

E-ISSN : 2746 - 2536

Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan

Volume 5 No.1 - April 2024

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief

Unan Yusmaniar Oktawati, Universitas Gadjah Mada

Associate Editor

Ahmad Adhiim Muthahhari, Universitas Gadjah Mada

Candra Febri Nugraha, Universitas Gadjah Mada

Editor

Esa Prakasa, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Fahmizal, Universitas Gadjah Mada

Fakih Irsyadi, Universitas Gadjah Mada

Isnain Nur Rifai, Universitas Gadjah Mada

Kiagus Aufa Ibrahim, Chiba University

Rizki Firmansyah Setya Budi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

Suhono, Universitas Gadjah Mada

Copyeditor

Fitri Puspa Sari, Universitas Gadjah Mada

Tika Erna Putri, Universitas Gadjah Mada

Assistant Editor

Andi Fariel, Universitas Gadjah Mada

Yessi Idianingrum Tanu Wijaya, Universitas Gadjah Mada

Published by:

- 1. Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya dengan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah dan Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah pada Gardu Distribusi MI-44-150-21 PT PLN ULP Magelang Kota** 1 - 8
Aldila Fajar Rizkiana, Yuris Mulya Saputra
- 2. Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis Internet of Things** 9 - 17
Hendi Budianto, Budi Sumanto
- 3. Komparasi Metode Manipulasi Baseline untuk Uji Diskriminasi Keberadaan Residu Pestisida pada Sayuran Sawi Hijau Berbasis Electronic Nose** 18 - 23
Abelta Mika Setiarini, Budi Sumanto
- 4. Modifikasi Motor Brushless Berbasis Lilitan pada Sistem Propulsi untuk Meningkatkan Performa Terbang Unmanned Aerial Vehicle** 24 - 29
Ilham Riska Subekti, Isnan Nur Rifai
- 5. Studi Penerapan Filter Digital pada Sistem Pemantau Parameter di Kolam Ikan** 30 - 38
Agritian Sevty Fiddariani, Budi Sumanto
- 6. Analisis Kebutuhan Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya di PT Beras Rajawali Menggunakan Optimal Capacitor Placement ETAP 19** 39 - 45
Barik Irfani Al Firdausi, Muhammad A'an Auliq, Fitriana Fitriana
- 7. Solar Power Station For High-Powered Electronics** 46 - 49
Tika Erna Putri, Suhono Suhono, Rahmadi Putra Aji, Wahyu Waskito Aji
- 8. Tangan Bionik Sebagai Teknologi Tepat Guna Untuk Penyandang Tuna Daksa Berbasis 3D Printing** 50 - 55
Rufaida Fatkhul Janna, Amalia Cemara Nur'aidha, Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati

Published by:

Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya dengan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah dan Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah pada Gardu Distribusi MI-44-150-21 PT PLN ULP Magelang Kota

Aldila Fajar Rizkiana¹, Yuris Mulya Saputra^{1*}

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

*Korespondensi: ym.saputra@ugm.ac.id

Abstract – *The electrical system in Wonosobo hamlet is supplied by a distribution transformer with a capacity of 50 kVA. There are 54 customer units with a total installed contract power of 31.5 kVA. Based on the measurement results, the lowest voltage on the customer side is 199 V which is below the nominal voltage of 231 V or has a voltage drop percentage of 13.85% exceeding the minimum standard voltage drop of 10%. One of the causes is that many house connections in Wonosobo hamlet exceed the PLN 56-1: 1993 standard regarding house connection standards. Thus, it is necessary to make improvement efforts including reconfiguring the house connection (SR) network and reconductoring the low voltage network (JTR) to overcome overload on the JTR conductor. Improvements are made using ETAP 12.6.0 software simulations so that the voltage drop value can be improved according to PLN No. 1 Year 1995 standards and can reduce power losses. Based on the simulation results, after making improvement efforts using 2 methods, the lowest voltage value was obtained to 210.2 V with the highest percentage of the previous voltage drop of 12.42% to 9.00%. Therefore, the voltage drop value obtained after the repair is in accordance with PLN standards, which is below the minimum standard of 10%. After repairing with two methods, the total power loss generated dropped from 1864.05 watt to 1051.17 watt.*

Keywords – *house connection, SR reconfiguration, reconductoring, voltage drop, power loss*

Intisari – Sistem kelistrikan di dusun Wonosobo disuplai oleh transformator distribusi dengan kapasitas 50 kVA. Terdapat 54 unit pelanggan dengan total daya kontrak terpasang adalah 31,5 kVA. Berdasarkan hasil pengukuran, tegangan terendah disisi pelanggan adalah 199 V berada di bawah tegangan nominal 231 V atau memiliki persentase jatuh tegangan sebesar 13,85% melebihi standar minimum jatuh tegangan 10%. Salah satu penyebabnya adalah banyak tarikan sambungan rumah di dusun Wonosobo melebihi standar PLN 56-1:1993 mengenai standar sambungan rumah. Dengan demikian perlu dilakukan upaya perbaikan meliputi rekonfigurasi jaringan sambungan rumah (SR) dan melakukan rekonduktor jaringan tegangan rendah (JTR) untuk mengatasi *overload* pada penghantar JTR. Rencana perbaikan disimulasikan dengan perangkat lunak ETAP 12.6.0 agar nilai jatuh tegangan dapat diperbaiki sesuai standar PLN No. 1 Tahun 1995 dan dapat mengurangi rugi daya. Berdasarkan hasil simulasi, setelah melakukan upaya perbaikan menggunakan 2 metode diperoleh nilai tegangan terendah menjadi 210,2 V dengan persentase tertinggi jatuh tegangan sebelumnya sebesar 12,42% menjadi 9,00%. Oleh karena itu, nilai jatuh tegangan yang didapat setelah perbaikan sudah sesuai dengan standar PLN yaitu di bawah standar minimum 10%. Setelah dilakukan perbaikan dengan dua metode, total rugi daya yang dihasilkan turun dari 1864,05 watt menjadi 1051,17 watt.

Kata kunci – *sambungan rumah, rekonfigurasi SR, rekonduktor, jatuh tegangan, rugi daya*

I. PENDAHULUAN

Sistem pembangkit, transmisi, dan distribusi membentuk suatu kesatuan yang utuh dinamakan sistem tenaga listrik. Melalui sistem distribusi, tenaga listrik akan disalurkan sampai ke konsumen [1]. Gardu distribusi terdiri dari beberapa komponen, di antaranya penghantar, tiang penyangga, dan trafo distribusi. Terdapat dua jenis penghantar pada jaringan distribusi yaitu kawat dan kabel. Penghantar kawat pada JTM antara lain jenis *all aluminium conductor* (AAC) dan *all aluminium alloy conductor* (AAAC). Penghantar kabel yang biasa digunakan pada jaringan distribusi adalah jenis kabel AAAC-S, BC dan XLPE [2]. Tiang penyangga digunakan untuk menyangga saluran. Penentuan jarak gawang saluran udara tegangan rendah (SUTR) di daerah pemukiman sebesar 40 s.d. 50 meter, sedangkan jarak gawang pada daerah luar pemukiman sekitar 60 s.d. 80 meter [3]. Transformator berfungsi untuk menaikkan turunkan tegangan. Terdapat dua macam gardu

distribusi berdasarkan jenis pemasangannya yaitu gardu pasang luar dan gardu pasang dalam. Gardu distribusi pasang luar terdiri dari gardu cantol dan gardu portal. Gardu distribusi pasang dalam terdiri dari gardu beton dan gardu kios.

Distribusi tenaga listrik harus mempunyai tingkat keandalan yang baik dan sesuai dengan standar PLN yang berlaku. Tingkat keandalan sistem distribusi ditentukan oleh mutu tegangan dan kondisi sambungan rumah (SR) yang menjadi titik akhir pelayanan listrik ke konsumen. Berdasarkan hasil pengukuran di Dusun Wonosobo, Magelang, Jawa Tengah diperoleh nilai tegangan terendah pada pelanggan sebesar 199 V, dengan kata lain terjadi jatuh tegangan sebesar 13,85%, melebihi batas maksimal jatuh tegangan sebesar 10%. Jatuh tegangan merupakan selisih antara tegangan pengiriman dengan tegangan penerimaan tenaga listrik. Jatuh tegangan dinyatakan dalam satuan volt atau persen. Jatuh tegangan dipengaruhi oleh adanya resistansi, reaktansi, dan impedansi pada saluran [5]. Jatuh

tegangan yang terjadi disebabkan oleh jumlah tarikan sambungan rumah yang tidak sesuai standar di Dusun Wonosobo.

Untuk mengetahui penyebab lain dari jatuh, dilakukan perhitungan persentase pembebanan transformator. Persentase pembebanan transformator merupakan hal yang harus diperhatikan, pasalnya trafo yang mengalami pembebanan lebih (*overload*) akan menyebabkan isolasi pada transformator mengalami panas berlebih. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan sehingga dapat mengakibatkan terjadinya jatuh tegangan [4].

Rugi daya listrik terjadi karena hilangnya energi listrik pada saat proses distribusi daya listrik dari sumber menuju beban (konsumen) yang diakibatkan oleh adanya hambatan pada penghantar tenaga listrik [6]. Rugi daya (*losses*) diklasifikasikan menjadi dua secara teknis dan non-teknis. Rugi daya teknis dipengaruhi oleh sifat material atau peralatan jaringan, sedangkan rugi non-teknis dikarenakan kesalahan instalasi atau kerusakan alat pada jaringan [7]. Susut teknis meliputi susut penghantar, susut pada transformator, dan susut akibat faktor daya rendah. Sedangkan rugi energi atau susut energi merupakan kondisi di mana jumlah energi yang dikirim atau didistribusikan tidak sama dengan energi yang diterima di sisi pelanggan atau daya kirim tidak terjual sepenuhnya. Susut energi seharga dengan rugi daya rata-rata untuk periode tertentu dikalikan dengan jumlah jam dari periode yang bersangkutan [8].

Pemilihan jenis penghantar jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan sistem tenaga listrik untuk menghindari adanya rugi daya dan jatuh tegangan. Rekonduktor merupakan metode perbaikan jatuh tegangan melalui penggantian penghantar dengan ukuran lebih besar. Saat dilakukan rekonduktor parameter impedansi dan arus jaringan akan berubah sehingga akan mengubah rugi daya dan jatuh tegangan [9].

Electric Transient and Analysis Program (ETAP) adalah perangkat lunak desain dan simulasi yang komprehensif untuk sistem rangkaian tenaga [10]. Aplikasi ini menggunakan antarmuka *single line diagram* (SLD) untuk berbagai jenis analisis antara lain: aliran daya, hubung singkat, *starting* motor, stabilitas *transient*, koordinasi relai proteksi dan sistem harmonik. *Load flow analysis* adalah studi yang bertujuan untuk mengetahui aliran daya dari satu titik ke titik lain dalam sistem kelistrikan dan tegangan antar bus dalam sistem [11]. Studi aliran daya dihitung menggunakan dua metode, yaitu metode Gauss-Seidel dan metode Newton-Raphson. Metode Newton-Raphson karena lebih unggul daripada metode Gauss-Seidel yaitu lebih efektif digunakan pada sistem jaringan yang besar, memiliki tingkat ketelitian lebih baik dibanding metode Gauss-Seidel, iterasi lebih sedikit diperlukan dan komputasi lebih cepat [12].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase jatuh tegangan dan nilai rugi daya setiap sambungan rumah akibat sambungan rumah tidak sesuai

standar, mengetahui penurunan rugi daya sebelum dan sesudah dilakukan rekonfigurasi sambungan rumah dan rekonduktor JTR sesuai dengan hasil simulasi perangkat lunak ETAP 12.6.0. Selain itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas penggabungan dua metode perbaikan kualitas jaringan tegangan rendah dengan melakukan rekonfigurasi sambungan rumah dan rekonduktor JTR.

Perbedaan penelitian yang disusun oleh penulis dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya adalah lokasi penelitian berada di Dusun Wonosobo, Desa Kalegen, Kecamatan Bandongan, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. Perbedaan selanjutnya adalah sebelum merencanakan perbaikan melakukan perhitungan persentase pembebanan transformator, menggabungkan dua metode perbaikan *drop* tegangan dan rugi *losses* pada jaringan SR dengan melakukan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR menggunakan *software* ETAP 12.6.0, melakukan perhitungan rugi energi yang diakibatkan oleh rugi daya yang dihasilkan, dan menghitung persentase *error* perangkat lunak ETAP 12.6.0.

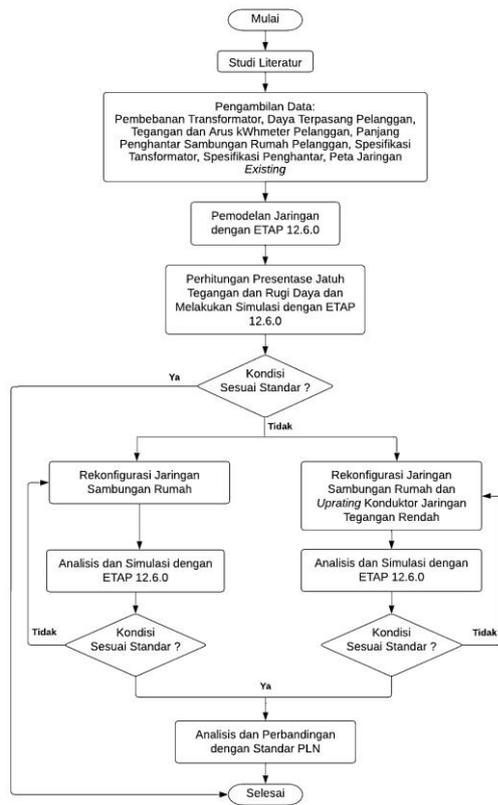
II. METODOLOGI

A. Flowchart

Upaya perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya akibat jumlah tarikan sambungan rumah yang tidak sesuai standar dilakukan menggunakan dua metode perbaikan. Metode pertama adalah melalui rekonfigurasi jaringan SR dan metode kedua dilakukan menggabungkan dua metode, yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR. Perbaikan akan dilakukan melalui perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Upaya perbaikan dilakukan melalui beberapa tahapan. Gambar 1 menunjukkan bagan diagram alir penelitian yang dilakukan.

Setelah itu, dilanjutkan dengan simulasi jaringan setelah perbaikan. Rencana perbaikan akan menggunakan dua metode. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan jatuh tegangan dan rugi daya di dusun Wonosobo adalah dengan melakukan rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan melakukan rekonduktor jaringan tegangan rendah. Apabila hasil jatuh tegangan dan rugi daya sudah sesuai standar maka penelitian dapat dikatakan selesai, jika hasil tidak sesuai standar maka akan dilakukan perencanaan perbaikan kembali. Setelah disimulasikan, hasil jatuh tegangan dan rugi daya baik sebelum maupun sesudah perbaikan dapat dibandingkan berdasarkan pada hasil simulasi yang terdapat pada *report* ETAP 12.6.0.

Setelah melakukan perbandingan hasil penurunan jatuh tegangan dan rugi daya dengan menggunakan dua metode, studi dilanjutkan menganalisis serta membandingkan dengan standar PLN. Pengerjaan penelitian pun telah selesai dilakukan.



Gambar 1. Bagan diagram alir penelitian

B. Standar PLN

Untuk memperbaiki permasalahan yang ada yaitu jatuh tegangan dan jumlah tarikan sambungan SR yang tidak sesuai ketentuan akan mengacu pada standar PLN. Menurut SPLN No. 1 Tahun 1995 mengenai tegangan-tegangan standar, variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +% dan minimum - 10% terhadap tegangan nominal 231 V sesuai dengan tegangan sekunder transformator yang tertera pada *nameplate* transformator [13]. Sedangkan, standar sambungan rumah diatur dalam SPLN No. 56-1 Tahun 1993 bahwa jumlah sambungan tenaga listrik tegangan rendah (SLTR) pada satu tiang maksimum enam sambungan luar pelayanan (SLP) dan dari setiap SLP diperbolehkan mempunyai maksimum empat tarikan pelanggan. Banyaknya sambungan rumah yang tidak sesuai standar menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik pelanggan. Selain itu juga akan mengakibatkan permasalahan jatuh tegangan yang akan berpengaruh pada rugi daya yang dapat merugikan PLN [14].

C. Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Perhitungan persentase pembebanan transformator digunakan untuk mengetahui kondisi transformator apakah dalam keadaan *overload* atau tidak. Persentase pembebanan transformator dikatakan mengalami *overload* jika nilai persentase pembebanan di atas 80% sesuai dengan standar PLN No.17 Tahun 1979. Pembebanan transformator dihitung menggunakan (1).

$$\% \text{ pembebanan} : \frac{I \text{ total}}{I \text{ beban penuh}} \times 100\% \quad (1)$$

$$I \text{ beban penuh} = \frac{S}{V} \quad (2)$$

Dengan,

- I total : arus total
- I beban penuh : arus beban penuh
- S : daya transformator (kVA)
- V : tegangan sekunder transformator (V)

D. Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan

Perhitungan nilai jatuh tegangan menggunakan (3), Sedangkan, persentase jatuh tegangan dihitung menggunakan (4).

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (3)$$

$$\% \text{ drop tegangan} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan.

- ΔV : jatuh tegangan (V)
- V_s : tegangan sumber (V)
- V_r : tegangan terima (V)

E. Perhitungan Rugi Daya dan Rugi Energi

Rugi daya pada jaringan SR dihitung menggunakan (5). Konstanta 2 merupakan jumlah penghantar fase dan netral yaitu dua. Setelah mengetahui nilai rugi daya, kemudian nilai rugi energi pada penghantar dapat dihitung menggunakan (6).

$$\Delta P = 2 \times I^2 \times R \quad (5)$$

$$E = P \times t \quad (6)$$

Dengan,

- ΔP : rugi daya listrik pada jaringan (watt)
- I : arus jaringan (A)
- R : tahanan penghantar (Ω)
- E : rugi-rugi energi (kWh)
- P : rugi-rugi daya (kW)
- T : waktu (jam)

F. Perhitungan Luas Penampang Konduktor

Untuk menentukan luas penampang penghantar untuk melakukan rekondutor, hal pertama yang harus dilakukan yaitu menentukan arus yang mengalir melalui penghantar tersebut sesuai (7).

$$I = \frac{P}{V \times \cos \varphi} \quad (7)$$

Dengan,

- I : arus nominal (A)
- P : daya aktif (W)
- V : tegangan (V)
- $\cos \varphi$: faktor daya (0,8)

Kemudian, setelah mengetahui arus nominal penghantar, luas penampang penghantar ditentukan berdasarkan besar KHA jenis kabel yang digunakan. Nilai kemampuan hantar arus diperoleh dari 1,25 kali dari arus nominal yang melewati penghantar tersebut [15].

G. Perhitungan Persentase Keakuratan Perangkat Simulasi ETAP 12.6.0

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan dan simulasi ETAP 12.6.0 untuk mengetahui nilai jatuh tegangan dan rugi daya. Oleh karena itu, untuk mengetahui nilai keakuratan ETAP 12.6.0 sesuai (8).

$$\% \text{ Keakuratan ETAP} = \frac{\bar{X} \text{ Hasil ETAP}}{\bar{X} \text{ Hasil rumus manual}} \times 100\% \quad (8)$$

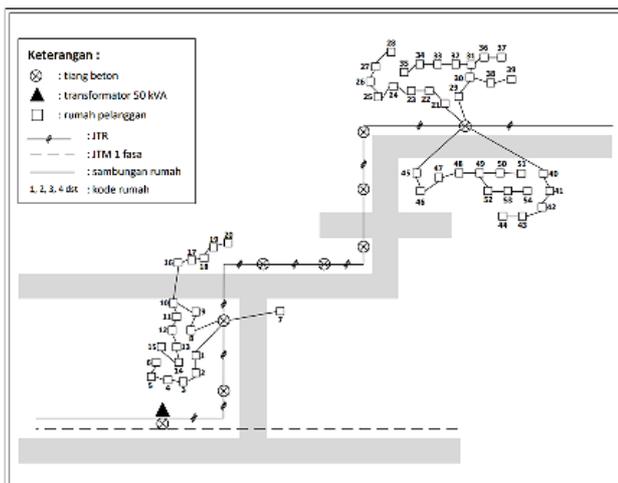
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian yang diperoleh kemudian diolah dengan urutan sebagai berikut :

A. Kondisi Jaringan

Kondisi jaringan di dusun Wonosobo ditunjukkan pada Gambar 2. Dusun Wonosobo disuplai oleh trafo satu fase berkapasitas 50 kVA. Penghantar yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik sampai ke pelanggan menggunakan jenis penghantar yang berbeda-beda. Penghantar JTM yang digunakan adalah jenis AAAC ukuran 70 mm² dengan nilai resistansi 0,438 Ω/km. Penghantar JTR yang digunakan adalah jenis NFA2X-T 2x70+50 mm² dengan nilai resistansi 0,433 Ω/km.

Sedangkan penghantar SR yang digunakan adalah jenis low voltage twisted cable (LVTC) NFA2X berukuran 2x10 mm² dengan nilai resistansi 3,08 Ω/km. Data pengukuran arus, tegangan, panjang penghantar SR disajikan pada Tabel 1 .



Gambar 2. Peta pelanggan PLN di dusun Wonosobo

Tabel 1. Data pengukuran arus, tegangan, dan panjang sambungan rumah

| Kode | Daya Pelanggan (VA) | Tegangan Terukur (A) | Arus Terukur (A) | Panjang SR (m) |
|--------|---------------------|----------------------|------------------|----------------|
| RMH 1 | 900 | 215,3 | 3,1 | 19 |
| RMH 2 | 450 | 214,5 | 1,4 | 18 |
| RMH 3 | 450 | 214,2 | 1,2 | 16 |
| RMH 4 | 450 | 213,45 | 1,33 | 10 |
| RMH 5 | 900 | 213 | 2,42 | 8 |
| RMH 6 | 450 | 212,1 | 1,8 | 10 |
| RMH 7 | 900 | 215,8 | 3,2 | 35 |
| RMH 8 | 450 | 214,56 | 1,23 | 9 |
| RMH 9 | 900 | 211,6 | 3,1 | 21 |
| RMH 10 | 450 | 210,3 | 2 | 9 |
| RMH 11 | 450 | 210 | 1,53 | 12 |
| RMH 12 | 450 | 209,46 | 1,21 | 12 |
| RMH 13 | 900 | 208 | 3,3 | 10 |
| RMH 14 | 450 | 209,37 | 1,58 | 11 |
| RMH 15 | 450 | 208 | 2 | 19 |
| RMH 16 | 900 | 209,7 | 3,2 | 15 |
| RMH 17 | 900 | 215 | 3,8 | 10 |
| RMH 18 | 450 | 209,53 | 1,33 | 15 |
| RMH 19 | 450 | 208,4 | 2 | 10 |
| RMH 20 | 450 | 207,27 | 1,21 | 10 |
| RMH 21 | 450 | 205,2 | 1,8 | 9 |
| RMH 22 | 450 | 205 | 2 | 7 |
| RMH 23 | 900 | 205,64 | 3,32 | 13 |
| RMH 24 | 450 | 205,6 | 1,2 | 15 |
| RMH 25 | 450 | 204,75 | 1,25 | 13 |
| RMH 26 | 450 | 203,8 | 1,8 | 14 |
| RMH 27 | 900 | 203,2 | 2,3 | 20 |
| RMH 28 | 450 | 205,2 | 2 | 16 |
| RMH 29 | 450 | 204 | 1,61 | 15 |
| RMH 30 | 450 | 204,4 | 1,2 | 8 |
| RMH 31 | 900 | 203 | 2,4 | 6 |
| RMH 32 | 450 | 203 | 1,83 | 12 |
| RMH 33 | 450 | 203,3 | 1,6 | 15 |
| RMH 34 | 900 | 203 | 2,2 | 15 |
| RMH 35 | 450 | 202,53 | 1,37 | 10 |
| RMH 36 | 450 | 204,68 | 1,86 | 10 |
| RMH 37 | 450 | 204,14 | 1,72 | 10 |
| RMH 38 | 450 | 203,2 | 1,9 | 12 |
| RMH 39 | 900 | 203,23 | 3,67 | 10 |
| RMH 40 | 450 | 205 | 1,8 | 30 |
| RMH 41 | 900 | 204 | 3,32 | 15 |
| RMH 42 | 450 | 204 | 1,67 | 17 |
| RMH 43 | 450 | 203,26 | 1,28 | 15 |
| RMH 44 | 450 | 203,58 | 1,6 | 10 |
| RMH 45 | 450 | 204,34 | 1,65 | 13 |
| RMH 46 | 900 | 204,2 | 3,2 | 18 |
| RMH 47 | 450 | 203,6 | 1,5 | 12 |
| RMH 48 | 900 | 202,56 | 3,74 | 17 |
| RMH 49 | 450 | 201 | 2 | 14 |
| RMH 50 | 450 | 202,4 | 1,2 | 19 |
| RMH 51 | 900 | 202 | 2,6 | 12 |
| RMH 52 | 450 | 201,85 | 1,27 | 15 |
| RMH 53 | 450 | 199,62 | 1,39 | 16 |
| RMH 54 | 450 | 199 | 1,5 | 15 |

B. Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Pengukuran arus pada jaringan distribusi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi transformator dalam keadaan beban lebih (*overload*) atau tidak. Jika transformator mengalami beban lebih, maka akan berpengaruh pada kualitas tegangan yang diterima pelanggan. Data pengukuran pembebanan transformator disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data pengamatan pembebanan trafo distribusi 50 kVA

| | Arus Terukur (A) | Arus Total (A) |
|----|---------------------|-------------------|
| X1 | 56 | |
| X2 | 60 | 116 |
| N | 8,2 | 10 |

Berdasarkan data pengukuran yang ada, dapat dihitung persentase pembebanan transformator sebagai berikut : Untuk menghitung persentase pembebanan transformator, terlebih dahulu menghitung arus beban penuh sesuai dengan (2) sebagai berikut :

$$I \text{ beban penuh} = \frac{50.000 \text{ VA}}{231 \text{ V}}$$

$$I \text{ beban penuh} = 216,45 \text{ A}$$

Setelah itu, dapat dihitung persentase pembebanan transformator sesuai dengan (1) sebagai berikut :

$$\% \text{ Pembebanan Transformator} = \frac{116}{216,45} \times 100\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Transformator} = 53,53\%$$

Diperoleh persentase pembebanan transformator sebesar 53,53% atau tidak melebihi 80%.

C. Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan Sebelum Rekonfigurasi

Pada perhitungan persentase jatuh tegangan diperlukan data pengukuran tegangan pada Tabel 1. Jatuh tegangan diperoleh dari hasil selisih antara tegangan dari PLN yaitu 231 V (tegangan keluaran transformator) dengan tegangan pelanggan (tegangan terima) yang diukur secara langsung. Persentase jatuh tegangan RMH 1 dihitung dengan menggunakan (4).

$$\% \text{ drop tegangan} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \text{ jatuh tegangan} = \frac{231 - 215,3}{231} \times 100\%$$

$$\% \text{ jatuh tegangan} = 6,80 \%$$

Perhitungan persentase jatuh tegangan hingga rumah ke 54 menggunakan persamaan dan cara perhitungan yang sama seperti pada rumah kesatu. Berdasarkan hasil perhitungan, persentase jatuh tegangan berada pada rentang 6,58% hingga 13,85%. Terdapat 35 rumah pelanggan melebihi batas

ketentuan penurunan tegangan yaitu -10% berdasarkan SPLN 1:1995. Tegangan minimal sesuai ketentuan adalah 207,9 V.

D. Perhitungan Rugi Daya Sebelum Rekonfigurasi

Perhitungan rugi daya yang ditimbulkan akibat sambungan rumah tidak sesuai standar PLN di dusun Wonosobo dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran arus setiap konsumen yang dapat dilihat pada Tabel 1. Rugi daya pada sambungan rumah ini dipengaruhi oleh nilai arus, panjang jaringan sambungan rumah, dan resistansi penghantar. Untuk mengetahui rugi daya dilakukan perhitungan menggunakan (5).

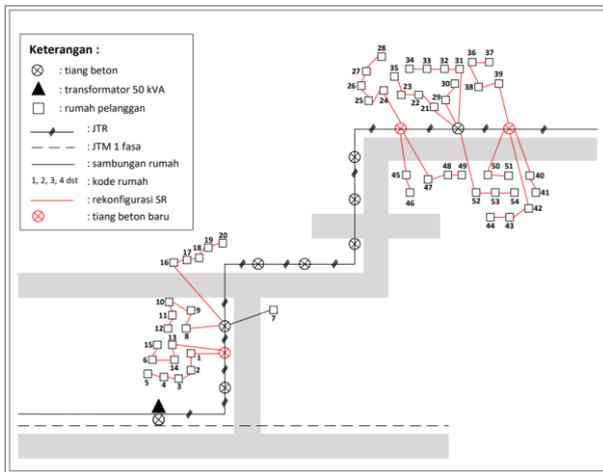
Sesuai dengan (5), perhitungan rugi daya pada jaringan SR ini dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya nilai arus, panjang jaringan sambungan rumah, dan resistansi penghantar. Salah satu penyebab adanya rugi daya adalah *overload* penghantar JTR, di mana aliran arus melalui penghantar melebihi arus nominal penghantar. Oleh karena itu untuk perlu dilakukan rekonduktor untuk memperkecil resistansi yang melewati penghantar. Semakin besar luas penampang penghantar, semakin kecil resistansinya, sehingga nilai jatuh tegangan semakin kecil. Rekonfigurasi jaringan SR juga dilakukan sebagai upaya mengurangi rugi daya, hal ini dikarenakan panjang penghantar mempengaruhi besarnya nilai rugi daya. Jadi, semakin banyak tarikan sambungan rumah, semakin tinggi nilai rugi daya yang dihasilkan.

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan (5) diperoleh total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar JTR adalah sebesar 2736,47 watt yang terdiri dari rugi penghantar JTR dan rugi penghantar SR.

E. Perencanaan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah

Upaya penanggulangan jatuh tegangan dan rugi daya (*losses*) yang diakibatkan oleh SR tidak sesuai standar PLN dilakukan melalui rekonfigurasi sambungan rumah. Rekonfigurasi sambungan rumah dilakukan dengan melakukan penambahan JTR agar dapat menjangkau sambungan rumah deret paling ujung sehingga jatuh tegangan dapat berkurang.

Rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dilakukan dengan mengacu pada ketentuan SPLN 56-1:1993 pasal lima yaitu jumlah SLTR pada satu tiang diperbolehkan maksimum 6 SLP dengan tiap SLP diperbolehkan maksimum memiliki 4 tarikan pelanggan. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa jumlah sambungan rumah yang telah dilakukan rekonfigurasi sudah sesuai dengan standar ketentuan teknis pemasangan sambungan rumah sesuai SPLN 56-1:1993. Sebelum melakukan simulasi *load flow analysis* jaringan eksisting, terlebih dahulu dilakukan pembuatan SLD. Pembuatan SLD pada ETAP 12.6.0 dilakukan dengan pengisian parameter sesuai dengan data dan kondisi di lapangan.



Gambar 3. Perancangan rekonfigurasi sambungan rumah

F. Simulasi Jaringan Eksisting Sambungan Rumah Sebelum Rekonfigurasi

Penggunaan perangkat lunak ETAP berfungsi untuk menganalisis aliran daya (*load flow analysis*) baik pada jaringan distribusi tenaga listrik yang sudah ada maupun perencanaan perbaikan.

Persentase jatuh tegangan sebelum rekonfigurasi berada pada rentang 5,89% s.d. 12,42%. Untuk memperbaiki jatuh tegangan tersebut maka dilakukan upaya rekonfigurasi SR dengan melakukan penambahan JTR. Diperoleh total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi daya penghantar JTR adalah sebesar 1864,05 watt.

G. Perhitungan Ukuran Penghantar untuk Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah

Setelah membuat SLD kemudian dilakukan simulasi *load flow analysis*. Berdasarkan hasil simulasi *load flow analysis*, terdapat beberapa komponen berwarna merah dan ungu. Komponen yang berwarna ungu menunjukkan suatu kondisi *marginal*, sedangkan komponen berwarna merah menunjukkan kondisi *critical*. Kondisi *marginal* diartikan sebagai kondisi toleransi dan dapat dinyatakan masih aman, sedangkan kondisi *critical* berarti komponen pada sistem tenaga listrik dalam kondisi berbahaya dan harus segera dilakukan evaluasi beserta penanganannya. *Setting* persentase *marginal* dan *critical* diatur pada fitur *Load Flow Study Case* pada perangkat lunak ETAP 12.6.0. Persentase *critical* diatur 100% dan persentase *marginal* diatur sebesar 95%.

Dapat dilihat pada *alert view* yang menunjukkan komponen memiliki kondisi *marginal* dan *critical*. Kondisi *critical* terdapat pada beberapa sadapan karena mengalami jatuh tegangan dan penghantar JTR LVTC NFA-2XT 1 mengalami *overload*. Berdasarkan hasil simulasi kondisi *real* dapat diketahui bahwa penyebab jatuh tegangan tidak hanya berasal dari sambungan rumah yang tidak sesuai standar PLN, akan tetapi terdapat penghantar jaringan tegangan rendah yang mengalami *overload*. Penghantar JTR LVTC NFA-2XT

1 mengalami *overload* dikarenakan aliran arus melalui penghantar terlampaui besar sehingga melebihi arus nominal penghantar. Oleh karena itu perlu dilakukan rekonduktor atau memperbesar luas penampang penghantar.

Untuk menentukan luas penampang penghantar yang diperlukan, maka harus dilakukan perhitungan arus yang mengalir melewati penghantar tersebut dengan (7).

$$I = \frac{P}{V \times \cos\theta}$$

$$I = \frac{31500 \text{ VA}}{231 \text{ V} \times 0,8}$$

$$I = 170,45 \text{ A}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, arus yang mengalir melewati penghantar JTR LVTC NFA-2XT 1 sebesar 170,45 A ketika total daya pelanggan 31.500 VA. Berdasarkan PUIL 2000, untuk menentukan KHA suatu penghantar menggunakan perhitungan berikut.

$$\text{KHA} = 125\% \times I_{\text{nominal}}$$

$$\text{KHA} = 125\% \times I_{\text{nominal}}$$

$$\text{KHA} = 125\% \times 170,45$$

$$\text{KHA} = 213,06$$

Selanjutnya penentuan luas penghantar ditentukan berdasarkan Kuat Hantar Arus (KHA) penghantar jenis NFA2X yang terdapat pada Tabel 2. Luas penghantar yang paling sesuai adalah jenis NFA2X berukuran 2x95 + 1x70 mm² dengan kuat hantar arus 242 A. Rekonduktor jaringan tegangan rendah dilakukan untuk memperkecil resistansi yang melewati penghantar, karena luas penampang penghantar berbanding terbalik dengan resistansi penghantar. Semakin besar luas penampang penghantar maka semakin kecil resistansinya. Resistansi penghantar merupakan faktor yang mempengaruhi jatuh tegangan. Diharapkan setelah dilakukan rekonduktor dapat memperbaiki permasalahan jatuh tegangan.

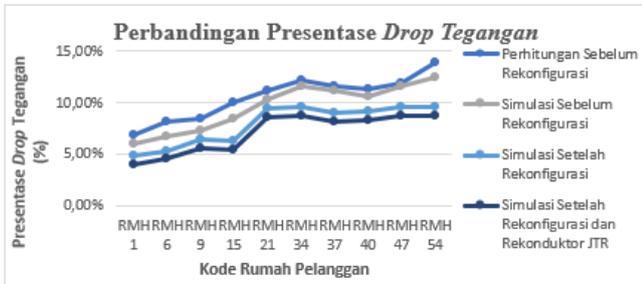
H. Simulasi Perbaikan Jaringan Sambungan Rumah Setelah Rekonfigurasi Menggunakan ETAP 12.6.0

Simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0 dilakukan pada beberapa kondisi yaitu jaringan *eksisting* atau sebelum perbaikan, setelah dilakukan rekonfigurasi, dan setelah dilakukan rekonfigurasi beserta rekonduktor JTR. Tujuannya agar dapat dilakukan perbandingan jatuh tegangan dan rugi daya sebelum maupun sesudah rekonfigurasi SR dan rekonduktor JTR.

Hasil simulasi setelah rekonfigurasi menggunakan ETAP 12.6.0 diperoleh persentase jatuh tegangan pada rentang 4,85% hingga 9,83 % atau berada di bawah batas penurunan jatuh tegangan yaitu -10%. Sedangkan total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar jaringan tegangan rendah adalah sebesar 1212,49 watt.

Hasil simulasi setelah rekonfigurasi dengan melakukan penambahan jaringan tegangan rendah dan rekonduktor menunjukkan bahwa tidak ada jatuh tegangan yang melebihi batas standar yang di tentukan yaitu -10%. Persentase jatuh tegangan berada pada rentang 4.03% hingga 9.00%. Total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar jaringan tegangan rendah adalah sebesar 1051,17 watt.

Berikut disajikan grafik perbandingan hasil jatuh tegangan sebelum dilakukan rekonfigurasi, setelah dilakukan rekonfigurasi, dan setelah dilakukan rekonfigurasi beserta rekonduktor JTR menggunakan simulasi ETAP 12.6.0. Grafik perbandingan persentase jatuh tegangan menggunakan 10 rumah pelanggan yang diambil secara acak berdasarkan perbedaan jumlah tarikan sambungan rumah. Berikut grafik hubungan antara rumah pelanggan dengan persentase jatuh tegangan baik sebelum dan setelah dilakukan perbaikan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perbandingan persentase jatuh tegangan

Gambar 4 menunjukkan bahwa perbaikan jatuh tegangan dengan menggunakan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan rekonduktor JTR dapat menurunkan nilai jatuh tegangan sebelum rekonfigurasi sebesar 12,42% menjadi 9,00%. Dibandingkan dengan menggunakan satu metode saja yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah, persentase jatuh tegangan turun dari 12,42% menjadi 9,83%. Perbaikan tegangan terendah pelanggan setelah rekonfigurasi yaitu dari tegangan 202,3 V menjadi 219,8 V. Setelah dilakukan perbaikan menggunakan 2 metode tegangan dapat diperbaiki menjadi 221,7 V. Saat ini jatuh tegangan pada pelanggan sudah sesuai dengan standar PLN No. 1:1995.

Dilihat dari aspek ekonomi, penggunaan dua metode memang lebih mahal karena harus melakukan penggantian penghantar JTR, akan tetapi dilihat dari aspek keamanan penghantar JTR yang sudah mengalami *overload* harus dilakukan penggantian untuk mengantisipasi penghantar mengalami panas sehingga dapat berakibat fatal yaitu terbakar dan berujung pada biaya perbaikan. Selain itu, seiring dengan berjalannya waktu pelanggan atau beban akan terus bertambah sehingga perlu dilakukan penggantian penghantar yang disesuaikan dengan arus yang mengalir pada penghantar tersebut ketika beban mencapai 80% (batas pembebanan transformator). Maka dengan

mempertimbangkan aspek-aspek tersebut penggunaan dua metode lebih optimal untuk menurunkan *drop* tegangan dan rugi daya pada pelanggan.

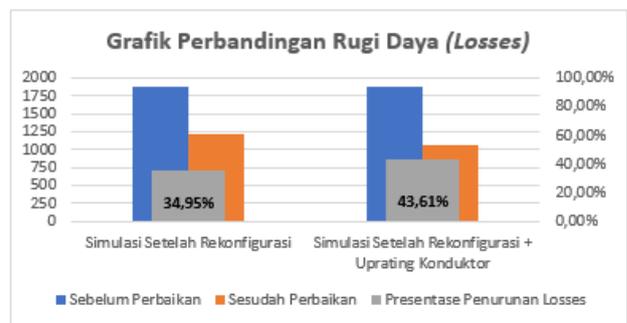
Terdapat perbedaan hasil persentase jatuh tegangan dengan perhitungan dan simulasi sebelum perbaikan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Perhitungan keakuratan dilakukan dengan membandingkan *report* ETAP dengan hasil perhitungan secara manual dikali dengan 100%. Adapun perhitungan berdasarkan (8) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \% \text{ Keakuratan ETAP} &= \frac{\bar{X} \text{ Hasil ETAP}}{\bar{X} \text{ Hasil rumus manual}} \times 100\% \\ \% \text{ Keakuratan ETAP} &= \frac{9,88\%}{10,64\%} \times 100\% \\ \% \text{ Keakuratan ETAP} &= 92,91\% \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh persen keakuratan ETAP sebesar 92,91% atau dengan tingkat *error* sebesar 7,09%, hal ini dikarenakan simulasi menggunakan ETAP 12.6.0 merupakan kondisi ideal berbeda dengan kondisi di lapangan sehingga terdapat adanya faktor yang tidak dapat diperhitungkan pada ETAP 12.6.0 seperti adanya *overheat* akibat sambungan penghantar kurang kencang yang menimbulkan *losses*.

Berikut disajikan Gambar 5 yaitu grafik perbandingan penurunan rugi daya menggunakan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR dibandingkan menggunakan 1 metode saja yaitu rekonfigurasi jaringan SR saja.

Berdasarkan grafik perbandingan rugi daya pada Gambar 5 terlihat bahwa penggabungan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan rekonduktor JTR dapat menurunkan rugi daya lebih besar yaitu sebesar 43,61%, dibandingkan dengan menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR sebesar 34,95%. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ETAP 12.6.0, penurunan rugi daya sebelum perbaikan adalah sebesar 1.864,05 watt menjadi 1.212,49 watt dengan perbaikan menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR, sedangkan penurunan nilai rugi daya dengan melakukan perbaikan menggunakan dua metode sebesar 1.051,17 watt.



