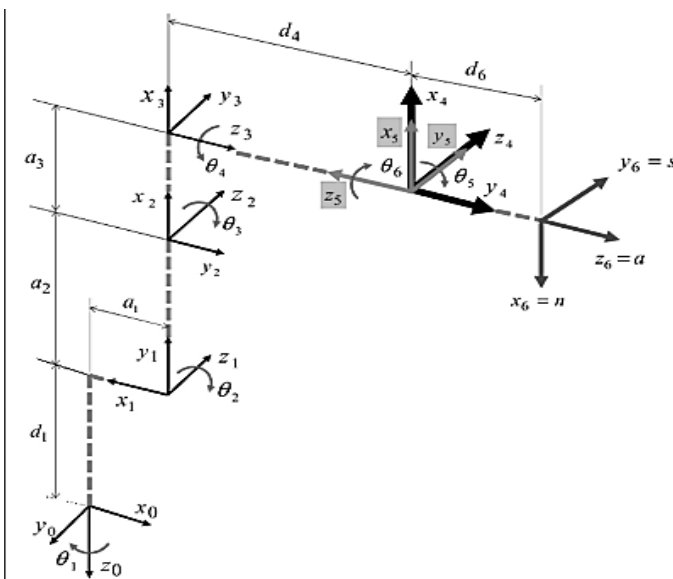
posisi end effector tepat sesuai dengan posisi yang diinginkan.

Parameter Denavit-Hartenberg (DH) diperlukan untuk memasukkan model robot ke dalam DH parameter yang telah disediakan pada software Ar2.



Gambar 8. Model Robot 6 DOF

Penyambungan (*joint*) telah memiliki ukuran masing-masing yang akan disesuaikan berdasarkan ketentuan DH parameter *Denavit-Hartenberg*. Untuk menentukan perhitungan DH parameter *Denavit-Hartenberg* dapat dilihat pada diagram kinematika 6 DOF dibawah ini[7].



Gambar 9. Diagram Kinematika 6 DOF[7]

Setiap sambungan memiliki satu nilai yang merupakan variabel yang mewakili sambungan yang digerakkan.

Berdasarkan perhitungan dengan mengacu pada diagram kinematika terdapat DH parameter Dari *Denavit - Hartenberg* pada tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. DH Parameter Dari Denavit Hartenberg[7]

| Joint | Θ (Theta) | Tautan Putar (Link Twist) α | Tautan keseimbangan (Link Offset) D | Tautan Panjang (Link Length) a |
|-------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0,000174533 | -1,570796327 | 185 | 30 |
| 2 | -1,570796327 | 0 | 0 | 240 |
| 3 | -2,48026E-16 | 1,570796327 | 0 | 60 |
| 4 | 0,000174533 | -1,570796327 | -260 | 0 |
| 5 | 0,000174533 | 1,570796327 | 0 | 0 |
| 6 | 3,141767187 | 0 | -60 | 0 |

Pada tabel diatas dapat dijelaskan secara rinci bahwa:

1. Nilai θ (theta) didapat dari, dimana:
 - a. Joint $-n$ menggunakan nilai yang ditentukan dari besaran yang diukur secara manual.
 - b. Sudut minimum menyatakan nilai rentang maksimum yang bergerak kearah kiri
 - c. Sudut minimum menyatakan nilai rentang minimum yang bergerak kearah kanan
 - d. Nilai-nilai (θ) pada tabel diatas didapat dari : $joint - n = radians(n)$
2. Nilai Tautan putar (alpha) tetap pada posisinya atau tidak berubah mereka tetap pada nilai default negatif 90, nol, positif 90, negatif 90, positif 90, 0 maka tautan selanjutnya yang akan menghubungkan nilai-nilai yang akan berubah. Nilai joint-n (alpha) diatas di convert menjadi radians (nilai default-n).
3. Nilai tautan keseimbangan didapat dari besaran yang diukur secara manual yang terdapat pada gambar 8.
4. Nilai tautan panjang didapat dari besaran yang diukur secara manual yang terdapat pada gambar 8 diatas.

3.5. Index Kinerja Kunci Robot

Metrik kinerja robot dapat diperoleh dengan menangkap perintah dan mengontrol komunikasi yang digunakan oleh robot. Karena protokol komunikasi yang digunakan oleh robot memanfaatkan perangkat keras Arduino yang ada, Protokol komunikasi dapat ditangkap langsung dari antarmuka fisik, atau dengan alat in-line.

