

E-ISSN : 2746 - 2536

JULIET

Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan

Volume 3 No. 1 - Mei 2022

Departemen Teknik Elektro dan Informatika
Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada
Jl. Yacaranda, Sekip Unit IV, Yogyakarta. 55281

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Muhammad Arrofiq, Universitas Gadjah Mada

Associate Editor

Candra Febri Nugraha, Universitas Gadjah Mada

Editor

Budi Sumanto, Universitas Gadjah Mada

Esa Prakasa, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Fahmizal, Universitas Gadjah Mada

Suhono, Universitas Gadjah Mada

Copyeditor

Jans Hendry, Universitas Gadjah Mada

Assistant Editor

Andi Fariel, Universitas Gadjah Mada

Rismanda Kusumadewi, Universitas Gadjah Mada

Published by:

- 1. Analisis Potensi Penerapan PLTS pada Kantor Unit Metrologi Legal Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Tulungagung** 1 - 5
Geston Bakti Muntoha
- 2. Purwarupa Perangkat Pelindung Jemuran pada Rumah Pintar Berbasis IoT Memanfaatkan MQTT dan Fog Computing** 6 - 12
Mochammad Haldi Widiyanto, Matthew Christopher Albert, Herlangga Karteja
- 3. Purwarupa Pendeteksi Liquefied Petroleum Gas (LPG) Menggunakan Sensor MQ-2 dengan Blynk** 13 - 19
Rismanda Tyas Kusumadewi, Rizki Kurniadi, Unan Yusmaniar Oktiawati
- 4. Optimisasi Penjadwalan Pembangkit pada Microgrid dengan Mempertimbangkan Respons Beban** 20 - 24
Candra Febri Nugraha, Lukman Subekti
- 5. Implementasi Kinematika Trajectory Lingkaran pada Robot Roda Mecanum** 25 - 30
Fahmizal, Angga Priyatmoko, Afrizal Mayub

Analisis Potensi Penerapan PLTS pada Kantor Unit Metrologi Legal Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Tulungagung

Geston Bakti Muntoha^{1*}

¹Teknik Elektro, Universitas Islam Kadiri

*Korespondensi: gestonbakti@yahoo.co.id

Abstract – *Electricity consumption in Tulungagung Regency in 2018-2020 has increased. Electricity consumption in Tulungagung Regency in 2020 amounted to 572.007 GWh covering the household sector, industrial sector, business sector, social sector, office building sector and public street lighting. One of the energy consumption in Tulungagung Regency, especially in the office building sector in 2020 amounted to 22,140,943 kWh or equivalent to 22.14 GWh. One of the potential uses of renewable energy is to build PLTS in buildings or government offices that become the places of community service, one of which is the security service by the Legal Metrology Unit (UML) of Tulungagung Regency by utilizing the roof of the building or the building. This research aims to find out the potential energy generated from PLTS using Helioscope software if built on the roof. The area of the roof that has the potential as a place for PLTS to be built with a total area of the roof side of the office that can be used is 122.80m². By using a module of 500 Wp, the number of modules needed on the roof is 36 modules with a total installed capacity of 18,000 Wp. PLTS with this capacity requires as many as 1 unit with an inverter capacity of 15,000 W. Total energy potential generated from PLTS is 24,623.1 kWh / year or equivalent to 24.6 MWh / year with a system performance ratio of 76.2%. Factors that contribute to the reduction of energy potential or system loss with the largest contributors are the temperature by 7.5% and shading by 6.9%.*

Keywords : *photovoltaic, building, power, energy, metrology*

Intisari – Konsumsi energi listrik di Kabupaten Tulungagung tahun 2018-2020 mengalami peningkatan. Konsumsi energi listrik di Kabupaten Tulungagung tahun 2020 sebesar 572,007 GWh meliputi sektor rumah tangga, sektor industri, sektor usaha, sektor sosial, sektor gedung kantor dan penerangan jalan umum. Salah satu konsumsi energi di Kabupaten Tulungagung khususnya pada sektor gedung perkantoran pada tahun 2020 sebesar 22.140.943 kWh atau setara 22,14 GWh. Salah satu potensi pemanfaatan energi terbarukan yaitu dengan membangun PLTS pada bangunan gedung atau kantor pemerintahan yang menjadi tempat pelayanan masyarakat salah satunya yaitu pelayanan kemetrolagian oleh Unit Metrologi Legal (UML) Kabupaten Tulungagung dengan memanfaatkan atap gedung atau bangunan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan dari PLTS menggunakan *software* Helioscope jika dibangun pada atap tersebut. Luasan atap yang berpotensi sebagai tempat PLTS dibangun dengan luas total sisi atap kantor yang dapat digunakan adalah 122,80m². Dengan menggunakan modul sebesar 500 Wp maka jumlah modul yang diperlukan pada atap sebanyak 36 modul dengan total kapasitas terpasang sebesar 18.000 Wp. PLTS dengan kapasitas tersebut memerlukan sebanyak satu unit dengan kapasitas *inverter* 15.000 W. Total potensi energi yang dihasilkan dari PLTS sebesar 24.623,1 kWh/tahun atau setara dengan 24,6 MWh/tahun dengan *system performance ratio* sebesar 76,2%. Faktor-faktor yang menyumbang pengurangan potensi energi atau dalam hal ini disebut *system loss* dengan penyumbang terbesar yaitu faktor suhu sebesar 7,5% dan faktor *shading* sebesar 6,9%.

Kata kunci : *fotovoltaik, gedung, daya, energi, metrologi*

I. PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik di Kabupaten Tulungagung pada tahun 2018-2020 mengalami peningkatan. Konsumsi energi listrik di Kabupaten Tulungagung tahun 2020 sebesar 572,01 GWh meliputi sektor rumah tangga, sektor industri, sektor usaha, sektor sosial, sektor gedung kantor dan penerangan jalan umum. Konsumsi energi di Kabupaten Tulungagung pada sektor gedung perkantoran pada tahun 2020 mencapai 22,141 GWh [1]. Energi listrik di kabupaten Tulungagung dipasok melalui jaringan interkoneksi Jawa-Madura-Bali karena belum adanya pembangkit listrik yang dapat memenuhi permintaan listrik di Kabupaten Tulungagung. Energi yang disalurkan pada jaringan interkoneksi umumnya bersumber dari Batubara [2]. Oleh sebab itu energi pengganti bahan bakar fosil sangat dibutuhkan oleh manusia ke depannya. Komposisi Energi terbarukan di Indonesia meliputi Mikro Hidro 0,41%, Biomassa 2,71%, Surya 0,09% dan Hibrid 0,01% [3] Pemanfaatan energi terbarukan dengan mengoptimalkan energi surya dapat diterapkan didaerah perkotaan khususnya pada gedung-gedung perkantoran. Sektor bangunan hingga 40% dari total energi tahunan [4]

Energi surya merupakan energi yang potensial dikembangkan di Indonesia mengingat Indonesia terletak di daerah khatulistiwa. Energi surya yang mampu dibangkitkan di seluruh daratan Indonesia adalah 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan 112.000 GWp [5] Salah satu potensi pemanfaatan energi terbarukan yaitu dengan membangun PLTS di atas bangunan gedung atau kantor pemerintahan salah satunya yaitu pelayanan kemetrolagian oleh Unit Metrologi Legal (UML) Kabupaten Tulungagung. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi energi yang dihasilkan dari PLTS menggunakan *software* Helioscope jika dibangun pada atap Gedung Unit Metrologi Legal Kabupaten Tulungagung

II. STUDI PUSTAKA

A. Helioscope

HelioScope program yang bersifat *open software* baru yang berbasis *website*. HelioScope merupakan produk dari Folsom Lab USA yang digunakan untuk mendesain sistem fotovoltaik seperti beberapa fitur PVSyst serta menambahkan fungsionalitas desain AutoCAD, yang memungkinkan perancang untuk melakukan desain lengkap pada satu paket.

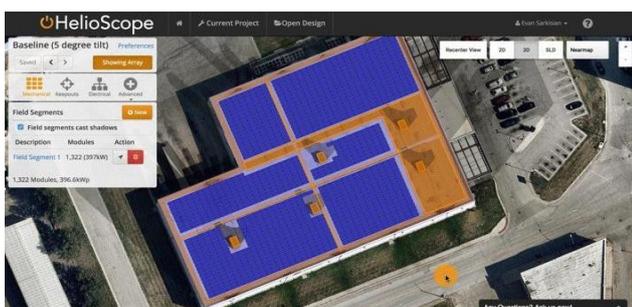
Lokasi berupa alamat lengkap, konfigurasi *array*, modul PV serta spesifikasi *inverter* merupakan syarat *input* utama yang dibutuhkan HelioScope.

Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk memprediksi produksi energi yang menghitung berdasarkan kerugian akibat cuaca serta iklim. Aspek-aspek seperti *shading*, pengabelan, efisiensi komponen, ketidakcocokan panel, serta penggunaan lama (penuaan) dapat pula dianalisis guna memberikan rekomendasi untuk peralatan serta tata letak susunan. Program ini menampilkan produksi tahunan, kumpulan data cuaca, rasio kinerja, serta parameter sistem lainnya untuk hasil simulasi [6] Fungsi tersebut memudahkan pengguna ketika menggunakan HelioScope. Pengguna dapat memasukkan lokasi bangunan yang akan dipelajari secara lengkap serta menghubungkannya secara *real-time* ke Google Earth, sehingga hal tersebut pula mempermudah pengguna untuk merancang sistem PLTS pada gedung yang akan dianalisis. Kumpulan data dari *inverter* dan panel surya juga disediakan secara lengkap dan detail sehingga pengguna dapat lebih selektif dalam menyusun rangkaian PLTS.

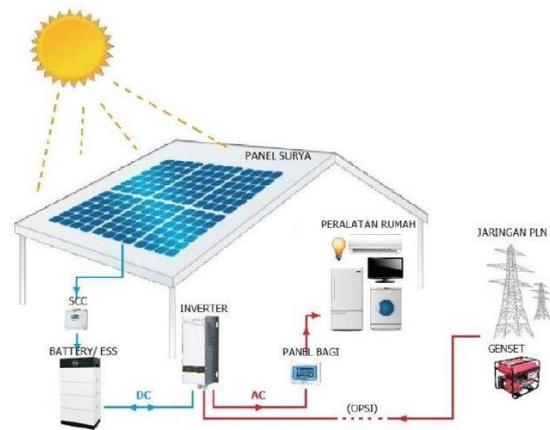
B. PLTS

Sebuah teknologi pembangkit listrik yang mengonversi energi foton yang bersumber dari surya menjadi energi listrik disebut Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Sel – sel fotovoltaik dalam panel surya melakukan konversi dari tenaga foton sebagai energi listrik. Sel *fotovoltaik* adalah lapisan tipis dari silikon (Si) murni atau bahan semikonduktor, sehingga jika bahan tersebut menerima energi foton maka akan mengeksitasi elektron dari ikatan atomnya menjadi elektron yang bergerak bebas, dan pada akhirnya akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah [7].

Prinsip sel surya (*fotovoltaik*) yaitu apabila dioda semikonduktor bekerja dalam proses tak seimbang dan berdasarkan efek *fotovoltaik*. Pada saat itu sel surya menghasilkan tegangan 0,5 – 1 Volt tergantung dari intensitas cahaya matahari dan jenis zat semikonduktor yang dipakai. Untuk intensitas energi yang ada dalam sinar matahari yang sampai ke permukaan bumi besarnya sekitar 1.000 W. Tapi karena daya guna konversi energi radiasi menjadi energi listrik berdasarkan efek *fotovoltaik* baru mencapai 25%, sehingga produksi listrik maksimal yang dihasilkan sel surya baru mencapai 250 W per m² [8].



Gambar 1. Tampilan HelioScope [9]



Gambar 2. Sistem PLTS [8]

III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Kantor Unit Metrologi Legal yang berada di Dinas Perindustrian dan Perdagangan (Disperindag), Kabupaten Tulungagung Provinsi Jawa Timur. Unit Metrologi Legal Kabupaten Tulungagung terletak Kantor Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Tulungagung merupakan salah satu kantor milik Pemerintah yang terdapat di Kabupaten Tulungagung. Kantor ini terletak pada latitude atau garis lintang 8°05'17"S dan *longitude* atau garis bujur 111°56'06"E. Penelitian ini menggunakan *software HelioScope* versi 2021. Tahapan metode penelitian adalah sebagai berikut:

1. Melakukan observasi lapangan pada Kantor Dinas Perindustrian dan Perdagangan, Kabupaten Tulungagung Provinsi Jawa Timur untuk mengetahui kondisi area atap Gedung yang berpotensi menjadi lokasi PLTS, letak secara geografis serta mengumpulkan data yang menunjang penelitian.
2. Menghitung luasan area atap gedung yang memiliki potensi pada atap gedung untuk penempatan fotovoltaik menggunakan *HelioScope*, di mana pada *HelioScope* telah terhubung langsung dengan *Google Earth*.
3. Menentukan banyaknya modul surya yang dapat dipasang pada atap gedung dan daya yang diperoleh.
4. Melakukan simulasi dengan menggunakan *HelioScope* untuk menentukan produksi energi dari PLTS.
5. Mengetahui hasil produksi energi yang diperoleh.

Flowchart tahapan metode penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar lokasi UML pada Disperindag Kabupaten Tulungagung ditunjukkan oleh Gambar 4. Untuk mengetahui potensi daya listrik optimal yang mampu dihasilkan dari atap yang terdapat pada Kantor UML Disperindag Kabupaten Tulungagung maka luas atap perlu dihitung. Luasan atap dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 3. Flowchart penelitian



Gambar 4. Lokasi UML pada DISPERINDAG Kabupaten Tulungagung [10]

Pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa bagian yang berwarna biru merupakan luasan atap yang berpotensi sebagai tempat PLTS dibangun dengan ukuran atap sisi kecil yaitu 16,6 x 2,4 m dan luas sebesar 39,84 m² serta ukuran atap sisi besar yaitu 24,4 x 3,4 m dan luas sebesar 82,96 m². Sehingga luas total sisi atap kantor yang dapat digunakan untuk membangun PLTS adalah 122,80 m².

Setelah mengetahui luasan atap yang terdapat pada Kantor UML Disperindag Kab. Tulungagung, simulasi produksi energi listrik dengan menggunakan HelioScope dapat dilakukan. Pada simulasi ini, diperlukan data masukan dari dua komponen fotovoltaik, yaitu modul surya dan *inverter*. Pemilihan modul surya bergantung pada ketersediaan modul surya pada *database HelioScope*. Modul surya yang dipilih dalam simulasi ini yaitu Trina Solar, TSM-DE18M(II) (500W) yang diproduksi oleh Trina Solar. Modul surya Trina Solar dipilih karena merupakan jenis panel surya *monocrystalline* yang cocok untuk kondisi lokasi.



Gambar 5. Luasan atap kantor yang dapat dimanfaatkan untuk area pemasangan PLTS

STC adalah standar untuk mengukur kinerja maksimal suatu panel surya pada suatu kondisi seragam sehingga memungkinkan untuk melakukan perbandingan seragam pada panel surya baik pada produsen yang sama atau berbeda. Parameter NMOT (*nominal module operating temperature*) didefinisikan sebagai suhu operasi yang dicapai oleh modul panel surya dalam kondisi tertentu atau kondisi yang telah ditentukan. Spesifikasi modul surya dapat dilihat pada Tabel 1.

Pemilihan *inverter* disesuaikan dengan kapasitas mendekati kapasitas terpasang PLTS (Tabel 1). *Inverter* yang digunakan yaitu inverter Sunny Tripower, karena memiliki produksi energi dengan efisiensi tinggi, fleksibilitas desain yang baik, dan kompatibilitas dengan banyak modul surya. *Inverter Sunny Tripower* yang digunakan pada simulasi ini adalah Sunny Tripower 15000TL dengan spesifikasi *inverter* yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Jumlah modul fotovoltaik dapat diketahui setelah mengetahui luasan atap gedung serta menentukan kapasitas modul surya (berdasarkan data dimensi modul surya). Penentuan jumlah modul yang dapat dipasang dilakukan dengan HelioScope, yang dapat menyesuaikan dengan luasan tersebut, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Setelah menentukan jumlah modul dengan menyesuaikan bentuk atap, maka dapat diketahui jumlah modul surya yang dapat dipasang dan jumlah *inverter* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 1. Spesifikasi panel surya Trina Solar, TSM-DE18M(II) (500W)

Trina Solar, TSM-DE18M(II)	STC	NMOT
Maximum Power (P _{max})	500 W _p	379 W _p
Maximum Power Voltage (V _{mp})	42,8 V	40,4 V
Maximum Power Current (I _{mp})	11,69 A	9,37 A
Open-circuit Voltage (V _{oc})	51,7 V	48,8 V
Short-circuit Current (I _{sc})	12,28 A	9,89 A
Module Efficiency STC	20,90 %	20,90 %
Nominal Module Operating temperature (NMOT)	41±3°C	41±3°C
Irradiance	1.000 W/m ²	800 W/m ²

Tabel 2. Spesifikasi *inverter* Sunny Tripower 15000TL

Karakteristik	Sunny Tripower 15000TL
Max. DC power	22.500 Wp
Max. input voltage	1.000 V
MPP voltage range/rated input voltage	150–1.000 V/300-800 V
Min. input voltage /initial input voltage	150 V / 188 V
Max. input current per string input A / input B	66 A / 33 A
Rated power (@230 V, 50 Hz)	15.000 W
Max. apparent AC power	15.000 VA
Max. efficiency	98,2 %



Gambar 6. Model penempatan PLTS

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 3, jumlah modul yang diperlukan pada atap Gedung A atau atap sisi kecil adalah sebanyak 15 modul dengan spesifikasi kapasitas modul sebesar 500 Wp, sehingga kapasitas terpasang sebesar 7.500 Wp. Sedangkan pada atap Gedung B atau atap sisi besar sebanyak 21 modul dengan spesifikasi kapasitas modul sebesar 500 Wp sehingga kapasitas terpasang sebesar 10.500 Wp dengan jumlah *inverter* terpasang sebanyak 1 unit dengan kapasitas *inverter* 15.000 W.

Setelah mengetahui jumlah modul, *inverter* dan potensi daya terpasang, maka selanjutnya dapat diketahui produksi energi yang mampu dihasilkan dari PLTS tersebut dengan HelioScope. Potensi energi yang dihasilkan dari fotovoltaiik dapat dilihat pada Tabel 4 serta faktor-faktor yang menyumbang pengurangan potensi energi (*system loss*) dapat pula dilihat pada Gambar 7.

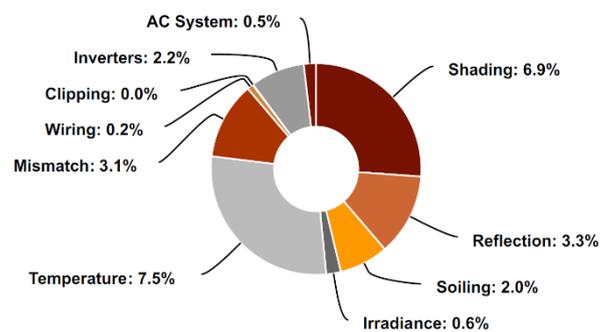
Berdasarkan Tabel 4, total potensi energi yang dihasilkan dari PLTS yang berlokasi di Kantor Unit Metrologi Legal sebesar 24.623,1 kWh/tahun atau setara dengan 24,6 MWh/tahun dengan *system performance ratio* sebesar 76,2%. Total potensi energi yang dihasilkan tersebut semakin berkurang dari spesifikasi pada *nameplate* dengan faktor – faktor yang menyumbang pengurangan potensi energi atau dalam hal ini disebut *system loss* terlihat pada gambar 7. Penyumbang terbesar yaitu faktor temperatur sebesar 7,5% dan faktor *shading* atau bayangan yang mengurangi cahaya matahari untuk menyinari panel surya yaitu sebesar 6,9% sedangkan penyumbang terkecil yaitu *clipping* dan *wiring* yang masing-masing sebesar 0,0% dan 0,2%.