Gambar 5. Grafik perbandingan rugi daya

IV. SIMPULAN

Setelah dilakukan upaya perbaikan dengan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 diperoleh persentase penurunan jatuh tegangan sebesar 27,54%. Presentasi jatuh tegangan dapat diperbaiki dari rentang 5,89% s.d. 12,42% menjadi 4,03% s.d. 9,00%. Berdasarkan standar PLN No. 1:1995 mengenai variasi tegangan pelayanan, persentase jatuh tegangan setelah perbaikan sudah sesuai standar yaitu berada di bawah 10%. Penggabungan dua metode untuk mengatasi permasalahan yang ada mampu menurunkan rugi daya sebesar 43,61%, dibandingkan hanya dengan melakukan rekonfigurasi jaringan SR saja dengan persentase penurunan rugi daya sebesar 34,95%. Penggabungan dua metode untuk mengatasi permasalahan yang ada yaitu dengan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR efektif untuk memperbaiki jatuh tegangan dan menurunkan rugi daya.

PENELITIAN LANJUTAN

Penggabungan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR memiliki keterbatasan. Metodologi yang digunakan yaitu rekonfigurasi SR yang dilakukan secara manual dan perlu adanya penggantian penghantar JTR, sehingga pada praktiknya di lapangan tentu akan memerlukan biaya dan tenaga yang harus diperhitungkan secara lebih detail.

Perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya akibat tarikan sambungan rumah tidak sesuai standar menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR merupakan solusi yang baik. Namun, proses rekonfigurasi jaringan SR masih dilakukan secara manual sehingga disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode rekonfigurasi *artificial intelligence* (AI) seperti *binary particle swarm optimization* (BPSO) agar dapat menentukan bentuk konfigurasi jaringan SR paling efisien dengan hasil rugi daya seminimal mungkin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bapak Dudy Setiawan selaku supervisor teknik PT PLN ULP Magelang Kota yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil data penelitian. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan saran pada pengerjaan penelitian yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Syufrijal dan Monantun, "Jaringan Distribusi Tenaga Listrik," *Kementrian Pendidik. Dasar Menengah Dan Kebud. RI*, vol. 1, p. 203, 2014.
- [2] Pasra dan Ruswandi, "Pelaksanaan Manajemen Pemeliharaan Gardu Distribusi," *J. SUTET*, vol. 6, no. 2, pp. 1–70, 2016.
- [3] Suhadi dan Wrahatnolo, "Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1," *Direktorat Pembim. SMK*, pp. 1–130, 2008.
- [4] Harahap dkk., "Analisa Penambahan Trafo Sisi Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo Bl 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etap 12.6.0," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2019.
- [5] Medina dkk., "Analisis Jatuh Tegangan Jaringan Distribusi 20 kV pada Penyulang CPK PT . PLN (Persero) UP3 Bandung," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, p. 10, 2021.
- [6] Kartika dkk., "Analisis Beban Takseimbang Terhadap Rugi-Rugi Daya Dan Efisiensi Transformator K10005 Jaringan Distribusi Sekunder Pada Penyulang Klungkung," *J. SPEKTRUM*, vol. 5, no. 2, p. 310, 2018.
- [7] N. Zainun, "Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi," *Ppsdm Migas*, vol. 10, no. 02, pp. 435–442, 2021, [Online]. Available: <https://ppsdmmigas.esdm.go.id/id/Profile/sejarah#>
- [8] J. Ju *et al.*, "Pembuatan dan Penyemprotan Cairan Desinfektan untuk Mencegah Penyebaran Covid-19," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 43, no. 1, p. 7728, 2020.
- [9] Abdullah dan Badaruddin, "Analisa Perbaikan Penampang Penghantar Guna Mengurangi Drop Tegangan dan Simulasi Etap 16.0 Pada JTR GD KRDB di Wilayah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Serang Kota," *J. Teknol. Elektro*, vol. 11, no. 1, p. 24, 2020.
- [10] Cahyadi dkk., "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Transmisi 150 kV Menggunakan Software Etap 12.6," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 126–130, 2022.
- [11] Hasibuan dkk., "Analisa Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Fast Decoupled Menggunakan Software Etap," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 37–45, 2020.
- [12] Safitri dan Ananta, "Simulasi Penempatan Transformator Pada Jaringan Distribusi Berdasarkan Jatuh Tegangan Menggunakan Etap Power Station 12.6.0," *J. Edukasi Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 12–24, 2020.
- [13] Septiani dkk., "Analisis Drop Tegangan Pada Jaringan Tegangan Rendah PT . PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Panakkukang," *Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. September, pp. 129–135, 2021.
- [14] SPLN 56-1, *Sambungan Tenaga Listrik Tegangan Rendah (SLTR)*. 1993.
- [15] M. T. . A. C. S. . D. I. M. D. M. . Ir. Hery Purnomo, "Perancangan Kelistrikan Pada Kondotel Borobudur Blimbing Kota Malang," *J. Mhs. Tek. Elektro Univ. Brawijaya*, vol. 2, no. 7, p. 120722, 2014, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/120722/>

Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis *Internet of Things*

Hendi Budianto¹, Budi Sumanto^{1*}

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

*Korespondensi: budi.sumanto@ugm.ac.id

Abstract – *Indoor air quality is often neglected. People spend most of their time indoors. Maintaining indoor air quality is very important because it can impact the comfort of the environment and the health of the occupants. Humans cannot detect air conditions that can endanger health. This is because most of these gaseous pollutants are difficult for the human sense of smell to perceive. Therefore, a system is needed to monitor the air quality in that room. Currently, indoor air quality monitoring systems are carried out manually by environmental health officers who use measuring devices and take measurements directly on-site. This study aims to design an indoor air quality monitoring system to inform directly and can be used remotely. The system can provide a database management system as a data collector, early warning of poor air quality, and an information provider interface display using the web. The method used in this study is a research and development method that includes the stages of system design, tool manufacture and integration, web-based application design, and system testing. This device comprises sensors, NodeMCU ESP8266, Arduino Uno, and an LCD screen. The results showed that the monitoring system with the website successfully detected several parameters of gas levels (CO₂ and CO), dust particles, temperature, and air humidity. The sensor data can be displayed in real time and stored in a database. Testing using a sample variation of the number of people resulted in the system's performance when the gas concentration was within the sensor's detection range.*

Keywords – *air quality, internet of things, NodeMCU ESP8266, website*

Intisari – Kualitas udara dalam ruangan sering kali diabaikan, padahal manusia menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan. Kualitas udara dalam ruangan sangat penting untuk dijaga karena dapat berdampak pada kenyamanan lingkungan dan kesehatan penghuninya. Manusia yang berada di tempat tersebut tidak dapat mendeteksi kondisi udara yang dapat membahayakan kesehatan. Hal ini disebabkan karena kebanyakan dari polutan gas tersebut sulit dirasakan oleh indra penciuman manusia. Oleh karena itu, diperlukan sistem untuk melakukan pemantauan kualitas udara pada kondisi ruangan tersebut. Saat ini, sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan umumnya masih manual dilakukan oleh petugas kesehatan lingkungan yang menggunakan alat ukur dan melakukan pengukuran secara langsung di lokasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem *monitoring* kualitas udara dalam ruangan untuk menginformasikan secara langsung dan dapat digunakan dari jarak jauh. Sistem dapat menyediakan *database management system* sebagai pengumpul data, peringatan dini buruknya kualitas udara, dan tampilan antarmuka penyedia informasi menggunakan web. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian dan pengembangan yang meliputi tahap desain sistem, pembuatan dan integrasi alat, perancangan aplikasi berbasis web, serta pengujian sistem. Perangkat ini terdiri dari rangkaian sensor, NodeMCU ESP8266, Arduino Uno, dan layar LCD. Hasil penelitian menunjukkan sistem monitoring dengan *website* berhasil mendeteksi beberapa parameter kadar gas (CO₂ dan CO), partikel debu, suhu, dan kelembaban udara. Data kualitas udara yang diperoleh dari sensor dapat ditampilkan secara *real-time* dan tersimpan di *database*. Pengujian dengan menggunakan variasi sampel jumlah orang menghasilkan kinerja dari sistem saat konsentrasi gas berada dalam rentang kemampuan deteksi sensor.

Kata kunci – *kualitas udara, internet of things, NODEMCU ESP8266, website*

I. PENDAHULUAN

Udara merupakan suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi (atmosfer), yang komposisinya tidak selalu konstan. Udara merupakan komponen lingkungan yang penting dalam kehidupan, sehingga perlu dipelihara dan ditingkatkan kualitasnya [1].

Umumnya, dampak kesehatan yang paling sering terjadi akibat pencemaran udara adalah Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA), termasuk asma, bronkitis, dan gangguan pernapasan lainnya. Jika kualitas udara dalam ruangan buruk, maka gangguan kesehatan dan kenyamanan lingkungan akan mempengaruhi kinerja dari setiap individu yang berada di dalam ruangan tersebut. Oleh karena itu, menjaga kualitas udara dalam ruangan harus menjadi perhatian agar dapat menciptakan lingkungan yang sehat dan nyaman untuk ditinggali [2].

Kualitas udara yang memenuhi standar kesehatan sangat penting bagi kesehatan fisik makhluk hidup dan merupakan faktor penting dalam menciptakan lingkungan yang sehat. Udara yang dihirup mengandung oksigen yang sangat penting bagi kelangsungan hidup, namun juga terdapat zat lain seperti karbon monoksida, karbon dioksida, formaldehid, jamur, virus, bakteri, debu, dan lain sebagainya. Terkadang oksigen di dalam maupun luar ruangan dapat terkontaminasi oleh zat-zat berbahaya, yang dalam batasan tertentu masih dapat dinetralisasi namun jika melebihi batas normal, zat-zat tersebut dapat menyebabkan masalah kesehatan. World Health Organization (WHO) menyatakan bahwa beberapa zat berbahaya yang berasal dari bangunan, material konstruksi, peralatan, proses pembakaran atau pemanasan dapat memicu masalah kesehatan.

Upaya penanggulangan kualitas udara yang buruk di dalam ruangan salah satu aspek yang perlu dilakukan secara

berkelanjutan oleh semua pihak karena dampaknya dapat mengganggu kesehatan. Oleh karena itu, dibutuhkan pedoman pengaturan penyehatan udara dalam ruang rumah sebagai acuan bagi pemilik rumah, penghuni, pengembang perumahan, dan pemerintah dalam upaya penyehatan kualitas udara dalam ruang rumah. Pedoman tersebut mencakup persyaratan kualitas udara, dampak, faktor risiko, upaya penyehatan udara, serta tata laksana pengawasan kualitas udara dalam ruangan. Pemantauan kualitas udara di dalam rumah sering dilakukan oleh petugas kesehatan lingkungan di Puskesmas dan dinas kesehatan tingkat kabupaten atau kota [3].

Saat ini, pengukuran kualitas udara di dalam ruangan dilakukan oleh petugas kesehatan dengan membawa alat ukur dan melakukan pengukuran langsung di lokasi. Salah satu cara untuk mengatasi dampak buruk pencemaran udara pada kesehatan yaitu dengan menerapkan sistem peringatan dini atau pemantauan terhadap kualitas udara [4]. Oleh karena itu, dibutuhkan pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis *internet of things* (IoT) agar data terkini dapat tersedia bagi petugas kesehatan atau pengguna. Dengan sistem ini, petugas kesehatan lingkungan hanya perlu datang sekali ke lokasi untuk memasang alat dan dapat memonitor hasil pengukuran dari jarak jauh dan *real-time* melalui situs web yang tersedia. Beberapa penelitian sebelumnya, telah dirancang sebuah sistem pemantauan tingkat kualitas udara, yang meliputi CO₂, debu, asap, CO, dan H₂. Sensor MQ-135 digunakan untuk mendeteksi kualitas udara, sensor MG-811 untuk mendeteksi karbon dioksida (CO₂), sensor debu untuk mendeteksi partikel PM 2.5, sensor MQ-2 untuk mendeteksi asap, sensor MQ-9 untuk mendeteksi karbon monoksida (CO), dan sensor MQ-8 untuk mendeteksi hidrogen (H₂). Mikrokontroler yang digunakan ialah ESP32 sebagai pengendali utamanya. Data dari sensor dikirim secara *real-time* ke *smartphone* Android melalui modul Bluetooth ESP32, dan ditampilkan dalam sebuah aplikasi monitoring [5].

Rm. Fa'iq dalam penelitiannya membahas mengenai kualitas udara di dalam ruangan dapat ditentukan berdasarkan beberapa parameter, antara lain suhu, kelembapan, konsentrasi polutan udara seperti karbon monoksida, karbon dioksida, dan lain-lain, serta partikel debu atau *particulate matter* (PM) yang ada di udara. Untuk memantau dan mengevaluasi kualitas udara di dalam ruangan, diperlukan sistem pemantau *indoor air quality* (IAQ). Sistem ini membantu dalam mendeteksi dan mengevaluasi kondisi udara di dalam ruangan sehingga dapat menentukan tingkat kualitas udara yang ada. Agar data lebih mudah dianalisis dan diakses, ESP32 *node* sensor yang terdiri dari beberapa sensor akan mengirimkan data melalui protokol MQTT. Data tersebut akan dikirim ke *virtual private server* (VPS) dan disimpan dalam sebuah basis data. Untuk memvisualisasikan data dengan lebih baik, digunakan sebuah *tool* bernama *metabase* yang terhubung dengan basis data [6].

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Grace C. Rumampuk dkk., penanggulangan pencemaran udara dapat dilakukan dengan mengukur kualitas udara dan

mengategorikannya. Namun, memonitor kualitas udara secara manual dalam ruangan tidaklah efektif. Oleh karena itu, melalui penelitian ini telah dirancang sebuah sistem pemantauan kualitas udara dalam ruangan yang dapat memberikan informasi secara *real-time* dengan menggunakan sensor MQ135 untuk mendeteksi kualitas udara, MG811 untuk mendeteksi CO₂, sensor debu untuk mendeteksi partikel PM2.5, sensor MQ2 untuk mendeteksi asap, sensor MQ9 untuk mendeteksi CO, sensor MQ8 untuk mendeteksi H₂, serta menggunakan mikrokontroler ESP32. Sistem yang dibuat akan mendeteksi polusi dan hasil bacaan sensor secara *real-time* akan dikirim melalui modul Wi-Fi ke *platform IoT online value of real time data* (OvoRD) dan ditampilkan dalam bentuk web [7].

Menurut Faiazuddin kualitas udara yang buruk menjadi perhatian utama di daerah perkotaan. Lebih dari 85% orang terpapar dengan risiko tinggi dari suatu masalah tertentu. Menurut WHO orang semakin sadar untuk memantau kondisi kualitas udara, mengawasi kesehatan mereka dengan berfokus pada lingkungan di mana mereka menghabiskan sebagian besar waktu, seperti di rumah, sekolah, dan dalam mobil. Komunikasi antara sensor dan Raspberry Pi4 menggunakan protokol komunikasi *port serial* dan program diimplementasikan dalam pemrograman Python. Sebagian besar parameter lingkungan yang akan dipantau meliputi volume CO, CO₂, suhu, kelembaban, kebocoran gas, asap, sensor suhu, dan lainnya. Informasi parameter ini dapat diterima oleh Raspberry Pi4 dan Arduino Uno, kemudian diolah dan ditransmisikan ke *cloud* secara terus-menerus. Informasi akan terus dipantau dan disimpan dalam *database cloud* [8].

Pada beberapa penelitian terkait, aplikasi informasi hanya menampilkan nilai satuan dari zat-zat yang dipantau [9][10], berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya, penelitian tersebut tidak memberikan sistem alarm peringatan penurunan kualitas udara di mana hal ini dapat menjadi informasi yang bermanfaat untuk pengguna dalam menjaga lingkungan agar tetap sehat. Selain itu, pada sistem ini tersedia fitur untuk mencetak data dalam berbagai format, seperti CSV, PDF, *spreadsheet* (.xlsx), atau menyalin data secara langsung. Fitur ini membuatnya lebih praktis dan terdapat berbagai macam jenis format *file* menyesuaikan kebutuhan dalam memperoleh data.

Pada penelitian ini dirancang sebuah prototipe yang dipasang dalam ruangan untuk monitoring kualitas udara berbasis IoT. Alat ini dapat mengukur beberapa parameter kualitas udara yang meliputi suhu, kelembaban, karbon monoksida, karbon dioksida, dan partikel debu. Data dari setiap sensor diolah oleh Arduino Uno, kemudian data tersebut dikirimkan ke NodeMCU ESP8266 melalui komunikasi serial. Selanjutnya informasi pemantauan akan dikirimkan ke sebuah *website* melalui jaringan internet mengambil data yang terkumpul pada server *database*. Data-data sensor juga ditampilkan pada LCD agar dapat dilihat secara langsung hasil pembacaan kualitas udara di lokasi. Data dapat diunduh dengan ekspor dokumen dari *database* ke

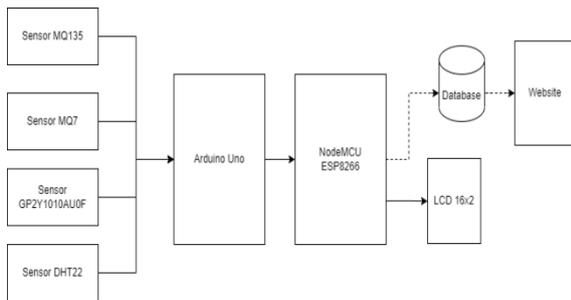
dalam format *file excel*, *CSV*, *PDF*, atau data *copy*. Sistem ini dilengkapi notifikasi peringatan pada website sebagai indikator pencemaran udara, digunakan dalam upaya memberikan pesan kepada pengguna bahwa kualitas udara di sekitar berbahaya.

II. METODOLOGI

Dalam tahap perancangan sistem, terdapat dua aspek yang perlu diperhatikan yaitu perancangan *hardware* dan *software*. Perancangan *hardware* berkaitan dengan kebutuhan elektronis dan mekanis yang diperlukan, sementara perancangan *software* berkaitan dengan pemrograman yang digunakan dalam pembuatan sistem dan *website*.

A. Perancangan Sistem

Gambar 1 menunjukkan proses sistem mulai dari *input* hingga *output*. Pada diagram ini menunjukkan garis solid dan garis putus-putus. Garis solid menunjukkan terhubung langsung melalui kabel pada *hardware*. Garis putus-putus menggambarkan hubungan sistem dengan nirkabel atau *wireless*. Sistem *monitoring* kualitas udara ini terdiri dari sistem pengukuran, sistem *database*, dan sistem antarmuka data seperti yang terlihat pada blok diagram sistem. Sistem pengukuran terdiri dari beberapa sensor yaitu sensor gas MQ-135, sensor MQ-7, sensor debu GP2Y1010AU0F, sensor suhu dan kelembaban DHT-22. Bagian sistem pengukuran yang terdiri beberapa sensor tersebut kemudian dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno. Mikrokontroler ini berfungsi sebagai penerima data, pengelola sistem, dan pemroses data analog ke digital dengan menggunakan program ADC hingga mengubahnya menjadi nilai ppm lalu diintegrasikan melalui komunikasi serial ke NodeMCU ESP8266 melalui pin Tx untuk selanjutnya terhubung dengan internet.

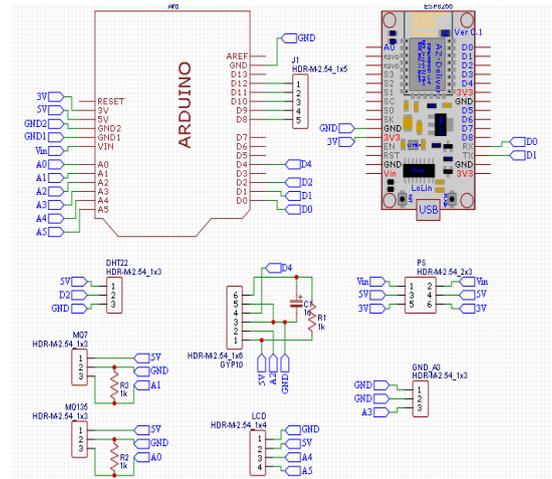


Gambar 1. Blok diagram sistem

Hasil pembacaan oleh NodeMCU ESP8266 kemudian dikirimkan ke sistem *database* MySQL pada komputer server melalui koneksi Wi-Fi yang tersedia dalam *device*. Sistem *database* yang telah dibuat digunakan dalam menerima data hasil pengukuran, dengan tabel yang tersusun pada MySQL di komputer server. Data yang tersimpan nantinya dapat diakses oleh pengguna melalui situs jaringan, sehingga informasi pada sistem *database* dapat diakses oleh pengguna melalui antarmuka *website*.

B. Perancangan Hardware

1) *Perancangan Elektronis*: Suplai dari sistem menggunakan adaptor dengan keluaran tegangan 5 VDC dan arus *output* sebesar 2 A. Perancangan *hardware* ini menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dan NodeMCU ESP8266 untuk mendapatkan data dari sensor gas MQ-135, sensor MQ-7, sensor GP2Y1010AU0F, sensor suhu dan kelembaban DHT-22. Pada pin Rx dan Tx pada ESP8266 dihubungkan dengan pin Rx dan Tx pada Arduino Uno sebagai jalur akses melalui komunikasi serial di antara keduanya. Masing-masing pin sensor dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno.



Gambar 2. Rancangan skematik PCB

2) *Perancangan Mekanik*: Tujuan dari perancangan ini adalah untuk membuat *casing* sebagai wadah meletakkan seluruh komponen yang telah dipasang pada PCB, perancangan mekanik digunakan bahan akrilik sebagai bahan penyusunnya. Selain itu dengan rancangan mekanik dapat mempermudah pengecekan alat ketika melakukan *troubleshooting* serta mudah untuk digunakan. Hasil rancangan alat dapat ditunjukkan pada Gambar 3.

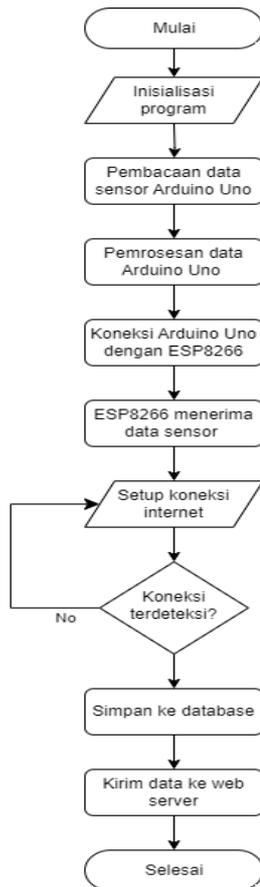


Gambar 3. Hasil perancangan alat

C. Perancangan Software

Sistem ini memerlukan perancangan *software* untuk mengontrol *hardware* yang telah dirancang dan membentuk sistem sesuai dengan kebutuhan, serta untuk membangun *website*. Program bertujuan untuk memberikan perintah dan

melakukan pembacaan data dari dan ke perangkat keras untuk menjalankan sistem. Perancangan perangkat lunak terdiri dari tiga bagian, yaitu perancangan program mikrokontroler menggunakan *software* Arduino IDE, perancangan *database* menggunakan *software* XAMPP untuk mengelola *database* [11], dan perancangan web menggunakan *text editor* Visual Studio Code untuk pembuatan program HTML, CSS, JavaScript, PHP dengan *framework bootstrap*. Cara kerja sistem secara garis besar ditunjukkan melalui *flowchart* pada Gambar 4.



Gambar 4. *Flowchart* cara kerja sistem

D. Pengembangan IoT

Pengembangan IoT meliputi pembuatan website beserta integrasi *database* menggunakan bahasa pemrograman HTML, PHP, *query* dengan *software* XAMPP MySQL. *Database* yang digunakan pada proyek ini adalah *database* MySQL yang berada pada *software* *phpmyadmin* komputer server. Perancangan *database* pertama dengan pembuatan *database* baru pada MySQL terdapat tabel yang terdiri dari kolom yang mana merupakan bagian tetap dan baris merupakan bagian sementara seiring dengan bertambahnya data yang masuk pada tabel. Melalui internet melakukan pengambilan data dari *database* di dalam komputer server dengan menggunakan *query* pada *script* PHP.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Database

Pengujian *database* sistem bertujuan untuk mengetahui performa media penyimpanan dan pengiriman data oleh mikrokontroler. Pengujian meliputi pengecekan waktu respons *database* dalam menerima dan menyimpan data yang dikirim. Hasil pengujian *database* ditampilkan pada Gambar 5.

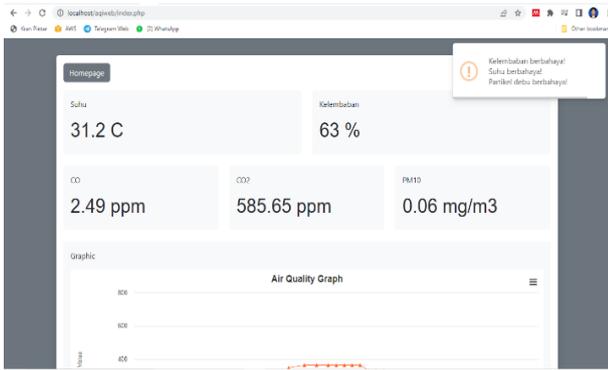
| | id | suhu | kelembaban | mq2 | mq135 | pm10 | tanggal | waktu |
|------------------|----|------|------------|------|---------|------|------------|----------|
| Ubah Salin Hapus | 1 | 29.9 | 67.6 | 2.55 | 1768.68 | 0.15 | 2023-07-15 | 10:38:29 |
| Ubah Salin Hapus | 2 | 29.9 | 67.6 | 2.57 | 1916.92 | 0.15 | 2023-07-15 | 10:38:45 |
| Ubah Salin Hapus | 3 | 29.9 | 67.6 | 2.55 | 1879 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:39:04 |
| Ubah Salin Hapus | 4 | 30 | 67.3 | 2.57 | 1841.66 | 0.13 | 2023-07-15 | 10:39:20 |
| Ubah Salin Hapus | 5 | 29.9 | 67.2 | 2.6 | 1804.89 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:39:37 |
| Ubah Salin Hapus | 6 | 29.9 | 67.3 | 2.57 | 1879 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:39:55 |
| Ubah Salin Hapus | 7 | 29.9 | 67.4 | 2.57 | 1768.68 | 0.13 | 2023-07-15 | 10:40:12 |
| Ubah Salin Hapus | 8 | 29.9 | 67.6 | 2.57 | 1879 | 0.15 | 2023-07-15 | 10:40:29 |
| Ubah Salin Hapus | 9 | 29.9 | 67.6 | 2.54 | 1804.89 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:40:47 |
| Ubah Salin Hapus | 10 | 29.9 | 67.5 | 2.55 | 1955.42 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:41:04 |
| Ubah Salin Hapus | 11 | 29.9 | 67.6 | 2.57 | 1916.92 | 0.13 | 2023-07-15 | 10:41:21 |
| Ubah Salin Hapus | 12 | 29.9 | 67.7 | 2.55 | 1955.42 | 0.15 | 2023-07-15 | 10:41:38 |
| Ubah Salin Hapus | 13 | 29.9 | 67.6 | 2.54 | 1879 | 0.15 | 2023-07-15 | 10:41:55 |
| Ubah Salin Hapus | 14 | 29.9 | 67.7 | 2.54 | 1916.92 | 0.13 | 2023-07-15 | 10:42:12 |
| Ubah Salin Hapus | 15 | 29.9 | 67.3 | 2.54 | 1994.5 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:42:29 |
| Ubah Salin Hapus | 16 | 29.9 | 67.6 | 2.52 | 1841.66 | 0.14 | 2023-07-15 | 10:42:47 |
| Ubah Salin Hapus | 17 | 29.9 | 67.5 | 2.54 | 1841.66 | 0.13 | 2023-07-15 | 10:43:04 |

Gambar 5. Pengujian database

Dari pengujian ini, diperoleh bahwa server *database* MySQL berhasil menyimpan data yang dikirim oleh mikrokontroler dengan ditunjukkan data yang masuk pada MySQL sesuai yang terlihat pada Gambar 7 dan data ini yang kemudian akan ditampilkan secara *real-time* pada web. Data kualitas udara dari alat dikirimkan ke *database* MySQL dengan menggunakan jaringan Wi-Fi. Proses pengiriman data dari alat ke *database* dilakukan setiap 17 detik. Hasil pengujian *database* dan pengujian web dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.

| | id | suhu | kelembaban | mq2 | mq135 | pm10 | tanggal | waktu |
|------------------|-----|------|------------|------|--------|------|------------|----------|
| Ubah Salin Hapus | 262 | 31.2 | 63.5 | 2.23 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:28:54 |
| Ubah Salin Hapus | 263 | 31.2 | 62.8 | 2.24 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:29:10 |
| Ubah Salin Hapus | 264 | 31.2 | 63.6 | 2.25 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:29:26 |
| Ubah Salin Hapus | 265 | 31.2 | 63.1 | 2.24 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:29:42 |
| Ubah Salin Hapus | 266 | 31.1 | 63.3 | 2.21 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:29:58 |
| Ubah Salin Hapus | 267 | 31.2 | 63.3 | 2.23 | 494.42 | 0.05 | 2023-07-19 | 14:30:14 |
| Ubah Salin Hapus | 268 | 31.2 | 63.3 | 2.23 | 505.19 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:30:30 |
| Ubah Salin Hapus | 269 | 31.2 | 63.1 | 2.2 | 516.14 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:30:47 |
| Ubah Salin Hapus | 270 | 31.2 | 62.6 | 2.17 | 505.19 | 0.05 | 2023-07-19 | 14:31:03 |
| Ubah Salin Hapus | 271 | 31.2 | 62.9 | 2.21 | 516.14 | 0.04 | 2023-07-19 | 14:31:19 |
| Ubah Salin Hapus | 272 | 31.2 | 62.9 | 2.28 | 527.27 | 0.07 | 2023-07-19 | 14:31:35 |
| Ubah Salin Hapus | 273 | 31.2 | 63.1 | 2.34 | 527.27 | 0.08 | 2023-07-19 | 14:31:52 |
| Ubah Salin Hapus | 274 | 31.1 | 62.8 | 2.34 | 494.42 | 0.05 | 2023-07-19 | 14:32:08 |
| Ubah Salin Hapus | 275 | 31.2 | 63.4 | 2.49 | 585.65 | 0.06 | 2023-07-19 | 14:32:24 |
| Ubah Salin Hapus | 276 | 31.2 | 63.3 | 2.64 | 610.33 | 0.07 | 2023-07-19 | 14:32:40 |
| Ubah Salin Hapus | 277 | 31.2 | 63.6 | 2.67 | 561.74 | 0.07 | 2023-07-19 | 14:32:56 |

Gambar 6. Hasil pengujian database



Gambar 7. Hasil pengujian pengiriman data database dengan website

Gambar 6 merupakan tabel hasil data pengujian database yang meliputi data suhu, kelembaban, dan waktu. Sedangkan, Gambar 7 terlihat beberapa fitur pada sistem telah ditambahkan dari rancangan awal website. Beberapa fitur tersebut mencakup alarm notifikasi untuk memberikan peringatan terhadap indikasi pencemaran udara.

B. Pengujian Komunikasi Website dengan Sistem

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui keberhasilan pengiriman data dari sistem dengan web. Skema pengiriman data dari alat dengan web dapat ditunjukkan pada Gambar 8.



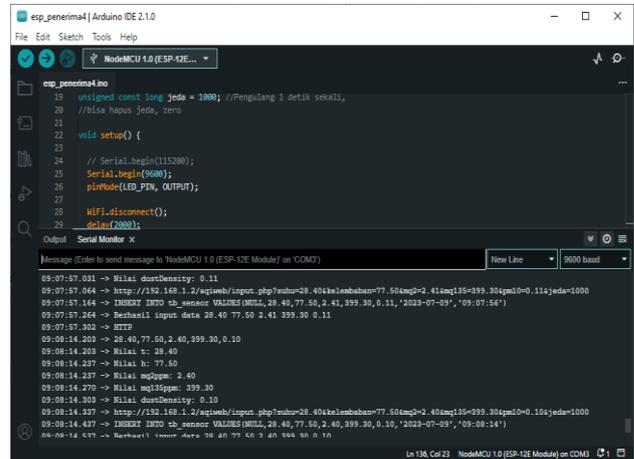
Gambar 8. Alur pengiriman data dari alat dengan web

Pada Gambar 8 menunjukkan alur pengujian komunikasi data bertujuan untuk memastikan bahwa data yang dihasilkan oleh sensor dapat terkirim tanpa kehilangan data oleh mikrokontroler dengan program yang telah di-upload dan disimpan secara lengkap dalam database MySQL. Komunikasi data dilakukan melalui koneksi internet menggunakan Wi-Fi yang disediakan oleh modul NodeMCU ESP8266. Untuk pengujian, dilakukan pengujian koneksi antara NodeMCU ESP8266 dengan pengiriman paket data melalui terminal serial monitor dan penerimaan data secara real-time oleh website. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan provider jaringan internet Indihome.

Hasil pembacaan data-data sensor yang terdapat pada website sesuai pada database, pada Gambar 9 menunjukkan berhasil ditampilkan sesuai dengan pada layar LCD alat. Waktu pengiriman data dari layar LCD dengan web berkisar antara 17 detik. Pengujian pengiriman data sensor dari alat via terminal serial monitor dapat dilihat pada gambar 9 berikut ini.

Pada Gambar 9, data monitoring dari alat dikirimkan ke website melalui url HTTP dengan menggunakan jaringan Wi-Fi. NodeMCU ESP8266 sebagai perangkat untuk terhubung dengan internet sehingga dapat mengirimkan data. NodeMCU ESP8266 akan melakukan pencarian jaringan Wi-Fi yang akan digunakan untuk proses pengiriman data. Untuk

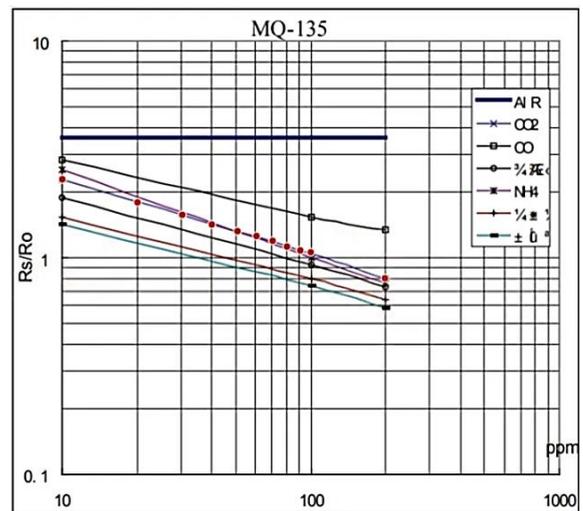
melakukan hal ini, SSID (nama jaringan) dan password jaringan Wi-Fi yang digunakan harus sesuai dengan yang telah ditentukan dalam syntax pada Arduino IDE. Selanjutnya, data sensor akan disimpan dalam database MySQL. Berikutnya data akan dikirimkan ke web dan data diperbarui setiap 17 detik.



Gambar 9. Hasil pengiriman data via serial monitor

C. Kalibrasi Sensor

Sebelum dilakukan pengukuran kualitas udara, perlu dilakukan uji kalibrasi dengan variasi konsentrasi gas dalam satuan ppm. Nilai pembacaan sistem akan dibandingkan dengan nilai yang tercatat dalam datasheet dari sensor. Tujuan dari kalibrasi ini adalah untuk memastikan hasil pengukuran sesuai dengan standar yang diinginkan yakni mengubah satuan pembacaan nilai analog menjadi part per milion (ppm).



Gambar 10. Grafik karakteristik sensitivitas gas sensor MQ135 [12]

Grafik sensitivitas pada Gambar 10 digunakan dalam menentukan titik perpotongan x dan y, menunjukkan hubungan antara ppm dengan Rs/Ro. Berdasarkan grafik tersebut nantinya digunakan dalam program Arduino untuk kalibrasi. Titik-titik perpotongan hubungan antara x dan y ini

diletakkan pada garis sesuai konsentrasi gas yang akan diidentifikasi. Grafik menggunakan skala log-log dengan skala linier. Konsentrasi data gas terdapat dalam rentang antara 10 ppm hingga 200 ppm.

Sensor gas MQ135 ini berfungsi untuk mengidentifikasi keberadaan gasCO₂, yang ditandai dengan garis berwarna biru beserta titik pada *datasheet*. Konsentrasi perilaku gas relatif terhadap hambatan eksponensial dan korelasi antara perbandingan resistansi dan konsentrasi gas menunjukkan pola linier. Langkah pertama dalam kalibrasi sensor yaitu melakukan penentuan nilai Ro di udara bersih melalui (1).

$$Ro = \frac{Rs}{\text{nilai maksimal sensitivitas udara di ruang hampa}} \quad (1)$$

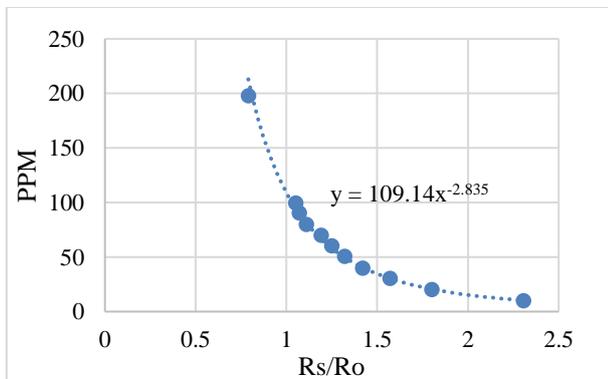
Untuk menghitung nilai Ro diperlukan nilai Rs pada kondisi ruang dalam keadaan kosong atau udara bersih. Hal ini dapat dilakukan dengan mengambil rata-rata pembacaan analog (nilai ADC) dari sensor dan mengonversinya menjadi tegangan. Selanjutnya, rumus Rs dapat digunakan untuk mencari nilai Ro. Dapat diketahui ketika sensor bekerja pada udara bebas nilai Rs/Ro adalah 3.6 ppm.

Ro adalah resistansi sensor pada konsentrasi yang diketahui tanpa adanya gas lain atau dalam kondisi ruang hampa. Sedangkan Rs adalah resistansi sensor yang berubah tergantung pada konsentrasi gas. Nilai Rs ini yaitu perhitungan dari resistansi referensi di mana nilai didapatkan dari (2) dan (3).

$$VRL = \text{analogValue} \times \left(\frac{5}{1023}\right) \quad (2)$$

$$Rs = \left(\frac{Vc \times RL}{VRL}\right) - RL \quad (3)$$

Nilai Ro yang telah diperoleh akan dimasukkan ke dalam program dengan memilih nilai Ro yang sering muncul atau konstan dan memiliki nilai tertinggi. Data nilai perpotongan tersebut dimasukkan ke dalam tabel menggunakan bantuan tools Ms Excel untuk mendapatkan persamaan nilai ppm, data terlihat pada Gambar 11 dalam bentuk plot grafik hubungan Rs/Ro dengan PPM.



Gambar 11. Grafik hubungan Rs/Ro dengan PPM

Selanjutnya adalah menentukan nilai ppm. Melalui data-data yang diperoleh dari titik perpotongan antara x dan y pada

grafik karakteristik sensor pada Gambar 10, selanjutnya digunakan untuk mencari nilai ppm. Tabel 1 menunjukkan data titik perpotongan antara x dan y grafik karakteristik sensor.

Tabel 1 Hasil pengukuran titik x dan y

| x | y |
|--------|-------|
| 10 | 2,306 |
| 20,04 | 1,8 |
| 30,32 | 1,57 |
| 39,84 | 1,42 |
| 50,53 | 1,32 |
| 60,27 | 1,25 |
| 70 | 1,19 |
| 79,88 | 1,11 |
| 90,36 | 1,07 |
| 99,56 | 1,05 |
| 197,86 | 0,79 |

Sebagai contoh, misal ada 20 ppm akan digunakan untuk menghitung besar nilai Rs/Ro, maka perhitungannya ialah sebagai berikut.

$$y = 109,14x^{-2.83}$$

$$20 = 109,14x^{-2.83}$$

$$x^{-2.83} = \frac{20}{109,14}$$

$$x^{-2.83} = 0,18$$

$$x = \sqrt[-2.83]{0,18}$$

$$x = 1,83$$

Setelah nilai x diperoleh maka didapatkan nilai Rs/Ro sehingga dapat digunakan untuk mencari Ro. Ganti Rs sesuai dengan persamaan.

$$\frac{Rs}{Ro} = 1,83$$

$$Rs = 1,83 \times Ro$$

$$\frac{Rs}{1,83} = Ro$$

$$Ro = \frac{Rs}{1,83}$$

Untuk mencari Ro menurut *datasheet* nilai referensi (Rs) pada sensor MQ-135 terletak pada 30KΩ - 200KΩ, digunakan nilai 30KΩ sehingga nilai Ro yaitu.

$$Ro = \frac{Rs}{1,83}$$

$$Ro = \frac{30000}{1,83} = 16,393\Omega$$

Sehingga untuk menghasilkan nilai ppm digunakan persamaan pada program seperti berikut.

$$ppm = 109,14 * pow(Rs / Ro, -2,83);$$

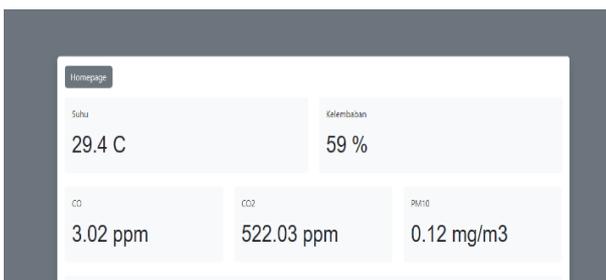
D. Pengujian Website

Pada pengujian *website*, fokusnya adalah menguji kinerja tampilan *website* yang langsung dilihat oleh pengguna saat mengakses *website* monitoring kualitas udara. Pengujian ini terdiri dari dua bagian, meliputi halaman *dashboard* dan halaman *monitoring*. Pengujian dilakukan dengan uji coba fungsi dari setiap menu yang ada pada *dashboard website* dan pengujian data yang ditampilkan pada halaman monitoring web yang tersimpan pada *database*. Pengujian dashboard ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Pengujian tampilan web *dashboard*

Selanjutnya, halaman monitoring pada Gambar 13 menunjukkan data-data kualitas udara yang diperoleh dari pembacaan sensor secara *real-time* dan juga dapat melihat data sebelumnya. Pengguna hanya dapat melakukan monitoring terhadap kualitas udara, dan tidak dapat melakukan perubahan data pada halaman ini. Pada halaman ini, terdapat beberapa fitur utama yang disajikan, termasuk tampilan monitoring beberapa macam parameter seperti nilai suhu, kelembaban, konsentrasi gas CO dan CO₂, partikel debu, dan juga notifikasi peringatan jika terdeteksi indikasi pencemaran udara.



