

Implementation of IoT Integrated Forklift Robot with MQTT Protocol for Industrial Automation

[Implementasi Robot Forklift Terintegrasi IoT dengan Protokol MQTT untuk Otomasi Industri]

Faisal Faris¹⁾, Indah Sulistiyowati^{*,2)} (10pt)

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

*Email Penulis Korespondensi: indah_sulistiyowati@umsida.ac.id

Abstract. *This research develops and tests a prototype forklift robot controlled via an Internet of Things (IoT)-based system using an ESP32 microcontroller and the MQTT protocol. Designed to overcome the limitations of traditional manual forklifts, the robot enhances warehouse operations by increasing efficiency and minimizing human error. The study presents the design, testing, and evaluation of the forklift robot's movement control, mechanical wheel performance, load capacity, and wireless connectivity across various Android devices and network providers. Testing was conducted over distances ranging from 1 km to 90 km with different Android devices (e.g., Samsung, Xiaomi, OPPO, Vivo) and providers (Indosat, Axis, Telkomsel, Smartfren). The robot successfully performed a variety of movements, including forward, backward, left, right, rotation, and lifting operations. It demonstrated stable load lifting capabilities up to 300 grams, with instability observed for heavier loads, and could operate smoothly across a range of network conditions. Connectivity tests showed consistent performance and stable communication, reinforcing the robot's practical use for remote control and real-time monitoring. This research emphasizes the potential of IoT-enabled forklift robots to optimize material handling processes in warehouses, contributing to safer and more efficient industrial environments.*

Keywords - Forklift Robot; Internet of Things (IoT); System Control; MQTT; Mecanum Wheel

Abstrak. *Penelitian ini mengembangkan dan menguji prototipe robot forklift yang dikendalikan melalui sistem berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan protokol MQTT. Dirancang untuk mengatasi keterbatasan forklift manual tradisional, robot ini meningkatkan operasi gudang dengan meningkatkan efisiensi dan meminimalkan kesalahan manusia. Penelitian ini menyajikan desain, pengujian, dan evaluasi kontrol gerakan robot forklift, kinerja roda mekanis, kapasitas beban, dan konektivitas nirkabel di berbagai perangkat Android dan penyedia jaringan. Pengujian dilakukan pada jarak mulai dari 1 km hingga 90 km dengan perangkat Android yang berbeda (misalnya, Samsung, Xiaomi, OPPO, Vivo) dan penyedia layanan (Indosat, Axis, Telkomsel, Smartfren). Robot ini berhasil melakukan berbagai gerakan, termasuk maju, mundur, kiri, kanan, rotasi, dan operasi pengangkatan. Robot ini menunjukkan kemampuan pengangkatan beban yang stabil hingga 300 gram, dengan ketidakstabilan yang teramati pada beban yang lebih berat, dan dapat beroperasi dengan lancar di berbagai kondisi jaringan. Uji konektivitas menunjukkan kinerja yang konsisten dan komunikasi yang stabil, memperkuat penggunaan praktis robot untuk kendali jarak jauh dan pemantauan waktu nyata. Penelitian ini menekankan potensi robot forklift berkemampuan IoT untuk mengoptimalkan proses penanganan material di gudang, yang berkontribusi pada lingkungan industri yang lebih aman dan efisien.*

Kata Kunci - Robot Forklift; Internet of Things (IoT); Kontrol Sistem; MQTT; Roda Mekanum

I. PENDAHULUAN

Forklift adalah alat pengangkat yang dapat digunakan di dalam maupun di luar ruangan untuk mengangkat dan memindahkan barang[1]. Industri, ekspedisi, dan pelabuhan banyak menggunakan forklift, terutama di ruang logistik dan pergudangan.[2], [3], [4]. Penggunaan forklift membuat pekerjaan lebih mudah bagi karyawan, terutama dalam memindahkan barang yang sulit atau terlalu berat untuk diangkat oleh manusia[5]. Karena dapat membahayakan kesehatan dan keselamatan pekerja, beberapa perusahaan melarang operator forklift memasuki area tertentu[6]. Selain itu, ada kelemahan forklift yang dapat menyebabkan kecelakaan kerja jika objek dipindahkan lebih tinggi dari pandangan operator[3], [7].

Kesalahan manusia mungkin terjadi karena forklift ini bergantung pada operator manual. Untuk mengurangi kesalahan manusia dan mengoptimalkan penggunaan forklift, sistem kendali jarak jauh dan komunikasi data yang lebih canggih seperti robot forklift diperlukan[8].