Setiap paket protokol berisi semua metrik yang ditunjukkan pada Tabel 3, dan ditransmisikan dengan kecepatan 700 Hz. Komunikasi ini adalah level terendah yang dapat ditangkap, karena paket pada jalur ini langsung menuju ke masing-masing sendi robot[8].

Tabel 3. Metrik Kinerja Robot[8]

| No | Metrik | Keterangan |
|----|--|---|
| 1 | Posisi Sambungan (Joint Position) | Posisi setiap sambungan robot |
| 2 | Titik Atur Sambungan (Joint Setpoint) | Pengaturan titik awal setiap sambungan robot. |
| 3 | Kecepatan Sambung (Joint Velocity) | Kecepatan setiap sambungan robot. |
| 4 | Arus sambungan (Joint Current) | Arus listrik setiap sambungan robot. |
| 5 | Penanda pengatur sambungan (Joint Control Flags) | Penanda menjelaskan status operasi setiap sambungan robot |

Karena sejumlah besar data yang dikirim selama paket protokol komunikasi menangkap data pada antarmuka ini

dengan waktu terbatas dan biasanya dicadangkan untuk percobaan di mana dampak kinerja robot dapat diantisipasi karena hasil sementara diperoleh dari nilai metrik (pada tabel 3) dan nilai KPI (Indikator Kinerja Kunci) pada tabel 4 yang lebih mudah didapatkan[8].

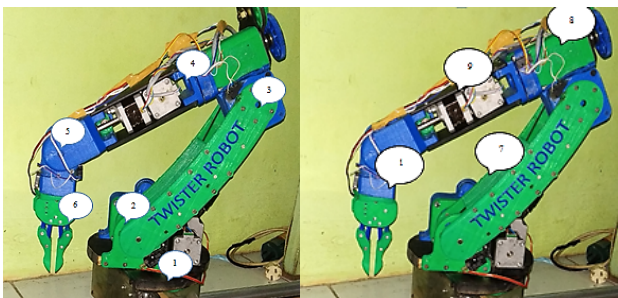
Tabel 0. IKK (Indikator Kinerja Kunci) Robot[8]

| No | Indikator Kinerja | Keterangan |
|----|---|---|
| 1 | Latensi Penggerak - LP (<i>Actuation Latency</i>) | Jumlah waktu yang diperlukan untuk lengan robot untuk mulai bergerak setelah pekerjaan baru diterima |
| 2 | Waktu Sikap Perjalanan - SWP (<i>Pose Travel Time</i>) | Jumlah waktu pada lengan robot untuk bergerak di antara dua sikap kerja. |
| 3 | Keakuratan Peletakan - KP (<i>Position Accuracy</i>) | Penyimpangan antara posisi yang diperintahkan dan posisi yang diukur. |
| 4 | Kemampuan Posisi Pengulangan - PP (<i>Position Repeatability</i>) | Kesepakatan antara posisi yang diukur setelah n-pengulangan kunjungan dengan perintah posisi yang sama. |
| 5 | Konsumsi Energi - KE (<i>Energy Consumption</i>) | Perkiraan jumlah daya yang dikonsumsi oleh motor sambungan robot |
| 6 | Waktu Pelaksanaan Kerja - WPK (<i>Job Execution Time</i>) | Jumlah waktu yang dibutuhkan robot untuk menyelesaikan pekerjaan |

4. Pembahasan dan Analisa

4. 1. Hasil Perancangan Lengan Robot

Hasil dari perancangan lengan robot ini terdiri dari kerangka yang saling dihubungkan membentuk lengan robot yang sebagian besar terbuat dari bahan plastik PLA (*polylactic Acid*) yang dirancang menggunakan *3D printer*. Selain itu terdapat juga link dan joint yang ada dalam mekanik lengan robot. Hasil dari perancangan lengan robot dapat dilihat pada gambar 10 dibawah ini.