Gambar 13. Pengujian tampilan halaman *monitoring*

Tujuan pengujian ini adalah untuk melihat pembaruan pembacaan data dari sensor ke web server. Data sensor yang telah diolah oleh ESP8266 akan dikirimkan ke web server menggunakan protokol transmisi data HTTP untuk disimpan pada *database*. Pada *website*, data akan diperbarui setiap 17 detik pada setiap *field*. Fungsi yang diharapkan adalah bahwa server dapat menyimpan data sensor dan field dapat menampilkan data tersebut. Grafik yang ditampilkan pada *website* akan menunjukkan riwayat data dari sensor yang

diamati. Data yang ditampilkan pada *website* sama dengan data yang ditampilkan pada serial monitor di Arduino IDE.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil mengirimkan data dari sensor ke *website*. Data tersebut kemudian ditampilkan pada halaman web dalam bentuk angka, grafik, dan tabel. Setelah pengujian terhadap *front-end website*, dapat dipastikan bahwa rancangan *website* dapat berfungsi dengan baik. *Website* dapat diakses dari berbagai perangkat, mampu melakukan pemantauan jarak jauh, dan menampilkan data *monitoring* seperti Gambar 14.

| No | Suhu | Kelembaban | CO | CO2 | pm10 | Tanggal | Waktu |
|-----|------|------------|------|--------|------|------------|----------|
| 439 | 29.4 | 59.8 | 3.02 | 522.03 | 0.12 | 2023-07-20 | 15:48:48 |
| 438 | 29.3 | 59.1 | 3.02 | 510.42 | 0.03 | 2023-07-20 | 15:48:31 |
| 437 | 29.3 | 59.7 | 3.02 | 510.42 | 0.12 | 2023-07-20 | 15:48:15 |
| 436 | 29.4 | 59.3 | 3.02 | 522.03 | 0.05 | 2023-07-20 | 15:47:59 |
| 435 | 29.4 | 59.2 | 3 | 522.03 | 0.08 | 2023-07-20 | 15:47:43 |
| 434 | 29.3 | 59.2 | 3.02 | 510.42 | 0.09 | 2023-07-20 | 15:47:26 |
| 433 | 29.3 | 59.2 | 3.02 | 522.03 | 0.07 | 2023-07-20 | 15:47:10 |
| 432 | 29.4 | 59.7 | 3.02 | 522.03 | 0.12 | 2023-07-20 | 15:46:54 |
| 431 | 29.4 | 59.4 | 3.02 | 522.03 | 0.07 | 2023-07-20 | 15:46:37 |
| 430 | 29.4 | 59.4 | 3.02 | 522.03 | 0.06 | 2023-07-20 | 15:46:21 |

Gambar 14. Tampilan data *table web*

Selain itu, hasil pengukuran yang disimpan dalam *database* kemudian ditampilkan di *website* pengguna memiliki pilihan untuk mengekspor data dalam berbagai format, seperti CSV, PDF, *spreadsheet* (.xlsx), atau menyalin data langsung untuk pengolahan lebih lanjut. Fitur notifikasi juga telah ditambahkan pada halaman monitoring untuk memberikan peringatan terkait pencemaran udara. Jika nilai tiap parameter zat melebihi batas yang telah ditentukan maka notifikasi sebagai tanda peringatan aktif. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk mendeteksi apabila terjadi masalah kualitas udara di suatu lokasi.

E. Pengujian Sensor

Pada penelitian ini, tidak dimungkinkan untuk melakukan kalibrasi sensor karena tidak tersedia alat standar yang dapat digunakan. Kalibrasi dilakukan berdasarkan *datasheet*. Oleh karena itu, tahap pengujian sensor ini bertujuan untuk mengamati hasil pengukuran yang diperoleh dari tiap sensor ketika ditempatkan dalam kondisi lingkungan yang berbeda dari satu pengujian ke pengujian lainnya. Dengan melakukan pengujian ini, diharapkan sensor dapat memberikan respons yang berbeda terhadap kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga menunjukkan bahwa perancangan sensor telah berfungsi dengan baik.

1) *Pengujian Sensor DHT22*: Sensor yang digunakan dalam pengukuran ini adalah jenis sensor digital, sehingga tidak memerlukan penggunaan ADC atau komponen tambahan lainnya. Penggunaannya cukup dengan memanggil *library* yang telah disediakan dan hasil pengukuran dapat langsung ditampilkan. Akurasi pengukuran sensor terhadap kelembaban udara dapat ditemukan dalam *datasheet* sensor. Pada *datasheet* sensor DHT22, akurasi pengukuran

kelembaban adalah $\pm 5\%$ dengan rentang pengukuran antara 20% hingga 95%. Sedangkan untuk pengukuran temperatur suhu, sensor ini memberikan akurasi pengukuran sekitar 2°C dengan rentang pengukuran suhu 0°C hingga 50°C . Hasil pengujian sensor untuk pengukuran suhu dan kelembaban ditampilkan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil pengujian sensor DHT22

| Suhu ($^{\circ}\text{C}$) | Kelembaban (%) | Waktu |
|-----------------------------|----------------|-----------|
| 28 | 67 | 9.00-9.10 |
| 28 | 67 | 9.00-9.05 |
| 28 | 67 | 8.00-9.00 |
| 28 | 67 | 8.00-8.50 |
| 28 | 68 | 8.00-8.45 |
| 28 | 67 | 8.00-8.40 |
| 28 | 67 | 8.00-8.35 |
| 28 | 68 | 8.00-8.30 |

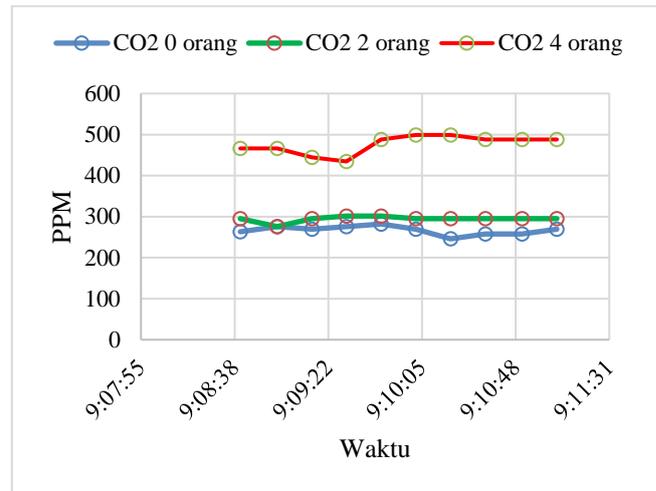
Berdasarkan hasil pengujian yang tercantum pada Tabel 2, sensor DHT-22 yang digunakan telah berfungsi dengan baik dalam pengukuran suhu dan kelembaban udara di sekitar lingkungan ruangan.

2) *Pengujian Sensor MQ*: Pengujian ini bertujuan untuk mengobservasi perubahan respons sensor jenis MQ yang digunakan, yaitu MQ-7 dan MQ-135, terhadap variasi lingkungan pengujian. Pengujian dilakukan dengan menciptakan kondisi yang dapat menghasilkan perbedaan konsentrasi gas CO dan CO_2 . Dalam pengujian ini, variasi dilakukan dengan mengubah jumlah partisipan sebagai sumber perubahan konsentrasi gas. Hal ini akan menjadi pemicu untuk mengamati perubahan respons sensor terhadap konsentrasi gas yang diamati sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15, Gambar 16 dan Gambar 17.

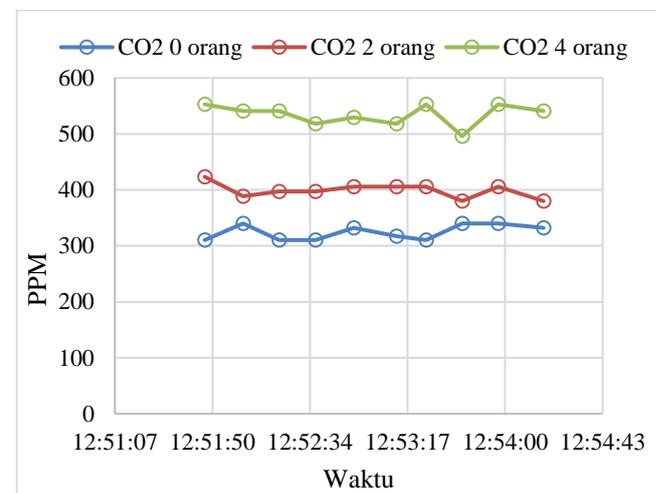
Gambar 15, Gambar 16, dan Gambar 17 menunjukkan hasil respons sensor terhadap tiga kondisi dalam pengambilan data yaitu tanpa ada orang, terdapat dua orang, dan empat orang pada waktu pagi, siang, serta malam hari. Dari plot grafik tersebut dapat diketahui bahwa sensor mampu merekam data yang melalui proses pengondisian berdasarkan jumlah orang. Proses pencatatan data membutuhkan waktu sekitar 15 detik – 17 detik. Terlihat bahwa konsentrasi CO_2 yang dihasilkan oleh sensor cenderung mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan jumlah orang.

Parameter meteorologi seperti kecepatan angin, fluktuasi suhu udara, tingkat curah hujan, dan kelembaban sekitar dapat mempengaruhi pembacaan konsentrasi CO_2 oleh sensor MQ135 yang digunakan dalam sistem pemantauan [13].

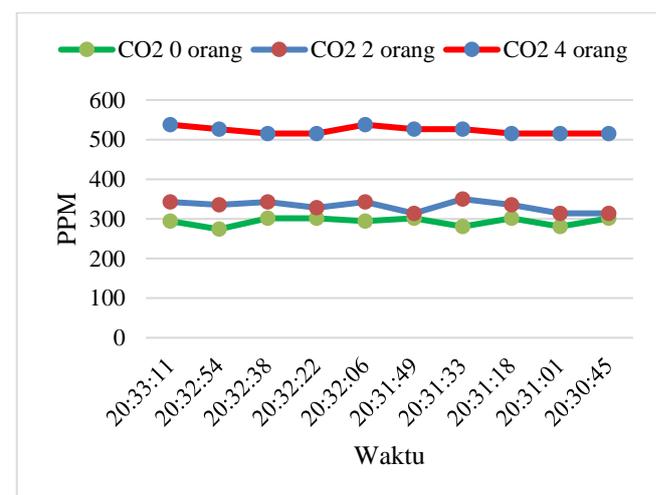
Konsentrasi gas yang diamati pada grafik yaitu konsentrasi CO_2 karena terlihat paling signifikan perbedaannya. Konsentrasi CO_2 di dalam ruangan dipengaruhi oleh jumlah manusia yang berada di dalamnya. Semakin banyak manusia di dalam ruangan, semakin tinggi konsentrasi CO_2 yang dihembuskan sehingga terjadi peningkatan konsentrasi CO_2 di udara dari aktivitas pernapasan [14].



Gambar 15. Grafik perbandingan konsentrasi CO₂ pagi



Gambar 16. Grafik perbandingan konsentrasi CO₂ siang



Gambar 17. Grafik perbandingan konsentrasi CO₂ malam

3) *Pengujian Sensor GP2Y1010AU0F*: Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi performa sensor debu yang digunakan. Pengujian melibatkan pengukuran kadar partikel debu dengan memasukkan benda dengan ketebalan yang bervariasi ke dalam lubang sensor. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 3, sensor debu yang dirancang mampu memberikan hasil pengukuran yang berbeda saat diberikan sampel dengan ketebalan yang bervariasi.

Tabel 3. Hasil pengujian sensor debu

| pm10 | waktu |
|------|-----------|
| 0,10 | 9.00-9.10 |
| 0,10 | 9.00-9.05 |
| 0,08 | 8.00-9.00 |
| 0,10 | 8.00-8.50 |
| 0,08 | 8.00-8.45 |
| 0,08 | 8.00-8.40 |
| 0,11 | 8.00-8.35 |
| 0,08 | 8.00-8.30 |

Meskipun proses kalibrasi tidak dapat dilakukan dalam penelitian ini, kriteria keberhasilan pengukuran partikel debu dapat diketahui melalui perbedaan hasil pengukuran pada ketebalan yang diketahui berbeda. Pada tabel data yang diperoleh cenderung stabil karena sedikitnya sumber pemicu partikulat debu di dalam ruangan. Ketebalan sampel benda akan mempengaruhi kenaikan hasil pembacaan sensor debu GP2Y1010AU0F. Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor debu berfungsi dengan baik.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa, sistem telah berhasil dibuat serta mampu melakukan pemantauan kualitas udara secara jarak jauh dan *real-time*. Informasi hasil pemantauan kualitas udara telah berhasil dikirimkan dari *database* dengan *website*. Sensor Gas dapat digunakan untuk melakukan deteksi dan monitoring gas-gas polutan seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), serta sensor suhu dan sensor debu dapat digunakan dengan menampilkan hasil deteksi pengukuran pada layar LCD 16x2. Melalui pengujian dengan menggunakan variasi sampel jumlah orang menghasilkan kinerja dari sistem saat konsentrasi gas berada dalam rentang kemampuan deteksi sensor. Sistem ini dilengkapi dengan sistem manajemen basis data atau *database management system* (DBMS) yang dapat membantu petugas dalam melakukan *monitoring*, pencatatan, dan pelaporan. Semua data yang diperoleh berhasil disimpan dengan baik dalam *database*, sehingga memungkinkan untuk melakukan inventarisasi data kualitas udara. Visualisasi *dashboard* dapat

memenuhi kebutuhan pengguna dalam memantau parameter kualitas udara di dalam ruangan serta dapat menampilkan riwayat pengambilan data kadar udara yang meliputi gas, suhu, kelembaban, debu pada setiap jamnya dalam bentuk grafik. Penambahan fitur peringatan pada web untuk memberikan informasi tentang potensi bahaya penurunan kualitas udara sekitar selama proses *monitoring*. Sistem ini bertujuan menjadi alat pemantauan kualitas udara di dalam ruangan untuk meningkatkan kesadaran akan pentingnya udara yang sehat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zafira, M. U., Ghozali, K., & Sabilla, I. A. (2022). Rancang Bangun Prototype Monitoring Kualitas Udara dalam Ruangan. *Jurnal Teknik ITS*, 11(2), A91–A96, 2022.
- [2] Budiyo, A., Bidang, P., Ozon, P., & Polusi Udara, D. (2010). *Indeks Kualitas Udara*.
- [3] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077 Tahun 2011 (2011).
- [4] Widodo, A. P., “Sistem Pemantau Kualitas Udara Dalam Ruang Berbasis Lokasi dan Jaringan Nirkabel”. Universitas Indonesia, 2019.
- [5] Ulaan, G. C., Poekoel, V. C., & Ontowirjo, A. H. J. (2022). Pembuatan Aplikasi Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan. *Jurnal Teknik Informatika*, 17(1), 93–104.
- [6] Rm. Fa’iq Zia El Hakam, “Rancang Bangun Sistem Monitor Kualitas Udara dalam Ruangan Berbasis System-on-Chip ESP32”. Universitas Gadjah Mada, 2019.
- [7] Rumampuk, G. C., Poekoel, V. C., & Rumagit, A. M. (2022). Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Dalam Ruangan Berbasis IoT. *Jurnal Teknik Informatika*, 17(1), 11–18.
- [8] Faizuddin, S., Lakshmaiah, M. V., Alam, K. T., & Ravikiran, M. (2020). IoT based Indoor Air Quality Monitoring system using Raspberry Pi4. *Proceedings of the 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2020*, 714–719. <https://doi.org/10.1109/ICECA49313.2020.9297442>.
- [9] Taştan, M., & Gökozan, H. (2019). Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/app9163435>.
- [10] Taştan, M., Taştan, M., Gökozan, H., & Mutlu, A. (2022). Analysis of the Impact of Human Activities on Indoor Air Quality with Internet of Things Based e-Nose. *Celal Bayar University Journal of Science*, 18(4), 393–401. <https://doi.org/10.18466/cbayarfbe.1018796>.
- [11] Kadir, A. (2008). Tuntutan praktis Belajar database menggunakan MySQL. Yogyakarta. Penerbit Andi.
- [12] K. B. K. Sai, S. Ramasubbareddy, and A. K. Luhach, “IoT based air quality monitoring system using MQ135 and MQ7 with machine learning analysis,” *Scalable Computing*, vol. 20, no. 4, pp. 599–606, 2019, doi: 10.12694/scpe.v20i4.1561.
- [13] Kurniawan, A. (2018). Pengukuran Parameter Kualitas Udara (CO, NO₂, SO₂, O₃ Dan PM10) di Bukit Kototabang Berbasis ISPU. *Jurnal Teknosains*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.22146/teknosains.34658>.
- [14] Subagio, Hary. 2008. Instrumentasi Pemantauan Kualitas Udara. Yogyakarta : Jurusan Teknik Elektro FT UGM.

Komparasi Metode Manipulasi *Baseline* untuk Uji Diskriminasi Keberadaan Residu Pestisida pada Sayuran Sawi Hijau Berbasis *Electronic Nose*

Abelta Mika Setiari¹, Budi Sumanto^{1,*}

¹Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Universitas Gadjah Mada; abeltamika2019@mail.ugm.ac.id

*Korespondensi: budi.sumanto@ugm.ac.id

Abstract – *The agricultural sector is a key pillar for human survival. Among the agricultural products frequently consumed are green mustard vegetables. However, it is often challenging to distinguish the aroma between organic vegetables and those containing pesticide residues. Additionally, ensuring the quality of food products requires high costs. To address these issues, an electronic nose instrument was developed. The electronic nose instrument faces the problem of sensor drift, which can be addressed through preprocessing techniques such as baseline manipulation. There are five baseline manipulation methods: difference, relative difference, fractional difference, log difference, and normalization. The acquired data will then undergo baseline manipulation and feature extraction using statistical and fast fourier transform methods. Subsequently, the processed data will be examined for its distribution using principal component analysis (PCA). The percentage variance of PC 1 becomes the main indicator to determine the best baseline manipulation method. After the analysis, it was found that the most optimal baseline manipulation methods are relative difference and fractional difference, with PC 1 value reaching 79.02% and PC 2 value reaching 8.35%, resulting in a total PC value of 87.37%. These results indicate that both relative difference and fractional difference baseline manipulation methods are effective in improving the data discrimination level in the electronic nose instrument. Therefore, this instrument can aid in determining the quality and discrimination of vegetable types based on their aromas.*

Keywords – *baseline manipulation electronic nose, principal component analysis*

Intisari – Sektor pertanian menjadi pilar utama untuk keberlangsungan hidup manusia. Di antara hasil pertanian yang sering dikonsumsi adalah sayuran sawi hijau. Namun, aroma sawi hijau organik dan yang mengandung residu pestisida seringkali sulit dibedakan. Pengecekan kualitas mutu bahan makanan juga memerlukan biaya yang tinggi. Untuk mengatasi masalah ini, dikembangkanlah instrumen *electronic nose*. *Electronic nose* memiliki permasalahan *sensor drift*, yang dapat diatasi melalui teknik prapemrosesan data seperti manipulasi *baseline*. Terdapat lima metode manipulasi *baseline* yaitu *difference*, *relative difference*, *fractional difference*, *log difference*, dan *normalization*. Manipulasi *baseline* dan ekstraksi fitur menggunakan metode statistik dan *fast fourier transform* diterapkan pada hasil data akuisisi. *Principal component analysis* digunakan untuk melihat persebaran data yang telah diproses. Metode manipulasi *baseline* terbaik ditentukan berdasarkan nilai persen variansi pada PC 1 sebagai indikator utama. Hasil analisis menunjukkan nilai total PC mencapai 87,37% dengan nilai PC 1 dan PC 2 masing-masing adalah 79,02% dan 8,35%. Berdasarkan hasil analisis tersebut diperoleh bahwa metode manipulasi *baseline* terbaik adalah *relative difference* dan *fractional difference*. Kedua metode manipulasi *baseline* tersebut efektif dalam meningkatkan tingkat diskriminasi data pada instrumen *electronic nose*. Dengan demikian, instrumen ini dapat membantu dalam penentuan kualitas dan diskriminasi jenis sayuran sawi hijau berdasarkan aroma yang dimiliki.

Kata kunci – *manipulasi baseline, electronic nose, principal component analysis*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan sayuran yang bersih dan sehat terus meningkat seiring dengan kesadaran masyarakat akan pentingnya mengkonsumsi sayuran bagi kesehatan tubuh. Disisi lain, serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) masih menjadi tantangan tersendiri di sektor pertanian, termasuk dalam budi daya sayuran. Salah satu cara untuk menanggulangi serangan OPT adalah dengan melakukan penyemprotan pestisida. Metode ini umum digunakan dalam mengendalikan hama, akan tetapi dapat meninggalkan residu pada tanaman sayuran yang berbahaya jika dikonsumsi dalam jangka panjang.

Salah satu jenis sayuran yang sering dikonsumsi adalah sawi hijau karena banyaknya manfaat dan nutrisi yang dimiliki. Akan tetapi tanaman sawi hijau rentan terhadap hama, sehingga sangat memungkinkan dilakukan penyemprotan pestisida dalam upaya menjaga tanaman tersebut aman. Oleh karena itu, akan sulit membedakan sawi hijau yang terkontaminasi pestisida dan sawi hijau yang

organik. Salah satu cara untuk membedakan sayuran sawi hijau organik dan yang mengandung pestisida adalah dengan mengidentifikasi baunya. Namun, untuk membedakan aroma sayuran organik dan yang mengandung residu pestisida sulit bagi orang awam, serta memerlukan analisis yang mahal [1]. Oleh karena itu, diperlukan suatu teknologi yang mampu mengidentifikasi sayuran, khususnya sawi hijau, berdasarkan baunya agar dapat dibedakan sawi hijau organik dan mengandung pestisida. Teknologi yang memenuhi standar biaya perancangan yang rendah, instalasi yang mudah, dan identifikasi yang cepat adalah *electronic nose* [2], [3].

Electronic nose diperkenalkan pada Tahun 1982 oleh Persaud dan Dodd [1]. *Electronic nose* adalah sebuah instrumen yang dirancang menggunakan deret sensor gas untuk mendeteksi dan mengenali aroma. Perancangan instrumen ini terinspirasi oleh indra penciuman manusia yaitu hidung. Namun, instrumen ini memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap senyawa kimia yang ada dalam aroma suatu objek [4]. Ketika sensor gas terpapar oleh aroma akan menyebabkan kenaikan pada nilai sensor. Setiap aroma

memiliki pola unik dan pola inilah yang menjadi kunci untuk algoritma *machine learning* dapat mengenali aroma tersebut [5]. Instrumen ini telah berhasil mengidentifikasi berbagai objek seperti bahan dan minuman herbal, infeksi luka, teh hitam, dan lain-lain [1], [6]–[8].

Namun, *electronic nose* memiliki permasalahan *sensor drift* atau ketidakstabilan sinyal sensor gas yang menyebabkan turunnya reprodusibilitas sinyal sensor gas tersebut. *Sensor drift* dapat disebabkan oleh penuaan sensor dan paparan senyawa sulfur atau asam yang dapat mengakibatkan perubahan karakteristik sensor. Penanganan *sensor drift* dapat dilakukan dengan memaksimalkan pra-pemrosesan data, termasuk manipulasi *baseline* [6]. Dengan cara ini, kinerja klasifikasi *electronic nose* dapat ditingkatkan.

Terdapat lima metode manipulasi *baseline*, yaitu *difference*, *relative difference*, *fractional difference*, *log difference*, dan *normalization* [7]. Penelitian sebelumnya telah membandingkan tiga diantaranya, yaitu *difference*, *relative difference*, dan *fractional difference*. Dari ketiga metode tersebut, manipulasi *baseline difference* memberikan hasil paling optimal [6]. Dengan penambahan perbandingan metode manipulasi *baseline* yang lain tentunya terdapat kemungkinan bahwa kesimpulan atau metode manipulasi *baseline* yang paling optimal menjadi berbeda. Hal ini dapat memengaruhi kinerja klasifikasi *electronic nose*. Oleh karena itu, penelitian ini melanjutkan penelitian sebelumnya dengan membandingkan kelima metode manipulasi *baseline* tersebut untuk menemukan metode yang paling optimal.

II. METODOLOGI

A. Bahan Penelitian

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan terdiri dari dua jenis sayuran sawi hijau yang dikelompokkan berdasarkan teknik budidayanya yaitu sayuran sawi hijau organik (OR) dan sayuran sawi hijau yang mengandung residu pestisida (RP) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Inisiasi penamaan sampel

| No. | Nama Sampel | Total |
|-----|-------------|-----------|
| 1 | OR | 20 sampel |
| 2 | RP | 20 sampel |

Sampel berisi 10 gram untuk masing-masing sampel. Sampel sayuran sawi hijau yang mengandung residu pestisida dikumpulkan dari petani dan sampel sayuran sawi hijau organik dari toko, bukan dibudidaya sendiri.

B. Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan terdiri dari alat *electronic nose* dan komputer. Alat ini digunakan untuk melakukan akuisisi data terhadap aroma sayuran sawi hijau. Wujud alat *electronic nose* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. *Electronic nose*

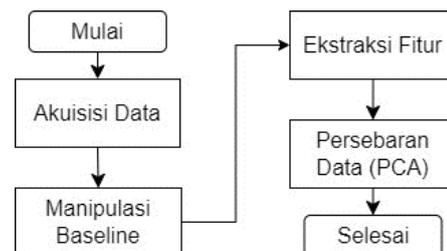
Alat ini terdiri dari sembilan buah sensor *metal oxide semiconductor* (MOS) yang terdiri dari MQ-3, MQ-9, MQ-135, MQ-137, TGS-2600, TGS-2602, TGS-2611, TGS-813, dan TGS-822. Sensor MOS ini memiliki sensitivitas yang berbeda-beda terhadap gas tertentu seperti yang diuraikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sensitivitas setiap sensor

| Sensor | Sensitivitas |
|----------|---|
| MQ-3 | alkohol |
| MQ-9 | karbon monoksida (CO), metana (CH ₄), LPG |
| MQ-135 | amonia (NH ₃), alkohol, bensin, nitrogen oksida (NO _x), <i>smoke</i> , karbon dioksida (CO ₂) |
| MQ-137 | amonia (NH ₃) |
| TGS-2600 | kontaminan udara berbentuk gas |
| TGS-2602 | VOCs, <i>odorous gases</i> |
| TGS-2611 | metana (CH ₄) |
| TGS-813 | metana (CH ₄), propana (), butana (C ₄ H ₁₀) |
| TGS-822 | uap pelarut organik, etanol (C ₂ H ₆ O) |

C. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini terdiri dari akuisisi data, manipulasi *baseline*, ekstraksi fitur, persebaran data dengan *principal component analysis* (PCA) seperti yang ditunjukkan Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

D. Akuisisi Data

Akuisisi data merupakan pengambilan data mengenai aroma sampel sayuran sawi hijau. Sebelum proses akuisisi data, sampel dipanaskan hingga suhu 45-50°C. Proses pengambilan data terdiri dari tiga tahap meliputi *flushing* selama 10 detik, *collecting* selama 30 detik, dan *purging* selama 60 detik. *Flushing* merupakan langkah pengambilan udara bebas dari *chamber* atau ruang sensor. Proses *collecting* adalah pengambilan aroma objek dari ruang sampel. Proses *purging* adalah pengambilan udara buangan aroma objek dengan udara bebas dari *chamber*. Pengambilan data dilakukan pada *sampling rate* 10 Hz. Pengambilan data diulang sebanyak tiga kali untuk per sampel. Total ada 120 data.

Hasil dari proses akuisisi data ini menghasilkan rangkaian nilai yang membentuk pola respons. Selanjutnya, rangkaian nilai tersebut akan disimpan dalam format file '.csv'. Setelah itu, dilakukan pra-pengolahan data dan pengolahan data di komputer.

E. Manipulasi Baseline

Manipulasi *baseline* dilakukan untuk memperbaiki *sensor drift*. Selain itu, manipulasi *baseline* dilakukan untuk menyamaratakan nilai *baseline* pada setiap sensor [9]. Kelima metode manipulasi *baseline* berikut ini memiliki tujuan yang sama yaitu memberikan kompensasi atas kesalahan pembacaan sensor, namun dengan lima pendekatan yang berbeda.

1) *Difference*: Manipulasi *baseline difference* biasanya digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan *noise* tambahan dalam pembacaan sensor gas [7]. Contoh derau tambahan yaitu pergerakan acak partikel dalam komponen sensor, derau elektronik (gangguan listrik), beberapa sensor gas yang berinteraksi atau berdekatan satu sama lain, dan lain-lain. Hasil manipulasi *baseline difference* diperoleh dari (1).

$$X_{ij} = V_{ij}max - V_{ij}min \quad (1)$$

2) *Relative Difference*: Manipulasi *baseline relative difference* digunakan untuk mengurangi atau menghilangkan kesalahan multiplikatif yang dapat disebabkan oleh penuaan sensor [6]. Metode ini juga dapat membantu memberikan kompensasi pengaruh suhu pada sensor [7]. Suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan konduktivitas sensor. Dengan metode ini, dapat diperoleh pembacaan yang lebih stabil meskipun terjadi fluktuasi suhu dan/atau penuaan sensor. Hasil manipulasi *baseline relative difference* diperoleh dari (2).

$$X_{ij} = V_{ij}max/V_{ij}min \quad (2)$$

3) *Fractional Difference*: Metode manipulasi *baseline fractional difference* juga dapat mengkompensasi pengaruh suhu pada sensor. Metode ini juga dapat digunakan untuk linierisasi hubungan antara resistansi sensor oksida logam

dengan konsentrasi aroma yang terdeteksi [7]. Hasil manipulasi *baseline fractional difference* diperoleh dari (3).

$$X_{ij} = (V_{ij}max - V_{ij}min)/V_{ij}min \quad (3)$$

4) *Log Difference*: Manipulasi *baseline log difference* cocok untuk digunakan ketika variabilitas dalam konsentrasi aroma yang dideteksi sangat besar karena dapat melinierkan hubungan yang sangat tidak linier antara konsentrasi aroma yang dideteksi dengan keluaran sensor [7]. Dengan menggunakan metode ini, dapat diperoleh keluaran sensor yang lebih linier dengan konsentrasi aroma yang dideteksi. Hasil manipulasi *baseline log difference* diperoleh dari (4).

$$X_{ij} = \log(V_{ij}max/V_{ij}min) \quad (4)$$

5) Normalization

Manipulasi *baseline normalization* digunakan untuk mengurutkan elemen vektor respon pembacaan sensor agar berada dalam urutan yang sama. Selain itu, metode ini sangat efektif ketika identifikasi aroma yang tepat menjadi perhatian [7]. Hasil manipulasi *baseline normalization* diperoleh dari (5).

$$X_{ij} = (V_{ij} - V_{ij}min)/(V_{ij}max/V_{ij}min) \quad (5)$$

X_{ij} merupakan nilai pembacaan sensor ke-1 hingga pembacaan sensor terakhir yang digunakan. X_{ij} merupakan nilai tegangan terbaru dari suku ke- ij setelah dilakukan manipulasi *baseline*. $V_{ij}max$ adalah nilai tegangan maksimum asli dari suku ke- ij . Sementara, $V_{ij}min$ adalah nilai tegangan asli terendah dari suku ke- ij . V_{ij} mengacu pada nilai tegangan asli dari suku ke- ij .

6) *Ekstraksi Fitur* Ekstraksi fitur merupakan langkah transformasi data yang telah melewati proses manipulasi *baseline* menjadi representasi yang lebih informatif sehingga dapat digunakan untuk proses pengolahan data selanjutnya [10]. Penelitian ini menggunakan dua metode ekstraksi fitur yaitu statistik dan *fast fourier transform* (FFT). *Fast fourier transform* adalah algoritma yang digunakan untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi [11]. Terdapat tiga fitur yang digunakan, diuraikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Daftar fitur dan inisiasi penamaan fitur

| No. | Fitur | Inisiasi Fitur |
|-----|------------------------------|----------------|
| 1 | Mean | M1 |
| 2 | Daya spektrum frekuensi ke-3 | M2 |
| 3 | Daya spektrum frekuensi ke-4 | M3 |

Fitur *mean* (M1) mencerminkan nilai rata-rata dari kumpulan data. Sementara, fitur daya spektrum frekuensi (M2 dan M3) menggambarkan magnitudo tertinggi ketiga dan keempat dari hasil FFT atas data respons yang telah dilakukan manipulasi *baseline*.

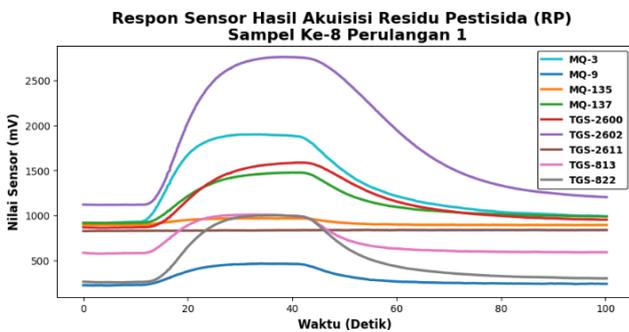
F. Persebaran Data

Setelah ekstraksi fitur dari data, analisis PCA digunakan untuk mengamati persebaran data. *Principal component analysis* (PCA) merupakan suatu teknik yang berguna untuk mengurangi dimensi data yang kompleks tetapi tetap mempertahankan informasi penting dari data tersebut [12]. Salah satu kegunaan utama PCA adalah untuk memahami dan menganalisis persebaran data dalam ruang berdimensi tinggi dengan mengubahnya menjadi ruang berdimensi lebih rendah [13]. Penentuan komponen yang digunakan tercermin dari nilai masing-masing komponen tersebut. Nilai *eigen* terbesar dan vektor *eigen* yang mempertahankan jumlah data terbesar yang dipilih [3].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

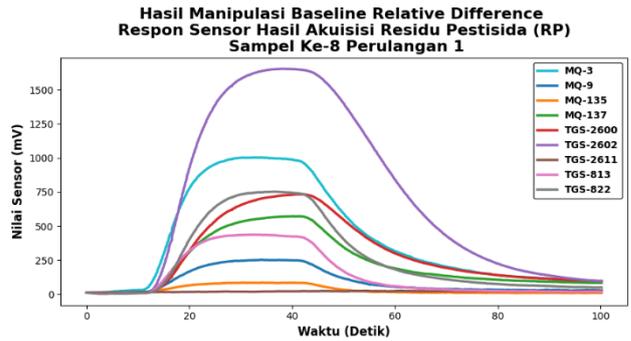
A. Hasil Akuisisi Data dan Manipulasi Baseline

Dari proses akuisisi data aroma sayuran sawi hijau, diperoleh pola respons data dengan satuan tegangan mV. Hasil akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 3. Sumbu-x menunjukkan waktu dalam satu kali pengambilan data. Sumbu-y menunjukkan nilai pembacaan oleh sensor. Terdapat kenaikan nilai pembacaan sensor setelah detik ke-10 dan turun kembali setelah detik ke-40 yang disebabkan oleh tiga tahap proses pengambilan data atau aliran udara yaitu *flushing*, *collecting*, dan *purging*, sesuai dengan teori dasar *electronic nose*, dijabarkan pada bagian sebelumnya. Titik dasar respons setiap sensor berbeda-beda. Oleh karena itu, dilakukan manipulasi *baseline* untuk menyamaratakan titik dasar dari masing-masing respons sensor. Hasil setelah dilakukan manipulasi *baseline* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Hasil akuisisi data (RP) sampel ke-8 perulangan 1 tanpa manipulasi *baseline*

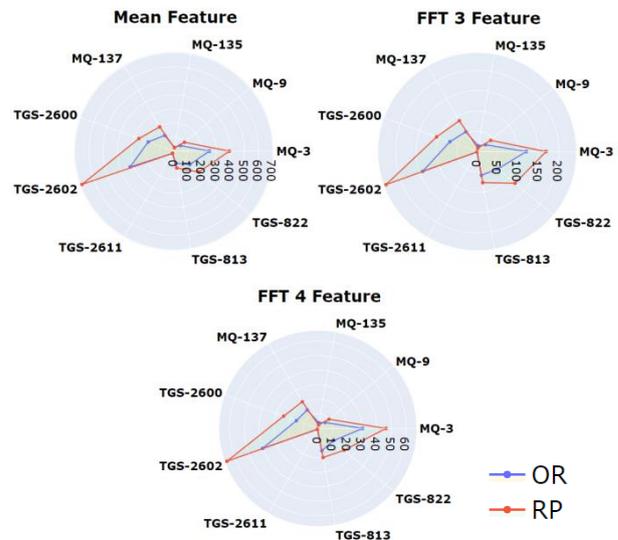
Gambar 4 mengindikasikan bahwa setiap sensor memiliki titik dasar yang mendekati nol sehingga meminimalkan *noise* sensor [14]. Manipulasi *baseline* mengubah titik dasar respons dari setiap sensor sehingga terdapat perbedaan antara plot pola respons data mentah dengan plot pola respons data hasil manipulasi *baseline*. Manipulasi *baseline* tidak mengubah karakteristik setiap sensor karena pada dasarnya manipulasi *baseline* hanya menggeser respons sensor. Berdasarkan kedua grafik tersebut, semua sensor mengalami perubahan respons dengan perubahan nilai terbesar terjadi pada sensor TGS-2602 dan perubahan nilai terkecil pada sensor TGS-2611.



Gambar 4. Grafik hasil akuisisi data (RP) sampel ke-8 perulangan 1 dengan manipulasi *baseline*

B. Hasil Ekstraksi Fitur

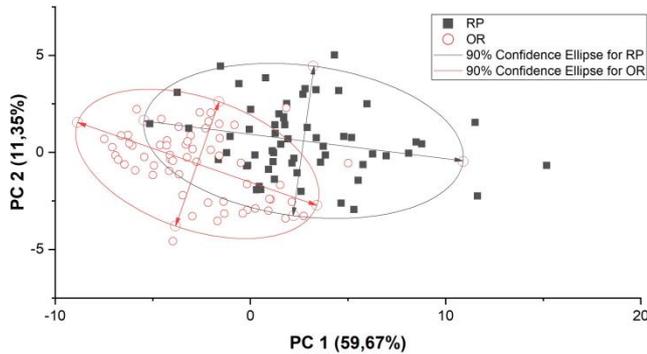
Hasil ekstraksi fitur memberikan informasi nilai fitur dan setiap sensornya memiliki masing-masing tiga fitur. Secara total, data dari semua sensor memiliki dimensi 120 baris x 27 kolom. Hasil ekstraksi fitur ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar 5 merupakan grafik radar untuk memperlihatkan titik-titik fitur secara efektif dalam ruang dua dimensi [15]. Sensor TGS-2602 memberikan nilai tertinggi pada semua fitur. Sebaliknya, sensor TGS-2611 menunjukkan nilai terendah.



Gambar 5. Grafik radar hasil ekstraksi fitur

C. Hasil Persebaran Data

Principal component analysis merupakan teknik untuk merepresentasikan data dan memeriksa apakah data sampel terpisah dengan baik atau memiliki korelasi [16]. *Principal component analysis* (PCA) bekerja dengan mentransformasikan data ke dalam koordinat baru agar lebih mudah diinterpretasikan. Hasil kovarian dari PCA dapat mengidentifikasi adanya *noise* pada data [6]. Hasil PCA tanpa manipulasi *baseline* dapat dilihat pada Gambar 6.

Gambar 6. Hasil PCA tanpa manipulasi *baseline*

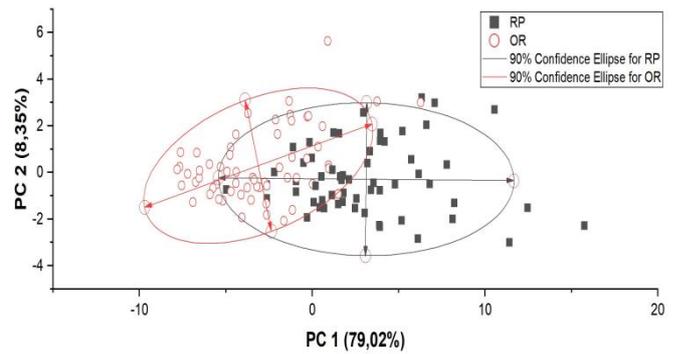
Dari Gambar 6, dapat dilihat bahwa simbol kotak berwarna hitam merupakan sampel residu pestisida (RP). Sementara, simbol lingkaran berwarna merah merupakan sampel organik (OR). Persebaran data dari kedua jenis sampel tersebut saling berkorelasi ditandai dengan adanya tumpang tindih antara keduanya. Nilai persen variansi untuk komponen PC 3 dan seterusnya diabaikan karena nilainya kecil dan memiliki pengaruh yang sedikit. Nilai persen variansi dari hasil PCA tanpa manipulasi *baseline* adalah PC 1 sebesar 59,67% dan PC 2 sebesar 11,35%. Jumlah persen variansi tersebut masih rendah yakni kurang dari 80%. Oleh karena itu, selanjutnya akan dilihat hasil PCA dari data yang sudah dimanipulasi *baseline*. Hasil PCA dari kelima metode manipulasi *baseline* dirangkum dalam Tabel 4.