Tabel 3. Jumlah modul panel surya yang dapat dipasang pada atap dan penggunaan *inverter*

Lokasi PLTS	Jumlah Inverter (Unit)	Kapasitas Inverter	Jumlah Modul (Unit)	Kapasitas Modul (Wp)	Kapasitas Terpasang (Wp)
Atap Gedung A (atap sisi kecil)	1	15.000	15	500	7.500
Atap Gedung B (atap sisi besar)	1	15.000	21	500	10.500

Tabel 4. Hasil simulasi produksi energi fotovoltaiik PLTS yang terdapat pada Kantor Unit Metrologi Legal

Parameter Titik Output Energi	Energi (kWh/tahun)
<i>Nameplate</i>	28.499,3
<i>Output at Irradiance level</i>	28.330,3
<i>Output at Cell Temperature Derate</i>	26.194,8
<i>Output After Mismatch</i>	25.374,5
<i>Optimal DC Output</i>	25.311,1
<i>Constrained DC Output</i>	25.306,7
<i>Inverter Output</i>	24.746,9
<i>Energy to Grid</i>	24.623,1
<i>System Performance Ratio</i>	76,2%

Gambar 7. Grafik faktor-faktor yang menyumbang pengurangan potensi energi (*system loss*)

V. SIMPULAN

Unit Metrologi Legal Kabupaten Tulungagung terletak Kantor Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Tulungagung merupakan salah satu kantor milik Pemerintah. Luasan atap yang berpotensi sebagai tempat PLTS dibangun dengan luas total sisi atap kantor yang dapat digunakan adalah 122,80 m². Dengan menggunakan modul sebesar 500 Wp maka jumlah modul yang diperlukan pada atap sebanyak 36 modul dengan total kapasitas terpasang sebesar 18.000 Wp. Pembangkit PLTS dengan kapasitas tersebut memerlukan sebanyak 1 unit dengan kapasitas *inverter* 15.000 W. Total potensi energi yang dihasilkan dari PLTS sebesar 24.623,1 kWh/tahun atau setara dengan 24,6 MWh/tahun dengan *system performance ratio* sebesar 76,2%. Faktor – faktor yang menyumbang pengurangan potensi energi atau dalam hal ini disebut *system loss* dengan penyumbang terbesar yaitu faktor temperatur sebesar 7,5% dan faktor *shading* sebesar 6,9%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sekretariat Perusahaan PT PLN (persero), *Statistik PLN 2020*. 2020. Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/07/Statistik-PLN-2020.pdf>
- [2] Y. Badruzzaman, "Roadmap Energy di Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta," *JTET (Jurnal Teknik Elektro Terapan)*, vol. 2, no. 1, Jan. 2016, doi: 10.32497/JTET.V2I1.28.G28.
- [3] Sekretariat Jenderal Ketenagalistrikan, *STATISTIK KETENAGALISTRIKAN 2018*. 2018. Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/92999-statistik-2018.pdf
- [4] United Nations Environment Programme, *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*. Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/32152>
- [5] Hasnawiya Hasan, "PERANCANGAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI PULAU SAUGI," *Jurusan Teknik Perkapalan - Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin*, 2014, Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/25489720.pdf>
- [6] N. Umar, B. Bora, C. Banerjee, and B. S. Panwar, "Comparison of different PV power simulation softwares: case study on performance analysis of 1 MW grid-connected PV solar power plant," pp. 11–24, 2018, Accessed: Jun. 20, 2022. [Online]. Available: www.ijesi.org/Volumewww.ijesi.org
- [7] Matthew. Buresch, *Photovoltaic energy systems: design and installation*. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [8] R. Salman, "ANALISIS PERENCANAAN PENGGUNAAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) UNTUK PERUMAHAN (SOLAR HOME SYSTEM)".
- [9] "www.helioscope.com/designer/ Akses tanggal 20 Maret 2022."
- [10] "www.earth.google.com/web/ Akses tanggal 20 Maret 2022."

Purwarupa Perangkat Pelindung Jemuran pada Rumah Pintar Berbasis IoT Memanfaatkan MQTT dan *Fog Computing*

Mochammad Haldi Widiyanto^{1,*}, Matthew Christopher Albert¹, Matthew Christopher Albert¹

¹Computer Science Department, School of Computer Science, Bina Nusantara University;

matthew.albert@binus.ac.id, herlangga.karteja@binus.ac.id

*Korespondensi: mochamad.widiyanto@binus.ac.id,

Abstract – *The industrial revolution has changed the world a lot, one of which is the internet of things (IoT) role. This technology needs the role of protocols for communication and etc. Most studies use message queue telemetry transport (MQTT) because it is lightweight and easy to apply. MQTT has been widely used in smart homes, farms, and smart cities. But in practice, MQTT also requires the internet to work. One suggestion that can be used with fog computing is when there is a sensor error, or the internet is unstable. Many studies on IoT use MQTT as a protocol, but its use is still rarely combined with fog computing. This study aims to make a prototype of a clothesline protection device using the MQTT and fog computing protocols. The test results using BlackBox show that all devices have worked well. The MQTT communication protocol is very light for communication and then assisted by fog computing which can perform remotely correctly when a sensor error occurs. Fog computing can also help when the internet connection is not good. The weakness of this research is a delay in the movement of the DC motor. This happens because of low-cost devices and interference from signals or objects around it. Another weakness is that there is no validation of environmental results such as humidity and temperature.*

Keywords: *fog computing, internet of things (IoT), message queue telemetry transport (MQTT)*

Intisari – Revolusi industri telah banyak mengubah dunia, salah satunya peran dari *internet of things* (IoT). Teknologi ini perlu peran serta protokol untuk komunikasi dll. Kebanyakan penelitian menggunakan *message queue telemetry transport* (MQTT) karena sifatnya yang ringan dan mudah diaplikasikan. Pemanfaatan MQTT sudah banyak digunakan seperti pada rumah pintar, pertanian pintar dan kota pintar. Tetapi pada penerapannya MQTT juga membutuhkan internet untuk bekerja, salah satu saran yang dapat digunakan dengan *fog computing* ketika terdapat kesalahan pada sensor atau internet tidak stabil. Terdapat banyak penelitian mengenai IoT yang memanfaatkan MQTT sebagai protokolnya, tetapi pemanfaatannya masih jarang menggabungkan keduanya dengan *fog computing*. Pada penelitian ini bertujuan untuk membuat purwarupa perangkat pelindung jemuran dengan memanfaatkan protokol MQTT dan *fog computing*. Hasil pengujian dengan memanfaatkan BlackBox menunjukkan jika semua perangkat telah bekerja dengan baik. Pada protokol komunikasi MQTT terbukti sangat ringan untuk komunikasi lalu dibantu dengan *fog computing* yang dapat melakukan *remote* dengan tepat ketika terjadi kesalahan pada sensor. *Fog computing* pun dapat membantu ketika koneksi internet yang kurang baik. Kelemahan penelitian ini adalah terjadi *delay* pada pergerakan motor DC, hal ini terjadi karena penggunaan perangkat berbiaya rendah, dan terjadi interferensi dari sinyal atau benda di sekitarnya. Kelemahan lainnya adalah belum adanya validasi hasil lingkungan seperti kelembaban dan suhu.

Kata kunci: *fog computing, internet of things (IoT), message queue telemetry transport (MQTT)*

I. PENDAHULUAN

Banyak peralatan pintar yang membantu dalam berbagai kegiatan sebenarnya tidak jauh dalam konsep *internet of things* (IoT), dengan dibantu dengan koneksi Internet dalam memasuki konsep tersebut, seperti halnya memberikan masukan dan luaran dengan menghubungkan benda, sumber daya dan pengguna. IoT sekarang dapat dimanfaatkan pada tempat lain seperti jaringan *cloud*, 4G, 5G dan Big Data dan tidak terlepas juga dengan *artificial intelligence* (AI) [1].

Karena merupakan salah satu bagian dari revolusi industri Teknologi IoT banyak digunakan pada beberapa kasus seperti *smart farming* [2], *smart home* [3], *smart healthcare* [1], dan dapat juga digabungkan dengan teknologi lainnya. Pada lapisan jaringan tepatnya aplikasi, terdapat beberapa protokol komunikasi yang dirancang khusus untuk komponen IoT telah banyak diusulkan. Seperti memanfaatkan *constrained application protocol* (CoAP) dan *message queue telemetry transport* (MQTT) [4].

Banyak pengguna lebih memanfaatkan MQTT karena sifatnya yang lebih mudah dibandingkan memanfaatkan *hyper text transfer protocol* (HTTP).

MQTT sebenarnya protokol untuk melakukan konektivitas berdasarkan *machine to machine* (M2M). beberapa protokol yang cocok pada M2M adalah yang dapat meminimalisasi ketidakandalan komunikasi dan kehilangan data, sehingga diperlukan komunikasi yang bekerja pada saluran *lossy* [5]. Protokol MQTT sebenarnya memiliki banyak keunggulan salah satunya dapat melakukan pengiriman data dengan memanfaatkan sedikit konsumsi listrik, *bandwidth* rendah, lalu dapat juga memiliki konektivitas yang sangat tinggi [6].

Pemanfaatan IoT memerlukan konektivitas yang tinggi dan koneksi terhadap internet, tetapi dengan memanfaatkan *fog computing* pada beberapa pengaplikasian yang sangat peka terhadap latensi/waktu dapat menerapkan ini. Pada Teknologi ini yang disebut juga dengan paradigma yang mengombinasikan antara *cloud* dan *edge computing*. Oleh karena itu dapat membagi tugas pemrosesan data dan penyaluran data memanfaatkan *fog computing*. Adanya purwarupa perangkat teknologi ini dapat mengurangi ketergantungan dengan pemanfaatan *cloud* [7].

Sudah banyak penelitian mengenai IoT dan protokol lainnya. Seperti pada [4] penelitian menguji kinerja dari MQTT dan CoAP. Penelitian lain seperti [8], memanfaatkan

MQTT sebagai protokol komunikasi internet dan Google Assistant yang digunakan untuk melakukan kontrol jarak jauh. Belum banyak penelitian melakukan pemantauan berbasis *website* secara terpusat memanfaatkan MQTT dan *fog computing*.

Oleh karena itu, pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan penerapan ketiga teknologi IoT, MQTT dan pemanfaatan *fog computing* untuk kondisi di mana lingkungan yang digunakan mengalami kelemahan pada koneksi internet, namun ingin memiliki perlengkapan yang dapat mengkoordinasikan banyak perangkat-perangkat lainnya pada purwarupa perangkat pelindung jemuran di *smart home*, karena jemuran yang ada dalam rumah tangga terkadang memiliki masalah seperti hujan, terik matahari yang berlebihan dsb. Dengan kondisi Indonesia yang memiliki dua musim; panas dan hujan memang memiliki tantangan tersendiri, salah satunya kondisi hujan yang tidak dapat diprediksi. Salah satu manfaat lain adalah penelitian ini berfokus pada pembuatan purwarupa perangkat pelindung jemuran untuk melakukan pemantauan secara waktu nyata, tetapi ketika tidak terdapat internet dapat memanfaatkan *fog computing*.

Pada sesi ini telah dibahas mengapa peneliti memilih IoT, MQTT dan *fog computing*, pada sesi dua peneliti akan menyajikan dasar teori dan ulasan literasi mengenai beberapa penelitian mengenai IoT, MQTT dan *fog computing*. Pada sesi 3 peneliti akan menyajikan desain perangkat. Pada sesi 4 penulis akan menyajikan hasil dari aplikasi. Pada sesi 5 akan disajikan kesimpulan.

II. DASAR TEORI DAN ULASAN LITERASI

A. Dasar Teori

1) *Internet of Things*

IoT sudah sering dibicarakan karena sifatnya yang dapat memberikan koneksi ke mana-mana, IoT juga bekerja tidak sendiri, di dalamnya terdapat beberapa komponen seperti *controller*, penginderaan, pemrosesan, komunikasi dan dapat juga bekerja dengan teknologi lain untuk membantu pengguna.

IoT dapat dibicarakan sebagai sebuah teknologi yang berfokus pada jaringan perangkat cerdas yang memiliki keterikatan hubungan satu sama lain, teknologi ini dapat menghasilkan data *input* secara waktu nyata tentang lingkungan. IoT berasal dari kata "*internet*" dan "*things*" [9]. Oleh karena itu, beberapa perangkat dapat melakukan komunikasi ke Internet, jika melihat contoh sederhana terdapat pada peralatan elektronik, rumah tangga, mesin perkebunan, furnitur atau pabrik [10].

2) *MQTT*

Pengembangan protokol ini mula-mula dengan menghubungkan penginderaan pada jalur pipa minyak dengan satelit. MQTT dimanfaatkan dalam melakukan pengiriman pesan secara tidak berbarengan [11], MQTT memiliki sifat yang seperti ringan, *publish-subscribe* dengan sebuah protokol *transport* pesan, *server-client*, sangat nyaman

digunakan pada teknologi IoT dan M2M [12]. Di mana ketika Klien berhubungan dengan broker *publish* data tentang topik tertentu atau *subscribe*. Di sini Broker memiliki fungsi untuk memberikan data publikasi ke klien yang telah terhubung. MQTT memiliki dukungan terhadap *quality of service* (QoS), hal ini menjadikan MQTT sangat baik digunakan pada aplikasi dengan sumber daya terbatas. Tetapi, MQTT juga dapat digunakan pada arsitektur klasik berbasis *cloud* [13].

Pemanfaatan MQTT yang memiliki sifat yang ringan banyak sekali digunakan, selain ringan pengaplikasiannya mudah sehingga diminati banyak peneliti. Pada penelitian MQTT digunakan oleh penulis dalam membantu komunikasi di perangkat.

3) *Fog Computing*

Pada saat ini *fog computing* merupakan salah satu teknologi untuk mengumpulkan data dari prapemrosesan dan perangkat. Teknologi ini dapat membantu dalam menyelesaikan masalah dalam sistem [14]. Hal lain yang dapat dilakukan salah satunya agar mengurangi kemacetan komputasi dalam memanfaatkan jaringan pada pengaplikasian IoT. Teknologi ini sebenarnya merupakan paradigma komputasi yang dapat memiliki jaminan dalam penyimpanan data, aklerasi dan jaringan [15]. Sehingga penulis memanfaatkan teknologi ini karena jika terjadi kemacetan pada data dapat diatasi dengan ini. Disisi lain dapat juga menolong dalam hal mengatasi ketidakstabilan internet jika terjadi.

B. Ulasan Literasi

Menurut penelitian [16], pada 2015 melakukan sebuah pekerjaan berupa pemanfaatan protokol yang sering digunakan pada IoT, yang mana salah satunya adalah MQTT, CoAP dan protokol lainnya, di mana semuanya memanfaatkan TCP/IP. Peneliti berfokus dalam memberikan rencana dan solusi untuk melakukan peningkatan pada MQTT yang digunakan pada perangkat seluler. Peneliti mengambil keuntungan adalah membuat sistem pada MQTT lebih tahan terhadap perubahan jarak dan kesesuaian pada seluler di kombinasikan dengan IoT. Peneliti tersebut merupakan salah satu tahun di mana MQTT sudah berkembang dengan IoT. Tetapi belum fokus terhadap alat pemantauan.

Penelitian [17], di tahun 2018 melakukan fokus penelitian di MQTT pada bidang keamanan menggunakan protokol MQTT. Peneliti mengusulkan melakukan penerapan keamanan pada M2M memanfaatkan jaringan *IPv6 over low-power wireless personal area networks* (6LoWPAN) dengan memanfaatkan autentikasi. Peneliti menyebutkan jika CoAP dan 6LoWPAN merupakan dua hal protokol yang sangat baik digunakan pada lingkungan terbatas. Tetapi belum dimanfaatkan terhadap deteksi lingkungan lain seperti jemuran, pemanfaatannya belum ditambahkan dengan teknologi *fog computing*.

Masih di tahun 2018, penelitian [6], melakukan implementasi pada MQTT berbasis *website*. Penelitiannya melakukan penerapan protokol MQTT pada pengamanan rumah pintar, menurut peneliti protokol ini sifatnya sangat

ringan dan memungkinkan dalam pengiriman data sehingga diharapkan *bandwidth* yang digunakan tidak banyak dalam penerapannya dalam IoT. Masih seperti penelitian sebelumnya karena fokus pada penelitian yang membutuhkan sumber komunikasi yang ringan terhadap konsep rumah pintar. Tetapi karena pemanfaatannya masih menggunakan MQTT tanpa memanfaatkan *fog computing*, Oleh karena itu masih terdapat ruang untuk melakukan inovasi dalam penelitian tersebut.

Penelitian [18], di tahun 2019 melakukan sebuah pengukuran kinerja sistem *fog computing*, percobaan dengan menaruh setiap *node* pada kondisi jarak berbeda setiap empat meter. Penelitian tersebut sudah memanfaatkan *fog computing* pada sistem *smart home*. Hanya tidak melakukan pengembangan memanfaatkan MQTT. Berbeda dengan yang akan dilakukan pada penelitian ini pemanfaatan *fog computing* dan MQTT juga digunakan pada pemantauan dan pembuatan sistem otomatis.

Pada [7], di tahun 2021. Penelitian mengembangkan sebuah perangkat yang berbasis pada *fog computing* yang digunakan pada IoT yang diaplikasikan di rumah pintar. fokus pada penggunaan dan pengukuran *delay* yang dilihat pada *fog server* dengan memanfaatkan *broker* MQTT jaringan lokal yang dimanfaatkan di jaringan lokal telah berhasil mengurangi waktu komputasi.

Perbedaan pada penelitian yang dilakukan oleh para penulis sebelumnya, jika dalam penelitian ini adalah objek yang digunakan pada *smart home* adalah pemantauan jemuran otomatis, berbasis MQTT untuk koneksi internet, dan untuk *fog computing* dapat di atur secara jarak jauh secara manual tanpa menghilangkan kontrol utama dalam mengatur beberapa *node* sekaligus.

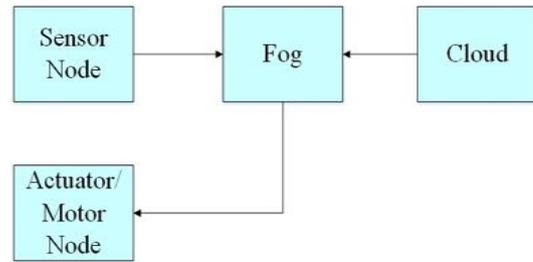
III. DESAIN PERANGKAT

Setelah melakukan pengulasan pada penelitian sebelumnya, pada sesi ini penulis akan fokus pada perangkat yang akan dibuat dan dibentuk, tapi sebelum itu dilakukan pada penelitian ini pembuatan desain perangkat dibuat dalam tiga bentuk komponen seperti pada Gambar 1.

Pada Gambar 1 menjelaskan jika yang mempengaruhi suatu aktuator yang pertama memang *input* dari sensor tersebut, atau dilakukan pengaturan secara manual di *fog*, terakhir dapat juga otomatisasi menggunakan *cloud* dengan memanfaatkan MQTT.

Selanjutnya pada desain perangkat ini akan dijelaskan komponen apa saja yang dimanfaatkan pada penelitian ini yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan komponen apa saja yang digunakan dalam penelitian, dengan fungsi *controller* dan pengiriman informasi di dalam NodeMCU, modul CD74HC4067 dengan memanfaatkan TTL yang dapat membantu peneliti bekerja di 16 kanalnya secara dua arah, dengan memiliki MUX / DEMUX. Artinya, modul ini dapat berguna seperti sakelar pintar. Untuk hujan pada penelitian memanfaatkan *raindrop*



Gambar 1. Skema perangkat

sensor, karena dapat melakukan penginderaan terhadap air yang jatuh ke komponen tersebut. Lalu terakhir memanfaatkan DHT-11 untuk melakukan pemantauan untuk temperatur dan kelembaban, Komponen *sensor node* ini yang menjadi pembeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Tabel 2, menunjukkan komponen yang ada di *actuator node*.

Pada Tabel 2, komponen aktuator/motor digunakan sebagai penggerak dari perangkat pelindung jemuran pada *smart home*, salah satunya masih menggunakan pusat *controller* dari NodeMCU, yang mendapatkan daya dari *power supply* 5-35V. Terakhir penggerak memanfaatkan Motor DC untuk menggerakkan terpal sebagai perangkat pelindung jemuran. Selanjutnya komponen yang digunakan pada komponen *fog computing* adalah ESP32 Wemos Lolin32 Lite yang digunakan dan dimanfaatkan secara penuh sebagai komponen *fog computing*.

Pada sistem *fog* sendiri hanya memanfaatkan ESP32 saja sebagai perantara pada via api *call* jaringan lokal, sedangkan pada *cloud* sendiri memanfaatkan beberapa perangkat lunak seperti pada Tabel 3.

Pada Tabel 3, merupakan tabel dari perangkat lunak yang digunakan pada *cloud*, pada penelitian ini pemanfaatan MQTT Broker akan dilakukan di *cloud* dan beberapa tampilan terdapat di *Web Server* melalui *API Gateway*.

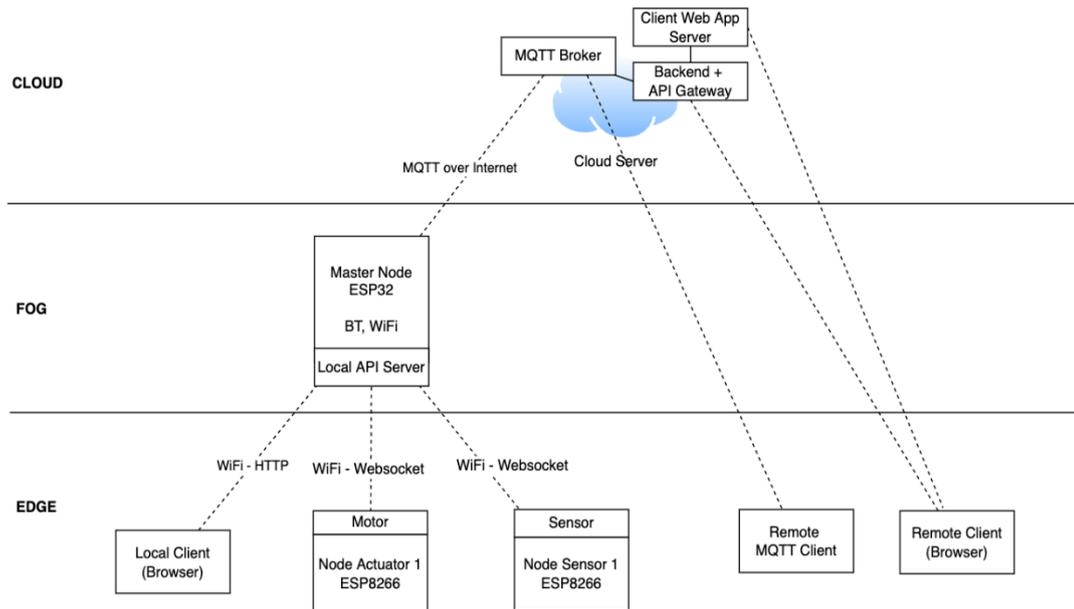
Selanjutnya untuk memahami komponen mana saja yang digunakan pada penelitian ini, berikut merupakan hasil dari desain perangkat dari semua perangkat dan komponen disertai dengan cara kerja alat seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Tabel 1. Komponen *sensor node*

No.	Komponen
1	ESP8266 NodeMCU Lolin Lua Wifi
2	CD74HC4067 16-Channel Analog Digital Multiplexer 74HC4067
3	Raindrop Module Sensor
4	Voltage Comparator LM393 Module
5	DHT-11 Module Temperature dan kelembaban

Tabel 2. Komponen *actuator/motor node*

No.	Komponen
1	ESP8266 NodeMCU Lolin Lua Wifi
2	Power Supply 5 - 35V
3	Motor DC



Gambar 2. Desain arsitektur perangkat pelindung jemuran pada smart home

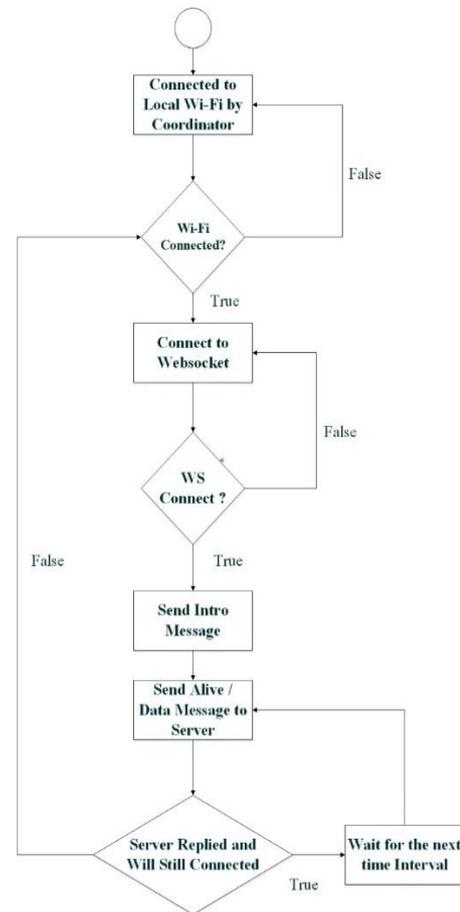
Tabel 3. Perangkat lunak cloud

No.	Perangkat Lunak
1	MQTT Broker
2	Web Server
3	API Gateway

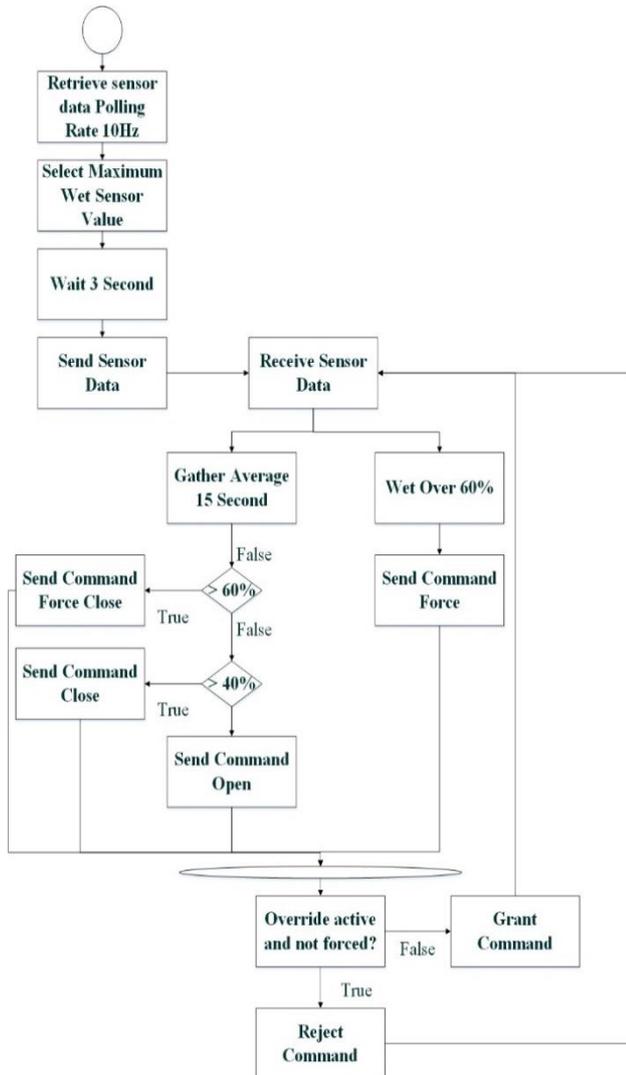
Pada Gambar 2, menunjukkan desain dari perangkat yang akan dijalankan pada penelitian ini, seperti pada edge terdapat local client dengan browser, dan node actuator lalu node sensor dan remote client. Untuk lapisan fog hanya memanfaatkan master node yang ada di ESP32 karena memiliki proses yang lebih cepat, dan terakhir pemanfaatan MQTT berasal di cloud. Untuk MQTT Broker digunakan di cloud, dan MQTT subscribe dapat diakses melalui remote MQTT_client, format perintah yang disediakan dapat langsung digunakan pada remote, hanya saja dibuat sebuah abstraksi yang lebih mudah berupa REST API server yang akan mengirimkan pesan MQTT tanpa harus mengetahui format detailnya. Remote client yang terdapat di website dapat juga ditampilkan pada telepon seluler dan dapat digunakan di mana pun, hal ini juga digunakan karena menjadi pembeda dalam penelitian lain.

Pada Gambar 3, menunjukkan logika koneksi antara node pada edge dengan fog layer menggunakan websocket, beserta logika ketahanan koneksi apabila terjadi restart mendadak atau putus koneksi agar dapat sesegera mungkin tersambung kembali. Koneksi websocket ini digunakan untuk mengecek status, mengirim data, dan memberi perintah. Dalam penerapannya, dibutuhkan sebuah node koordinator pada fog layer yang akan membuka port untuk koneksi websocket sehingga banyak edge node dapat bergabung, dan secara berkala dapat melakukan pengecekan status dari tiap node. Karena perangkat dijalankan secara asynchronous, maka kegagalan pada sebuah edge node tidak akan membuat perangkat lainnya menjadi tidak bisa digunakan atau diakses.

Oleh karena itu pada penerapan aslinya diharapkan dapat menerapkan redundancy N+1, baik pada sensor node maupun actuator node agar ketika ada kegagalan node dapat dibantu oleh cadangannya.



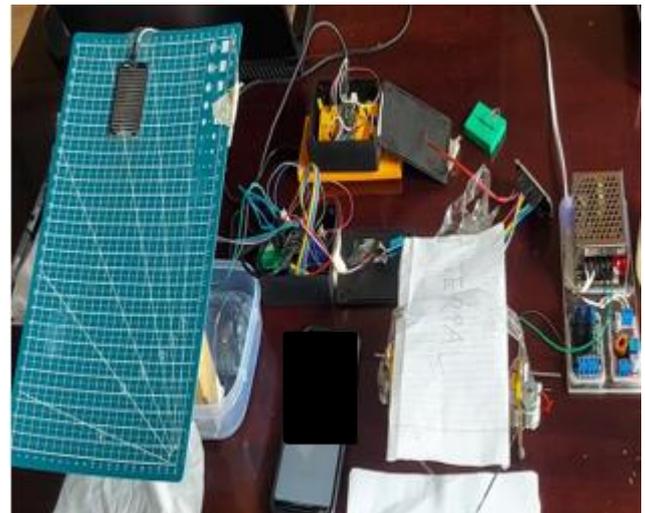
Gambar 3. Logika koneksi antar edge node dengan fog layer



Gambar 4. Logika pengambilan keputusan

Sedangkan pada Gambar 4, menunjukkan *fuzzy logic* yang dipakai dalam menentukan apakah keadaan di luar dianggap sedang hujan atau tidak. Hal yang mempengaruhi yakni hanyalah dari sensor *raindrop*, di mana akan diberi *threshold* dua fase yang akan dapat mengambil keputusan untuk memaksa untuk menutup apabila hujan lebat, dan akan membuka apabila dianggap sudah mencapai nilai aman. Nilai kebasahan pada sensor *raindrop* akan dihitung dengan interval rata-rata 15 detik. Nilai kebasahan berasal dari hasil normalisasi bacaan dari sensor *raindrop* dan dipengaruhi oleh keadaan alat, sehingga mungkin saja dengan sensor yang berbeda perlu dilakukan kalibrasi ulang. Sensor yang dipakai di dalam pengujian ini hanyalah dalam tahap hobi saja sehingga pada penerapan aslinya dibutuhkan sensor *industrial* dengan kalibrasi lebih lanjut.

Pada Gambar 5 akan ditunjukkan rangkaian yang digunakan pada penelitian ini agar terlihat perangkat apa saja yang digunakan dan dimanfaatkan, tetapi pada penelitian ini



Gambar 5. Tampilan hasil dari perakitan purwarupa perangkat pelindung jemuran pada *smart home*

hanya menggunakan perangkat sederhana dalam melakukan simulasi pada purwarupa perangkat pelindung jemuran otomatis (mengingat Motor DC yang digunakan harus besar).

Setelah mengetahui desain apa saja yang digunakan dalam membuat purwarupa perangkat pada penelitian ini, penulis melakukan uji coba alat dengan beberapa skema dan pengujian beberapa kasus memanfaatkan BlackBox. Penggunaan metode BlackBox [19] dirasa sangat penting karena memiliki banyak kelebihan, metode ini dapat mengetahui kinerja sistem yang sesuai dengan kebutuhan atau belum.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini pengujian dilakukan dalam berbagai skema berikut:

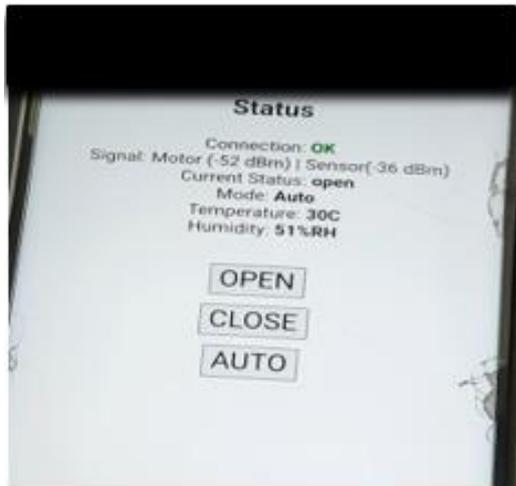
- Skema tampilan *website* pada telepon seluler
- Skema Motor DC
- Pengujian BlackBox

Berikut dijabarkan masing-masing dari skema yang diberikan.

A. Skema Tampilan Website pada Telepon Seluler

Pada bagian ini penulis akan menguji tampilan *website* pada telepon seluler memanfaatkan MQTT dalam melakukan pemantauan menggunakan telepon seluler seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Pada Gambar 6 menunjukkan hasil *website* yang dapat ditampilkan pada telepon seluler dengan memanfaatkan MQTT seperti, Status Koneksi, kuat sinyal pada motor, kuat sinyal pada sensor, *current status* (merupakan status dari motor DC, terbuka atau tidak), suhu dan terakhir kelembaban. Sehingga membuktikan jika MQTT dapat membantu dalam melakukan komunikasi.



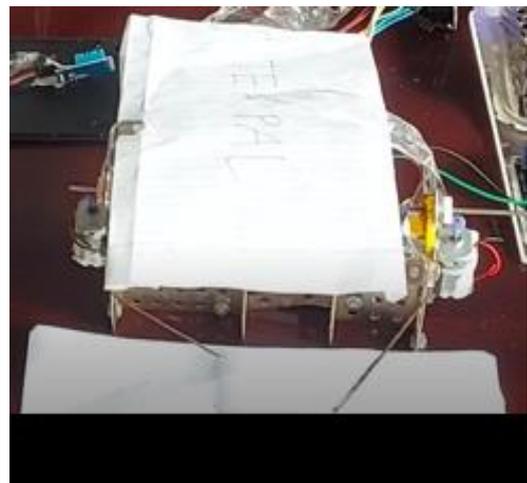
Gambar 6. Tampilan *website* pada telepon seluler



Gambar 8. Pengujian pengindraan *raindrop* sensor



Gambar 7. Tampilan *remote* menggunakan *local* API server



Gambar 9. Terpal terbuka

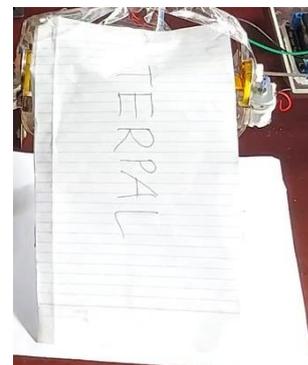
Pada gambar selanjutnya terdapat manual untuk mengontrol purwarupa perangkat pelindung jemuran (buka atau tutup), atau sebaliknya menggunakan skala otomatis yang memanfaatkan sensor *raindrop*. Pada gambar 7 akan ditampilkan gambar melakukan *remote* aplikasi menggunakan *local* API server yang terdapat di lapisan *fog* layer.

Seperti pada Gambar 7 penelitian ini dilakukan *remote* jika memang terjadi kesalahan pada sensor dan jaringan seluler, sehingga dapat langsung dilakukan komunikasi jarak jauh yang mana berasal di *fog* layer. Sehingga pada penelitian ini menunjukkan jika tanpa adanya internet, melakukan pembukaan dan penutupan tidak menjadi masalah, selama masih memanfaatkan *local* API yang terdapat di *fog* layer.

B. Motor DC

Pada skema ini digunakan untuk membuktikan jika status sudah terbuka maka motor DC akan membuka pelindung jemuran dan sebaliknya. Gambar 8 menunjukkan skema dalam penerimaan air di *raindrop* sensor dan dampak yang terjadi.

Pada Gambar 9 dan Gambar 10, merupakan hasil dari terpal jika terbuka dan tertutup terpal agar terlihat hasil motor DC yang dapat menggerakkan terpal terbuka dan tertutup.



Gambar 10. Terpal tertutup

Gambar 8 s.d. Gambar 10, menunjukkan beberapa hasil yang ditunjukkan untuk menguji pengindraan jika ketika *raindrop* sensor terkena air maka terpal akan tertutup (Gambar 10), ketika sudah tidak ada air terpal akan terbuka (Gambar 9) hal ini terjadi karena motor menggerakkan terpal, lalu status pada telepon seluler akan tertutup. Sehingga percobaan telah berhasil dan sebaliknya jika *raindrop* dikeringkan maka terpal akan terbuka

Tabel 4. Pengujian BlackBox

No.	Uji Coba	Hasil
1	Temperatur	Sukses mendeteksi
2	Kelembaban	Sukses mendeteksi
3	Tampilan <i>web</i>	Sukses menampilkan pada telepon seluler
4	Komunikasi MQTT	Sukses menghubungkan
5	<i>Fog computing</i>	Sukses melakukan <i>remote</i>
6	Motor DC	Terjadi sedikit <i>delay</i> atau <i>error</i>

C. Pengujian BlackBox

Pada pengujian ini dilakukan karena beberapa sensor dan tampilan belum semua dapat ditampilkan tapi secara BlackBox dapat menunjukkan beberapa komponen atau perangkat yang dapat lolos uji atau tidak, terdapat pada Tabel 4.

Pada penelitian ini terjadi sedikit kekurangan pada motor DC di bagian aktuator, karena terjadi *delay* atau terkadang motor tidak bergerak merespons, pada komunikasi yang digunakan secara *fog* juga terjadi demikian. Sehingga penelitian ini memang terjadi sedikit kekurangan dalam penerapan aktuator.

V. SIMPULAN

Pada penelitian ini berfokus pada peran MQTT dalam memberikan komunikasi ke purwarupa perangkat dan *fog computing* yang dapat membantu, menggunakan jaringan *local API, fog layer* dapat mengganti peran koneksi internet pada MQTT. Pada penerapannya seperti pada purwarupa perangkat pelindung jemuran, penelitian ini telah membuktikan jika MQTT sangat baik digunakan dengan menghasilkan komunikasi yang ditampilkan pada telepon seluler dengan menunjukkan semua hasil baik. Pengujian yang dilakukan pada BlackBox pun mendapatkan hasil yang sesuai ketika semua sensor bekerja dengan baik kecuali motor DC yang masih terjadi sedikit kendala. Hal lain seperti memanfaatkan *fog computing* dalam berkomunikasi dengan memanfaatkan dapat digunakan jika terjadi kesalahan pada sensor atau komunikasi MQTT terkendala internet. Pada penelitian ini juga memiliki kelemahan seperti belum adanya validasi hasil terhadap suhu dan kelembaban, selanjutnya adalah terjadi *delay* pada pergerakan motor DC, hal ini terjadi karena penggunaan alat berbiaya rendah, dan terjadi interferensi dari sinyal atau benda di sekitarnya. Penelitian selanjutnya dapat memanfaatkan ruang tertutup dengan melakukan validasi awal terhadap lingkungan dan membandingkan dengan protokol lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Alshehri and G. Muhammad, "A Comprehensive Survey of the Internet of Things (IoT) and AI-Based Smart Healthcare," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 3660–3678, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047960.
- [2] A. Triantafyllou, D. C. Tsouros, P. Sarigiannidis, and S. Bibi, "An Architecture model for Smart Farming," in *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, May 2019, pp. 385–392. doi: 10.1109/DCOSS.2019.00081.
- [3] Z. N. Mohammad, F. Farha, A. O. M. Abuassba, S. Yang, and F. Zhou, "Access Control and Authorization in Smart Homes: A Survey," in *Tsinghua Science and Technology*, Dec. 2021, vol. 26, no. 6, pp. 906–917. doi: 10.26599/TST.2021.9010001.
- [4] V. Seoane, C. Garcia-Rubio, F. Almenares, and C. Campo, "Performance evaluation of CoAP and MQTT with security support for IoT environments," *Computer Networks*, vol. 197, p. 108338, 2021, doi: 10.1016/j.comnet.2021.108338.
- [5] L. Dürkop, B. Czybik, and J. Jasperneite, "Performance evaluation of M2M protocols over cellular networks in a lab environment," in *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, Feb. 2015, pp. 70–75. doi: 10.1109/ICIN.2015.7073809.
- [6] B. M. Susanto, E. S. J. Atmadji, and W. L. Brenkman, "Implementasi Mqtt Protocol Pada Smart Home Security Berbasis Web," *Jurnal Informatika Polinema*, vol. 4, no. 3, pp. 201–205, May 2018, doi: 10.33795/jip.v4i3.207.
- [7] A. Zainudin, I. Anisah, and M. M. Gulo, "Implementasi Fog Computing Pada Aplikasi Smart Home Berbasis Internet of Things," *CESS (Journal of Computer Engineering System and Science)*, vol. 6, no. 1, pp. 127–132, 2021, doi: 10.24114/cess.v6i1.20658.
- [8] F. Alfiah, B. Rahman, and Imelda, "Control system prototype smart home IoT based with MQTT method using Google Asisstant," *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, vol. 4, no. 2, pp. 303–310, 2020, doi: 10.29207/resti.v4i2.1721.
- [9] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, "Internet of Things (IoT): A Literature Review," *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, no. 5, pp. 164–173, 2015, doi: 10.4236/jcc.2015.35021.
- [10] E. Navarro, N. Costa, and A. Pereira, "A Systematic Review of IoT Solutions for Smart Farming," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4231, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20154231.
- [11] I. Harjanto, "IoT Gateway Menggunakan Protokol MQTT pada Perangkat Kendali Berbasis Modbus-RTU," *Jurnal Ilmiah Teknosains*, vol. 6, no. 1, pp. 12–19, 2020, doi: 10.26877/jitek.v6i1.5957.
- [12] A. Velinov, A. Mileva, S. Wendzel, and W. Mazurczyk, "Covert Channels in the MQTT-Based Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 161899–161915, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2951425.
- [13] E. Longo, A. E. C. Redondi, M. Cesana, A. Arcia-Moret, and P. Manzoni, "MQTT-ST: a Spanning Tree Protocol for Distributed MQTT Brokers," in *ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Jun. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICC40277.2020.9149046.
- [14] P. Hosseinioun, M. Kheirabadi, S. R. Kamel Tabbakh, and R. Ghaemi, "A new energy-aware tasks scheduling approach in fog computing using hybrid meta-heuristic algorithm," *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 143, pp. 88–96, 2020, doi: 10.1016/j.jpdc.2020.04.008.
- [15] P. Habibi, M. Farhoudi, S. Kazemian, S. Khorsandi, and A. Leon-Garcia, "Fog Computing: A Comprehensive Architectural Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 69105–69133, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2983253.
- [16] J. E. Luzuriaga, J. C. Cano, C. Calafate, P. Manzoni, M. Perez, and P. Boronat, "Handling mobility in IoT applications using the MQTT protocol," in *2015 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Sep. 2015, pp. 245–250. doi: 10.1109/ITeChA.2015.7317403.
- [17] S. Biju and N. M. Shekoker, "Security approach on MQTT based smart home," in *2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI)*, Sep. 2018, pp. 1106–1114. doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8391883.
- [18] D. Nuridhuha, M. Hannats, H. Ichsan, and R. Maulana, "Sistem Monitoring Lingkungan Rumah Cerdas berbasis Fog Computing dan nRF24I01," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 4, no. 2, pp. 622–631, 2020.
- [19] R. Parluka, T. A. Nisaa, S. M. Ningrum, and B. A. Haque, "Studi Literatur Kekurangan dan Kelebihan Pengujian Black Box," *Teknomatika*, vol. 10, no. 2, pp. 131–140, Oct. 2020.

Purwarupa Pendeteksi *Liquified Petroleum Gas* (LPG) Menggunakan Sensor MQ-2 dengan Blynk

Rismanda Tyas Kusumadewi^{1,*}, Rizki Kurniadi¹, Unan Yusmaniar Oktiawati¹

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; rizkikurniadi@mail.ugm.ac.id,
unan_yusmaniar@ugm.ac.id

*Korespondensi: rismandatyas@mail.ugm.ac.id

Abstract - One technology that is currently often used by humans is the internet of things (IoT). With IoT technology, humans can easily overcome the problems of need, one of which is overcoming the problem of the threat of fire that occurs due to gas leaks. To prevent these potential threats and dangerous risks, awareness is needed. Humans need information in the form of timely warnings about gas leaks that are used as prevention of potential and dangerous risks that can threaten home security. With the development of technology today, humans can easily get information in real time. This technology is made in the form of a prototype which is integrated to develop a prototype of LPG gas leak detector with real-time information features, namely monitoring and notification using the Blynk application. This detector utilizes the MQ-2 sensor as a gas sensor, especially LPG gas and NodeMCU V3 ESP 8266 which can be connected to the internet and integrated with the Blynk application. In making the prototype, functionality and QoS (quality of service) testing are also carried out which are used as proof that the prototype can work well.

Keywords : Blynk, IoT, monitoring, prototype, real-time

Inti sari - Salah satu teknologi yang saat ini sering digunakan oleh manusia yaitu *internet of things* (IoT). Dengan teknologi IoT manusia dapat dengan mudah mengatasi permasalahan kebutuhan salah satunya yaitu mengatasi permasalahan ancaman kebakaran yang terjadi akibat adanya kebocoran gas. Untuk mencegah potensi ancaman dan risiko yang berbahaya tersebut, kesadaran diperlukan. Manusia membutuhkan informasi berupa peringatan tepat waktu tentang kebocoran gas yang digunakan sebagai pencegahan potensi dan risiko berbahaya yang dapat mengancam keamanan rumah. Dengan berkembangnya teknologi sekarang ini manusia dapat dengan mudah mendapatkan informasi secara *real-time*. Teknologi ini dibuat dalam bentuk prototipe yang diintegrasikan untuk mengembangkan prototipe pendeteksi kebocoran gas LPG dengan fitur informasi *real-time* yaitu berupa pemantauan dan notifikasi menggunakan aplikasi Blynk. Pendeteksi ini memanfaatkan sensor MQ-2 sebagai sensor gas khususnya gas LPG dan NodeMCU V3 ESP 8266 yang dapat terhubung dengan internet dan terintegrasi dengan aplikasi Blynk. Dalam pembuatan prototipe, dilakukan pula pengujian fungsionalitas dan QoS (*quality of service*) yang digunakan sebagai pembuktian bahwa prototipe tersebut dapat bekerja dengan baik.

Kata kunci : Blynk, IoT, pemantauan, purwarupa, *real-time*

I. PENDAHULUAN

Salah satu sumber energi yang sering diperlukan untuk memenuhi kebutuhan manusia sehari-hari adalah LPG (*liquified petroleum gas*). Sumber energi ini digunakan manusia untuk keperluan industri maupun rumah tangga. Akan tetapi penggunaan LPG memiliki risiko yang cukup tinggi. Seperti masih seringnya didengar berita meledaknya gas LPG. Sebenarnya LPG tersebut sudah didesain menggunakan tabung yang bisa bertahan pada suhu tinggi dalam beberapa saat, sehingga jika penanganan yang cepat dapat mencegah terjadinya kecelakaan. Dengan begitu peringatan dini sangat dibutuhkan jika terjadi kebocoran gas untuk meminimalkan tingkat terjadinya kecelakaan akibat LPG.

Dengan menyediakan sebuah sistem informasi berupa peringatan tepat waktu, pengguna atau penghuni dapat meminimalkan potensi dan risiko berbahaya terhadap kebocoran gas, khususnya apabila mereka jauh dari rumah. Latar belakang tersebutlah yang menjadi dasar pemikiran dari studi ini serta perkembangan terhadap sistem informasi berupa peringatan tersebut digunakan untuk membantu orang-orang atau penghuni memantau sistem keamanan rumah mereka.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas mengenai perancangan sistem pendeteksi gas. Hutagalung melakukan penelitian untuk merancang sistem pendeteksi

kebocoran gas menggunakan sensor MQ2 [1]. Selain itu, pada penelitian lainnya melakukan penambahan perangkat informasi tentang kebocoran gas melalui SMS GSM agar kondisi gas dapat selalu terpantau secara *real-time* [2]. Hal ini yang membedakan pada penelitian ini yang menggunakan aplikasi Blynk yang digunakan sebagai perangkat informasi secara *real-time*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Dalam landasan teori akan dijelaskan mengenai teori – teori yang bersangkutan dengan penelitian yang akan dilakukan. Teori – teori yang digunakan sebagai penunjang penelitian disebutkan pada poin – poin di bawah ini.

NodeMCU V3 ESP 8266 merupakan suatu *microcontroller* semacam Arduino yang telah ditambahi dengan modul Wi-Fi ESP 8266. Tidak hanya modul *Wi-Fi*, serta ada memori untuk menyimpan program, *port* yang ada *port digital input-output*, satu buah *port analog input* dan *port* dengan peranan khusus semacam UART, SPI, I2C, serta lain-lain. Sebagaimana dengan Arduino, NodeMCU V3 ESP 8266 ini pula wajib di program terlebih dulu.

Gas sensor (MQ2) adalah sensor yang berguna untuk mendeteksi kebocoran gas baik pada rumah maupun industri. Sensor ini sangat cocok untuk mendeteksi H₂, LPG, CH₄, CO, alkohol, asap atau *propane*. Karena sensitivitasnya yang

tinggi dan waktu respons yang cepat, pengukuran dapat dilakukan dengan cepat [1].

Blynk merupakan aplikasi buat iOS serta OS Android yang digunakan buat mengendalikan Arduino, NodeMCU, Raspberry Pi serta sejenisnya lewat Internet. Aplikasi ini bisa difungsikan selaku pusat kontrol perangkat *hardware*, menunjukkan informasi sensor, menaruh informasi, dan visualisasi. Aplikasi Blynk mempunyai tiga komponen utama, ialah aplikasi, *server*, serta *libraries*. Blynk *server* berperan untuk mengatasi seluruh komunikasi di antara *smartphone* serta *hardware*. *Widget* yang ada pada Blynk antara lain *button*, *value display*, *history graph*, *Twitter*, serta *email*. Blynk tidak terikat dengan sebagian tipe *microcontroller* tetapi wajib didukung *hardware* yang dipilih. NodeMCU dikontrol dengan Internet lewat Wi-Fi, *chip* ESP 8266 [3].

Arduino didefinisikan selaku suatu *platform* elektronik yang *open source*, berbasis pada aplikasi serta *hardware* yang fleksibel serta gampang digunakan, yang diperuntukkan buat seniman, desainer, hobi serta tiap orang yang tertarik dalam membuat objek ataupun area yang interaktif. Arduino selaku suatu *platform* komputasi fisik (*physical computing*) yang *open source* pada *board input output* simpel, yang diartikan dengan *platform* komputasi fisik di sini merupakan suatu sistem fisik yang interaktif dengan pemakaian aplikasi serta *hardware* yang bisa mengetahui serta merespons suasana serta keadaan [4].

Wireshark merupakan *tool* yang diperuntukkan buat penganalisisan paket informasi jaringan. Wireshark disebut pula *Network packet analyzer* yang berperan menangkap paket-paket jaringan serta berupaya untuk menunjukkan seluruh data dipaket tersebut sedetail mungkin. Sesungguhnya *network packet analyzer* selaku perlengkapan buat mengecek apa yang sesungguhnya berlangsung di dalam jaringan baik kabel ataupun *wireless* [5].

III. METODOLOGI

Penelitian yang digunakan merupakan pengembangan model *research and development*. Penelitian ini sering diartikan sebagai suatu proses atau Langkah – langkah untuk mengembangkan suatu sistem baru atau menyempurnakan sistem yang telah ada. Pengembangan Alat didasarkan pada arsitektur perangkat keras sistem dan pengembangan perangkat lunak. Pendekatan pengembangan menggunakan model pengembangan purwarupa.

A. Perancangan Arsitektur Sistem

Purwarupa pendeteksi gas LPG merupakan sebuah sistem yang berguna untuk melakukan deteksi kebocoran gas terutama gas LPG dengan piranti peringatan melalui notifikasi pada Blynk yang terdiri dari perangkat komponen yang bekerja secara berkesinambungan dan terintegrasi dimulai dari perangkat *input*, *process*, dan *output*. Pengembangan purwarupa ini diharapkan dapat digunakan sebagai sebuah alat deteksi dini kebocoran gas LPG yang akan membantu pengguna atau masyarakat meminimalkan potensi dan risiko berbahaya yang mengancam keamanan rumah [2].

Proses perangkaian sistem ditujukan untuk menghubungkan tiap perangkat agar tiap perangkat dapat terkoneksi satu sama lain sesuai dengan yang diharapkan. Dalam perangkaian sistem ini dilakukan implementasi dari arsitektur yang telah dibuat sebelumnya. Perlu diperhatikan, setiap perangkat harus saling terhubung agar bisa bekerja dengan benar. Perangkaian sistem merupakan salah satu tahap penting yang ditujukan untuk mendapatkan hasil penelitian.

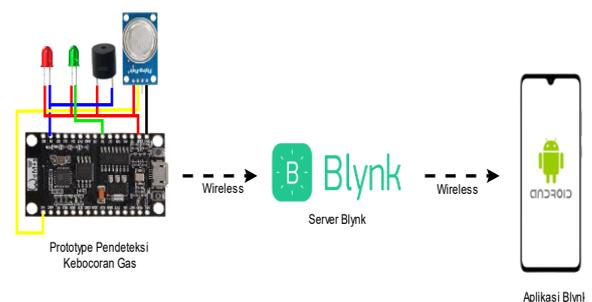
Perangkat yang digunakan dalam perangkaian sistem terdapat dua bentuk, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras yang digunakan adalah satu buah laptop, satu buah sensor MQ-2, satu buah Arduino NodeMCU ESP2866, satu buah *smartphone android*, satu buah *buzzer*, 2 buah LED, 2 buah resistor 470 Ω , satu buah *breadboard* dan beberapa kabel *jumper*. Sedangkan perangkat lunak yang digunakan adalah sistem operasi Windows 10, Arduino IDE versi 1.8.13, Blynk, dan Wireshark [6].

Purwarupa sistem pendeteksi gas LPG terdiri dari sensor MQ2 yang berfungsi sebagai pendeteksi gas LPG dan NodeMCU V3 sebagai *microcontroller* yang sudah dilengkapi dengan modul Wi-Fi ESP2866 yang menghubungkan Arduino dengan Internet sehingga sistem dapat terkoneksi dengan aplikasi Blynk yang menjadi perangkat *monitoring* kepekatan gas di udara dan sebagai alat notifikasi apabila kepekatan gas di udara melebihi ambang batas normal. Adapun perancangan rangkaian dapat dilihat pada Gambar 1.

B. Tahap Instalasi dan Konfigurasi Sistem

Pada tahap instalasi dan konfigurasi sistem berisikan langkah – langkah untuk membangun purwarupa sistem pendeteksi gas LPG menggunakan sensor gas MQ-2 dengan Blynk. Berikut adalah Langkah konfigurasi yang akan dilakukan.

1. Konfigurasi dan Instalasi Arduino IDE versi 1.8.13
2. Konfigurasi NodeMCU V3 ESP 8266
3. Konfigurasi NodeMCU V3 ESP8266 dan Sensor MQ-2
4. Konfigurasi MQ-2
5. Konfigurasi Blynk
6. Konfigurasi Blynk pada *microcontroller*
7. Konfigurasi notifikasi, *gauge*, dan *monitoring* pada Blynk.
8. Konfigurasi LED dan *buzzer*



Gambar 1. Rancangan rangkaian sistem

C. Perancangan program sistem

Dalam proses perancangan program sistem pendeteksi kebocoran gas, pembuatan program sistem menggunakan aplikasi Arduino IDE Versi 1.8.13 dengan menggunakan bahasa C/C++ .

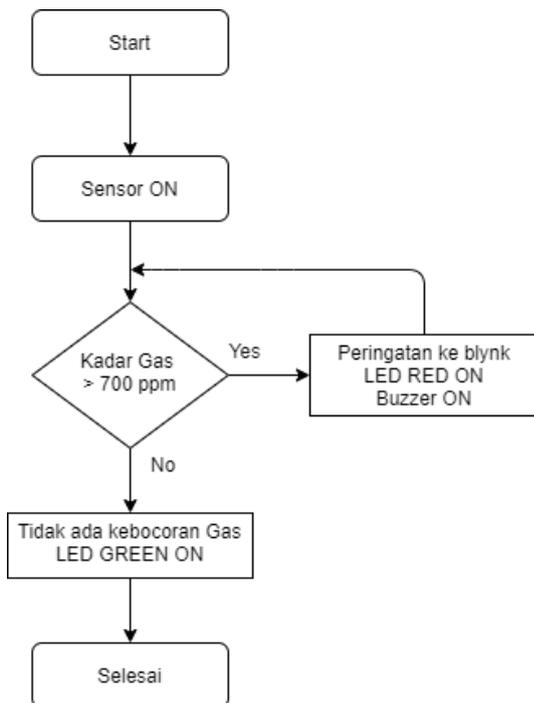
Adapun program sistem purwarupa dibuat sesuai dengan diagram alir seperti Gambar 2. Berdasarkan dari diagram alir program, sistem akan bekerja pertama kali bila sistem telah terkoneksi dengan Wi-Fi sehingga sistem dapat terkoneksi dengan Blynk. Selanjutnya sensor akan menyala dan mendeteksi kadar gas di udara apakah melebihi 700ppm. Bila kadar gas melebihi 700ppm maka akan ada notifikasi pada Blynk serta buzzer akan menyala. Sedangkan bila kadar gas di bawah 700ppm maka sistem akan mendeteksi bahwa tidak ada kebocoran gas atau kadar gas diudara dalam keadaan normal [7].

D. Pengujian Sistem dan Pengambilan Data

Dalam tahap pengujian sistem, purwarupa akan diuji dengan tujuan untuk mengetahui apakah data yang dihasilkan sesuai dengan apa yang diharapkan sehingga dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya.

Data yang diambil berdasarkan penelitian ini meliputi sensitivitas sensor dalam mendeteksi kepekatan gas diudara berupa gas LPG, delay, throughput, serta packet loss.

1. Pengujian sensor MQ-2
2. Pengambilan data kepekatan gas di udara
3. Pengujian QoS
4. Pengambilan data QoS



Gambar 2. Diagram alir program sistem

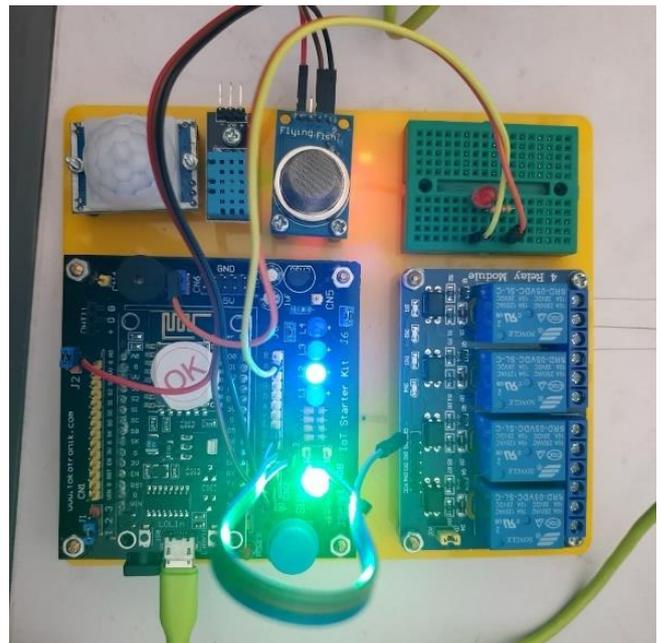
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Purwarupa Pendeteksi LPG Menggunakan Sensor MQ-2 dengan Blynk

Penelitian ini menghasilkan purwarupa sistem pemantau dan pendeteksi dini kebocoran gas LPG. Gambar 3. adalah tampilan sistem yang komponen-komponennya sudah dirakit yang terdiri dari Node MCU V3 ESP8266, Sensor MQ-2, LED, buzzer, kabel konektor USB dan kabel jumper yang siap untuk digunakan.

Purwarupa ini bekerja menggunakan sensor MQ-2 sebagai pendeteksi gas. MQ-2 cocok untuk mendeteksi H₂, LPG, CH₄, CO, alkohol, asap atau propane. Purwarupa ini sangat bermanfaat digunakan dalam menanggulangi ancaman kebocoran gas LPG serta kebakaran.

Node MCU V3 ESP8266 berfungsi sebagai microcontroller yang berperan sebagai pusat dari kerja sistem. Selain itu, pada board Node MCU ini terdapat chip ESP8266 yang berfungsi mendukung Node MCU dalam melakukan koneksi ke Wi-Fi. Sensor MQ-2 berfungsi untuk mendeteksi gas khususnya gas LPG. Kedua LED berfungsi untuk indikator peringatan. LED hijau menandakan sistem mendeteksi gas di lingkungan dalam keadaan normal. LED dan buzzer merah menandakan sistem mendeteksi gas di lingkungan melebihi batas normal. Kabel konektor USB berfungsi menghubungkan Node MCU ke laptop agar dapat dilakukan pemrograman melalui antar muka yang disediakan oleh software Arduino IDE. Kabel jumper pada rangkaian ini berfungsi sebagai penghubung antara pin yang ada pada Arduino dengan pin yang terhubung dengan sensor serta komponen pendukung lainnya.



Gambar 3. Purwarupa pendeteksi liquified petroleum gas (LPG) menggunakan sensor MQ-2 dengan Blynk

B. Hasil Tampilan Monitoring dan Notifikasi pada Blynk

Hasil pembacaan gas yang terdeteksi ditampilkan secara *real-time* melalui aplikasi Blynk menggunakan *widget gauge* dan *super chart*. Nilai-nilai yang didapatkan berasal dari hasil deteksi gas oleh sensor MQ-2 yang datanya di-import ke NodeMCU V3 dan selanjutnya dikirim ke server Blynk dan diteruskan ke dalam Blynk yang digunakan [8]. Hasil tampilan dari *monitoring* deteksi gas oleh MQ-2 yang tertampil dalam Blynk yang dapat dilihat pada Gambar 4.

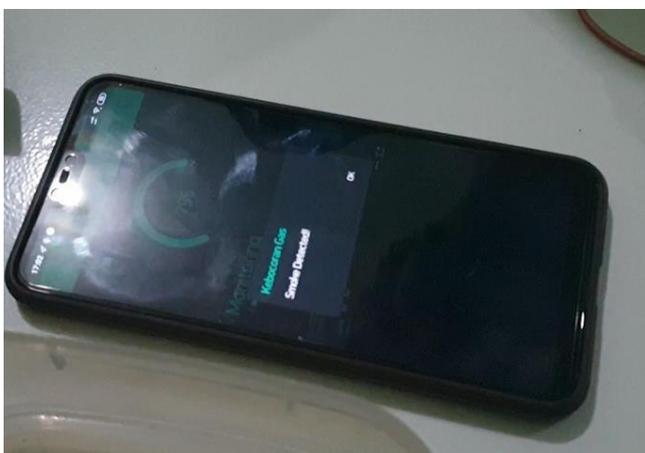
Selain *monitoring* hasil deteksi gas, Blynk juga digunakan sebagai notifikasi apabila tingkat gas yang terdeteksi melebihi batas normal. Notifikasi yang ditampilkan menggunakan *widget notification* merujuk pada Tabel 1. logika pengiriman notifikasi [9]. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan hasil notifikasi dan data pengujian *sensor value*.

Tabel 1. Logika pengiriman notifikasi

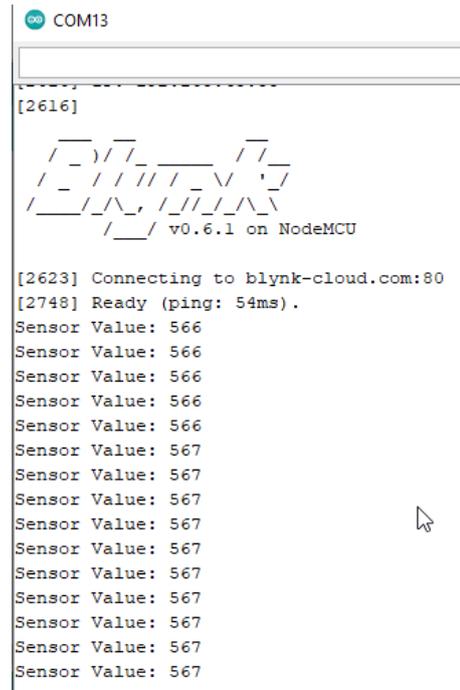
Jika	Maka
Gas < 700 ppm	Tidak ada notifikasi deteksi gas
Gas ≥ 700 ppm	Terdapat notifikasi deteksi gas



Gambar 4. Monitoring dengan gauge dan superchart dalam Blynk



Gambar 5. Notifikasi pada Blynk

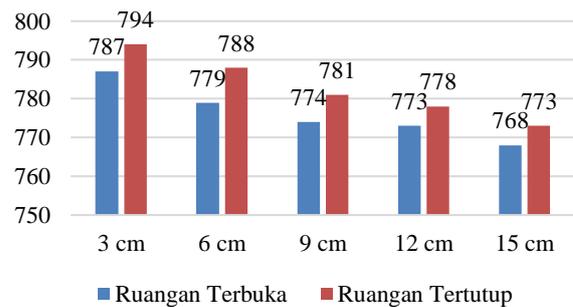


Gambar 6. Data sensor value

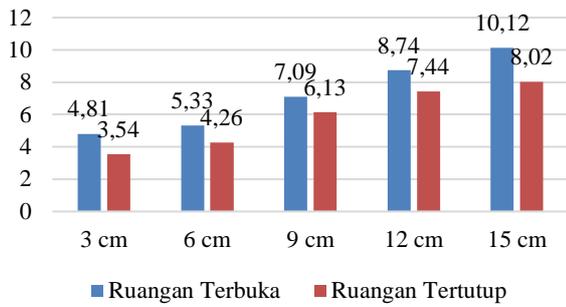
C. Hasil Pengujian Sensitivitas Sensor

Pengujian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui sensitivitas sensor terhadap jarak dan jenis ruangan. Pengujian dilakukan menggunakan kompor gas *portable* yang diletakkan dalam dua ruangan yaitu ruangan tertutup dan terbuka. Untuk lebih jelasnya, proses pengujian ini akan dituangkan ke dalam grafik perbandingan hasil pengujian. Berikut adalah grafik pengujian sistem pendeteksi kebocoran gas.

Dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 7. Nilai kepekatan gas di udara dipengaruhi oleh jarak dan jenis ruangan. Semakin dekat letak sistem terhadap kompor *portable* maka kepekatan gas yang terdeteksi akan semakin tinggi. Dalam ruangan tertutup, nilai kepekatan gas di udara lebih tinggi dibandingkan dengan ruangan terbuka dikarenakan gas di udara terhalangi oleh media padat seperti perabotan dan tembok, sehingga gas di udara dalam ruangan tertutup tidak terurai dengan bebas yang disebabkan oleh keterbatasan luas ruangan.



Gambar 7. Grafik perbandingan jarak pengujian sistem



Gambar 8. Grafik perbandingan waktu terdeteksi pengujian sistem

Sedangkan dalam ruangan terbuka, kepekatan gas di udara akan lebih rendah dikarenakan tidak terdapat penghalang media padat seperti perabotan atau tembok sehingga gas bebas terurai di udara yang disebabkan oleh ruang untuk molekul gas bergerak tidak terbatas.

Dapat dilihat pada Gambar 8. Waktu yang diperlukan sensor MQ-2 untuk mendeteksi gas pada ambang batas melebihi normal dipengaruhi oleh jarak dan jenis ruangan. Semakin jauh letak sistem terhadap kompor *portable* maka kepekatan gas yang terdeteksi akan semakin lama. Dalam ruangan tertutup waktu yang diperlukan sensor MQ-2 untuk mendeteksi gas pada ambang batas melebihi normal akan lebih cepat dikarenakan kepekatan gas diudara semakin tinggi bila terhalangi oleh media padat seperti perabotan dan tembok. Sedangkan dalam ruangan terbuka waktu yang diperlukan sensor MQ-2 untuk mendeteksi gas pada ambang batas melebihi normal akan lebih lambat dikarenakan dalam ruangan terbuka, kepekatan gas diudara akan lebih rendah yang disebabkan tidak terdapat penghalang media padat seperti perabotan atau tembok sehingga gas bebas terurai di udara.

D. Hasil Pengujian QoS

Proses pengiriman data dimulai dari tersambungannya purwarupa ke internet melalui Wi-Fi. Setelah terhubung ke internet, maka purwarupa akan melakukan proses *three-way handshake* dengan server Blynk yang ditandai dengan mengirimkan *flag SYN* dan direspon dengan SYN, ACK. Proses *three-way handshake* ini terekam oleh aplikasi Wireshark.

Setelah proses selesai, proses selanjutnya adalah mengirimkan data yang dibaca oleh sistem. Pengiriman data ini ditandai dengan adanya *flag ACK* dari server ke sistem purwarupa dan kemudian direspons dengan *flag PSH* yang artinya *push data*. Proses pengiriman data ini terekam oleh aplikasi Wireshark yang ditampilkan pada Gambar 9.

```

8 0.186743 192.168.43.4 74.125.200.94 TCP 66 1442 > 443 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 WS=256 SACK_PERM=1
9 0.187254 192.168.43.4 188.166.206.43 TCP 54 4284 > 443 [ACK] Seq=1 Ack=57 Win=188 Len=0
10 0.210347 74.125.200.94 192.168.43.4 TCP 66 443 > 1442 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=4200 Len=0 MSS=1400 WS=4 SACK_PERM=1
11 0.210596 192.168.43.4 74.125.200.94 TCP 54 1442 > 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=131584 Len=0
12 0.211206 192.168.43.4 74.125.200.94 TLSv1.3 649 Client Hello
13 0.254238 74.125.200.94 192.168.43.4 TCP 54 443 > 1442 [ACK] Seq=1 Ack=596 Win=4792 Len=0
14 0.281326 74.125.200.94 192.168.43.4 TLSv1.3 266 Server Hello, Change Cipher Spec, Application Data
15 0.310023 192.168.43.4 74.125.200.94 TLSv1.3 118 Change Cipher Spec, Application Data
16 0.310475 192.168.43.4 74.125.200.94 TLSv1.3 146 Application Data
    
```

Gambar 9. Pengujian QoS three-way handshake

```

1.611671 192.168.43.4 74.125.200.94 TCP 54 1442 > 443 [ACK] Seq=1129 Ack=139 Win=182094 Len=0
1.616422 192.168.43.4 157.240.208.61 TCP 69 62948 > 5222 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=139 Len=0 TSV=1610948 TSecr=113303160 [TCP segment of a reassembled PDU]
1.696387 157.240.208.61 192.168.43.4 TCP 66 5222 > 62948 [ACK] Seq=1 Ack=4 Win=1319 Len=0 TSV=1133016895 TSecr=1610948
1.698012 192.168.43.4 157.240.208.61 TCP 101 62948 > 5222 [PSH, ACK] Seq=4 Ack=1 Win=139 Len=0 TSV=1610948 TSecr=1133016895 [TCP segment of a reassembled PDU]
1.742115 157.240.208.61 192.168.43.4 TCP 66 5222 > 62948 [ACK] Seq=1 Ack=9 Win=1328 Len=0 TSV=1133016719 TSecr=1610948
1.896386 157.240.208.61 192.168.43.4 TCP 107 5222 > 62948 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=9 Win=328 Len=8 TSV=1133016962 TSecr=1610948 [TCP segment of a reassembled PDU]
    
```

Gambar 10. Pengiriman data oleh sistem

```

2.844067 188.166.206.43 192.168.43.4 TLSv1.2 101 Application Data
2.965701 192.168.43.4 188.166.206.43 TCP 54 62953 > 80 [ACK] Seq=115 Ack=11 Win=2134 Len=0
2.967771 192.168.43.4 188.166.206.43 TCP 54 62944 > 443 [ACK] Seq=1 Ack=160 Win=188 Len=0
    
```

Gambar 11. Pengiriman data ke Blynk



Gambar 12. Tunda waktu paket data dari purwarupa ke server Blynk dan tunda waktu paket data dari server Blynk ke purwarupa.

1) Parameter Tunda Waktu (delay)

Nilai pada parameter tunda waktu didapatkan dari perhitungan waktu ketika paket data diterima dikurangi dengan waktu ketika paket data dikirimkan. Waktu pengiriman dan penerimaan paket data diketahui dari hasil rekaman *traffic* data pada aplikasi Wireshark. Pengujian dilakukan pada jarak yang sama yaitu sebesar 30 cm antara sistem dengan Wi-Fi. Ada dua nilai tunda waktu yang diambil pada pengujian ini yaitu tunda waktu pengiriman data dari NodeMCU menuju server Blynk dan tunda waktu pengiriman data aplikasi dari server Blynk menuju aplikasi Blynk pada ponsel Android [6].

Gambar 12. menunjukkan grafik rata-rata tunda waktu pada sistem. Dapat dilihat rata-rata nilainya dari purwarupa ke server Blynk lebih tinggi dibandingkan nilai tunda waktu dari Blynk ke ponsel. Nilai tunda waktu dari purwarupa ke server Blynk apabila dikonversikan menjadi mili detik yaitu sebesar 47,20 ms sedangkan nilai tunda waktu server Blynk ke ponsel sebesar 32,92 ms. Berdasarkan data tersebut, nilai tunda waktu dari sistem termasuk ke dalam kategori sangat bagus menurut kategori tunda waktu, dikarenakan rata-ratanya pada penelitian yang dilakukan diperoleh nilai kurang dari 150 ms.

2) Parameter Packet Loss Ratio

Nilai *packet loss ratio* didapatkan dari perhitungan jumlah paket yang diterima dikurangi jumlah paket terkirim, kemudian hasilnya dibagi dengan jumlah paket terkirim dan dikalikan 100%. Pengujian *packet loss* bertujuan untuk mengetahui bagaimana kualitas pengiriman data dari sistem ke server Blynk. Parameter yang digunakan untuk perbandingan hasil pengujian adalah standar yang ditetapkan oleh *telecommunications protocol harmonization over network* (TIPHON). Terdapat dua variasi pengujian pada

jarak sistem dengan Wi-Fi, yaitu pengujian A dan B yakni jarak 25 cm dan 60 cm.

Kedua pengujian jarak sistem dengan Wi-Fi dalam jarak 30 cm dan 60 cm diperoleh nilai *packet loss* yaitu 0% atau dapat diartikan bahwa tidak terdapat paket yang hilang selama proses pengiriman data dari purwarupa ke server Blynk. Hasil data pengujian *packet loss ratio* ditampilkan pada tabel 2

Berdasarkan hal ini, dapat dikatakan bahwa *packet loss* yang diperoleh termasuk ke dalam kategori sangat bagus menurut TIPHON.

3) Parameter Throughput

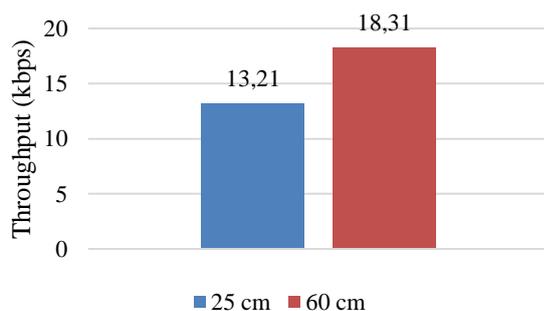
Throughput adalah nilai *bandwidth* aktual yang terukur pada suatu ukuran waktu tertentu dalam mentransmisikan data. Terdapat tiga kali pengujian dengan dua variasi pengujian jarak sistem dengan Wi-Fi, yaitu pengujian A dan B yakni dengan jarak 25 cm dan 60 cm.

Berdasarkan data rata-rata nilai *throughput* yang mengacu pada Gambar 13. nilai yang didapatkan pada jarak 25 cm yaitu 13,21 kbps dan pada jarak 60 cm yaitu 18,31 kbps. Pada parameter *throughput*, semakin banyak dan semakin besar data yang dikirimkan maka nilai *throughput* akan naik. Faktor lain yang bisa mempengaruhi nilai *throughput* adalah tunda waktu, semakin kecil nilai tunda waktu maka semakin besar nilai *throughput*.

V. SIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan bahwa sensitivitas kerja purwarupa pendeteksi *liquified petroleum gas* (LPG) dipengaruhi oleh jarak purwarupa dengan obyek (gas) dan jenis ruangan di mana purwarupa tersebut ditempatkan. Dari hasil data yang didapatkan, untuk mendapatkan peringatan yang lebih cepat, lebih baik purwarupa ditempatkan pada jarak tidak melebihi 15 cm dan purwarupa ini cocok digunakan pada ruangan tertutup.

Untuk pengiriman data dari purwarupa sistem ke platform Blynk memiliki *quality of service* dengan kategori Sangat Bagus. Parameter tunda waktu memiliki nilai rata – rata sebesar 40.05 ms. parameter *packet loss ratio* (PLR) memiliki nilai rata-rata sebesar 0% dan parameter *throughput* memiliki nilai rata-rata sebesar 15,76 kbps.



Gambar 13. Grafik rata-rata *throughput*

Tabel 2. Pengujian *packet loss ratio*

Jarak	Packet Loss Ratio
A (25cm)	<p>Packet: 532 Displayed: 0 (0.0%)</p>
B (60cm)	<p>Packet: 225 Displayed: 0 (0.0%)</p>

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Hutagalung, "RANCANG BANGUN ALAT PENDETEKSI KEBOCORAN GAS DAN API DENGAN MENGGUNAKAN SENSOR MQ2 DAN FLAME DETECTOR | JURNAL REKAYASA INFORMASI," *JURNAL REKAYASA INFORMASI*, 7(2)., 2018. <https://ejournal.istn.ac.id/index.php/rekayasainformasi/article/view/279> (accessed May 09, 2022).
- [2] Deby Shintia, Fazrin Alfiansyah, and Mifwan Fuady Mansur, "DETEKSI KEBOCORAN GAS MENGGUNAKAN MODUL ARDUINO DAN GSM (GLOBAL SYSTEM FOR MOBILE COMMUNICATION) DENGAN PERINGATAN MELALUI SMS (SHORT MESSAGE SERVICE)," 2019.
- [3] Joko Christian and Nurul Komar, "Prototipe Sistem Pendeteksi Kebocoran Gas LPG Menggunakan Sensor Gas MQ2, Board Arduino Duemilanove, Buzzer, dan Arduino GSM Shield pada PT. Alfa Retailindo (Carrefour Pasar Minggu)," *Jurnal TICOM Vol.2 No.1* , vol. 2, 2013.
- [4] B. Dahlan and B. bin Dahlan, "SISTEM KONTROL PENERANGAN MENGGUNAKAN ARDUINO UNO PADA UNIVERSITAS ICHSAN GORONTALO," *ILKOM Jurnal Ilmiah*, vol. 9, no. 3, pp. 282–289, Dec. 2017, doi: 10.33096/ilkom.v9i3.158.282-289.
- [5] M. F. Adriant and I. M. Mardianto, "IMPLEMENTASI WIRESHARK UNTUK PENYADAPAN (SNIFFING) PAKET DATA JARINGAN," *PROSIDING SEMINAR NASIONAL CENDEKIAWAN*, Apr. 2016, doi: 10.25105/SEMNAS.V0I0.139.
- [6] I. Hidayat and I. Hidayat, "Sistem Pendeteksi Kebocoran Gas Menggunakan Sensor MQ-6 Berbasis Jaringan Sensor Wireless," *Techno.Com*, vol. 17, no. 4, pp. 355–364, Nov. 2018, doi: 10.33633/tc.v17i4.1771.
- [7] D. Agus and D. Pranata, "PROTOTYPE SISTEM PENDETEKSI KEBOCORAN LIQUIFIED PETROLEUM GAS BERBASIS ARDUINO DAN CALL GATEWAY," *Ubiquitous: Computers and its Applications Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 11–20, 2019.
- [8] R. B. Prototipe *et al.*, "Rancang Bangun Prototipe Sistem Peringatan Jarak Aman pada Kendaraan Roda Empat Berbasis Mikrokontroler ATMEGA32," *TELKA - Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 2, no. 1, pp. 53–61, May 2016, doi: 10.15575/TELKA.V2N1.53-61.

-
- [9] M. T. Tombeng, "Prototype of Gas Leak... v Prototype of Gas Leak Detector System Using Microcontroller and SMS Gateway," 2017. *Komputer Fakultas Ilmu Komputer Universitas Al Asyariah Mandar*, vol. 4, no. 2, pp. 21–27, Sep. 2018, doi: 10.35329/JIHK.V4I2.41.
- [10] Y. Efendi, "Internet Of Things (Iot) Sistem Pengendalian Lampu Menggunakan Raspberry Pi Berbasis Mobile," *Jurnal Ilmiah Ilmu*

Optimisasi Penjadwalan Pembangkit pada *Microgrid* dengan Mempertimbangkan Respons Beban

Candra Febri Nugraha^{1,*}, Lukman Subekti¹

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; lukmans@ugm.ac.id

*Korespondensi: candra.febri.nugraha@mail.ugm.ac.id

Abstract – In a smart grid, the adequacy of electricity supply is not only determined by generation, but the electrical demand can also be involved. Demand response is one way to maintain a balance between electricity supply and load by reducing electricity consumption at a certain period. In this study, a microgrid system operating design is proposed by considering the penetration of new and renewable energy and demand response. Optimization is carried out with the aim of obtaining the lowest generation costs, while maximizing customer benefits from the demand response program. The mixed-integer linear programming method is used to determine generator generation and customer load reduction throughout the planning period. The obtained diesel generator operating cost is \$116.40 and the total customer load response benefit is \$100. Based on the analysis, the demand response is able to help the system maintain a power balance in critical conditions, namely when the supply from the generator is not sufficient. From the test system used, it was found that the load curtailment throughout the planning period is 67.04 kWh for three customers. The distribution of the reduced demand depends on the value of the demand response incentive for each customer. The amount of load reduction is strongly influenced by the specified demand response budget.

Keywords – optimal dispatch, demand response, microgrid, mixed-integer linear programming

Intisari – Dalam *smart grid*, kecukupan pasokan listrik tidak hanya ditentukan oleh pembangkitan saja, tetapi beban listrik juga dapat dilibatkan. Respons beban merupakan salah satu cara untuk menjaga keseimbangan antara pasokan dan beban listrik dengan cara mengurangi pemakaian listrik pada waktu-waktu tertentu. Dalam studi ini diusulkan sebuah desain operasi sistem *microgrid* dengan mempertimbangkan penetrasi energi baru dan terbarukan serta respons beban. Optimisasi dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh biaya pembangkitan terendah, sekaligus memaksimalkan keuntungan pelanggan dari program respons beban. Metode *mixed-integer linear programming* digunakan untuk menentukan pembangkitan pada generator dan pengurangan beban pelanggan sepanjang periode perencanaan. Biaya operasi pembangkit diesel yang diperoleh adalah \$116,40 dan keuntungan respons beban yang diperoleh pelanggan sebesar \$100. Berdasarkan analisis, respons beban mampu membantu sistem menjaga keseimbangan daya pada kondisi-kondisi kritis, yaitu ketika suplai dari pembangkit sedang tidak mencukupi. Dari sistem pengujian yang digunakan, diperoleh penurunan beban yang terjadi selama periode penjadwalan adalah 67,04 kWh pada tiga pelanggan. Distribusi beban yang dikurangi bergantung pada nilai insentif respons beban pada tiap-tiap pelanggan. Besarnya penurunan beban sangat dipengaruhi oleh anggaran respons beban yang ditetapkan.

Kata kunci – penjadwalan pembangkit, respons beban, *microgrid*, pemrograman *mixed-integer linear*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat setiap tahunnya, sehingga perlu diimbangi oleh suplai listrik yang tidak hanya cukup, tetapi juga berkualitas, andal, dan efisien. Teknologi informasi dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga yang ada. Konsep untuk mengubah sistem tenaga listrik konvensional dengan memanfaatkan teknologi komunikasi dan otomasi disebut sebagai *smart grid* [1].

Umumnya, sistem tenaga listrik mengandalkan pembangkit untuk memenuhi kebutuhan beban. Dalam hal ini, konsumen listrik tidak berperan aktif dalam sistem ini. Pada *smart grid*, keseimbangan antara *demand* dan pembangkitan tidak hanya ditentukan oleh pembangkitan, tetapi juga oleh pelanggan. Salah satu solusi yang muncul untuk mengendalikan pola konsumsi beban adalah melalui inisiatif *demand side management* berupa *demand response* [2]. Hal ini dimungkinkan dengan adanya sistem komunikasi dua arah antara sistem dan pelanggan dalam konsep *demand response*. *Demand response* merupakan perubahan pola penggunaan listrik oleh pelanggan sebagai respons terhadap perubahan harga listrik atau pemberian insentif [3].

Dengan meningkatnya kesadaran akan emisi karbon dan perubahan iklim, operasi sistem tenaga listrik tidak hanya dituntut untuk ekonomis, tetapi ramah lingkungan. Negara-negara di dunia telah beralih menggunakan sumber energi baru dan terbarukan (EBT). Umumnya, pembangkit energi terbarukan bersifat *resource-based*, yang berarti bahwa pembangkit hanya berada di daerah yang berpotensi. Pembangkit EBT yang letaknya dekat dengan beban disebut sebagai *distributed generation* (DG). Jenis DG yang umum diintegrasikan pada jaringan listrik adalah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) [4]–[6]. Adanya koneksi antara DG dan beban pada suatu wilayah tertentu dapat membentuk jaringan listrik kecil yang disebut dengan *microgrid*.

Salah satu isu yang menjadi perhatian dalam *microgrid* adalah sisi ekonominya. Dari sudut pandang ekonomi, listrik yang dibeli dari *grid* utama biasanya masih lebih ekonomis dari pada listrik yang dibangkitkan dari *microgrid*. Untuk mencapai operasi yang ekonomis, diperlukan perencanaan operasi *microgrid* dengan tujuan untuk meminimisasi biaya operasi.

Dalam beberapa tahun terakhir, telah banyak penelitian yang dilakukan dengan tema *optimal dispatching* pada

microgrid dengan mempertimbangkan *demand response*. Peneliti [7] melakukan perancangan *optimal dispatch* pada *microgrid* dengan mempertimbangkan EBT dan *demand response*. Penelitian dilanjutkan oleh [8] dengan konsep matematis yang sama, tetapi menggunakan metode optimisasi yang berbeda. *Dynamic economic load dispatch* menggunakan metode *particle swarm optimization* (PSO) diusulkan oleh peneliti [9] dengan pertimbangan *demand response*.

Terdapat pula peneliti [10] yang memodelkan *optimal dispatch* pada sistem *microgrid* yang terhubung dengan *combined cooling, heating, and power* (CCHP). Peneliti [11] melakukan formulasi *optimal dispatch* pada *microgrid* dengan pertimbangan *interruptible load*. Namun, kedua peneliti belum mempertimbangkan kekangan operasi dasar berupa *ramp rate*.

Dalam penelitian ini dilakukan pengembangan desain operasi *microgrid* berupa penjadwalan pembangkit dengan mempertimbangkan *demand response*. Penjadwalan pembangkit dilakukan dengan mempertimbangkan kemampuan teknis lengkap dari pembangkit konvensional serta menjadikan status operasi pembangkit sebagai variabel optimisasi. Problem optimisasi diselesaikan menggunakan *mixed-integer linear programming* (MILP) diselesaikan dengan *solver* komersial CPLEX 12.9.0. Model yang dikembangkan kemudian diterapkan pada sistem *grid-connected microgrid* sebagai studi kasus.

II. DASAR TEORI

A. Penjadwalan Pembangkit

Tujuan dari penjadwalan pembangkit adalah untuk menghasilkan penjadwalan pembangkitan dalam periode tertentu, dengan biaya terendah [12]. Hasil optimasi yang diperoleh tidak boleh melanggar batasan yang dipertimbangkan. Hasil penjadwalan pembangkit meliputi generator mana yang beroperasi dan berapa daya yang dihasilkan.

Minimisasi dilakukan agar diperoleh biaya operasi yang paling ekonomis. Dalam sebuah generator, komponen biayanya terdiri dari biaya bahan bakar dan biaya *startup* atau biaya untuk menghidupkan pembangkit. Fungsi objektif penjadwalan pembangkit dalam penelitian ini disajikan pada (1).

$$\min \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} [C_i + v_i^t SU_i] \quad (1)$$

$$C_i(P_i^t) = \alpha_i P_i^t + \beta_i u_i^t \quad (2)$$

dengan,

- u_i^t : Status operasi generator i pada waktu t , 1 jika beroperasi dan 0 jika tidak
- $C_i(P_i^t)$: Biaya operasi generator i (\$/jam)
- α_i, β_i : koefisien fungsi biaya unit pembangkit i (\$/kWh dan \$/h)
- P_i^t : daya keluaran pembangkit i pada waktu t (kW)
- v_i^t : status *startup* pembangkit i pada waktu t , 1

- 0 jika *startup* dan 0 jika tidak
- SU_i : biaya *startup* pembangkit i (\$/start)
- NT, t : periode penjadwalan, indeks waktu
- NG, i : jumlah generator, indeks generator

Fungsi objektif dicari dengan mempertimbangkan beberapa kekangan operasi sistem dan pembangkit, seperti yang ditunjukkan pada (3)-(6).

$$\sum_{i=1}^{NG} P_i^t = P_D^t - P_S^t - P_W^t \quad (3)$$

$$u_i^t P_i^{min} \leq P_i^t \leq u_i^t P_i^{max} \quad (4)$$

$$-P_i^{down} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq P_i^{up} \quad (5)$$

$$|T_i^t| \geq |T_i^{min-down}|, u_i^t = 1, u_i^{t-1} = 0 \quad (6)$$

$$T_i^t \geq T_i^{min-up}, u_i^t = 0, u_i^{t-1} = 1$$

dengan,

- P_i^t : daya keluaran pembangkit i pada waktu t (kW)
- P_D^t : kebutuhan daya pada waktu t (kW)
- P_S^t : pembangkitan PLTS pada waktu t (kW)
- P_W^t : pembangkitan PLTB pada waktu t (kW)
- P_i^{max} : daya keluaran maksimal pembangkit i (kW)
- P_i^{min} : Daya keluaran minimal pembangkit i (kW)
- P_i^{up} : batas kapasitas *ramping up* pembangkit i (kW/jam)
- P_i^{down} : batas kapasitas *ramping down* pembangkit i (kW/jam)
- T_i^{min-up} : *minimum up-time* pembangkit i (jam)
- $T_i^{min-down}$: *minimum down-time* pembangkit i (jam)
- T_i^t : durasi operasi pembangkit i pada waktu t (jam)

Persamaan (3) adalah kekangan keseimbangan daya, di mana jumlah daya yang dibangkitkan harus sama dengan kebutuhan beban. Persamaan (4) adalah kekangan kapasitas teknis unit pembangkit. Persamaan (5) adalah kekangan kemampuan *ramping* pembangkit. Dan persamaan (6) adalah kekangan *minimum up time* dan *minimum down time*.

B. Respons Beban dan Jaringan Eksternal

Respons beban dimodelkan sebagai beban yang dapat dikurangi dayanya pada waktu-waktu tertentu. Namun, setiap beban memiliki batas daya yang dapat dikurangi dalam satu harinya. Kekangan ini ditunjukkan pada (7). Selain itu, pengurangan beban juga dibatasi oleh biaya respons beban yang disiapkan dalam satu hari operasi, seperti yang dinyatakan pada (8).

$$\sum_{t=1}^{NT} P_{DR_d}^t \leq P_{DR_d}^{max} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^{NT} \sum_{d=1}^{ND} \gamma_d^t P_{DR_d}^t \leq B_{DR} \quad (8)$$

dengan,

- $P_{DR_d}^t$: pengurangan beban konsumen d pada waktu t (kW)
- $P_{DR_d}^{max}$: pengurangan maksimal beban konsumen d (kW)
- γ_d^t : insentif respons beban konsumen d pada waktu t (\$/kWh)
- B_{DR} : anggaran respons beban dalam satu hari (\$)
- NT, t : periode penjadwalan, indeks waktu
- ND, d : jumlah beban konsumen, indeks beban

Dalam sistem *grid-connected microgrid*, sistem juga terhubung dengan jaringan eksternal sebagai cadangan daya untuk *microgrid*. Besarnya daya yang dapat diimpor dari jaringan eksternal dibatasi oleh kapasitas trafo distribusi, seperti yang dinyatakan pada (9). P_{grid}^t merupakan daya yang diimpor dari jaringan eksternal pada waktu t , sedangkan P_{grid}^{max} adalah daya maksimal yang dapat diimpor. Biaya impor listrik dari jaringan eksternal pada waktu t dinyatakan dalam dengan δ^t .

$$P_{grid}^t \leq P_{grid}^{max} \quad (9)$$

Dengan adanya respons beban dan impor daya dari jaringan eksternal, maka kekangan keseimbangan daya diubah menjadi (10).

$$\sum_{i=1}^{NG} P_i^t + \sum_{d=1}^{ND} P_{DR_d}^t + P_{grid}^t = P_D^t - P_S^t - P_W^t \quad (10)$$

C. Fungsi Objektif Penjadwalan Pembangkit dan Respons Beban

Tujuan optimisasi penjadwalan pembangkit adalah untuk meminimisasi biaya pembangkitan generator. Jika *microgrid* terhubung dengan jaringan eksternal, maka biaya impor daya juga akan diminimisasi. Di sisi lain, tujuan dari respons beban adalah untuk memaksimalkan keuntungan yang diperoleh pelanggan dari pemberian insentif respons beban. Artinya, dalam permasalahan ini terdapat dua tujuan, yaitu minimisasi dan maksimalisasi. Untuk itu, fungsi objektif optimisasi tujuan ganda didefinisikan menjadi (11).

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} [u_i^t C_i + v_i^t S U_i] + \delta^t P_{grid}^t - \left(\sum_{t=1}^{NT} \sum_{d=1}^{ND} \gamma_d^t P_{DR_d}^t \right) \right\} \quad (11)$$

III. METODOLOGI

Untuk menguji skema penjadwalan pembangkit dengan respons beban, dilakukan pengujian pada sistem *grid-connected microgrid*. Beberapa data dalam sistem pengujian yang digunakan merujuk pada [7]. Sistem ini memiliki tiga pembangkit diesel, PLTS, dan PLTB. Data teknis pembangkit diesel ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan data biaya pembangkitan [7]. Pembangkit EBT dimodelkan sebagai beban negatif, sehingga daya yang dibangkitkan akan sesuai dengan *forecast*-nya. PLTS dan PLTB memiliki kapasitas maksimal masing-masing 15 kW dan 11 kW. Kurva beban dan *forecast* pembangkitan PLTS dan PLTB ditunjukkan pada Gambar 1 [7].

Microgrid pada kasus ini terhubung dengan jaringan eksternal dengan transfer daya maksimal 4 kW. Biaya pembelian listrik dari jaringan dimodelkan menggunakan tiga tarif mengikuti waktu, yaitu *off-peak*, *mid-peak*, dan *on-peak*, seperti yang ditunjukkan Gambar 2 [14].

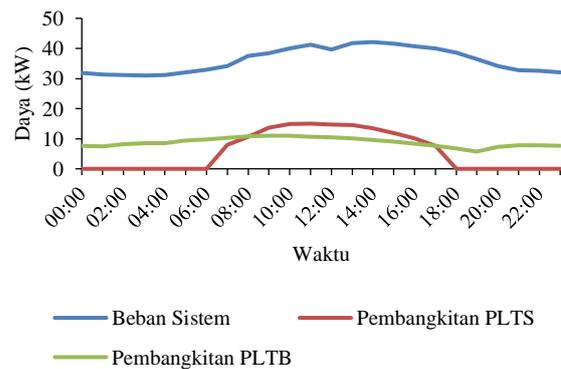
Terdapat tiga kelompok pelanggan yang disuplai dalam sistem ini. Kontrak respons beban dimodelkan secara sederhana, yaitu untuk setiap kWh yang dikurangi, pelanggan akan mendapat insentif. Untuk setiap kelompok pelanggan, biaya insentif yang ditetapkan berbeda, seperti yang pada Tabel 3 [7]. Diasumsikan biaya yang tersedia untuk membayar insentif respons beban dalam satu hari adalah \$100. Periode penjadwalan pembangkit dan respons beban adalah 24 jam, dengan *timestep* satu jam.

Tabel 1. Data teknis pembangkit diesel [7], [13]

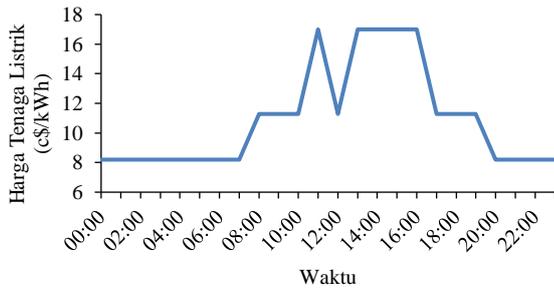
Generator	Daya Maks. (kW)	Daya Min. (kW)	Ramp-rate (kW/jam)	MUT/MDT (jam)
G1	4,0	0,4	3	1
G2	6,0	0,6	5	1
G3	9,0	0,9	8	1

Tabel 2. Fungsi biaya pembangkit diesel [7]

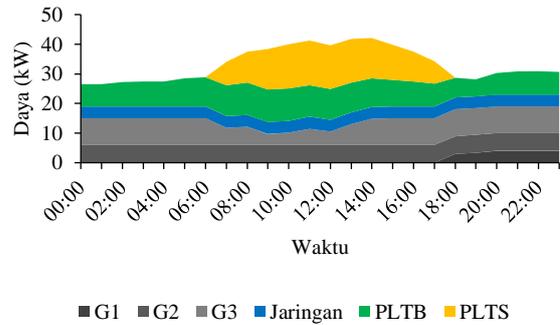
Pembangkit	α (\$/kWh)	β (\$/jam)	Startup (\$/start)
G1	0,50	0,2	0,216
G2	0,25	0,2	0,324
G3	0,30	0,3	0,486



Gambar 1. Profil beban sistem dan pembangkitan pembangkit EBT [7]



Gambar 2. Harga tenaga listrik dari jaringan utama [14]



Gambar 4. Komposisi pembangkitan dan impor listrik optimal

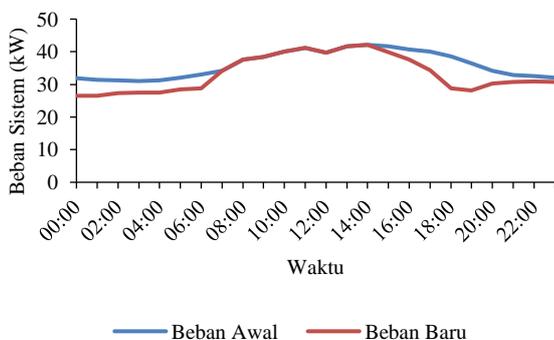
Tabel 3. Insentif respons beban pada tiap-tiap pelanggan [7]

Pelanggan	Insentif Respons beban (\$/kWh)
Pelanggan 1	1,32
Pelanggan 2	1,63
Pelanggan 3	1,64

Terdapat tiga kelompok pelanggan yang disuplai dalam sistem ini. Kontrak respons beban dimodelkan secara sederhana, yaitu untuk setiap kWh yang dikurangi, pelanggan akan mendapat insentif. Untuk setiap kelompok pelanggan, biaya insentif yang ditetapkan berbeda, seperti yang pada Tabel 3 [7]. Diasumsikan biaya yang tersedia untuk membayar insentif respons beban dalam satu hari adalah \$100. Periode penjadwalan pembangkit dan respons beban adalah 24 jam, dengan *timestep* satu jam.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

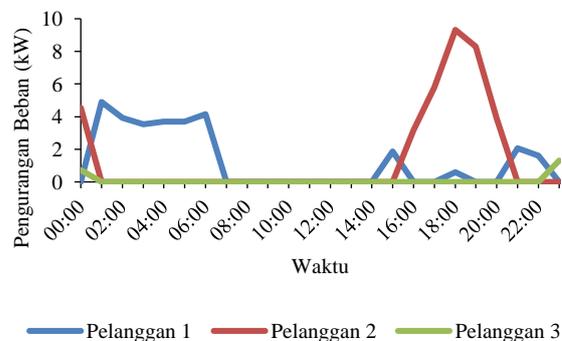
Penjadwalan pembangkit bersama dengan respons beban akan mengubah kurva beban pada sistem. Gambar 3 menunjukkan kurva beban awal dan kurva beban dengan pertimbangan respons beban. Dapat diamati bahwa dengan adanya respons beban, beban sistem dapat dikurangi pada waktu-waktu tertentu. Terdapat penurunan beban yang terjadi antara pukul 01:00 s.d. 06:00 dan pukul 15:00 s.d. 23:00. Detail daya yang dibangkitkan oleh pembangkit diesel dan EBT serta pembelian daya dari jaringan eksternal ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Profil beban sistem awal dan profil beban setelah respons beban

Respons beban membantu mengurangi beban sistem yang ditanggung oleh sistem pembangkit dan jaringan eksternal. Sebagai contoh, pada pukul 20:00, beban sistem adalah 34,14 kW. Sedangkan, pembangkit hanya tersedia 19 kW, jaringan eksternal 4 kW, PLTB 7,21 kW, dan PLTS tidak memproduksi daya. Artinya, ada kekurangan daya sebesar 3,9 kW. Untuk mempertahankan keseimbangan, maka beban Pelanggan 2 dikurangi sebesar 3,9 kW. Total beban yang dikurangi pada setiap pelanggan ditunjukkan pada Gambar 5 dan dirangkum dalam Tabel 4. Pelanggan 1, Pelanggan 2, dan Pelanggan 3 mengalami pengurangan sebesar masing-masing 30 kWh, 35 kWh, dan 2,04 kWh. Pelanggan 3 mengalami pengurangan beban yang paling sedikit karena insentif yang perlu dibayarkan kepada pelanggan 3 adalah yang paling besar. Sehingga, prioritas pengurangan beban adalah pada Pelanggan 1 dan Pelanggan 2 terlebih dahulu.

Tabel 5 menunjukkan total biaya yang diperlukan untuk operasi sistem dalam satu hari. Secara keseluruhan, diperlukan biaya sebesar \$227,93 dengan komponen bahan bakar yang paling besar kemudian disusul oleh insentif untuk respons beban. Biaya pada respons beban tidak dapat melebihi anggaran yang sudah ditetapkan, yaitu \$100. Apabila anggaran untuk insentif respons beban diperbesar, maka biaya bahan bakar akan berkurang karena beban yang disuplai lebih kecil.



Gambar 5. Pengurangan beban paling optimal pada setiap pelanggan

Tabel 4. Pengurangan beban pada tiap-tiap pelanggan serta insentif yang diterima

Pelanggan	Penghematan Energi (kWh)	Insentif Diterima (\$)
Pelanggan 1	30,00	39,60
Pelanggan 2	35,00	57,05
Pelanggan 3	2,04	3,35

Tabel 5. Total biaya operasi sistem

Komponen Biaya	Biaya (\$)
Bahan bakar	116,40
Startup	1,03
Impor listrik	10,50
Insentif respons beban	100,00
Total	227,93

V. SIMPULAN

Dalam penelitian ini dikembangkan model optimisasi manajemen energi pada *microgrid*, yang merupakan kombinasi dari penjadwalan pembangkit dan respons beban. Optimisasi dilakukan untuk meminimalisasi biaya pembangkitan dari sisi operator *microgrid* sekaligus memaksimalkan keuntungan dari program respons beban. Biaya operasi pembangkit diesel yang diperoleh adalah \$116,40 dan keuntungan respons beban yang diperoleh pelanggan sebesar \$100. Adanya respons beban dapat membantu sistem *microgrid* menjaga keseimbangan daya ketika sumber energi dari pembangkitan sedang tidak memadai. Pengurangan beban pelanggan yang terjadi selama periode penjadwalan adalah 67,04 kWh pada ketiga pelanggan. Distribusi beban yang dikurangi bergantung pada nilai insentif respons beban pada tiap-tiap pelanggan. Selain itu, besarnya insentif respons beban sangat memengaruhi besar energi yang dikurangi. Semakin besar anggaran yang tersedia, maka daya yang dikurangi akan semakin besar dan begitu pula sebaliknya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Cecati, G. Mokryani, A. Piccolo, and P. Siano, "An overview on the Smart Grid concept," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 3322–3327, 2010, doi: 10.1109/IECON.2010.5675310.
- [2] F. Rahimi and A. Ipakchi, "Demand Response as a Market Resource Under the Smart Smart Grid Paradigm," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 82–88, 2010, [Online]. Available: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5454394.
- [3] V. S. K. M. Balijepalli, V. Pradhan, S. A. Khaparde, and R. M. Shereef, "Review of demand response under smart grid paradigm," *2011 IEEE PES Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol. ISGT India 2011*, pp. 236–243, 2011, doi: 10.1109/ISET-India.2011.6145388.
- [4] N. Kagan, C. F. M. Almeida, U. D. S. Paulo, E. Vicentini, and A. E. S. Eletropaulo, "Study of the Distributed Generation Impact on Distributed Networks, Focused on Quality of," pp. 6–11, 2016.
- [5] A. V. Shalukho, I. A. Lipuzhin, and A. A. Voroshilov, "Power Quality in Microgrids with Distributed Generation," pp. 54–58, 2019.
- [6] W. Huang, Z. Fu, and L. Hua, "Research on optimal capacity configuration for distributed generation of island micro-grid with wind/solar/battery/diesel engine," 2018.
- [7] N. I. Nwulu and X. Xia, "Optimal dispatch for a microgrid incorporating renewables and demand response," *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 16–28, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.08.026.
- [8] B. Imtiaz, Y. Cui, and I. Zafar, "Economic Dispatch of Microgrid Incorporating Demand Response Using Dragonfly Algorithm," *2021 IEEE Int. Conf. Adv. Electr. Eng. Comput. Appl. AEECA 2021*, pp. 59–68, 2021, doi: 10.1109/AEECA52519.2021.9574430.
- [9] A. R. Jordehi, M. S. Javadi, and J. P. S. Catalao, "Dynamic Economic Load Dispatch in Isolated Microgrids with Particle Swarm Optimisation considering Demand Response," *UPEC 2020 - 2020 55th Int. Univ. Power Eng. Conf. Proc.*, pp. 13–17, 2020, doi: 10.1109/UPEC49904.2020.9209769.
- [10] T. Zhang, J. Zhang, L. Wang, and D. Zhang, "Optimal economic dispatch for intelligent community micro-grid considering demand response," *IGBSG 2018 - 2018 Int. Conf. Intell. Green Build. Smart Grid*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/IGBSG.2018.8393560.
- [11] Z. Wang, Y. Shao, X. Dou, J. Wang, and X. Zhang, "Optimal dispatch of microgrid considering interruptible load," *2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, vol. 3, 2020.
- [12] M. Tkiouat and I. Abdou, "Unit Commitment Problem in Electrical Power System: A Literature Review," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 1357–1372, 2018, doi: 10.11591/ijece.v8i3.pp1357-1372.
- [13] IESR, "Technical Report: A Roadmap for Indonesia's Power Sector: How Renewable Energy Can Power Java-Bali and Sumatera," 2019.
- [14] Westario Power Inc., "May 2021 Electricity Pricing Changes." Ontario, 2021, [Online]. Available: <https://westario.com/may-2021-electricity-pricing-changes/>.

Implementasi Kinematika *Trajectory* Lingkaran pada Robot Roda *Mecanum*

Fahmizal^{1*}, Angga Priyatmoko¹, Afrizal Mayub²

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; angga.priyatmoko@mail.ugm.ac.id

²Pascasarjana Pendidikan IPA, Universitas Bengkulu; afrizalmayub@unib.ac.id

*Korespondensi: fahmizal@ugm.ac.id

Abstract - *The movement of the non-holonomic mobile robot is still not efficient because it can only move forward, backward, and turn so that it requires a wheel platform that is able to move more efficiently and more variedly. The use of mecanum wheels on wheeled robots is one of the best solutions because the mecanum wheels can move in all directions and are more stable. This paper proposes a mechanical robot trajectory kinematics design with a simple and easy mechanism to implement using an embedded system such as using Arduino. From the results of this study, it was found that the robot was able to maneuver following a circular trajectory with a radius of 50 cm in 7 seconds.*

Keywords - *mobile robot, mecanum robot, inverse kinematics, trajectory*

Intisari - Pergerakan *mobile robot non holonomic* masih belum efisien karena hanya dapat bergerak maju, mundur, berbelok sehingga membutuhkan platform roda yang mampu bergerak lebih efisien dan lebih variatif. Penggunaan roda *mecanum* pada robot beroda menjadi salah satu solusi terbaik karena roda *mecanum* dapat bergerak ke segala arah dan lebih stabil. Makalah ini mengusulkan sebuah perancangan desain kinematika *trajectory* robot *mecanum* dengan mekanisme yang sederhana dan mudah untuk diimplementasikan menggunakan *embeded system* seperti menggunakan Arduino. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa robot mampu bermanuver mengikuti *trajectory* lingkaran dengan radius 50 cm dalam waktu 7 detik.

Kata kunci - *robot beroda, roda mecanum, invers kinematika, trajectory*

I. PENDAHULUAN

Roda *mecanum* masuk ke dalam kategori robot *holonomic*. Berbeda dengan roda pada umumnya harus berbelok ketika menggerakkan dan tidak dapat bergerak ke segala arah sedangkan roda *mecanum* dapat bergerak ke segala arah tanpa harus berbelok. Roda *mecanum* disebut juga "Roda Ikon", jenis roda ini ditemukan pertama oleh Bengt Ikon dari Swedia [1].

Robot roda *mecanum* merupakan jenis robot *omnidirectional mobile robot* yang berperan penting dalam transportasi dan industri modern karena fleksibilitas dan kemampuan manuvernya yang tinggi. Platform dengan roda *mecanum* memiliki keunggulan besar dibandingkan desain konvensional dalam hal mobilitas di lingkungan yang padat. Lingkungan ini biasanya ditemukan di kantor, bengkel pabrik, gudang, rumah sakit, dan fasilitas perawatan lansia.

Roda *mecanum* menggunakan desain roda yang dikelilingi oleh *roller* dengan membentuk sudut 45°. Arah dan kecepatan masing-masing roda menghasilkan resultan gaya yang menerjemahkan pergerakan mobilitas tanpa mengubah arah hadap robot (*heading*) ataupun perubahan sudut putar *yaw* roda [2]-[4]. Namun terdapat kelemahan pada platform roda *mecanum*, yaitu apabila kondisi lantai yang tidak rata, masalah slip roda akan muncul [5].

Automatic guided vehicle (AGV) biasanya menggunakan platform roda *mecanum* dalam pengoperasiannya. Robot AGV merupakan suatu pengembangan dari teknologi otomasi di bidang *mobile robot* pada *warehouse industry* [6], [7]. Penggunaan AGV dengan roda *mecanum* sangat bermanfaat untuk dunia industri karena lebih fleksibel dan daya tahan serta mobilitasnya. Agar robot dapat bergerak ke segala arah maka membutuhkan perhitungan kinematika gerak sehingga

dalam pergerakannya dapat menghasilkan pola-pola seperti *trajectory* bentuk lingkaran.

Penelitian yang dilakukan oleh Zhe Sun dkk [8] membahas simulasi pelacakan *trajectory* lintasan dari robot *mecanum* dengan metode *adaptive integral terminal sliding mode* (AITSM). Serta dilakukan juga oleh peneliti Trinh dkk. [9] membahas perancangan *trajectory* lintasan dari robot *Mecanum* dengan menggunakan metode *non-uniform rational basis spline* (NURBS). Selanjutnya diteliti juga oleh Veer Alakshendra dkk. [10] yang membahas *adaptive robust second-order sliding mode control* (ARSSMC) untuk kasus pengendalian *trajectory* secara simulasi.

Dari tinjauan beberapa pustaka, umumnya para peneliti melakukan pembahasan perancangan *trajectory* robot *mecanum* dengan pengujian di level simulasi. Makalah ini mengusulkan sebuah perancangan desain *trajectory* robot *mecanum* dengan mekanisme yang sederhana dan mudah untuk diimplementasikan menggunakan *embeded system* seperti menggunakan Arduino.

Susunan pada makalah ini disusun menjadi lima bagian. Pada bab 2, konfigurasi robot *mecanum* dalam penelitian ini diusulkan. Di bab 3 perancangan desain *trajectory* pada robot *mecanum* dijelaskan. Prosedur penerapan persamaan *inverse kinematika* (IK) robot *mecanum* di bab 4 beserta hasil data eksperimen. Bab 5 menjelaskan kesimpulan dari penelitian ini.

II. KONFIGURASI ROBOT MECANUM

A. Roda Mecanum

Roda *mecanum* yang digunakan pada penelitian ini berdiameter 6 cm dengan *rollers* dipasang membentuk sudut 45° seperti yang disajikan pada Gambar 1, sehingga dapat

menyelesaikan rintangan dengan mudah dan posisi pemasangan roda *mecanum* berbeda dengan roda *Omni* seperti pada Gambar 2.

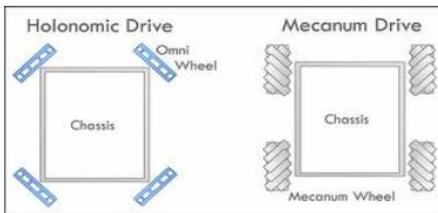
Kombinasi arah putar pada letak masing-masing roda *mecanum* akan mempengaruhi arah atau resultan gaya yang mengakibatkan perpindahan posisi robot *mecanum* seperti pada Gambar 3.

B. Desain Badan Robot Mecanum

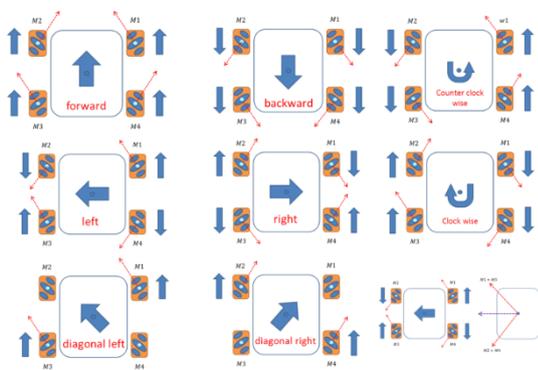
Desain mekanik sangat berpengaruh pada kinerja robot *mecanum* karena desain harus dibuat secara simetris dan sepresisi mungkin sehingga dapat mempermudah dalam menyesuaikan pengaturan perhitungan kinematika untuk pergerakannya. Pada penelitian ini badan robot dibuat menggunakan bahan akrilik dengan ketebalan 5 mm dengan bantuan perangkat lunak Corel Draw seperti yang disajikan pada Gambar 4. Hasil keseluruhan didesain badan robot *mecanum* yang telah disusun dengan perangkat elektroniknya disajikan pada Gambar 5. Badan robot *mecanum* dibuat dengan ukuran panjang antar sumbu 150 mm yang membentuk segi empat.



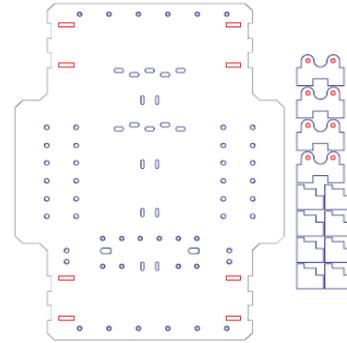
Gambar 1. Roda *mecanum* dengan *rollers* 45° [5]



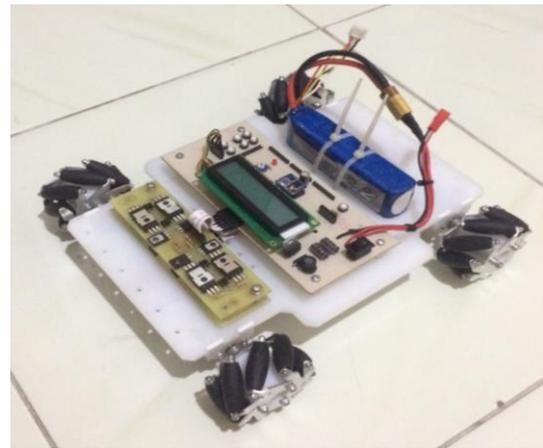
Gambar 2. Perbedaan posisi pemasangan antara roda *omni* dan roda *mecanum* [8]



Gambar 3. Resultan gaya perpindahan robot *mecanum* akibat dari kombinasi arah putar pada masing-masing roda *mecanum*



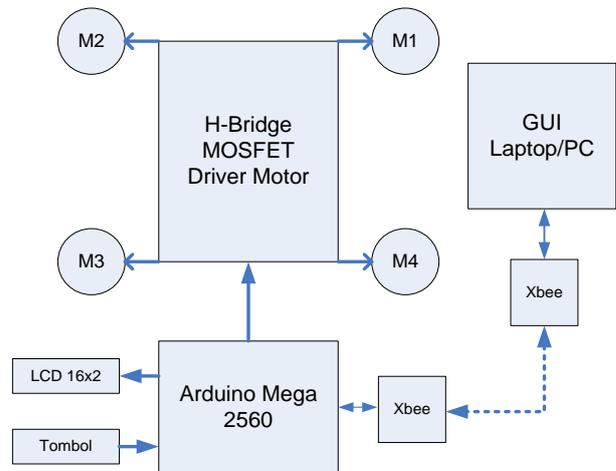
Gambar 4. Desain mekanik *body* robot *mecanum* dengan Corel Draw



Gambar 5. Realisasi desain mekanik dari robot *mecanum*

C. Desain Elektronika Robot Mecanum

Pada penelitian ini perangkat pengendali elektronis robot *mecanum* menggunakan Arduino Mega 2560 yang memiliki memori *flash* sebesar 256KB (8KB telah berisi *bootloader*), SRAM 8KB, dan EEPROM 4KB. Alasan pemilihan Arduino Mega karena nantinya memori *trajectory* lintasan robot *mecanum* membutuhkan memori SRAM di atas 1 Kb. Desain elektronika robot *mecanum* pada penelitian ini secara menyeluruh disajikan pada Gambar 6.



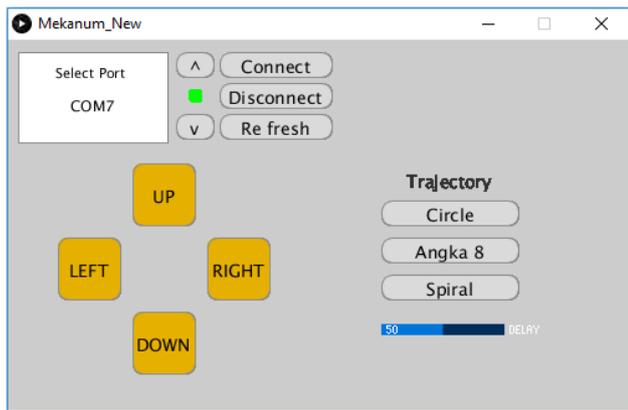
Gambar 6. Desain elektronika robot *mecanum*

Selain itu, desain komunikasi robot *mecanum* dirancang secara *wireless* (garis putus-putus), menggunakan modul X-Bee serta aplikasi Processing IDE sebagai *graphical user interface* (GUI) sebagai pembentuk antarmuka robot dengan *user*. Modul X-Bee yang digunakan adalah X-Bee S2C yang ditunjukkan seperti pada Gambar 7. X-Bee sendiri merupakan suatu modul yang dapat melakukan komunikasi serial secara *wireless* pada frekuensi 2,4 GHz. Untuk dapat mengakses X-Bee menggunakan aplikasi bernama XCTU [11].

Desain GUI yang dipergunakan pada penelitian ini disajikan pada Gambar 8. GUI ini dirancang untuk memberikan perintah *trajectory* yang telah ditanamkan pada Arduino Mega 2560. Adapun *trajectory* yang dirancang pada penelitian ini meliputi bentuk lingkaran (*circle*), bentuk angka 8 dan bentuk spiral.



Gambar 7. X-Bee S2C

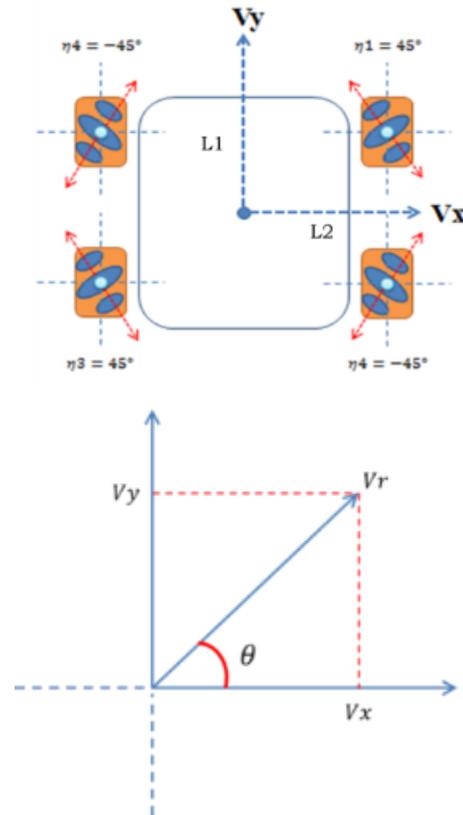


Gambar 8. Hasil rancangan GUI *trajectory* robot *mecanum* menggunakan Processing IDE

III. DESAIN TRAJECTORY ROBOT MECANUM

A. Kinematika pada Robot Mecanum

Penurunan kinematika robot *mecanum* merupakan tahap awal dalam perancangan desain *trajectory*. Pada penelitian ini diperlukan formula persamaan kinematika terbalik/*inverse* (IK). Persamaan ini akan digunakan sebagai dasar pergerakan robot agar mampu bergerak ke segala arah. Persamaan IK digunakan saat menentukan kecepatan putaran motor yang diperlukan untuk memenuhi gerakan yang diinginkan dari platform roda *mecanum*. Demikian pula, persamaan kinematika maju/*forward* (FK) dapat digunakan untuk menentukan *trajectory* robot *mecanum* dari kecepatan rotasi motor saat ini. Persamaan FK dan IK dari konfigurasi robot *mecanum* disajikan pada (1) dan (2).



Gambar 9. Konfigurasi dan resultan gaya robot *mecanum*

Dengan merujuk pada konfigurasi desain robot *mecanum* pada Gambar 9. Di mana R adalah jari-jari roda; ω_i adalah kecepatan sudut roda ke- i ($i = 1 \dots 4$); l_1, l_2 adalah jarak antara sumbu roda dan pusat badan robot *mecanum* dan $L=l_1+l_2$.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{M1} \\ \omega_{M2} \\ \omega_{M3} \\ \omega_{M4} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\omega_1 \\ R\omega_2 \\ R\omega_3 \\ R\omega_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & (l_1 + l_2) \\ 1 & -1 & -(l_1 + l_2) \\ 1 & 1 & (l_1 + l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

Gambar 9 menunjukkan persamaan vektor roda *mecanum*. Persamaan 3 menjadi acuan dalam menurunkan Persamaan IK. Hasil dari persamaan IK yang diturunkan akan diimplementasikan pada setiap roda *mecanum*. Dengan memahami resultan kecepatan (V_r) dan arah (θ), diperoleh kecepatan pada sumbu y (V_y) dan sumbu x (V_x), nilai-nilai ini akan digunakan dalam solusi persamaan IK pada robot *mecanum*. Langkah-langkah menurunkan persamaan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$V_r = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x} \quad (4)$$

$$V_r^2 = V_x^2 + V_y^2 \quad (5)$$

$$V_y = \sqrt{V_r^2 - V_x^2} \quad (6)$$

Dengan mensubstitusi (6) ke (4), diperoleh:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{V_y}{V_x}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_y^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$(\tan \theta)^2 = \frac{V_r^2 - V_x^2}{V_x^2}$$

$$V_x^2 = \frac{V_r^2}{(\tan \theta)^2 + 1}$$

$$V_x = \sqrt{\frac{V_r^2}{(\tan \theta)^2 + 1}}$$

Dengan menggunakan (6) dan (7), nilai V_y dan V_x akan digunakan dalam solusi persamaan IK pada robot *mecanum*. Data robot dan roda yang digunakan dalam penelitian ini dideskripsikan pada Tabel 1.

B. Desain Trajectory

Setelah formula persamaan IK diperoleh maka selanjutnya dapat menerapkan *trajectory* yang akan diterapkan pada robot *mecanum*. Pada penelitian ini mencoba merancang tiga jenis *trajectory* yaitu lingkaran, angka 8 dan spiral dengan mengacu pada (8)-(10). Dimana nilai t adalah $0 \leq t \leq 6\pi$.

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos t \\ \sin t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

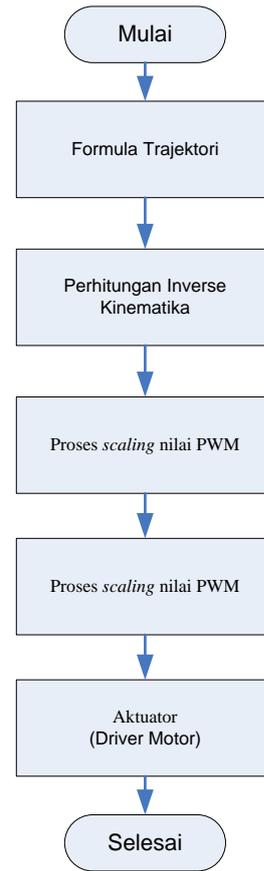
$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos t \\ \frac{\sin(2t)}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \cos \omega t \\ t \sin \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Selanjutnya agar aktuator dapat bergerak maka memerlukan proses *scaling* seperti yang disajikan pada Gambar 10 kedalam *range* nilai *pulse width modulation* (PWM). Pada penelitian ini menggunakan PWM 8-bit sehingga *range* nilai PWM berada pada (0-255).

Table 1. Data robot dan parameter roda robot *mecanum*

Parameter	Panjang (mm)
Diameter roda	60
Panjang $l1$	150
Panjang $l2$	150



Gambar 10. Tahapan scaling PWM aktuator

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

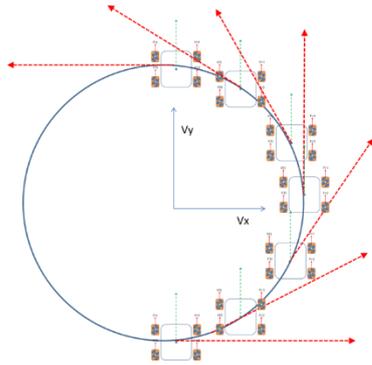
Pada tahapan pengujian, diuji coba dengan cara memberi masukan nilai $\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \theta \end{bmatrix}$ sesuai *trajectory* yang diinginkan.

Percobaan pertama adalah *trajectory* lingkaran dengan menggunakan formula pada (8). Tabel 2 menyajikan hasil data masukan untuk proses perhitungan persamaan IK pada kasus *trajectory* lingkaran.

Dari data V_x dan V_y apabila disajikan dalam bentuk grafis dua dimensi maka dapat dilihat seperti pada Gambar 11. Dari data Tabel 2 maka dapat diperoleh hasil perhitungan persamaan IK pada Tabel 3.

Tabel 2. Data masukan untuk proses hitung IK pada *trajectory* lingkaran

θ (radians)	V_x	V_y
0	1	0
0.1	0.995004165	0.099833417
0.2	0.980066578	0.198669331
0.3	0.955336489	0.295520207
0.4	0.921060994	0.389418342
0.5	0.877582562	0.479425539
...
6.2	0.996542097	-0.083089403



Gambar 11. Ilustrasi hasil plot dua dimensi data dari Tabel 2

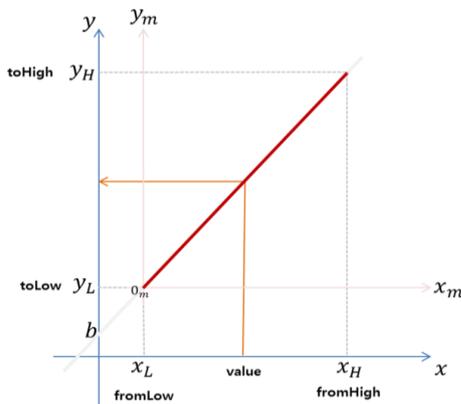
Tabel 3. Data hasil persamaan IK pada (8)

θ (radians)	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
0	1	1	1	1
0.1	1.0948	0.8952	0.8952	1.0948
0.2	1.1787	0.7814	0.7814	1.1787
0.3	1.2509	0.6598	0.6598	1.2509
0.4	1.3105	0.5316	0.5316	1.3105
0.5	1.3570	0.3982	0.3982	1.3570
...
6.2	0.9135	1.0796	1.0796	0.9135

Hasil IK dan *trajectory* dari Tabel 3 nilainya masih kecil sehingga tidak dapat langsung dimasukkan ke dalam fungsi PWM pada perangkat Arduino, oleh karena itu perlu dilakukan *scaling* agar nilai tersebut sesuai dengan nilai PWM pada *range* (0-255). Metode *scaling* ini dijelaskan pada Gambar 12 dengan (11).

$$y = \left(\frac{y_H - y_L}{x_H - x_L}\right)(x - x_L) + y_L \tag{11}$$

Setelah tahapan *scaling* ini dilewati dengan hasil pada Tabel 4 maka nilai kecepatan pada masing-masing roda *mecanum* sudah dalam range nilai PWM antara 0-255. Nilai dari Tabel 4 ini membentuk pola *trajectory* lingkaran. Dari hasil percobaan diperoleh bahwa robot mampu bermanuver mengikuti *trajectory* lingkaran dengan radius 50 cm dalam waktu 7 detik.



Gambar 12. Grafik proses *scaling* nilai PWM

Tabel 4. Hasil data Tabel 3 yang sudah diskalakan dengan nilai PWM

θ (radians)	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
0	180	180	180	180
0.1	183	177	177	183
0.2	186	173	173	186
0.3	189	171	171	189
0.4	192	167	167	192
0.5	195	164	164	195
...
6.2	177	183	183	177

V. SIMPULAN

Makalah ini menyajikan sebuah prosedur tahapan dalam penerapan kinematika balik/inverse (IK) dan dilanjut dengan penerapan *trajectory* lingkaran pada robot *mecanum*. Proses *scaling* ke dalam nilai *range* PWM (0-255) dari hasil perhitungan IK menjadi hal yang sangat penting sebelum diterapkan pada masing-masing roda *mecanum*. Dari hasil percobaan diperoleh bahwa robot mampu bermanuver mengikuti *trajectory* lingkaran dengan radius 50 cm dalam waktu 7 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung oleh Laboratorium Instrumentasi dan Kendali, Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. Ilon, Wheels for a course stable self propelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base. U. S. A. Patent, 1975.
- [2] Yadav, P. S., Agrawal, V., Mohanta, J. C., & Ahmed, M. F. (2022). A robust sliding mode control of mecanum wheel-chair for trajectory tracking. *Materials Today: Proceedings*.
- [3] Li, S., Zhang, J., Zhao, K., Zhang, Y., Sun, Z., & Xia, Y. (2022). Trajectory tracking control for four-mecanum-wheel mobile vehicle: A variable gain active disturbance rejection control approach. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 32(4).
- [4] Filomeno Amador, L. D., & Castillo Castañeda, E. (2022). Kinematic and dynamic analysis of an omnidirectional mobile platform driven by a spherical wheel. *Mechanical Sciences*, 13(1), 31-39.
- [5] Fahmizal, Kuo, C. H. (2016, August). Trajectory and heading tracking of a mecanum wheeled robot using fuzzy logic control. In *2016 International Conference on Instrumentation, Control and Automation (ICA)* (pp. 54-59). IEEE.
- [6] Le, T. L., Nghin, D. V., & Aly, M. (2022). Design and Fabrication of Mecanum Wheel for Forklift Vehicle. In *Modern Mechanics and Applications* (pp. 795-810). Springer, Singapore.
- [7] Adam, N., Aiman, M., Nafis, W. M., Irawan, A., Muaz, M., Hafiz, M., ... & Ali, S. N. S. (2017). Omnidirectional configuration and control approach on mini heavy loaded forklift autonomous guided vehicle. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 90, p. 01077). EDP Sciences.
- [8] Sun, Z., Hu, S., He, D., Zhu, W., Xie, H., & Zheng, J. (2021). Trajectory-tracking control of Mecanum-wheeled omnidirectional mobile robots using adaptive integral terminal sliding mode. *Computers & Electrical Engineering*, 96, 107500.
- [9] Ly, T. T. K., Thai, N. H., Dzung, L. Q., & Thanh, N. T. (2020, December). Determination of kinematic control parameters of omnidirectional AGV robot with mecanum wheels track the reference trajectory and velocity. In *International Conference on Engineering Research and Applications* (pp. 319-328). Springer, Cham.

- [10] Alakshendra, V., & Chiddarwar, S. S. (2017). Adaptive robust control of Mecanum-wheeled mobile robot with uncertainties. *Nonlinear Dynamics*, 87(4), 2147-2169.
- [11] Kumbhar, H. (2016, August). Wireless sensor network using Xbee on Arduino Platform: An experimental study. In *2016 International Conference on Computing Communication Control and automation (ICCUBEA)* (pp. 1-5). IEEE

Acknowledgment

We sincerely thank the experts and colleagues who have committed to reviewing the Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan Volume 3 No. 1 of 2022. The experts and colleagues who have contributed to the journal are listed below.

Name	Affiliation
Candra Febri Nugraha, S.T., M.Eng.	Universitas Gadjah Mada
Erik Tridianto, S.T., M.T.	Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
Esa Apriaskar, S.T., M.T.	Universitas Negeri Semarang
Imroatul Hudati, S.T., M.T.	Universitas Gadjah Mada
Jimmy Trio Putra, S.T., M.Eng.	Universitas Gadjah Mada
Pinto Anugrah, S.T., M.Eng.	Universitas Andalas
Rendra Dwi Firmansyah, S.Si., M.Eng.	Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Unan Yusmaniar Oktawati, S.T., M.Sc., Ph.D.	Universitas Gadjah Mada
Wahri Sunanda, S.T., M.Eng.	Universitas Bangka Belitung
Yanuar Mahfudz Safarudin, S.T., M.T.	Politeknik Negeri Semarang