Gambar 10. Hasil Perancangan Lengan Robot

Keterangan pada gambar 10:

1. Nomor 1 merupakan bagian *Base Rotate* lengan robot
2. Nomor 2 merupakan *Shoulder* lengan robot
3. Nomor 3 merupakan bagian *Elbow* lengan robot
4. Nomor 4 merupakan bagian *wrist Rotate* lengan robot
5. Nomor 5 merupakan bagian *wrist* lengan robot
6. Nomor 6 merupakan bagian *end effector* yaitu *gripper*
7. Nomor 7 merupakan link 1 penghubung antara *Base Rotate* dengan *Shoulder* untuk menggerakkan bagian *elbow*
8. Nomor 8 adalah bagian link *elbow* yang berhubungan dengan *Wrist Rotate*.
9. Nomor 9 merupakan link 2 penghubung antara *wrist*

rotate dengan *wrist* untuk menggerakkan bagian *Roll*
10. Nomor 10 merupakan bagian penghubung untuk menggerakkan bagian *end-effector*

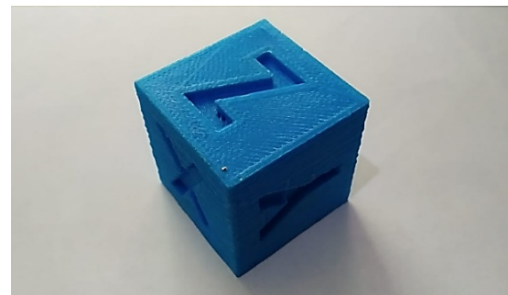
4. 2. Pengujian Lengan Robot

Metode penentuan waktu perpindahan gerakan robot secara umum terdiri dari dua, yaitu perpindahan secara homogeny sumbu (x dan y) dan perpindahan secara bertumpuksumbu (x dan y). Penentuan waktu perpindahan gerakan ini ditentukan untuk mendapatkan nilai IKK (indikator kinerja kunci) robot sesuai dengan kedua arah sumbu (x dan y).

Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data hanya berdasarkan metode perpindahan lengan homogeny sumbu (x dan y) dan perpindahan secara bertumpuk sumbu (x dan y).

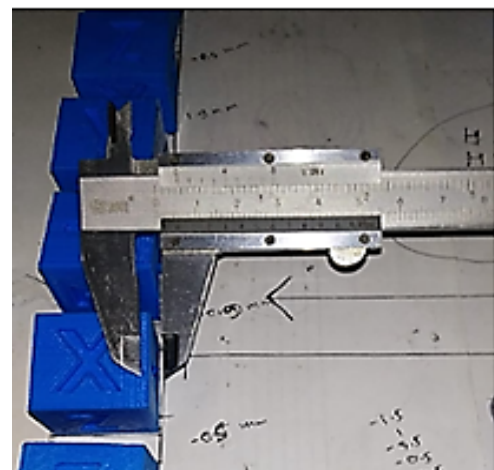
4. 2. 1. Perpindahan barang Sistem Homogen

Jumlah percobaan yang dilakukan pada sistem homogen sumbu X sebanyak 8 percobaan. Untuk setiap percobaan menggunakan objek 3 dimensi yang di cetak menggunakan 3D Printer dengan ukuran (3 x 3 x 3 cm) yang dapat dilihat bentuk objek pada gambar dibawah ini.



Gambar 11. Bentuk Sampel Percobaan

Hasil cetak tersebut akan digunakan untuk pengambilan data pada lengan robot berdasarkan perpindahan setiap sumbu dengan sistem homogen dan sistem tumpukan yang telah dijelaskan diatas. Hasil perpindahan ini akan diukur tingkat kepresisiannya dengan jangka sorong berdasarkan Index Kinerja Kunci robot (IKK). Proses pengukuran sampel dapat dilihat pada gambar 12 dibawah ini.



Gambar 12. Proses Pengukuran dengan Jangka Sorong

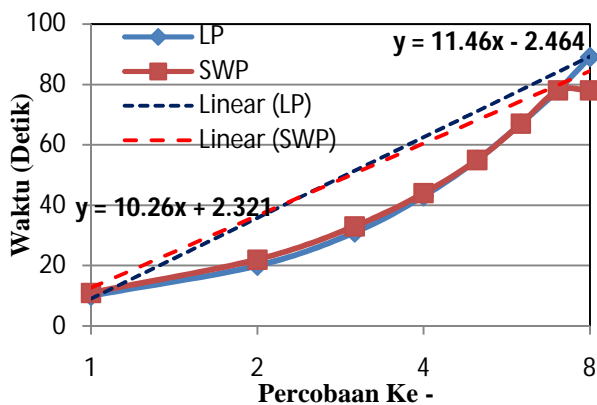
a. Sistem Homogen Sumbu-X

Untuk menyelesaikan pekerjaan pada sistem homogen Sumbu - X membutuhkan waktu 155 detik dengan menghitung waktu LP dan waktu SWP. Konsumsi energi atau perkiraan jumlah daya yang dikonsumsi oleh motor keseluruhan yang paling tertinggi pada percobaan 3 yaitu 5,28 Ampere yang dapat dilihat pada tabel indikator 5 dibawah ini.