Robot memiliki banyak kelebihan yang tidak dimiliki oleh manusia, salah satunya adalah dapat menghasilkan kualitas yang sama jika melakukan tugas yang sama berulang kali, sehingga dapat digunakan untuk berbagai macam tugas. Hal ini dianggap sangat efisien dalam industri karena akurasi yang tinggi, biaya yang rendah, dan waktu produksi yang cepat[9]. Keunggulan tersebut semakin diperkuat dengan hadirnya Internet of Things (IoT), IoT merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang efektif yang dapat digunakan dalam skenario apapun[10]. Kegiatan sehari-hari menjadi lebih mudah dan efektif berkat teknologi ini yang menghubungkan benda-benda di sekitar kita dengan internet. Tujuan dari metode IoT ini adalah untuk menghubungkan smartphone Android dengan robot, yang kemudian dapat digunakan untuk mengontrol robot forklift. Kemajuan IoT juga memungkinkan pengguna untuk membuat sistem kontrol dan perangkat yang terhubung dengan internet secara real time[11], [12].

Sebuah penelitian berjudul "Rancang Bangun Robot Forklift Dengan Kendali Smartphone Android Berbasis Arduino Mega 2560" telah dipublikasikan pada bulan Desember 2017. Pada penelitian ini dilakukan penelitian dan pengembangan terhadap prototipe robot forklift dengan menggunakan motor DC sebagai penggerak, modul Bluetooth, dan mikrokontroler yang dapat dikendalikan dengan Bluetooth pada smartphone Android. Hasil penelitian menunjukkan bahwa robot dapat dikendalikan menggunakan smartphone Android untuk menimbang benda dengan akurasi 31,2 gram per detik dengan berat maksimal 200 gram[13].

Penelitian berikutnya berjudul "Rancang Bangun Robot Forklift dengan Roda Mecanum Berbasis Internet of Things" (2020) Robot Forklift menggunakan Mikrokontroler ESP32 untuk menggerakkan dan mengendalikan robot. Robot ini memiliki tiga mekanisme yang berbeda, termasuk ESP Cam untuk visibilitas operator dan pemantauan melalui aplikasi smartphone Android dan sensor jarak untuk mendeteksi objek. Navigasi robot memanfaatkan kecepatan yang berbeda dari setiap batang untuk bergerak ke segala arah tanpa harus melakukan perubahan rute secara tiba-tiba. Jika robot mendapat perintah menggunakan aplikasi Blynk pada smartphone, maka robot akan berhenti merespons. Menurut temuan studi, robot forklift ini dapat membawa beban hingga 2600 gram dengan kecepatan angkat maksimum 3,49 km/jam, atau 0,97 m/s. [2].

Untuk meningkatkan produktivitas, mikrokontroler ESP32 digunakan untuk menghubungkan Internet of Things dengan proses kontrol robot forklift. Sistem Android dapat mengontrol pergerakan robot forklift dari jarak jauh atau secara nirkabel secara real time berkat konektivitas Internet of Things[14].

Metode yang digunakan adalah integrasi Internet of Things pada prototipe robot forklift dengan menggunakan protokol MQTT. Protokol MQTT merupakan protokol jaringan Machine to Machine (M2M) yang berukuran kecil dengan mekanisme publish-subscribe[15]. MQTT membutuhkan mesin berdaya rendah dan lalu lintas data yang rendah agar dapat berfungsi dengan bandwidth jaringan yang terbatas atau spesifikasi mesin. Protokol ini memungkinkan interaksi mesin-ke-jaringan dan sebaliknya[16]. Sesuai dengan keinginan pengguna, MQTT memungkinkan pengiriman dan penerimaan pesan melalui kontrol atau pengawasan berdasarkan topik yang telah ditentukan sebelumnya[17]. MQTT merupakan pilihan yang baik untuk komunikasi antar perangkat dan aplikasi Internet of Things (IoT) karena membutuhkan bandwidth yang lebih Rendah dibandingkan protokol lainnya dengan mengikuti instruksi dari perangkat android yang telah ditentukan, robot forklift ini memiliki kemampuan untuk mengambil dan menempatkan barang[18]. Secara umum, pengendali robot memiliki dua pengontrol input. Yang pertama terhubung ke robot itu sendiri, dan yang kedua terhubung ke tiang, yang berbasis sistem operasi Android. Sistem nirkabel yang terintegrasi dengan Internet of Things memungkinkan pengendali untuk mengontrol dari jarak jauh[19], [20].