Tabel 4. Rangkuman hasil PCA

| No. | Manipulasi Baseline | PC 1 | PC 2 |
|-----|------------------------------|--------|-------|
| 1 | <i>Difference</i> | 76,55% | 9,27% |
| 2 | <i>Relative Difference</i> | 79,02% | 8,35% |
| 3 | <i>Fractional Difference</i> | 79,02% | 8,35% |
| 4 | <i>Log Difference</i> | 77,01% | 9,12% |
| 5 | <i>Normalization</i> | 76,44% | 9,34% |

Tabel 4 menunjukkan bahwa hasil PCA dari kelima metode manipulasi *baseline* menunjukkan nilai persentase tertinggi pada PC 1 sebesar 79,02% dari hasil PCA dengan manipulasi *baseline relative difference* dan *fractional difference*. Sementara itu, jumlah persen tertinggi pada total PC berasal dari hasil PCA dari kedua manipulasi *baseline* tersebut yaitu sebesar 87,37%. Hasil PCA dengan manipulasi *baseline relative difference* ditunjukkan pada Gambar 7.

Nilai persen variansi menunjukkan variasi data yang ada. Nilai persen variansi pada PC ke-*n* yang semakin tinggi menunjukkan diskriminasi antara kedua sampel. Perbedaan nilai persen variansi inilah yang menjadi tolak ukur karakteristik dari setiap data yang ada [8]. Nilai persen variansi PC 1 mengindikasikan tingkat diskriminasi data sehingga menunjukkan metode manipulasi *baseline* yang paling optimal untuk diterapkan dalam pengolahan data selanjutnya [6].

Gambar 7. Hasil PCA dengan manipulasi *baseline relative difference*

Berdasarkan Tabel 4, metode manipulasi *baseline* yang paling optimal adalah *relative difference* dan *fractional difference*. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadinya *sensor drift* memiliki kemungkinan disebabkan oleh pengaruh suhu pada sensor karena karakteristik dari kedua metode manipulasi *baseline* tersebut.

IV. SIMPULAN

Simpulan dari penelitian ini adalah bahwa tahapan pra-pemrosesan data memiliki pengaruh pada tingkat persebaran data dalam sistem sensor gas sehingga dapat meningkatkan tingkat diskriminasi data antara kedua sampel yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa manipulasi *baseline relative difference* dan *fractional difference* memberikan hasil yang paling optimal dengan nilai PC 1 sebesar 79,02% dan PC 2 sebesar 8,35% sehingga total PC mencapai 87,37%. Ini dapat disebabkan oleh *noise* dalam data karena pengaruh suhu pada sensor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sitompul, B. H. Iswanto, and W. Indrasari, "Analisis Cluster Bahan Herbal Berdasarkan Fitur Respon E-Nose," vol. IX, no. Cx, pp. 141–146, 2020.
- [2] M. Taştan and H. Gökozan, "Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 16, 2019.
- [3] D. Karakaya, O. Ulucan, and M. Turkan, "Electronic Nose and Its Applications : A Survey," vol. 17, no. April, pp. 179–209, 2020.
- [4] Y. I. Tanu Wijaya, S. Humaira, and B. Sumanto, "Optimization of Green Tea Qualification Model Based on Feature Selection Using K-Nearest Neighbor Method with Electronic Nose," *Proc. - 2022 8th Int. Conf. Sci. Technol. ICST 2022*, vol. 1, pp. 1–6, 2022.
- [5] I. O. P. C. Series and M. Science, "Classification based on K-Nearest Neighbor and Logistic Regression method of coffee using Electronic Nose Classification based on K-Nearest Neighbor and Logistic Regression method of coffee using Electronic Nose," 2021.
- [6] D. K. Agustika and D. K. Triyana, "Metode Manipulasi Baseline untuk Mengatasi Sensor Drift pada Sensor Gas untuk Uji Diskriminasi Jamu," 2016.
- [7] J. Yan, F. Tian, Q. He, and Y. Shen, "Feature Extraction from Sensor Data for Detection of Wound Pathogen Based on Electronic Nose," vol. 24, no. 2, pp. 57–73, 2012.
- [8] D. Lelono and K. Triyana, "Suhu Pemanas Sampel Optimal Untuk Klasifikasi Teh Hitam Menggunakan Electronic Nose," *IJEIS (Indonesian J. Electron. Instrum. Syst.)*, vol. 9, no. 1, p. 45, 2019.
- [9] B. Sumanto, D. R. Java, W. Wijaya, and J. Hendry, "Seleksi Fitur Terhadap Performa Kinerja Sistem E-Nose untuk Klasifikasi

- Aroma Kopi Gayo,” *MATRIK J. Manajemen, Tek. Inform. dan Rekayasa Komput.*, vol. 21, no. 2, pp. 429–438, 2022.
- [10] E. S. A. Nugraha, N. D. Resty, Y. I. T. Wijaya, and B. Sumanto, “Electronic Nose to Classify Tobacco Origin using a Naive Bayes Method based on Feature Selection,” *ICCoSITE 2023 - Int. Conf. Comput. Sci. Inf. Technol. Eng. Digit. Transform. Strateg. Facing VUCA TUNA Era*, pp. 267–272, 2023.
- [11] D. T. Kusuma, “Fast Fourier Transform (FFT) Dalam Transformasi Sinyal Frekuensi Suara Sebagai Upaya Perolehan Average Energy (AE) Musik,” vol. 14, no. 1, pp. 28–35, 2021.
- [12] J. Asharf, N. Moustafa, H. Khurshid, E. Debie, W. Haider, and A. Wahab, “A review of intrusion detection systems using machine and deep learning in internet of things: Challenges, solutions and future directions,” *Electron.*, vol. 9, no. 7, 2020.
- [13] I. A. Sabilla, D. P. Purbawa, R. Sarno, A. Al Fauzi, D. R. Wijaya, and R. Gunawan, “Men and Women Classification at Night through the Armpit Sweat Odor using Electronic Nose,” *Proc. - 2021 IEEE Asia Pacific Conf. Wirel. Mobile, APWiMob 2021*, pp. 121–127, 2021.
- [14] A. A. NUGROHO, W. WIJAYA, J. HENDRY, and B. SUMANTO, “Seleksi Fitur Aroma Teh Kombucha menggunakan ANN untuk Optimasi Kinerja Sistem E-nose,” *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 10, no. 2, p. 334, 2022.
- [15] Y. Tang, K. Xu, B. Zhao, and M. Zhang, “A novel electronic nose for the detection and classification of pesticide residue on apples,” pp. 20874–20883, 2021.
- [16] D. K. Agustika and K. Triyana, “Application of principal component analysis and discrete wavelet transform in electronic nose for herbal drinks classification,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1755, no. July 2016, pp. 1–7, 2016.

Perbaikan Jatuh Tegangan dan Rugi Daya dengan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah dan Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah pada Gardu Distribusi MI-44-150-21 PT PLN ULP Magelang Kota

Aldila Fajar Rizkiana¹, Yuris Mulya Saputra^{1*}

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

*Korespondensi: ym.saputra@ugm.ac.id

Abstract – *The electrical system in Wonosobo hamlet is supplied by a distribution transformer with a capacity of 50 kVA. There are 54 customer units with a total installed contract power of 31.5 kVA. Based on the measurement results, the lowest voltage on the customer side is 199 V which is below the nominal voltage of 231 V or has a voltage drop percentage of 13.85% exceeding the minimum standard voltage drop of 10%. One of the causes is that many house connections in Wonosobo hamlet exceed the PLN 56-1: 1993 standard regarding house connection standards. Thus, it is necessary to make improvement efforts including reconfiguring the house connection (SR) network and reconductoring the low voltage network (JTR) to overcome overload on the JTR conductor. Improvements are made using ETAP 12.6.0 software simulations so that the voltage drop value can be improved according to PLN No. 1 Year 1995 standards and can reduce power losses. Based on the simulation results, after making improvement efforts using 2 methods, the lowest voltage value was obtained to 210.2 V with the highest percentage of the previous voltage drop of 12.42% to 9.00%. Therefore, the voltage drop value obtained after the repair is in accordance with PLN standards, which is below the minimum standard of 10%. After repairing with two methods, the total power loss generated dropped from 1864.05 watt to 1051.17 watt.*

Keywords – *house connection, SR reconfiguration, reconductoring, voltage drop, power loss*

Intisari – Sistem kelistrikan di dusun Wonosobo disuplai oleh transformator distribusi dengan kapasitas 50 kVA. Terdapat 54 unit pelanggan dengan total daya kontrak terpasang adalah 31,5 kVA. Berdasarkan hasil pengukuran, tegangan terendah disisi pelanggan adalah 199 V berada di bawah tegangan nominal 231 V atau memiliki persentase jatuh tegangan sebesar 13,85% melebihi standar minimum jatuh tegangan 10%. Salah satu penyebabnya adalah banyak tarikan sambungan rumah di dusun Wonosobo melebihi standar PLN 56-1:1993 mengenai standar sambungan rumah. Dengan demikian perlu dilakukan upaya perbaikan meliputi rekonfigurasi jaringan sambungan rumah (SR) dan melakukan rekonduktor jaringan tegangan rendah (JTR) untuk mengatasi *overload* pada penghantar JTR. Rencana perbaikan disimulasikan dengan perangkat lunak ETAP 12.6.0 agar nilai jatuh tegangan dapat diperbaiki sesuai standar PLN No. 1 Tahun 1995 dan dapat mengurangi rugi daya. Berdasarkan hasil simulasi, setelah melakukan upaya perbaikan menggunakan 2 metode diperoleh nilai tegangan terendah menjadi 210,2 V dengan persentase tertinggi jatuh tegangan sebelumnya sebesar 12,42% menjadi 9,00%. Oleh karena itu, nilai jatuh tegangan yang didapat setelah perbaikan sudah sesuai dengan standar PLN yaitu di bawah standar minimum 10%. Setelah dilakukan perbaikan dengan dua metode, total rugi daya yang dihasilkan turun dari 1864,05 watt menjadi 1051,17 watt.

Kata kunci – *sambungan rumah, rekonfigurasi SR, rekonduktor, jatuh tegangan, rugi daya*

I. PENDAHULUAN

Sistem pembangkit, transmisi, dan distribusi membentuk suatu kesatuan yang utuh dinamakan sistem tenaga listrik. Melalui sistem distribusi, tenaga listrik akan disalurkan sampai ke konsumen [1]. Gardu distribusi terdiri dari beberapa komponen, di antaranya penghantar, tiang penyangga, dan trafo distribusi. Terdapat dua jenis penghantar pada jaringan distribusi yaitu kawat dan kabel. Penghantar kawat pada JTM antara lain jenis *all aluminium conductor* (AAC) dan *all aluminium alloy conductor* (AAAC). Penghantar kabel yang biasa digunakan pada jaringan distribusi adalah jenis kabel AAAC-S, BC dan XLPE [2]. Tiang penyangga digunakan untuk menyangga saluran. Penentuan jarak gawang saluran udara tegangan rendah (SUTR) di daerah pemukiman sebesar 40 s.d. 50 meter, sedangkan jarak gawang pada daerah luar pemukiman sekitar 60 s.d. 80 meter [3]. Transformator berfungsi untuk menaikkan turunkan tegangan. Terdapat dua macam gardu

distribusi berdasarkan jenis pemasangannya yaitu gardu pasang luar dan gardu pasang dalam. Gardu distribusi pasang luar terdiri dari gardu cantol dan gardu portal. Gardu distribusi pasang dalam terdiri dari gardu beton dan gardu kios.

Distribusi tenaga listrik harus mempunyai tingkat keandalan yang baik dan sesuai dengan standar PLN yang berlaku. Tingkat keandalan sistem distribusi ditentukan oleh mutu tegangan dan kondisi sambungan rumah (SR) yang menjadi titik akhir pelayanan listrik ke konsumen. Berdasarkan hasil pengukuran di Dusun Wonosobo, Magelang, Jawa Tengah diperoleh nilai tegangan terendah pada pelanggan sebesar 199 V, dengan kata lain terjadi jatuh tegangan sebesar 13,85%, melebihi batas maksimal jatuh tegangan sebesar 10%. Jatuh tegangan merupakan selisih antara tegangan pengiriman dengan tegangan penerimaan tenaga listrik. Jatuh tegangan dinyatakan dalam satuan volt atau persen. Jatuh tegangan dipengaruhi oleh adanya resistansi, reaktansi, dan impedansi pada saluran [5]. Jatuh

tegangan yang terjadi disebabkan oleh jumlah tarikan sambungan rumah yang tidak sesuai standar di Dusun Wonosobo.

Untuk mengetahui penyebab lain dari jatuh, dilakukan perhitungan persentase pembebanan transformator. Persentase pembebanan transformator merupakan hal yang harus diperhatikan, pasalnya trafo yang mengalami pembebanan lebih (*overload*) akan menyebabkan isolasi pada transformator mengalami panas berlebih. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan sehingga dapat mengakibatkan terjadinya jatuh tegangan [4].

Rugi daya listrik terjadi karena hilangnya energi listrik pada saat proses distribusi daya listrik dari sumber menuju beban (konsumen) yang diakibatkan oleh adanya hambatan pada penghantar tenaga listrik [6]. Rugi daya (*losses*) diklasifikasikan menjadi dua secara teknis dan non-teknis. Rugi daya teknis dipengaruhi oleh sifat material atau peralatan jaringan, sedangkan rugi non-teknis dikarenakan kesalahan instalasi atau kerusakan alat pada jaringan [7]. Susut teknis meliputi susut penghantar, susut pada transformator, dan susut akibat faktor daya rendah. Sedangkan rugi energi atau susut energi merupakan kondisi di mana jumlah energi yang dikirim atau didistribusikan tidak sama dengan energi yang diterima di sisi pelanggan atau daya kirim tidak terjual sepenuhnya. Susut energi seharga dengan rugi daya rata-rata untuk periode tertentu dikalikan dengan jumlah jam dari periode yang bersangkutan [8].

Pemilihan jenis penghantar jaringan distribusi merupakan faktor penting yang harus diperhatikan dalam perencanaan sistem tenaga listrik untuk menghindari adanya rugi daya dan jatuh tegangan. Rekonduktor merupakan metode perbaikan jatuh tegangan melalui penggantian penghantar dengan ukuran lebih besar. Saat dilakukan rekonduktor parameter impedansi dan arus jaringan akan berubah sehingga akan mengubah rugi daya dan jatuh tegangan [9].

Electric Transient and Analysis Program (ETAP) adalah perangkat lunak desain dan simulasi yang komprehensif untuk sistem rangkaian tenaga [10]. Aplikasi ini menggunakan antarmuka *single line diagram* (SLD) untuk berbagai jenis analisis antara lain: aliran daya, hubung singkat, *starting* motor, stabilitas *transient*, koordinasi relai proteksi dan sistem harmonik. *Load flow analysis* adalah studi yang bertujuan untuk mengetahui aliran daya dari satu titik ke titik lain dalam sistem kelistrikan dan tegangan antar bus dalam sistem [11]. Studi aliran daya dihitung menggunakan dua metode, yaitu metode Gauss-Seidel dan metode Newton-Raphson. Metode Newton-Raphson karena lebih unggul daripada metode Gauss-Seidel yaitu lebih efektif digunakan pada sistem jaringan yang besar, memiliki tingkat ketelitian lebih baik dibanding metode Gauss-Seidel, iterasi lebih sedikit diperlukan dan komputasi lebih cepat [12].

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui persentase jatuh tegangan dan nilai rugi daya setiap sambungan rumah akibat sambungan rumah tidak sesuai

standar, mengetahui penurunan rugi daya sebelum dan sesudah dilakukan rekonfigurasi sambungan rumah dan rekonduktor JTR sesuai dengan hasil simulasi perangkat lunak ETAP 12.6.0. Selain itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui efektivitas penggabungan dua metode perbaikan kualitas jaringan tegangan rendah dengan melakukan rekonfigurasi sambungan rumah dan rekonduktor JTR.

Perbedaan penelitian yang disusun oleh penulis dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya adalah lokasi penelitian berada di Dusun Wonosobo, Desa Kalegen, Kecamatan Bandongan, Kabupaten Magelang, Jawa Tengah. Perbedaan selanjutnya adalah sebelum merencanakan perbaikan melakukan perhitungan persentase pembebanan transformator, menggabungkan dua metode perbaikan *drop* tegangan dan rugi *losses* pada jaringan SR dengan melakukan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR menggunakan *software* ETAP 12.6.0, melakukan perhitungan rugi energi yang diakibatkan oleh rugi daya yang dihasilkan, dan menghitung persentase *error* perangkat lunak ETAP 12.6.0.

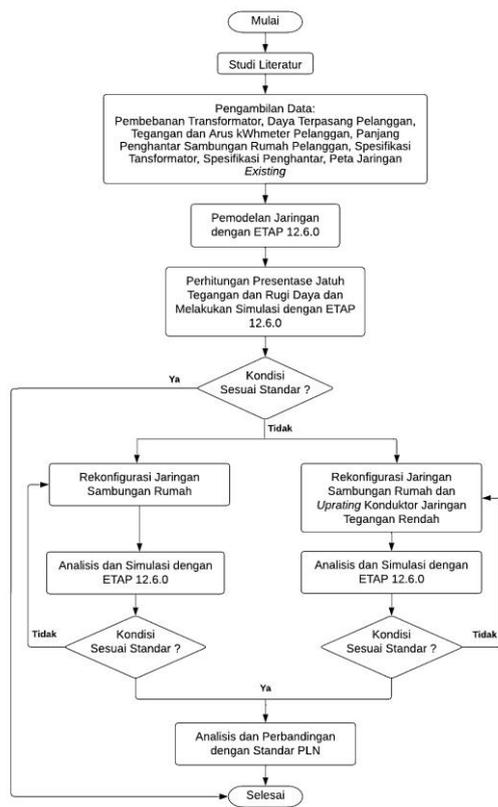
II. METODOLOGI

A. Flowchart

Upaya perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya akibat jumlah tarikan sambungan rumah yang tidak sesuai standar dilakukan menggunakan dua metode perbaikan. Metode pertama adalah melalui rekonfigurasi jaringan SR dan metode kedua dilakukan menggabungkan dua metode, yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR. Perbaikan akan dilakukan melalui perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Upaya perbaikan dilakukan melalui beberapa tahapan. Gambar 1 menunjukkan bagan diagram alir penelitian yang dilakukan.

Setelah itu, dilanjutkan dengan simulasi jaringan setelah perbaikan. Rencana perbaikan akan menggunakan dua metode. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan jatuh tegangan dan rugi daya di dusun Wonosobo adalah dengan melakukan rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan melakukan rekonduktor jaringan tegangan rendah. Apabila hasil jatuh tegangan dan rugi daya sudah sesuai standar maka penelitian dapat dikatakan selesai, jika hasil tidak sesuai standar maka akan dilakukan perencanaan perbaikan kembali. Setelah disimulasikan, hasil jatuh tegangan dan rugi daya baik sebelum maupun sesudah perbaikan dapat dibandingkan berdasarkan pada hasil simulasi yang terdapat pada *report* ETAP 12.6.0.

Setelah melakukan perbandingan hasil penurunan jatuh tegangan dan rugi daya dengan menggunakan dua metode, studi dilanjutkan menganalisis serta membandingkan dengan standar PLN. Pengerjaan penelitian pun telah selesai dilakukan.



Gambar 1. Bagan diagram alir penelitian

B. Standar PLN

Untuk memperbaiki permasalahan yang ada yaitu jatuh tegangan dan jumlah tarikan sambungan SR yang tidak sesuai ketentuan akan mengacu pada standar PLN. Menurut SPLN No. 1 Tahun 1995 mengenai tegangan-tegangan standar, variasi tegangan pelayanan ditetapkan maksimum +% dan minimum - 10% terhadap tegangan nominal 231 V sesuai dengan tegangan sekunder transformator yang tertera pada *nameplate* transformator [13]. Sedangkan, standar sambungan rumah diatur dalam SPLN No. 56-1 Tahun 1993 bahwa jumlah sambungan tenaga listrik tegangan rendah (SLTR) pada satu tiang maksimum enam sambungan luar pelayanan (SLP) dan dari setiap SLP diperbolehkan mempunyai maksimum empat tarikan pelanggan. Banyaknya sambungan rumah yang tidak sesuai standar menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik pelanggan. Selain itu juga akan mengakibatkan permasalahan jatuh tegangan yang akan berpengaruh pada rugi daya yang dapat merugikan PLN [14].

C. Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Perhitungan persentase pembebanan transformator digunakan untuk mengetahui kondisi transformator apakah dalam keadaan *overload* atau tidak. Persentase pembebanan transformator dikatakan mengalami *overload* jika nilai persentase pembebanan di atas 80% sesuai dengan standar PLN No.17 Tahun 1979. Pembebanan transformator dihitung menggunakan (1).

$$\% \text{ pembebanan} = \frac{I \text{ total}}{I \text{ beban penuh}} \times 100\% \quad (1)$$

$$I \text{ beban penuh} = \frac{S}{V} \quad (2)$$

Dengan,

I total : arus total

I beban penuh : arus beban penuh

S : daya transformator (kVA)

V : tegangan sekunder transformator (V)

D. Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan

Perhitungan nilai jatuh tegangan menggunakan (3), Sedangkan, persentase jatuh tegangan dihitung menggunakan (4).

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (3)$$

$$\% \text{ drop tegangan} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\% \quad (4)$$

Dengan.

ΔV : jatuh tegangan (V)

V_s : tegangan sumber (V)

V_r : tegangan terima (V)

E. Perhitungan Rugi Daya dan Rugi Energi

Rugi daya pada jaringan SR dihitung menggunakan (5). Konstanta 2 merupakan jumlah penghantar fase dan netral yaitu dua. Setelah mengetahui nilai rugi daya, kemudian nilai rugi energi pada penghantar dapat dihitung menggunakan (6).

$$\Delta P = 2 \times I^2 \times R \quad (5)$$

$$E = P \times t \quad (6)$$

Dengan,

ΔP : rugi daya listrik pada jaringan (watt)

I : arus jaringan (A)

R : tahanan penghantar (Ω)

E : rugi-rugi energi (kWh)

P : rugi-rugi daya (kW)

T : waktu (jam)

F. Perhitungan Luas Penampang Konduktor

Untuk menentukan luas penampang penghantar untuk melakukan rekonduktur, hal pertama yang harus dilakukan yaitu menentukan arus yang mengalir melalui penghantar tersebut sesuai (7).

$$I = \frac{P}{V \times \cos \varphi} \quad (7)$$

Dengan,

I : arus nominal (A)

P : daya aktif (W)

V : tegangan (V)

$\cos \varphi$: faktor daya (0,8)

Kemudian, setelah mengetahui arus nominal penghantar, luas penampang penghantar ditentukan berdasarkan besar KHA jenis kabel yang digunakan. Nilai kemampuan hantar arus diperoleh dari 1,25 kali dari arus nominal yang melewati penghantar tersebut[15].

G. Perhitungan Persentase Keakuratan Perangkat Simulasi ETAP 12.6.0

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan dan simulasi ETAP 12.6.0 untuk mengetahui nilai jatuh tegangan dan rugi daya. Oleh karena itu, untuk mengetahui nilai keakuratan ETAP 12.6.0 sesuai (8).

$$\% \text{ Keakuratan ETAP} = \frac{\bar{X} \text{ Hasil ETAP}}{\bar{X} \text{ Hasil rumus manual}} \times 100\% \quad (8)$$

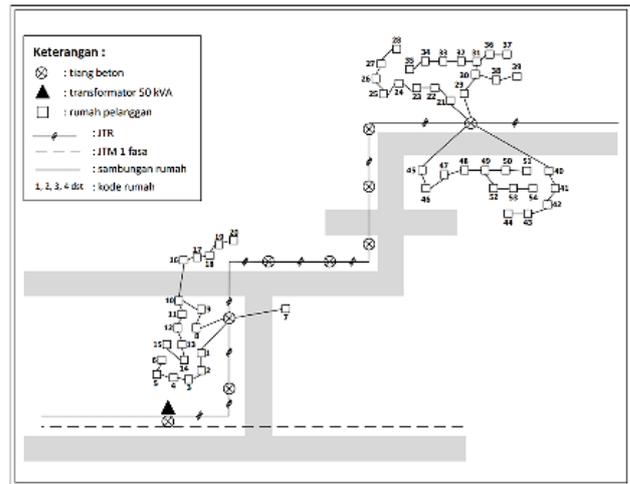
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian yang diperoleh kemudian diolah dengan urutan sebagai berikut :

A. Kondisi Jaringan

Kondisi jaringan di dusun Wonosobo ditunjukkan pada Gambar 2. Dusun Wonosobo disuplai oleh trafo satu fase berkapasitas 50 kVA. Penghantar yang digunakan untuk menyalurkan energi listrik sampai ke pelanggan menggunakan jenis penghantar yang berbeda-beda. Penghantar JTM yang digunakan adalah jenis AAAC ukuran 70 mm² dengan nilai resistansi 0,438 Ω/km. Penghantar JTR yang digunakan adalah jenis NFA2X-T 2x70+50 mm² dengan nilai resistansi 0,433 Ω/km.

Sedangkan penghantar SR yang digunakan adalah jenis low voltage twisted cable (LVTC) NFA2X berukuran 2x10 mm² dengan nilai resistansi 3,08 Ω/km. Data pengukuran arus, tegangan, panjang penghantar SR disajikan pada Tabel 1.



Gambar 2. Peta pelanggan PLN di dusun Wonosobo

Tabel 1. Data pengukuran arus, tegangan, dan panjang sambungan rumah

| Kode | Daya Pelanggan (VA) | Tegangan Terukur (A) | Arus Terukur (A) | Panjang SR (m) |
|--------|---------------------|----------------------|------------------|----------------|
| RMH 1 | 900 | 215,3 | 3,1 | 19 |
| RMH 2 | 450 | 214,5 | 1,4 | 18 |
| RMH 3 | 450 | 214,2 | 1,2 | 16 |
| RMH 4 | 450 | 213,45 | 1,33 | 10 |
| RMH 5 | 900 | 213 | 2,42 | 8 |
| RMH 6 | 450 | 212,1 | 1,8 | 10 |
| RMH 7 | 900 | 215,8 | 3,2 | 35 |
| RMH 8 | 450 | 214,56 | 1,23 | 9 |
| RMH 9 | 900 | 211,6 | 3,1 | 21 |
| RMH 10 | 450 | 210,3 | 2 | 9 |
| RMH 11 | 450 | 210 | 1,53 | 12 |
| RMH 12 | 450 | 209,46 | 1,21 | 12 |
| RMH 13 | 900 | 208 | 3,3 | 10 |
| RMH 14 | 450 | 209,37 | 1,58 | 11 |
| RMH 15 | 450 | 208 | 2 | 19 |
| RMH 16 | 900 | 209,7 | 3,2 | 15 |
| RMH 17 | 900 | 215 | 3,8 | 10 |
| RMH 18 | 450 | 209,53 | 1,33 | 15 |

| Kode | Daya Pelanggan (VA) | Tegangan Terukur (A) | Arus Terukur (A) | Panjang SR (m) | Kode | Daya Pelanggan (VA) | Tegangan Terukur (A) | Arus Terukur (A) | Panjang SR (m) |
|--------|---------------------|----------------------|------------------|----------------|--------|---------------------|----------------------|------------------|----------------|
| RMH 19 | 450 | 208,4 | 2 | 10 | RMH 48 | 900 | 202,56 | 3,74 | 17 |
| RMH 20 | 450 | 207,27 | 1,21 | 10 | RMH 49 | 450 | 201 | 2 | 14 |
| RMH 21 | 450 | 205,2 | 1,8 | 9 | RMH 50 | 450 | 202,4 | 1,2 | 19 |
| RMH 22 | 450 | 205 | 2 | 7 | RMH 51 | 900 | 202 | 2,6 | 12 |
| RMH 23 | 900 | 205,64 | 3,32 | 13 | RMH 52 | 450 | 201,85 | 1,27 | 15 |
| RMH 24 | 450 | 205,6 | 1,2 | 15 | RMH 53 | 450 | 199,62 | 1,39 | 16 |
| RMH 25 | 450 | 204,75 | 1,25 | 13 | RMH 54 | 450 | 199 | 1,5 | 15 |
| RMH 26 | 450 | 203,8 | 1,8 | 14 | | | | | |
| RMH 27 | 900 | 203,2 | 2,3 | 20 | | | | | |
| RMH 28 | 450 | 205,2 | 2 | 16 | | | | | |
| RMH 29 | 450 | 204 | 1,61 | 15 | | | | | |
| RMH 30 | 450 | 204,4 | 1,2 | 8 | | | | | |
| RMH 31 | 900 | 203 | 2,4 | 6 | | | | | |
| RMH 32 | 450 | 203 | 1,83 | 12 | | | | | |
| RMH 33 | 450 | 203,3 | 1,6 | 15 | | | | | |
| RMH 34 | 900 | 203 | 2,2 | 15 | | | | | |
| RMH 35 | 450 | 202,53 | 1,37 | 10 | | | | | |
| RMH 36 | 450 | 204,68 | 1,86 | 10 | | | | | |
| RMH 37 | 450 | 204,14 | 1,72 | 10 | | | | | |
| RMH 38 | 450 | 203,2 | 1,9 | 12 | | | | | |
| RMH 39 | 900 | 203,23 | 3,67 | 10 | | | | | |
| RMH 40 | 450 | 205 | 1,8 | 30 | | | | | |
| RMH 41 | 900 | 204 | 3,32 | 15 | | | | | |
| RMH 42 | 450 | 204 | 1,67 | 17 | | | | | |
| RMH 43 | 450 | 203,26 | 1,28 | 15 | | | | | |
| RMH 44 | 450 | 203,58 | 1,6 | 10 | | | | | |
| RMH 45 | 450 | 204,34 | 1,65 | 13 | | | | | |
| RMH 46 | 900 | 204,2 | 3,2 | 18 | | | | | |
| RMH 47 | 450 | 203,6 | 1,5 | 12 | | | | | |

B. Perhitungan Persentase Pembebanan Transformator

Pengukuran arus pada jaringan distribusi ini bertujuan untuk mengetahui kondisi transformator dalam keadaan beban lebih (*overload*) atau tidak. Jika transformator mengalami beban lebih, maka akan berpengaruh pada kualitas tegangan yang diterima pelanggan. Data pengukuran pembebanan transformator disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data pengamatan pembebanan trafo distribusi 50 kVA

| | Arus Terukur (A) | Arus Total (A) |
|----|------------------|----------------|
| X1 | 56 | 116 |
| X2 | 60 | |
| N | 8,2 | 10 |

Berdasarkan data pengukuran yang ada, dapat dihitung persentase pembebanan transformator sebagai berikut : Untuk menghitung persentase pembebanan transformator, terlebih dahulu menghitung arus beban penuh sesuai dengan (2) sebagai berikut :

$$I \text{ beban penuh} = \frac{50.000 \text{ VA}}{231 \text{ V}}$$

$$I \text{ beban penuh} = 216,45 \text{ A}$$

Setelah itu, dapat dihitung persentase pembebanan transformator sesuai dengan (1) sebagai berikut :

$$\% \text{ Pembebanan Transformator} = \frac{116}{216,45} \times 100\%$$

$$\% \text{ Pembebanan Transformator} = 53,53\%$$

Diperoleh persentase pembebanan transformator sebesar 53,53% atau tidak melebihi 80%.

C. Perhitungan Persentase Jatuh Tegangan Sebelum Rekonfigurasi

Pada perhitungan persentase jatuh tegangan diperlukan data pengukuran tegangan pada Tabel 1. Jatuh tegangan diperoleh dari hasil selisih antara tegangan dari PLN yaitu 231 V (tegangan keluaran transformator) dengan tegangan pelanggan (tegangan terima) yang diukur secara langsung. Persentase jatuh tegangan RMH 1 dihitung dengan menggunakan (4).

$$\% \text{ drop tegangan} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \times 100\%$$

$$\% \text{ jatuh tegangan} = \frac{231 - 215,3}{231} \times 100\%$$

$$\% \text{ jatuh tegangan} = 6,80 \%$$

Perhitungan persentase jatuh tegangan hingga rumah ke 54 menggunakan persamaan dan cara perhitungan yang sama seperti pada rumah kesatu. Berdasarkan hasil perhitungan, persentase jatuh tegangan berada pada rentang 6,58% hingga 13,85%. Terdapat 35 rumah pelanggan melebihi batas ketentuan penurunan tegangan yaitu -10% berdasarkan SPLN 1:1995. Tegangan minimal sesuai ketentuan adalah 207,9 V.

D. Perhitungan Rugi Daya Sebelum Rekonfigurasi

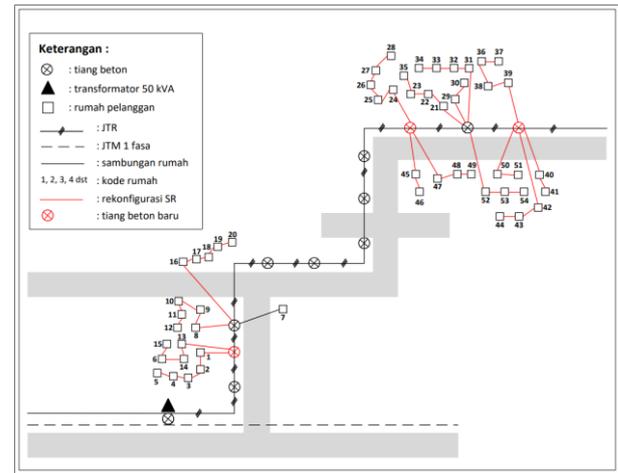
Perhitungan rugi daya yang ditimbulkan akibat sambungan rumah tidak sesuai standar PLN di dusun Wonosobo dilakukan berdasarkan data hasil pengukuran arus setiap konsumen yang dapat dilihat pada Tabel 1. Rugi daya pada sambungan rumah ini dipengaruhi oleh nilai arus, panjang jaringan sambungan rumah, dan resistansi penghantar. Untuk mengetahui rugi daya dilakukan perhitungan menggunakan (5).

Sesuai dengan (5), perhitungan rugi daya pada jaringan SR ini dipengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya nilai arus, panjang jaringan sambungan rumah, dan resistansi penghantar. Salah satu penyebab adanya rugi daya adalah *overload* penghantar JTR, di mana aliran arus melalui penghantar melebihi arus nominal penghantar. Oleh karena itu untuk perlu dilakukan rekonduktor untuk memperkecil resistansi yang melewati penghantar. Semakin besar luas penampang penghantar, semakin kecil resistansinya, sehingga nilai jatuh tegangan semakin kecil. Rekonfigurasi jaringan SR juga dilakukan sebagai upaya mengurangi rugi daya, hal ini dikarenakan panjang penghantar mempengaruhi besarnya nilai rugi daya. Jadi, semakin banyak tarikan sambungan rumah, semakin tinggi nilai rugi daya yang dihasilkan.

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan (5) diperoleh total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar JTR adalah sebesar 2736,47 watt yang terdiri dari rugi penghantar JTR dan rugi penghantar SR.

E. Perencanaan Rekonfigurasi Jaringan Sambungan Rumah

Upaya penanggulangan jatuh tegangan dan rugi daya (*losses*) yang diakibatkan oleh SR tidak sesuai standar PLN dilakukan melalui rekonfigurasi sambungan rumah. Rekonfigurasi sambungan rumah dilakukan dengan melakukan penambahan JTR agar dapat menjangkau sambungan rumah deret paling ujung sehingga jatuh tegangan dapat berkurang.



Gambar 3. Perancangan rekonfigurasi sambungan rumah

Rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dilakukan dengan mengacu pada ketentuan SPLN 56-1:1993 pasal lima yaitu jumlah SLTR pada satu tiang diperbolehkan maksimum 6 SLP dengan tiap SLP diperbolehkan maksimum memiliki 4 tarikan pelanggan. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa jumlah sambungan rumah yang telah dilakukan rekonfigurasi sudah sesuai dengan standar ketentuan teknis pemasangan sambungan rumah sesuai SPLN 56-1:1993. Sebelum melakukan simulasi *load flow analysis* jaringan eksisting, terlebih dahulu dilakukan pembuatan SLD. Pembuatan SLD pada ETAP 12.6.0 dilakukan dengan pengisian parameter sesuai dengan data dan kondisi di lapangan.

F. Simulasi Jaringan Eksisting Sambungan Rumah Sebelum Rekonfigurasi

Penggunaan perangkat lunak ETAP berfungsi untuk menganalisis aliran daya (*load flow analysis*) baik pada jaringan distribusi tenaga listrik yang sudah ada maupun perencanaan perbaikan.

Persentase jatuh tegangan sebelum rekonfigurasi berada pada rentang 5,89% s.d. 12,42%. Untuk memperbaiki jatuh tegangan tersebut maka dilakukan upaya rekonfigurasi SR dengan melakukan penambahan JTR. Diperoleh total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi daya penghantar JTR adalah sebesar 1864,05 watt.

G. Perhitungan Ukuran Penghantar untuk Rekonduktor Jaringan Tegangan Rendah

Setelah membuat SLD kemudian dilakukan simulasi *load flow analysis*. Berdasarkan hasil simulasi *load flow analysis*, terdapat beberapa komponen berwarna merah dan ungu. Komponen yang berwarna ungu menunjukkan suatu kondisi *marginal*, sedangkan komponen berwarna merah menunjukkan kondisi *critical*. Kondisi *marginal* diartikan sebagai kondisi toleransi dan dapat dinyatakan masih aman, sedangkan kondisi *critical* berarti komponen pada sistem tenaga listrik dalam kondisi berbahaya dan harus segera dilakukan evaluasi beserta penanganan. *Setting* persentase *marginal* dan *critical* diatur pada fitur *Load Flow Study Case* pada perangkat lunak ETAP 12.6.0. Persentase *critical* diatur 100% dan persentase *marginal* diatur sebesar 95%.

Dapat dilihat pada *alert view* yang menunjukkan komponen memiliki kondisi *marginal* dan *critical*. Kondisi *critical* terdapat pada beberapa sadapan karena mengalami jatuh tegangan dan penghantar JTR LVTC NFA-2XT 1 mengalami *overload*. Berdasarkan hasil simulasi kondisi *real* dapat diketahui bahwa penyebab jatuh tegangan tidak hanya berasal dari sambungan rumah yang tidak sesuai standar PLN, akan tetapi terdapat penghantar jaringan tegangan rendah yang mengalami *overload*. Penghantar JTR LVTC NFA-2XT 1 mengalami *overload* dikarenakan aliran arus melalui penghantar terlampaui besar sehingga melebihi arus nominal penghantar. Oleh karena itu perlu dilakukan rekonduktor atau memperbesar luas penampang penghantar.

Untuk menentukan luas penampang penghantar yang diperlukan, maka harus dilakukan perhitungan arus yang mengalir melewati penghantar tersebut dengan (7).

$$I = \frac{P}{V \times \cos\theta}$$

$$I = \frac{31500 \text{ VA}}{231 \text{ V} \times 0,8}$$

$$I = 170,45 \text{ A}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, arus yang mengalir melewati penghantar JTR LVTC NFA-2XT 1 sebesar 170,45 A ketika total daya pelanggan 31.500 VA. Berdasarkan PUIL 2000, untuk menentukan KHA suatu penghantar menggunakan perhitungan berikut.

$$KHA = 125\% \times I_{\text{nominal}}$$

$$KHA = 125\% \times I_{\text{nominal}}$$

$$KHA = 125\% \times 170,45$$

$$KHA = 213,06$$

Selanjutnya penentuan luas penghantar ditentukan berdasarkan Kuat Hantar Arus (KHA) penghantar jenis NFA2X yang terdapat pada Tabel 2. Luas penghantar yang paling sesuai adalah jenis NFA2X berukuran 2x95 + 1x70 mm² dengan kuat hantar arus 242 A. Rekonduktor jaringan

tegangan rendah dilakukan untuk memperkecil resistansi yang melewati penghantar, karena luas penampang penghantar berbanding terbalik dengan resistansi penghantar. Semakin besar luas penampang penghantar maka semakin kecil resistansinya. Resistansi penghantar merupakan faktor yang mempengaruhi jatuh tegangan. Diharapkan setelah dilakukan rekonduktor dapat memperbaiki permasalahan jatuh tegangan.

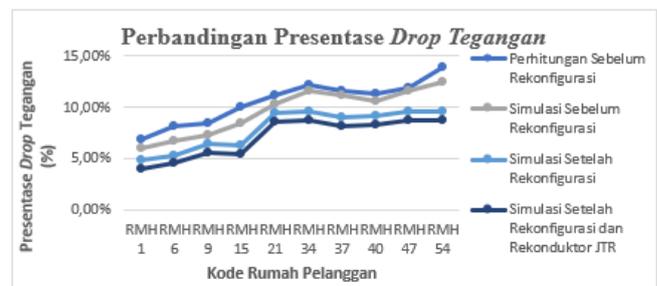
H. Simulasi Perbaikan Jaringan Sambungan Rumah Setelah Rekonfigurasi Menggunakan ETAP 12.6.0

Simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0 dilakukan pada beberapa kondisi yaitu jaringan *eksisting* atau sebelum perbaikan, setelah dilakukan rekonfigurasi, dan setelah dilakukan rekonfigurasi beserta rekonduktor JTR. Tujuannya agar dapat dilakukan perbandingan jatuh tegangan dan rugi daya sebelum maupun sesudah rekonfigurasi SR dan rekonduktor JTR.

Hasil simulasi setelah rekonfigurasi menggunakan ETAP 12.6.0 diperoleh persentase jatuh tegangan pada rentang 4,85% hingga 9,83 % atau berada di bawah batas penurunan jatuh tegangan yaitu -10%. Sedangkan total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar jaringan tegangan rendah adalah sebesar 1212,49 watt.