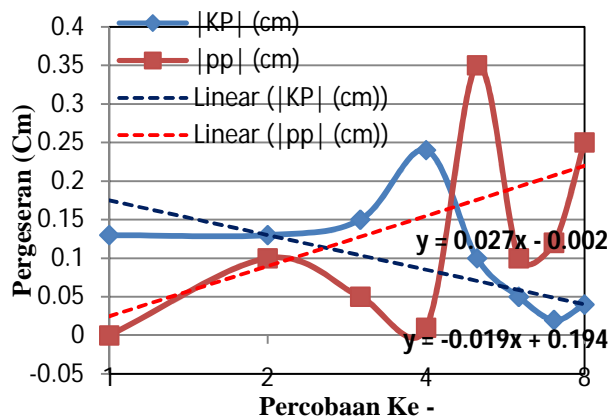
Tabel 5. Indikator Kinerja Kunci Robot Sistem Homogen Sumbu - X

| Percobaan | LP (dalam detik) | SWP (dalam detik) | KP (Cm) | PP (Cm) | KE (Ampere) |
|-----------|------------------|-------------------|----------|----------|-------------|
| 1 | 10,94 | 11,32 | 0,13 | - | 4,59 |
| 2 | 10,36 | 11,66 | 0,13 | 0,1 | 5,12 |
| 3 | 11,56 | 11,98 | 0,15 | 0,05 | 5,28 |
| 4 | 12,01 | 11,72 | 0,24 | 0,01 | 5,00 |
| 5 | 12,30 | 11,43 | 0,1 | 0,35 | 5,31 |
| 6 | 12,21 | 12,89 | 0,05 | 0,1 | 4,85 |
| 7 | 11,79 | 11,31 | 0,02 | 0,12 | 5,05 |
| 8 | 11,41 | - | 0,04 | 0,25 | 5,17 |

Tabel 5 diatas dapat dibuat grafik pergerakan pengulangan (*iterasi*) dan pergerakan kepresisian secara akumulatif untuk setiap percobaan. Grafik pergerakan pengulangan tersebut dapat dilihat pada gambar 13 dan grafik nilai kepresisian pada gambar 14 dibawah ini.



Gambar 13. Grafik Pergerakan Pengulangan Homogen Sumbu - X



Gambar 14. Grafik Nilai Kepresisian Pengulangan Homogen Sumbu - X

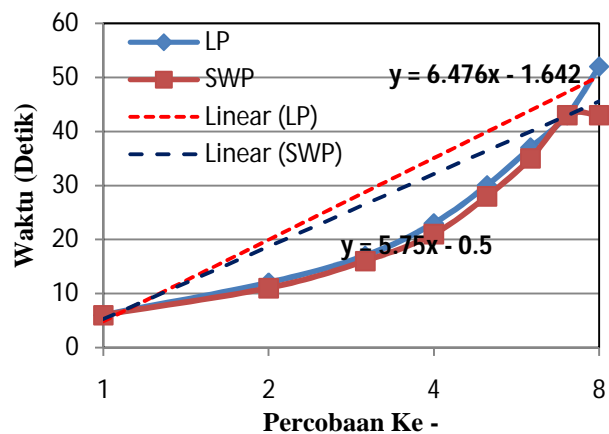
b. Sistem Homogen Sumbu-Y

Waktu Pelaksanaan Kerja - WPK (*Job Execution Time*) yaitu jumlah waktu yang dibutuhkan robot untuk menyelesaikan pekerjaan pada sistem homogen Sumbu - Y membutuhkan waktu 98 detik dengan menghitung waktu LP dan waktu SWP. Konsumsi energi atau perkiraan jumlah daya yang dikonsumsi oleh motor keseluruhan yang paling tertinggi pada percobaan 8 yaitu 5.29 Ampere yang dapat dilihat pada tabel indikator 6 dibawah ini.

