

ANALISIS KETERLAMBATAN GERAK LENGAN ROBOT MANIPULATOR BERBASIS *INTERNET OF THINGS*

*Paryanto^a, Calvin Darma Saputra^a, Rusnaldy^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: paryanto@ft.undip.ac.id

Abstract

Robotic arm is an useful tool in the industry with multiple functions that allow human involvement to be minimal and also allow for greater precision and accuracy that human cannot possess. Robotic arms are conventionally controlled manually via wired communication within a specific facility, however in some scenario, a remote control would be desired. Internet of Things (IoT) is one of the solutions to mitigate the desired remote control of the robotic arm, but doing so will introduce latency. The purposes of this study is to design a robotic arm and the control app in order to test the latency of the system using specific types of network connections while using a specific ammount of joints and data intervals in the operation. The robotic arm system is composed of ESP32 microcontroller that is connected to either cable internet or 4G network via Wifi and PCA9685 PWM Driver to control the MG996R and MG90S servos. The robotic arm is controlled via an application made in MIT App Inventor 2 which is capable of sending data to the Firebase Realtime Database. The best performance with the average latency value of 63ms is achieved when using cable network with the wifi in the different room under 10ms of data interval while using one joint. The worst performance with the average latency value of 1702ms is achieved when using 4G network with the wifi in a different room under 10ms of data interval while using five joints at once.

Keyword : *esp32; internet of things; latency; network; robotic arm*

Abstrak

Lengan robot merupakan alat yang berguna dalam industri dengan berbagai fungsi yang memungkinkan keterlibatan manusia menjadi minimal dengan kepresisian dan akurasi yang tidak dimiliki manusia. Lengan robot umumnya dikendalikan manual menggunakan komunikasi kabel dalam fasilitas spesifik, namun dalam skenario tertentu, pengendalian secara nirkabel dengan jarak jauh dibutuhkan. Implementasi Internet of Things dapat menjadi salah satu solusi untuk memitigasi pengendalian jarak jauh, namun hal tersebut akan menghasilkan masalah baru yakni keterlambatan penyampaian data. Tujuan Tugas Akhir ini adalah perancangan lengan robot beserta aplikasi pengendalinya dan pengujian keterlambatan penyampaian data yang diakibatkan oleh sistem tersebut dalam jaringan internet tertentu, jumlah sendi yang dikendalikan, dan interval pengiriman data tertentu. Sistem lengan robot terdiri dari mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan jaringan internet kabel dan 4G melalui Wi-fi serta PCA9685 PWM Driver untuk mengendalikan servo MG996R dan MG90S. Pengendalian dilakukan menggunakan aplikasi yang dibuat pada MIT App Inventor 2 yang mengirimkan data ke Firebase Realtime Database. Performa terbaik didapat dari pengujian menggunakan jaringan internet kabel berbeda ruangan dengan keterlambatan 63ms pada interval pengiriman data 10ms saat menggunakan 1 sendi, sedangkan performa terburuk didapat dari pengujian menggunakan jaringan internet 4G dengan kondisi berbeda ruangan dengan keterlambatan 1702ms pada interval pengiriman data 10ms saat menggunakan 5 sendi sekaligus.

Kata Kunci : *esp32; internet; internet of things; keterlambatan; lengan robot*

1. PENDAHULUAN

Sampai tahun 2022, banyak industri yang menggunakan lengan robot untuk membantu atau menggantikan pekerjaan manusia. Robot dapat dideskripsikan sebagai sebuah mesin yang didesain untuk melakukan sebuah tugas berdasarkan program yang telah dibuat oleh pengguna. Umumnya, lengan robot diprogram menyerupai fungsi lengan manusia [1]. *Internet of Things (IoT)* adalah konsep untuk menghubungkan alat apapun ke internet dan kepada alat lainnya yang terhubung. IoT adalah jaringan besar dari alat- alat yang terhubung di mana mereka dapat mengumpulkan

dan berbagi data mengenai cara mereka digunakan dan lingkungan sekitar mereka [2]. Salah satu contoh konsep produk IoT adalah IoT-type Electric Fan [3] di mana pada artikel tersebut digunakan Web Server sebagai middleware. Jangkauan pengiriman data kepada Web Server tersebut hanya mencakup jangkauan Wi-Fi yang digunakan.

Penggunaan lengan robot dengan konsep IoT menunjukkan beberapa peluang dalam industri dengan tujuan utama yaitu pengendalian secara daring untuk memperluas jangkauan pengiriman data. Dengan menggunakan platform tertentu sebagai middleware, pengiriman data perintah dapat dilakukan dari mana saja. Namun, pengendalian secara daring dapat menimbulkan adanya keterlambatan dalam penyerahan dan penerimaan data.

Munculnya jaringan 5G yang menjanjikan keterlambatan di bawah 1ms akan meluncurkan penelitian mengenai aplikasi tactile dan VR (Virtual Reality) di mana AGV (Automated Guided Vehicle) dan AMR (Autonomous Mobile Robot) dapat diteleoperasikan oleh manusia menggunakan alat-alat haptik. Untuk penggunaan teleoperasi antar manusia dan mesin, waktu siklus untuk internet taktil dalam lingkungan VR perlu di bawah 5ms karena mata manusia dapat mendeteksi keterlambatan di atas itu. Dalam prinsipnya, internet taktil memungkinkan bagi manusia untuk berinteraksi dan meningkatkan interaksi dengan mesin dan teknologi. Internet taktil dapat memungkinkan interaksi haptik dengan balasan secara visual. Haptik sendiri berhubungan dengan perasaan menyentuh, dalam kasus ini persepsi dan manipulasi objek menggunakan sentuhan dan proprioepsi. Proprioepsi adalah perasaan dari posisi relatif suatu bagian tubuh dan usaha relatif yang digunakan untuk bergerak [4].

Agar sistem teknis dapat mengikuti interaksi manusia dengan lingkungannya, kecepatan sistem perlu memenuhi kecepatan reaksi natural dari manusia. Oleh karena itu, penting bagi internet taktil untuk memiliki end-to-end latency sebesar 1ms. Keandalan dan harga infrastruktur jaringan yang murah juga dibutuhkan karena banyak tugas kritis yang dilakukan secara jarak jauh agar dapat diskalakan. Penggunaan internet taktil menggabungkan teknologi IoT dan robot, serta transmisi melalui jaringan 5G dengan kecerdasan yang berbasis user experience melalui mobile edge computing. Dalam level aplikasinya, otomasi, robotika, telepresensi, augmented reality (AR), virtual reality (VR), dan artificial intelligence (AI) akan menjadi peluang untuk digunakan.

Kasus penggunaan yang sudah tumbuh dalam aplikasi industri antara lain otomasi, robotika, dan telepresensi dalam smart factory dan operasi jarak jauh mesin industri. Pengembangan dari hal ini memungkinkan untuk pembuatan produk yang sangat menyesuaikan pelanggan, pertambangan jarak jauh berisiko tinggi, inspeksi jarak jauh, serta perbaikan dan perawatan pabrik. Selain itu terdapat juga peran pengembangan internet taktil dalam medis, contohnya adalah bagi seorang dokter untuk memerintahkan tele-robot ke lokasi pasien dan melakukan pemeriksaan dari jarak jauh menggunakan balasan audio visual dan haptik [5].

Salah satu penggunaan sistem operasi semi otomatis adalah dalam industri nuklir. Penggunaan teleoperasi robot dalam industri tersebut sangat umum karena dapat memfasilitasi pemberhentian dalam daerah nuklir apabila tingkatan radiasinya di atas batas yang dapat diterima [6].

Dikarenakan potensi dari perkembangan teknologi IoT dan peluang dari teleoperasi jarak jauh, perlu dilakukan penelitian yang sesuai dengan kondisi aplikasinya pada Indonesia untuk memperoleh gambaran mengenai performa yang akan didapat apabila menggunakan jaringan yang tersedia. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan tujuan utama yaitu perancangan lengan robot dengan pengendalian jarak jauh melalui internet menggunakan firebase realtime database dan pembuatan aplikasi pengiriman data posisi sendi lengan robot ke firebase secara realtime menggunakan MIT App Inventor 2. Pengujian keterlambatan gerak dan keberhasilan penyampaian data dilakukan dalam skenario penggunaan lengan robot yang dikontrol menggunakan mikrokontroler ESP32S dan mikro servo dengan berbagai jenis jaringan, jumlah sendi yang digunakan secara sekaligus, dan interval pengiriman data.

2. OBJEK PENELITIAN

2.1. Lengan Robot

Lengan robot adalah sistem elektrik-mekanis dengan fungsi menyerupai lengan manusia. Pergerakan lengan robotik pada dasarnya diakibatkan dua komponen utama yakni servomotor dan mikrokontroler. Pergerakan dari servomotor didasarkan dari lebar pulsa kotak. Sebergantinya lebar pulsa servomotor mendeteksi perubahan dan bergerak [7].

2.2. Perancangan Lengan Robot

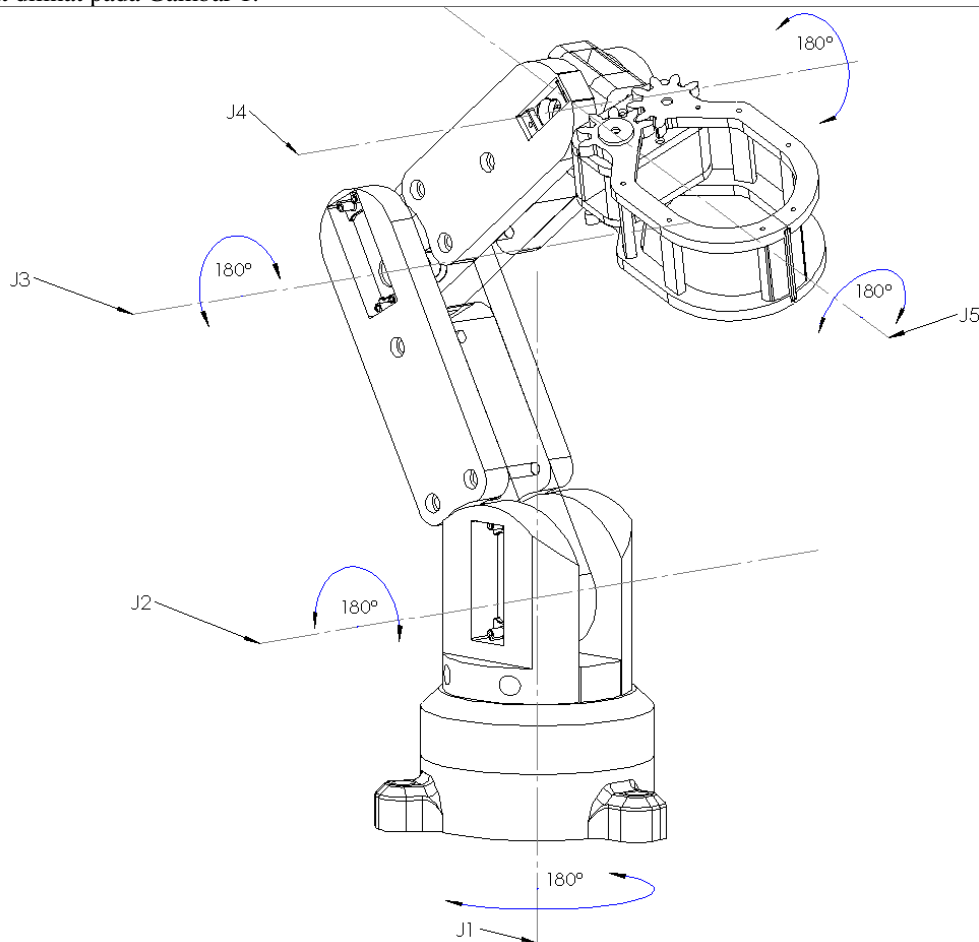
Pada langkah ini dilakukan perancangan struktur lengan robot yang dimulai dengan penentuan parameter lengan robot. Parameter yang ditentukan adalah sebagai berikut.

- a. Jumlah derajat kebebasan/*Degree of Freedom* (DoF) atau sendi yang dimiliki oleh lengan robot. Jumlah sendi yang akan diaplikasikan pada lengan robot ini adalah lima sendi dengan gripper.
- b. Range of motion (RoM) atau jangkauan gerak dari lengan robot.

Jangkauan gerak lengan robot dapat ditentukan berhubungan dengan spesifikasi servo motor yang digunakan. Hal tersebut dilakukan agar servo mampu mengangkat lengan beserta bebannya. Setelah parameter ditentukan, penyesuaian antara komponen servo yang digunakan dengan struktur lengan robot perlu dilakukan. Dimensi servo yang digunakan diukur menggunakan digitar vernier caliper dan disesuaikan ke desain yang akan dibuat.

Perancangan struktur lengan robot dilakukan pada perangkat lunak Solidworks 2020 untuk membuat model tiga dimensi padat dari struktur lengan robot tersebut. Dimensi bagian yang menghubungkan struktur dengan servo diukur

dengan menggunakan jangka sorong dengan memperhatikan *clearance*. Rancangan struktur lengan robot yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Struktur Lengan Robot

2.3. ESP32S

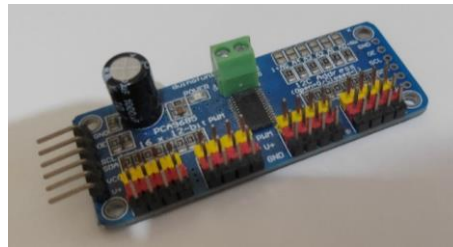
Modul mikrokontroler ESP32S adalah modul mikrokontroler yang ditujukan untuk berbagai macam aplikasi mulai dari jaringan sensor bertenaga rendah sampai ke tugas yang paling menuntut seperti pengkodean suara, streaming musik, dan lainnya. Integrasi Bluetooth, Bluetooth LE, dan Wi-Fi memastikan banyak macam aplikasi dapat ditargetkan. Menggunakan Wi-Fi dapat memungkinkan jarak fisik jauh dan koneksi ke internet secara langsung melalui router Wi-Fi [8].



Gambar 2. Mikrokontroler ESP32S

2.4. PCA9685

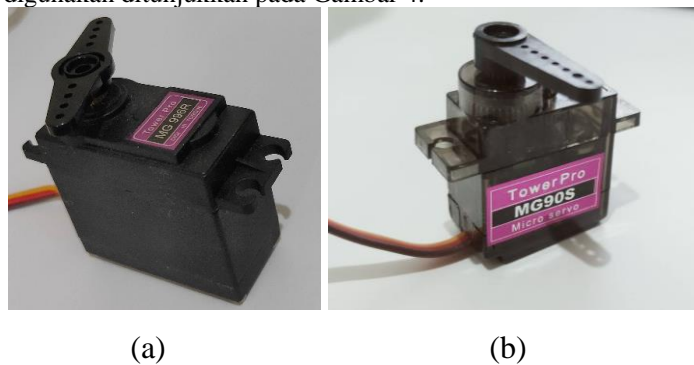
Modul PCA9685 adalah pengendali sinyal PWM 16 saluran yang dapat dihubungkan ke mikrokontroler dengan komunikasi I2C [9]. Modul ini digunakan untuk mengontrol beberapa servo secara sekaligus.



Gambar 3. Modul PCA9685

2.5. Mikro Servo

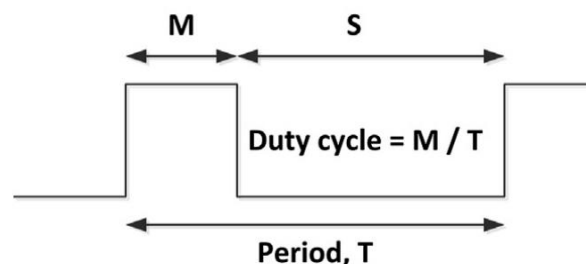
Servo Motor adalah perangkat listrik yang digunakan pada mesin-mesin industri pintar yang berfungsi untuk mendorong atau memutar objek dengan kontrol presisi tinggi dalam hal posisi sudut, akselerasi dan kecepatan, sebuah kemampuan yang tidak dimiliki oleh motor biasa. Servo dapat memutar dan mengarahkan objek pada sudut atau jarak tertentu [10]. Servo yang digunakan adalah servo dengan model Tower Pro Servo MG996R dan Tower Pro Servo MG90S. Posisi sudut servo dapat diatur dengan menggunakan PWM dengan mengatur *duty cycle* atau siklus kerja dari servo tersebut. Servo yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Mikro Servo (a) MG996R dan (b) MG90S

2.6. Pulse Width Modulation (PWM)

Pulse Width Modulation (PWM) atau disebut juga modulasi lebar pulsa adalah teknik untuk mengontrol sirkuit analog menggunakan output digital dari mikrokontroler. PWM digunakan dalam berbagai macam aplikasi, mulai dari komunikasi sampai kontrol dan konversi daya. Contohnya PWM digunakan untuk mengontrol kecepatan motor, cahaya LED, dan lainnya [11]. Biasanya sinyal PWM terbentuk seperti pada Gambar 5 di bawah ini.



Gambar 5. Sinyal PWM

Pada gambar tersebut terdapat waktu nyala dan waktu mati yang biasanya disebut sebagai waktu *mark* (M) dan *space* (S) pada sinyal. Siklus kerja atau *duty cycle* adalah rasio waktu nyala terhadap periode sinyal. Siklus kerja dapat bervariasi dari 0 sampai 1 dan biasanya diekspresikan dalam persentase. Energi yang disuplai ke beban dikontrol dengan memvariasikan siklus kerjanya. Dalam penelitian ini, siklus kerja akan bervariasi bergantung pada posisi sudut setiap servo yang diinginkan. Siklus kerja akan diberikan oleh modul PCA9685 dengan frekuensi 50Hz.

2.7. Firebase Realtime Database

Firestore *Realtime Database* adalah basis data NoSQL yang di-host secara cloud, oleh karena itu memiliki optimisasi dan fungsi yang berbeda dibandingkan dengan database relasional. Data disimpan sebagai JSON dan disinkronisasikan secara realtime kepada setiap klien yang terhubung. Daripada menggunakan tipikal request HTTP, Firestore *Realtime Database* menggunakan sinkronisasi data setiap terdapat perubahan data. Perangkat yang terhubung akan mendapatkan pembaruan data dalam waktu milisekon. Firestore *Realtime Database* adalah database dan Realtime

Database API didesain untuk hanya mengizinkan operasi yang dapat dieksekusi secara cepat. Ini memungkinkan untuk membuat pengalaman realtime yang dapat dialami pengguna tanpa mengorbankan responsivitas [12].

2.8. Latency

Latency salah satu komponen QoS yang penting yang dapat mempengaruhi banyak komponen QoS lainnya. Beberapa usaha telah dilakukan untuk mengukur dan mengestimasi keterlambatan dan parameter yang berhubungan dalam lingkungan jaringan tertentu. Pendekatan tertua yang secara luas digunakan dalam pengukuran jaringan protokol internet adalah ping dan traceroute. Walaupun ping dan traceroute dapat menyediakan data yang berguna untuk kondisi jaringan, metode tersebut hanya mengukur RTT, tidak berupa kondisi simpel ujung ke ujung [13]. Memperhatikan hal tersebut, dengan mengabaikan OS dan *framing*, perhitungan latency dapat dilakukan berdasarkan model pada demonstrasi terdahulu [14] berikut ini.

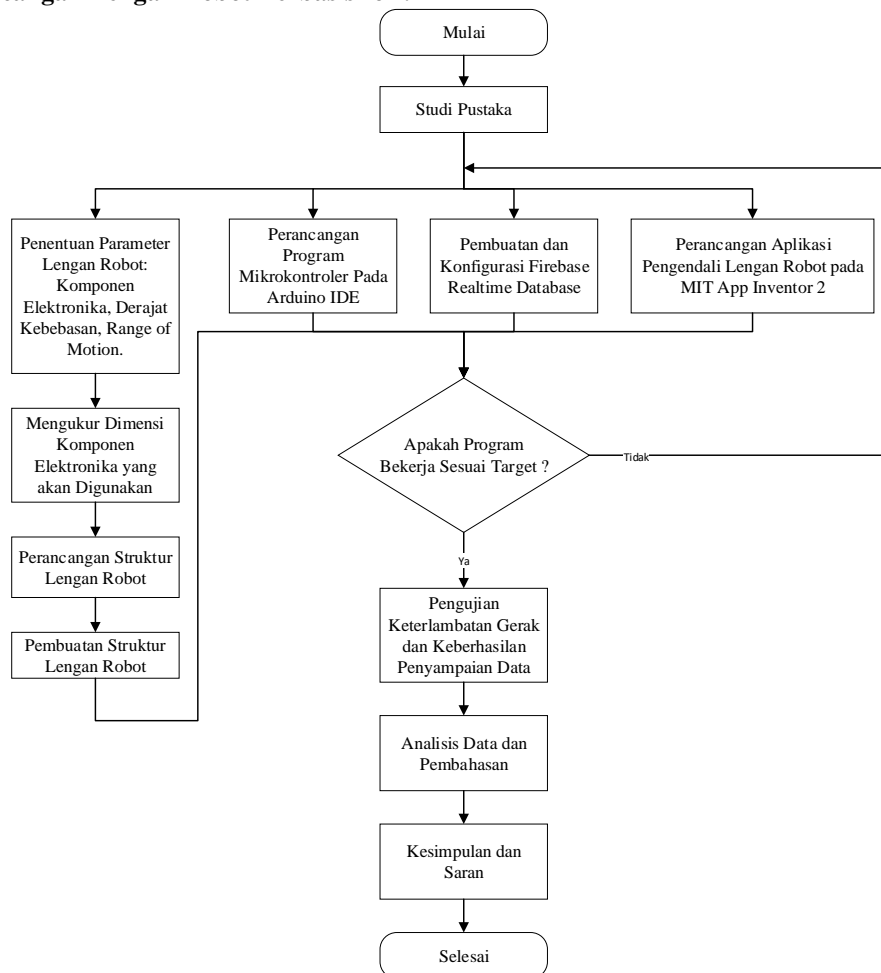
$$\Delta i = t_{ri} - t_{rs}$$

Dimana:

- Δi : Latency Δi untuk paket ke- i (ms)
- t_{ri} : Waktu penerimaan paket (*epoch milisecond*)
- t_{si} : Waktu transmisi paket (*epoch milisecond*)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Alur Perancangan Lengan Robot Berbasis IoT.



Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Pada perancangan pembuatan sistem ini, peneliti melakukan studi pustaka terlebih dahulu untuk mengetahui tujuan penelitian beserta ide rancangan yang akan diaplikasikan. Penentuan parameter yang digunakan kepada robot dibagi menjadi tiga bagian sebagai berikut.

- a. Penentuan Derajat Kebebasan

Derajat Kebebasan dapat ditentukan berdasarkan sasaran kemampuan lengan robot.

b. Penentuan Komponen Elektronika

Komponen elektronika ditentukan berdasarkan struktur lengan robot yang digunakan mulai dari jumlah dan jenis servo yang digunakan.

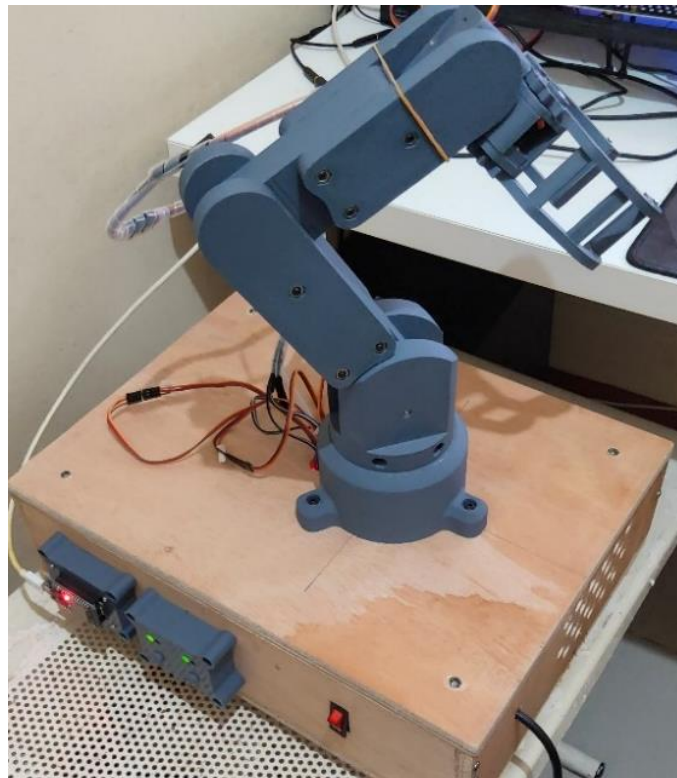
c. Penentuan *Range of Motion*

Derajat Kebebasan ditentukan berdasarkan motor yang digunakan.

Pengukuran dimensi dilakukan untuk menghubungkan desain struktur lengan robot dengan desain komponen yang digunakan. Pengukuran dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong dan kemudian bracket penghubung servo dengan struktur didesain pada aplikasi Solidworks 2020 dan kemudian dibuat menggunakan 3D *printer*. Program mikrokontroler dibuat pada Arduino IDE berdasarkan sampel proyek yang tersedia pada library Firebase-ESP-Client [15] dan Adafruit-PWM-Servo-Driver-Library [16]. Fungsi yang akan digunakan pada program mikrokontroler berupa *streamcallback* pada library Firebase-ESP-Client [15] untuk menarik kunci dan nilai dari suatu kunci tersebut. Kemudian Firebase Realtime Database dibuat untuk mentransmisikan data dari aplikasi pengendali lengan robot yang akan dibuat ke modul ESP32. Data yang dikirim dari aplikasi akan sampai ke Firebase Realtime Database dan disimpan dalam bentuk JSON dan kemudian modul ESP32 akan mengambil data dari database tersebut. Perancangan aplikasi pengendali lengan robot dilakukan pada MIT App Inventor 2 dengan merancang tampilan aplikasi dan kemudian memberikan fungsi terhadap tampilan yang telah dibuat. Fungsi yang diberikan adalah tombol, slider, penggunaan array pada database lokal, pengiriman data ke Firebase, dan penerimaan data dari Firebase. Apabila sistem secara keseluruhan sudah mencukupi target, maka dapat dilakukan pengujian.

3.2. Lengan Robot Berbasis IoT

Setelah perancangan, pembuatan, pemrograman, dan integrasi, telah dibuat sistem lengan robot yang dapat kemudian dilakukan pengujian. Sistem lengan robot ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Lengan Robot

3.3. Firebase *Realtime Database*

Telah dibuat firebase *realtime database* untuk menyimpan data posisi servo beserta data pengaturan batas PWM servo.

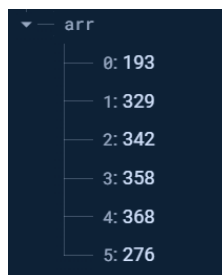


Gambar 8. Struktur Data pada *database*

Database pada sistem ini terbagi menjadi dua bagian sebagai berikut.

a. Posisi servo

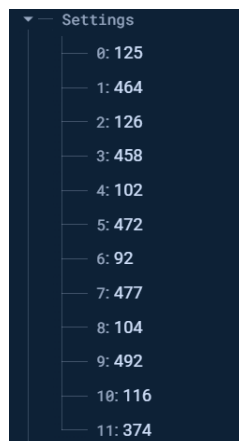
Posisi servo memiliki key “arr” dan memiliki subkey berupa array yang berisi data posisi servo dalam integer. Pohon data ini menyimpan data posisi servo yang dikirim dari aplikasi yang telah dibuat. Subkey dari pohon data “arr” terdiri dari 0-5 yang masing- masing merupakan penamaan untuk servo yang dituju.



Gambar 8. Struktur Data Posisi Servo pada *Firestore Realtime Database*

b. Pengaturan PWM limit servo

Pada profil pengaturan PWM limit servo terdapat nilai pwm minimum dan maksimum yang dapat diproses oleh aplikasi untuk dikalkulasikan menjadi posisi servo. Pohon data ini menyimpan data nilai pwm minimum dan maksimum setiap servo yang dikirim dari aplikasi yang telah dibuat. *Subkey* dari pohon data “Settings” terdiri dari angka 0-11 di mana angka genap merupakan penamaan nilai minimum pwm servo dan angka ganjil merupakan penamaan nilai maksimum pwm servo.



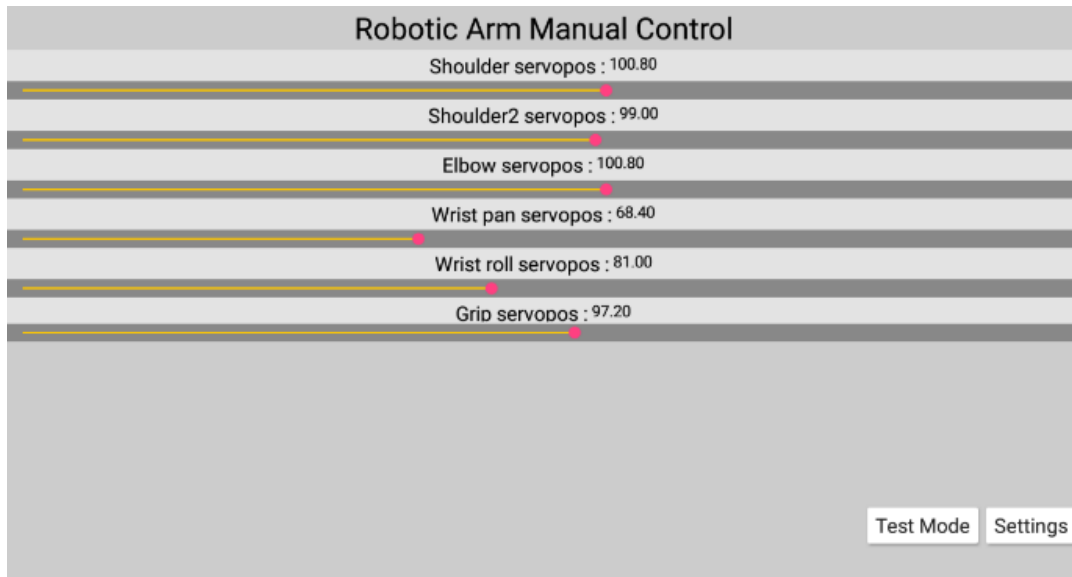
Gambar 9. Struktur Data Pengaturan Servo pada *Firestore Realtime Database*

3.4. Aplikasi Pengendali Lengan Robot Berbasis IoT

Aplikasi pengendali lengan robot berbasis IoT telah dibuat menggunakan MIT App Inventor 2. Aplikasi tersebut memiliki 3 menu antara lain menu kendali utama, menu pengaturan PWM, dan menu pengujian.

a. Menu Kendali Utama

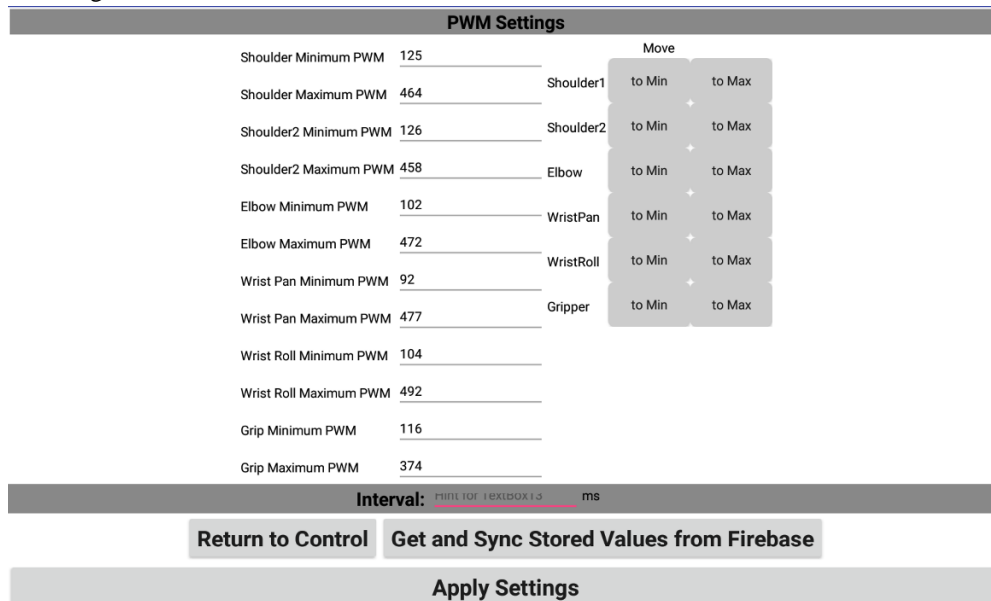
Pada menu ini dapat dilakukan kendali lengan robot menggunakan *slider* yang tertera pada layar. Pengendalian dilakukan dengan menggeser slider ke kanan atau ke kiri.



Gambar 10. Menu Kendali Utama

b. Menu Pengaturan

Saat tombol settings pada layar utama ditekan, akan muncul menu seperti pada Gambar 11. Menu ini ditujukan sebagai upaya melakukan kalibrasi posisi masing- masing servo. Masing- masing nilai PWM servo dapat diisi berdasarkan iterasi yang dapat dilakukan oleh pengguna. Nilai minimum dan maksimum yang diberikan untuk suatu servo berupa nilai saat servo berada dalam sudut terkecil dan sudut terbesar relatif pada jangkauan gerak masing- masing sendi dari lengan robot.



Gambar 11. Pengaturan Limit Servo

c. Menu Pengujian

Saat tombol pengujian ditekan, akan muncul menu seperti pada Gambar 12. Menu ini didesain khusus untuk eksperimen pengujian keterlambatan gerakan lengan robot yang dilakukan. Pada menu ini terdapat tombol “Test n Joint” yang berfungsi untuk menguji gerakan lengan robot menggunakan jumlah sendi sebanyak n secara bersamaan. Saat tombol pengujian ditekan, maka aplikasi akan mengirim data PWM ke firebase realtime database dan mencatat data PWM serta waktu pengirimannya dalam format unix epoch. Data tersebut disimpan dalam bentuk “.csv”.

Di bawah tombol- tombol tersebut terdapat kotak yang dapat diisi dengan angka untuk memberikan input berupa interval pengiriman data. Interval yang diinput akan berpengaruh terhadap laju pengiriman data. Di bagian bawah kotak pengisian interval terdapat indikator PWM yang dikirim untuk setiap servo. Apabila seluruh indikator kuning telah

berhenti maka pengujian selesai. Selain itu terdapat tombol “Reset Position” dan “Clear Data”. Tombol “Reset Position” berfungsi untuk mengembalikan nilai PWM dari maksimum ke minimum dalam kondisi pengujian. Tombol “Clear Data” berfungsi untuk menghapus data- data yang telah disimpan oleh aplikasi. Di bawah tombol “Reset Position” dan “Clear Data” terdapat indikator waktu dalam unix epoch. Di sisi kanan bawah terdapat tombol “Control” untuk kembali ke menu kontrol utama.



Gambar 11. Pengaturan Limit Servo

3.5. Prosedur Pengujian

Pengujian pengukuran keterlambatan gerak lengan robot dan keberhasilan penyampaian data dibagi menjadi empat jenis kasus. Keempat kasus tersebut adalah sebagai berikut.

a. Wifi Internet Kabel posisi Seruangan

Kondisi pengukuran dilakukan dengan penempatan assembly lengan robot dan komputer pada ruangan yang memiliki router Wi-fi di dalamnya dan dikelilingi tembok beton. Sinyal Wi-fi dengan assembly lengan robot memiliki RSSI wifi sekitar (-30) sampai (-40)dbm.

b. Wifi Internet Kabel posisi Beda Ruang

Kondisi pengukuran dilakukan dengan penempatan assembly lengan robot dan komputer pada ruangan yang berbeda dan lantai yang berbeda dengan router Wi-fi sehingga sinyal terhalang tembok beton. Sinyal Wi-fi dengan assembly lengan robot memiliki RSSI wifi sekitar (-80) sampai (-90) dbm.

c. Wifi 4G Kabel posisi Seruangan

Kondisi pengukuran dilakukan dengan penempatan assembly lengan robot dan komputer pada ruangan yang terdapat ponsel dengan jaringan 4G yang sudah diaktifkan Wi-fi tethering di dalamnya dan dikelilingi tembok beton. Sinyal Wi-fi ponsel dengan assembly lengan robot memiliki RSSI wifi sekitar (-30) sampai (-40)dbm.

d. Wifi 4G Kabel posisi Beda Ruang

Kondisi pengukuran dilakukan dengan penempatan assembly lengan robot dan komputer pada ruangan yang berbeda dan lantai yang berbeda terhadap ponsel dengan jaringan 4G yang sudah diaktifkan Wi-fi tethering di dalamnya dan dikelilingi tembok beton sehingga sinyal terhalang tembok beton. Sinyal Wi-fi ponsel dengan assembly lengan robot memiliki RSSI wifi sekitar (-80) sampai (-90) dbm.

Setiap kasus akan dilakukan pengujian penggunaan gerakan servo mulai dari satu servo sampai enam servo secara bersamaan dengan delapan jenis interval pengiriman data mulai dari interval 10ms sampai 80ms. Pengiriman data berupa step PWM yang diberikan untuk memberikan perintah posisi servo yang dituju. Pengujian setiap kasus akan dilakukan sebanyak satu kali untuk kedelapan interval pengiriman data. Keenam gerakan servo tersebut adalah berikut.

i. Gerakan satu sendi

Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° .

ii. Gerakan dua sendi bersamaan

Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1 dan Shoulder 2 secara bersamaan. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° . Shoulder 2 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut c° ke sudut d° .

iii. Gerakan tiga sendi bersamaan

Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1, Shoulder 2, dan Elbow secara bersamaan. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° . Shoulder 2 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut c° ke sudut d° . Elbow akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut e° ke sudut f° .

iv. Gerakan empat sendi bersamaan

Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1, Shoulder 2, Elbow, dan Wrist Pan secara bersamaan. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° . Shoulder 2 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut c° ke sudut d° . Elbow akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut e° ke sudut f° . Wrist Pan akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut g° ke sudut h° .

v. Gerakan lima sendi bersamaan

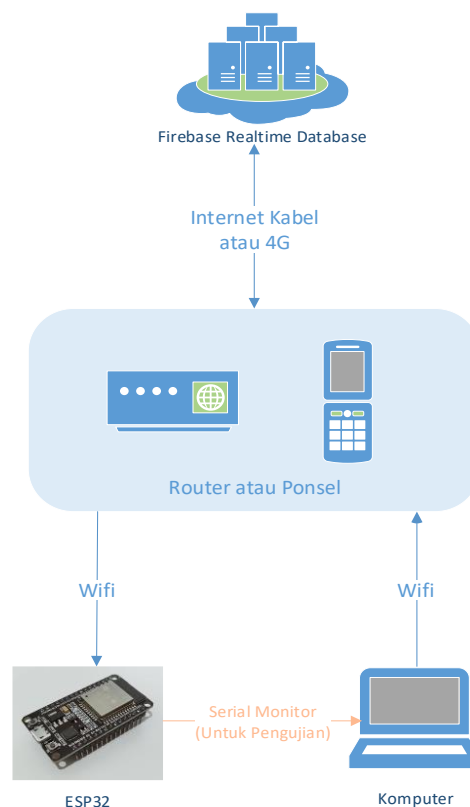
Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1, Shoulder 2, Elbow, Wrist Pan, dan Wrist Roll secara bersamaan. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° . Shoulder 2 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut c° ke sudut d° . Elbow akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut e° ke sudut f° . Wrist Pan akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut g° ke sudut h° . Wrist Roll akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut i° ke sudut j° .

vi. Gerakan lima sendi dan gripper bersamaan

Gerakan ini dilakukan pada servo Shoulder 1, Shoulder 2, Elbow, Wrist Pan, Wrist Roll, dan Gripper secara bersamaan. Shoulder 1 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut a° ke sudut b° . Shoulder 2 akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut c° ke sudut d° . Elbow akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut e° ke sudut f° . Wrist Pan akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut g° ke sudut h° . Wrist Roll akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut i° ke sudut j° . Gripper akan diperintahkan untuk bergerak dari sudut k° ke sudut l° .

3.6. Setup Pengujian

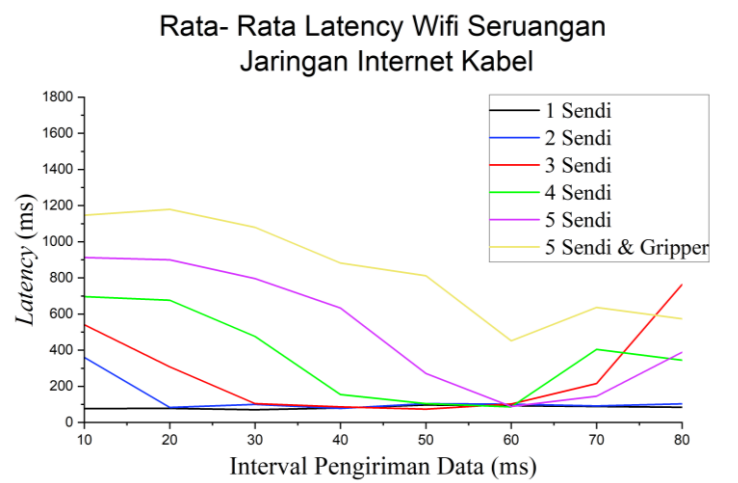
Setup yang digunakan untuk pengujian dilakukan dengan menghubungkan mikrokontroler ke komputer menggunakan kabel USB agar dapat memantau serial monitor pada aplikasi Arduino IDE. Hal ini bertujuan untuk meminimalisasi keterlambatan penyampaian data dari mikrokontroler ESP32 ke komputer dan untuk membatasi agar koneksi nirkabel yang diciptakan hanya berupa pengiriman data dari aplikasi MIT App Inventor ke Firebase Realtime Database dan penerimaan data dari Firebase Realtime Database ke mikrokontroler ESP32.



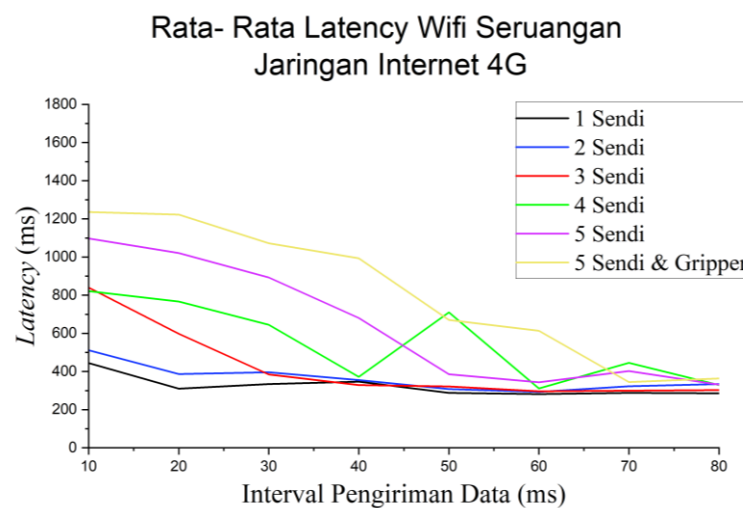
Gambar 12. Diagram Setup dan Alur Data.

3.7. Hasil Pengujian

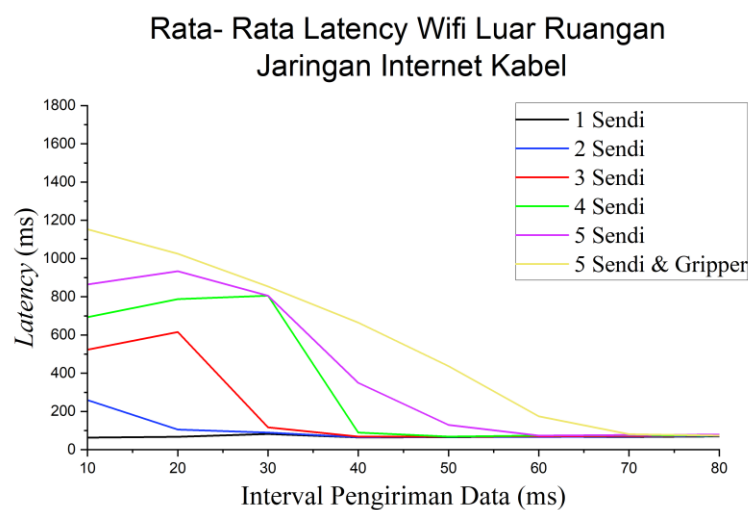
Data pengujian berupa timestamp dikumpulkan dari file “.csv” yang telah disimpan oleh aplikasi dan kemudian dicocokkan dengan data yang diterima oleh serial monitor arduino untuk selanjutnya dilakukan perhitungan latency. Data yang didapat dari pengujian terbagi menjadi empat bagian yang ditunjukkan dengan grafik pada Gambar 13 sampai Gambar 17.



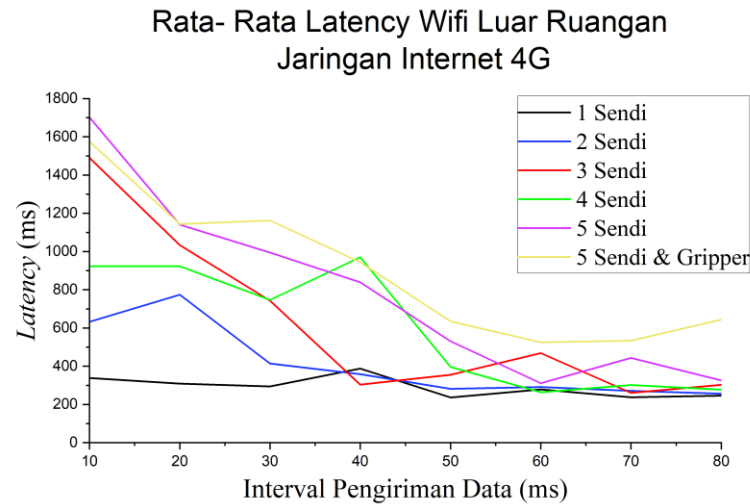
Gambar 13. Rata- Rata Latency Wifi Seruangan Jaringan Internet Kabel



Gambar 14. Rata- Rata Latency Wifi Seruangan Jaringan Internet 4G



Gambar 15. Rata- Rata Latency Wifi Luar Ruangan Jaringan Internet Kabel



Gambar 16. Rata- Rata Latency Wifi Luar Ruangan Jaringan Internet 4G

Berdasarkan data yang diperoleh, jaringan internet kabel memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan jaringan internet 4G. Selain itu dapat juga terlihat bahwa semakin banyak sendi yang digunakan secara sekaligus, maka nilai *latency* yang didapat akan meningkat. Pengaruh penggunaan interval pengiriman data yang lebih cepat juga dapat meningkatkan *latency*. Hal itu dikarenakan laju pengiriman data yang semakin besar akan meningkatkan waktu untuk memproses data tersebut dalam transmisinya[16],[17]. Terdapat fenomena untuk data pengujian rata- rata latency Wifi seruangan jaringan internet kabel di mana *latency* menurun sampai interval pengiriman data 60ms dan kemudian naik kembali.

4. Kesimpulan

Dari penelitian ini, telah dirancang lengan robot berbasis IoT 5 sendi dan gripper-nya dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang diprogram menggunakan Arduino IDE untuk integrasi dengan basis data Firebase Realtime Database dan aplikasi kendalinya yang dibuat menggunakan MIT App Inventor 2.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, Internet kabel menunjukkan performa keterlambatan yang lebih baik dibandingkan dengan internet 4G. Penggunaan interval pengiriman data yang cepat dapat meningkatkan laju pengiriman data sehingga cenderung menghasilkan keterlambatan yang lebih buruk. Semakin banyak sendi yang digunakan pada lengan robot, laju pengiriman data akan semakin meningkat, sehingga performa keterlambatan akan cenderung semakin buruk.

Performa jaringan internet kabel terbaik didapat pada saat pengujian luar ruangan yaitu sebesar 63ms saat menggunakan interval pengiriman data 10ms, sedangkan performa terburuk didapat pada saat pengujian seruangan yaitu sebesar 1179ms saat menggunakan interval pengiriman data 20ms.

Performa jaringan internet 4G terbaik didapat pada saat pengujian luar ruangan yaitu sebesar 237ms saat menggunakan interval pengiriman data 50ms, sedangkan performa terburuk didapat pada saat pengujian berbeda ruangan yaitu sebesar 1702ms saat menggunakan interval pengiriman data 10ms.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ishak, Khairul & Ishak, Mohamad Khairi & Roslan, Muhammad. (2018). 'Design of Robotic Arm Controller based on Internet of Things (IoT)', Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). 10. 5-8.
- [2] Jen Clark. (2016). 'What is the Internet of Things (IoT)?', IBM. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/what-is-the-iot/>
- [3] W. -C. Tsai, Y. -J. Shih and T. -M. Tsai. (2016). 'IoT-type Electric Fan: Remote-Controlled by Smart-Phone', 2016 Third International Conference on Computing Measurement Control and Sensor Network (CMCSN), Matsue, Japan, pp. 12-15, doi: 10.1109/CMCSN.2016.17.
- [4] Oyekanlu, E. A., Smith, A. C., Thomas, W. P., Mulroy, G., Hitesh, D., Ramsey, M., Kuhn, D. J., Mcghinnis, J. D., Buonavita, S. C., Looper, N. A., Ng, M., Ng'oma, A., Liu, W., Mcbride, P. G., Shultz, M. G., Cerasi, C., & Sun, D. (2020). 'A review of recent advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and research areas for 5G-based smart manufacturing applications', IEEE Access, 8, 202312–202353. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3035729>
- [5] Kavanagh, S. (2020). 'What is the tactile internet?', 5G. <https://5g.co.uk/guides/what-is-the-tactile-internet/>

- [6] Ghosh, A., Paredes Soto, D. A., Veres, S. M., & Rossiter, A. (2020). 'Human robot interaction for future remote manipulations in industry 4.0', *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 10223–10228.
- [7] Mittal D., Prashar A., Gupta V., Yadav R., Nagal R. (2011). 'Robotic Arm with Finger Movement. In: Das V.V., Stephen J., Chaba Y. (eds) *Computer Networks and Information Technologies*', CNC 2011. *Communications in Computer and Information Science*, vol 142. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19542-6_98
- [8] Espressif Systems. (2021). 'ESP32WROOM32 Datasheet', Espressif Systems. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf
- [9] Adafruit. (2015). 'PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I2C-bus LED controller Rev. 4 — 16 April 2015 Product data sheet', *Adafruit*. <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/PCA9685.pdf>
- [10] Schneider Electric. (2021). 'Apa itu Servo Motor dan Kegunaannya?'. Schneider Electric. <https://www.se.com/id/id/faqs/FA374507/>
- [11] Ibrahim, D. (2014). 'Advanced PIC32 projects'. *Designing Embedded Systems with 32-Bit PIC Microcontrollers and MikroC*, 359–442. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-097786-7.00008-7>
- [12] Google. (2021). 'Google Cloud IoT Solutions', Google. <https://cloud.google.com/solutions/iot#section-1>
- [13] A. A. Bisu, A. Purvis, K. Brigham and H. Sun. (2018). 'A Framework for End-to-End Latency Measurements in aSatellite Network Environment'. 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-6, doi: 10.1109/ICC.2018.8422913.
- [14] M. A. Karaman, B. Gorkemli, S. Tatlicioglu, M. Komurcuoglu and O. Karakaya. (2015). 'Quality of service control and resource prioritization with Software Defined Networking', *Proceedings of the 2015 1st IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, London, UK, pp. 1-6, doi: 10.1109/NETSOFT.2015.7116149.
- [15] Suwatchai Klakerdpol, & ode. (2022). 'mobizt/Firebase-ESP32: None (v4.0.0)'. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6610470>
- [16] Aljubayri, M., Peng, T., & Shikh-Bahaei, M. (2021). 'Reduce delay of multipath TCP in IOT networks', *Wireless Networks*, 27(6), 4189–4198. <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02701-3>
- [17] Lai, Y.-C., Ali, A., Hossain, Md. S., & Lin, Y.-D. (2019). 'Performance modeling and analysis of TCP and UDP flows over software defined networks', *Journal of Network and Computer Applications*, 130, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.010>