Hasil simulasi setelah rekonfigurasi dengan melakukan penambahan jaringan tegangan rendah dan rekonduktor menunjukkan bahwa tidak ada jatuh tegangan yang melebihi batas standar yang di tentukan yaitu -10%. Persentase jatuh tegangan berada pada rentang 4.03% hingga 9.00%. Total keseluruhan rugi-rugi sambungan rumah beserta rugi penghantar jaringan tegangan rendah adalah sebesar 1051,17 watt.

Berikut disajikan grafik perbandingan hasil jatuh tegangan sebelum dilakukan rekonfigurasi, setelah dilakukan rekonfigurasi, dan setelah dilakukan rekonfigurasi beserta rekonduktor JTR menggunakan simulasi ETAP 12.6.0. Grafik perbandingan persentase jatuh tegangan menggunakan 10 rumah pelanggan yang diambil secara acak berdasarkan perbedaan jumlah tarikan sambungan rumah. Berikut grafik hubungan antara rumah pelanggan dengan persentase jatuh tegangan baik sebelum dan setelah dilakukan perbaikan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perbandingan persentase jatuh tegangan

Gambar 4 menunjukkan bahwa perbaikan jatuh tegangan dengan menggunakan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan rekonduktor JTR dapat menurunkan nilai jatuh tegangan sebelum rekonfigurasi sebesar 12,42% menjadi 9,00%. Dibandingkan dengan menggunakan satu metode saja yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah, persentase jatuh tegangan turun dari 12,42% menjadi 9,83%. Perbaikan tegangan terendah pelanggan setelah rekonfigurasi yaitu dari tegangan 202,3 V menjadi 219,8 V. Setelah dilakukan perbaikan menggunakan 2 metode tegangan dapat diperbaiki menjadi 221,7 V. Saat ini jatuh tegangan pada pelanggan sudah sesuai dengan standar PLN No. 1:1995.

Dilihat dari aspek ekonomi, penggunaan dua metode memang lebih mahal karena harus melakukan penggantian penghantar JTR, akan tetapi dilihat dari aspek keamanan penghantar JTR yang sudah mengalami *overload* harus dilakukan penggantian untuk mengantisipasi penghantar mengalami panas sehingga dapat berakibat fatal yaitu terbakar dan berujung pada biaya perbaikan. Selain itu, seiring dengan berjalannya waktu pelanggan atau beban akan terus bertambah sehingga perlu dilakukan penggantian penghantar yang disesuaikan dengan arus yang mengalir pada penghantar tersebut ketika beban mencapai 80% (batas pembebanan transformator). Maka dengan mempertimbangkan aspek-aspek tersebut penggunaan dua metode lebih optimal untuk menurunkan *drop* tegangan dan rugi daya pada pelanggan.

Terdapat perbedaan hasil persentase jatuh tegangan dengan perhitungan dan simulasi sebelum perbaikan menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0. Perhitungan keakuratan dilakukan dengan membandingkan *report* ETAP dengan hasil perhitungan secara manual dikali dengan 100%. Adapun perhitungan berdasarkan (8) sebagai berikut :

$$\% \text{ Keakuratan ETAP} = \frac{\bar{X} \text{ Hasil ETAP}}{\bar{X} \text{ Hasil rumus manual}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Keakuratan ETAP} = \frac{9,88\%}{10,64\%} \times 100\%$$

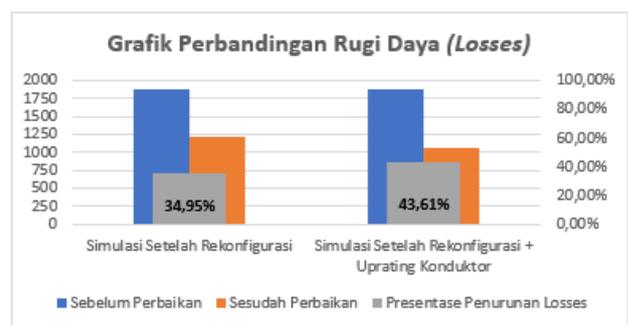
$$\% \text{ Keakuratan ETAP} = 92,91\%$$

Berdasarkan perhitungan diperoleh persen keakuratan ETAP sebesar 92,91% atau dengan tingkat *error* sebesar 7,09%, hal ini dikarenakan simulasi menggunakan ETAP 12.6.0 merupakan kondisi ideal berbeda dengan kondisi di lapangan sehingga terdapat adanya faktor yang tidak dapat diperhitungkan pada ETAP 12.6.0 seperti adanya *overheat* akibat sambungan penghantar kurang kencang yang menimbulkan *losses*.

Berikut disajikan Gambar 5 yaitu grafik perbandingan penurunan rugi daya menggunakan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR dibandingkan

menggunakan 1 metode saja yaitu rekonfigurasi jaringan SR saja.

Berdasarkan grafik perbandingan rugi daya pada Gambar 5 terlihat bahwa penggabungan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan sambungan rumah dan rekonduktor JTR dapat menurunkan rugi daya lebih besar yaitu sebesar 43,61%, dibandingkan dengan menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR sebesar 34,95%. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ETAP 12.6.0, penurunan rugi daya sebelum perbaikan adalah sebesar 1.864,05 watt menjadi 1.212,49 watt dengan perbaikan menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR, sedangkan penurunan nilai rugi daya dengan melakukan perbaikan menggunakan dua metode sebesar 1.051,17 watt.



Gambar 5. Grafik perbandingan rugi daya

IV. SIMPULAN

Setelah dilakukan upaya perbaikan dengan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR menggunakan simulasi ETAP 12.6.0 diperoleh persentase penurunan jatuh tegangan sebesar 27,54%. Presentasi jatuh tegangan dapat diperbaiki dari rentang 5,89% s.d. 12,42% menjadi 4,03% s.d. 9,00%. Berdasarkan standar PLN No. 1:1995 mengenai variasi tegangan pelayanan, persentase jatuh tegangan setelah perbaikan sudah sesuai standar yaitu berada di bawah 10%. Penggabungan dua metode untuk mengatasi permasalahan yang ada mampu menurunkan rugi daya sebesar 43,61%, dibandingkan hanya dengan melakukan rekonfigurasi jaringan SR saja dengan persentase penurunan rugi daya sebesar 34,95%. Penggabungan dua metode untuk mengatasi permasalahan yang ada yaitu dengan rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR efektif untuk memperbaiki jatuh tegangan dan menurunkan rugi daya.

PENELITIAN LANJUTAN

Penggabungan dua metode yaitu rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR memiliki keterbatasan. Metodologi yang digunakan yaitu rekonfigurasi SR yang dilakukan secara manual dan perlu adanya penggantian penghantar JTR, sehingga pada praktiknya di lapangan tentu akan memerlukan biaya dan tenaga yang harus diperhitungkan secara lebih detail.

Perbaikan jatuh tegangan dan rugi daya akibat tarikan sambungan rumah tidak sesuai standar menggunakan metode rekonfigurasi jaringan SR dan rekonduktor JTR merupakan solusi yang baik. Namun, proses rekonfigurasi jaringan SR masih dilakukan secara manual sehingga disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode rekonfigurasi *artificial intelligence* (AI) seperti *binary particle swarm optimization* (BPSO) agar dapat menentukan bentuk konfigurasi jaringan SR paling efisien dengan hasil rugi daya seminimal mungkin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Bapak Dudy Setiawan selaku supervisor teknik PT PLN ULP Magelang Kota yang telah mengizinkan penulis untuk mengambil data penelitian. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, masukan, dan saran pada pengerjaan penelitian yang tidak bisa disebutkan satu-persatu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Syufrijal dan Monantun, "Jaringan Distribusi Tenaga Listrik," *Kemendik. Dasar Menengah Dan Kebud. RI*, vol. 1, p. 203, 2014.
- [2] Pasra dan Ruswandi, "Pelaksanaan Manajemen Pemeliharaan Gardu Distribusi," *J. SUTET*, vol. 6, no. 2, pp. 1–70, 2016.
- [3] Suhadi dan Wrahatnolo, "Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1," *Direktorat Pemb. SMK*, pp. 1–130, 2008.
- [4] Harahap dkk., "Analisa Penambahan Trafo Sisip Sisi Distribusi 20 Kv Mengurangi Beban Overload Dan Jutah Tegangan Pada Trafo Bl 11 Rayon Tanah Jawa Dengan Simulasi Etab 12.6.0," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 1, no. 2, pp. 62–69, 2019.
- [5] Medina dkk., "Analisis Jatuh Tegangan Jaringan Distribusi 20 kV pada Penyulang CPK PT . PLN (Persero) UP3 Bandung," *Pros. Semin. Nas. Energi, Telekomun. dan Otomasi*, p. 10, 2021.
- [6] Kartika dkk., "Analisis Beban Takseimbang Terhadap Rugi-Rugi Daya Dan Efisiensi Transformator KI0005 Jaringan Distribusi Sekunder Pada Penyulang Klungkung," *J. SPEKTRUM*, vol. 5, no. 2, p. 310, 2018.
- [7] N. Zainun, "Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi," *Ppsdm Migas*, vol. 10, no. 02, pp. 435–442, 2021, [Online]. Available: <https://ppsdmmigas.esdm.go.id/id/Profile/sejarah#>
- [8] J. Ju *et al.*, "Pembuatan dan Penyemprotan Cairan Desinfektan untuk Mencegah Penyebaran Covid-19," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 43, no. 1, p. 7728, 2020.
- [9] Abdullah dan Badaruddin, "Analisa Perbaikan Penampang Penghantar Guna Mengurangi Drop Tegangan dan Simulasi Etap 16.0 Pada JTR GD KRDB di Wilayah Kerja PT. PLN (Persero) ULP Serang Kota," *J. Teknol. Elektro*, vol. 11, no. 1, p. 24, 2020.
- [10] Cahyadi dkk., "Analisis Pengaruh Rugi-Rugi Daya Pada Jaringan Transmisi 150 kV Menggunakan Software Etap 12.6," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 126–130, 2022.
- [11] Hasibuan dkk., "Analisa Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Fast Decoupled Menggunakan Software Etap," *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 3, no. 1, pp. 37–45, 2020.
- [12] Safitri dan Ananta, "Simulasi Penempatan Transformator Pada Jaringan Distribusi Berdasarkan Jatuh Tegangan Menggunakan Etap Power Station 12.6.0," *J. Edukasi Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 12–24, 2020.
- [13] Septiani dkk., "Analisis Drop Tegangan Pada Jaringan Tegangan Rendah PT . PLN (Persero) Unit Layanan Pelanggan (ULP) Panakkukang," *Semin. Nas. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 3, no. September, pp. 129–135, 2021.
- [14] SPLN 56-1, *Sambungan Tenaga Listrik Tegangan Rendah (SLTR)*. 1993.
- [15] M. T. . A. C. S. . D. I. M. D. M. . Ir. Hery Purnomo, "Perancangan Kelistrikan Pada Kondotel Borobudur Blimbing Kota Malang," *J. Mhs. Tek. Elektro Univ. Brawijaya*, vol. 2, no. 7, p. 120722, 2014, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/120722/>

Studi Penerapan Filter Digital pada Sistem Pemantau Parameter di Kolam Ikan

Agritian Sevty Fiddariani¹, Budi Sumanto^{1*}

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

*Korespondensi: budi.sumanto@ugm.ac.id

Abstract – Indonesia has great potential in the fisheries sector, especially in the aquaculture sector. Along with the high potential of aquaculture, better attention is also needed to aspects that support aquaculture, such as temperature, pH and water depth. In previous studies, the measurement results of this parameter were not confirmed and were affected by interference. Therefore, a study was conducted regarding the application of digital filter methods that include Kalman filter, moving average filter, and Hanning filter 'to determine which of the three filter methods has the best accuracy value on this tool. By using the Kalman filter, moving average filter and Hanning filter method, the results show that the HCSR-04 sensor is more compatible with the Hanning filter and moving average and Kalman filter, the DS18B20 sensor uses the Hanning filter, and the pH 4502- Sensor C uses the moving average filter and Kalman filter.

Keywords – fish pond, Kalman filter, moving average filter, Hanning filter

Intisari – Indonesia memiliki potensi yang besar pada sektor perikanan terutama pada sektor perikanan budidaya. Seiring dengan tingginya potensi perikanan budidaya maka diperlukan pula perhatian yang lebih baik pada aspek-aspek yang mendukung budidaya perikanan, seperti suhu, pH, dan kedalaman air. Pada penelitian sebelumnya, hasil pengukuran parameter tersebut belum tervalidasi dan terpengaruh oleh gangguan. Oleh karena itu, dilakukan studi mengenai penerapan metode filter digital yang meliputi filter Kalman, *moving average filter*, dan filter Hanning untuk menentukan dari ketiga metode filter tersebut manakah yang terbaik nilai akurasi pada alat tersebut. Dengan menggunakan metode filter Kalman, *moving average filter*, dan filter Hanning, didapatkan hasil bahwa sensor HCSR-04 lebih cocok dengan filter Hanning dan *moving average filter* serta filter Kalman, sensor DS18B20 menggunakan filter Hanning, dan sensor pH 4502-C menggunakan *moving average filter* dan filter Kalman.

Kata kunci – kolam ikan, filter Kalman, *moving average filter*, filter Hanning

I. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi yang besar pada sektor perikanan terutama pada sektor perikanan budidaya. Menurut Rilis Data Kementerian Kelautan dan Perikanan pada triwulan IV tahun 2022, volume perikanan budidaya sebesar 4,39 juta ton [1]. Seiring dengan tingginya potensi perikanan budidaya maka diperlukan pula perhatian yang lebih baik pada aspek-aspek yang mendukung budidaya perikanan. Beberapa aspek yang menjadi acuan adalah parameter suhu, pH, dan kedalaman air. Menurut Kelabora [2] hal tersebut dikarenakan suhu dapat mempengaruhi aktivitas ikan, seperti nafsu makan ikan, pernafasan, reproduksi, dan tentu pertumbuhan ikan. Menurut Arifin [3] nilai pH air yang tidak sesuai dengan batasan optimal ikan akan mengakibatkan gangguan fisik atau fisiologis, stres, bahkan kematian. Menurut Saptarini [4], kedalaman air kolam yang terlalu dangkal memiliki rentang perubahan suhu yang tidak stabil dan cenderung meningkat karena terjadi penetrasi sinar matahari yang lebih tinggi. Akan tetapi apabila kedalaman air kolam terlalu dalam akan mengakibatkan pertumbuhan ikan menjadi lebih lambat karena cahaya matahari akan semakin sulit untuk menembus kedalaman air karena cahaya matahari mengalami penurunan ketika sudut datang matahari semakin kecil.

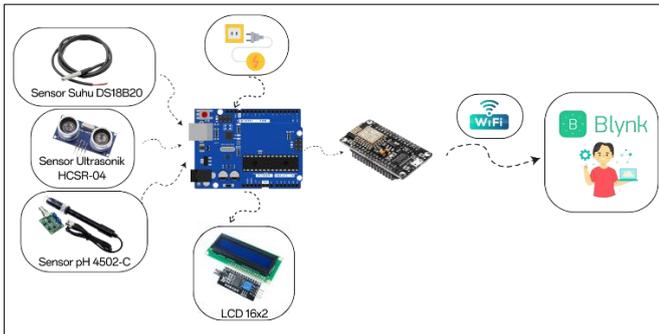
Menurut Fiddariani dan Oktiawati [5], hasil pemantauan data masih dalam bentuk data mentah dan nilai akurasi belum terjamin. Meskipun sudah berbasis otomatis namun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut dikarenakan data hasil pemantauan melalui sensor perlu dilakukan pengolahan sehingga data akan dapat tervalidasi dengan baik.

Pengembangan yang akan dilakukan adalah studi mengenai penerapan beberapa macam metode filter digital dengan tujuan untuk menentukan kebutuhan tiap sensor akan adanya filter serta metode filter yang terbaik nilai akurasi pada alat tersebut.

Oleh karena itu, pada penelitian ini bertujuan untuk dapat merancang sistem, mengetahui kinerja, dan mengetahui performa dengan metode filter Kalman, *moving Average Filter*, dan filter Hanning pada alat pemantau parameter kolam ikan sehingga dapat menentukan metode filter yang terbaik pada alat khususnya pada sensor-sensor yang digunakan. Pemilihan ketiga metode ini didasari oleh literatur yang telah mengaplikasikannya dan diterapkan pada sistem yang berbeda-beda. Ketiga metode filter ini telah diterapkan pada sensor *load cell* dengan hasil penggunaan metode filter Hanning memiliki hasil filter terbaik dibandingkan dengan filter Kalman dan *Moving Average Filter* [6]. Penggunaan filter Kalman telah digunakan pula untuk menstabilkan hasil pengukuran pada implementasi sensor HCSR-04 sebagai anemometer serta sensor suhu pada prototipe di luar angkasa [7, 8]. Selain itu, terdapat pula penelitian yang membandingkan filter Kalman beserta *moving average* sekaligus namun pengimplementasiannya pada *wireless odometer* dan alat pengukur kolesterol non-invasif [9, 10]. Di sisi lain, kedua filter ini juga dapat dikombinasikan bersamaan seperti halnya, penggunaan metode filter Kalman dengan bagian prediksi menggunakan *moving average filter* [11].

II. METODOLOGI

Berdasarkan Gambar 1 yakni blok diagram elektronis, sumber listrik yang memuat tegangan dan arus untuk menyuplai mikrokontroler Arduino Uno dan Node MCU ESP8266 serta komponen yang lain. Data yang diambil oleh ketiga sensor akan diolah oleh Arduino Uno untuk diimplementasikan metode filter Kalman, *moving average filter*, dan filter Hanning secara paralel sehingga hasil implementasi dapat dibandingkan. Selanjutnya data akan dikirim melalui *SoftwareSerial* menuju Node MCU ESP8266 dan akan dikirim melalui WiFi untuk ditampilkan pada aplikasi Blynk. Selain itu, hasil pengukuran data *real* akan ditampilkan pada layar LCD 16x2.



Gambar 1. Blok diagram elektronis

Pengambilan sampel dilakukan dengan menggunakan alat pemantau parameter kolam ikan seperti pada Gambar 2. Alat pemantau parameter ikan akan diletakkan pada kolam ikan. Kolam ikan yang digunakan merupakan kolam budidaya dengan air tawar.

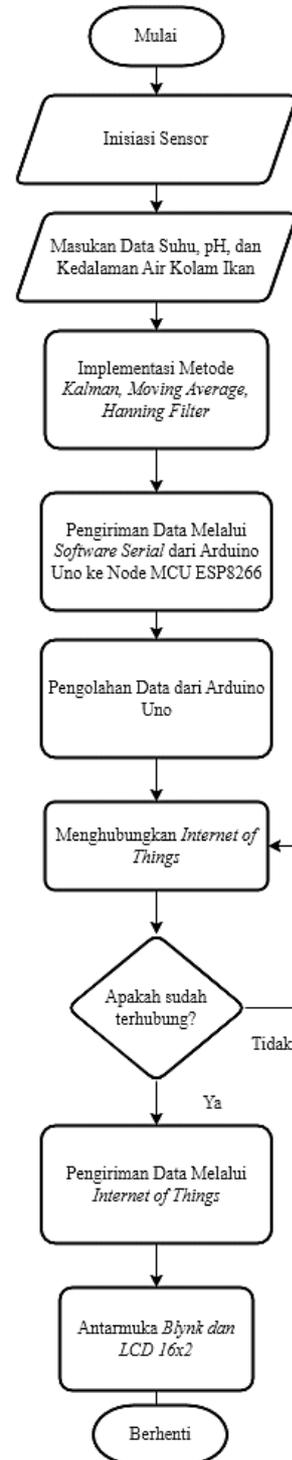


Gambar 2. Hasil desain mekanis dan elektronis

Alat ini mampu mengukur parameter air kolam ikan, seperti suhu, pH, dan kedalaman air. Sensor-sensor yang dimiliki oleh alat ini antara lain sensor suhu DS18B20, sensor pH 4502-C, dan sensor jarak HCSR-04. Bahan baku mekanis yang digunakan adalah akrilik. Bahan tersebut sangat membantu dalam proses *troubleshooting* karna bersifat tembus pandang. Desain dilakukan dengan *software* Inventor.

A. Perancangan dan Implementasi Sistem

Gambar 3 merupakan diagram alir sistem secara keseluruhan yang dimulai dengan inisiasi pin-pin sensor. Setelah inisiasi sensor, maka dilakukan proses penerimaan masukan data parameter kolam ikan, yaitu suhu, pH, dan kedalaman air.



Gambar 3. Diagram alir sistem

Data hasil pengukuran akan diimplementasikan metode filter Kalman, *moving average filter*, dan filter Hanning. Setelah itu, akan dilakukan proses menghubungkan ke sistem *internet of things (IoT)* yang nantinya akan digunakan untuk mengirim data ke *interface*. Apabila proses tersebut tidak berhasil maka aliran sistem akan kembali melakukan proses menghubungkan sedangkan jika proses berhasil maka sistem akan melanjutkan pengolahan data dari Arduino Uno. Data yang telah terolah akan dikirimkan melalui IoT menuju aplikasi antarmuka Blynk dan data akan ditampilkan baik secara bentuk grafik maupun nilai. Selain itu data yang sudah terolah ini akan ditampilkan melalui LCD yang telah terhubung pada perangkat.

Adapun pada pengimplementasian metode filter digital filter Hanning, filter Kalman, dan *moving average filter* menggunakan algoritmanya masing-masing. Pada filter Kalman, algoritma diawali dengan inisialisasi estimasi awal sistem dan ketidakpastian awal estimasi. Selanjutnya dilakukan tahapan prediksi yang terbagi menjadi 2 macam, yaitu nilai estimasi dan ketidakpastian. Apabila tahapan prediksi telah usai, maka akan dilanjutkan pada bagian pembaharuan yang memuat *residual*, *residual covariance*, *kalman gain*, koreksi nilai estimasi, dan koreksi nilai ketidakpastian. Adapun untuk persamaan pembaruan tercantum dalam (1), (2), (3), (4), dan (5).

1) *Residual*: Residual merupakan nilai perbedaan antara pengukuran aktual dan prediksi pengukuran. Selain itu, nilai residual berfungsi untuk mengukur sejauh mana kesesuaian prediksi dengan data aktual.

$$y(k) = z(k) - H * \hat{x}(k|k-1) \quad (1)$$

2) *Residual Covariance*: Pada tahap ini dilakukan pengukuran ketidakpastian *residual*, dihitung berdasarkan ketidakpastian prediksi, matriks pengukuran, dan ketidakpastian pengukuran.

$$S = H * P(k|k-1) * H^T + R \quad (2)$$

3) *Kalman Gain*: *Kalman Gain* adalah faktor penyesuaian yang memadukan prediksi variabel keadaan dengan informasi pengukuran. K dihitung berdasarkan ketidakpastian prediksi, matriks pengukuran, dan *residual covariance*.

$$K = P(k|k-1) * H^T * S^{-1} \quad (3)$$

4) *Koreksi nilai estimasi*: Nilai estimasi mengacu pada peningkatan nilai estimasi variabel keadaan berdasarkan *residual* dan *Kalman Gain*, menghasilkan nilai terbaru dari variabel keadaan.

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K * y(k) \quad (4)$$

5) *Koreksi Ketidakpastian*: Tahap ini bertugas untuk mengoreksi ketidakpastian yang terkait dengan estimasi variabel keadaan setelah pengukuran baru.

$$P(k|k) = (I - K * H) * P(k|k-1) \quad (5)$$

Keterangan:

- H : matriks pengukuran yang menghubungkan nilai estimasi sistem dengan pengukuran aktual
- $z(k)$: data pengukuran aktual pada waktu k
- $\hat{x}(k|k)$: estimasi nilai sistem pada waktu k berdasarkan informasi hingga waktu k
- $P(k|k)$: ketidakpastian estimasi pada waktu k berdasarkan informasi hingga waktu k

Proses akan dilakukan perulangan dari tahap prediksi dan pembaruan untuk setiap iterasi dengan menggunakan data pengukuran baru. Selanjutnya pada bagian metode *moving average filter* memiliki rumusan seperti pada (6).

$$y(i) = \left(\frac{\text{data}_n + \text{data}_{n-1} + \dots}{m} \right) \quad (6)$$

Keterangan:

- $y(i)$: data keluaran ke- i
- data_n : data masukan ke- n
- m : jumlah data masukan

Prinsip kerja *moving average filter* adalah meratakan sejumlah data yang telah didapatkan untuk menentukan tiap data dari keluaran. Proses penyaringan data akan dilakukan terus menerus untuk menghalau derau yang diakibatkan oleh *noise* mekanik [9].

Filter Hanning [12] merupakan suatu filter yang berfungsi menghaluskan sinyal data yang memiliki derau atau *noise*. Prinsip kerjanya adalah dengan mengambil rata-rata tertimbang dari data masukan dengan menggunakan rumusan *hanning window* seperti pada (7).

$$y(i) = \frac{(\text{Data}_{[0]} + 2x\text{Data}_{[1]} + \text{Data}_{[2]})}{4} \quad (7)$$

Keterangan:

- $y(i)$: nilai rata-rata filter Hanning
- $\text{Data}_{[0]}$: sampel data pertama dari masukan sensor
- $\text{Data}_{[1]}$: sampel data sebelumnya yang pertama
- $\text{Data}_{[2]}$: sampel data terakhir

Mean squared error (MSE) adalah suatu perhitungan untuk mengukur rata-rata kesalahan kuadrat antara data aktual dan prediksi yang dihasilkan oleh *moving average filter*, sehingga dapat dievaluasi seberapa baik filter tersebut dalam memperkirakan data aktual. Rumusan MSE tercantum dalam (8).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2 \quad (8)$$

Keterangan:

- n : jumlah data
- Y_i : nilai aktual dari pengamatan ke- i
- Y'_i : nilai prediksi dari pengamatan ke- i

Standar deviasi pada filter Kalman adalah ukuran statistik yang mengukur sebaran data pengukuran atau estimasi, dan menunjukkan tingkat ketidakpastian dalam prediksi atau estimasi yang rumusnya dapat dilihat pada (9). Semakin tinggi standar deviasi, semakin besar ketidakpastian dalam hasil prediksi atau estimasi.

$$\text{Standar Deviasi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (9)$$

Keterangan:

- n : jumlah data dalam dataset
- x_i : nilai data ke- i
- \bar{x} : rata-rata dari seluruh nilai data

Persentase kesalahan adalah metode pengukuran yang digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana perbedaan antara dua nilai atau data. Dalam persentase kesalahan relatif, yang dilakukan adalah menghitung persentase perbedaan antara nilai yang diukur dan nilai referensi, yang kemudian diukur sebagai persentase dari nilai referensi atau nilai yang sebenarnya seperti pada (10).

$$PK = \left| \frac{\text{Data Aktual} - \text{Data Filter}}{\text{Data Aktual}} \right| \times 100\% \quad (10)$$

Keterangan :

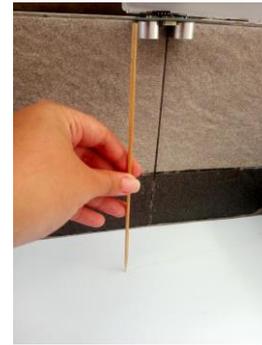
- Data Aktual : data mentah hasil pengukuran
- Data Filter : data hasil filter

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Uji Kalibrasi

Pengujian kalibrasi sensor HCSR-04 dilakukan dengan cara mengambil nilai pada penempatan sensor di bidang datar dan nilai yang didapatkan dibandingkan dengan pengukuran alat ukur meteran pada tempat yang sama. Pengukuran ketinggian dilakukan dengan menghadapkan sensor ke permukaan bawah baik langsung pada permukaan lantai sebagai acuan pada ketinggian 17,4 cm dan pada permukaan benda rata untuk pengukuran ketinggian 13,5 cm seperti pada Gambar 4 dan 5. Hasil persentase kesalahan yang didapatkan adalah 0,52% untuk ketinggian 13,5 cm dan 0,51% untuk ketinggian 17,4 cm.

Pengujian kalibrasi sensor DS18B20 dilakukan dengan cara mengambil nilai pada air biasa dan air hangat dengan nilai suhu yang mendekati nilai suhu air pada kolam ikan seperti pada Gambar 6 dan 7. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan membandingkan besar persentase kesalahan pengukuran oleh sensor terhadap alat ukur banding, yaitu termometer. Hasil yang didapatkan adalah 1,6% untuk suhu 27,5°C dan 0,39% untuk suhu 33,5°C.



Gambar 4. Pengaturan posisi pada ketinggian 17,4 cm



Gambar 5. Pengaturan posisi pada ketinggian 13,5 cm



Gambar 6. Pengaturan suhu 33,5°C



Gambar 7. Pengaturan suhu 27,5 °C

Pengujian kalibrasi sensor pH 4502-C dilakukan dengan kalibrasi secara teknis bawaan dan dibandingkan dengan alat ukur pH meter digital. Persentase kesalahan yang didapatkan adalah 2,3% untuk nilai pH 4,00 dan 1,8% untuk nilai pH 7,00

dengan nilai pengukuran pH meter sebesar 4,32 dan 6,94 seperti pada Gambar 8 dan 9. Berdasarkan nilai persentase kesalahan yang didapatkan, ketiga sensor layak untuk digunakan pada sistem pemantau parameter di kolam ikan.



Gambar 8. Pengaturan pada pH 4,32



Gambar 9. Pengaturan pada pH 6,94

B. Pengujian Tuning Metode Filter

Pada pengujian metode filter Kalman melalui nilai acak untuk mendapatkan nilai R dan Q yang optimal, didapatkan nilai R 0,1 dan Q 0,01 untuk kondisi peredaman *noise* yang stabil namun tidak mengubah karakteristik pola data asli. Proses *tuning* metode filter Kalman dilakukan dengan cara memberikan nilai acak yang dimasukkan ke perhitungan filter Kalman dengan menambahkan nilai R dan Q secara bertahap. Hasil perbandingan antara nilai sebelum dan sesudah filter akan dihitung rata-rata simpangan untuk menentukan simpangan peredaman yang terkecil atau yang terbaik. *Tuning* dihentikan apabila telah didapatkan nilai R dan Q yang memiliki tingkat peredaman *noise* paling baik.

Pengujian pada metode *moving average filter* melalui nilai acak untuk menentukan nilai *window size* yang optimal, nilai acak tersebut antara lain 5, 10, dan 15. Setelah dilakukan uji coba pada nilai acak tersebut, didapatkan nilai *window size* optimal sebesar 10 dengan kondisi peredaman secara maksimal serta rentang jumlah data yang diproses dalam rentang yang terbaik.

C. Perbandingan Hasil Pengukuran Antara Alat Pemantau Parameter Kolam Ikan dengan Alat Ukur Digital

Pengambilan sampel untuk perbandingan dilakukan pada 6 titik waktu selama durasi 39 jam. Sampel yang diambil merupakan kolam ikan budidaya air tawar. Nilai persentase kesalahan yang didapat menyatakan perbandingan selisih

nilai antara pengukuran alat ukur dengan sensor pada pengambilan sampel langsung ke kolam ikan. Hasil persentase kesalahan terendah yang didapatkan untuk sensor HCSR-04 adalah 0,12%, sensor DS18B20 sebesar 0,5%, dan sensor pH 4502-C sebesar 2,22%.

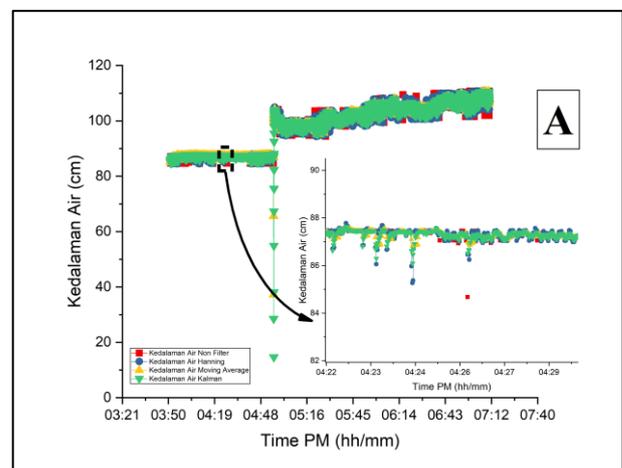
D. Analisis Data Filter Terhadap Perubahan Kondisi Lingkungan

Pada saat pengambilan data terdapat perubahan kondisi lingkungan, yaitu turunnya hujan dengan intensitas cukup tinggi selama beberapa jam. Variabel kontrol yang digunakan dalam penelitian ini adalah objek pengambilan data untuk seluruh metode filter pada kolam ikan nila yang sama serta dilakukan pengambilan data pada waktu yang bersamaan secara serentak. Adapun untuk daftar parameter yang diamati tercantum pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pengamatan

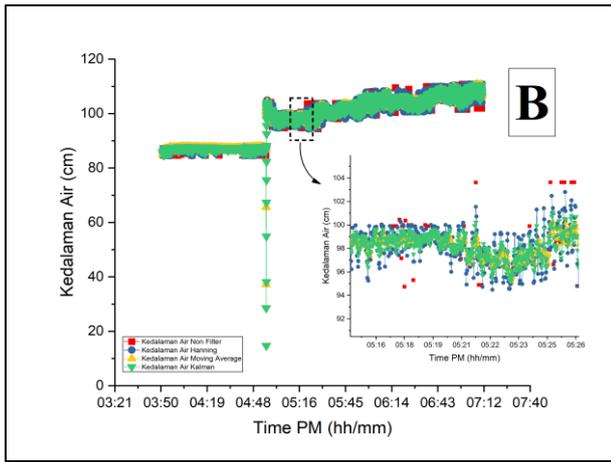
| Sensor | Metode Filter | Parameter |
|-----------|-----------------------|------------------------|
| HCSR-04 | <i>Hanning</i> | Kecepatan respons |
| DS18B20 | <i>Moving average</i> | Peredaman <i>noise</i> |
| pH 4502-C | <i>Kalman</i> | |

1) *Kedalaman Air*: Parameter kedalaman air diukur dengan menggunakan sensor HCSR-04. Sensor ini bekerja dengan cara memantulkan gelombang ultrasonik ke permukaan air dan menghitung jarak melalui durasi waktu pemantulan serta kecepatan gelombang ultrasonik. Hasil perhitungan jarak antara permukaan air akan menjadi nilai pengurang dari total tinggi kolam dan jarak ketinggian sensor dengan permukaan kolam ikan.

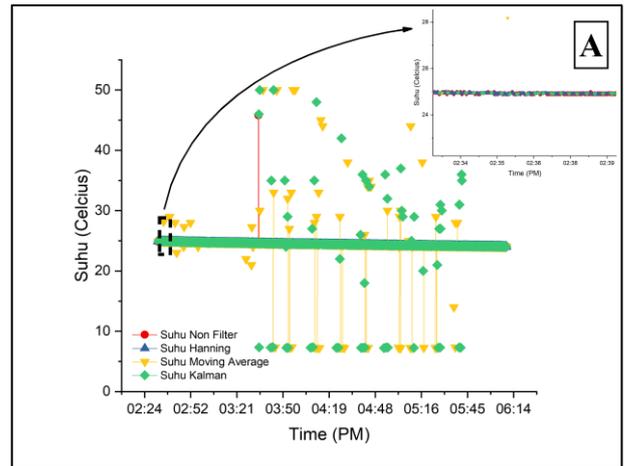


Gambar 10. Grafik kedalaman air sebelum penambahan volume air

Gambar 10 menunjukkan grafik hasil pengukuran ketiga filter dengan grafik A pada kondisi sebelum kenaikan volume air. Volume air meningkat drastis dikarenakan bertambahnya air dari sumber air kolam yang diambil dari sungai. Data yang direpresentasikan dengan garis merah atau pengukuran tanpa filter terdapat beberapa titik yang menandakan *noise* dengan lonjakan nilai yang sangat variatif dan terlampaui jauh.



Gambar 11. Grafik kedalaman air sesudah penambahan volume air



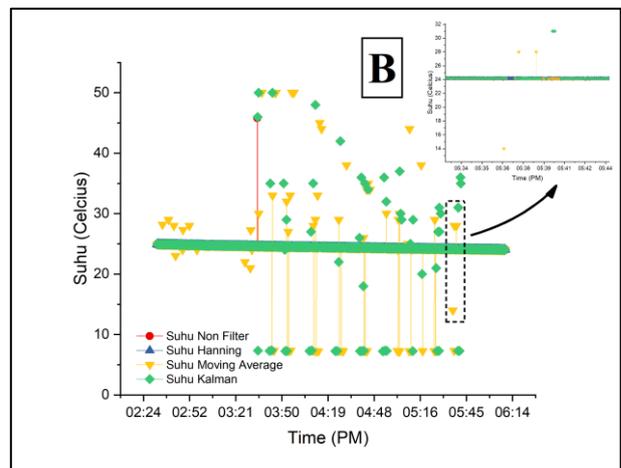
Gambar 12. Grafik suhu sebelum mengalami penurunan

Gambar 11 dengan grafik B adalah sesudah kenaikan volume air. Hasil pengukuran kedalaman air dengan filter Hanning yang berwarna biru memiliki peredaman *noise* namun masih terdapat *noise* yang belum stabil dibanding dengan filter yang lainnya. Namun kecepatan *respons* jauh lebih cepat daripada filter Kalman dan *moving average filter*. Kecepatan *respons* ditentukan dari bentuk grafik hasil filter yang jauh lebih cepat atau lebih awal dalam merespons perubahan data yang masuk dari sensor.

Dari ketiga filter tersebut, dilakukan perbandingan secara perhitungan persentase kesalahan antara data kedalaman air aktual dengan data kedalaman air filter. Persentase kesalahan filter Kalman didapatkan sebesar 0,024%, *moving average filter* sebesar 0,035%, dan filter Hanning sebesar 0,047 %.

2) *Suhu*: Parameter kedalaman air diukur dengan menggunakan sensor DS18B20. Dikarenakan sifat sensor yang anti air, maka sensor langsung dimasukkan ke dalam kolam ikan. Setelah terjadi hujan, suhu air di kolam ikan semakin menurun. Awal mula bernilai 25°C dan terus menurun hingga hampir bernilai 23°C. Berdasarkan grafik A pada Gambar 12, terdapat hasil reaksi filter terhadap perubahan nilai suhu sesaat setelah terjadi hujan. Kemudian untuk penurunan suhu hingga mencapai 23°C. Pada grafik A, grafik pengukuran data tanpa filter tidak mengalami fluktuasi data yang signifikan atau simpangan yang jauh. Gambar 13 dengan grafik B adalah sesudah penurunan suhu air. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai pengukuran filter Kalman dan *moving average* terdapat nilai yang *error* karena fluktuasi data dari sensor sangat kecil.

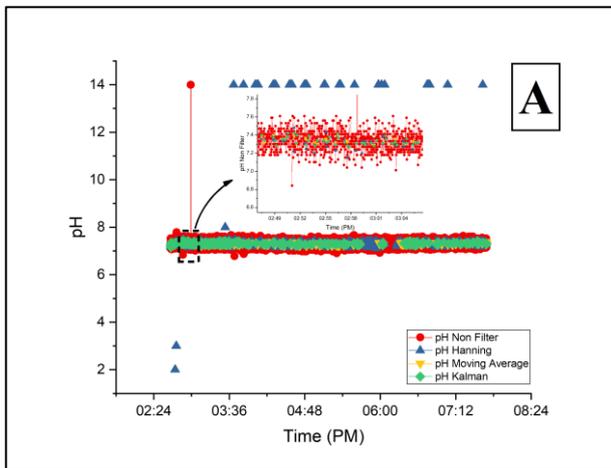
Namun filter Hanning dapat lebih menyesuaikan. Meskipun filter Hanning dapat lebih menyesuaikan, namun hasil pengukurannya tidak jauh berbeda dengan pengukuran tanpa filter. Dari ketiga filter tersebut, dilakukan perbandingan secara perhitungan persentase kesalahan antara data suhu aktual dengan data suhu filter. Persentase kesalahan filter Kalman didapatkan sebesar 0,28%, *moving average filter* sebesar 0,404%, dan filter Hanning 0,084%.



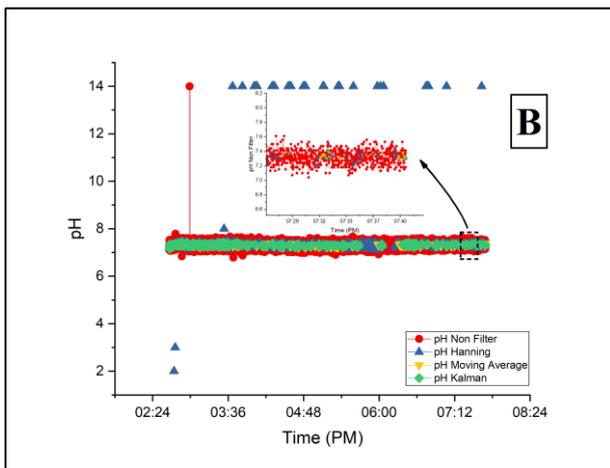
Gambar 13. Grafik suhu sesudah mengalami penurunan

3) *pH*: Parameter pH air kolam ikan diukur dengan menggunakan sensor pH 4502-C. Pada saat terjadinya hujan, nilai pH yang terukur sempat mengalami *error* karna butuh penyesuaian. Akan tetapi setelah melalui penyesuaian selama beberapa detik, pengukuran nilai pH menjadi lebih stabil. Pada saat terjadinya hujan, nilai pH yang terukur sempat mengalami *error* karna butuh penyesuaian. Akan tetapi setelah melalui penyesuaian selama beberapa detik, pengukuran nilai pH menjadi lebih stabil.