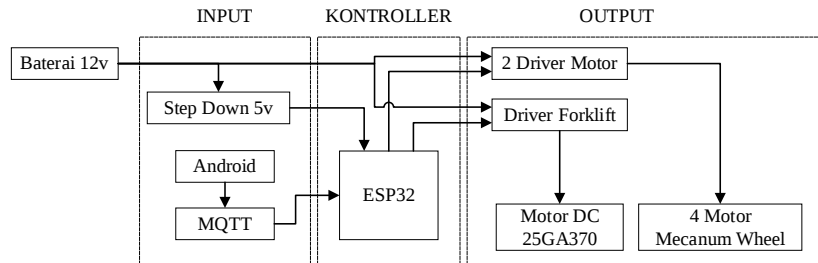
Penelitian sebelumnya tentang robot forklift berkemampuan Internet of Things sebagian besar mengandalkan Blynk atau Bluetooth untuk pengoperasian jarak jauh[5]. Namun, meskipun Blynk memerlukan registrasi pengguna dan membatasi akses platform, solusi berbasis Bluetooth kurang fleksibel dan memiliki jangkauan yang lebih kecil, sehingga kurang cocok untuk berbagai kebutuhan kontrol. Sebaliknya, MQTT menyediakan solusi yang lebih mudah beradaptasi karena tidak memerlukan registrasi atau login dan bekerja dengan berbagai platform, termasuk browser web, Android, dan aplikasi khusus MQTT. Selain itu, berbeda dengan desain preset Blynk, MQTT menawarkan lebih banyak pilihan untuk modifikasi desain antarmuka pengguna[21]. Dengan menggunakan MQTT, penelitian ini mengatasi kendala ini, menawarkan protokol komunikasi yang lebih mudah beradaptasi dan dapat diskalakan untuk robot forklift dan meningkatkan seluruh pengalaman kontrol dan penggunaan[22].

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif yang dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu studi literatur, perancangan prototipe, pengolahan data, serta analisis data dan kesimpulan. Penelitian yang menggunakan pendekatan deskriptif menyampaikan fakta dengan cara mendeskripsikan apa yang dilihat, diperoleh, dan dirasakan. Pada penelitian ini, yang diuji meliputi hasil uji roda mecanum, hasil uji berat beban forklift dan hasil uji konektivitas, serta hasil perancangan tampilan user interface pengendali robot pada smartphone. Gambar 1 merupakan skema rangkaian yang akan digunakan pada prototipe forklift berbasis IoT.

A. Analisis Sistem

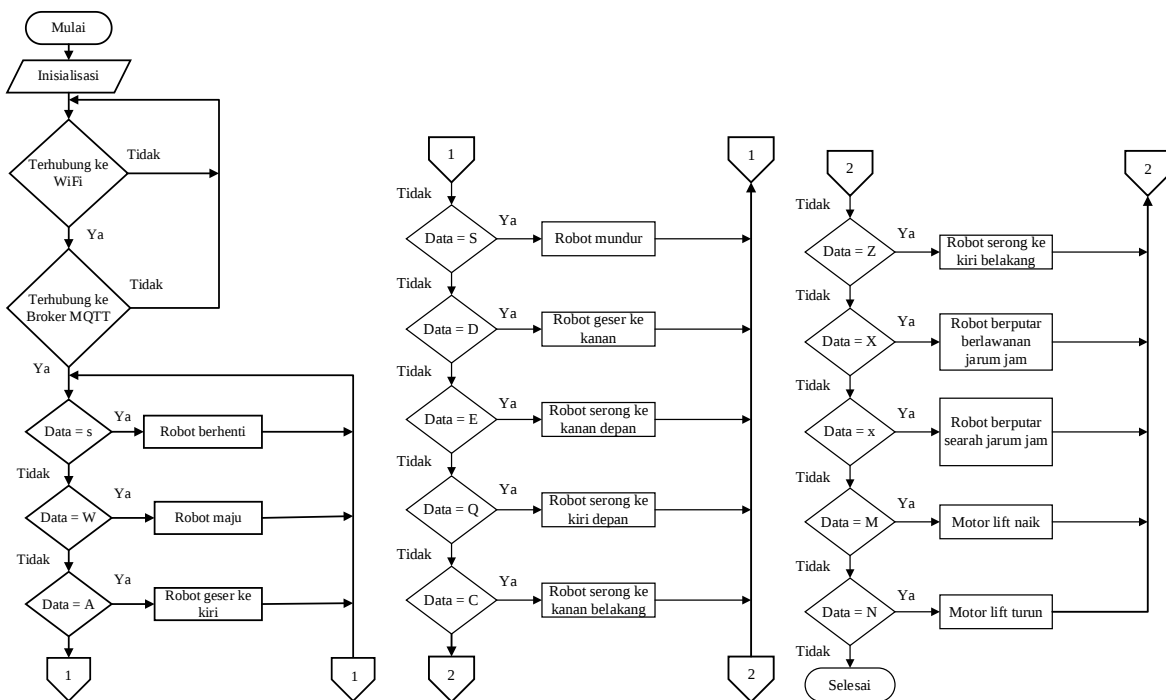
Dalam penelitian ini, perangkat android dirancang untuk memberikan perintah kepada robot forklift untuk meletakkan dan mengambil barang. Secara umum, pengendali robot memiliki dua input kontrol. Salah satunya terletak pada robot itu sendiri, dan yang lainnya terletak pada tiang, atau pengangkat, yang beroperasi pada sistem operasi Android.



Gambar 1. Diagram Blok Prototype Forklift

B. Desain sistem

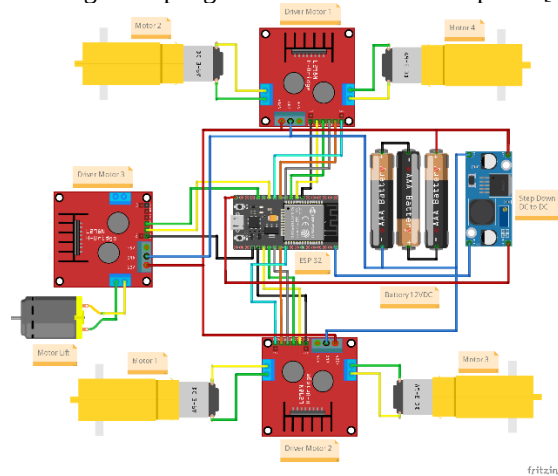
Perancangan sistem pada penelitian Prototype Sistem Kendali Forklift Menggunakan Android dan ESP32 Berbasis Komunikasi MQTT ini memiliki proses kerja sebagai berikut: Prototipe akan dikontrol secara nirkabel melalui aplikasi Android. Dengan ESP32 yang berfungsi sebagai mikrokontroler (otak) dari prototipe forklift yang nantinya akan memiliki dua input pengendali, input kendali motor, dan input kendali lift (tiang).



Gambar 2. Diagram Alir Prototype Forklift

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

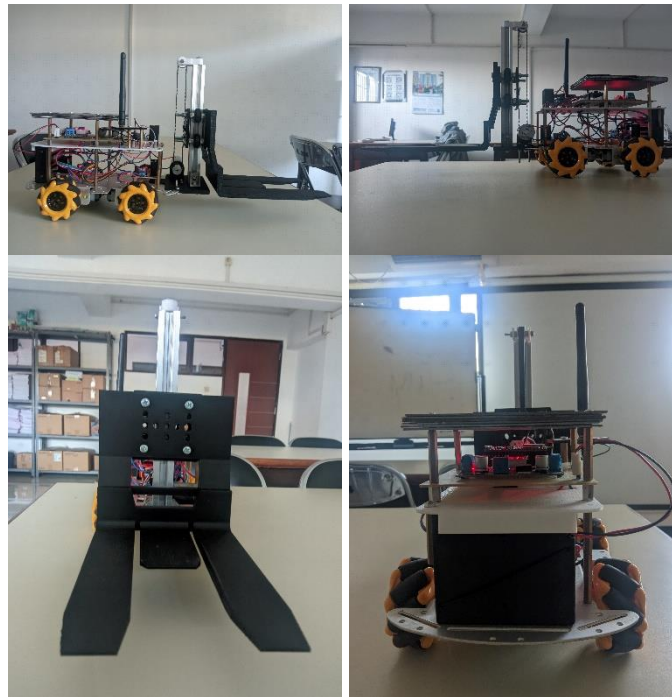
Hasil penelitian yang diperoleh dari Sistem Kontrol Prototipe Forklift Menggunakan Android dan ESP32 Berbasis Komunikasi MQTT disini meliputi prototipe robot forklift, hasil uji mekanik roda, hasil uji berat beban forklift, dan hasil uji konektivitas, serta hasil rancangan UI pengendali robot untuk smartphone[2].



Gambar 3. Skema Rangkaian Prototipe Forklift

A. Hasil Prototipe Robot Forklift

Hasil dari penelitian ini terdiri dari dua bagian yaitu perangkat lunak yang meliputi antarmuka kontrol untuk smartphone dan perangkat keras yang meliputi prototipe robot forklift dengan roda mekanik yang dapat dikontrol dari jarak jauh dengan smartphone. Hasil rancangan secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 4.

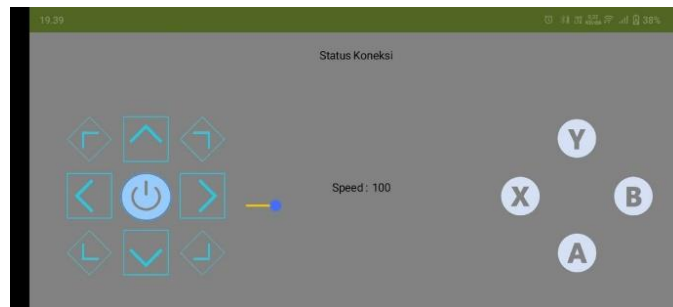


Gambar 4. Hasil Prototipe Forklift

Robot ini memiliki garpu pengangkat yang digerakkan oleh motor DC tipe 25GA 370 yang memiliki tegangan 12 volt DC, kecepatan 12 rpm, dan torsi 9 kg/cm.

B. Hasil Tampilan Antarmuka Pengguna

Aplikasi MIT App Inventor digunakan untuk membangun UI yang berfungsi sebagai pengendali robot forklift untuk smartphone dengan hasil dari mit app inventor adalah forklift IoT.apk. Bentuk UI yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Antarmuka Pengguna Kontrol Forklift

Keterangan:

symbol	keyword	keterangan
	= -	Button Power digunakan sebagai aplikasi MIT App terhubung dengan MQTT
	= W	Button Forward digunakan sebagai perintah robot bergerak maju
	= A	Button Left digunakan sebagai perintah robot bergerak ke kiri
	= S	Button Reverse digunakan sebagai perintah robot bergerak mundur
	= D	Button Right digunakan sebagai perintah robot bergerak ke kanan
	= E	Button Right Forward digunakan sebagai perintah robot bergerak serong ke kanan depan
	= Q	Button Left Forward digunakan sebagai perintah robot bergerak serong ke kiri depan
	= C	Button Right Reverse digunakan sebagai perintah robot bergerak serong ke kanan belakang
	= Z	Button Left Reverse digunakan sebagai perintah robot bergerak serong ke kiri belakang
	= X	Button B digunakan sebagai perintah robot berputar searah jarum jam
	= x	Button X digunakan sebagai perintah robot bergerak berlawanan jarum jam
	= M	Button Y digunakan sebagai perintah lift untuk naik
	= N	Button A digunakan sebagai perintah lift untuk turun

Pengujian ini dimulai dengan menekan Tombol Power, kontrol forklift tidak dapat digunakan apabila user interface gagal terhubung dengan broker MTT dengan mengirimkan notifikasi pada layar berupa "MQTT broker not connected" hingga status koneksi berubah menjadi Online. Untuk menggerakkan forklift, tekan tombol sesuai dengan perintah di atas dan lepaskan tombol untuk menghentikan pergerakan robot, dan tambahkan slider kecepatan untuk mengatur kecepatan robot.

C. Hasil Pengujian Roda Mekanum

Tabel 1. Hasil Uji Pergerakan Roda Mekanum

No	Gerakan	Motor kiri depan	Motor kanan depan	Motor kiri belakang	Motor kanan belakang
1	Maju	Maju	Maju	Maju	Maju
2	Mundur	Mundur	Mundur	Mundur	Mundur
3	Kiri	Mundur	Maju	Maju	Mundur
4	Kanan	Maju	Mundur	Mundur	Maju
5	Kanan Depan	Maju	-	-	Maju
6	Kiri Depan	-	Maju	Maju	-
7	Kanan Belakang	-	Mundur	Mundur	-
8	Kiri Belakang	Mundur	-	-	Mundur
9	Rotasi CW	Maju	Mundur	Maju	Mundur
10	Rotasi CCW	Mundur	Maju	Mundur	Maju

Data pada tabel 1 menguji motor untuk roda mekanis. Motor 1, 2, 3, dan 4 harus bergerak maju dengan kecepatan PWM yang sama agar robot bergerak maju. Jika ingin bergerak mundur, keempat motor harus bergerak mundur. Untuk bergerak ke kiri, motor 1 dan 4 harus bergerak mundur, sedangkan motor 2 dan 3 harus bergerak maju. Untuk bergerak ke kanan, motor 1 dan 4 harus bergerak maju, sedangkan motor 2 dan 3 harus bergerak mundur. Setiap motor dapat bergerak secara diagonal dengan menggabungkan gerakan maju dan mundur. Motor 1 dan 3 bergerak maju, sedangkan motor 2 dan 4 bergerak mundur. Sebaliknya, motor 1 dan 3 bergerak mundur, sedangkan motor 2 dan 4 bergerak maju. Proses pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa robot dapat bergerak sesuai dengan yang direncanakan.

D. Hasil Pengujian Sistem Forklift

Pengujian sistem forklift dilakukan untuk mengetahui kapasitas beban yang dapat diangkat oleh prototipe forklift.

Tabel 2. Hasil Uji Kapasitas Beban Angkat

No	Berat beban (gr)	Waktu angkat (s)	Waktu turun (s)	keterangan
1	120	14	14	Stabil
2	200	14.5	15	Stabil
3	300	14.6	15.8	Stabil
4	450	16	14	Tidak stabil

5	520	16.3	14	Tidak stabil
6	800	0	0	Tidak bisa diangkat
7	1000	0	0	Tidak bisa diangkat

Hasil pengujian sistem forklift didapatkan beban maksimal yang dapat diangkat oleh prototipe forklift sebesar 300 gram. Pengujian pada beban 450-520 gram dapat diangkat namun robot tidak seimbang sehingga beban tidak stabil. Pengujian pada beban 800-1000 gram tidak dapat diangkat.

E. Hasil Pengujian Konektivitas

Pengujian konektivitas dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sistem kontrol android. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan perangkat android ke internet dan menghubungkan ke broker MQTT.

Tabel 3. Hasil Pengujian ESP32 Sebagai Modul IoT Berbasis Komunikasi MQTT Terhadap *Device* dan *Provider* Yang Berbeda

No	Tipe Android	Jarak Kisaran (km)	Provider	Pengujian Ke					Status Koneksi	Deskripsi Tempat
				1	2	3	4	5		
1	Samsung	1	Axis	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Candi
2	Xiaomi	2	Indosat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Tanggulangin
3	OPPO A53	8	Indosat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Jenggolo
4	Infinix	12	Indihome	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Gedangan
5	Oppo Reno 3	16	Smartfren	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Ngoro
6	Vivo Y20	20	Telkomsel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Bangil
7	Vivo S One Pro	34	Orbit Telkomsel	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Tarik-Sidoarjo
8	samsung A22	45	Indosat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Gresik
9	Realmi C7	90	Indosat	✓	✓	✓	✓	✓	✓	dari Kampus ke Paceng-Gresik

Hasil pengujian ESP32 sebagai modul IoT berbasis komunikasi MQTT dengan berbagai jenis Android dan provider menunjukkan performa yang konsisten dalam mempertahankan koneksi pada berbagai jarak dan provider yang berbeda. Pengujian dilakukan di berbagai lokasi dengan jarak mulai dari satu kilometer hingga sembilan puluh kilometer dari kampus. Setiap provider yang digunakan, baik Indosat, Axis, Indihome, Smartfren, Telkomsel, dan Orbit Telkomsel menunjukkan status koneksi yang berhasil dan stabil.

Perangkat Android seperti Samsung, Xiaomi, OPPO A53, dan Vivo S One Pro berhasil terkoneksi dari jarak dekat hingga jarak yang sangat jauh, dengan hasil yang positif untuk setiap jarak yang diujikan. Sebagai contoh, koneksi dari kampus ke berbagai lokasi, mulai dari Candi hingga Paceng-Gresik, tetap stabil tanpa masalah.

Tabel 4. Hasil Pengujian Keseluruhan Robot Bagian 1

No	Kondisi robot	Jarak kisaran (km)	Gerakan robot			
			Maju	Mundur	Kiri	Kanan
1	terhubung	1	✓	✓	✓	✓
2	terhubung	2	✓	✓	✓	✓
3	terhubung	8	✓	✓	✓	✓
4	terhubung	12	✓	✓	✓	✓
5	terhubung	16	✓	✓	✓	✓
6	terhubung	20	✓	✓	✓	✓
7	terhubung	34	✓	✓	✓	✓
8	terhubung	45	✓	✓	✓	✓
9	terhubung	90	✓	✓	✓	✓

Hasil pengujian keseluruhan robot pada bagian 1 menunjukkan bahwa robot dapat melakukan empat gerakan dasar seperti maju, mundur, kiri, dan kanan dengan sukses pada berbagai jarak selama broker MQTT terhubung.

Tabel 5. Hasil Pengujian Keseluruhan Robot Bagian 2

No	Kondisi robot	Jarak kisaran (km)	Gerakan robot			
			Kanan Depan	Kiri Depan	Kanan Belakang	Kiri Belakang
1	terhubung	1	✓	✓	✓	✓
2	terhubung	2	✓	✓	✓	✓
3	terhubung	8	✓	✓	✓	✓
4	terhubung	12	✓	✓	✓	✓
5	terhubung	16	✓	✓	✓	✓
6	terhubung	20	✓	✓	✓	✓
7	terhubung	34	✓	✓	✓	✓
8	terhubung	45	✓	✓	✓	✓
9	terhubung	90	✓	✓	✓	✓

Hasil pengujian keseluruhan robot pada bagian 2 menunjukkan bahwa robot dapat melakukan semua gerakan yang diuji seperti kanan depan, kiri depan, kanan belakang, dan kiri belakang dengan sukses pada berbagai jarak selama broker MQTT terhubung.

Tabel 6. Hasil Pengujian Keseluruhan Robot Bagian 3

No	Kondisi robot	Jarak kisaran (km)	Gerakan robot			
			Rotasi CW	Rotasi CCW	Naik	Turun
1	terhubung	1	✓	✓	✓	✓
2	terhubung	2	✓	✓	✓	✓
3	terhubung	8	✓	✓	✓	✓

4	terhubung	12	✓	✓	✓	✓
5	terhubung	16	✓	✓	✓	✓
6	terhubung	20	✓	✓	✓	✓
7	terhubung	34	✓	✓	✓	✓
8	terhubung	45	✓	✓	✓	✓
9	terhubung	90	✓	✓	✓	✓

Robot forklift dapat secara efektif menjalankan berbagai tindakan, termasuk rotasi searah jarum jam (CW) dan berlawanan arah jarum jam (CCW), serta operasi lift naik dan turun pada jarak yang beragam, menurut temuan pengujian robot secara keseluruhan di bagian 3. Selama broker MQTT terhubung, gerakan-gerakan ini-yang sangat penting untuk operasi robot-berhasil diselesaikan. Selama uji coba, tidak ada jeda atau kegagalan yang terlihat, dan protokol MQTT memungkinkan komunikasi yang lancar pada jarak mulai dari 1 km hingga 90 km. Karakteristik ini selaras dengan hasil yang diantisipasi dari sistem berkemampuan IoT, di mana kinerja operasional sebagian besar bergantung pada konektivitas.

Kinerja prototipe dalam penelitian ini sangat sesuai dengan temuan sebelumnya jika dibandingkan dengan penelitian awal, peningkatan yang patut dicatat dalam penelitian ini adalah stabilitas dan akurasi kontrol pada jarak tersebut menunjukkan robot forklift berbasis IoT[2], yang dikontrol melalui aplikasi Android dan protokol MQTT, mencapai kemampuan kontrol yang kuat pada rentang jarak dari 1 km hingga 90 km, dengan jenis gerakan yang berhasil seperti maju, mundur, dan rotasi. Infrastruktur komunikasi yang solid ditunjukkan oleh kelancaran operasi robot dalam jarak yang lebih jauh - hingga 90 km - yang tidak begitu jelas pada penelitian awal. Selain itu, penelitian ini menyajikan kapasitas pengangkatan prototipe forklift, mencapai pengangkatan yang stabil hingga 300 gram, sebanding dengan pengujian pengangkatan beban awal, di mana stabilitas beban menjadi bermasalah saat bobotnya[2]. melebihi 2.600 gram.

Penelitian ini lebih berkonsentrasi pada peningkatan jarak operasional tanpa mengorbankan kinerja pergerakan, menggunakan protokol MQTT sebagai media komunikasi yang ringan, meskipun kedua eksperimen menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk kerangka kerja IoT. MQTT memberikan solusi bandwidth rendah yang efektif untuk sistem kendali jarak jauh. Akan tetapi, hal ini memperluas penggunaannya dengan menyelidiki kapasitasnya untuk mempertahankan stabilitas pada jarak yang lebih jauh.

Perbandingan kapasitas angkat dalam studi ini menegaskan kesimpulan studi awal bahwa forklift robotik menunjukkan ketidakstabilan atau kegagalan saat membawa beban besar. Studi ini menemukan bahwa beban 300 gram adalah beban maksimum untuk operasi yang stabil, setelah itu sistem menjadi tidak stabil. Perkembangan masa depan dalam desain forklift robotik harus mempertimbangkan hal ini, terutama ketika melihat motor pengangkat yang lebih kuat dan sistem penyeimbangan yang lebih baik[2], [13].

Hasil penelitian ini semakin diperkuat dengan keandalan komunikasi MQTT di beberapa perangkat Android dan penyedia jaringan (Axis, Telkomsel, Indosat, dan Smartfren). Sesuai dengan temuan awal, penelitian ini menunjukkan bahwa MQTT merupakan protokol komunikasi yang sukses untuk manajemen forklift jarak jauh, seperti yang ditunjukkan oleh keberhasilan pengoperasiannya dari berbagai lokasi, termasuk dari jarak hingga 90 km. Hasil ini menunjukkan bagaimana sistem forklift berbasis IoT dapat meningkatkan operasi gudang dengan memberikan kontrol yang akurat dan andal dari berbagai jarak dan meningkatkan efisiensi penanganan material.

IV. SIMPULAN

Hasil penelitian ini memberikan investigasi yang lebih dalam tentang aplikasi dunia nyata dari teknologi IoT dalam otomatisasi gudang sekaligus mengonfirmasi keandalan operasional robot forklift, terutama yang berkaitan dengan kontrol gerakan dan stabilitas komunikasi. Peningkatan signifikan dalam rentang kendali, stabilitas beban, dan integrasi sistem ditunjukkan saat membandingkan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya, yang menjadikan robot forklift ini sebagai pilihan yang lebih serbaguna untuk aplikasi dunia nyata.

REFERENSI

- [1] D. Ilangasinghe and M. Parnichkun, "Navigation Control of an Automatic Guided Forklift," *2019 1st International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics, ICA-SYMP 2019*, pp. 123–126, Feb. 2019, doi: 10.1109/ICA-SYMP.2019.8646051.
- [2] Y. Yusman, S. Amra, and A. M. Alfatani, "Rancang Bangun Robot Forklift dengan Roda Mecanum Berbasis Internet of Things," *AVITEC*, vol. 6, no. 1, p. 1, Feb. 2024, doi: 10.28989/avitec.v6i1.1969.
- [3] I. Henry, A. Nagoro, K. Jati, and N. A. Mutaqin, "AEEJ : Journal of Automotive Engineering and Vocational Education Design and Build Forklift Autonomous Driving System Using Arduino Rancang Bangun Forklift Autonomous Driving System Menggunakan Arduino," 2021, doi: 10.24036/aej.v2i2.26.
- [4] A. Tahir, P. Studi Perbaikan dan Perawatan Mesin, and A. Teknik Soroako, "Prototipe Forklift Sebagai Media Pembelajaran dengan Pengendali Jarak Jauh," 2023.
- [5] M. Singh, A. Singh, and V. K. Tayal, "Mini Forklift Robot Control Design using Microcontroller for Industrial Applications," *Proceedings of the 5th International Conference on Inventive Research in Computing Applications, ICIRCA 2023*, pp. 1578–1582, 2023, doi: 10.1109/ICIRCA57980.2023.10220920.
- [6] A. Prutsch, H. Possegger, and H. Bischof, "Action-By-Detection: Efficient Forklift Action Detection for Autonomous Mobile Robots in Warehouses," *Proc IEEE Int Conf Robot Autom*, pp. 10757–10763, 2024, doi: 10.1109/ICRA57147.2024.10611659.
- [7] G. G. Maulana, H. Rudiansyah, and S. N. Tazkia, "Automation Forklift System untuk Penyimpanan Produk pada Gudang Berbasis Labview," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 6, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.28932/jutisi.v6i1.2334.
- [8] G. Priyandoko, "PROTOTYPE ROBOT FORKLIFT LINE FOLLOWER INCOMING MATERIAL WAREHOUSE DENGAN WIRELESS MONITORING," 2021.
- [9] M. Malarczyk, G. Kaczmarczyk, J. Szrek, and M. Kaminski, "Internet of Robotic Things (IoRT) and Metaheuristic Optimization Techniques Applied for Wheel-Legged Robot," *Future Internet 2023, Vol. 15, Page 303*, vol. 15, no. 9, p. 303, Sep. 2023, doi: 10.3390/FI15090303.
- [10] Hayatal Falah Agus, Syahririni Syamsudduha, Wisaksono Arief, and Eko Prasetyo Yoga, "IOT-Based Sumo Robot Control Using Blynk Software," 2023.
- [11] I. Sulistiyowati, A. R. Sugiarto, and J. Jamaaluddin, "Smart Laboratory Based on Internet of Things in the Faculty of Electrical Engineering, University of Muhammadiyah Sidoarjo," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jul. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/874/1/012007.
- [12] A. Hayatal, S. Syahririni, A. W, A. A. DP, and D. PN, "Junior High Robotics Inspiration: Engaging Students with Exciting Interactive Socialization," *Indonesian Journal of Cultural and Community Development*, vol. 14, no. 2, Aug. 2023, doi: 10.21070/ijccd.v14i2.959.
- [13] A. Mariano, "RANCANG BANGUN ROBOT FORKLIFT DENGAN KENDALI SMARTPHONE ANDROID BERBASIS ARDUINO MEGA 2560," 2017.
- [14] M. Kashyap, A. K. Dev, and V. Sharma, "Implementation and analysis of EMQX broker for MQTT protocol in the Internet of Things," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, p. 100846, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PRIME.2024.100846.
- [15] K. Kosaka, Y. Noda, T. Yokotani, and K. Ishibashi, "Implementation and Evaluation of the Control Mechanism Among Distributed MQTT Brokers," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 134211–134216, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3335273.
- [16] Dhairya. Parikh, "Raspberry Pi and MQTT essentials : the complete guide to help you build innovative full-scale prototype projects," 2022, Accessed: Feb. 03, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Raspberry_Pi_and_MQTT_Essentials.html?hl=id&id=zNJdzwEACAAJ
- [17] M. Carratu, V. Gallo, and V. Paciello, "IEEE 1451: Communication among smart sensors using MQTT protocol," *2022 IEEE International Symposium on Measurements and Networking, M and N 2022 - Proceedings*, 2022, doi: 10.1109/MN55117.2022.9887708.
- [18] M. Z. Ahmad, A. R. Adenan, M. S. Rohmad, and Y. M. Yussoff, "Performance Analysis of Secure MQTT Communication Protocol," *2023 19th IEEE International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2023 - Conference Proceedings*, pp. 225–229, 2023, doi: 10.1109/CSPA57446.2023.10087603.
- [19] A. Suryowinoto and M. Wijayanto, "The prototype of A Forklift Robot Based on AGV System and Android Wireless Controlled for Stacked Shelves," *International Journal of Artificial Intelligence & Robotics (IJAIR)*, vol. 2, no. 1, pp. 1–7, Jul. 2020, doi: 10.25139/ijair.v2i1.2621.

- [20] I. Sulistiyowati, A. I. Muzaqi, M. S. Maulana, M. T. Alimova, and Supardi, "Revolutionizing package delivery with IoT-based smart boxes: Solving the Dilemma of missed deliveries," *AIP Conf Proc*, vol. 3167, no. 1, Jul. 2024, doi: 10.1063/5.0220240/3304514.
- [21] A. Sartori, R. Waspe, and C. Schlette, "MQTT Enabled Simulation Interface for Motion Execution of Industrial Robots," *2023 9th International Conference on Automation, Robotics and Applications, ICARA 2023*, pp. 28–32, 2023, doi: 10.1109/ICARA56516.2023.10125673.
- [22] F. Dewanta, I. Wahidah, S. N. Hertiana, D. D. Sanjoyo, and S. H. S. Ariffin, "SibProMQTT: Protection of the MQTT Communication Protocol Against Sybil Attacks Applied for IoT Devices," *Proceedings of the 2023 International Conference on IC Design and Technology, ICICDT 2023*, pp. 108–111, 2023, doi: 10.1109/ICICDT59917.2023.10332423.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.