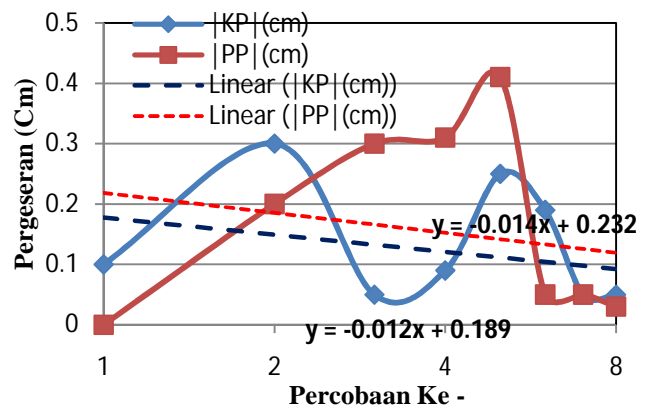
Tabel 6. Indikator Kinerja Kunci Robot Sistem HomogenSumbu-Y

| Percobaan | LP (dalam detik) | SWP (dalam detik) | KP (Cm) | PP (Cm) | KE (Ampere) |
|-----------|------------------|-------------------|----------|----------|-------------|
| 1 | 6,36 | 6,06 | 0,1 | - | 5,15 |
| 2 | 6,14 | 5,44 | 0,3 | 0,2 | 4,88 |
| 3 | 5,73 | 5,84 | 0,05 | 0,3 | 5,09 |
| 4 | 6,77 | 6,82 | 0,09 | 0,31 | 5,19 |
| 5 | 7,49 | 7,28 | 0,25 | 0,41 | 3,74 |
| 6 | 7,53 | 7,74 | 0,19 | 0,05 | 5,14 |
| 7 | 8,13 | 8,66 | 0,05 | 0,05 | 4,14 |
| 8 | 9,03 | - | 0,05 | 0,03 | 5,29 |

Tabel 6 diatas dapat dibuat grafik pergerakan pengulangan (*iterasi*) dan pergerakan kepresisian secara akumulatif untuk setiap percobaan. Grafik pergerakan pengulangan tersebut dapat dilihat pada gambar 15 dan grafik nilai kepresisian pada gambar 16 dibawah ini.



Gambar 15. Grafik Pergerakan Pengulangan Homogen Sumbu - Y



Gambar 16. Grafik Nilai Kepresisian Pengulangan Homogen Sumbu - Y

4. 2. 2. *Perpindahan Barang Sistem Tumpukan*

Jumlah percobaan yang dilakukan pada sistem tumpukan sumbu X sebanyak 8 percobaan. Untuk jenis sampel dan pengambilan data sistem tumpukan sama dengan sistem homogen.

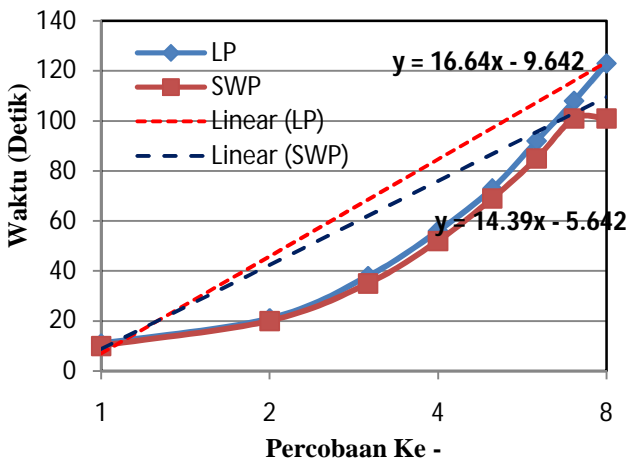
a. *Sistem Tumpukan Sumbu-X*

WPK (Waktu pelaksanaan kerja) yaitu jumlah waktu yang dibutuhkan robot untuk menyelesaikan pekerjaan pada sistem tumpukan Sumbu - X membutuhkan waktu 224 detik dengan menghitung waktu LP dan waktu SWP. Konsumsi energi atau perkiraan jumlah daya yang dikonsumsi oleh motor keseluruhan yang paling tertinggi pada percobaan 3 yaitu 5,64 Ampere yang dapat dilihat pada tabel indikator 7 dibawah ini.

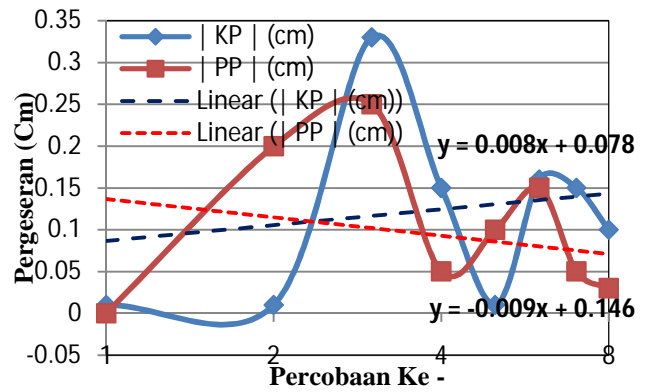
Tabel 7. Indikator Kinerja Kunci Robot Sistem Tumpukan Sumbu – X

| Percobaan | LP (dalam detik) | SWP (dalam detik) | KP (Cm) | PP (Cm) | KE (Ampere) |
|-----------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 11,90 | 10,24 | 0,01 | - | 5,12 |
| 2 | 10,26 | 10,79 | 0,01 | 0,2 | 5,50 |
| 3 | 17,19 | 15,32 | 0,33 | 0,25 | 5,64 |
| 4 | 18,38 | 17,05 | 0,15 | 0,05 | 5,58 |
| 5 | 17,05 | 17,91 | 0,01 | 0,10 | 5,16 |
| 6 | 19,50 | 16,61 | 0,16 | 0,15 | 5,35 |
| 7 | 16,06 | 16,08 | 0,15 | 0,05 | 5,47 |
| 8 | 15,29 | - | 0,10 | 0,03 | 5,45 |

Tabel 7 diatas dapat dibuat grafik pergerakan pengulangan (*iterasi*) dan pergerakan kepresisian secara akumulatif untuk setiap percobaan. Grafik pergerakan pengulangan tersebut dapat dilihat pada gambar 17 dan grafik nilai kepresisian pada gambar 18 dibawah ini.



Gambar 17. Grafik Pergerakan Pengulangan Tumpukan Sumbu – X



Gambar 18. Grafik Nilai Kepresisian Pengulangan Tumpukan Sumbu – X

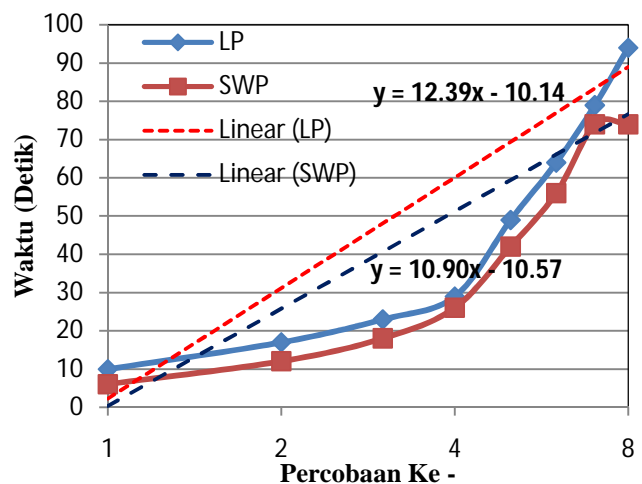
b. *Sistem Tumpukan Sumbu-Y*

Waktu yang dibutuhkan robot untuk menyelesaikan pekerjaan pada sistem tumpukan Sumbu-Y membutuhkan waktu 168 detik dengan menghitung waktu LP dan waktu SWP. Konsumsi energi atau perkiraan jumlah daya yang dikonsumsi oleh motor keseluruhan yang paling tertinggi pada percobaan 3 dan 6 yaitu 5,74 Ampere yang dapat dilihat pada tabel indikator 8 dibawah ini.

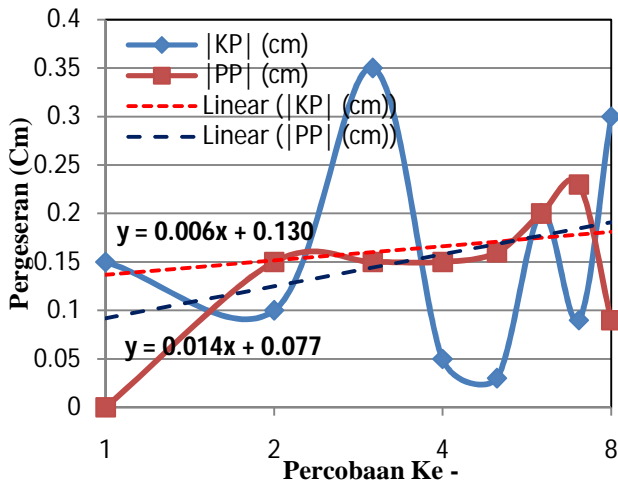
Tabel 8. Indikator Kinerja Kunci Robot Sistem Tumpukan Sumbu – Y

| Percobaan | LP (dalam detik) | SWP (dalam detik) | KP (Cm) | PP (Cm) | KE (Ampere) |
|-----------|------------------|-------------------|-----------|-----------|-------------|
| 1 | 10,94 | 6,90 | 0,15 | - | 5,59 |
| 2 | 7,67 | 6,69 | 0,10 | 0,15 | 5,59 |
| 3 | 6,77 | 6,46 | 0,35 | 0,15 | 5,44 |
| 4 | 6,47 | 8,07 | 0,05 | 0,15 | 5,03 |
| 5 | 20,21 | 16,32 | 0,03 | 0,16 | 5,74 |
| 6 | 15,96 | 14,77 | 0,20 | 0,20 | 5,74 |
| 7 | 15,52 | 18,08 | 0,09 | 0,23 | 5,59 |
| 8 | 15,54 | - | 0,30 | 0,09 | 5,59 |

Tabel 8 diatas dapat dibuat grafik pergerakan pengulangan (*iterasi*) dan pergerakan kepresisian secara akumulatif untuk setiap percobaan. Grafik pergerakan pengulangan tersebut dapat dilihat pada gambar 19 dan grafik nilai kepresisian pada gambar 20 dibawah ini.



Gambar 19. Grafik Pergerakan Pengulangan Tumpukan Sumbu – Y



Gambar 20. Grafik Nilai Kepresisian Pengulangan Tumpukan Sumbu -Y

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang didapat untuk perpindahan barang membutuhkan waktu yang cukup lama karena suatu objek yang dikerjakan membutuhkan waktu pergerakan axis robot untuk mencapai posisi koordinat tertentu. Kejadian tersebut terdapat pada sistem tumpukan sumbu X dengan nilai rata-rata maksimum SWP sebesar 18,08 detik dan LP - *actuancy latency* dengan nilai maksimum yaitu 20,21 detik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai KP - keakuratan peletakan maksimum dengan semua percobaan memiliki nilai 0.35 cm dan PP - posisi pengulangan (*Position Repeatability*) yang paling besar dengan nilai 0.41 cm.

Daftar Pustaka

- [1] A. Saefullah, D. Immaniar, and R. A. Juliansah, "Sistem Kontrol Robot Pemindah Barang Menggunakan Aplikasi Android Berbasis Arduino Uno," CCIT J., vol. 8, no. 2, pp. 45–56, 2015.
- [2] Y. A. W. Putra dan D. Untoro, "Perancangan Kontroler Lengan Robot Hastobot Menggunakan Android Dan Arduino Dengan Komunikasi Bluetooth," J. Elektro, Vol. 8, No. 2, pp. 61–70, 2015.
- [3] Suwarno dan R. Syam, "Analisis Kinematika dan Dinamika Mobile Manipulator pada Robot Penjinak Bom," Prosid Sem Nas Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) VII, no. II1-001. November, pp. 1–9, 2008.
- [4] A. Ikhwan and L. Anifah, "Pengembangan Trainer Mikrokontroler Atmega 16 Sebagai Media Pembelajaran Pada Standar Kompetensi Memprogram Peralatan Sistem Otomasi Elektronik Yang Berkaitan dengan I/O Bantuan Mikroprosesor dan Mikrokontroler di SMKN 2 Lamongan," J. Pend. Tek. Elektro, vol. 06, no. 03, pp. 225–231, 2017.
- [5] Skematik driver A4988. <https://www.pngdownload.id/png-oqv0rg/>. diakses tanggal 9 Juli 2020.
- [6] H. Santoso, 2015, "Panduan Praktis Arduino Untuk Pemula," Vol. Monster Arduino-1, Juli, Malang : Elangsakti.com.
- [7] P. Coiffet and M. Chirouze, 1983 "An Introduction to Robot Technology," ed. 1, Netherland : Springer, 1983, DOI : 10.1007/978-94-011-6100-8.
- [8] T. A. Zimmerman, 2017, "Metrics and Key Performance Indicators for Robotic Cybersecurity Performance Analysis," NISTIR 8177, pp. 1–44, US Department of Commerce, NIST, DOI: 10.6028/NIST.IR.8177.