Gambar 14 menunjukkan grafik hasil pengukuran ketiga filter dengan grafik A pada kondisi sebelum terjadi hujan dan Gambar 15 dengan grafik B sesudah terjadi hujan. Berdasarkan data yang didapatkan, nilai pengukuran Hasil pengukuran filter Hanning menghasilkan data yang kurang stabil. Hal tersebut dikarenakan sifat karakteristik filter Hanning menyaring *noise* pada bentuk data yang berupa frekuensi sedangkan sensor pH 4502-C menghasilkan data yang tidak berbentuk frekuensi. Hasil pengukuran filter Kalman dan *moving average filter* terbukti dapat meredam *noise* kecuali filter Hanning yang sering terjadi *error*.



Gambar 14. Grafik pH saat terjadi hujan



Gambar 15. Grafik pH sebelum dan sesudah terjadi hujan

Dari ketiga filter tersebut, dilakukan perbandingan secara perhitungan persentase kesalahan antara data pH aktual dengan data pH filter. Persentase kesalahan filter Kalman didapatkan sebesar 0,014%, *moving average filter* sebesar 0,272%, dan filter Hanning 1,364%.

Dari keseluruhan grafik pengukuran data pada Gambar 10 hingga Gambar 15 dilakukan analisis secara perhitungan pada empat jenis data pada setiap grafiknya baik pengukuran kedalaman air, suhu, maupun pH. Tabel 2 menunjukkan perhitungan nilai standar deviasi dari *Kalman Filter*. Berdasarkan nilai standar deviasi, *Kalman Filter* dapat meredam data *noise* yang terjadi pada sensor HCSR-04. Penggunaan *Kalman Filter* yang dapat meredam *noise* juga diimplementasikan pada sensor *fusion*, sensor MPU-6050, dan *node* sensor IoT [13, 14, 15]. Hasil pada ketiga pengimplementasian tersebut adalah filter Kalman dapat meredam adanya kesalahan pengukuran data yang disebabkan oleh adanya *noise* pada pengukuran data melalui sensor tersebut. Hal tersebut juga terbukti pada penelitian ini dengan sensor HCSR-04 dan pH 4502-C.

Tabel 2. Standar deviasi filter Kalman

| Jenis | Tanpa Filter | Filter |
|---------------|--------------|----------|
| Kedalaman Air | 8,1218 | 8,0049 |
| Suhu | 0,39736 | 2,7596 |
| pH | 0,12823 | 0,040542 |

Tabel 3 menunjukkan perhitungan MSE untuk menentukan rata-rata data selisih antara nilai pengukuran tanpa filter dan pengukuran dengan filter untuk metode *moving average filter*. Semakin kecil nilai MSE maka fluktuasi data *noise* akan semakin kecil pula. Penggunaan *moving average filter* dianalisis juga pada mikrokontroler berarsitektur AVR 8-bit [16].

Tabel 3. MSE *moving average filter*

| Jenis | Tanpa Filter | Filter |
|---------------|--------------|----------|
| Kedalaman Air | 0,042355 | 0,005082 |
| Suhu | 0,09326 | 0,095041 |
| pH | 0,065458 | 0,062189 |

Tabel 3 menunjukkan nilai perhitungan *error Hanning Filter* untuk menentukan persentase kesalahan antara pengukuran *Hanning Filter* dengan pengukuran data asli. Semakin kecil nilai *error* maka semakin kecil pula fluktuasi pengukuran yang terjadi.

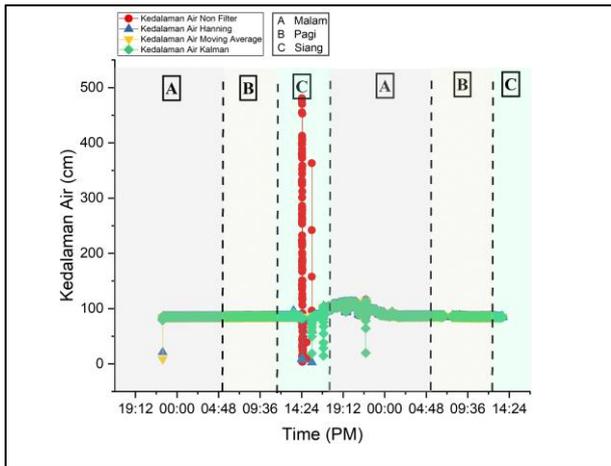
Tabel 4. *Error filter Hanning*

| Jenis | Tanpa Filter | Filter |
|---------------|--------------|---------|
| Kedalaman Air | 0,2005% | 0,1430% |
| Suhu | 1,2582 % | 1,2489% |
| pH | 3,7267% | 3,8548% |

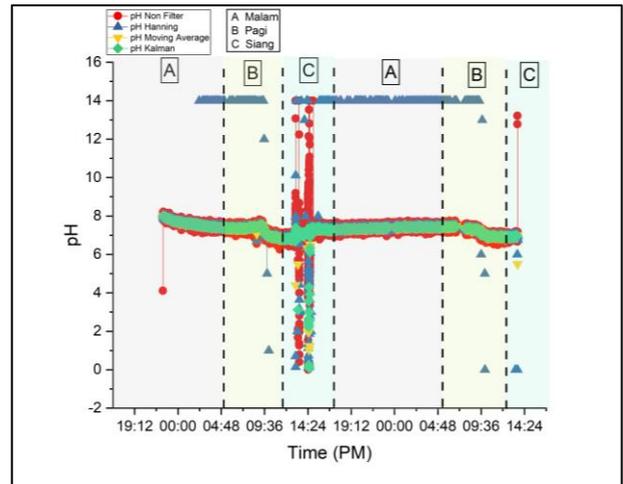
E. Analisis Data Filter Terhadap Perubahan Waktu

Pada Gambar 10, Gambar 11, dan Gambar 13 terbagi menjadi beberapa bagian antara lain area A merupakan waktu malam hari dari pukul 18.00 WIB hingga 06.00 WIB, area B merupakan waktu pagi hari dari pukul 06.00 WIB hingga 12.00 WIB, dan area C merupakan waktu siang hari dari pukul 12.00 WIB hingga 18.00 WIB.

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 16, pada malam, pagi, hingga siang kedalaman air berada pada nilai yang stabil, yaitu kisaran 85 cm. Akan tetapi pada pukul 14.00 WIB terjadi hujan deras yang mengakibatkan pembacaan *error* sesaat dan bertambahnya volume air kolam. Setelah mengalami kenaikan pada area C hingga area A yang ke 2 namun kedalaman air berangsur menurun hingga pagi dan siang hari. Meskipun sempat terjadi *error* pada saat terjadinya hujan namun ketiga filter dapat menyesuaikan.



Gambar 16. Data kedalaman air terhadap perubahan waktu

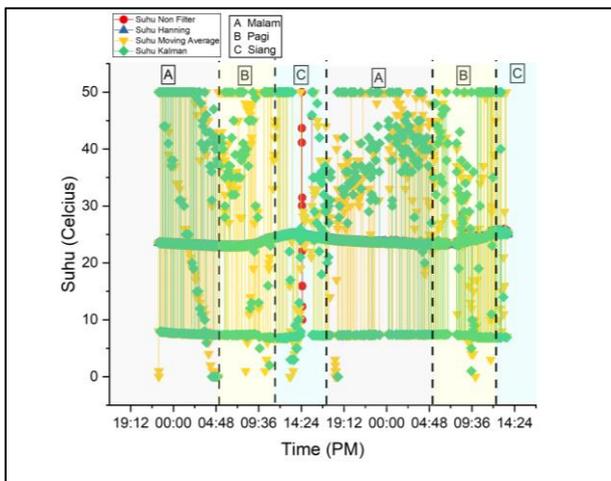


Gambar 18. Data pH terhadap perubahan waktu

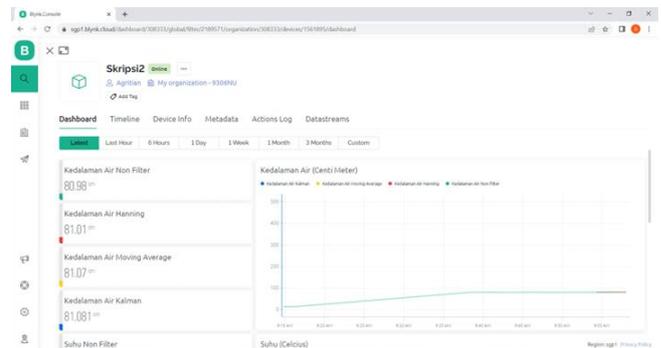
Kondisi *error* terjadi hanya beberapa saat dan sensor HCSR-04 dapat secepatnya kembali normal dan stabil untuk mengukur kedalaman air. Melalui data kedalaman air terhadap perubahan waktu, sejatinya ketiga filter dapat meredam *noise* sehingga nilai kedalaman air lebih stabil.

F. Analisis Sistem

Sistem pemantau parameter di kolam ikan dibuat dengan menggunakan sistem IoT. Hasil pengukuran data ditampilkan secara *realtime* untuk nilai digital dan ditampilkan pula melalui grafik. Gambar 19 menunjukkan tampilan pada perangkat komputer dan Gambar 20 menunjukkan tampilan pada gawai.



Gambar 17. Data suhu terhadap perubahan waktu



Gambar 19. Tampilan Blynk pada perangkat komputer

Berdasarkan hasil pengamatan pada Gambar 17, nilai pengukuran suhu mengalami perubahan terhadap waktu, yakni ketika pagi hari dan malam hari suhu cenderung menurun sedangkan pada siang hari suhu cenderung meningkat. Akan tetapi pengukuran filter Kalman dan *moving average filter* mengalami fluktuasi yang tinggi kecuali filter Hanning meskipun peredamannya sangat sedikit karna sensor DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi.

Berdasarkan pengamatan pada Gambar 18, perubahan nilai pH yang terukur oleh sensor pH 4502-C terhadap perubahan waktu sangat bervariasi. Pada malam hari nilai pH cenderung meningkat dan menuju siang hari nilai pH menurun. filter Kalman dan *moving average filter* dapat meredam *noise* lebih baik daripada filter Hanning.



Gambar 20. Tampilan Blynk pada gawai

IV. SIMPULAN

Berdasarkan hasil implementasi metode filter digital, dapat disimpulkan bahwa sensor HCSR-04 lebih cocok dengan filter Hanning untuk kecepatan *respons* dan *moving average filter* serta filter Kalman untuk meredam *noise*, sensor DS18B20 tidak membutuhkan penambahan filter, dan sensor pH 4502-C dengan *moving average filter* dan filter Kalman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada:

1. Bapak Nur Rohman Rosyid, S.T., M.T., D.Eng, Ketua Departemen Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, UGM Yogyakarta
2. Bapak Hidayat Nur Isnianto, S.T., M.Eng., Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol, Departemen Teknik Elektro dan Informatika, UGM Yogyakarta

Serta berbagai pihak yang telah membantu dalam keberhasilan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. d. I. S. J. K. K. d. P. Pusat Data, "Rilis Data Kelautan dan Perikanan Triwulan IV Tahun 2022," Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta, 2022.
- [2] D. M. Kelabora, "PENGARUH SUHU TERHADAP KELANGSUNGAN HIDUP DAN PERTUMBUHAN LARVA IKAN MAS (CYPRINUS CARPIO)," *Terubuk*, vol. 38, no. 1, pp. 71-81, 2010.
- [3] O. Z. Arifin, V. A. Prakoso dan B. Pantjara, "KETAHANAN IKAN TAMBAKAN (*Helostoma temminckii*) TERHADAP BEBERAPA PARAMETER KUALITAS AIR DALAM LINGKUNGAN BUDIDAYA," *Jurnal Riset Akuakultur*, vol. 12, no. 3, pp. 241-251, 2017.
- [4] D. Saptarini, "Pola Sebaran Intensitas Cahaya Vertikal Dan Pengaruhnya Terhadap Kelimpahan Serta Keanekaragaman Jenis Fitoplankton Di Perairan Juata Kota Tarakan," Perpustakaan UBT : Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, 2013.
- [5] A. S. Fiddariani dan U. Y. Oktiawati, "Design and Implementation of Temperature and pH Monitoring Tools in Fish Pond Based on Arduino
- [6] R. . A. Anwari dan W. S. Pambudi, "Implementasi Hanning Filter, Kalman Filter dan Moving Average filter pada Pengisian Air Minum Isi Ulang Otomatis," *Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika*, vol. 1, no. 1, pp. 7-12, 2021.
- [7] I. A. Kuncara, J. E. Suseno, A. Setyawan dan I. Gunadi, "Development of Ultrasonic Anemometer Using HC-SR04 with Kalman Filter Based on Microcontroller Integrated IoT," Semarang, Indonesia, 2020.
- [8] X. Zhang, H. Liang, J. Feng dan H. Tan, "Kalman Filter Based High Precision Temperature Data Processing Method," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, no. 832346, pp. 1-7, 2022.
- [9] F. A. Chalifatullah, W. S. Pambudi dan I. Masfufiah, "Implementasi Moving Average dan Kalman Filter pada Wireless Odometer untuk Informasi Service Kendaraan Bermotor," *Jurnal Sistem Komputer dan Informatika (JSON)*, vol. 4, no. 1, pp. 156-164, 2022.
- [10] H. I. Romadhoni, R. Maulana dan E. R. Widasari, "Implementasi Analisis Perbandingan Filter Kalman, Moving Average dan Eksponensial pada Alat Pengukur Kadar Kolesterol berbasis Non-Invasif," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 6, no. 9, pp. 4571-4579, 2022.
- [11] N. Siripool, K. Galajit, J. Karnjana, T. Phatrapornnant dan W. Kongprawechnon, "Canopy Temperature Estimation Using Kalman Filtering with Moving Average Algorithm for Durian Orchard's Monitoring System," dalam *2022 61st Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Japan, 2022.
- [12] T. Iskandar dan H. M. Saputra, "Perbandingan Average Filter dengan Hanning Filter pada Pengolahan Sinyal Load Cell," *Seminar Nasional Itenas, Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia..*
- [13] K. Č. M. Mostarac dan K. Miličević, "Impact of Different Noise Distributions in the Application of Kalman Filter in Sensor Fusion," dalam *2022 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST)*, Osijek, 2022.
- [14] P. A. Zartika, M. Kusumawardani dan K. Koesmariyanto, "Rancang Bangun Mouse untuk Penyandang Disabilitas Menggunakan Sensor MPU-6050 dengan Metode Kalman Filter sebagai Peredam Noise," *Jurnal Jaringan Telekomunikasi*, vol. 11, no. 4, pp. 188-194, 2021.
- [15] J. Kwon dan D. Park, "Implementation of computation-efficient sensor network for Kalman filter-based intelligent position-aware application.," dalam *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIC)*, Japan, 2020.

Analisis Kebutuhan Bank Kapasitor Untuk Perbaikan Faktor Daya di PT Beras Rajawali Menggunakan *Optimal Capacitor Placement* ETAP 19

Barik Irfani Al Firdausi¹, M. A'an Auliq¹, Fitriana^{1,*}

¹Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Jember, barikfirdausi@gmail.com; aan.auliq@unmuhjember.ac.id;

*Korespondensi: fitriana@unmuhjember.ac.id

Abstract – Currently, the demand for electrical energy is continuously increasing due to growing needs, including in the industrial sector such as PT Beras Rajawali, which is continually expanding its production facilities to meet the rising demand. The increase in the number of production units will result in a decrease in power factor that needs to be addressed promptly. One way to mitigate or reduce power losses due to low power factor is by installing a capacitor bank, as demonstrated in this study. The installation of this capacitor bank is expected to operate effectively and efficiently, necessitating prior analysis through simulation before the actual installation of the capacitor bank. The analysis method employed in this research is *Optimal Capacitor Placement (OCP)* using ETAP software. Simulation results and calculations indicate that installing a capacitor bank on a bus with a decreased power factor successfully restores the power factor to normal levels. This is evident from the fact that, before the capacitor bank installation, the current on both buses reached 101.1 A and 111.4 A, whereas after the capacitor bank was installed, the current decreased to 67.9 A and 78.5 A.

Keywords – capacitor bank, ETAP 19, optimal capacitor placement, power factor

Intisari – Saat ini, permintaan energi listrik terus meningkat karena kebutuhan yang bertambah, termasuk di sektor industri seperti PT Beras Rajawali yang terus memperluas fasilitas produksinya guna memenuhi permintaan yang semakin tinggi. Adanya peningkatan jumlah unit produksi akan terjadi penurunan faktor daya yang perlu segera diatasi. Salah satu cara untuk mengatasi atau mengurangi kerugian daya akibat faktor daya yang rendah adalah dengan memasang bank kapasitor. Pemasangan bank kapasitor ini diharapkan dapat bekerja secara efektif dan efisien sehingga perlu dilakukan analisis terlebih dahulu melalui simulasi sebelum dilakukan pemasangan bank kapasitor secara *real*. Metode analisis yang digunakan pada penelitian ini yaitu *Optimal Capacitor Placement (OCP)* menggunakan *software* ETAP. Hasil simulasi dan perhitungan menunjukkan bahwa pemasangan bank kapasitor pada bus yang mengalami penurunan faktor daya berhasil mengembalikan faktor daya menjadi normal. Hal ini terlihat ketika sebelum dipasang bank kapasitor, arus pada kedua mencapai 101,1 A dan 111,4 A, sedangkan setelah dipasang bank kapasitor, besarnya arus menurun menjadi 67,9 A dan 78,5 A.

Kata kunci – capacitor bank, ETAP 19, optimal capacitor placement, faktor daya

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem ketenagalistrikan terdapat tiga jenis faktor daya yang dikenal, yaitu faktor daya *leading* (terdahulu), faktor daya *unity*, dan faktor daya *lagging* (terbelakang). Faktor daya *unity* terjadi ketika tegangan sefase dengan arus. Sementara itu, pada faktor daya *lagging*, fase arus tertinggal dari tegangan. Hal ini menggambarkan situasi di mana beban rangkaian bersifat induktif. Sedangkan pada faktor daya *leading*, fase arus mendahului tegangan yang merujuk pada kondisi di mana beban rangkaian bersifat kapasitif. Ketika terjadi penurunan faktor daya, perbaikan diperlukan bukan hanya untuk mengurangi rugi-rugi daya (*power loss*), tetapi juga untuk mengurangi biaya operasional listrik, mengurangi penurunan tegangan, dan meningkatkan kapasitas sistem [1].

Salah satu cara untuk mengurangi ataupun memperbaiki rugi-rugi daya (*power loss*) yang diakibatkan oleh faktor daya yang rendah adalah dengan melakukan pemasangan bank kapasitor [2]. Bank kapasitor ini dipasang pada beban induktif atau ketika fase arus berada dalam kondisi *lagging* [3]. Untuk beban yang bersifat kapasitif atau ketika fase arus berada dalam kondisi *leading*, diperlukan pemasangan induktor untuk menyelaraskan tegangan dan arus agar sefase atau *unity*. Penggunaan kapasitor ini dapat menghasilkan penghematan daya reaktif.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Billahi [4], dilakukan pengamatan terhadap perubahan faktor daya sebagai akibat dari pemasangan bank kapasitor di unit *boiler* PPSDM Migas (Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak dan Gas Bumi) Cepu. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, pemasangan bank kapasitor dengan nilai kapasitans 45 kVAR tersebut menyebabkan perubahan nilai faktor daya yang awalnya 89,0 menjadi meningkat menjadi 97,6 sesuai dengan target faktor daya yang diinginkan. Arus pada saluran bus juga mengalami penurunan dari yang sebelumnya 16,4 A menjadi 14,9 A .

Penelitian lainnya terkait penggunaan bank kapasitor juga pernah dilakukan oleh Nurmahandy [5]. Pada penelitian tersebut, peneliti mengaplikasikan metode *Fast Decoupled* dan ETAP untuk mensimulasikan perbaikan faktor daya menggunakan bank kapasitor pada Penyulang Barata PT PLN (Persero) Ngagel Surabaya.

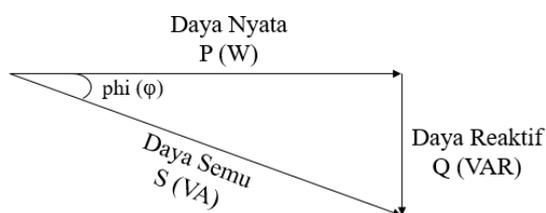
PT Beras Rajawali merupakan salah satu perusahaan yang bergerak dalam industri pengolahan pangan. Aktivitas industri yang dilakukan oleh PT Beras Rajawali banyak menggunakan motor listrik yang merupakan beban induktif. Namun, penggunaan motor listrik tersebut tidak diimbangi dengan beban kapasitif. Selain itu, PT Beras Rajawali juga belum menggunakan bank kapasitor. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya penurunan faktor daya (*power*

factor) yang di dalam sistem kelistrikan dikenal dengan nama $\cos \phi$ ($\cos \phi$). Faktor daya yang rendah dapat menimbulkan berbagai masalah diantaranya yaitu kerugian finansial, pemborosan energi, dan infrastruktur kelistrikan menjadi terbebani. Salah satu solusi untuk mengatasi ketidakseimbangan dalam penggunaan beban induktif dan kapasitif yaitu dengan menggunakan bank kapasitor. Keuntungan yang akan didapatkan dari penggunaan bank kapasitor diantaranya yaitu dapat menurunkan jatuh tegangan, mengurangi rugi-rugi daya, dan memperbaiki faktor daya. Berdasarkan latar belakang ini, maka pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mengetahui kebutuhan bank kapasitor di PT Beras Rajawali menggunakan metode *Adaptive Newton Raphson* dan *tool Optimal Capacitor Placement (OCP)* pada ETAP 19.0. Hal ini dilakukan untuk memastikan perhitungan kebutuhan bank kapasitor lebih akurat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Daya Listrik dan Segitiga Daya

Daya yaitu besarnya energi listrik yang diserap oleh suatu rangkaian setiap satuan waktu. Daya listrik dikelompokkan tiga bagian, daya real (P), daya semu (S), yang terakhir daya reaktif (Q) [6]. Hubungan antara ketiga daya tersebut dapat digambarkan melalui segitiga daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Segitiga daya

Berdasarkan Gambar 1, daya nyata (P), daya reaktif (Q) dan daya semu (S) dapat ditentukan menggunakan (1) – (3), dan perhitungan faktor daya mengacu pada (4) [7].

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (1)$$

$$S = V \times I \quad (2)$$

$$Q = V \times I \times \sin \phi = \sqrt{P^2 + S^2} \quad (3)$$

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (4)$$

Keterangan:

- P : daya nyata (watt)
- V : tegangan (volt)
- I : arus (A)
- $\cos \phi$: faktor daya
- Q : daya reaktif (VAR)
- S : daya semu (VA)

B. Faktor Daya

Faktor daya adalah rasio antara daya aktif dan daya semu [8]. Faktor daya, juga dikenal sebagai faktor kerja, mencerminkan sudut fase antara daya aktif dan daya semu dalam sistem listrik. Daya aktif digunakan untuk menggerakkan peralatan konsumen dalam jaringan listrik [9], sementara daya semu dihasilkan oleh generator pembangkit dan disalurkan ke pelanggan [10].

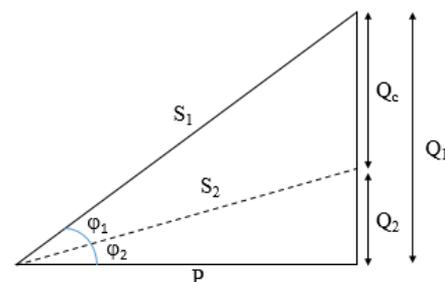
Penambahan daya reaktif akan mengakibatkan penurunan faktor daya listrik [11]. Salah satu cara sederhana untuk mencegah penurunan faktor daya listrik adalah dengan memilih peralatan konsumen yang memiliki faktor daya tinggi atau dengan memasang kapasitor. Kapasitor adalah komponen listrik yang menghasilkan daya reaktif ketika terhubung dalam jaringan listrik. Pemasangan kapasitor dapat meningkatkan faktor daya, dan ketika faktor daya ditingkatkan, daya reaktif dapat berkurang dan mendekati nilai daya aktif [10].

Sebuah peralatan dengan faktor daya 1.0 merupakan peralatan yang hanya memiliki resistansi murni dan merupakan pemakaian yang paling efisien dalam jaringan listrik. Sebaliknya, peralatan dengan faktor daya rendah (0,5) mengandung induktansi yang menyebabkan kerugian lebih tinggi dalam sistem pasokan tenaga listrik [7]. Faktor daya rendah terkait dengan perbedaan fase antara arus dan tegangan pada terminal peralatan. Biasanya, sudut fase rendah disebabkan oleh penggunaan peralatan induktif seperti transformator, motor induksi, lampu TL, dan peralatan elektronik lainnya.

Semakin kecil faktor daya yang digunakan maka akan semakin besar arus ke beban. Arus yang lebih tinggi dari yang diperlukan sangat tidak diinginkan karena semakin besar pula rugi-rugi daya pada saluran dan peralatan distribusi listrik yang lain.

C. Perbaikan Faktor Daya

Sebuah kapasitor daya yang sering dinamakan bank kapasitor itu memiliki daya Q_c yang setara daya reaktif sistem yang diperbaiki oleh faktor daya [12]. Ketika sudah terpenuhi, bank kapasitor menaikkan faktor daya ke nilai maksimum yaitu $\cos \phi = 1$. Besarnya daya reaktif Q_c yang dibutuhkan untuk mengubah faktor daya dari $\cos \phi_1$ menjadi $\cos \phi_2$ bisa diilustrasikan melalui Gambar 2.



Gambar 2. Perbaikan faktor daya

Berdasarkan Gambar 2, besar daya reaktif kapasitif (Q_c) dapat ditentukan menggunakan (5) [13].

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (5)$$

Keterangan:

- P : daya nyata (watt)
- φ_1 : sudut sebelum perbaikan
- φ_2 : sudut setelah perbaikan
- Q_c : besar daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya (VAR)

Selanjutnya, besar nilai dari kapasitor per fase yang diperlukan untuk perbaikan faktor daya dapat dihitung menggunakan (6).

$$\Delta C = \frac{Q_c}{3V^2 2\pi f} \quad (6)$$

Keterangan:

- ΔC : besar nilai kapasitor per fase
- f : frekuensi (Hz)
- V : tegangan (V)
- Q_c : besar daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya (VAR)

D. Perhitungan Arus dan Daya

Sistem kelistrikan tiga fase merupakan sistem kelistrikan yang terdiri dari tiga keluaran yang bersifat simetris, dengan perbedaan sudut 120° pada setiap fase. Persamaan daya yang digunakan yaitu (7)-(9).

$$P = S \times \cos \varphi \quad (7)$$

$$Q = S \times \sin \varphi \quad (8)$$

$$S = P + Q \quad (9)$$

Selanjutnya, dari rumusan tersebut dilakukan pengembangan perhitungan yang digunakan untuk menemukan nilai Q_L dan Q_C . Nilai-nilai ini diperlukan untuk menentukan kapasitor dan induktor yang akan digunakan dalam upaya perbaikan faktor daya. Perhitungan untuk menentukan induktor yang dibutuhkan dapat dilakukan dengan menggunakan (10)-(12).

$$S_1 = P / \cos \varphi \quad (10)$$

$$Q_L = \sqrt{S_1^2 - P^2} \quad (11)$$

$$L_{total} = Q_L / L \quad (12)$$

E. Bank Kapasitor

Dalam usaha untuk memperbaiki faktor daya dan mengatur tegangan dalam jaringan listrik, *engineer* menggunakan bank kapasitor yang menawarkan sistem

kompensasi daya reaktif. Pada saluran transmisi, beban yang bersifat induktif akan menyerap daya reaktif, yang pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan tegangan di sisi penerima. Bank kapasitor berperan penting dalam kompensasi daya reaktif ini dan memastikan agar tegangan tetap pada level yang sesuai ketika beban mencapai puncaknya.

Pemasangan bank kapasitor merupakan langkah untuk menyediakan pasokan daya reaktif tambahan [14], yang pada gilirannya akan mengurangi penyerapan daya reaktif oleh sistem yang disebabkan oleh beban. Tujuan dari tindakan ini adalah untuk mengurangi penurunan tegangan dan kerugian dalam jaringan. Selain meningkatkan nilai tegangan, pengaturan tegangan dengan menggunakan bank kapasitor juga dapat meningkatkan faktor daya. Hal ini dikarenakan pemasangan bank kapasitor dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban [15]. Dengan mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban dalam sistem, nilai faktor daya dapat ditingkatkan. Bank kapasitor memberikan manfaat yang signifikan dalam kinerja sistem distribusi, karena mampu mengurangi kerugian energi, meningkatkan kapasitas layanan, dan mengurangi penurunan tegangan [16].

F. Software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)

Dalam perancangan dan analisis sistem tenaga listrik, sangat penting memiliki perangkat lunak aplikasi untuk mencerminkan kondisi nyata sebelum sistem diimplementasikan. Salah satu aplikasi perangkat lunak yang digunakan untuk menyimulasikan sistem tenaga listrik adalah ETAP (*Electric Transient and Analysis Program*) *Power Station* 19.0. ETAP memiliki kemampuan untuk melakukan simulasi tenaga listrik dalam mode *offline*, serta dapat digunakan secara *online* untuk mengelola data secara *real-time* atau mengendalikan sistem secara langsung. Aplikasi ini menyediakan berbagai fitur, termasuk yang digunakan untuk menganalisis pembangkitan energi listrik, sistem transmisi, dan distribusi energi listrik [17].

Dalam analisis sistem tenaga listrik, diagram saluran tunggal (*single line diagram*) digunakan sebagai notasi yang disederhanakan untuk merepresentasikan sistem tenaga listrik tiga fase. Sebagai alternatif dari menggambarkan saluran tiga fase secara terpisah, digunakan sebuah konduktor tunggal. Pendekatan ini mempermudah pembacaan diagram dan studi rangkaian. Komponen listrik seperti pemutus rangkaian, transformator, kapasitor, *busbar*, dan konduktor lainnya dapat diwakili menggunakan simbol yang telah di standarisasi untuk diagram saluran tunggal.

G. Optimal Capacitor Placement Software ETAP (Electrical Transient and Analysis Program)

Simulasi OCP berfungsi memperbaiki level tegangan sistem dengan menambah kapasitor pada bus yang mengalami *drop voltage* secara otomatis. Artinya ETAP 19 akan menghitung berapa kapasitas kapasitornya dan berapa jumlah bank kapasitor minimal yang mampu memperbaiki

sistem sehingga kita tidak perlu menghitung secara manual. Pada penempatan kapasitor yang optimal dapat dilakukan dengan cara-cara sebagai berikut:

- 1) Memasukkan data pembangkit, data beban, jumlah bus dan data impedansi pada saluran ke dalam *software* ETAP.
- 2) Melakukan proses *load flow* dengan menggunakan metode *Newton Raphson* untuk mengetahui kondisi di sistem.
- 3) Menjalankan optimalisasi penempatan kapasitor pada *software* ETAP.
- 4) Kemudian lihat di mana lokasi dari kapasitor yang optimal dan kapasitas dari kapasitor hasil menjalankan optimalisasi penempatan kapasitor menggunakan ETAP.
- 5) Melakukan pemasangan bank kapasitor sesuai dengan hasil optimalisasi lalu jalankan program *load flow* kembali.

H. Metode Newton Raphson

Metode *Newton Raphson* dalam penyelesaian aliran daya menggunakan prinsip dari Deret Taylor untuk fungsi dengan dua variabel atau lebih. Metode ini digunakan untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya dengan memanfaatkan persamaan non linier untuk mengestimasi tegangan dan sudut fase pada setiap bus. Daya injeksi pada bus i adalah seperti pada (13).

$$P_i - jQ_i = V_i * \sum Y_{ij} V_j n_j \quad (13)$$

Keterangan:

- P_i : daya aktif ke- i
 Q_i : daya reaktif ke- i
 V_i : tegangan ke- i
 Y_{ij} : admitans

Dalam hal ini dilakukan pemisahan daya nyata dan daya reaktif pada bus i . Pemisahan ini akan menghasilkan suatu set persamaan simultan non linier. Dalam koordinat kutub diketahui sesuai pada (14)-(16).

$$|V_i| \angle \delta_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad (14)$$

$$|V_j| \angle \delta_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad (15)$$

$$|V_{ij}| \angle \delta_{ij} = |V_{ij}| e^{j\delta_{ij}} \quad (16)$$

Karena $e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})} = \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})$ maka pemisahan daya pada bus i menjadi komponen real dan imajiner yaitu digunakan (17)-(18).

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum Y_{ij} V_j \angle \theta_{ij} + \delta_j = n j = 1 \quad (17)$$

$$|V_i| e^{-j\delta_i} \sum Y_{ij} V_j \angle (e^{j(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij})}) n j = 1$$

$$P_i = \sum |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) n j = 1 \quad (18)$$

$$Q_i = \sum |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j - \delta_i + \theta_{ij}) n j = 1 \quad (19)$$

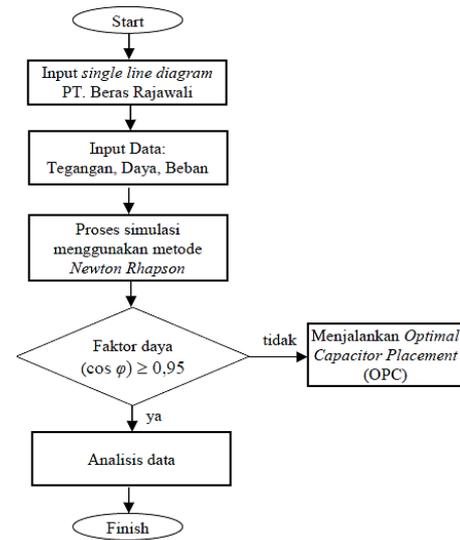
Nilai daya aktif (P_i) dan daya reaktif (Q_i) telah diketahui, tetapi nilai tegangan (V_i) dan sudut (δ_i) tidak diketahui kecuali

pada *slack bus* [18]. Kedua persamaan non linier tersebut dapat diuraikan menjadi suatu set persamaan simultan linier dengan cara menyatakan hubungan antara perubahan daya nyata ΔP_i daya reaktif ΔQ_i terhadap perubahan *magnitude* tegangan ΔV_i dan sudut fase tegangan $\Delta \delta_i$.

III. METODOLOGI

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir kegiatan simulasi pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3. Kegiatan simulasi dimulai dengan menggambar *single line diagram* pada ETAP 19 sebagai rekonstruksi sistem kelistrikan PT Beras Rajawali kemudian input data pembangkit generator (P gen, Q gen, Q max, Q min) dan *high voltage* Perusahaan Listrik Negara (PLN) (P PLN, Q PLN, Q max, Q min), data beban {V mag, sudut fase tegangan δ , daya aktif (P), daya reaktif (Q)}, jumlah bus, dan data impedansi pada saluran ke dalam *software* ETAP 19. Selanjutnya dilakukan simulasi proses aliran beban menggunakan metode *Newton Raphson* untuk mengetahui sistem di PT Beras Rajawali. Jika faktor daya ($\cos \phi$) terbaca kurang dari 0,95 maka dilakukan perbaikan faktor daya dengan fitur OCP pada ETAP 19 dan jika faktor daya terbaca lebih dari sama dengan 0,95 maka dilakukan analisis dan simulasi selesai.



Gambar 3. Flowchart simulasi perbaikan faktor daya

B. Sumber Data

Data awal pada penelitian ini diperoleh dari dua sumber utama, yaitu informasi yang tercatat dalam dokumen dan yang tercantum dalam spesifikasi komponen kelistrikan. Selanjutnya, guna memvalidasi dan memperkuat data tersebut, dilakukan wawancara dengan petugas atau teknisi kelistrikan yang berhubungan dengan unit alat penggilingan dan pengeringan beras. Berikut data awal yang digunakan untuk penelitian ini:

1) *Data Sumber Tenaga Listrik:* Sumber PLN merupakan pemasok utama tenaga listrik yang ada di PT Beras Rajawali. Tenaga listrik PLN mencakup seluruh beban listrik yang ada di pabrik. Tabel 1 merupakan data sumber tenaga listrik high voltage PLN pada PT Beras Rajawali:

Tabel 1. Data sumber tenaga listrik PLN pada PT Beras Rajawali

| No. | Parameter | Keterangan |
|-----|--------------|------------|
| 1 | Daya (kVA) | 197 kVA |
| 2 | Arus (A) | 300 A |
| 3 | Tegangan (V) | 380 V |
| 4 | Daya (kW) | 157,6 kW |

Selain menggunakan sumber tenaga listrik dari PLN, PT Beras Rajawali juga menggunakan sumber tenaga listrik dari genset. Genset ini merupakan cadangan sumber tenaga listrik apabila PLN mengalami pemadaman. Terdapat dua buah genset yang digunakan oleh PT Beras Rajawali yaitu Genset 1 untuk memenuhi beban listrik pada mesin penggiling padi sedangkan Genset 2 untuk memenuhi beban listrik pada empat unit mesin pengemas beras dan beban-beban lain seperti lampu, komputer dan kulkas. Data kedua genset tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data genset pada PT Beras Rajawali

| No. | Parameter | Genset 1 | Genset 2 |
|-----|---------------|--------------|-----------------|
| 1 | Merek | Kadegen | Matsumoto |
| 2 | Tipe | KD-50 W | MDG-40 SSE/SSDV |
| 3 | Tegangan | 220/380 | 220/380 |
| 4 | Daya (kW/kVA) | 44 kW/55 kVA | 32 kW/40 kVA |
| 5 | Arus | 73,4 A | 60,7 A |

2) *Data Transformator:* Transformator (Trafo) merupakan komponen yang memiliki peran cukup penting dalam proses pendistribusian yang terjadi pada tenaga listrik. Peran utama dari trafo adalah mengubah besaran listrik yang bersumber dari PLN. Tabel 3 menunjukkan data trafo yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 3. Data transformator

| No. | Parameter | Trafo 1 | Trafo 2 | Trafo 3 |
|-----|-----------|-------------|-------------|-----------|
| 1 | Merek | Trafoindo | Trafoindo | Centrado |
| 2 | Daya | 315 kVA | 315 kVA | |
| 3 | Tegangan | 20 kV-400 V | 20 kV-400 V | 400-220 V |

3) *Data Beban:* Beban yang digunakan pada penelitian ini yaitu mesin penggiling dan mesin pengemas yang digunakan pada PT Beras Rajawali dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi beban

| No. | Parameter | Mesin Penggiling | Mesin Pengemas |
|-----|-----------|------------------|----------------|
| 1 | Merek | Wanma | OCPACK |
| 2 | Tipe | MNM-5 Rice Mill | OC-420AZ |
| 3 | Daya | 25 W | 5,5 kW / unit |

C. *Pemodelan Single Line Diagram*

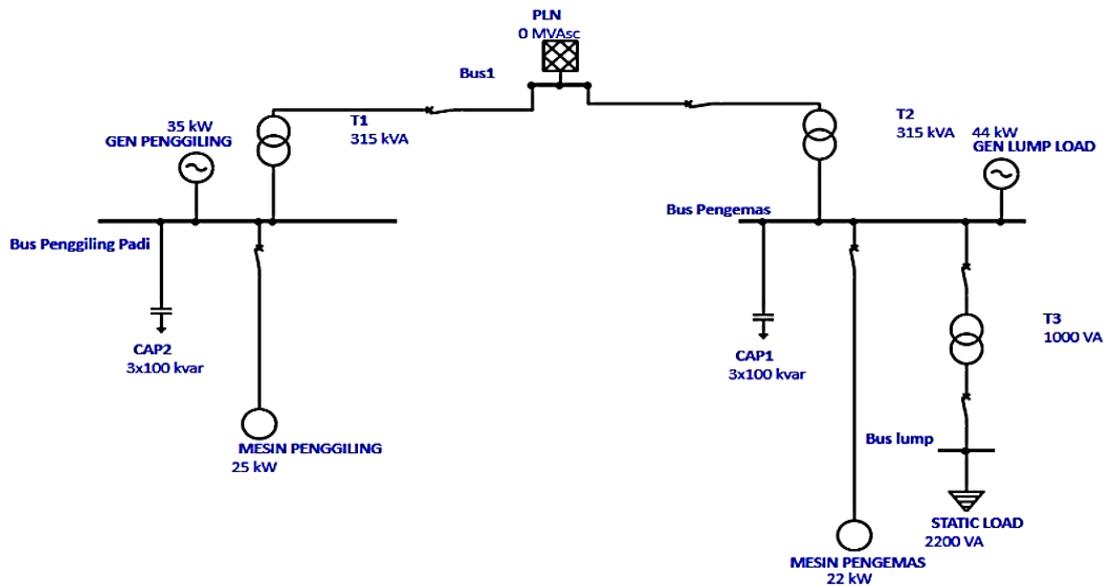
Gambar 2 menunjukkan pemodelan *single line diagram* yang digunakan pada penelitian ini. Dari gambar pemodelan tersebut sumber tenaga listrik yang digunakan adalah sumber tegangan PLN dan dua unit genset. Untuk sumber PLN dengan besar tegangan 197 kV dijadikan sebagai sumber utama yang mencakup segala proses produksi dan proses administrasi dalam pabrik. Sedangkan untuk dua unit genset berfungsi sebagai tenaga cadangan apabila terjadi pemadaman yang dilakukan oleh PLN. Penggunaan dua unit genset terbagi menjadi dua beban yang berbeda. Untuk Gen 1 dengan daya 32 kW untuk memenuhi kebutuhan satu unit mesin penggiling padi dengan daya beban sebesar 25 KW pada bus 2 dan Gen 2 pada bus dengan daya 44 kW untuk memenuhi kebutuhan dua beban sekaligus yakni empat unit mesin pengemasan dengan daya total sebesar 8 kW dan *static load* seperti lampu, komputer dan alat elektronik yang memiliki daya total sebesar 0,4 kW. Kemudian dari pemodelan tersebut bisa dilihat terdapat tiga unit transformator *step down*. Transformator 1 penghubung antara bus 1 dan bus 2, transformator 1 menurunkan dari tegangan 197 kV ke tegangan 30 kV. Begitu pun dengan transformator 2 yang menjadi penghubung bus 1 dan bus 3, transformator 2 menurunkan dari tegangan 197 kV ke tegangan 30 kV. Transformator 1 dan Transformator 2 digunakan untuk menghidupkan mesin penggiling dan pengemas. Kemudian transformator 3 merupakan trafo yang menurunkan tegangan dari bus 3 sebesar 30 kV menjadi 0,4 kV yang berada di bus 4 yang akan digunakan sebagai sumber tegangan beban statis.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Perbaikan Faktor Daya Sistem Tenaga Listrik*

Dalam studi kasus yang dilakukan di PT Beras Rajawali faktor daya yang didapatkan ketika seluruh beban (mesin penggiling dan mesin pengemas) dinonaktifkan, maka di dapat faktor daya sebesar 0,85. Besar faktor daya ini masih perlu diperbaiki karena dalam penelitian ini hasil faktor daya yang harus dicapai adalah lebih dari sama dengan 0,95. Tabel 5 merupakan data utama terkait sumber daya kelistrikan di PT Beras Rajawali.

