

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM ROBOT LENGAN PADA ROBOT BERGERAK PEMUNGUT SAMPAH BERBASIS FPGA

1st Luthfi Fajarizki
D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

luthfifajarizki@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Denny Darlis, S. SI., MT
D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

dennydarlis@telkomuniversity.ac.id

3rd Aris Hartaman, S.T., M.T.
D3 Teknologi Telekomunikasi
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

arishartaman@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Tugas Akhir ini merancang dan mengimplementasikan lengan robot pemungut sampah berbasis Field Programmable Gate Array (FPGA) yang dikendalikan melalui Visible Light Communication (VLC). Sistem menerima perintah dari Ground Control Station (GCS) berupa karakter ASCII, diproses oleh FPGA, lalu diteruskan ke modul ESP32 untuk menggerakkan motor servo pada base, shoulder, elbow, dan gripper. Perintah seperti 'O' (gripper buka 90°), 'C' (gripper tutup 0°), 'Y' (elbow maju 180°), dan 'H' (elbow mundur 90°) berhasil 100%. Namun, perintah shoulder ('T' turun 90°, 'G' naik 180°) serta base ('A' kiri 180°, 'D' kanan 0°) hanya berhasil 20% akibat terjadinya looping di perintah tersebut. Perintah 'X' (base tengah 90°) berhasil 100%. Perancangan meliputi rangkaian perangkat keras, logika kontrol Verilog pada FPGA, serta pengujian lapangan. Hasil menunjukkan sistem mampu merespons perintah secara real-time, meski terdapat fenomena looping pada beberapa perintah saat dikirim melalui GCS, sedangkan via serial monitor normal. Dari sisi mekanik, gripper hanya mampu menjepit sampah kecil dan ringan. Secara keseluruhan, sistem telah berfungsi sesuai tujuan, meski terbatas hanya pada proses pengambilan sampah tanpa membawa ke tujuan akhir.

Kata kunci— FPGA, robot pemungut sampah, VLC, ESP32, servo motor, lengan robot.

I. PENDAHULUAN

Sampah masih menjadi salah satu persoalan lingkungan yang belum terselesaikan di banyak daerah. Setiap hari, berbagai jenis sampah dihasilkan dari aktivitas manusia, baik di rumah tangga, sekolah, perkantoran, maupun tempat umum. Sayangnya, kesadaran masyarakat untuk membuang sampah pada tempatnya masih rendah. Tidak jarang sampah dibuang sembarangan di jalan, sungai, atau taman. Kebiasaan ini menimbulkan dampak negatif, seperti pencemaran lingkungan, bau tidak sedap akibat tumpukan sampah yang membusuk, hingga penyumbatan saluran air yang berpotensi menyebabkan banjir. Sampah juga dapat menjadi tempat berkembang biaknya vektor penyakit seperti lalat, nyamuk, dan tikus yang membahayakan kesehatan masyarakat [1].

Upaya penanganan sampah sebenarnya sudah dilakukan melalui berbagai pendekatan, salah satunya edukasi untuk meningkatkan kesadaran masyarakat. Namun, hasilnya tidak selalu cepat terlihat. Oleh karena itu, diperlukan solusi

alternatif yang lebih praktis dan dapat bekerja langsung di lapangan. Salah satunya adalah penggunaan teknologi robotik berupa robot pemungut sampah yang dirancang untuk mendeteksi, mengambil, dan memindahkan sampah ke tempat penampungan. Dengan adanya robot ini, pembersihan lingkungan dapat dilakukan lebih efisien, terjadwal, serta mengurangi risiko paparan manusia terhadap sampah.

Penelitian sebelumnya merancang robot lengan berbasis Arduino Uno dengan empat derajat kebebasan yang dikendalikan potensiometer, namun bersifat manual tanpa komunikasi jarak jauh [2]. Berbeda, tugas akhir ini merancang lengan robot pemungut sampah berbasis FPGA dan ESP32 dengan komunikasi Visible Light Communication (VLC). FPGA menerima perintah dari Ground Control Station (GCS) dan meneruskan ke ESP32 melalui UART untuk menghasilkan sinyal PWM penggerak motor servo. Pendekatan ini memadukan kecepatan FPGA, fleksibilitas ESP32, serta komunikasi cahaya bebas interferensi elektromagnetik, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi publik yang luas.

II. KAJIAN TEORI

A. Robot Lengan

Robot lengan, atau lebih dikenal sebagai manipulator robot, merupakan salah satu tipe robot yang paling umum diterapkan di sektor industri. Selain itu, jenis robot ini sering dimanfaatkan dalam riset dan pengembangan teknologi robotika. Robot lengan mampu menjalankan tugas yang secara konsisten sulit dilakukan oleh manusia, seperti pengelasan, pengecatan, dan pemindahan barang, serta berbagai tugas lainnya [3]. Di dalam lengan robot terdapat sejumlah komponen, yaitu dasar (fundamental atau tempat berdirinya lengan robot), sendi (titik sambung yang dapat memberikan gerakan yang teratur), rangka (struktur yang membentuk lengan robot), dan alat akhir (bagian paling akhir yang menjalankan fungsi spesifik, seperti penjepit dan lain-lain) [4].

B. Motor Servo

Motor servo merupakan salah satu jenis aktuator yang banyak digunakan dalam sistem kontrol otomatis. Perangkat ini sebenarnya adalah motor listrik yang sudah dilengkapi dengan rangkaian pengendali internal, sehingga dapat bergerak secara presisi sesuai dengan sinyal kendali yang diterimanya. Motor servo mampu berputar ke dua arah, yaitu

searah jarum jam maupun berlawanan arah jarum jam, tergantung pada instruksi yang diberikan [5]. Motor servo biasanya digunakan sebagai aktuator yang membutuhkan tingkat akurasi tinggi dalam menentukan posisi sudut. Pergerakannya dikendalikan lewat sinyal kontrol, baik dalam bentuk analog maupun digital, agar rotasi porosnya bisa diatur secara tepat sesuai kebutuhan [6]. Sistem motor servo DC umumnya terdiri dari motor DC dan mekanisme transmisi. Transmisi ini berfungsi untuk menurunkan kecepatan dan menambah torsi, serta bisa mengubah gerakan putar menjadi gerakan lain seperti translasi. Contoh mekanismenya antara lain roda gigi, cacing, rak, dan cam [7].

C. Field Programmable Gate Array (FPGA)

FPGA adalah komponen semikonduktor yang terdiri dari kumpulan blok logika yang bisa diatur sesuai kebutuhan pengguna. Blok-blok ini saling terhubung melalui jalur interkoneksi yang juga bisa diprogram, sehingga fungsinya bisa disesuaikan dengan sistem yang dirancang. [8]. FPGA memiliki gerbang logika yang dapat diprogram, seperti AND, NAND, NOR, OR, dan XOR, serta fungsi matematika dan kombinasi yang lebih kompleks, seperti decoder, subtractor, adder, dan multiplier [9]. Selain itu, blok dalam FPGA juga dapat dilengkapi dengan elemen memori, seperti register hingga RAM.

D. ESP32

ESP32 adalah mikrokontroler yang banyak dimanfaatkan dalam berbagai proyek berbasis Internet of Things (IoT) karena mendukung koneksi WiFi dan Bluetooth. Selain itu, ESP32 juga punya performa pemrosesan yang cukup tinggi sehingga cocok untuk aplikasi kendali jarak jauh atau sistem otomatisasi [10]. ESP32 mampu melakukan pemrosesan data secara real-time sekaligus terhubung ke jaringan tanpa perlu modul tambahan. Karena itulah, ESP32 sering dipakai dalam sistem yang butuh komunikasi jarak jauh dan respons cepat, misalnya pada alat pendeteksi kerusakan jalan [11].

E. Degree of Freedom (DoF)

Degree of freedom atau derajat kebebasan adalah sebuah sistem pada sambungan lengan robot yang bisa dibengkokkan, diputar, atau digeser. Derajat kebebasan berfungsi untuk memahami bagaimana robot bergerak, seberapa rumit algoritma pengendaliannya, serta jumlah motor yang terdapat pada lengan robot. Penentuan jumlah DoF ditetapkan berdasarkan banyaknya pergerakan yang bisa dilakukan oleh lengan robot atau banyaknya aktuator yang ada pada lengan robot [12]. Derajat kebebasan menentukan bagaimana robot bergerak, seberapa kompleks algoritma pengendaliannya, dan berapa banyak motor atau aktuator yang diperlukan. Jumlah DoF biasanya didasarkan pada banyaknya pergerakan yang dapat dilakukan oleh lengan robot atau aktuator yang terpasang pada setiap sendi. Misalnya, lengan robot industri sering memiliki enam DoF untuk menjangkau posisi dan orientasi objek dari berbagai sudut, sedangkan lengan robot sederhana mungkin hanya memiliki dua atau tiga DoF.

F. Arduino IDE

Arduino IDE adalah software yang digunakan untuk menulis dan mengunggah program ke board Arduino. Software ini berfungsi sebagai media utama untuk membuat dan mengedit kode (sketch), lalu meng-upload-nya langsung ke board yang digunakan. Arduino IDE dibangun menggunakan bahasa pemrograman Java, dan sudah dilengkapi dengan pustaka (library) C/C++ berbasis Wiring, sehingga proses pengolahan input dan output jadi lebih sederhana dan mudah digunakan [13]. Selain itu, Arduino IDE memiliki antarmuka yang sederhana dan mudah dipahami, sehingga cocok digunakan baik oleh pemula maupun pengembang berpengalaman. Software ini juga mendukung berbagai jenis board, termasuk varian Arduino, ESP32, dan platform mikrokontroler lainnya. Fitur Serial monitor yang tersedia memudahkan pengguna untuk melakukan debugging dan memantau data secara real-time.

G. Quartus Prime

Quartus adalah software yang dibuat oleh Altera dan digunakan untuk menangani seluruh proses desain FPGA. Dengan software ini, pengguna bisa membuat desain digital baik lewat tampilan grafis maupun menggunakan bahasa pemrograman HDL seperti VHDL atau Verilog. Selain itu, Quartus juga mendukung proses simulasi, sintesis, dan implementasi langsung ke chip FPGA yang bisa diprogram ulang sesuai kebutuhan [14].

III. METODE

Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental dengan merancang dan mengimplementasikan sistem Robot Lengan pada robot pemungut sampah. Metode ini mencakup tahapan perancangan arsitektur sistem, pemodelan, implementasi lengan robot, serta pengujian koneksi komunikasi.

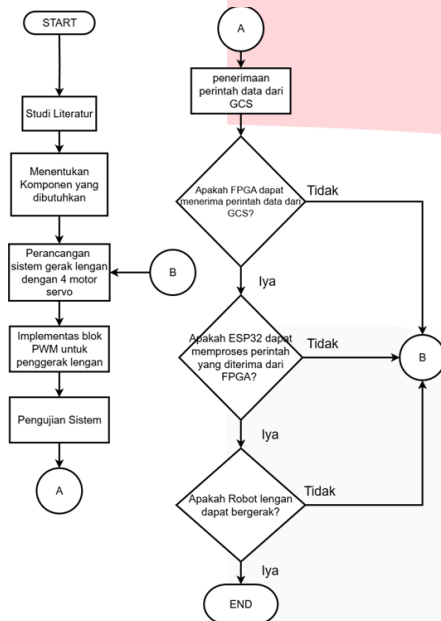
A. Arsitektur Sistem

Arsitektur sistem pada perancangan ini bertujuan menghasilkan lengan robot pemungut sampah yang mampu menerima perintah kendali jarak jauh dan mengeksekusinya secara cepat, presisi, dan terintegrasi. Sistem dibangun dari tiga subsistem utama, yaitu Ground Control Station (GCS) sebagai pusat kendali, media komunikasi Visible Light Communication (VLC), serta unit pemrosesan dan eksekusi yang terdiri dari FPGA, ESP32, dan motor servo. GCS mengirimkan perintah digital berupa karakter ASCII melalui VLC yang menggunakan LED sebagai pemancar dan fotodiode sebagai penerima, dengan keunggulan tahan terhadap interferensi elektromagnetik, hemat daya, dan aman. Data perintah dari VLC diterima FPGA, diproses melalui UART, lalu diteruskan ke ESP32, sementara FPGA juga terhubung dengan motor driver untuk mengendalikan motor DC penggerak roda. ESP32 bertindak sebagai pengendali utama motor servo dengan menghasilkan sinyal PWM untuk empat servo pada base, shoulder, elbow, dan gripper yang membentuk empat derajat kebebasan lengan robot. Sistem juga dilengkapi sensor ultrasonik untuk mendeteksi keberadaan sampah serta sensor MPU6050 untuk mengetahui orientasi robot, dengan data yang dapat dikirimkan kembali

ke GCS melalui Wi-Fi. Dengan konfigurasi ini, FPGA berfokus pada komunikasi VLC, sedangkan ESP32 menangani pemrosesan gerakan secara real-time, sehingga kolaborasi keduanya memungkinkan lengan robot merespons perintah secara cepat, akurat, dan efisien dalam menjalankan tugas pemungutan sampah.

B. Tahapan perencanaan

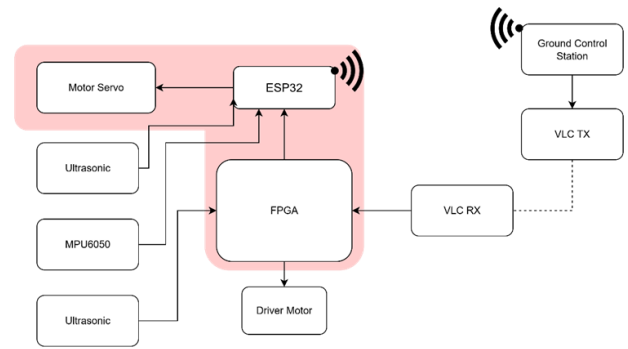
Tahapan perancangan dimulai dari studi literatur untuk memahami teori dan penelitian sebelumnya, kemudian menentukan komponen yang dibutuhkan. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem gerak lengan dengan empat motor servo serta implementasi blok PWM sebagai pengendali aktuator. Setelah itu, sistem diuji dengan menerima perintah dari Ground Control Station (GCS) melalui FPGA dan ESP32. Jika perintah berhasil diproses, robot akan menggerakkan lengan sesuai instruksi.



Gambar 1.
Alur Perencanaan Sistem

B. Pemodelan Sistem

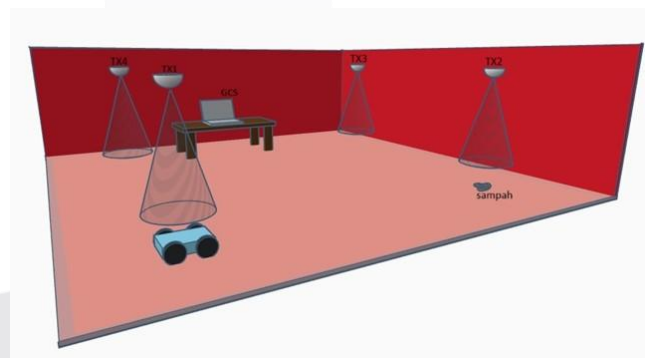
Pemodelan Sistem di memperlihatkan oleh blok diagram komunikasi dan kendali yang terdiri dari pusat pengendali, media komunikasi berbasis Visible Light Communication (VLC), unit pemrosesan data dengan FPGA dan ESP32, serta aktuator berupa motor servo pada lengan dan motor DC pada roda. Selain itu, terdapat pula sensor ultrasonic dan MPU6050 yang terhubung ke FPGA untuk memberikan data pendukung. Setiap blok saling terhubung dan berfungsi secara berurutan, mulai dari pengiriman instruksi oleh GCS, penerimaan dan pemrosesan data, hingga menghasilkan gerakan lengan maupun pergerakan roda robot.



Gambar 2
Blok Diagram Sistem

C. Skenario Sistem

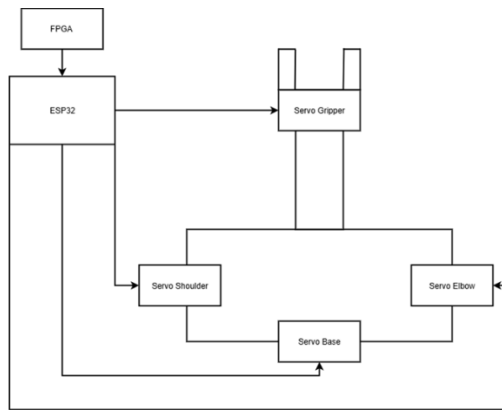
Pada skenario pengujian, robot pemungut sampah dikendalikan manual oleh Ground Control Station (GCS) melalui sinyal VLC Transmitter TX1. GCS mengarahkan robot maju menuju TX2, lokasi sampah berada. Saat sensor ultrasonik mendeteksi sampah, GCS mengirim instruksi melalui VLC untuk menggerakkan lengan robot. Perintah diteruskan FPGA ke ESP32 yang menghasilkan sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo pada base, shoulder, elbow, dan gripper hingga gripper menjepit sampah. Sistem juga dilengkapi sensor MPU6050 untuk membaca orientasi gerakan robot pada sumbu X, Y, dan Z. Data orientasi dikirim ESP32 ke GCS via Wi-Fi agar operator dapat memantau posisi robot. Sesuai batasan sistem, robot hanya melakukan pengambilan sampah tanpa memindahkannya ke tempat tujuan akhir.



Gambar 3
Skenario Sitem

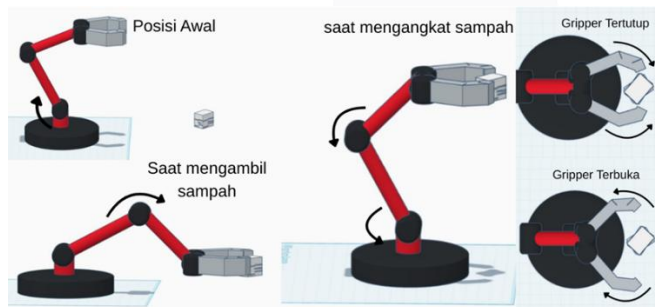
D. Model Sistem Penggerak Robot Lengan

Model Sistem Penggerak Robot Lengan menggunakan empat motor servo untuk menggerakkan bagian base, shoulder, elbow, dan gripper. Motor base mengatur rotasi, shoulder menggerakkan bahu naik-turun, elbow melipat atau meluruskan lengan, dan gripper membuka-menutup penjepit. Seluruh motor dikendalikan ESP32 sebagai pusat pengolah gerakan. ESP32 menerima perintah dari FPGA melalui UART, kemudian mengubahnya menjadi sinyal kontrol (PWM) untuk mengatur sudut motor. Sumber daya berasal dari power supply pada robot yang menyalurkan tegangan ke ESP32, FPGA, dan motor servo. Dengan konfigurasi ini, semua komponen bekerja terintegrasi sehingga lengan robot dapat beroperasi mandiri tanpa sumber daya eksternal.



Gambar 4
Model Sistem Penggerak Robot Lengan

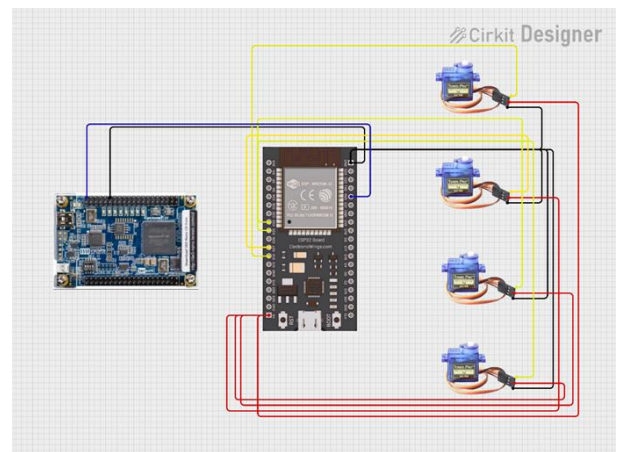
Desain pergerakan robot lengan terdiri dari tiga tahap utama. Pada posisi awal, lengan siaga dengan gripper terbuka. Tahap mengambil sampah dilakukan dengan menurunkan shoulder dan memajukan elbow hingga gripper mendekati objek, lalu gripper menutup untuk menjepit. Tahap terakhir adalah mengangkat, di mana shoulder dan elbow kembali bergerak ke atas agar objek terangkat. Pola gerak ini meniru lengan manusia, mulai dari menunggu, menjangkau, hingga mengangkat objek. Semua dikendalikan motor servo pada base, shoulder, elbow, dan gripper secara terintegrasi. Namun, gripper masih terbatas hanya mampu mengambil sampah kecil dan ringan. Gambar 5 menunjukkan *Design Penggerakan Lengan Robot*.



GAMBAR 5
Design Pergerakan Lengan Robot

E. Skematik Penggerakan Robot Lengan

Skematik berikut menunjukkan skema rangkaian sistem penggerak lengan robot yang terdiri dari FPGA DE0-Nano, ESP32, empat motor servo, dan jalur distribusi daya. FPGA menerima perintah dari sistem komunikasi lalu meneruskannya ke ESP32 melalui UART, dengan pin TX FPGA (GPIO_00) terhubung ke pin RX ESP32. ESP32 menjadi pengendali utama, di mana servo base, shoulder, elbow, dan gripper masing-masing terhubung ke pin GPIO 27, 14, 25, dan 33. Jalur sinyal servo menggunakan kabel kuning, VCC dengan kabel merah, dan GND dengan kabel hitam. Sumber daya untuk FPGA dan ESP32 berasal dari power supply yang sama, sementara servo mendapat tegangan dari output ESP32. Konfigurasi ini menjaga suplai daya stabil sehingga pergerakan servo tetap responsif dan tidak terganggu meski beberapa motor bergerak bersamaan.



GAMBAR 6
Skematik Penggerakan Robot Lengan

IV HASIL DAN PEMBAHASAN

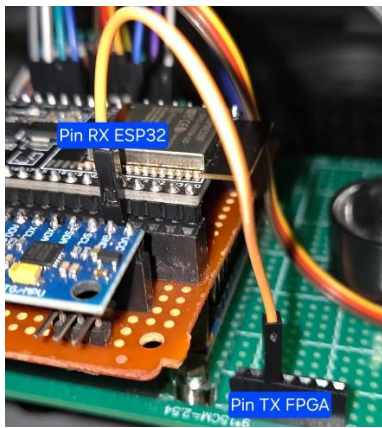
A. Implementasi Sistem

Hasil rangkaian kontrol motor servo menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama ditunjukkan pada gambar. ESP32 dipasang pada PCB dan terhubung ke motor servo melalui konektor pin dengan kabel berwarna berbeda untuk membedakan fungsi: kuning sebagai sinyal GPIO, merah untuk VCC, dan coklat untuk GND. Servo Base, Shoulder, Elbow, dan Gripper masing-masing terhubung ke pin GPIO sesuai program, dengan suplai daya berasal dari jalur VCC ESP32. Tata letak kabel yang rapi memastikan daya dan sinyal stabil sehingga servo dapat bergerak responsif, serta memudahkan proses pemrograman, pengujian, dan perawatan lengan robot. Hasil Implementasi Sistem dapat dilihat pada Gambar 7.



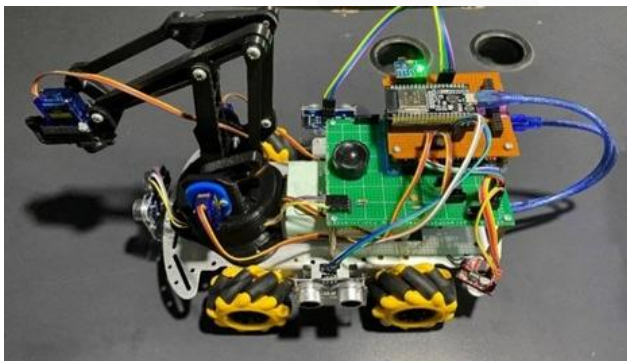
GAMBAR 7
Hasil Implementasi

Pada gambar 8, terlihat sambungan antara modul FPGA dan modul ESP32. Kabel jumper berwarna oranye menghubungkan pin TX pada FPGA dengan pin RX pada ESP32. Hubungan ini merupakan bagian dari komunikasi serial (UART) yang digunakan untuk mengirimkan data dari FPGA menuju ESP32. Prinsipnya, pin TX (transmit) pada perangkat pengirim dihubungkan ke pin RX (receive) pada perangkat penerima. Dalam kasus ini, FPGA berperan sebagai pengirim data, sedangkan ESP32 bertindak sebagai penerima. Data yang dikirim FPGA akan diterima langsung oleh ESP32 untuk kemudian diproses lebih lanjut, untuk menggerakkan motor servo pada robot lengan.



GAMBAR 8
Hasil Implementasi ESP32 dengan FPGA

Gambar tersebut merupakan hasil keseluruhan dari perancangan robot pemungut sampah. Robot ini dilengkapi lengan dengan empat motor servo (base, shoulder, elbow, dan gripper) untuk mengambil sampah, serta menggunakan FPGA dan ESP32 sebagai pengendali utama. ESP32 menerima instruksi dari FPGA melalui komunikasi UART dan menghasilkan sinyal PWM untuk menggerakkan servo. Robot juga didukung sensor ultrasonik untuk mendeteksi objek dan sensor MPU6050 untuk membaca orientasi. Dengan integrasi rangkaian, aktuator, serta sistem kendali, robot mampu menjalankan fungsi utama yaitu memungut sampah sesuai perintah dari Ground Control Station (GCS).



Gambar 9
Hasil Akhir Implementasi Robot

B. Pengujian Sistem

Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem penggerak lengan robot berbasis FPGA bekerja sesuai fungsinya, mulai dari penerimaan perintah hingga pergerakan servo. Perintah dari Ground Control Station (GCS) dikirim melalui komunikasi VLC dalam format ASCII seperti 'A', 'D', dan lainnya. FPGA menerima perintah tersebut, kemudian meneruskannya ke ESP32 melalui UART. ESP32 menghasilkan sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo sesuai instruksi. Hasil pengujian menunjukkan FPGA mampu menerima dan mengirimkan data dengan benar, sementara ESP32 berhasil menghasilkan kontrol PWM sehingga lengan robot bergerak sesuai perintah dari GCS.

Tabel 1
Hasil Pengujian Gerak Robot Lengan

Data diterima	Perintah	Sudut Servo	Keterangan
O	Gripper Terbuka	90°	Berhasil Membuka Gripper
C	Gripper Tertutup	0°	Berhasil Menutup Gripper
Y	Elbow Maju	180°	Berhasil Memajukan Elbow
H	Elbow Mundur	90°	Berhasil Memundurkan Elbow
T	Shoulder Turun	90°	Berhasil Menurun kan Shoulder tetapi Looping
G	Shoulder Naik	180°	Berhasil Menaikan Shoulder tetapi Looping
A	Base Hadap Kiri	180°	Berhasil Hadap kiri tetapi Looping
D	Base Hadap Kanan	0°	Berhasil Hadap Kanan tetapi Looping
X	Base Hadap Tengah	90°	Berhasil Hadap Tengah

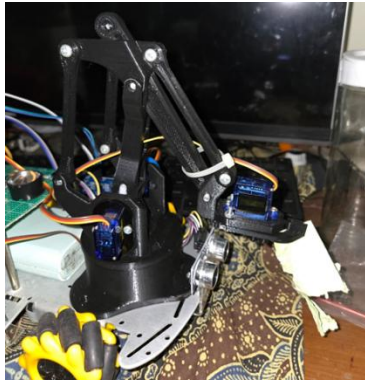
Tabel ini menunjukkan hasil pengujian gerakan aktuator lengan robot berdasarkan perintah yang diterima, posisi sudut servo yang tercapai, dan status keberhasilan gerakannya. Setiap baris merepresentasikan satu perintah dengan kode karakter tertentu yang dikirim ke sistem. saat menerima perintah 'O', gripper membuka dengan sudut servo 90° dan tercatat berhasil membuka gripper dengan tingkat keberhasilan 100%. Perintah 'C' menutup gripper pada posisi sudut 0° dengan tingkat keberhasilan 100%. Perintah 'Y' dan 'H' menggerakkan servo elbow maju dan mundur pada sudut 180° dan 90°, masing-masing dengan tingkat keberhasilan 100%. Perintah 'T' dan 'G' mengatur gerakan shoulder turun (90°) dan naik (180°) dengan tingkat keberhasilan 20% hanya saat FPGA tidak terkena sinar VLC sehingga FPGA tidak meneruskan perintah ke ESP32. Hal yang sama juga terjadi pada perintah 'A' dan 'D' yang mengontrol pergerakan base ke kiri (180°) dan kanan (0°), dengan tingkat keberhasilan 20%. Untuk perintah 'X' yang memposisikan base di tengah (90°), tingkat keberhasilan mencapai 100%. Tetapi, saat perintah yang sama dikirim hanya melalui serial monitor, gerakan seluruh servo berjalan normal tanpa looping. Hal ini mengindikasikan adanya gangguan atau ketidaksinkronan komunikasi antara modul ESP32 dengan FPGA saat menerima perintah dari GCS, yang menyebabkan perintah terkirim berulang dan memicu gerakan berulang pada aktuator lengan robot.

Tabel 2
Penerimaan Sinyal pada Jarak 65 cm dalam Kondisi Gelap

Jenis Sampah	Keterangan
Sampah ringan dan kecil (Tisu bekas)	Dapat jepit oleh gripper
Sampah ringan dan besar (kertas utuh)	Tidak dapat dijepit oleh gripper
Sampah berat dan besar	Tidak dapat dijepit oleh gripper

Berdasarkan tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa robot lengan pada sistem ini hanya mampu mengambil sampah yang berukuran kecil dan berbobot ringan, seperti tisu bekas

atau potongan kertas kecil. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan daya jepit pada gripper, yang tidak cukup kuat untuk menjepit objek dengan ukuran besar atau berat yang lebih tinggi. Akibatnya, saat mencoba mengambil sampah yang berukuran lebih besar seperti kertas utuh atau benda yang lebih berat, gripper tidak mampu menahan objek tersebut dengan kokoh sehingga sampah mudah terlepas atau bahkan tidak berhasil terangkat sama sekali. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan mekanis gripper masih perlu ditingkatkan, baik dari segi kekuatan jepitan maupun desain mekanik, agar robot dapat menangani berbagai jenis sampah dengan ukuran dan bobot yang lebih bervariasi secara efektif.



Gambar 10
Robot Lengan dengan Sampah

C. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian, sistem lengan robot pemungut sampah berbasis FPGA telah mampu menjalankan perintah gerakan gripper, elbow, shoulder, dan base sesuai sudut servo yang ditentukan, di mana gripper dapat membuka dan menutup dengan baik, elbow mampu bergerak maju dan mundur, serta shoulder dan base dapat bergerak ke posisi yang diinginkan meskipun pada beberapa perintah masih terjadi looping akibat glitch komunikasi antara FPGA dan ESP32.

Pada pengujian kemampuan menjepit, gripper hanya berhasil menjepit sampah ringan berukuran kecil seperti tisu bekas, sedangkan sampah ringan berukuran besar maupun sampah berat tidak dapat dijepit karena keterbatasan daya jepit dan torsi servo. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem sudah berjalan sesuai rancangan, namun masih memerlukan perbaikan pada aspek komunikasi agar tidak terjadi looping serta peningkatan desain gripper agar mampu menjepit objek dengan variasi ukuran dan berat yang lebih beragam..

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian, dapat disimpulkan bahwa sistem lengan robot pemungut sampah berbasis FPGA telah berfungsi sesuai tujuan. FPGA DE0-Nano berhasil digunakan sebagai pengolah awal perintah dari GCS melalui komunikasi VLC, kemudian diteruskan ke ESP32 untuk mengendalikan motor servo. Sistem mampu mengeksekusi perintah gerakan gripper, elbow, shoulder, dan base dengan akurasi yang baik, meskipun pada beberapa perintah masih terjadi looping akibat glitch komunikasi antara FPGA dan ESP32. Hasil pengujian menunjukkan perintah pada gripper dan elbow

berhasil 100%, sementara shoulder dan base hanya sebagian yang berhasil. Dari sisi mekanik, gripper hanya mampu menjepit sampah ringan berukuran kecil, sedangkan sampah besar atau berat tidak dapat dijepit. Secara keseluruhan, sistem telah menunjukkan kinerja yang cukup baik, namun masih memerlukan perbaikan pada aspek komunikasi dan kekuatan gripper agar lebih optimal.

REFERENSI

- [1] I. Iskandar, "Rancang Bangun Prototype Robot Pemungut Sampah Berbasis Arduino Mega," 2020.
- [2] I. Amalia, Syukranullah, and Bukhari, "RANCANG BANGUN ROBOT LENGAN BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO UNO Abstrak," Feb. 2019.
- [3] D. S. Pamungkas and M. S. Noviansyah, "Simulator Robot Lengan Dua Derajat Kebebasan," 2021.
- [4] M. Abidin and B. Suprianto, "Rancang Bangun Trainable Servo Robotic Arm 4 Dof (Degree of Freedom)," 2020.
- [5] I. P. Nasution, U. A. Ahmad, and W. P. Tresna, "Karakterisasi Putaran Motor Servo Jangkauan Setengah Bola Untuk Mendukung Pelontar peluru Berbasis Pneumatic," 2023.
- [6] A. A. Yurida, Rahayu Lucky P, and D. F. Syahbana, "Implementasi Kontrol Torsi Motor Servo Menggunakan Metode PI pada Sistem Automatic Pallet Dispenser," 2021.
- [7] X. Wang, W. Wang, L. Li, J. Shi, and B. Xie, "Adaptive Control of DC Motor Servo System with Application to Vehicle Active Steering," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 24, no. 3, pp. 1054–1063, Jun. 2019, doi: 10.1109/TMECH.2019.2906250.
- [8] Y. B. Gunawan Sugiarta, F. Isdaryani, D. P. Andini, and R. Hikmawati, "Implementasi Sistem Kendali ON-OFF pada Field Programmable Gate Array (FPGA)," *Jurnal Teknologi Rekayasa*, vol. 7, no. 1, 2022, doi: 10.31544/jtera.v7.i1.2022.
- [9] A. Syahri, "Desain Kontrol Vending Mesin Berbasis Fpga Dengan Finite State Machine," 2016.
- [10] B. T. Silalahi and E. Syahrin, "Penghitungan Surat Suara Berbasis Teknologi Dengan Menggunakan ESP32," vol. 8, no. 2, p. 136, Feb. 2024, [Online]. Available: <https://e-journal.potensi-utama.ac.id/ojs/index.php//>
- [11] M. I. Achmad and S. N. A, "Jurnal+MAHANDIA+Vol+8+No+2,+Agustus+2024+-+007+sd+022," Aug. 2024.
- [12] O. Mahendra, "Motion Capture System Berbasis Webcam Untuk Pengendalian Lengan Robot," 2018.
- [13] U. Mahanin Tyas, A. Apri Bukhari, kamal, Firdayanti, and Pattasang, "IMPLEMENTASI APLIKASI ARDUINO IDE PADA MATA KULIAH SISTEM DIGITAL," Apr. 2023.
- [14] H. Jurnal, I. A. Dianta, and A. A. Aqham, "JURNAL PUBLIKASI ILMU KOMPUTER DAN MULTIMEDIA Penerapan Logika Algoritma Pada Prototipe Data Biner Untuk Generator Kartu FPGA," *JUPIKOM*, vol. 1, no. 2, 2022.