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran besar faktor daya yang terjadi apabila beberapa step bank kapasitor dimatikan secara bertahap. *Power bank controller* yang digunakan di PT Beras Rajawali menggunakan enam step bank kapasitor dengan total daya reaktif 600 kVAR berkapasitas 100 kVAR.



Gambar 2. Pemodelan *single line diagram* sistem kelistrikan pabrik beras PT Beras Rajawali menggunakan ETAP 19

Ketika dilihat secara langsung bahwa terdapat tiga step dengan masing-masing berukuran 100 kVAR diaktifkan. Hal ini dapat dijadikan perbandingan dengan hasil simulasi ETAP nantinya. Pengukuran data faktor daya dilakukan dengan mengaktifkan dua beban mesin. Untuk beban statis tidak terdapat bank kapasitor karena kecilnya daya reaktif yang di timbulkan. Data yang dihasilkan dari pengukuran ini seperti pada Tabel 6. Sesuai dengan Tabel 6 dapat diketahui bahwa dalam kondisi satu step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya hanya mencapai 0,67 dengan arus yang cukup besar 106,57 A. Kemudian kondisi dua step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya bertambah baik tapi belum mencapai sempurna hanya mencapai 0,75 dengan arus yang cukup baik tetapi masih tinggi yaitu 95,20 A. Ketika tiga step kapasitor diaktifkan, maka faktor daya berada di titik yang di inginkan yaitu 0,85 dan arus sudah stabil yaitu 60,7 A. Semakin besar arus dan semakin kecil faktor daya maka semakin besar nilai kerugian yang dialami oleh PT Beras Rajawali.

Tabel 5. Data sumber kelistrikan di PT Beras Rajawali

| No. | Parameter | Keterangan |
|-----|-------------------------------------|------------|
| 1 | Daya Nyata Utama (kVA) | 197 kVA |
| 2 | Cos phi | 0,85 |
| 3 | Daya Aktif Utama (kW) | 167,45 |
| 4 | Daya Aktif Keluar dari Trafo 1 (kW) | 28,28 |
| 5 | Daya Aktif Keluar dari Trafo 2 (kW) | 30,85 |

Begitu pun juga dengan keadaan faktor daya yang pada mesin pengemas beras. Sesuai dengan Tabel 7 dapat diketahui bahwa dalam kondisi satu step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya hanya mencapai 0,74 dengan arus yang cukup besar 108,11 A. Kemudian kondisi dua step bank kapasitor diaktifkan, maka kondisi faktor daya bertambah baik tapi belum mencapai sempurna hanya mencapai 0,792

dengan arus yang cukup baik tetapi masih tinggi yaitu 101,00 A dan ketika tiga step kapasitor diaktifkan maka faktor daya berada di titik yang di inginkan yaitu 0,85 dan arus sudah stabil yaitu 73,34. Selanjutnya dilakukan perhitungan faktor daya dalam kondisi terbaik.

Tabel 6. Data faktor daya yang berubah akibat pengurangan step bank kapasitor pada beban mesin penggiling padi (bus 2)

| No. | Faktor Daya | Arus | Tegangan | Keterangan |
|-----|-------------|--------|----------|------------------|
| 1 | 0,67 | 106,57 | 0,4 kV | 1 Step Terpasang |
| 2 | 0,75 | 95,20 | 0,4 kV | 2 Step Terpasang |
| 3 | 0,85 | 70,7 | 0,4 kV | 3 Step Terpasang |

Dalam hal ini, peneliti akan menghitung faktor daya dengan faktor daya 0,95 atau lebih tinggi dari apa yang diterapkan pada PT Beras Rajawali. Kemudian untuk batasan titik terendah dari faktor daya yang akan diperbaiki sebesar 0,65. Tabel 8 merupakan hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 2 untuk beberapa nilai faktor daya.

Tabel 7. Data faktor daya yang berubah akibat pengurangan step bank kapasitor pada beban mesin pengemas beras (bus 3)

| No. | Faktor Daya | Arus | Tegangan | Keterangan |
|-----|-------------|--------|----------|------------------|
| 1 | 0,74 | 108,11 | 0,4 kV | 1 Step Terpasang |
| 2 | 0,792 | 101,00 | 0,4 kV | 2 Step Terpasang |
| 3 | 0,85 | 73,34 | 0,4 kV | 3 Step Terpasang |

Tabel 8 menunjukkan kondisi faktor daya jika berada di angka 0,65 maka akan menghasilkan arus sebesar 108,77 A. Jika faktor daya menunjukkan angka 0,95 maka akan menghasilkan arus sebesar 74,42 A. Hal ini terjadi karena

semakin besar faktor daya dapat menghasilkan arus yang kecil. Ketika faktor daya berada di angka 0,65 dibutuhkan daya reaktif kapasitif 23,76 kVAR. Apabila faktor daya berada di angka 0,95, dibutuhkan daya reaktif kapasitif sebesar 0. Hal ini terjadi karena semakin besar faktor daya maka kebutuhan daya reaktif kapasitif akan semakin kecil. Ketika faktor daya berada diangka 0,65 maka membutuhkan 1 bank kapasitor yang akan di aktifkan untuk mendapatkan faktor daya yang maksimal. Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka membutuhkan 0 bank kapasitor yang akan di aktifkan. Saat arus berada diangka 108,77 A maka daya reaktif kapasitif adalah 23,76 kVAR. Apabila arusnya 74,42 A maka daya reaktifnya adalah 0 kVAR. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil arus maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang di gunakan. Ketika daya reaktif kondisi drop diangka 33,96 kVAR maka besar kebutuhan daya reaktif kapasitif berada diangka 23,76 kVAR.

Apabila daya reaktif kondisi drop berada pada angka 9,3 kVAR maka kebutuhan daya reaktif kapasitif 0 kVAR. Hal ini terjadi karena semakin kecil daya reaktif kondisi drop maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang diperlukan. Tabel 9 menunjukkan kondisi faktor daya jika berada di angka 0,65 maka akan menghasilkan arus sebesar 118,65 A. Jika faktor daya menunjukkan angka 0,95 maka akan menghasilkan arus sebesar 81,18 A. Hal ini terjadi karna semakin besar faktor daya dapat menghasilkan arus yang kecil. Jika faktor daya berada di angka 0,65 maka akan membutuhkan daya reaktif kapasitif 25,93 kVAR. Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka akan membutuhkan daya reaktif kapasitif sebesar 0. Hal ini terjadi karena semakin besar faktor daya kebutuhan daya reaktif kapasitif akan semakin kecil. Ketika faktor daya berada diangka 0,65 maka membutuhkan 1 bank kapasitor yang akan di aktifkan untuk mendapatkan faktor daya yang maksimal.

Tabel 8. Hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 2

| Faktor Daya (PF) | | Arus (A) | Daya Aktif (kW) | Besar Daya Reaktif Kondisi Drop (kVAR) | Besar Kebutuhan Daya Reaktif Kapasitif (kVAR) | Step Kapasitor yang Dibutuhkan |
|-------------------|-------------------|----------|-----------------|--|---|---|
| Sebelum Perbaikan | Setelah Perbaikan | | | | | |
| 0,65 | 0,95 | 108,77 | 28,28 | 33,06 | 23,76 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,70 | 0,95 | 101 | 28,28 | 28,85 | 19,55 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,75 | 0,95 | 94,27 | 28,28 | 24,94 | 15,64 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,80 | 0,95 | 88,38 | 28,28 | 21,21 | 11,91 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,85 | 0,95 | 83,177 | 28,28 | 17,53 | 8,23 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,9 | 0,95 | 78 | 28,28 | 13,70 | 4,40 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,95 | 0,95 | 74,42 | 28,28 | 9,3 | 0 | 0 Steps Diaktifkan (0 steps x 100 kVAR) |

Tabel 9. Hasil perhitungan kondisi besar arus dan kebutuhan step kapasitor pada bus 3

| Faktor Daya (PF) | | Arus (A) | Daya Aktif (kW) | Besar Daya Reaktif Kondisi Drop (kVAR) | Besar Kebutuhan Daya Reaktif Kapasitif (kVAR) | Step Kapasitor yang Dibutuhkan |
|-------------------|-------------------|----------|-----------------|--|---|---|
| Sebelum Perbaikan | Setelah Perbaikan | | | | | |
| 0,65 | 0,95 | 118,65 | 30,85 | 36,07 | 25,93 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,70 | 0,95 | 110,18 | 30,85 | 31,47 | 21,33 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,75 | 0,95 | 102,83 | 30,85 | 27,21 | 17,07 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,80 | 0,95 | 96,41 | 30,85 | 23,14 | 13,00 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,85 | 0,95 | 90,74 | 30,85 | 19,12 | 8,98 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,9 | 0,95 | 85,7 | 30,85 | 14,94 | 4,80 | 1 Steps Diaktifkan (1 steps x 100 kVAR) |
| 0,95 | 0,95 | 81,18 | 30,85 | 10,14 | 0 | 0 Steps Diaktifkan (0 steps x 100 kVAR) |

Apabila faktor daya berada di angka 0,95 maka membutuhkan 0 bank kapasitor yang akan di aktifkan. Saat arus berada diangka 118,65 A maka daya reaktif kapasitif adalah 25,93 kVAR. Apabila arusnya 81,18 A maka daya reaktifnya adalah 0 kVAR. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin kecil arus maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang digunakan. Jika daya reaktif kondisi drop diangka 36,07 kVAR maka besar kebutuhan daya reaktif kapasitif berada diangka 25,93 kVAR. Apabila daya reaktif kondisi drop berada pada angka 10,14 kVAR maka kebutuhan daya reaktif kapasitif 0 kVAR. Hal ini terjadi karena semakin kecil daya reaktif kondisi drop maka semakin kecil juga daya reaktif kapasitif yang diperlukan.

B. Simulasi Load Flow saat Bank Kapasitor tidak Aktif Menggunakan ETAP 19

Simulasi menggunakan *software* ini berfungsi sebagai acuan untuk melihat kondisi sistem saat beban penuh. Kemudian melihat besaran arus yang ada pada masing-masing bus, melihat besaran daya aktif, besaran daya reaktif, dan melihat kondisi faktor daya. Kemudian hasil simulasi nanti akan dilakukan perbandingan dengan hasil perhitungan yang sudah dilakukan dengan persamaan sebelumnya. Gambar 3 merupakan keadaan sistem yang sedang disimulasikan dan tampak *load flow* pada saat beban puncak menunjukkan nilai-nilai pada setiap *busbar*.

Pada Gambar 3, *load flow* menunjukkan besarnya daya nyata dan besarnya tegangan yang ada pada setiap *busbar*. Dapat dilihat bahwa pada Bus Penggiling padi dan Bus pengemas berwarna merah. *Busbar* yang berwarna merah ini menunjukkan bahwa terjadi *undervoltage* dan bisa

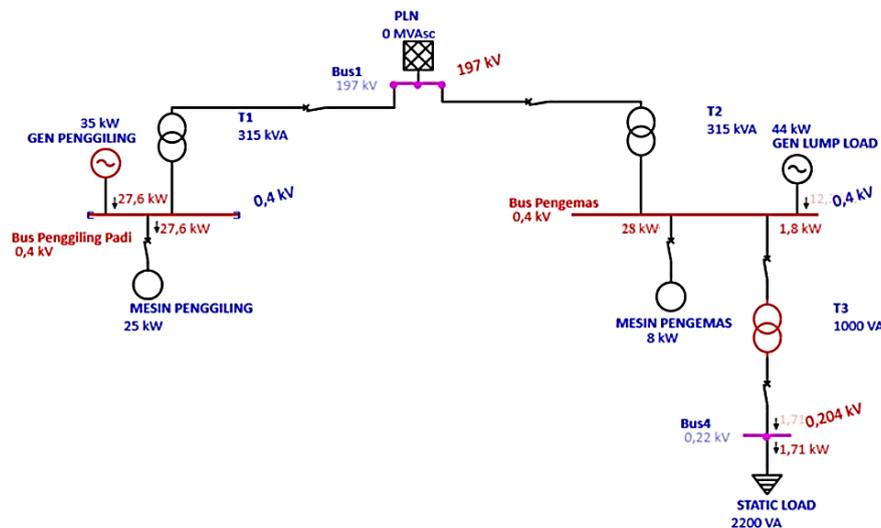
dikarenakan tingginya daya reaktif yang muncul akibat beban motor induksi. Untuk *busbar* yang berwarna ungu menunjukkan bahwa walaupun *undervoltage* tetapi masih dalam batas aman. Tabel 10 adalah tabel daya nyata yang ada pada setiap bus yang akan dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan galat persentase.

Tabel 10. Daya aktif pada hasil simulasi ETAP 19

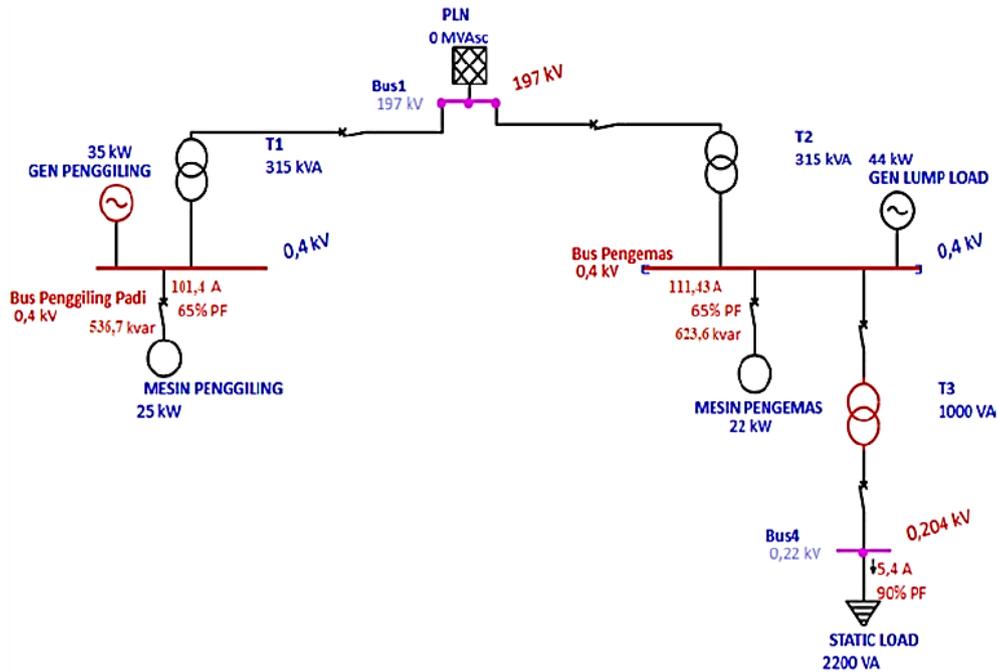
| No. | Parameter | Keterangan |
|-----|---------------------------------------|------------|
| 1 | Daya Aktif Bus Penggilingan Padi (kW) | 27,6 |
| 2 | Daya Aktif Bus Pengemas (kW) | 29,8 |
| 3 | Daya Aktif Bus 4 (kW) | 1,71 |
| 4 | Tegangan Bus 1 (kV) | 197 |
| 5 | Tegangan Bus Penggiling Padi (kV) | 0,4 |
| 6 | Tegangan Bus Pengemas (kV) | 0,4 |
| 7 | Tenaga Bus 4 (kV) | 0,204 |

Setelah didapatkan hasil dari daya aktif pada setiap bus khususnya pada bus yang memiliki beban motor induksi, maka dilanjutkan menganalisis persentase error dari hasil perhitungan teori dengan hasil simulasi. Berdasarkan hasil perhitungan, seperti pada Tabel 11, diketahui bahwa ada selisih sebesar 0,68 kW pada bus penggiling padi dengan persentase error sebesar 2,4% dan selisih sebesar 1,05 pada bus pengemas dengan persentase error sebesar 3,4%. Dapat diambil keputusan dari hasil persentase error tersebut yang menunjukkan bahwa perhitungan dan simulasi memiliki nilai yang sangat dekat.

Setelah melihat yang terjadi dengan daya nyata, maka selanjutnya memperhatikan sistem kelistrikan yang terjadi dengan daya reaktif dan arus yang ditimbulkan akibat bank kapasitor tidak diaktifkan dan akibat beban motor induktif. Gambar 4 menunjukkan kondisi daya reaktif dan arus yang berada di bus penggiling dan bus pengemasan yang mengalami drop faktor daya ditandakan dengan bus berwarna merah.



Gambar 3. Simulasi ETAP 19 kondisi daya aktif saat beban penuh dan kondisi bank kapasitor dinonaktifkan



Gambar 4. Simulasi ETAP 19 kondisi arus dan daya reaktif saat beban penuh dan kondisi bank kapasitor dinonaktifkan

Tabel 11. Perbandingan hasil perhitungan daya aktif pada saluran bus 2 dan bus 3 dengan simulasi ETAP 19.0

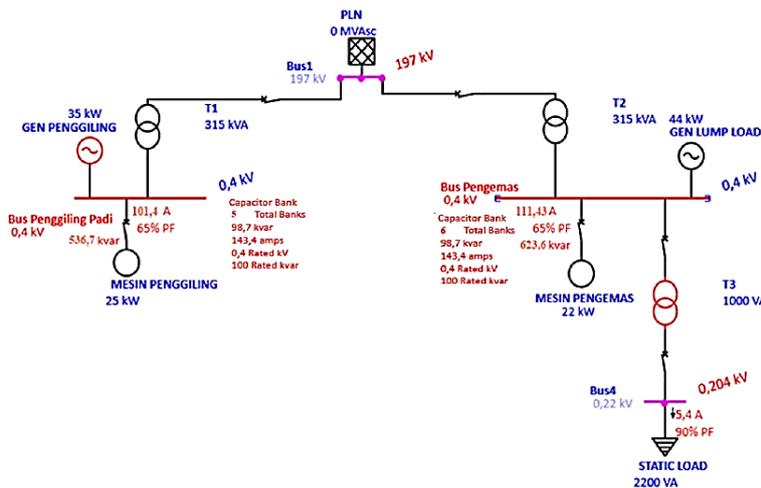
| Nama Saluran | Daya Aktif Perhitungan (kW) | Daya Hasil Simulasi ETAP(kW) | Selisih (kW) | Persentase |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|--------------|------------|
| Bus Penggiling | 28,28 | 27,6 | 0,68 | 2,4% |
| Bus Pengemas | 30,85 | 29,8 | 1,05 | 3,4% |

Pada Gambar 4, *load flow* menunjukkan besarnya arus dan besarnya daya reaktif yang ada pada setiap busbar yang diakibatkan bank kapasitor tidak terpasang. Kondisi ini sangat berbanding lurus dengan teori bahwa, semakin tinggi daya

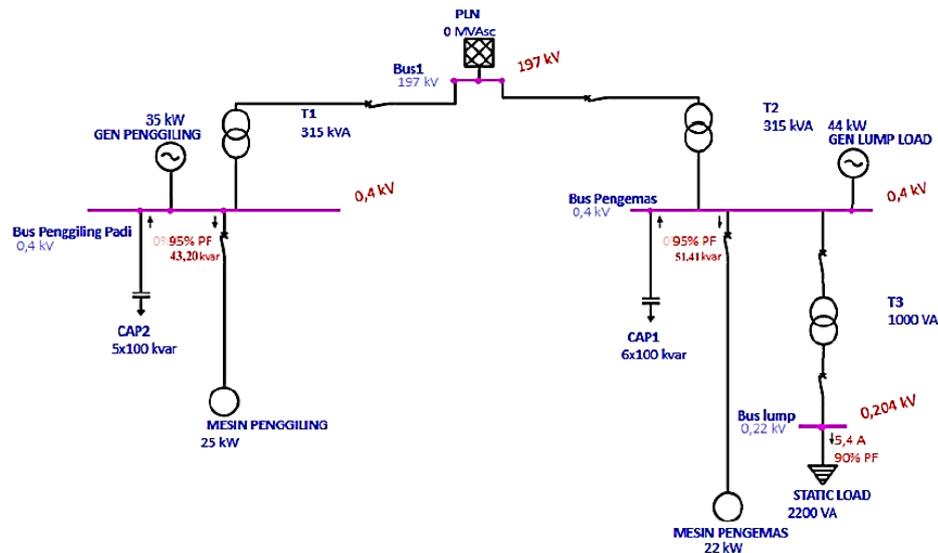
reaktif yang muncul akibat beban induktif mengakibatkan besarnya arus dan pastinya akan membuat besar pula rugi-rugi daya yang terjadi. Tabel 12 adalah tabel arus dan daya reaktif yang ada pada setiap bus.

Tabel 12. Arus dan daya reaktif hasil simulasi ETAP 19

| No. | Parameter | Keterangan |
|-----|-------------------------------------|------------|
| 1 | Arus pada Bus Penggiling Padi (A) | 101,4 |
| 2 | Arus pada Bus Pengemas (A) | 111,43 |
| 3 | Arus pada Bus 4 (A) | 5,4 |
| 4 | Daya reaktif Bus Pengemas (kVAR) | 536,7 |
| 5 | Daya reaktif Penggiling Padi (kVAR) | 623,6 |



Gambar 5. Hasil *running optimal capacitor placement*



Gambar 6. Hasil *running* OCP setelah dilakukan pemasangan bank kapasitor

Dari hasil simulasi ETAP 19 menggunakan modul atau *tools* OCP, didapat data yang bisa digunakan untuk melakukan perhitungan persentase error antara bus penggiling dan bus pengemas hasil ETAP dan hasil perhitungan teori. Data hasil *running* OCP pada bus penggiling padi menunjukkan besar kebutuhan step bank kapasitor yaitu lima unit dengan *rated* kVAR atau besar setiap stepnya sebesar 100 kVAR. Begitu pun juga dengan hasil *running* OCP pada bus penggiling padi menunjukkan besar kebutuhan step bank kapasitor yaitu enam unit dengan *rated* kVAR atau besar setiap stepnya sebesar 100 kVAR. Dengan ini antara perhitungan dan simulasi ETAP 19 tidak terdapat selisih atau 0% error pada *rated* kVAR (besar setiap step kapasitor) dan tidak terdapat selisih kebutuhan bank kapasitornya. Selanjutnya dilakukan simulasi yang memasukkan jumlah kapasitor dan *rate* kVAR kapasitor hasil dari OCP untuk melihat hasil akhir dari perbaikan faktor daya.

Gambar 6 menunjukkan hasil *running* OCP setelah dilakukan pemasangan bank kapasitor. Hasil simulasi setelah pemasangan bank kapasitor ini akan dibandingkan dengan hasil perhitungan setelah perbaikan faktor daya dan juga akan dibandingkan dengan hasil simulasi ETAP 19 sebelum pemasangan bank kapasitor. Dari Gambar 6 dapat diketahui perbandingan antara perhitungan arus dan daya reaktif setelah perbaikan faktor daya dengan hasil simulasi. Berdasarkan Tabel 13 hasil perhitungan arus setelah perbaikan faktor daya pada bus penggiling sebesar 74,42 A dan arus pada bus pengemas sebesar 81,18 A. Sedangkan dari hasil simulasi setelah perbaikan faktor daya didapatkan besarnya arus pada bus penggiling sebesar 67,9 A dan besar arus pada bus pengemas sebesar 78,5 A. Sehingga didapatkan persentase error hasil perhitungan dan hasil simulasi arus pada bus penggiling sebesar 8,7% dan persentase error hasil perhitungan dan hasil simulasi arus pada bus pengemas sebesar 3,3%.

Tabel 13. Perbandingan arus hasil dari perhitungan manual dan hasil simulasi di ETAP 19

| No. | Jenis Saluran | Hasil Manual | Hasil ETAP | Error Persen |
|-----|----------------|--------------|------------|--------------|
| 1 | Bus penggiling | 74,42 A | 67,9 A | 8,7% |
| 2 | Bus pengemas | 81,18 A | 78,5 A | 3,3 % |

V. SIMPULAN

Penelitian yang dilakukan langsung di PT Beras Rajawali mengungkapkan adanya signifikansi nilai faktor daya terhadap sistem kelistrikan. Pada saat faktor daya mencapai 0,67, arus yang terukur mencapai 106,57 A, sementara pada faktor daya 0,85, arus menurun menjadi 70,7 A. Untuk mengatasi faktor daya yang menurun, dilakukan pemasangan bank kapasitor pada bus yang terkena dampak. Langkah ini berhasil mengembalikan faktor daya menjadi normal, menunjukkan efektivitas tindakan tersebut. Selanjutnya, saat melakukan OCP pada kondisi beban puncak, ditemukan penempatan optimal untuk kapasitor pada bus penggiling sejumlah lima step dengan daya reaktif kapasitif 500 kVAR. Begitu pula pada bus pengemas, dihasilkan penempatan optimal sejumlah enam step dengan daya reaktif kapasitif yang sama. Hasil pemasangan bank kapasitor pada kedua bus juga memberikan dampak positif. Sebelum pemasangan, besar arus di kedua bus mencapai 101,4 A dan 111,4 A. Setelah dipasang, angka tersebut menurun signifikan menjadi 67,9 A dan 78,5 A, menandakan bahwa bank kapasitor berhasil mengembalikan besar arus ke tingkat yang normal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lisiani, A. Razikin, dan Syaifurrahman, "Identifikasi dan Analisis Jenis Beban Listrik Rumah Tangga Terhadap Faktor Daya (Cos Phi)," *J. Untan*, vol. 1, no. 3, hal. 1–9, 2020.
- [2] D. Wibowo, Yusniati, R. Nasution, dan Z. Pelawi, "Analisis Perbaikan

- Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Di Masjid Agung Serdang Bedagai," *Cetak) J. Electr. Technol.*, vol. 8, no. 1, hal. 1–6, 2023.
- [3] F. A. Noor, "Pengaruh Penambahan Kapasitor Terhadap Tegangan, Arus, Faktor Daya, Dan Daya Aktif Pada Beban Listrik Di Minimarket," Universitas Negeri Semarang, 2017.
- [4] W. A. Billahi, "Analisis Perubahan Nilai Faktor Daya Terhadap Pemasangan Kapasitor Bank Pada Unit Boiler Pusat Pengembangan Sumber Daya Manusia Minyak Dan Gas Bumi Cepu," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 2, hal. 497–505, 2021.
- [5] K. D. Nurmahandy, "Analisis Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Kapasitor Bank Pada Penyulang Barata PT PLN Ngagel Surabaya," *J. Tek. Elektro*, vol. 10, no. 1, hal. 261–270, 2021.
- [6] N. Setiaji, Sumpena, dan A. Sugiharto, "Analisis Konsumsi Daya Dan Distribusi Tenaga Listrik," *J. Teknologi Ind.*, vol. 11, no. 1, hal. 1–8, 2022.
- [7] J. Murianto, D. Febrianto, dan F. Azmi, "Rancang Bangun Alat Uji Pada Perbaikan Faktor Daya Dengan Kapasitor Bank," *JESCE (Journal Electr. Syst. Control Eng.*, vol. 4, no. 1, hal. 53–62, 2020.
- [9] Y. Marniati, "Analisis Penambahan Jurusan Gardu Distribusi I.598 Pada Penyulang Apel PT.PLN Rayon Rivai Palembang," *J. TEKNO*, vol. 19, no. 2, hal. 32–48, 2022.
- [10] G. Romadhona *et al.*, "Pengukuran dan Analisis Kualitas Daya Listrik di IGD dan IKBS Rumah Sakit Islam Purwokerto," *Cyclotr. J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 1, hal. 20–25, 2023.
- [11] B. Ferdiansah, A. Margiantono, dan F. Ahmad, "Analisis Pengaruh Kapasitor Bank Terhadap Nilai Faktor Daya Dan Nilai Jatuh Tegangan," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, no. 2, hal. 234–241, 2023.
- [12] Y. P. Sudarmojo dan A. I. Weking, "Optimasi Pemasangan Kapasitor Dengan Metode Quantum Genetic Algorithm Untuk Meningkatkan Kualias Daya Pada Jaringan Distribusi Bali," Bali, 2019.
- [13] A. Nuwolo dan A. Kusmantoro, "Rancang Bangun Kapasitor Bank pada Jaringan Listrik Gedung Universitas PGRI Semarang," in *Prosiding SNST ke-6 Tahun 2015*, 2015, hal. 8–14.
- [14] A. N. Shafira, A. Soeprijanto, dan S. Anam, "Penentuan Letak dan Kapasitas Bank Kapasitor Secara Optimal Menggunakan Bee Colony Algorithm," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, hal. A750–A751, 2016.
- [15] R. Pasangkunan, S. A. Karim, dan H. Hasrul, "Pengaruh Pemasangan Kapasitor Bank Terhadap Faktor Daya Pada Reefer Plug Di PT. Pelindo IV Cabang Makassar New Port," *J. Media Elektr.*, vol. 19, no. 1, hal. 26–30, 2021.
- [16] C. Elchrisa, L. K. Amali, dan A. I. Tolago, "Analisis Optimasi Penempatan Kapasitor Bank pada Jaringan Tegangan Menengah 20kV Feeder IS.03 Rayon Limboto untuk Memperbaiki Kualitas Tegangan," *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 1, hal. 25–31, 2019.
- [17] M. A. I. Lubis, "Analisa Perhitungan dan Perencanaan Uprating Kabel Untuk Perbaikan Tegangan Jatuh Pada Sisi Jaringan Tegangan Rendah Di Gardu PR198 PT PLN (Persero) ULP Perbaungan," Medan: Universitas Pembangunan Panca Budi, 2021.
- [18] M. T. Hagh, T. Ahamadzadeh, K. M. Muttaqi, dan D. Sutanto, "Load flow analysis of radial and weakly meshed distribution systems including distributed generations," 2014.

Solar Power Station for High-Powered Electronics

Tika Erna Putri^{1*}, Suhono¹, Rahmadi Putra Aji¹, Wahyu Waskito Aji¹

¹Department of Electrical Engineering and Informatics, Universitas Gadjah Mada; akhisuhono@ugm.ac.id, rahmadi.putra.aji@mail.ugm.ac.id, wahyu.waskito.a@mail.ugm.ac.id

*Correspondence: tika.erna.p@ugm.ac.id

Intisari - Banyaknya rumah tangga pengguna PLN dengan daya di bawah 2200 VA di Indonesia menyebabkan pemakaian peralatan elektronik berdaya tinggi (HPE) seperti misalnya kompor listrik, microwave, dan oven, menjadi terbatas. Pada kasus tertentu HPE tidak dapat beroperasi karena daya listrik kurang atau menjadi penyebab miniature circuit breaker (MCB) trip. Pada kenyataannya, penggunaan HPE tersebut dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Sumber daya (power station) terpisah dengan PLN (off-grid) dengan penyimpanan daya berkapasitas rendah dirasa mampu mengatasi permasalahan tersebut dikarenakan pemakaian HPE harian kebanyakan pada jangka waktu 1-3 jam. Solar home system (SHS) dapat menjadi basis power station off-grid untuk HPE. Akan tetapi, studi SHS yang dilakukan hanya terbatas pada daya rendah dibawah 1000 VA atau daya tinggi diatas 3000 VA. Mengatasi hal tersebut, dalam penelitian ini akan dibuat power station daya tinggi antara 1000 VA - 3000VA berbasis SHS dan dianalisis penggunaan hariannya untuk peralatan HPE kompor listrik, microwave, dan oven. Proses pengisian daya power station dengan empat 100 Wp polikristalin solar panel dapat menghasilkan daya berkisar 1 kWh perharinya. Hasil memasak harian menunjukkan dengan 2-3 menu dapat dibuat perharinya dengan HPEs yang di tenagai power station.

Kata kunci: power station, solar home system, off-grid solar panel, kompor listrik

Abstract - The number of PLN power users below 2200 VA for households in Indonesia causes the use of high-powered electronic equipment (HPE) such as electric stoves, microwaves, and ovens, to be limited. In some cases, the HPE can't operate due to lack of power or being the cause of the miniature circuit breaker (MCB) down. In fact, the use of HPE can improve the quality of life of people. Power stations separated by PLN (off-grid) and high-powered are thought to be able to solve the problem due to the daily use of HPE mostly over 1-3 hours. Solar home system (SHS) can be the base power station off-grid for HPE. However, the SHS studies carried out are limited to low power below 1000 VA or high power above 3000 VA. Addressing this, the study will create high power stations between 1000 VA - 3000VA based on SHS and analyze its daily use for electrical HPE equipment such as electric stoves, microwaves, and ovens. The charging of a power station with four 100 Wp Polycrystalline solar panels can charge around 1 kWh on sunny days in Yogyakarta, Indonesia. Daily cooking activity shows the power station can support 2-3 menus daily with the usage of HPEs.

Keywords: power station, solar home system, off-grid solar panels, electric stoves

I. INTRODUCTION

Advancement in technology is also followed by improvement in living standards. Household electronic devices such as electric stoves, air conditioners, etc [1], [2]. mostly need high electrical power consumption for operation. Statistical data of state electricity company (PLN) Indonesia in 2021, the number of customers with electric power category below 2200 VA or category R1 dominates as much as 75.6 million compared to customers above 2200VA or R2 and R3 groups as 1.7 million and 0.3 million [3]. The low power availability (below 2200 VA) became one of the reasons the majority of Indonesian households did not use high-power electronic equipment (HPE) such as electric stoves, microwaves, ovens, etc. The power consumption for electric stoves was around 800-1600 watts while microwave and oven range between 450-3000 watts. The usage of HPE in houses with power less than 2200 VA will often result in a miniature circuit breaker (MCB) down. Although some HPEs are usually used for short periods for 1-3 hours. This short working time may allow for the relocation of HPE power sources from PLN to reserve sources with large power but low storage.

Solar power is widely used as a power supply in households, industries, or farms. PLTS produces direct current (DC) electricity that can be used directly or converted

to alternating current (AC). The transition from a PLN system to independent energy with PLTS in households or the solar home system (SHS) needs to be considered because there is a risk of loss given the installation of PLTS requires a large cost. In addition to cost risks, different weather risks in each region and different electricity needs in each home are an obstacle to the rise in SHS popularity. The SHS cost mostly comes from the inverter system and storage. Suppressing these outputs and risks, the SHS can be formed in the form of a power station [4] or a mini SHS with a specific performance [5]–[8]. The existing power stations are too large while mini SHSs are usually only in small power capacities below 1000 watts [9]–[11]. When there is a power station or Mini SHS with a high power between 1000 – 3000 watts but low storage, the HPE problem can be solved. Vocational school faculty has a research roadmap with a focus on the Green-Blue Economy. In the focus of the research, the application of solar panels in buildings has become one of the leading research projects. By implementing this approach, our research aims to address the issue of MCBs tripping and enhance the utilization of HPE without necessitating an increase in PLN power. This will be achieved through the construction of mini SHSs in the form of power stations.

II. METHODOLOGY

In this study, a separate solar power station was built for HPE. This solar power was tested on electric stoves,

microwaves, and ovens. The results obtained were then analyzed by the performance.

A. Mathematical Model

The power station requirement was determined by calculation. In one household with the main cooking activity in the morning and noon, the usage of the electric stove was assumed around 1 hour, the microwave around 10 minutes, and the oven 20 minutes. The energy usage for one day E_{day} was determined using (1) [12].

$$E_{day} = \sum_{i=0}^n \frac{p_i \times u_i \times n_i}{1000} \text{ (kWh)}$$

$$= \frac{(1200 \times 1 \times 1) + (1200 \times \frac{1}{6} \times 1) + (500 \times \frac{1}{3} \times 1)}{1000} \quad (1)$$

$$= 1.567 \text{ kWh} \quad (1)$$

where i is the index for each type of HPE, u_i = number of hours of use of device type i per day, p_i = power rating of device type i , n_i = number of device type i . Total power PV needed P_{pv} consider efficiency and derating factors can be calculated using (2) [8], [12].

$$P_{pv} = \frac{E_{day}}{S_d \times d} \text{ (kW)} = \frac{1.567}{5.13 \times 0.8} = 0.381 \text{ (kW)} \quad (2)$$

where S_d = the average duration of solar radiation, d = the derating factor is influenced by efficiency effects such as soiling the panels, lost wires, shadows, snow cover, aging, and so on. In this study we use $S_d = 5.13 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ as the data taken at Yogyakarta, Indonesia, and the value $d = 80 \%$ based on available weather information in [13]. The number of solar panels required n_p was calculated using (3) [12].

$$n_p = \frac{P_{pv}}{P_o} = \frac{0.381}{0.1} = 3.81 \quad (3)$$

where P_o is the power output capacity of each panel (100 Wp). Battery LifePo4 was used as power storage in this research. The number of batteries needed in this power station was calculated using (4) [12].

$$N_{bat} = \frac{E_{day} \times n_d}{V_{bat} \times I_h \times DOD} = \frac{1.567 \times 1}{24 \times 100 \times 0.9} \quad (4)$$

$$= \frac{1.567}{2,160} = 0.725$$

where n_d is the number of days required for power reserves, V_{bat} is the voltage rating, I_h is the ampere-hour rating and DOD is the depth of discharge of the battery system. The 1-day power reserves were chosen to maintain power station cost.

Four polycrystalline solar panels 100 Wp were used as a voltage provider stored in a lifepo4 24 V 100 Ah lithium battery storage. The electricity was converted from DC to AC with a Techfine hybrid inverter 2 kVA MPPT 24V Low frequency 24 V 2000 watt and secured with MCB. The 2 kVA

hybrid inverter was chosen as the maximum load of around 1200 watts. The low-frequency type was used to accommodate high power spikes and frequent on off of the devices.

Three kinds of HPE consist of an Oxone OX-655D electric stove with a power consumption of 1200 watts, a Maspion MOT-500 oven with 500 watts, and a Samsung ME83M-B3 microwave with 1200 watts were used as a load alternately. The power station network is illustrated in Figure 1.

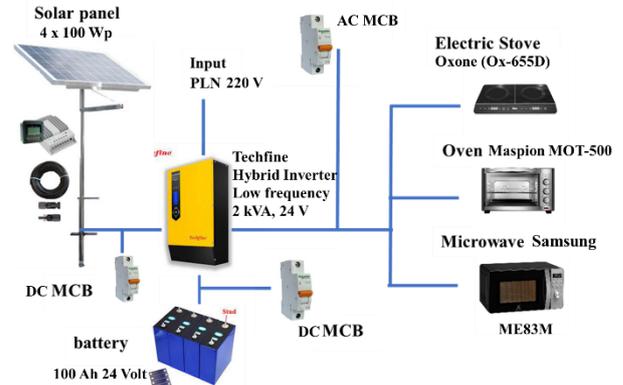


Figure 1. The power station network diagram

The HPE was used to cook different types of food to check the daily consumption of the power station. Four 50 Wp and 550 Wp solar panels were also used as comparisons for more suitable solar panel sources.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A. Charging of Power Station

The power station was built off-grid and moveable as an independent source, as shown in Figure 2. Solar panels were not permanently installed as the power station is moveable and easy to remove or change to increase its portability.



Figure 2. Portable power station with removable solar panels

The charging process of the solar power station was conducted from 10.00 until 15.00 with four 100 Wp polycrystalline solar panels in series. According to the obtained result in Table 1, solar power stations can charge for around 1 kWh on a sunny day each day. This result was lower compared to the targeted 1-day power charging (1,567 Wh). This condition may cause of derating factor d was less than 80%. Later, the charging process can be supported with PLN when the charging with solar panel was lower than the discharging by HPE. As a consideration of other alternatives, we also compared 50 Wp and 550 Wp monocrystalline as power sources. The obtained power is shown in Table 2. The result shows more than half the power produced by 100 Wp Poly could be obtained with 50 Wp Mono and 550 Wp produced power almost near to the targeted power (1,567 Wh) with higher current than 100 Wp and 50 Wp.

B. Discharging Power Station by Cooking Activity

Daily cooking was conducted to estimate the power consumption of the power station. All HPE was working at around 220 V voltage and 50 Hz frequency. The working current for the electric stove was 4.6 A, the microwave was 6.1 A, and the Oven was 2.2 A. The power consumption for daily cooking activity is shown in Table 3. The result of the cooking activity shows for 2-3 menus each day the power consumption was under 2000 Wh. The power consumption is also possible to be reduced by better management. This result confirms with this specification that, the power station can work properly to support HPE for household usage. Table 3 Daily cooking activity with HPE powered by the power station.

Table 1. Power gain of power station with four 100 Wp solar panels as source

| Time | PV Input | | | | | |
|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|
| | Day 1 | | Day 2 | | Day 3 | |
| | Power (Wh) | Current (Ah) | Power (Wh) | Current (Ah) | Power (Wh) | Current (Ah) |
| 10.00 – 11.00 | 181.9 | 3.1 | 190.0 | 3.2 | 190.9 | 3.4 |
| 11.00 – 12.00 | 275.7 | 4.3 | 358.5 | 5.7 | 107.0 | 1.9 |
| 12.00 – 13.00 | 291.0 | 4.6 | 252.5 | 4.0 | 237.1 | 3.9 |
| 13.00 – 14.00 | 184.9 | 3.1 | 231.2 | 3.8 | 156.8 | 2.5 |
| 14.00 – 15.00 | 98.0 | 2.2 | 86.5 | 1.6 | 74.0 | 1.4 |
| Total | 1,031.5 | 17.3 | 1,118.7 | 18.3 | 765.8 | 13.1 |

Table 2. Comparison between different solar panels for solar power station electricity source

| Time | PV Input | | | | | |
|---------------|---------------------------|--------------|----------------------------|--------------|---------------|--------------|
| | Four 50 Wp Mono in series | | Four 100 Wp Poly in series | | A 550 Wp Mono | |
| | Power (Wh) | Current (Ah) | Power (Wh) | Current (Ah) | Power (Wh) | Current (Ah) |
| 10.00 – 11.00 | 101.6 | 1.8 | 190.0 | 3.2 | 176.8 | 5.2 |
| 11.00 – 12.00 | 179.6 | 2.6 | 358.5 | 5.7 | 385.5 | 13.8 |
| 12.00 – 13.00 | 169.3 | 2.4 | 252.5 | 4.0 | 396.3 | 13.8 |
| 13.00 – 14.00 | 166.3 | 2.4 | 231.2 | 3.8 | 337.4 | 11.6 |
| 14.00 – 15.00 | 52.7 | 0.8 | 86.5 | 1.6 | 151.1 | 5.0 |
| Total | 669.5 | 10.0 | 1,118.7 | 18.3 | 1447.1 | 49.4 |

Table 3. Daily cooking activity to estimate power consumption per day

| Time | Menu | Load | Time | Power Consumption (Wh) |
|----------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Day 1/ Morning | Opor Ayam (500 gr Chicken) | Stove 1200 W | 28 min. | 546 |
| | Heating Water (500 mL) | Stove 1200 W | 8 min. | 158 |
| | Choco chips cookies (200gr) | Stove 1200 W Microwave 1200 W | Stove 2 min. Microwave 6 min. | 166 |
| Day 1/ Noon | Heating Opor | Stove 1200 W | 12 min. | 256 |
| Total | | | | 1,126 |
| Day 2/ Morning | Mac n Cheese (500 gr) | Stove 1200 W Oven 500 W | Stove 20 min. 30 sec. Oven 23 min. | 657 |
| | Heating Opor | Microwave 1200 W | 5 min. 30 Sec. | 83 |
| Day 2/ Noon | Chicken Soup 2 L | Stove 1200 W | 26 min | 524 |
| Total | | | | 1,264 |

| Time | Menu | Load | Time | Power Consumption (Wh) |
|----------------|-----------------------------|--------------|---------------|------------------------|
| Day 3/ Morning | Boil papaya's leaf (400 gr) | Stove 1200 W | 45 min | 1,207 |
| | Fried mackerel (660 gr) | Stove 1200 W | 14 min 57 sec | 232 |
| | Chili sauce | Stove 1200 W | 2 min 40 sec | 52 |
| Day 3/ Noon | Fried Tempe | Stove 1200 W | 17 min 51 sec | 336 |
| Total | | | | 1,885 |

IV. CONCLUSION

The majority of households in Indonesia are PLN customers with category R1 having under 2200 VA power electricity. The low availability of electric power hinders HPE usage in households. Separate solar power sources with low power storage may solve the problem because some HPE has a short time usage. A portable power station with a 2 kVA hybrid low-frequency inverter and 24 V 100 Ah battery storage has successfully been made. The charging of a power station with four 100 Wp Polycrystalline solar panels can charge around 1 kWh on sunny days in Yogyakarta, Indonesia. Daily cooking activity shows the power station can support 2-3 menus daily with the usage of HPE.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was fully supported by Vocational School Research Grant 2023 provided by Vocational School Universitas Gadjah Mada.

REFERENCES

- [1] Y. Yudiantono, J. Windarta, and A. Adiarso, "Sustainable Long-Term Energy Supply and Demand: The Gradual Transition to a New and Renewable Energy System in Indonesia by 2050," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 12, no. 2, pp. 419–429, 2023, doi: 10.14710/ijred.2023.50361.
- [2] J. Martínez-Gómez, D. Ibarra, S. Villacis, P. Cuji, and P. R. Cruz, "Analysis of LPG, electric and induction cookers during cooking typical Ecuadorian dishes into the national efficient cooking program," *Food Policy*, vol. 59, pp. 88–102, 2016, doi: 10.1016/j.foodpol.2015.12.010.
- [3] PT.PLN (persero), "Statistics PLN 2022," *Stat. PLN*, no. 03001–230526, p. 98, 2023, [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2022/08/Statistik-PLN-2021-29-7-22-Final.pdf>.
- [4] J. Barton *et al.*, "A Portable Power Station for Humanitarian Contexts," *2021 IEEE Int. Humanit. Technol. Conf. IHTC 2021*, 2021, doi: 10.1109/IHTC53077.2021.9698942.
- [5] S. Siddiqua, S. Firuz, B. M. Nur, R. J. Shaon, S. J. Chowdhury, and A. Azad, "Development of double burner smart electric stove powered by solar photovoltaic energy," *GHTC 2016 - IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. Technol. Benefit Humanit. Conf. Proc.*, pp. 451–458, 2016, doi: 10.1109/GHTC.2016.7857319.
- [6] M. Rezwan Khan and I. Alam, "A solar pv-based inverter-less grid-integrated cooking solution for low-cost clean cooking," *Energies*, vol. 13, no. 20, 2020, doi: 10.3390/en13205507.
- [7] A. Lamkaddem *et al.*, "System for powering autonomous solar cookers by batteries," *Sci. African*, vol. 17, p. e01349, 2022, doi: 10.1016/j.sciaf.2022.e01349.
- [8] A. Altouni, S. Gorjian, and A. Banakar, "Development and performance evaluation of a photovoltaic-powered induction cooker (PV-IC): An approach for promoting clean production in rural areas," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 6, p. 100373, 2022, doi: 10.1016/j.clet.2021.100373.
- [9] M. Soltani, A. Hajizadeh Aghdam, and Z. Aghaziarati, "Design, fabrication and performance assessment of a novel portable solar-based poly-generation system," *Renew. Energy*, vol. 202, no. October 2022, pp. 699–712, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.10.119.
- [10] N. El Moussaoui *et al.*, "Autonomous Power System Powered by Solar Batteries: A Case of Box Oven Heating," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 1269–1278, 2022, doi: 10.20508/ijrer.v12i3.13139.g8512.
- [11] G. Zubi, F. Spertino, M. Carvalho, R. S. Adhikari, and T. Khatib, "Development and assessment of a solar home system to cover cooking and lighting needs in developing regions as a better alternative for existing practices," *Sol. Energy*, vol. 155, pp. 7–17, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.05.077.
- [12] A. Jasuan, Z. Nawawi, and H. Samaulah, "Comparative Analysis of Applications Off-Grid PV System and On-Grid PV System for Households in Indonesia," *Proc. 2018 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. ICECOS 2018*, pp. 253–258, 2019, doi: 10.1109/ICECOS.2018.8605263.
- [13] M. Rumbayan, A. Abudureyimu, and K. Nagasaka, "Mapping of solar energy potential in Indonesia using artificial neural network and geographical information system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 3, pp. 1437–1449, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.11.024.

Tangan Bionik Sebagai Teknologi Tepat Guna Untuk Penyandang Tunadaksa Berbasis 3D Printing

Rufaida Fatkhul Janna¹, Amalia C. Nur'Aidha^{1*}, Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati¹

¹Teknik Biomedis, Universitas PGRI Yogyakarta; rufaidahfatkhuljannah@gmail.com, dhananjaya@upy.ac.id

*Korespondensi: amalia@e-mail.comupy.ac.id

Abstract – Physically impaired is a condition in which the physical structure is altered in a way that disrupts the body's ability to perform essential movements. Individuals facing a disability are often faced with social neglect due to prevailing negative perceptions, resulting in decreased self-confidence, and becoming more passive in social interactions rather than being an active part of society. This research aims to provide more affordable technological solutions for individuals with disabilities through the development of a bionic hand that can be controlled with a high level of accuracy. This bionic hand is designed to overcome the obstacles encountered in performing movements such as lifting, opening, and closing finger activities that can generally be performed by a normal hand. The achievement of this research goal is based on the application of 3D printing technology that produces a bionic hand through PLA material. Based on the test results, the bionic hand showed a good ability to lift and move each finger with an accuracy of about 90%. The movements of these fingers appeared natural and realistic, with responses to commands being fast and without significant delay. Although there was a slight vibration in some movements, this could be corrected with optimization programs or mechanical improvements. From the delay test results, the movement of the fingers of the bionic hand printed using 3D printing and controlled by Arduino uno with servo motor actuators showed a high degree of accuracy, with a small time difference between expected and measured, indicating good performance in moving the fingers of the bionic hand.

Keywords – bionics, physically impaired, 3d printing

Intisari – Tunadaksa adalah kondisi di mana struktur fisik mengalami perubahan yang mengakibatkan terganggunya fungsi tubuh untuk melakukan gerakan yang esensial. Individu yang menghadapi kondisi tuna daksa sering kali dihadapkan pada pengabaian sosial akibat persepsi negatif yang masih berlaku, sehingga menghasilkan penurunan rasa percaya diri, dan menjadi lebih pasif dalam interaksi sosial daripada menjadi bagian aktif dalam bermasyarakat. Penelitian ini bertujuan untuk menyediakan solusi teknologi yang lebih terjangkau bagi individu dengan disabilitas melalui pengembangan tangan bionik yang mampu dikendalikan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Tangan bionik ini dirancang untuk mengatasi kendala yang dihadapi dalam melakukan gerakan seperti mengangkat, membuka, dan menutup jari aktivitas yang umumnya dapat dilakukan oleh tangan yang normal. Pencapaian tujuan penelitian ini didasarkan pada penerapan teknologi pencetakan 3D yang menghasilkan tangan bionik melalui bahan PLA. Berdasarkan hasil pengujian, tangan bionik menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengangkat dan menggerakkan setiap jari dengan akurasi sekitar 90%. Gerakan jari-jari ini tampak alami dan realistis, dengan respons terhadap perintah yang cepat dan tanpa penundaan yang signifikan. Meskipun terdapat sedikit getaran pada beberapa gerakan, hal ini dapat diperbaiki dengan program pengoptimalan atau perbaikan mekanis. Dari hasil uji *delay*, pergerakan jari tangan bionik yang dicetak menggunakan pencetakan 3D dan dikontrol Arduino Uno dengan aktuator motor servo menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan selisih waktu yang kecil antara yang diharapkan dan yang terukur, mengindikasikan kinerja yang baik dalam menggerakkan jari-jari tangan bionik.

Kata kunci – bionik, tuna daksa, 3d printing

I. PENDAHULUAN

Setiap manusia menginginkan hidup dengan kondisi yang normal dan memiliki anggota tubuh yang lengkap seperti manusia pada umumnya, namun pada kenyataannya terdapat individu yang tidak mendapatkan kesempurnaan seperti individu lainnya[1]. Tunadaksa atau cacat tubuh dapat diartikan sebagai kelainan bentuk tubuh yang mengakibatkan kelainan fungsi tubuh untuk melakukan gerakan-gerakan yang dibutuhkan[2]. Biro Pusat Statistik (BPS) mendata jumlah penyandang tunadaksa di Indonesia sampai dengan tahun 2020 mencapai 22,5 juta orang. Dari jumlah tersebut kebanyakan penyebab tunadaksa dikarenakan kecelakaan, polio, keturunan dan cacat sejak lahir[3]. Para penyandang tunadaksa biasanya akan tersingkir dari pergaulan masyarakat sekitarnya karena masyarakat selalu memandang negatif para penyandang tunadaksa, sehingga membuat para penyandang tunadaksa menjadi rendah diri, minder, merasa tak berguna dan menjadi konsumen saja daripada menjadi penyumbang

aktif dalam setiap kegiatan masyarakat. Oleh sebab itu kebutuhan akan alat bantu untuk orang cacat seperti cacat pada tangan dan kaki banyak dibutuhkan di Indonesia.[4] Bagi penderita cacat kaki di Indonesia alat bantu berjalan mudah dicari mulai dari kursi roda, kruk, penyangga dan lain-lain. Bagi penderita cacat tangan di Indonesia, alat bantu penderita cacat sedikit variasinya. Sedangkan yang banyak di pasaran hanya berfungsi sebagai aksesoris saja tanpa memiliki fungsi lainnya[5].

Di era teknologi yang sudah maju, masih ada harapan bagi para penyandang tunadaksa amputasi transradial untuk bisa kembali pada aktivitas seperti biasanya, yaitu dengan menggunakan alat bantu tangan palsu atau biasa disebut tangan prostesis[6]. Namun, kemampuan prostesis bertenaga tubuh atau mekanik cukup sulit untuk amputasi tingkat bahu dikarenakan minimnya artikulasi[7]. Adapun prostesis bertenaga listrik yang bisa membantu mengembalikan fungsi tangan, namun membutuhkan biaya yang lebih tinggi

sehingga tidak sesuai dengan negara berkembang yang rata-rata gajinya rendah[8].

Pada penelitian sebelumnya pergerakan jari tangan bionik berbasis Arduino dan sensor MPU 650 dengan penggerak motor servo. Pada penelitiannya *delay* yang dibutuhkan selama 3 detik[9]. Penelitian lainnya oleh Habib Nurfaizal, Makhsum, dan Yan Mitha Djaksana sebuah prototipe robot yang mampu digerakan dengan lengan manusia (*gesture mode*) dan dapat bekerja secara *looping* menggunakan kontrol yang berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan penggerak motor servo. Namun, pergerakan sudut pada motor servo masih susah dan harga sistem kendali yang relatif mahal [10].

Berdasarkan permasalahan tersebut, perlu ada pengembangan terhadap sistem kendali tangan bionik agar memiliki kemampuan lain seperti dapat menggerakkan jari tangan robot sesuai kemauan pengguna dan *delay* yang lebih sedikit dengan harga yang terjangkau. Pada penelitian ini yang berjudul “Tangan Bionik sebagai Teknologi Tepat Guna untuk Penyandang Tunadaksa Berbasis 3D Printing” akan dibuat prototipe tangan bionik dengan kemampuan menggerakkan jari tangan membuka dan menutup, mampu mengangkat jari 1 sampai 5 dengan pergerakan sudut sesuai yang diinginkan pengguna dengan *delay* selama 1 detik dan memiliki harga yang terjangkau menggunakan percetakan 3D *printing* berbahan material PLA. Pada bidang kesehatan, 3D printer dapat menekan biaya pembuatan prostetik[11]. Pengenalan pencetakan 3D untuk pembuatan prosthesis telah menghasilkan strategi untuk mengurangi biaya produksi baru, memiliki aksesibilitas yang lebih baik dan penyesuaian desain prostetik[12].

Tujuan dari penelitian ini yaitu dapat memberikan teknologi tepat guna bagi para penyandang tunadaksa yang lebih *lowcost* menggunakan material PLA dengan teknologi 3D *Printing* dan menghasilkan pergerakan yang lebih akurat. Sehingga dapat membantu para penyandang tunadaksa dapat melakukan aktivitas seperti pada umumnya.

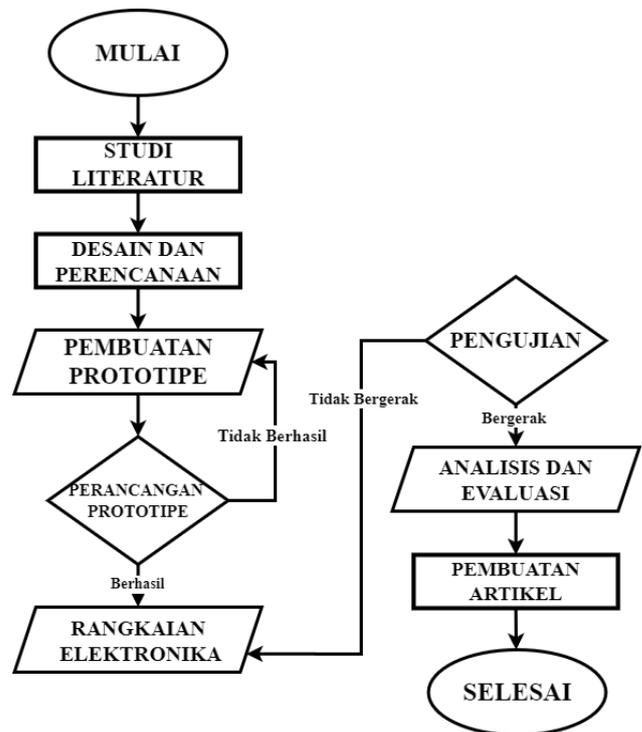
II. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode digital fabrikasi. Digital fabrikasi merupakan proses memanipulasi objek dengan cara menambahkan ataupun mengurangi objek menggunakan perangkat Printer 3D[13]. Ada beberapa tahapan penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 1. Untuk sistem kerja tangan bionik, ditunjukkan melalui Gambar 2.

1. Tahap Desain: Pada tahap ini, dilakukan perencanaan desain tangan bionik berbasis pencetakan 3D dengan mempertimbangkan aspek ergonomis, fungsi, dan kebutuhan individu yang disesuaikan. Data diperoleh melalui pengamatan, wawancara dengan tunadaksa dan tenaga medis terkait, serta mempelajari literatur untuk memahami kebutuhan dan fitur yang relevan. Desain tangan bionik menggunakan *software* Blender seperti pada Gambar 3.

2. Tahap Pembuatan Prototipe: Setelah desain awal dibuat, langkah selanjutnya adalah memproduksi prototipe

tangan bionik menggunakan teknologi pencetakan 3D seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4. Pemilihan bahan dan proses pencetakan yang tepat akan mempengaruhi kualitas dari hasil cetakan tersebut. Bahan material yang digunakan pada penelitian ini yaitu bahan PLA karena dengan harga yang kualitas yang sangat baik Data yang diperoleh dari tahap ini meliputi pengamatan langsung terhadap prototipe yang dihasilkan, serta pengujian awal untuk evaluasi fungsionalitas dan kesesuaian desain.



Gambar 1. Flowchart penelitian

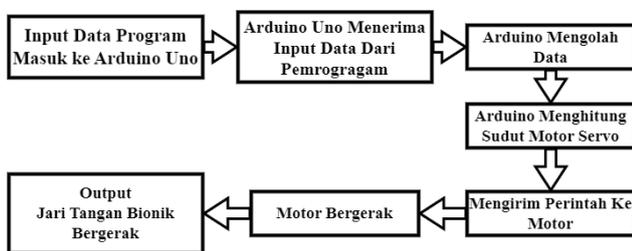
3. Tahap Perancangan Prototipe dan Pemilihan komponen: Setelah pembuatan prototipe menggunakan pencetakan 3D selesai dilanjutkan dengan perancangan prototipe dan pemilihan komponen, dalam pengembangan tangan bionik, pemilihan komponen yang tepat merupakan faktor penting. Komponen yang digunakan dalam penggunaan tangan bionik ini ada motor servo penggerak, Arduino Uno sebagai mikrokontroler, *breadboard* dan kabel *jumper*. Data yang diperoleh dalam tahap ini melibatkan riset pasar, konsultasi dengan para ahli, dan pengujian berbagai komponen untuk mengevaluasi kinerja dan kesesuaiannya. Adapun beberapa komponen yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 5.

4. Tahap Rangkaian Elektronika: Setelah komponen dipilih dan perancangan prototipe berhasil, tahap berikutnya adalah merangkai komponen elektronika ke dalam tangan bionik. Hal ini melibatkan penempatan dan penghubungan yang tepat antara servo motor, mikrokontroler, dan bagian-bagian lainnya. Data yang diperoleh dalam tahap ini meliputi pengamatan dan pengujian rangkaian elektronika untuk memastikan koneksi yang benar dan fungsi yang sesuai.

Gambar 6 menunjukkan rangkaian elektronika dari tangan bionik.

5. Tahap Pengujian: Setelah tangan bionik selesai dirakit, dilakukan pengujian yang komprehensif. Pengujian ini meliputi uji fungsionalitas, dan pengujian *delay*. Data yang diperoleh dari pengujian ini membantu dalam mengevaluasi kinerja tangan bionik, mengidentifikasi potensi masalah, dan melakukan perbaikan yang diperlukan. Pada pengujian *delay*

6. Tahap Evaluasi: Tahap evaluasi dilakukan untuk menilai kinerja dan keefektifan tangan bionik berbasis pencetakan 3D dalam penggunaan oleh tunadaksa. Data yang dikumpulkan mencakup umpan balik dari pengguna, tenaga medis, dan tim pengembang, serta pengamatan terhadap penggunaan tangan bionik dalam kehidupan sehari-hari. Evaluasi ini membantu dalam mengevaluasi solusi yang telah dikembangkan dan memperbaiki desain serta fungsi tangan bionik jika diperlukan.

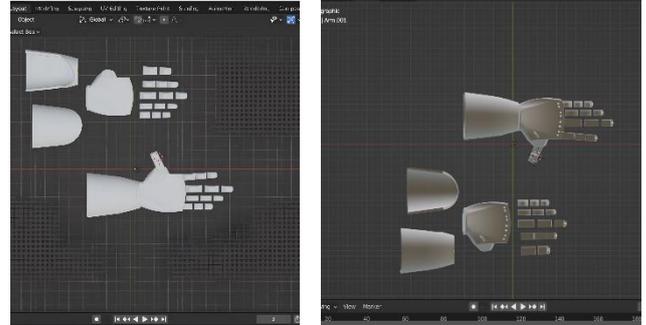


Gambar 2. Sistem kerja tangan bionik

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil percobaan yang dilakukan, mulai dari tahap desain yang mana pada tahap ini *software* yang digunakan adalah Blender 3.6 LTS. Adapun bagian yang didesain di antaranya tangan kiri dengan 5 jari, satu telapak tangan, dan satu lengan. Masing-masing jari memiliki 3 ruas, kecuali jari jempol yang memiliki 2 ruas jari. Hal ini dikarenakan tangan manusia normal memiliki lima jari, dan setiap jari umumnya terdiri dari tiga ruas. Oleh karena itu, menggambarkan tangan dengan lima jari dan tiga ruas pada masing-masing jari yang bukan jari jempol adalah representasi yang realistis dari tangan manusia biasa. Jari jempol memiliki dua ruas, karena jari ini memiliki gerakan yang berbeda dari jari-jari lainnya. Pada setiap ruas jari terdapat 2 lubang di bagian belakang sebagai tempat penghubung jari dengan telapak tangan. Dengan lubang tersebut setiap ruas jari dapat berfungsi sebagai tempat penghubung antara jari dan telapak tangan. Desain ini mencerminkan konsep bionik, di mana elemen-elemen mekanis di replikasi dari makhluk hidup. Lubang-lubang ini memungkinkan perangkat mekanis atau alat penopang terhubung dengan jari-jari dan memfasilitasi gerakan. Satu lubang tempat tali di bagian tengah setiap ruas jari bertujuan sebagai tempat tali guna menarik jari agar dapat bergerak. Ini merupakan pendekatan mekanik yang sederhana namun efektif untuk mengendalikan gerakan jari pada tangan bionik. Pada lengan tangan terdapat empat lubang sebagai tempat keluarnya tali yang digunakan untuk penggerak.

Prototipe tangan bionik 3D berhasil dibuat berdasarkan desain yang telah dirancang di *software* Blender. Prototipe ini menggunakan material PLA yang dicetak dengan teknologi 3D *Printing*, mengikuti ukuran dan detail mekanisme yang telah direncanakan.



Gambar 3. Desain tangan bionik menggunakan *software* blender

Setiap jari memiliki 3 ruas, kecuali jari jempol yang memiliki 2 ruas, dengan 2 lubang di bagian belakang sebagai tempat penghubung jari dengan telapak tangan dan 1 lubang di bagian tengah sebagai tempat tali guna menarik jari agar bergerak. Tali elastis dan tali senar menghubungkan motor servo SG90s dengan jari-jari, sehingga memungkinkan gerakan yang alami.



Gambar 4. Pembuatan prototipe menggunakan 3D *printing*

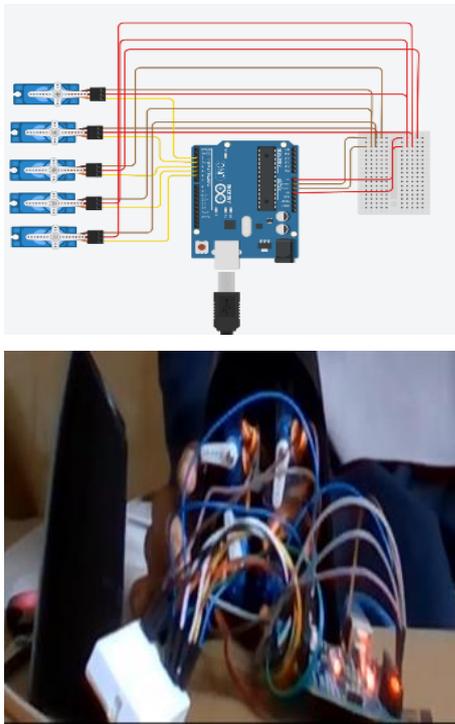
Pemilihan komponen untuk tangan bionik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti fungsionalitas, efisiensi, dan biaya. Komponen yang digunakan diantaranya Arduino Uno yang berfungsi sebagai otak atau pusat kendali utama dalam rangkaian tangan bionik yang mudah digunakan untuk memprogram dan mengontrol gerakan motor servo, mengatur interaksi dengan pengguna, dan mengintegrasikan berbagai komponen dalam rangkaian secara efisien. Tali elastis dan tali senar digunakan sebagai sistem penggerak untuk mengontrol gerakan jari-jari tangan bionik. Penggunaan tali ini membuat gerakan yang lebih halus dan alami pada tangan bionik. *Bread board* mini digunakan

sebagai platform untuk merakit dan menghubungkan komponen secara sementara tanpa penyolderan. Adaptor dan kabel jumper digunakan untuk menyediakan sumber daya dan menghubungkan komponen dengan mudah. Motor servo SG90 dipilih karena ukurannya yang kecil dan harganya yang terjangkau namun mampu menggerakkan jari-jari tangan bionik karena memiliki putaran yang akurat dan bekerja dengan tegangan rendah. Dengan menggunakan lima motor servo, setiap jari dapat dikendalikan secara mandiri untuk menghasilkan gerakan yang realistis pada tangan bionik. Dengan penggunaan komponen-komponen tersebut tangan bionik dapat dioperasikan dengan lancar, mengikuti perintah dari Arduino Uno, dan memberikan gerakan yang mirip dengan tangan manusia. Pilihan komponen ini memungkinkan desain yang efisien, biaya yang terjangkau, dan kemudahan dalam perakitan dan pengujian rangkaian.



Gambar 5. Komponen yang digunakan pada tangan bionik

Rangkaian elektronika pada tangan bionik dapat bergerak mirip dengan tangan manusia. Meskipun sederhana, dengan pemrograman dan pengaturan yang tepat, tangan bionik ini dapat memberikan kemampuan fungsional yang bermanfaat bagi penyandang tunadaksa.



Gambar 6. Rangkaian elektronik tangan bionik

Pada tahap pengujian dilakukan dua pengujian. Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian Fungsionalitas dengan mengoperasikan tangan bionik dan mengamati gerakan setiap jari berdasarkan angka yang diinginkan. Pengujian ini mencakup berbagai gerakan perintah jari, seperti mengangkat angka 1 sampai 5 secara berurutan, mengulang gerakan beberapa kali, dan mengganti urutan angka yang diangkat. Pengujian kedua merupakan pengujian waktu *delay*, yang bertujuan untuk menilai kinerja sistem Arduino Uno dalam pemrosesan data dan pengiriman perintah ke motor servo, yang mengakibatkan gerakan motor serta gerakan jari tangan bionik. Pengukuran waktu dilakukan dari saat instruksi diterima oleh Arduino Uno hingga motor servo bergerak dan jari tangan bionik mengikuti perintah tersebut. Serangkaian pengujian dilakukan sebanyak 3 kali untuk tiap jari agar mendapatkan data yang konsisten. Hasil pengujian waktu *delay* ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil pengujian fungsional

| Komponen Pengujian | Keberhasilan | |
|---|--------------|-------|
| | Berhasil | Tidak |
| Ibu jari dapat digerakkan | ✓ | |
| Jari Telunjuk dapat digerakkan | ✓ | |
| Jari Tengah, Jari manis, jari Kelingking dapat digerakkan | ✓ | |
| Jari dapat bergerak pada sudut 30° | ✓ | |
| Jari dapat bergerak sudut pada 60° | ✓ | |
| Jari dapat bergerak sudut pada 90 | ✓ | |
| Jari dapat bergerak pada sudut 180 | ✓ | |
| Gerakkan membuka dan menutup jari | ✓ | |
| Jari bergerak dengan <i>Delay</i> 1000s | ✓ | |

Tabel 2. Hasil pengujian *delay* motor servo

| Pengujian | Waktu <i>delay</i> pada pemrograman (1s) | Waktu servo bergerak (ms) |
|--------------|--|---------------------------|
| Ibu jari 1 | 20:25:34.569 | 20:26:34.702 |
| Ibu Jari 2 | 20:25:34.603 | 20:26:34.735 |
| Ibu Jari 3 | 20:25:34.605 | 20:26:34.752 |
| Telunjuk 1 | 20:25:34.930 | 20:25:35.151 |
| Telunjuk 2 | 20:25:35.964 | 20:25:36.126 |
| Telunjuk 3 | 20:25:36.015 | 20:25:36.167 |
| Tengah 1 | 20:25:36.539 | 20:25:36.685 |
| Tengah 2 | 20:25:36.573 | 20:25:36.703 |
| Tengah 3 | 20:25:36.596 | 20:25:36.759 |
| Manis 1 | 20:25:36.612 | 20:25:36.790 |
| Manis 2 | 20:25:36.985 | 20:25:37.134 |
| Manis 3 | 20:25:37.213 | 20:25:37.346 |
| Kelingking 1 | 20:25:37.226 | 20:25:37.379 |
| Kelingking 2 | 20:25:37.243 | 20:25:37.381 |
| Kelingking 3 | 20:25:37.243 | 20:25:37.398 |

Dari data tersebut tangan bionik menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengangkat dan menggerakkan setiap jari sesuai dengan angka yang ditentukan. Gerakan jari-jari ini tampak alami dan realistis, menunjukkan efektivitas penggunaan motor servo dan desain tali penggerak. Tangan bionik merespons dengan baik terhadap perintah yang diberikan melalui Arduino Uno, respons terhadap perintah dilakukan dengan cepat, dan tidak ada penundaan yang signifikan dalam gerakan jari. Gerakan setiap jari cukup akurat, meskipun ada sedikit getaran pada beberapa gerakan tertentu. Hal ini mungkin disebabkan oleh beban atau gesekan pada mekanisme penggerak dan dapat diperbaiki dengan program pengoptimalan atau perbaikan mekanis. Tangan bionik menunjukkan stabilitas dan ketahanan yang baik selama pengujian. Servo motor dan sambungan mekanis pada tangan bionik tetap dalam kondisi baik selama pengujian berlangsung. Keberhasilan gerakan jari-jari tangan bionik menunjukkan keberhasilan dalam perancangan dan implementasi rangkaian elektronika. Pemilihan motor servo yang tepat dan program yang efisien pada Arduino Uno telah menghasilkan gerakan yang halus dan realistis. Namun ditemukan *jitter* atau getaran pada beberapa gerakan menunjukkan adanya potensi untuk perbaikan lebih lanjut. Program pengoptimalan atau penyesuaian mekanis dapat meningkatkan ketepatan gerakan jari-jari. Sedangkan kestabilan dan ketahanan yang baik selama pengujian menunjukkan bahwa tangan bionik telah dirancang dengan kokoh dan tahan lama. Dari hasil uji *delay* yang tercatat dalam Tabel 2 juga dapat diketahui bahwa selisih waktu yang dibutuhkan motor servo untuk bergerak pada ibu jari berkisar antara 132 hingga 147 milidetik, pada telunjuk berkisar antara 152 hingga 221 milidetik, pada jari tengah berkisar antara 130 hingga 163 milidetik, pada jari manis berkisar antara 133 hingga 178 milidetik, dan pada jari kelingking berkisar antara 138 hingga 154 milidetik sehingga dapat disimpulkan bahwa pergerakan jari tangan bionik dengan aktuator motor servo sangat akurat.



Gambar 7. Hasil akhir tangan bionik

Hasil evaluasi tangan bionik 3D menunjukkan hasil yang dapat menciptakan gerakan jari-jari yang alami dan responsif. Setiap jari dapat diangkat sesuai urutan angka 1 hingga 5 dengan lancar. Meskipun sistem berfungsi dengan baik, namun masih ditemukan sedikit gangguan pada beberapa gerakan yang memengaruhi akurasi.

Peragaan hasil akhir tangan bionik ditunjukkan pada Gambar 7. Evaluasi juga stabilitas dan perlindungan pelindung selama penggunaan. Perlu analisis yang tajam untuk mengoptimalkan kinerja tangan bionik, termasuk mengatasi *jitter* dan mempertimbangkan kekuatan bahan pencetakan 3D. Dengan pengembangan lebih lanjut, teknologi bionik ini diharapkan dapat memberikan solusi yang efektif dan terjangkau bagi para penyandang tunadaksa.

IV. SIMPULAN

Keberhasilan percobaan ini menunjukkan kemampuan yang baik dalam mengangkat dan menggerakkan setiap jari sesuai dengan angka yang ditentukan, dengan gerakan yang tampak alami. Respons terhadap perintah dari Arduino Uno dilakukan dengan cepat tanpa penundaan yang signifikan, menunjukkan efektivitas penggunaan motor servo dan desain tali penggerak. Meskipun ditemukan sedikit terdapat getaran pada beberapa gerakan, pergerakan jari-jari tangan bionik secara keseluruhan sangat akurat. Dari hasil uji *delay* yang tercatat, pergerakan jari tangan bionik dengan aktuator motor servo menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan selisih waktu yang kecil antara yang diharapkan dan yang terukur. Berdasarkan parameter keberhasilan berdasarkan percobaan secara kuantitatif, tingkat akurasi pergerakan jari-jari tangan bionik mencapai lebih dari 90%, menunjukkan bahwa tangan bionik ini berhasil mencapai standar yang tinggi dalam fungsionalitasnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak perguruan tinggi Kami yaitu Universitas PGRI Yogyakarta yang menyediakan sarana prasarana, Ucapan terima kasih juga Kami sampaikan kepada ibu Amalia C. Nur'aidha, M. Si, dan bapak Dhananjaya Yama Hudha Kumarajati, M. Biotech selaku dosen pembimbing dalam kegiatan penelitian ini. Semoga dengan kegiatan penelitian ini para mahasiswa dapat mengasah kemampuannya dengan harapan dapat berpikir kritis untuk memberikan kontribusi dalam kemajuan bangsa ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Febriani, "Penerimaan Diri Pada Remaja Penyandang Tuna Daksa," vol. 6, no. 1, pp. 150–157, 2018.
- [2] I. Pratiwi and Hartosujono, "Resiliensi pada penyandang tunadaksa," *J. SPIRITS*, vol. 5, no. 1, pp. 48–54, 2015, [Online]. Available: https://media.neliti.com/media/publications/256854-resiliensi-pada-penyandang-tuna-daksa-no-7316ab42.pdf&ved=2ahUKEwiLyNmi_or1AhXfxDgGHaoiCCMQFnoECC0QAQ&usq=AOvVaw3Qe6E--WKKiNhWabXCikr2
- [3] Yayasan visi maha karya, "Program Kakiku Kini Kembali," *yayasan visi maha karya*. <https://visimahakarya.org/program-tunadaksa/> (accessed May 26, 2023).

- [4] T. Jefri, "Aksesibilitas Sarana dan Prasarana bagi Penyandang Tunadaksa di Universitas Brawijaya," *Ijds*, vol. 3, no. 1, pp. 16–25, 2016.
- [5] N. Akhfridho, "Perancangan Dan Pembuatan Tangan Palsu Sebagai Alat Bantu Orang Cacat," 2011, [Online]. Available: <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/34853>
- [6] M. Rahman, *Rancang Bangun Protesis Lengan Untuk Tunadaksa Bawah Siku (Amputasi Transradial)*. 2017.
- [7] W. Schweitzer, M. J. Thali, and D. Egger, "Casestudy-of-a-userdriven-prosthetic-arm-design-Bionic-hand-versus-customized-bodypowered-technology-in-a-highly-demanding-work-environmentJournal-of-NeuroEngineering-and-Rehabilitation.pdf," *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–27, 2018.
- [8] M. F. Amirullah, D. Kuswanto, and A. D. Krisbianto, "Desain Lengan Bionik Berbasis Open Source (HACKberry Arm) untuk Anak-Anak Tunadaksa Amputasi Trans-radial agar Lebih Percaya Diri," no. January 2022, pp. 89–95, 2021, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/profile/Djoko-Kuswanto/publication/357578406_Desain_Lengan_Bionik_Berbasis_Open_Source_HACKberry_Arm_untuk_Anak-](https://www.researchgate.net/profile/Djoko-Kuswanto/publication/357578406_Desain_Lengan_Bionik_Berbasis_Open_Source_HACKberry_Arm_untuk_Anak-Anak_Tunadaksa_Amputasi_Trans-radial_agar_Lebih_Percaya_Diri/links/61d56fb1da5d105e551d6a6e/Desain-Lengan-Bionik-B)
- [9] B. Utomo, N. Y. Dwi Setyaningsih, and M. Iqbal, "Kendali Robot Lengan 4 Dof Berbasis Arduino Uno Dan Sensor Mpu-6050," *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 11, no. 1, pp. 89–96, 2020, doi: 10.24176/simet.v11i1.3699.
- [10] H. Nurfaizal, M. Makhsun, and Y. M. Djaksana, "Prototype Sistem Kendali Robot Arm Gripper Manipulator Menggunakan Flex Sensor Dan Mpu6050 Berbasis Internet of Things," *Fakt. Exacta*, vol. 13, no. 4, p. 191, 2021, doi: 10.30998/faktorexacta.v13i4.6598.
- [11] M. Ihya *et al.*, "Pengaruh Variasi Jenis Resin Dan Waktu Curing Pada Hasil Cetakan 3D Printing Terhadap Nilai Material Properties," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 139–144, 2022.
- [12] A. D. Sunnarto, Gatot. Katmimi. Eliana, "Efektifitas Biaya Penggunaan Teknologi Pencetakan 3D (Industri 4.0) pada Alat Bantu Ortotik Prostetik Gatot Sunarto," vol. 14, pp. 17–26, 2023.
- [13] R. Scopigno, P. Cignoni, N. Pietroni, M. Callieri, and M. Dellepiane, "Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey," *Comput. Graph. Forum*, vol. 36, no. 1, pp. 6–21, 2017, doi: 10.1111/cgf.12781.

Acknowledgment

We sincerely thank the experts and colleagues who have committed to reviewing the Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan from October 2023 to March 2024. The experts and colleagues who have contributed to the journal are listed below.

| Name | Affiliation |
|--|--|
| Airlangga Adi Hermawan, S.T., M.Sc., Ph.D. | Universitas Gadjah Mada |
| Andi Junaidi, S.T., M.T. | Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara |
| Anni Karimatul Fauziyyah, S.Kom., M.Eng. | Universitas Gadjah Mada |
| Ardhi Wicaksono Santoso., S.Kom., M.Sc., Ph.D. | Universitas Gadjah Mada |
| Brahmantya Aji Pramudita, S.Si., M.Eng. | Universitas Telkom |
| Daniar Fahmi., S.T., M.T., Ph.D. | Institut Teknologi Sepuluh Nopember |
| Dean Corio, S.T., M.T. | Institut Teknologi Sumatera |
| Dian Budhi Santoso, S.T., M.Eng. | Universitas Singaperbangsa Karawang |
| Erwin Setyo Nugroho, S.T., M.Eng. | Politeknik Caltex |
| Esa Apriaskar, S.T., M.T. | Universitas Negeri Semarang |
| Fakih Irsyadi, S.T., M.T. | Universitas Gadjah Mada |
| Freddy Kurniawan, S.T., M.T. | Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto |
| Imroatul Hudati, S.T., M.T. | Universitas Gadjah Mada |
| Isnan Nur Rifai, S.Si., M.Eng., Ph.D. | Universitas Gadjah Mada |
| Kazman Riyadi, S.T., M.T. | Politeknik Negeri Ujung Pandang |
| Muhammad Khairuddin, S.ST., M.Sc. | Politeknik Negeri Malang |
| Nova El Maidah, S.Si., M.Cs. | Universitas Negeri Jember |
| Nurriza Kholifatulloh Hasanah, S.T., M.Eng. | Politeknik Enjinering Indorama |
| Prima Asmara Sejati, S.T., M.Eng., Ph.D. | Universitas Gadjah Mada |
| Rendra Dwi Firmansyah, S.Si., M.Eng. | Badan Riset dan Inovasi Nasional |
| Ir. Riki Khomarudin, S.T., M.T. | Prima Energi Consult |
| Ir. Rustam Asnawi, S.T., M.T., Ph.D. | Universitas Negeri Yogyakarta |
| Dr. Sahirul Alam, S.T., M.Eng. | Universitas Gadjah Mada |
| Ir. Unan Yusmaniar Oktiawati, S.T., M.Sc., Ph.D. | Universitas Gadjah Mada |
| Ir. Wahri Sunanda., S.T., M.Eng. | Universitas Bangka Belitung |
| Yanolanda Suzantry Handayani, S.T., M.Eng. | Universitas Bengkulu |
| Yanuar Mahfudz Safarudin, S.T., M.T. | Politeknik Negeri Semarang |
| Yuliyanto Agung Prabowo, S.T., M.T. | Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya |