

Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things

Rian Ardiansyah, Mahishya Darizqhi Dyah Saputri, Haris Gibran Rizantha, Anugrah Al Hafidz, et.al (89 – 98)

Sistem Lacak GPS Dengan Kontrol Menggunakan Handphone Berbasis IoT

Royan Agusthian Nugraha, Albi Agasti, Dahlia Meylani, Ilham Faqih, Mura Shaki, Indra Dwisaputra, M.T. (99 – 105)

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi Partial Discharge untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi

Frenzi Agres Yudithia, Rosnita Rauf, Atik Charisma (106 – 121)

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz (122 – 136)

Analisis Parameter QOS (Quality of Service) pada Jaringan WIFI Gedung Fakultas Teknik UNJANI dengan Menggunakan Wireshark

Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, Hajjar Yuliana, et.al (137 – 145)

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31

Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah (146- 157)

Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma

Bunga Wahyudiani, Azmi Hafizat Muzada, Asep Najmurrokhman (158 – 166)

ISSN 1693-4989



9 771693 498955



Vol. 23, No. 2, Desember 2025

E-ISSN : 2745-5688 P-ISSN : 1693-4989

EPSILON : *Journal of Electrical Engineering and Information Technology* adalah jurnal penelitian dan pengkajian aplikasi teknologi dalam bidang teknik elektro dan teknologi informasi yang dikelola oleh Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani. Redaksi menerima tulisan para peneliti di lingkup perguruan tinggi dan lembaga penelitian. Tulisan bisa dalam Bahasa Inggris atau dalam Bahasa Indonesia. Makalah lengkap dikirim dalam bentuk *softcopy* ke alamat redaksi. Makalah akan dimuat apabila mengikuti panduan yang ditetapkan serta setelah mengalami penyuntingan dan penilaian dari redaksi ahli. Penilaian dari redaksi ahli dilaksanakan secara anonim.

PENGELOLA JURNAL

Penanggung Jawab

Dekan Fakultas Teknik Unjani

Pimpinan Umum

Ketua Program Studi Teknik Elektro Unjani

Pimpinan Redaksi

Dede Furqon Nurjaman, S.T., M.T. (Scopus ID : 57215826304)

Universitas Jenderal Achmad Yani

Tim Redaksi :

1. Fauzia Haz, S.T., M.T. (Scopus ID : 57215826492) Universitas Jenderal Achmad Yani
2. Nivika Tiffany Somantri, S.T., M.T. (Scopus ID : 7205030775) Universitas Jenderal Achmad Yani
3. Irvan Budiawan, S.T., M.T. (Scopus ID : 57205060472) Universitas Jenderal Achmad Yani
4. Naftalin Winanti, S.ST., M.T. (Scopus ID : 57200994613) Universitas Jenderal Achmad Yani
5. Salita Ulitia Prini, S.Kom., M.T. (Scopus ID : 57208581701) Unit Pusat Riset Elektronika & Telekomunikasi – BRIN
6. Griffani Megiyanto Rahmatullah, S.ST., M.T. (Scopus ID : 57215431443) National Taiwan University of Science and Technology
7. Adnan Raffi Al Tahtawi, S.Pd., M.T. (Scopus ID : 57188575833) Politeknik Negeri Bandung

Epsilon diterbitkan dua (2) kali dalam satu tahun
Alamat Redaksi dan Tata Usaha:
Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani
Jl. Terusan Jenderal Sudirman PO Box 148 Cimahi 40533
Telp./Fax. 022 – 6642063
Website : www.unjani.ac.id
e-mail : jurnal_epsilon@unjani.ac.id

MITRA BESTARI

- Reviewers : 1. Dr. Asep Najmurokhman, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 55919091000)
2. Handoko Rusian Iskandar, S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57194219446)
3. Giri Angga Setia S.T., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57215919610)*
4. Dede Irawan Saputa, S.Pd., M.T. (Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57215833890)
5. M. Reza Hidayat, S.T., M.T. Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57188573208)
6. Hajiar Yuliana, S.T., M.T. Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57194007789)*
7. Atik Charisma, S.T., M.T. Universitas Jenderal Achmad Yani, Scopus ID : 57188567470)
8. Yurika, S.T., M.T. (Politeknik TEDC Bandug, SINTA ID : 6109670)
9. Antrisha Daneraici Setiawan, S.T., M.T. (University of Electro-Communications, Scopus ID : 57188573899)
10. Hanny Madiawati, S.ST., M.T. (Politeknik Negeri Bandung, Scopus ID : 57193823758)*
11. Barokatun Hasanah S.T., M.T. (Institut Teknologi Kalimantan, Scopus ID : 57188567669)
12. Imil Hamda Imran, M.Sc, P.hD (King Fahd University of Petroleum and Minerals, Scopus ID : 57199736015)
13. Nurul Fahmi Arief, S.T., M.T. (Universitas Pendidikan Indonesia, SINTA ID : 6725597)*
14. Anugrah Adiwilaga S.ST., M.T (Universitas Pendidikan Indonesia, Scopus ID : 57194714935)
15. Fakhruddin Mangkusasmito, S.T., M.T. (Universitas Diponegoro, SINTA ID : 6720123)
16. Christiono, S.T., M.T. (Institut Teknologi PLN, Scopus ID : 6679673)
17. Andi Junaidi, S.T., M.T. (Institut Teknologi PLN, Scopus ID : 57200986174)*
18. Imam Taufiqurrohman, S.Pd., M.T. (Universitas Siliwangi, Scopus ID : 53980722100)*
19. Agus Ramelan, S.Pd., M.T. (Universitas Negeri Solo, Scopus ID : 57203956839)*
20. Steven Humena, S.T., M.T. (Universitas Ichsan Gorontalo, Scopus ID : 57192240068)
21. Ayu Latifah, S.T., M.T. (Institut Teknologi Garut, Scopus ID : 57203959221)
22. Fachrur Razy Rahman, S.T.,M.T. (Politeknik Industri Logam Morowali, Scopus ID : 57280529800)
23. Martin, S.T., M.T. (Politeknik Negeri Bandung, Scopus ID : 7202782870)
24. Dinda Ayu Permatasari, S.S.T., M.T. (Politeknik Negeri Malang, Scopus ID : 57209274119)
25. C. Bambang Dwi Kuncoro, Ph.D (National Chin-Yi University of Technology (NCUT), Taiwan, Scopus ID : 56168013600)*
-

DAFTAR ISI

Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things

Rian Ardiansyah, Mahishya Darizqhi Dyah Saputri, Haris Gibran Rizantha, Anugrah Al Hafidz, Rafli Nur Ikhsan, Rahmat Fadillah, Indra Dwisaputra, 89 – 98

Sistem Lacak GPS Dengan Kontrol Menggunakan Handphone Berbasis IoT

Royan Agusthian Nugraha, Albi Agasti, Dahlia Meylani, Ilham Faqih, Mura Shaki, Indra Dwisaputra, M.T. 99 – 105

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi Partial Discharge untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi

Frenzi Agres Yudithia, Rosnita Rauf, Atik Charisma 106 - 121

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz 122 – 136

ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK

Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, Hajjar Yuliana, Sofyan Basuki, Ade Sena Permana 137 – 145

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31

Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah 146- 157

Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma

Bunga Wahyudiani, Azmi Hafizat Muzada, Asep Najmurrokhman 158 - 166

DARI REDAKSI

Puji syukur kami sampaikan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kelimpahan rahmat-Nya sehingga kami bisa menerbitkan Jurnal *EPSILON : Journal of Electrical Engineering and Information Technology* Vol. 23 No.1 Juni 2025. Pada edisi ini menerbitkan 7 (tujuh) artikel di bidang Teknik Elektro. Artikel tersebut yakni : (1) Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things (2) Sistem Lacak GPS Dengan Kontrol Menggunakan Handphone Berbasis IoT (3) Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi Partial Discharge untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi (4) Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung (5) ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK (6) Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31 (7) Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma.

Tim redaksi mengucapkan terimakasih kepada peneliti-peneliti yang berkenan mempublikasikan hasil penelitiannya di Jurnal *EPSILON : Journal of Electrical Engineering and Information Technology* Vol. 23 No. 2 Desember 2025. Kami juga mengucapkan terimakasih kepada mitra bestari yang terlibat dalam proses *review* artikel-artikel pada edisi ini. Terimakasih kami ucapkan kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani yang telah mendukung penerbitan artikel-artikel. Besar harapan kami kepada para peniliti, perekayasa dan para fungsional lainnya untuk mempublikasikan hasil penelitiannya pada jurnal kami demi pengembangan ilmu pengetahuan teknologi khususnya di bidang teknik elektro. Kami menerima kritik dan saran untuk kemajuan jurnal *EPSILON*.

Cimahi, Desember 2025

Dewan Redaksi

Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things

Rian Ardiansyah¹⁾, Mahishya Darizqhi Dyah Saputri²⁾, Haris Gibran Rizantha³⁾, Anugrah Al Hafidz⁴⁾, Rafli Nur Ikhsan⁵⁾, Rahmat Fadillah⁶⁾, Indra Dwisaputra,⁷⁾

^{1,2,3,4,5,6,7)}Program Studi Teknik Elektronika
Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung
Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat 33211, Indonesia

^{*}Korespondensi : ardiansyahrian2021@gmail.com

Abstrak

Meningkatnya jumlah kendaraan di kawasan urban menimbulkan permasalahan serius terkait ketersediaan lahan parkir, terutama di pusat perbelanjaan, perkantoran, dan lingkungan kampus. Kesulitan dalam menemukan ruang parkir kosong menyebabkan kemacetan, pemborosan bahan bakar, serta peningkatan emisi gas buang. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring area parkir berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu mendeteksi keberadaan kendaraan pada setiap slot parkir secara real-time menggunakan sensor. Informasi ketersediaan slot parkir ditampilkan melalui media digital untuk mempermudah pengendara dalam menemukan ruang parkir yang tersedia tanpa harus berkeliling. Sistem ini juga mendukung pengelolaan parkir yang lebih efisien melalui pemantauan kondisi lahan parkir secara otomatis dan terpusat. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan parkir dan mengurangi waktu pencarian ruang parkir secara signifikan.

Kata kunci : Internet of Things, Sistem Monitoring Parkir, Sensor IR Proximity, RFID Module, Motor Servo, Arduino Uno.

Abstract

The increasing number of vehicles in urban areas has led to serious parking space issues, particularly in shopping centers, office complexes, and university campuses. The difficulty in locating vacant parking spots contributes to traffic congestion, fuel waste, and higher exhaust emissions. This study develops a parking lot monitoring system based on the Internet of Things (IoT), which detects vehicle presence in each parking slot in real time using sensors. The availability of parking spaces is displayed digitally, allowing drivers to find vacant spots without circling around. This system also enhances parking management efficiency by enabling centralized and automated monitoring of parking conditions. Implementation results show that the system effectively improves space utilization and significantly reduces the time required to find a parking spot.

Keywords : Internet of Things, Parking Monitoring System, Sensor IR Proximity, RFID Module, Motor Servo, Arduino Uno.

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah kendaraan di area perkotaan menyebabkan peningkatan kebutuhan akan solusi pengelolaan parkir yang efisien [1]. Kendala utama yang sering dihadapi adalah kesulitan dalam menemukan tempat parkir yang kosong secara cepat sehingga menimbulkan kemacetan dan pemborosan bahan bakar [2]. Internet of Things (IoT) menjadi teknologi yang sangat potensial untuk mengatasi permasalahan ini dengan menghubungkan perangkat sensor ke jaringan internet sehingga data dapat dikumpulkan dan diproses secara real-time [3], [4].

Info Makalah:

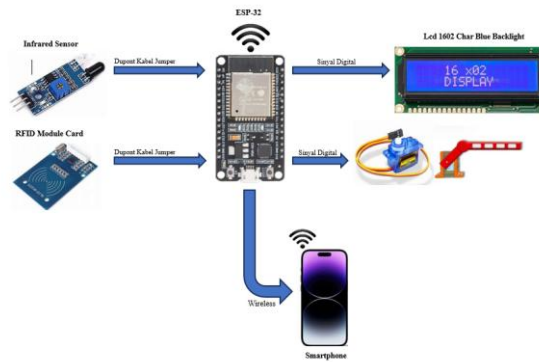
Dikirim : 22-6-2025
Revisi 1 : 19-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-859-2589-2074
e-mail : ardiansyahrian2021@gmail.com

Berbagai sistem monitoring parkir berbasis IoT telah dikembangkan sebelumnya. Misalnya, pemanfaatan mikrokontroler NodeMCU yang dipadukan dengan sensor infrared untuk mendeteksi ruang parkir dan mengirimkan data ke aplikasi mobile [5], [6]. Selain itu, terdapat pula aplikasi berbasis Android yang secara otomatis memberi pemberitahuan mengenai ketersediaan tempat parkir, sehingga memudahkan pengguna dalam mencari ruang kosong [7], [8]. Mikrokontroler ESP8266 dan ESP32 populer digunakan dalam pengembangan sistem tersebut karena kemampuannya dalam konektivitas Wi-Fi dan pengolahan

data yang cepat [9], [10].



Gambar 1. Diagram blok sistem parkir.

Sensor infrared menjadi pilihan utama untuk mendeteksi keberadaan kendaraan pada tiap slot parkir karena akurasi tinggi, respons cepat, dan kemudahannya dalam instalasi tanpa perlu modifikasi fisik yang besar [11], [12]. Data yang diperoleh kemudian dikirimkan secara nirkabel dan ditampilkan melalui antarmuka web sehingga dapat diakses dengan mudah oleh pengguna maupun pengelola parkir [13], [14]. Implementasi sistem ini tidak hanya membantu pengendara menemukan ruang parkir dengan cepat, tetapi juga mendukung pengelolaan area parkir yang lebih terstruktur dan efisien, sehingga dapat mengurangi kemacetan serta dampak lingkungan negatif [15].

II. METODE

Desain alat proyek dengan judul "Perancangan Sistem Monitoring dan Kontrol Akses Ruang Parkir Berbasis IoT Menggunakan ESP32 dan Teknologi RFID" dijelaskan pada bab ini. Pembahasan mencakup pembuatan desain diagram blok, desain perangkat keras, pemrograman perangkat lunak, rancangan kotak mekanik, tata letak instalasi sistem, serta metode pengolahan data. Bagian-bagian selanjutnya menjelaskan secara rinci tahapan-tahapan yang terlibat dalam pengembangan dan penerapan sistem pengelolaan parkir ini.

2.1 Studi Literatur

Penelitian ini mengadopsi pendekatan integratif dengan mengkaji berbagai literatur terkait teknologi monitoring dan kontrol akses parkir berbasis Internet of Things (IoT). Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep dasar sistem parkir otomatis, pemilihan perangkat keras yang optimal, serta integrasi teknologi nirkabel dan sistem autentikasi RFID.

2.2 Desain Sistem Kontrol

Desain diagram blok ini menggambarkan alur kerja sistem monitoring ruang kosong pada area parkir berbasis Internet of Things (IoT). Diagram ini menjelaskan prinsip kerja sistem serta komponen-

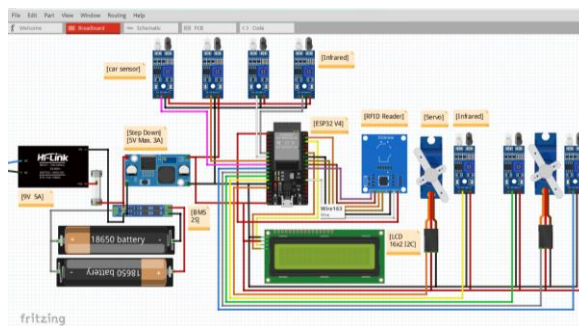
Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things (IoT)

***(Rian Ardiansyah, Mahishya Darizqhi Dyah Saputri, Haris Gibran Rianza, dkk :
Halaman 89 - 98)***

komponen yang digunakan, meliputi tahap input, proses, dan output. Pada tahap input, data diterima dari sensor infrared dan modul RFID yang berfungsi untuk mendeteksi keberadaan kendaraan dan validasi akses. Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem. Pada tahap output, informasi mengenai jumlah slot parkir yang tersedia ditampilkan secara real-time pada layar LCD 16x2, serta servo motor mengatur pembukaan dan penutupan palang pembatas. Sistem ini juga dilengkapi dengan komunikasi nirkabel antara ESP32 dan smartphone untuk kendali jarak jauh serta monitoring secara real-time, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

2.3 Rangkaian Sistem

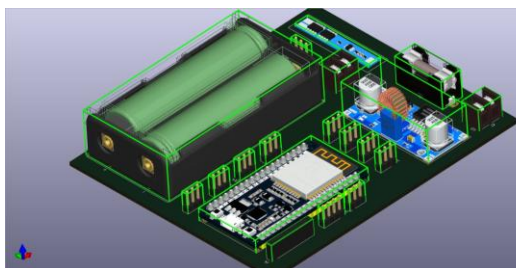
Bagian ini menjelaskan desain sistem elektronik dari alat sistem monitoring ruang kosong pada area parkir berbasis Internet of Things (IoT). Desain ini mencakup pengkabelan sensor dan aktuator yang terhubung ke mikrokontroler ESP32, serta detail penggunaan pin pada setiap komponen. Seluruh rangkaian dihubungkan melalui papan PCB untuk memperkuat koneksi antar komponen serta meminimalkan risiko lepasnya kabel saat perangkat digunakan. Input sistem berasal dari sensor infrared dan modul pembaca kartu RFID, yang mendeteksi kendaraan yang masuk dan keluar area parkir. Sementara itu, output sistem berupa motor servo yang berfungsi membuka dan menutup palang parkir secara otomatis, serta layar LCD 16x2 yang menampilkan jumlah slot parkir yang tersedia secara real-time. Sistem ini juga mendukung konektivitas nirkabel ke aplikasi berbasis smartphone, sehingga pengguna atau operator dapat memantau status parkir secara jarak jauh. Komunikasi data dilakukan menggunakan koneksi wireless dari ESP32 menuju aplikasi yang telah dikembangkan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



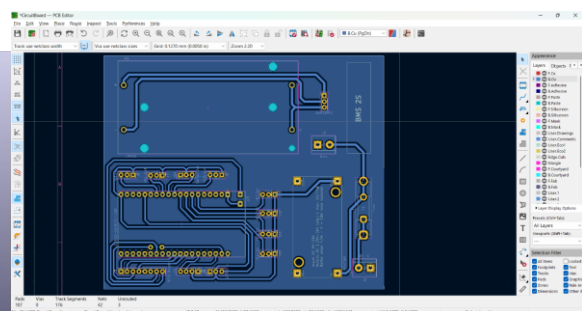
Gambar 2. Rangkaian sistem elektronik parkir otomatis

2.4 Rangkaian PCB sistem

Rancangan PCB memperhatikan jalur distribusi tegangan dan sinyal yang efisien agar sistem dapat bekerja secara stabil dan responsif. Layout PCB dioptimalkan untuk meminimalkan interferensi serta memastikan komunikasi data secara real-time. Sistem juga dirancang mendukung pengisian daya tanpa perlu membuka casing, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4 yang menampilkan desain dan hasil produksi PCB.



Gambar 3. Desain PCB sistem parkir.

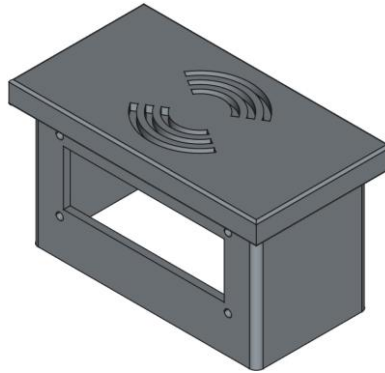


Gambar 4. Hasil jadi PCB sistem parkir.

2.5 Casing Module Daya

Enclosure berukuran 15 cm × 15 cm × 5 cm dirancang untuk melindungi komponen utama sistem, terutama catu daya. Ukurannya yang kompak memungkinkan integrasi sumber daya, modul penurun tegangan, dan unit pengendali tanpa mengurangi sirkulasi udara, berkat ventilasi pada sisi samping yang menjaga suhu tetap stabil. Struktur atas enclosure dapat dibuka untuk memudahkan perawatan dan penggantian komponen, dengan panel atas yang memiliki bukaan terbatas guna pengecekan kondisi internal tanpa harus membuka seluruh penutup, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

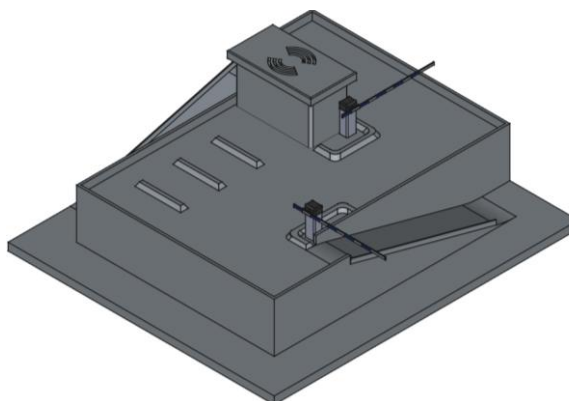
2.6 Desain Kotak Pos



Gambar 6. Desain kotak pos parkir.

Kotak pos sistem parkir dirancang berbentuk persegi panjang dengan atap datar yang dilengkapi ventilasi pada bagian atas untuk menjaga sirkulasi udara dan kestabilan suhu internal, sehingga mencegah panas berlebih yang dapat mengganggu kinerja komponen elektronik. Panel depan kotak pos memiliki lubang khusus untuk pemasangan layar LCD sebagai media informasi kepada pengguna parkir, serta panel buka yang memudahkan proses instalasi dan pemeliharaan perangkat internal. Dengan desain tersebut, kotak pos tidak hanya berfungsi sebagai pelindung komponen, tetapi juga menjadi bagian integral dari sistem informasi dan kontrol pada pengelolaan area parkir, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.

2.7 Desain Prototype



Gambar 7. Desain prototype sistem parkir otomatis.

Prototype sistem parkir otomatis dirancang dengan integrasi komponen utama dalam struktur bertingkat yang mendukung efisiensi dan kemudahan pemeliharaan. Kotak pos parkir berfungsi sebagai pusat kendali dengan ventilasi yang menjaga kestabilan suhu komponen elektronik. Mekanisme pengaturan akses kendaraan menggunakan barrier gate yang dikendalikan oleh aktuator atau servo motor, sementara jalur parkir dilengkapi dengan fitur penanda kendaraan. Desain ini mengutamakan kestabilan operasional serta kemudahan akses pada perangkat keras, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7.

2.8 Software Desain

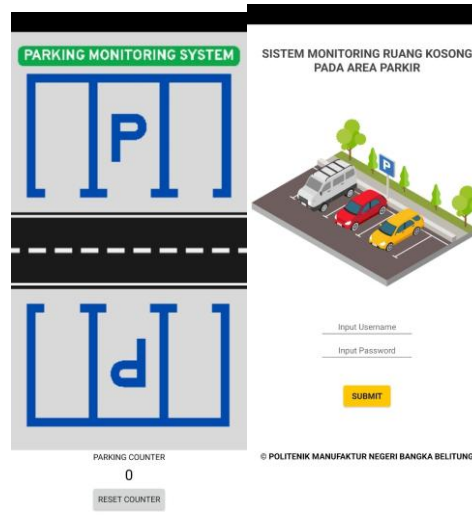
Aplikasi monitoring dirancang untuk memberikan kemudahan dalam melakukan pemantauan kondisi lahan parkir secara waktu nyata. Melalui antarmuka yang sederhana namun informatif, pengguna dapat

Sistem Monitoring Ruang Kosong pada Area Parkir Menggunakan Teknologi Internet of Things (IoT)

***(Rian Ardiansyah, Mahishya Darizqhi Dyah Saputri, Haris Gibran Rizantha, dkk :
Halaman 89 - 98)***

memperoleh informasi mengenai jumlah kendaraan yang berada di area parkir serta status setiap slot parkir berdasarkan data yang dikirimkan oleh sensor. Sistem ini juga dilengkapi dengan fitur autentikasi guna memastikan bahwa hanya pihak yang berwenang yang dapat mengakses informasi sistem.

Selain itu, aplikasi menyediakan fitur pengaturan ulang jumlah kendaraan, yang bertujuan untuk meningkatkan fleksibilitas dalam pengelolaan data parkir, terutama dalam kondisi khusus atau pemeliharaan sistem. Integrasi data sensor yang ditampilkan dalam antarmuka responsif memperkuat efisiensi operasional serta mempercepat proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan parkir. Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 8.



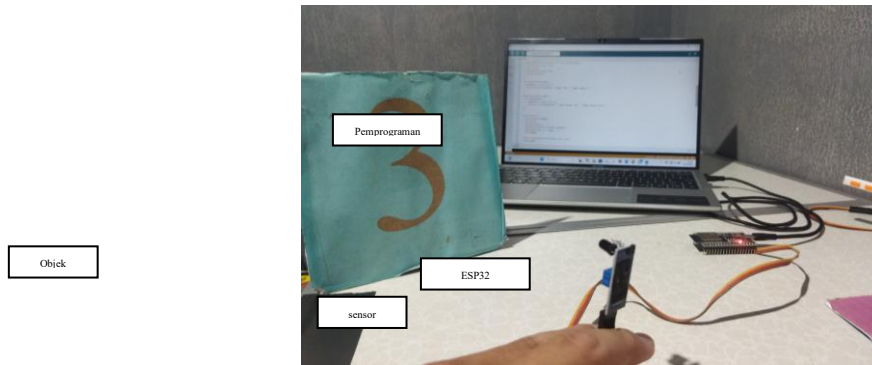
Gambar 8. Tampilan aplikasi monitoring parkir.

III. HASIL DAN DISKUSI

Bagian ini memuat hasil pengujian sistem yang telah dikembangkan serta pembahasannya. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan parameter yang telah ditentukan, mencakup aspek perangkat keras, perangkat lunak, serta respons keseluruhan sistem terhadap kondisi operasional. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan dianalisis secara deskriptif guna menilai kesesuaian antara keluaran sistem dengan rancangan awal. Pembahasan meliputi karakteristik masing-masing komponen utama yang digunakan, termasuk sensor inframerah, modul RFID MFRC522, dan motor servo SG90. Fokus pengujian pada sensor inframerah ditujukan untuk mengetahui kemampuan deteksi objek berdasarkan jarak serta pengaruh variasi warna dan intensitas cahaya lingkungan terhadap performa sensor. Analisis terhadap hasil yang diperoleh dilakukan untuk mengidentifikasi efektivitas sistem dan potensi keterbatasan yang muncul dalam penerapannya.

3.1 Pengujian Sensor Inframerah (IR)

Pengujian sensor inframerah dilakukan untuk mengetahui kemampuan deteksi berdasarkan jarak, warna objek, dan pencahayaan. Sensor terhubung ke Arduino Uno dengan tegangan kerja 3–5 V DC. Hasil menunjukkan sensor dapat mendeteksi objek pada jarak 1–8 cm, namun tidak pada jarak 9–10 cm. Dalam pencahayaan terang, semua warna objek (hitam, putih, hijau, biru, merah) terdeteksi hingga 30 cm. Dokumentasi pengujian ditampilkan pada Gambar 9, sedangkan data lengkap disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 9. Dokumentasi pengujian sensor infrared..

Table 1. Hasil Pengujian terhadap Objek Tangan.

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana sensor IR mampu mendeteksi keberadaan tangan yang melewati pintu. Hasil uji menunjukkan bahwa pada jarak 1 cm sampai 8 cm, sensor dapat mendeteksi keberadaan tangan secara konsisten dalam tiga kali pengujian. Namun pada jarak 9 cm, sensor sudah tidak mampu mendeteksi tangan.

Table 2. Hasil Pengujian Sensor terhadap Warna dan Pencahayaan.

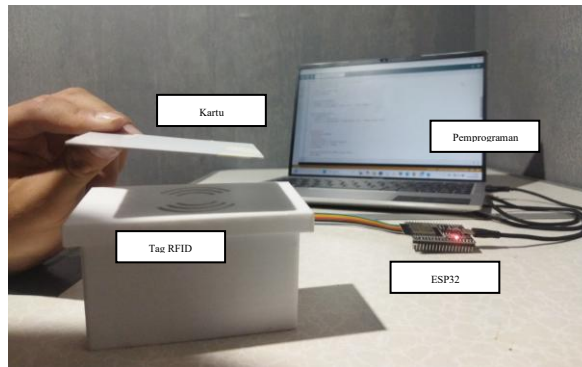
est Ir Sensor										
Warna	Jarak Pembacaan Kondisi Terang (Cm)									
	0	5	10	15	20	22	24	26	28	30
Hitam	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Putih	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Hijau	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Biru	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Merah	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Test Ir Sensor										
Warna	Jarak Pembacaan Kondisi Gelap (Cm)									
	0	5	10	15	20	22	24	26	28	30
Hitam	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X
Putih	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X
Hijau	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X
Biru	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X	X	X
Merah	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	X	X

Pada kondisi terang, semua warna objek (hitam, putih, hijau, biru, dan merah) dapat dideteksi sensor IR hingga jarak 30 cm tanpa kendala. Namun, pada kondisi gelap, deteksi mulai menurun setelah 22 cm, terutama pada warna gelap seperti biru dan hitam. Warna terang seperti putih dan merah masih terbaca hingga sekitar 24 cm. Hal ini menunjukkan bahwa pencahayaan dan warna memengaruhi akurasi sensor, di mana sensor IR bekerja lebih baik pada warna terang dan dalam kondisi cahaya cukup.

3.2 Pengujian MFRC 522 RFID

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja fungsional modul MFRC522 secara komprehensif. Fokus utama pengujian meliputi kemampuan modul dalam mendeteksi dan membaca *Unique Identifier* (UID) dari kartu RFID dan tag RFID, serta analisis terhadap jarak pembacaan efektif untuk kedua jenis transponder tersebut. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 10.



Gambar 10. Pengujian RFID dengan Kartu dan Tag.

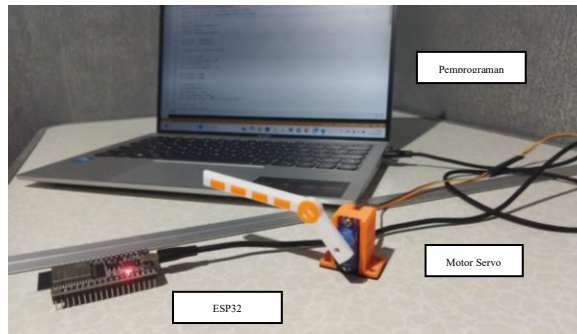
Table 3. Hasil Pengujian Jarak Pembacaan RFID.

Jarak (cm)	Kartu RFID (Card)	Tag RFID
0	✓	✓
0,5	✓	✓
1	✓	✓
1,5	✓	✓
2	✓	✓
2,5	✓	✓
2,7	✓	✓
3	✓	✗
3,5	✓	✗
3,6	✓	✗
3,7	✓	✗
3,8	✓	✗
3,9	✗	✗
4	✗	✗

Tabel 3 menunjukkan bahwa kartu RFID dapat terbaca dengan baik hingga jarak 3,8 cm, sementara tag RFID hanya dapat terbaca hingga jarak 2,7 cm. Di atas jarak tersebut, keduanya tidak terdeteksi oleh modul. Dengan demikian, kartu RFID memiliki jangkauan baca yang lebih jauh dibandingkan tag RFID, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan jarak pembacaan lebih panjang.

3.3 Pengujian Motor Servo

Subbab ini menyajikan hasil pengujian terhadap komponen motor servo, yang merupakan salah satu aktuator utama dalam sistem. Pengujian ini difokuskan pada akurasi sudut putar motor servo dalam merespons sinyal kendali dari mikrokontroler. Pengujian dilakukan dengan mengatur sudut putar motor servo dari 0° hingga 180°, pada interval tertentu. Hasil menunjukkan bahwa motor servo mampu bergerak secara akurat ke setiap sudut yang diuji, yaitu 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150°, dan 180°, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 11.



Gambar 11. Pengujian Pergerakan Motor Servo

Tabel 4. Hasil Pengujian Pergerakan Motor Servo.

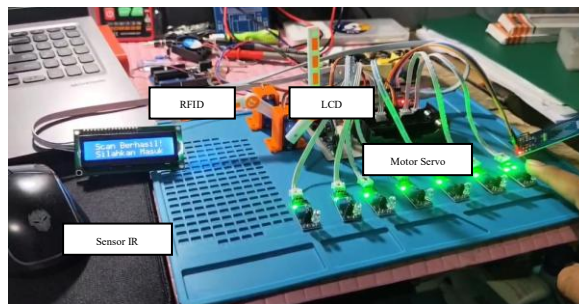
TEST MOTOR SERVO	
SUDUT (DALAM DERAJAT)	KEAKURASIAN
0	✓
30	✓
60	✓
90	✓
120	✓
150	✓
180	✓

Pada posisi 0°, palang parkir berada dalam kondisi terangkat ke atas sebagai indikasi akses terbuka. Hasil ini menunjukkan bahwa motor servo bekerja dengan baik dan responsif terhadap perintah sudut yang diberikan, sehingga dapat diandalkan dalam mengatur akses keluar-masuk kendaraan secara otomatis.

3.4 Pengujian Output Tampilan dan Mekanisme Servo

Layar LCD 16x2 berfungsi untuk memberikan informasi secara langsung kepada pengguna mengenai status sistem, seperti hasil pemindaian kartu RFID. Pada pengujian ini, apabila kartu RFID yang digunakan terdeteksi valid, maka sistem akan menampilkan pesan “Scan Berhasil!! Silakan Masuk” pada layar LCD. Pesan ini berfungsi sebagai indikator bahwa pengguna diperbolehkan mengakses area parkir.

Selanjutnya, motor servo akan secara otomatis mengatur posisi palang parkir. Palang akan terbuka setelah kartu RFID terverifikasi, dan akan tertutup kembali secara otomatis setelah sensor infrared mendeteksi bahwa kendaraan telah melewati area masuk. Proses ini menunjukkan bahwa integrasi antara tampilan output dan mekanisme kontrol akses telah berjalan sesuai dengan logika sistem yang dirancang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Tampilan pesan pada LCD dan pergerakan palang parkir setelah verifikasi kartu RFID.

IV. KESIMPULAN

Perancangan dan implementasi sistem monitoring serta kontrol akses ruang parkir berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan ESP32 dan teknologi RFID telah berhasil dilakukan dengan hasil yang memuaskan. Sistem mampu mendeteksi keberadaan kendaraan secara real-time menggunakan sensor infrared dengan akurasi tinggi pada jarak efektif 2–10 cm. Modul RFID RC522 bekerja secara responsif dalam membaca UID kartu dengan waktu respons kurang dari satu detik dan secara efektif membatasi akses hanya untuk pengguna yang terdaftar. Mekanisme kontrol palang parkir melalui motor servo berjalan dengan presisi, sesuai perintah digital dari mikrokontroler. Tampilan informasi melalui LCD I2C memberikan antarmuka langsung yang jelas dan informatif kepada pengguna. Seluruh komponen sistem berfungsi secara terpadu dan stabil, menunjukkan kinerja yang andal dalam mendukung efisiensi, keamanan, dan kenyamanan sistem parkir. Sistem ini terbukti layak digunakan sebagai solusi berbasis IoT untuk pengelolaan parkir yang cerdas dan terintegrasi, serta dapat dikembangkan lebih lanjut dengan dukungan antarmuka web atau aplikasi mobile untuk pemantauan dan manajemen data secara jarak jauh.

UCAPAN TERIMAKASIH

Apresiasi disampaikan kepada Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, khususnya kepada seluruh pihak yang berperan dalam penyelenggaraan mata kuliah Aplikasi Rangkaian Elektronika, atas arahan, pendampingan, dan dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan jurnal ini. Materi serta pengalaman selama perkuliahan telah memberikan kontribusi besar terhadap keberhasilan penelitian ini.

Terima kasih juga disampaikan kepada seluruh civitas akademika Polman Babel atas tersedianya fasilitas dan lingkungan akademik yang mendukung, sehingga seluruh rangkaian kegiatan penelitian terlaksana dengan lancar. Penghargaan diberikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga proyek ini berhasil diselesaikan secara menyeluruh.

Penelitian ini memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang sistem monitoring dan Internet of Things (IoT). Hasil yang dicapai menjadi pijakan konkret bagi kemajuan inovasi teknologi yang membawa manfaat bagi masyarakat luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Zhang, X. Liu, M. Guo, dan H. Zhao, "Urban parking challenges and solutions: A review," *Transportation Research Part C*, vol. 115, pp. 102618, 2020.
- [2] M. A. Rahman dan M. A. Islam, "A review of smart parking systems and technologies," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 87947–87961, 2020.
- [3] L. Atzori, A. Iera, dan G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer Networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787–2805, 2010.
- [4] S. Li, L. D. Xu, dan S. Zhao, "The internet of things: A survey," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233–2243, 2014.
- [5] M. Arifin dan T. Pratama, "Smart parking system using NodeMCU and ultrasonic sensor," dalam *Proc. 3rd International Conference on Electrical and Electronic Engineering*, 2021, pp. 1–5.
- [6] J. Park dan H. Choi, "IoT-based parking monitoring system with NodeMCU," *Sensors*, vol. 19, no. 10, 2019.
- [7] S. Sari dan S. Nugroho, "Android-based parking notification system," *Journal of Information Technology Applications*, vol. 9, no. 1, 2020.
- [8] Rahman dkk., "Mobile app for parking availability," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 123456–123465, 2020.
- [9] D. S. Kim dan H. J. Lee, "ESP8266-based smart parking system," *Journal of Information Processing Systems*, vol. 14, no. 4, 2018.
- [10] Y. Li dan S. Gao, "Development of IoT-based parking system," *Sensors*, vol. 19, no. 1, 2019.
- [11] S. R. Sharma dan R. K. Gupta, "Infrared sensor based smart parking system for efficient vehicle detection," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 12, pp. 4007–4015, 2021.
- [12] N. H. Tran dkk., "Smart parking monitoring using ESP8266," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 6, 2019.
- [13] H. Chen dkk., "Web-based parking guidance system," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 6, 2017.

- [14] T. Nguyen dan P. D. Pham, "Real-time parking management using IoT," *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 15, 2020.
- [15] S. A. Rahman dan M. Islam, "Smart parking systems: A review of technologies and methodologies," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 121011–121038, 2021.

Sistem Lacak GPS Dengan Kontrol Menggunakan Handphone Berbasis IoT

**Royan Agusthian Nugraha ^{1*)}, Albi Agasti ²⁾, Dahlia Meylani ³⁾, Ilham Faqih ⁴⁾,
Mura Shaki ⁵⁾, Indra Dwisaputra, M.T. ⁶⁾**

^{1,2,3,4,5)}Program Studi Teknik Elektro

⁶⁾Dosen Program Studi Teknik Elektro

Politeknik Manufaktur Bangka Belitung

Kawasan Industri Air Kantung, Sungailiat 33211, Indonesia

^{*})Korespondensi : royanagusthian21@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memungkinkan pengembangan sistem pelacakan yang efisien dan dapat diakses dari jarak jauh. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sebuah sistem pelacak GPS berbasis IoT yang dapat dikontrol dan dipantau secara real-time menggunakan handphone. Sistem ini dibangun menggunakan modul GPS Neo-6M untuk akuisisi data lokasi, mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama yang terhubung ke internet melalui Wi-Fi, serta sistem manajemen daya yang terdiri dari baterai lithium, modul charger TP4056, dan modul step-down. Perancangan perangkat keras diintegrasikan pada Printed Circuit Board (PCB) kustom dan dilindungi oleh kotak pelindung yang didesain menggunakan perangkat lunak CAD. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu memperoleh data koordinat dengan akurasi tinggi, bahkan setara dengan Google Maps, dan dapat mempertahankan lokasi valid terakhir saat sinyal terputus. Pengujian modul charger juga menunjukkan kinerja yang efektif dalam mengisi daya baterai hingga penuh. Secara keseluruhan, sistem pelacak portabel ini berhasil dikembangkan dan berfungsi sesuai tujuan, memberikan kemudahan pemantauan lokasi secara praktis.

Kata kunci : ESP32, GPS, IoT, Neo-6M, Sistem Pelacak, TP4056

Abstract

The development of Internet of Things (IoT) technology enables the creation of efficient and remotely accessible tracking systems. This research aims to design and implement an IoT-based GPS tracking system that can be controlled and monitored in real-time using a mobile phone. The system is built using a Neo-6M GPS module for location data acquisition, an ESP32 microcontroller as the main processing unit connected to the internet via Wi-Fi, and a power management system consisting of a lithium battery, a TP4056 charger module, and a step-down module. The hardware design is integrated onto a custom Printed Circuit Board (PCB) and protected by an enclosure designed with CAD software. Test results show the system can acquire coordinate data with high accuracy, even on par with Google Maps, and can maintain the last valid location when the signal is lost. The charger module testing also demonstrated effective performance in fully charging the battery. Overall, this portable tracking system was successfully developed and functions according to its objectives, providing practical ease of location monitoring.

Keywords : ESP32, GPS, IoT, Neo-6M, TP4056, Tracking System

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah merevolusi berbagai bidang, termasuk sistem

Info Makalah:

Dikirim : 22-6-2025
Revisi 1 : 19-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-859-2589-2074
e-mail : royanagusthian21@gmail.com

pelacakan dan pemantauan objek secara real-time. IoT memungkinkan berbagai perangkat untuk saling terhubung melalui internet dan berbagi data secara otomatis, termasuk dalam implementasi sistem pelacakan berbasis *Global Positioning System* (GPS) (Rayes & Salam, 2017). Sistem ini sangat berguna dalam sektor transportasi, logistik, dan keamanan, karena dapat memberikan informasi lokasi secara akurat dan cepat.

Pada sistem pelacakan konvensional, keterbatasan akses dan kontrol menjadi salah satu kendala utama. Namun, dengan pemanfaatan teknologi IoT, data lokasi dari modul GPS dapat dikirimkan secara langsung ke perangkat pengguna, seperti smartphone, melalui jaringan internet (Risteska Stojkoska & Trivodaliev, 2017). Dengan demikian, pengguna dapat melakukan pemantauan maupun kontrol terhadap perangkat pelacak dari jarak jauh secara real-time.

Modul GPS seperti *Neo-6M* digunakan untuk membaca koordinat lokasi, sedangkan mikrokontroler seperti *ESP32* dimanfaatkan karena memiliki kemampuan koneksi *Wi-Fi* yang memungkinkan perangkat terhubung ke internet (Arduino, n.d.). Data yang dikumpulkan kemudian dapat dikirim dan disimpan ke layanan cloud seperti *Firebase* atau *ThingSpeak*, yang memungkinkan pengguna untuk mengakses data melalui aplikasi berbasis *web* atau *mobile* (Aziz & Nugroho, 2020).

Beberapa penelitian telah menunjukkan efektivitas penggunaan GPS dan IoT dalam membangun sistem pelacak kendaraan dan aset yang fleksibel dan efisien (Kusuma & Wicaksono, 2021). Oleh karena itu, dalam penelitian ini dikembangkan sebuah sistem pelacak GPS berbasis IoT yang dapat dikontrol dan diakses melalui *handphone*. Sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi pemantauan serta memberikan kemudahan dalam kontrol perangkat pelacak secara praktis dan *real-time*.

II. METODE

Desain alat proyek dengan judul "Sistem Lacak GPS Dengan Kontrol Menggunakan Handphone Berbasis IoT" dijelaskan pada bab ini. Pembahasan mencakup pembuatan desain diagram blok, desain perangkat keras, pemrograman perangkat lunak, rancangan kotak mekanik, tata letak instalasi sistem, serta metode pengolahan data. Bagian-bagian selanjutnya menjelaskan secara rinci tahapan-tahapan yang terlibat dalam pengembangan dan penerapan sistem lacak GPS ini.

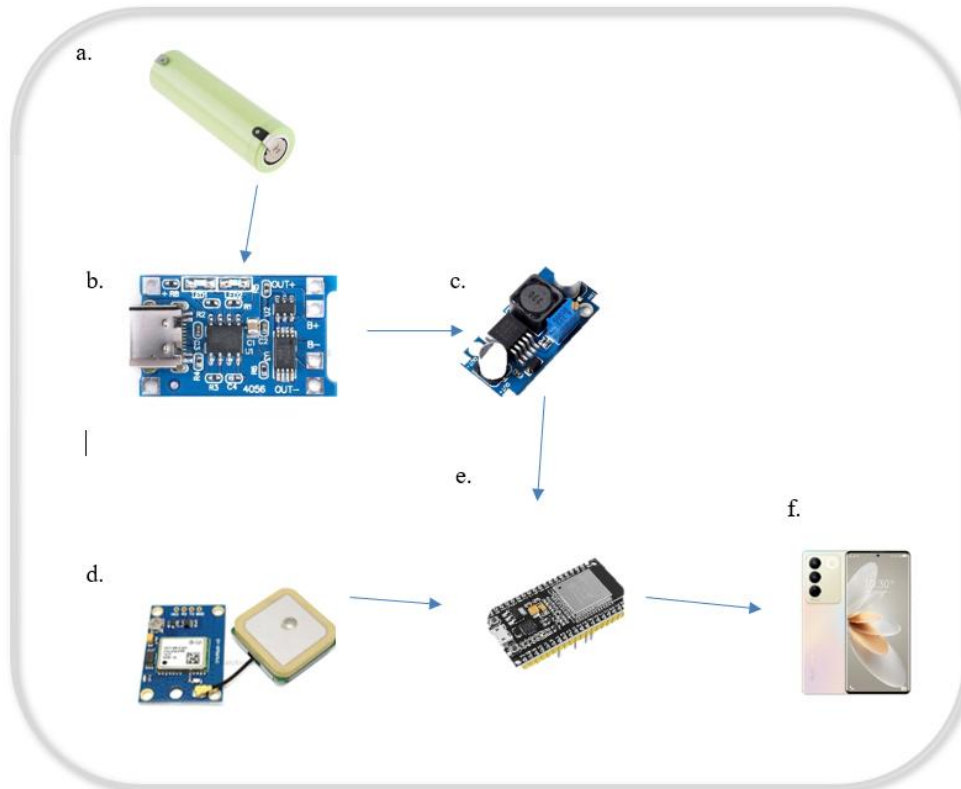
A. Diagram Blok Sistem Kontrol

Sistem pelacakan lokasi ini dirancang dengan modul GPS *Neo-6M* sebagai input utama yang mengakuisisi data koordinat secara *real-time*, sebuah modul yang umum digunakan dalam berbagai aplikasi pelacakan karena sensitivitas dan akurasi (misalnya, dalam penelitian oleh Syahrani dkk. (2024) yang mengembangkan sistem serupa, meskipun fokus utamanya pada keamanan pagar, namun prinsip penggunaan komponen *ESP32* dan monitoring jarak jauh relevan). Data tersebut kemudian diproses oleh mikrokontroler *ESP32*, yang berfungsi sebagai unit kendali pusat sistem karena kemampuannya dalam pemrosesan data dan konektivitas *Wi-Fi/Bluetooth* terintegrasi (Satria dkk., 2024; Syahrani dkk., 2024).

Selanjutnya, informasi lokasi dikirimkan ke perangkat smartphone melalui koneksi nirkabel (*Wi-Fi* atau *Bluetooth*) untuk pemantauan jarak jauh, sebuah kapabilitas inti dalam aplikasi berbasis *Internet of Things* (IoT) (Al-Karaki dan Kamal, 2004; Sethi dan Sarangi, 2017). Kebutuhan daya sistem dipenuhi oleh baterai *lithium* yang dapat diisi ulang melalui modul *charger*, dengan modul *step-down* yang memastikan regulasi tegangan yang sesuai untuk semua komponen elektronik. Aspek manajemen daya

ini krusial dalam perangkat IoT portabel untuk memastikan operasi yang efisien dan berkelanjutan (Yick dkk., 2008; Zanella dkk., 2014).

Desain terintegrasi ini menghasilkan sistem pelacak yang portabel, efisien, dan dapat digunakan dalam berbagai aplikasi pemantauan lokasi secara real-time, sejalan dengan tren pengembangan sistem IoT untuk berbagai kebutuhan monitoring (Gubbi dkk., 2013; Atzori dkk., 2010).

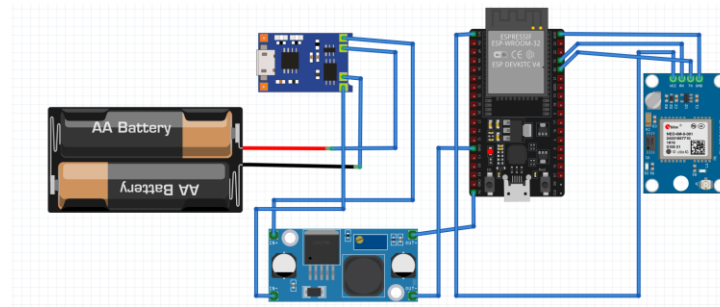


Gambar 1. Diagram Blok Sistem Kontrol

B. Rangkaian Sistem

Bagian ini menjelaskan desain sistem elektronik dari alat pelacak lokasi berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem ini menggunakan modul GPS *Neo-6M*, mikrokontroler *ESP32*, modul *charger*, baterai *lithium*, dan modul *step-down*. Desain ini mencakup pengkabelan dan koneksi antar komponen yang dirakit pada papan PCB (*Printed Circuit Board*) untuk memastikan kestabilan koneksi serta meminimalkan risiko gangguan selama perangkat digunakan, sebuah praktik penting dalam desain perangkat elektronik untuk menjaga integritas sinyal dan performa (Johnson dan Graham, 2003; Montrose, 2000). Modul GPS *Neo-6M* berfungsi sebagai input utama yang membaca data koordinat lokasi secara *real-time*, yang kemudian diproses oleh mikrokontroler *ESP32*, sebuah pilihan populer untuk aplikasi IoT karena integrasi Wi-Fi serta kemampuan pemrosesannya (Ridhoni dkk., 2023; Syahrani dkk., 2024). Data lokasi yang telah diproses ini selanjutnya dikirimkan ke aplikasi *smartphone* melalui konektivitas nirkabel (*Wi-Fi* atau *Bluetooth*), memungkinkan pemantauan jarak jauh (Sethi dan Sarangi, 2017).

Untuk manajemen daya, modul *charger* digunakan untuk mengisi ulang baterai *lithium* yang menjadi sumber daya utama, sebuah komponen standar dalam perangkat portabel modern (Whittingham, 2004). Sementara itu, modul *step-down* berperan krusial dalam menstabilkan dan menurunkan tegangan dari baterai agar sesuai dengan kebutuhan operasional mikrokontroler *ESP32* dan modul GPS, yang umumnya memerlukan tegangan lebih rendah (Rashid, 2017). Sistem yang dirancang secara keseluruhan ini memungkinkan pelacakan lokasi secara efisien dan portabel, serta mendukung pemantauan jarak jauh melalui aplikasi yang telah dikembangkan, sejalan dengan paradigma sistem IoT yang bertujuan untuk interkoneksi dan akses data jarak jauh (Gubbi dkk., 2013; Atzori dkk., 2010).

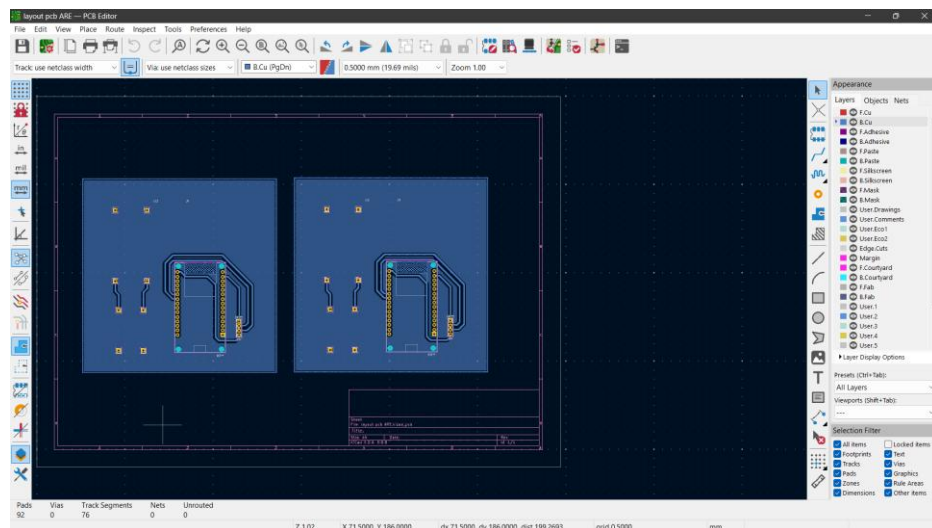


Gambar 2. Rangkaian Sistem

C. Rangkaian Sistem PCB (Printed Circuit Board)

Perancangan perangkat keras pada sistem pelacak GPS ini dilakukan dengan mempertimbangkan kestabilan suplai daya serta keterpaduan komponen dalam satu kesatuan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT), mengacu pada prinsip-prinsip dasar desain elektronik untuk perangkat portabel (misalnya, prinsip desain yang dibahas oleh Horowitz dan Hill, 2015). Jalur distribusi tegangan dan sinyal dirancang secara efisien untuk menjaga performa sistem selama proses pelacakan berlangsung. Tata letak sirkuit dioptimalkan untuk mendukung pengolahan data lokasi secara *real-time* dan memastikan komunikasi yang stabil antara modul GPS *Neo-6M* dan mikrokontroler *ESP32* sebagai unit pengolah pusat, sesuai dengan praktik terbaik dalam desain PCB (*Printed Circuit Board*) untuk integritas sinyal dan minimalisasi interferensi elektromagnetik (Montrose, 2000).

ESP32 ditempatkan pada papan rangkaian yang dirancang khusus dengan konfigurasi koneksi antar komponen yang kuat guna meminimalkan gangguan sinyal dan menjaga kontinuitas fungsi sistem, sebagaimana penting dalam pengembangan perangkat IoT yang handal dan terintegrasi (Ridhoni dkk., 2023). Sistem juga mendukung pengisian daya ulang melalui modul charger tanpa perlu pembongkaran, dengan baterai *lithium* sebagai sumber daya utama, serta modul *step-down* yang mengatur tegangan sesuai kebutuhan masing-masing komponen, mengikuti kaidah perancangan sistem catu daya elektronik yang efisien (Rashid, 2017). Seluruh rangkaian diintegrasikan secara kompak dan efisien untuk menghasilkan perangkat pelacak yang portabel, handal, dan mampu beroperasi secara berkelanjutan dalam berbagai kondisi di lapangan, sebuah tujuan umum dalam pengembangan perangkat IoT modern yang menuntut fungsionalitas tinggi dalam bentuk yang praktis (misalnya, seperti yang ditekankan dalam berbagai aplikasi oleh Atzori dkk., 2010).

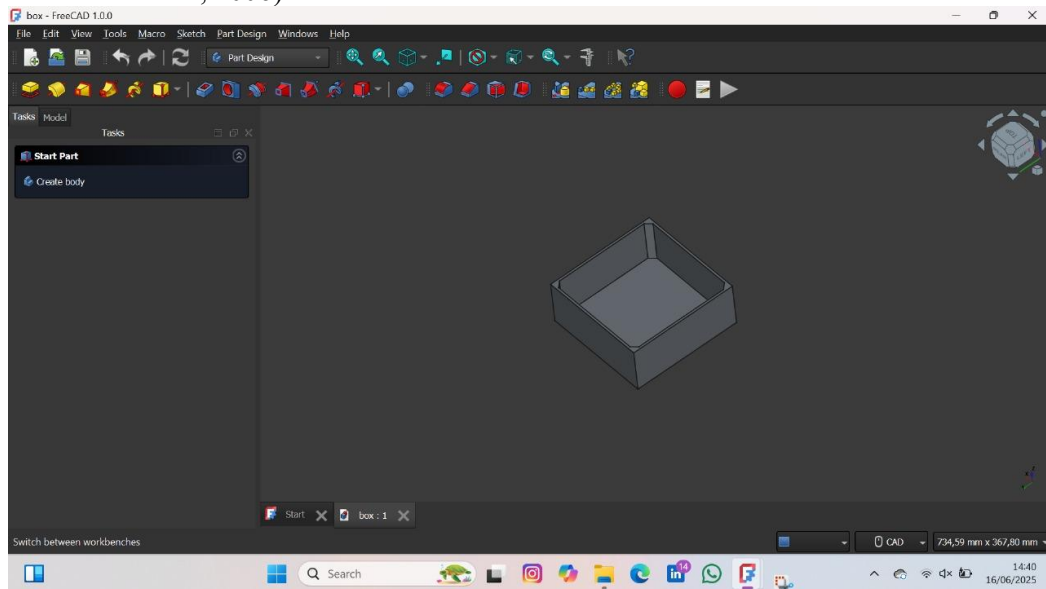


Gambar 3. Rangkaian Sistem PCB (Printed Circuit Board)

D. Desain Box Proyek

Tahap perancangan mekanik difokuskan pada pembuatan kotak pelindung (*enclosure*) untuk seluruh sistem elektronik, sebagaimana merupakan salah satu bagian krusial dari metode perancangan dan pengembangan produk secara keseluruhan (Ulrich dan Eppinger, 2016). Tujuan utama dari desain ini adalah untuk melindungi komponen-komponen sensitif seperti *mikrokontroler ESP32*, modul GPS, dan baterai dari benturan fisik, debu, serta faktor lingkungan lainnya yang dapat mempengaruhi kinerja dan keandalan perangkat, di mana pemilihan material menjadi faktor penentu (Ashby, 2010). Desain kotak proyek ini dibuat menggunakan perangkat lunak desain berbantuan komputer (CAD), yaitu *FreeCAD versi 1.0.0*, yang memungkinkan visualisasi dan iterasi desain secara cepat sebelum tahap produksi fisik.

Kotak dirancang dengan dimensi yang presisi agar dapat menampung *Printed Circuit Board (PCB)* dan semua modul secara pas dan aman. Praktik ini sejalan dengan prinsip *Design for Manufacture and Assembly (DFMA)* untuk memastikan kemudahan perakitan dan meminimalkan guncangan internal yang dapat mengganggu koneksi (Boothroyd dkk., 2010). Selain itu, desain ini mempertimbangkan portabilitas perangkat secara keseluruhan. Dengan bentuk yang ringkas, alat pelacak menjadi mudah untuk dibawa dan ditempatkan pada objek yang akan dipantau. Meskipun tidak diperlihatkan secara detail pada model dasar, rancangan akhir juga akan menyertakan lubang atau bukaan yang diperlukan untuk akses eksternal, seperti *port USB* untuk pengisian daya. Rancangan ini juga memberikan perhatian khusus pada celah untuk memastikan antena GPS dapat menerima sinyal satelit secara optimal, karena material dan desain penutup dapat secara signifikan mempengaruhi performa antena (Thaysen dan Jakobsen, 2006).



Gambar 4. Desain Box Proyek

III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil dan pembahasan berisi data yang disajikan dengan tabel-tabel dan/atau gambar-gambar serta analisis pembahasannya. Tabel dan gambar diberi nomor urut dengan angka romawi dan diberi judul. Sebelum Anda mulai memformat makalah Anda, pertama menulis dan menyimpan konten sebagai file teks terpisah. Pindahkan dengan *paste special* pilih *unformatted text*.

A. Module GPS Neo-6M

Pengujian dilakukan dengan menggunakan modul ESP32 (ESP-WROOM-32) yang terhubung dengan modul GPS NEO-6M dan dikombinasikan dengan fitur web server berbasis WiFi. Kode program dirancang untuk menampilkan koordinat lokasi (latitude dan longitude) melalui browser pada perangkat yang terhubung dalam satu jaringan WiFi. Saat pengujian, perangkat diletakkan di area terbuka agar modul GPS dapat memperoleh sinyal satelit. Setelah beberapa detik, koordinat lokasi berhasil ditampilkan di halaman web, lengkap dengan tautan menuju Google Maps. Selanjutnya, ketika perangkat dipindahkan ke dalam ruangan tertutup, GPS kehilangan sinyal; namun sistem tetap mampu

menampilkan data lokasi terakhir yang valid. Hal ini menunjukkan bahwa program mampu menyimpan dan menampilkan koordinat terakhir meskipun sinyal GPS hilang. Berdasarkan hasil pengujian, sistem berhasil bekerja sesuai tujuan, yaitu memantau dan menampilkan posisi terkini melalui browser dengan fallback ke lokasi terakhir jika sinyal GPS tidak tersedia.

Tabel 1. Hasil pengujian, sistem Module GPS Neo-6M

No	Waktu	Latitude Modul	Longitude Modul	Satelit	Altitude (m)	Jarak ke titik acuan	Perbandingan dengan Google Maps
1	10:03:00	-1.852700	106.131500	7	-13,50	5,96	Hampir tepat (beda < 6 m)
2	10:03:10	-1.852680	106.131490	7	-13,50	3,67	Sangat akurat (beda < 4 m)
3	10:03:20	-1.852660	106.131470	7	-13,50	1,23	Sangat akurat (beda < 2 m)
4	10:03:30	-1.852649	106.131474	8	-13,50	0,00	TEPAT (sama persis dengan Maps)

B. Module TP Charger

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja modul TP4056 dalam proses pengisian baterai lithium-ion. Pertama, modul TP4056 dihubungkan ke sumber tegangan input sebesar 5V dari adaptor USB yang stabil. Kemudian, sebuah baterai lithium-ion 3.7V disambungkan ke output modul. Selama proses pengisian berlangsung, data dicatat secara berkala setiap 5 menit, meliputi tegangan input, tegangan output, arus pengisian, suhu modul, dan status indikator LED (merah atau biru). Tegangan dan arus diukur menggunakan multimeter digital. Status indikator LED diamati secara visual. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa efektif modul dalam mengisi baterai dari kondisi kosong hingga penuh serta mengevaluasi kestabilan tegangan dan arus selama proses pengisian. Hasil pengamatan dicatat dalam tabel percobaan untuk dianalisis lebih lanjut.

Tabel 2. hasil pengujian, sistem Module TP Charger

No.	Waktu	Tegangan Input (V)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)	Status LED	Status Pengisian
1	11:23:00	5,10	3,72	970	Merah	Mengisi (awal)
2	11:28:00	5,08	3,93	850	Merah	Mengisi (progres)
3	11:33:00	5,07	4,10	700	Merah	Mengisi (80%)
4	11:38:00	5,08	4,19	300	Merah	Hampir penuh
5	11:43:00	5,09	4,20	60	Biru	Penuh / Standby

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem pelacak GPS berbasis IoT telah berhasil dirancang dan diimplementasikan, memenuhi tujuan untuk menyediakan solusi pemantauan lokasi yang efisien, akurat, dan dapat diakses serta dikontrol dari jarak jauh melalui handphone secara real-time. Pengujian fungsionalitas modul GPS Neo-6M di area terbuka menunjukkan kemampuan akuisisi data koordinat dengan akurasi tinggi, bahkan mencapai ketepatan yang sama dengan Google Maps saat menerima sinyal dari 8 satelit. Sistem juga terbukti andal karena mampu menyimpan dan menampilkan data lokasi terakhir yang valid ketika sinyal GPS terputus. Dari sisi manajemen daya, modul charger TP4056 efektif dalam mengisi baterai lithium hingga penuh, yang ditandai dengan perubahan status indikator LED dari merah menjadi biru. Desain perangkat keras yang terintegrasi pada PCB kustom dan dilindungi oleh kotak pelindung yang dirancang menggunakan CAD berhasil menyatukan seluruh komponen secara kompak dan portabel, sekaligus melindungi perangkat dari faktor eksternal. Secara keseluruhan, sistem telah berhasil bekerja sesuai dengan tujuan yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. L. & T. K. V. Risteska Stojkoska, "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, pp. 1454-1464, 2017.
- [2] S. S. Rayes, *Internet of Things: From Hype to Reality—The Road to Digitization*, Springer, 2017.
- [3] H. & W. A. Kusuma, "Implementasi Internet of Things (IoT) pada Sistem Monitoring dan Tracking Kendaraan Berbasis ESP32 dan Google Maps API," *Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 7(2), p. 45–52, 2021.
- [4] A. & N. L. E. Aziz, "Rancang Bangun Sistem Pelacak Kendaraan Menggunakan GPS dan GSM Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 8(3), pp. 157-162, 2020.
- [5] (n.d), "Neo-6M GPS Module Guide," *Arduino*, [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>.
- [6] Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E. (2004). Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11, 6–27. <https://doi.org/10.1109/MWC.2004.1368893>
- [7] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54, 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- [8] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29, 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [9] Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. In *Journal of Electrical and Computer Engineering* (Vol. 2017). Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- [10] Tapler, D., Gadermaier, B., Spychala, J., Stainer, F., Marko, A., Königsreiter, J., Hogrefe, K., Heitjans, P., & Wilkening, H. M. R. (2025). Unraveling Ultrafast Li-Ion Dynamics in the Solid Electrolyte LiTi₂(PS₄)₃ by NMR down to Cryogenic Temperatures. *Journal of the American Chemical Society*. <https://doi.org/10.1021/jacs.5c05253>
- [11] Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52, 2292–2330. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2008.04.002>
- [12] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1, 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi *Partial Discharge* untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi

Frenzi Agres Yudithia ^{1*)}, Rosnita Rauf ²⁾, Atik Charisma ³⁾

^{1,2)}Program Studi Teknik Elektro
Universitas Ekasakti

Jalan Veteran Dalam No. 26 Padang -25113

³⁾Program Studi Teknik Elektro

Universitas Jenderal Achmad Yan

Jalan Terusan Jend. Sudirman PO.BOX 148 Cimahi 40531

^{*}Korespondensi : frenziagresyudithia@gmail.com

Abstrak

Pencapaian deteksi andal dan lokalisasi *Partial Discharge* (PD) yang presisi adalah tantangan krusial dalam pemantauan prediktif peralatan tegangan tinggi. *Partial Discharge* mengindikasikan degradasi isolasi, dan pendeteksian diperumit oleh fenomena *multipath* akustik serta distorsi sinyal dari struktur internal peralatan. Tinjauan ini mengkaji konvergensi teknologi sensor dan algoritma canggih untuk mengatasi lokalisasi PD. Kemajuan sensor meliputi *Acoustic Emission* (AE) yang dioptimalkan dengan Model KLM, sensor UHF untuk memfilter kebisingan, dan sensor akustik serat optik inovatif. Untuk akurasi lokalisasi, teknik pemrosesan sinyal telah berkembang melampaui TDOA. Kini, diterapkan algoritma kuat seperti GCC-PHAT untuk meredam kebisingan, dan PSORS untuk memodelkan jalur perambatan sinyal akustik di sekitar penghalang. Alternatifnya adalah lokalisasi online melalui ETFL. Integrasi sensor sensitif dan algoritma *pathfinding* cerdas memberikan solusi diagnosis multimetode yang akurat, mendukung operasional peralatan tegangan tinggi yang lebih andal dan efisien.

Kata kunci : Kalibrasi, Partial Discharge, Pemeliharaan Prediktif , Sensor

Abstract

Achieving reliable detection and precise localization of Partial Discharge (PD) is a crucial challenge in predictive monitoring of high-voltage equipment. Partial Discharge indicates insulation degradation, and detection is complicated by acoustic multipath phenomena and signal distortion from the equipment's internal structure. This review examines the convergence of sensor technologies and advanced algorithms to address PD localization. Sensor advancements include Acoustic Emission (AE) optimized with the KLM Model, UHF sensors for noise filtering, and innovative fiber optic acoustic sensors. For localization accuracy, signal processing techniques have advanced beyond TDOA. Powerful algorithms such as GCC-PHAT for noise suppression and PSORS for modeling the acoustic signal propagation path around obstacles are now applied. An alternative is online localization via ETFL. The integration of sensitive sensors and intelligent pathfinding algorithms provides an accurate multi-method diagnosis solution, supporting more reliable and efficient operation of high-voltage equipment.

Keywords : Calibration, Partial Discharge, Predictive Maintenance, Sensors

I. PENDAHULUAN

Peralatan tegangan tinggi seperti transformator daya, kabel, dan switchgear memiliki peran yang sangat krusial dalam menjamin stabilitas sistem tenaga listrik. Permasalahan muncul ketika seiring bertambahnya usia peralatan utama jaringan listrik tersebut dan diperlukan metode yang handal untuk proses pemeliharaan serta perbaikan dalam mendeteksi kerusakan lebih awal khususnya untuk mengetahui kondisi bagian internal peralatan. Saat ini kebutuhan tersebut dapat terpenuhi ketika dilakukan pemantauan pada peralatan yang sedang beroperasi (*online monitoring*) yang dilakukan secara berkelanjutan, dimana proses ini dapat menghasilkan perekaman tekanan (*stres*) yang relevan sehingga menjadi bahan pertimbangan terhadap masa pakai peralatan. Adapun penyebab utama kerusakan pada

peralatan disebabkan karena adanya peluahan sebagian atau lebih umum disebut *partial discharge* (PD) yang dapat menjembatani muatan pada bahan isolator secara bertahap dapat menimbulkan degradasi pada bahan isolasi yang akan merusak peralatan [1], [2].

Info Makalah:

Dikirim : 29-10-2025
Revisi 1 : 07-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-82385341107
e-mail : frenziagresyudithia@gmail.com

Oleh karena itu, pemantauan aktivitas PD secara *online* digunakan sebagai metode penting untuk melakukan penilaian kondisi isolasi pada peralatan tegangan tinggi. Meskipun demikian, ada beberapa hal yang akan menjadi tantangan utama dalam melakukan diagnosis untuk kegiatan pemantauan selama mendeteksi PD secara andal dan menentukan sumber lokalisasinya secara akurat [17], [30]. Berdasarkan kemampuan tingkat akurasi tersebut, maka hasil penentuan lokasi akan menjadi sangat penting dalam memberikan informasi posisi PD secara langsung, selanjutnya dapat mengatur strategi kegiatan pemeliharaan.

Kondisi ini mungkin akan menjadi lebih sulit ketika sumber PD terjadi di dalam peralatan yang lebih kompleks seperti transformator, di mana sinyal akustik dapat terdistorsi dan mengalami pelemahan (*attenuation*) selama perambatannya [3], [14]. Pembahasan ini contohnya pada bagian struktur internal transformator seperti belitan dan inti dapat mempengaruhi perambatan gelombang akustik dan waktu kedatangan atau *Time of Arrival* (TOA), hal ini mengacu pada waktu yang dibutuhkan gelombang akustik untuk merambat dari sumber gangguan PD hingga mencapai pendeteksian sensor karena mediumnya yang tidak homogen [14]. Artikel ini secara umum akan mereview penjelasan tentang pendeteksian dan sumber lokasi gangguan peralatan tegangan tinggi yang disebabkan oleh PD. Selanjutnya akan membahas secara mendalam berbagai jenis-jenis sensor dan metode kalibrasi yang telah dikembangkan. Pada tahapan akhir akan dilanjutkan dengan teknik pemrosesan sinyal serta algoritma lokasi yang menjadi kunci untuk mewujudkan pemeliharaan prediktif yang akurat.

II. METODE

Peluhan sebagian merupakan penyebab utama dalam fenomena degradasi bahan isolasi, kejadian ini bisa terjadi di berbagai kondisi karena adanya pelepasan energi di rongga, di permukaan (*creeping*), atau di celah pada bagian isolasi. Selanjutnya indikator dalam degradasi ini dapat dideteksi secara sistematis melalui metode kimia seperti *Dissolved Gas Analysis* (DGA) [12] atau melalui berbagai teknik non-elektrik, seperti pengukuran suara akustik [9], [22], cahaya [11], gelombang elektromagnetik [5], atau analisis gas terlarut. Mengingat peran PD sebagai penanda potensi kegagalan pada bahan isolator, maka diperlukan juga beberapa aspek lainnya seperti sensor, kalibrasi, dan mekanisme yang pada bagian selanjutnya akan diulas untuk mendukung deteksi PD yang andal. Pembahasan ini akan dimulai dengan meninjau sensor-sensor yang dikembangkan (termasuk sensor akustik [19], [22], sensor *Ultra High Frequency* (UHF) [5], dan sensor induktif [25] untuk mendeteksi berbagai sinyal PD. Setelah itu, akan diuraikan metode kalibrasi yang esensialnya untuk memastikan akurasi dan keandalan data yang direkam oleh sensor [4]. Sebagai penutup, akan dibahas mekanisme terjadinya berbagai jenis PD dan bentuk karakteristik sinyal yang merupakan fondasi penting untuk mewujudkan diagnosis kondisi isolasi yang efektif.

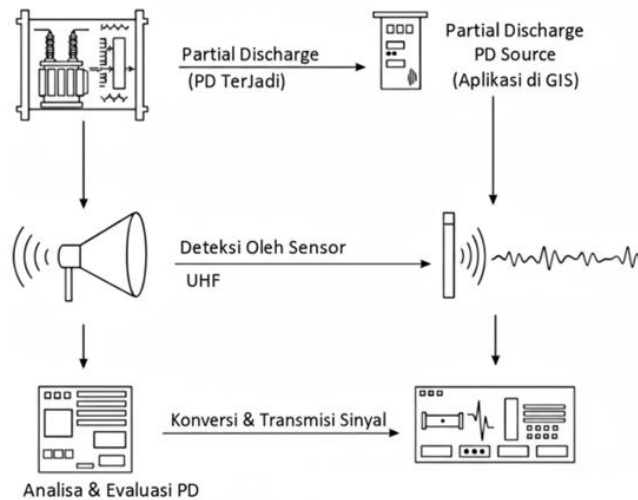
A. Sensor Partial Discharge

Pemilihan sensor yang tepat merupakan langkah yang paling awal dan fundamental untuk mencapai hasil diagnosis *Partial Discharge* (PD) yang efektif. Hal ini disebabkan sinyal PD yang dihasilkan oleh kegagalan isolasi dapat muncul dalam berbagai bentuk fisik [5], [9], diantaranya termasuk pulsa elektrik diukur melalui arus frekuensi ultra-tinggi (UHF) [5], gelombang elektromagnetik yang dideteksi oleh antena frekuensi tinggi [5], dan gelombang akustik ditangkap oleh sensor ultrasonik atau akustik [9]. Mengingat banyaknya variasi sinyal ini, berbagai jenis sensor juga telah dikembangkan secara spesifik untuk masing-masing sinyal. Oleh karena itu perlu untuk memastikan kesesuaian sensor dengan jenis sinyal PD yang lebih dominan, media transmisi (udara, minyak, atau padat) [5], serta lingkungan pengujian adalah penentu utama yang akan menjamin sensitivitas, akurasi, dan keberhasilan keseluruhan proses identifikasi dan lokasi kerusakan isolasi. Berikut ini adalah ulasan mengenai penggunaan dan

karakteristik spesifik dari berbagai jenis sensor yang telah dikembangkan untuk mendeteksi PD sebagai berikut :

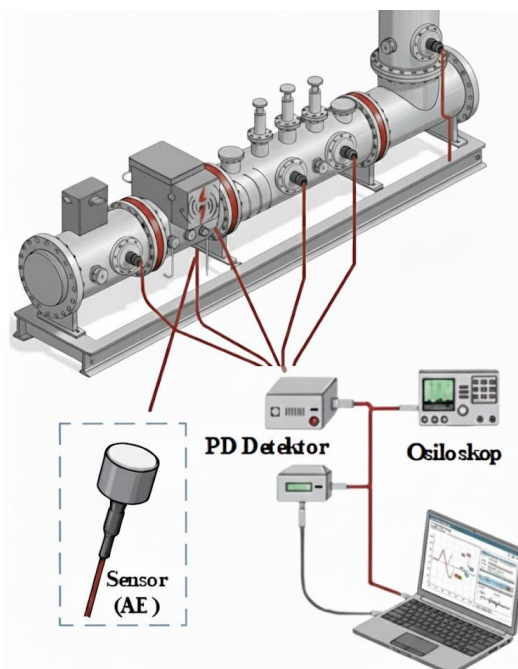
- 1) Sensor Elektrik Tradisional melakukan pengujian PD berdasarkan standar IEC 60270 yang merupakan acuan umum secara garis besar telah mewakili pengukuran PD pada peralatan listrik bertegangan tinggi [1]. Standar ini berlaku untuk pengukuran listrik PD menggunakan tegangan AC hingga 400 Hz dan tegangan DC. Rangkaian pengukuran standar IEC 60270 terdiri dari sinyal PD yang mengalir melalui kapasitansi objek uji (C_a), kapasitor kopling (C_k), perangkat kopling (C_D) dengan impedansi input (Z_{mi}), kabel koaksial (C_C), dan instrumen pengukur (M_I). Rangkaian ini dirancang untuk mengukur pulsa arus PD yang mengalir melalui objek uji (C_a), di mana bagian spektrum frekuensi tinggi dari sinyal inilah yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan PD. Salah satu yang menjadi keunggulan dari metode sensor elektrik tradisional yang berbasis IEC 60270 adalah sensitivitasnya yang tinggi terhadap aktivitas PD yang lemah karena bermuatan kecil, diukur dalam satuan pikoCoulomb (pC) menjadi indikasi kerusakan isolasi pada tahap awal. Hal ini juga menjadikannya sebagai alat diagnostik yang efektif untuk mendeteksi PD di dalam transformator atau peralatan lain. Selain itu, fungsi utama metode ini dijadikan untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu (*apparent charge*) [1]. Meskipun utamanya berguna untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu, beberapa metode dalam kategori elektrik ini dapat memprediksi lokasi PD. Namun demikian, kemampuan untuk lokalisasi menggunakan metode ini masih terbatas, karena umumnya hanya mampu melakukan lokalisasi 1-D (secara linear atau sepanjang konduktor, misalnya nomor belitan atau lilitan) [17]. Selain itu, juga karena sifatnya yang mengukur sinyal listrik sehingga metode ini sangat rentan terhadap interferensi elektromagnetik eksternal di lingkungan operasi. Kerentanan ini mengakibatkan proses pengukuran seringkali memerlukan langkah-langkah penyaringan (*filtering*) dan perisai (*shielding*) yang rumit untuk menjamin keakuratan hasil.
- 2) Sensor *Ultra High Frequency* (UHF) merupakan sistem pemantauan PD yang bekerja dengan mendeteksi gelombang elektromagnetik (EM) secara non-invasif yang disebabkan oleh adanya fenomena PD pada peralatan listrik bertegangan tinggi seperti *Gas-Insulated Switchgear* (GIS) dan transformator daya. Sensor ini dapat bekerja pada rentang frekuensi ultra-tinggi yaitu antara 300 MHz hingga 3 GHz [5]. Langkah awal dalam melakukan metode deteksi menggunakan sensor UHF dilakukan dengan cara menangkap sinyal elektromagnetik yang dihasilkan oleh aktivitas PD. Ini merupakan tahap akuisisi sinyal, di mana pulsa arus PD yang sangat cepat di dalam peralatan listrik memancarkan gelombang EM, yang kemudian dideteksi oleh sensor. Kualitas sinyal yang diakuisisi pada langkah awal ini digunakan sebagai prasyarat utama untuk seluruh proses diagnostik. Tanpa sinyal yang akurat dan bersih dari sensor, analisis lanjutan (seperti penentuan lokasi atau pemodelan pola PD) tidak akan dapat dipercaya. Beberapa hal yang menjadi kelebihan metode deteksi PD menggunakan UHF dilihat pada kemampuannya dalam ketahanan perangkat tersebut menerima sinyal gangguan elektromagnetik dari luar (interferensi). Selanjutnya pada perbandingan antara kekuatan sinyal yang ingin dideteksi (Sinyal PD) dengan kekuatan sinyal yang tidak diinginkan (Derau atau Kebisingan) yang disebut sebagai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) [5]. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang bersih dan andal, terutama saat peralatan sedang beroperasi (*online monitoring*) di lingkungan industri yang ramai. Faktor yang mendasari kelebihan dalam metode ini diantaranya pertama, sifat fisik PD itu sendiri, di mana lucutan sebagian merupakan impuls yang sangat singkat (seringkali rise time < 1 ns pada isolasi minyak) yang memancarkan gelombang EM dominan dalam rentang frekuensi ultra-tinggi dan kedua, adanya perisai alami pada peralatan tegangan tinggi yang tertutup struktur logam seperti tangki transformator atau selubung GIS yang secara efektif menghalangi kebisingan dari eksternal [5]. Kemampuannya dalam mengisolasi sinyal PD secara internal inilah yang memberikan imunitas superior (sistem dengan tingkat ketahanan yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode deteksi PD lainnya terhadap gangguan dari lingkungan luar) dan SNR yang tinggi atau kondisi di mana kekuatan sinyal yang bermanfaat (sinyal PD) jauh lebih besar (dominan) dibandingkan dengan kekuatan sinyal gangguan (derau atau *noise*) yang diterima oleh sensor, sehingga menjadikannya pilihan ideal untuk pengawasan isolasi yang sensitif. Untuk menjamin keakuratan sensor UHF, maka diperlukan penempatan sensor yang optimal guna meminimalkan obstruksi sinyal atau ada halangan fisik antara sumber PD dengan titik di mana terjadi lucutan [20]. Sistem pemantauan kondisi yang komprehensif pada peralatan tegangan tinggi, menggunakan teknologi Sensor UHF dalam menangkap sinyal PD secara non-invasif. bertujuan

untuk mendeteksi anomaly atau pada isolasi secepat mungkin (PD Terjadi → Deteksi → Analisa) sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan peralatan yang fatal. Alur metode deteksi PD ini secara umum dideskripsikan pada Gambar 1 langkahnya dimulai dari Sumber PD, misalnya di dalam trafo dan GIS yang kemudian menghasilkan Emisi Sinyal UHF. Sinyal ini selanjutnya ditangkap melalui Deteksi oleh Sensor UHF, sebelum diproses melalui konversi dan transmisi Sinyal (menggunakan Data Converter dan Transmitter). Tahap terakhir dilakukan analisis serta evaluasi PD, di mana data sinyal yang diterima dianalisis untuk mengidentifikasi, mengukur, dan mengevaluasi karakteristik PD tersebut.



Gambar 1 Sistem Deteksi dan Analisis PD Menggunakan Sensor UHF pada (Trafo dan GIS).

- 3) Sensor Akustik Ultrasonik contohnya pada Teknik *Acoustic Emission* (AE) atau termasuk salah satu jenis sensor dengan metode deteksi non-invasif, perannya juga sangat penting dalam pemeliharaan prediktif untuk diagnosis PD terutama pada perangkat tegangan tinggi seperti transformator dan GIS [22]. Gelombang tekanan akustik yang dihasilkan sensor ini berfungsi sebagai pembawa informasi spasial (lokasi) PD. Kemampuan sensor AE dalam menangkap dan membandingkan kedatangan gelombang PD di beberapa titik menjadikan hasil diagnosa akan akurat. Sehingga kegiatan pada proses ini lebih aman karena bersifat non-invasif dan dapat memprediksi penentuan lokasi kerusakan dalam tindakan perbaikan terencana tanpa perlu mematikan daya (*online*)[17].



Gambar 2 Pemantauan PD *Online* GIS menggunakan Sensor AE

Penggunaan sensor AE harus dioptimalkan untuk mencapai tingkat sensitivitas ultra tinggi yaitu kemampuan untuk menangkap pulsa PD yang sangat lemah karena pulsa PD awal seringkali memiliki energi yang sangat kecil. Optimasi ini akan ditentukan pada pemilihan jenis material sensor sehingga mencapai sensitivitas maksimum serta dikenal kuat yaitu menggunakan keramik piezoelektrik PZT tipe 5A [6]. Sebagai salah satu contohnya pada Sensor AE Tipe A6890 dirancang dengan elemen penginderaan ganda untuk mengoptimalkan respons frekuensi dan SNR. Sistem deteksi PD menggunakan Sensor AE bekerja dengan memasang sensor di dekat lokasi PD pada peralatan. Sensor AE mengubah gelombang tekanan akustik PD menjadi sinyal listrik yang kemudian diproses oleh PD Detektor (difilter dan diukur). Sinyal ini selanjutnya divisualisasikan melalui osiloskop untuk verifikasi dan kemudian dianalisis menggunakan laptop untuk diagnosis mendalam dan penentuan lokasi sumber PD. Proses ini memungkinkan pemantauan online dan lokalisasi kerusakan isolasi secara efektif [13]. Gambar 2 mengilustrasikan konfigurasi sistem pemantauan kondisi online dan diagnosis PD yang memanfaatkan gelombang akustik. Sistem ini terdiri dari tiga komponen yang saling terhubung (Peralatan Tegangan Tinggi GIS, Sensor AE, dan Unit Pemrosesan Sinyal). Secara teknis dalam optimasi desain sensor AE yang merupakan sebagai transduser piezoelektrik, dapat dilakukan menggunakan Model *Krimholtz-Leedom-Matthaei* (KLM) [6]. Model KLM berperan dalam optimasi desain sensor AE untuk memprediksi dan menganalisis sifat material seperti pada keramik PZT tipe 5A dan bentuk geometri sensor meliputi ketebalan elemen dengan menjadi alat simulasi prediktif. Hal ini dapat memastikan bahwa sensor yang diproduksi akan mencapai sensitivitas ultra-tinggi dan respons frekuensi optimal yang diperlukan untuk mendeteksi pulsa PD yang lemah dan menghasilkan SNR terbaik [6]. Setelah dilakukan optimasi, kinerja sensor juga dievaluasi lebih lanjut melalui analisis karakterisasi mendalam dengan mengubah data sensor mentah menjadi informasi diagnostik yang akurat dan dapat ditindaklanjuti. Kemudian sinyal AE yang terukur dalam domain frekuensi ditentukan menggunakan dua rumus kunci [6]:

- Frekuensi Sentroid ($f_{centroid}$) Frekuensi Sentroid memberikan frekuensi rata-rata berbobot dari seluruh spektrum frekuensi sinyal AE:

$$f_{centroid} = \frac{\sum_{k=1}^N k \cdot F[k]}{\sum_{k=1}^N F[k]} \quad (1)$$

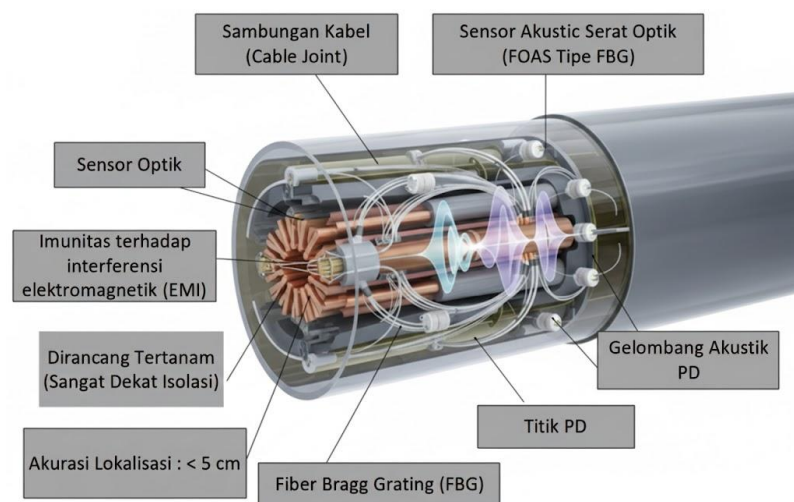
Di mana $F[k]$ adalah besaran yang sesuai dengan bin k dalam spektrum frekuensi.

- Frekuensi Puncak Berbobot (f_{peak}) Frekuensi Puncak Berbobot adalah rata-rata geometrik dari Frekuensi Puncak (f_{peak}) dan Frekuensi Sentroid ($f_{centroid}$):

$$(f_{peak}) = \sqrt{(f_{peak}) \cdot (f_{centroid})} \quad (2)$$

- 4) Sensor Optik dan Kimia seperti *Fiber-Optic Acoustic Sensors* (FOAS) juga merupakan bagian metode yang digunakan untuk pemantauan PD secara *online* tanpa perlu mematikan peralatan, karena FOAS dapat mengatasi masalah terbesar deteksi PD yaitu derau elektromagnetik sehingga menjadikannya sangat andal dan unggul. karena keunggulan utamanya berupa imunitas total terhadap *Electromagnetic Interference* (EMI) saat sensor ini berada di lingkungan operasional bertegangan tinggi, metode deteksi kelistrikan konvensional sangat rentan terhadap EMI seperti *corona* atau *switching* yang dapat menutupi sinyal PD yang lemah. FOAS mengatasi masalah ini karena beroperasi menggunakan prinsip optik dimana cahaya melalui serat optik, bukan listrik, sehingga menjamin tingkat SNR yang sangat tinggi dan menghasilkan data diagnostik yang bersih dan akurat [7], [11]. Pengembangan larik sensor akustik serat optik dengan menggunakan beberapa elemen berbasis *Fiber Bragg Grating* (FBG) yang masing-masing berfungsi sebagai titik deteksi individual dilakukan dengan meminimalkan jumlah kabel yang diperlukan sambil memaksimalkan jumlah titik sensor untuk lokalisasi PD di dalam belitan transformator [8]. Sehingga untuk mencapai tingkat akurasi lokalisasi PD yang terjadi di dalam belitan transformator (dengan eror kurang dari 5 cm), selain itu model desain larik sensor yang harus dipasang sangat dekat atau bahkan tertanam di

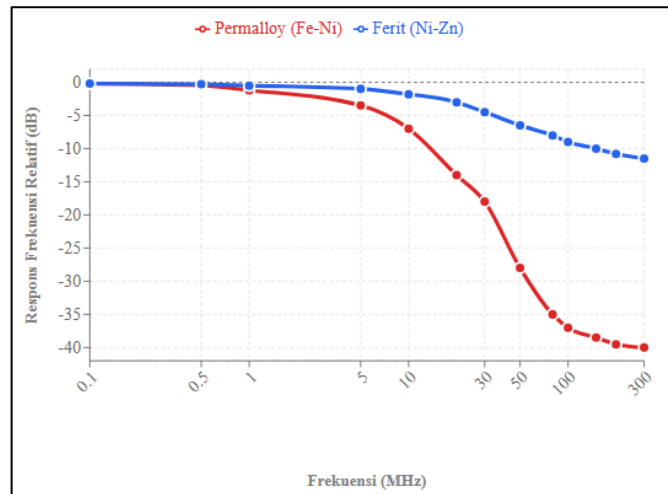
dalam belitan. Sensor yang telah dikembangkan seperti sensor akustik serat optik *Fabry-Pérot* (F-P), dirancang dengan ukuran yang ringkas dan tingkat isolasi yang sangat tinggi. Sensor yang ditanamkan ini harus mampu bertahan dalam kondisi ekstrem selama proses fabrikasi transformator, termasuk situasi vakum serta suhu dan tekanan yang berbeda saat penghilangan kelembapan dan pengisian minyak isolasi. Lokalisasi PD yang akurat dicapai dengan menganalisis *Time Difference of Arrival* (TDOA) dari sinyal akustik yang diterima oleh masing-masing sensor dalam larik [7]. Selain itu ada juga inovasi terbaru dalam penggunaan larik sensor jenis ultrasonik serat optik dengan menggunakan keseimbangan tekanan untuk melokalisasi sumber PD yang Ganda dalam minyak transformator [23]. Gambar 3. merepresentasikan bagaimana sistem FOAS mendeteksi *Partial Discharge* (PD) yang terjadi di dalam sambungan kabel HV dengan menangkap gelombang akustik yang dihasilkan oleh lucutan tersebut. Sensor serat optik yang tertanam atau terpasang sangat dekat dengan isolasi akan mendeteksi gelombang ini pada waktu yang berbeda di setiap titik sensor. Perbedaan waktu kedatangan atau TDOA antar sensor ini kemudian diolah dan di analisis untuk menentukan lokasi pasti sumber PD. Sistem ini menjadi penting untuk pemeliharaan prediktif pada infrastruktur kelistrikan tegangan tinggi, terutama transformator dan sambungan kabel HV.



Gambar 3 Sistem Deteksi PD Akustik Serat Optik (FOAS) Pada Sambungan Kabel HV

- 5) Sensor Induktif merupakan jenis sensor non-konvensional yang juga banyak digunakan untuk pemantauan *partial discharge* (PD) secara online, sensor ini umumnya dikenal dengan *High Frequency Current Transformer* (HFCT). Hal ini didasarkan pada sifatnya yang non-invasif serta kompatibel dengan peralatan bertegangan tinggi yang sedang beroperasi. Sensor ini bekerja dengan cara melingkari konduktor (kawat fasa atau kawat tanah) untuk mendeteksi pulsa arus frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh aktivitas PD [24]. Sensitivitas dan fidelitas sensor HFCT sangat bergantung pada desain mekanis dimana pada prosesnya diartikan sebagai tingkat akurasi suatu sistem dalam mereproduksi sinyal keluaran yang identik atau sangat menyerupai sinyal masukan aslinya. Kinerja Sensor dalam mendeteksi pulsa PD yang lemah sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama material inti diantaranya permeabilitas inti, kerapatan fluks saturasi, dan stabilitas suhu. Permeabilitas inti yang tinggi dibutuhkan untuk sensitivitas, memungkinkan sensor menangkap medan magnet dari pulsa PD yang sangat kecil. Kerapatan fluks saturasi yang memadai penting untuk fidelitas, memastikan sinyal PD yang kuat tidak mengalami distorsi atau pemotongan. Sementara itu, stabilitas suhu menjamin bahwa parameter magnetik inti tetap konsisten, sehingga pengukuran yang dilakukan HFCT tetap akurat dan andal meskipun terjadi fluktuasi disekitar lingkungan. Pengendalian faktor-faktor ini sangat penting untuk membedakan bentuk pulsa PD dari gangguan EMI yang kuat [25]. Berbagai pengembangan yang dilakukan seperti mengoptimalkan bentuk dari geometri sensor PD, pengembangan antena loop tanpa efek resonansi untuk meningkatkan fidelitas sinyal, serta perancangan sensor dengan bentuk inti yang telah dioptimalkan misalnya pada HFCT dalam memudahkan instalasi di kondisi nyata. Selain itu dengan upaya optimasi desain sensor, seluruh pengukuran dan pengujian PD harus dilakukan sesuai dengan standar teknis internasional.

Standar acuan utama adalah IEC 60270, yang menetapkan prosedur dan persyaratan kalibrasi untuk memastikan bahwa muatan PD yang terukur adalah terstandarisasi dan dapat diperbandingkan secara global [1].



Gambar 4 Respons Frekuensi Relatif Inti Magnetik Permalloy dan Ferit pada Sensor HFCT

Pemilihan material dari bagian inti magnetik sangat memegang peran penting dalam menentukan rentang frekuensi kerja dan resolusi pulsa PD. Berdasarkan studi perbandingan material, Permalloy (Fe-Ni) menunjukkan permeabilitas awal yang sangat tinggi ($\mu_i = 5000 - 10.000$) yang ideal untuk frekuensi rendah (di bawah 100 kHz) [25]. Namun, Permalloy memiliki resistivitas listrik yang rendah ($\sim 10^7 \Omega m$) yang memicu timbulnya arus Foucault (arus pusar) yang kuat pada eksitasi frekuensi tinggi. Efek ini menyebabkan pergeseran (damping) sinyal dan melebarkan respons impuls, sehingga mengurangi kemampuan sensor untuk merekam pulsa PD sub-nanodetik dengan resolusi tinggi. Sebaliknya, ferit berbasis $MO.Fe_2O_3$ adalah keramik oksida logam dengan resistivitas tinggi ($10^2 - 10^4 \Omega.m$), yang secara efektif menekan arus Foucault. Meskipun memiliki permeabilitas awal yang moderat ($\mu_i = 200 - 1000$), ferit $MO.Fe_2O_3$ mempertahankan respons frekuensi yang relatif datar hingga puluhan atau ratusan MHz. Hal ini menjadikannya lebih unggul untuk diagnosis PD karena mampu mereproduksi bentuk pulsa PD dengan distorsi minimal. Hasil perbandingan respons frekuensi material Fe-Ni dan $MO.Fe_2O_3$ ditunjukkan pada Gambar 4. Respons frekuensi kedua material inti magnetik. Grafik menunjukkan bahwa respons frekuensi Permalloy menurun tajam seiring peningkatan frekuensi, mengindikasikan atenuasi sinyal yang tinggi, sedangkan respons ferit $MO.Fe_2O_3$ relatif lebih datar, yang dibutuhkan untuk reproduksi akurasi sinyal pulsa PD [25].

- 6) Sensor Nirkabel Pasif atau dikenal *Passive Wireless Sensors* merupakan inovasi teknologi yang lebih signifikan karena kemudahannya instalasinya dan keandalan pengukuran pada peralatan tegangan tinggi dalam melakukan pemantauan PD. Sensor ini memberikan Solusi praktis karena tidak memerlukan kabel daya atau sinyal fisik yang memungkinkan sensor dipasang di tempat (*in-situ*) bahkan di dalam atau sangat dekat dengan komponen kritis peralatan seperti GIS atau belitan transformator di mana kabel konvensional sulit atau berbahaya untuk dipasang. Sensor ini dirancang untuk beroperasi secara pasif, yang berarti tidak memerlukan sumber daya internal atau sambungan langsung ke peralatan tegangan tinggi (HV). Prinsip kerja sensor nirkabel pasif berdasarkan pada mekanisme resonansi, di mana sensor yang umumnya berupa rangkaian LC resonator akan merespons sinyal *Radio Frequency* (RF) yang dipancarkan oleh perangkat pembaca (*readout device*) yang terletak jarak jauh. Kemudian data yang terukur misalnya PD diubah menjadi nilai Induktansi (L) atau Kapasitansi (C) sensor, yang selanjutnya akan mengubah frekuensi resonansi sensor (f_0). Perangkat pembaca kemudian mendeteksi perubahan f_0 dari sinyal yang dipancarkan kembali, sehingga ini yang menjadikannya dapat terhubung secara nirkabel untuk nilai pengukuran besaran fisik yang diukur. Perangkat pembaca memulai proses deteksi dengan mengirimkan energi nirkabel

pasif dalam bentuk gelombang RF ke sensor, yang berfungsi untuk mengaktifkan rangkaian resonansi LC pada sensor. Setelah diaktifkan, sensor kemudian memancarkan kembali (*ring back*) sinyal RF pada frekuensi resonansinya (f_0). Sinyal yang dipancarkan kembali ini telah dimodulasi oleh medan listrik di sekitarnya akibat aktivitas PD. Perubahan medan listrik PD menyebabkan pergeseran kecil pada f_0 . Perangkat pembaca kemudian menganalisis pergeseran frekuensi resonansi ini, sehingga sensor ini dapat dijadikan representasi nirkabel yang akurat dari aktivitas PD. Keunggulan teknologi sensor nirkabel pasif yaitu kemampuannya untuk mengeliminasi kebutuhan kontak langsung dengan apparatus tegangan tinggi. Hal ini tentu akan meningkatkan keamanan bagi personel dan peralatan karena tidak ada jalur konduktif fisik ke lingkungan bertegangan tinggi. Selain itu, sensor ini pemasangannya sederhana (*plug-and-play*), karena tidak memerlukan kabel daya atau sinyal yang rumit. Selain itu, teknologi ini secara efektif dapat mengurangi masalah pemuatan sumber (*source loading*) yang sering terjadi pada sensor konvensional berkabel, di mana koneksi sensor dapat mengubah atau membebani sinyal yang sedang diukur. Sensor nirkabel pasif yang diimplementasikan pada GIS sering dirancang dengan fitur resonansi ganda atau multi-resonansi. Desain ini bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas dengan mencakup deteksi PD di berbagai pita frekuensi misalnya, 0–800 MHz, memastikan pulsa PD tidak terlewatkan. Sensor ini dipasang di dalam kompartemen peralatan (misalnya, melalui jendela observasi GIS) dan sinyalnya dibaca secara nirkabel dari luar. Konfigurasi ini secara efektif mengeliminasi EMI dan jalur kebocoran, sehingga sistem mampu mencapai SNR yang sangat tinggi dan presisi yang optimal. Hal ini menjadikan sensor nirkabel pasif sebagai instrumen penting untuk mendiagnosis kondisi isolasi secara online dan berkelanjutan [26].

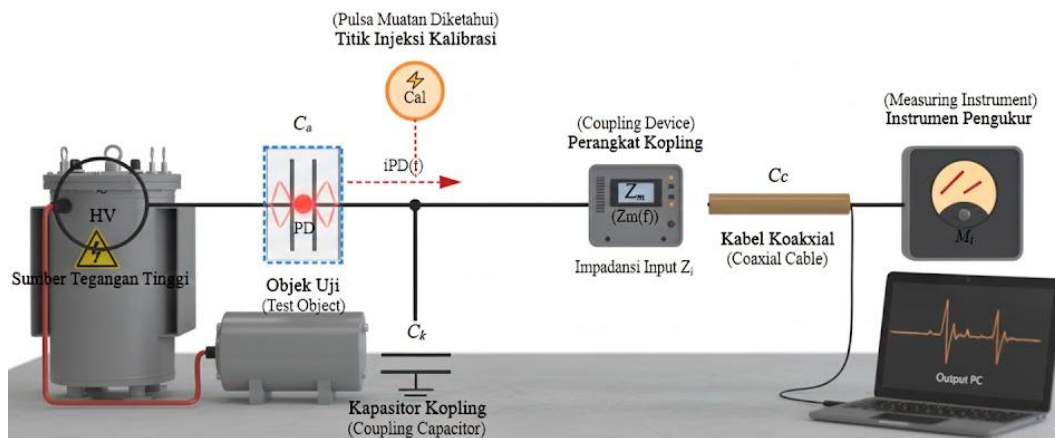
B. Metode Kalibrasi Partial Discharge

Kalibrasi merupakan tahapan fundamental dan sangat krusial dalam proses diagnosis *Partial Discharge* (PD) karena berfungsi sebagai jembatan antara sinyal mentah yang diukur oleh sensor misalnya tegangan dalam mV atau tekanan akustik dengan besaran fisik yang memiliki nilai diagnostik. Secara praktis kalibrasi juga dapat menentukan faktor konversi yang akurat untuk mengubah pembacaan mV sensor menjadi muatan PD terstandardisasi (Q), yang diukur dalam PicoCoulomb (pC). Proses ini memastikan bahwa hasil pengukuran dapat diperbandingkan secara universal dan valid untuk menilai tingkat keparahan isolasi. Proses ini memastikan sinyal yang terdeteksi dapat diubah menjadi besaran muatan listrik yang lebih absolut. Jika terjadi kegagalan dalam proses kalibrasi, terutama pada jenis sensor non-elektrik seperti *Acoustic Emission* (AE), sehingga akan dapat menyebabkan ketidakakuratan pembacaan serta respon sensitivitasnya menurun terhadap wilayah sekitarnya. Selain itu tingkat akurasi hasil juga dipengaruhi pada media perambatan seperti minyak isolasi serta struktur tangkinya, posisi sensor, dan bentuk geometri peralatan trafo. Tanpa metode kalibrasi yang tepat, diagnosis *Partial Discharge* (PD) menggunakan sinyal akustik akan sangat terganggu, terutama saat di dalam belitan transformator. Sinyal PD akan terlindung (melemah), tergaung, dan terdistorsi secara masif saat merambat melalui media isolasi dan struktur internal yang tidak homogen. Degradasi sinyal ini menciptakan interferensi *multipath* yang dapat merusak validitas perhitungan *Time Difference of Arrival* (TDOA), karena sulit untuk secara akurat menentukan waktu tiba pulsa PD yang pertama. Kegagalan dalam perhitungan TDOA yang pada akhirnya menghasilkan kesalahan dalam penentuan koordinat spasial PD (lokalisasi), sehingga membuat hasil diagnosis tidak dapat menjadi acuan untuk pemeliharaan prediktif [4]. Akhirnya, data yang tidak valid akan menyebabkan rencana pemeliharaan yang tidak tepat, bahkan akan meningkatkan risiko kerusakan fatal dan pemadaman listrik yang tidak terencana. Berikut ini metode kalibrasi yang digunakan dalam pendeteksian sinyal PD diuraikan sebagai berikut :

- 1) Kalibrasi Elektrik Standar menjadi acuan utama yang digunakan untuk sistem pengukuran *Partial Discharge* (PD) konvensional. Metode ini mengacu pada pulsa injeksi sesuai standar IEC 60270 (*high voltage test techniques partial discharge measurements*) [1]. Berdasarkan tujuan utama dari kalibrasi ini adalah agar dapat memastikan bahwa pulsa tegangan atau arus yang terukur oleh instrumen diubah secara akurat menjadi nilai muatan semu (*apparent charge*) dalam satuan pikoCoulomb (pC) [1], [27]. Nilai pC ini menjadi acuan besarnya peluahan yang terjadi dalam isolasi peralatan Listrik [27]. Standar IEC 60270 juga menetapkan persyaratan untuk sirkuit uji, termasuk kapasitor penggendeng dan alat ukur. Standar ini mengharuskan sistem dikalibrasi dengan menyuntikkan pulsa muatan yang diketahui ke dalam terminal uji. Proses kalibrasi ini sekaligus dapat memvalidasi sensitivitas dan keandalan sistem pengukuran PD untuk mendeteksi kerusakan isolasi

Tinjauan Kritis Sensor dan Kalibrasi Partial Discharge untuk Diagnosis dan Pemantauan Kondisi Peralatan Tegangan Tinggi
(Frenzi Agres Yudithia, Rosnita Rauf, Atik Charisma : Halaman 106 – 121)

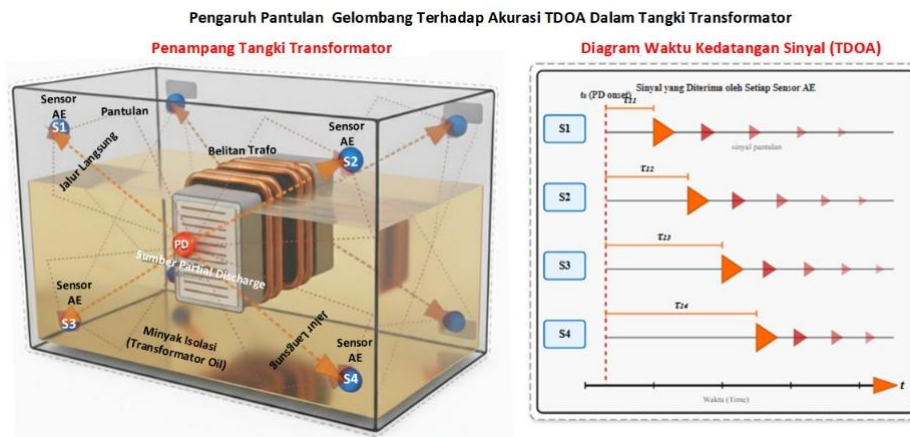
pada peralatan tegangan tinggi salah satunya pada transformator daya. Sistem pengukuran standar IEC 60270 ditunjukkan pada Gambar 5 secara umum terdiri dari sinyal PD yang mengalir melalui kapasitansi objek uji (C_a), kapasitor kopling (C_k), perangkat kopling (CD) dengan impedansi input (Z_{in}), kabel koaksial (CC), dan instrumen pengukur (MI). Rangkaian ini dirancang untuk mengukur pulsa arus PD yang mengalir melalui objek uji (C_a), di mana *High-Frequency Content* sebagai bagian dari sinyal PD yang berada pada pita *Ultra High Frequency* (UHF), ratusan MHz hingga GHz atau lebih kecil *High Frequency* (HF) puluhan MHz yang dari sinyal inilah yang digunakan untuk mengestimasi keberadaan PD. Keunggulan utama metode ini adalah sensitivitasnya yang tinggi terhadap aktivitas PD yang lemah, dan fungsi utamanya adalah untuk pendeteksian dan penentuan muatan semu [1].



Gambar 5. Sistem Pengukuran Partial Discharge Standar IEC 60270

- 2) Kalibrasi secara In-Situ dan Absolut merupakan dua tahapan esensial untuk memvalidasi dan mengkonversi sinyal yang dideteksi dalam pengukuran PD, sehingga menjadi besaran muatan listrik yang absolut. Kalibrasi Absolut memberikan besaran dasar yang terstandardisasi, sementara Kalibrasi In-Situ memastikan besaran tersebut akurat dan valid setelah memperhitungkan kompleksitas lingkungan nyata peralatan tegangan tinggi [27]. Pendekatan ini dilakukan bertujuan agar sinyal yang ditangkap oleh berbagai jenis sensor, terutama non-elektrik, dapat diukur dalam satuan fisik yang relevan, seringkali dilakukan di lokasi (in-situ) untuk memperhitungkan kondisi operasional dan bentuk geometri spesifik peralatan. Dalam sistem AE, kalibrasi sistem secara rutin dilakukan menggunakan metode Hsu-Nielsen untuk mengubah sinyal tegangan sensor dalam (mV) menjadi besaran fisik terukur yang relevan misalnya pada energi atau perpindahan permukaan. Selain itu, untuk Sensor HFC dalam menentukan estimasi muatan PD (pC) dapat diperoleh secara universal dengan menerapkan integral waktu ganda pada sinyal tegangan yang terukur. Keefektifan teknik integral waktu ganda ini menandakan bahwa hasilnya valid terlepas dari fungsi transfer spesifik sensor, menjadikannya metode yang kuat untuk mendapatkan nilai muatan PD yang dapat diperbandingkan [24]. Selain itu, akurasi kalibrasi juga sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri cacat pada isolasi padat. Selain itu, bentuk rongga bola (*spherical*) menghasilkan nilai kapasitor terkalibrasi yang lebih tinggi dan tegangan melintasi rongga (V_c) yang lebih rendah, dibanding kan dengan rongga berbentuk silinder atau pelat-pelat [27].
- 3) Kalibrasi pada sensor non-elektrik yang secara khusus pada penggunaan jenis sensor AE, umumnya juga terdapat kendala utama dalam penentuan lokalisasi sumber PD disebabkan karena sensitivitasnya yang sangat tinggi terhadap lingkungan sekitarnya. Akurasi hasil lokalisasi sangat bergantung pada media perambatan seperti minyak isolasi serta struktur tangki, posisi sensor, dan bentuk geometri peralatan trafo, yang semuanya memengaruhi jalur tempuh gelombang akustik. Kendala terbesar yang menyebabkan ketidakakuratan lokalisasi PD akustik adalah interferensi *multipath* atau gaung.

Fenomena ini terjadi akibat pantulan gelombang akustik oleh dinding dan komponen internal di dalam tangki trafo. Interferensi *multipath* menghasilkan sinyal berganda yang tiba di sensor pada waktu yang berbeda-beda, bukan hanya satu sinyal yang jelas. Hal ini secara langsung merusak validitas perhitungan TDOA, yang merupakan prinsip dasar lokalisasi akustik yang mengandalkan pengukuran waktu kedatangan (τ), dan menyebabkan kesalahan secara signifikan pada penentuan koordinat PD. Masalah ini diperparah ketika PD terjadi di dalam belitan trafo, di mana sinyal akustik menjadi terlindung, tergaung, dan terdistorsi secara masif sepanjang perambatannya. Kendala praktis lainnya adalah kopling akustik yang tidak tepat antara sensor dan permukaan tangki. Gambar 6 merupakan ilustrasi interferensi *multipath* dan diagram waktu kedatangan sinyal (TDOA) dalam lokalisasi sumber PD menggunakan sensor AE. Gambar ini secara visual menjelaskan tantangan utama dalam kalibrasi sensor non-elektrik. Diagram ini terbagi menjadi dua panel yakni panel kiri menunjukkan penampang tangki transformator (berisi Minyak Isolasi dan belitan transformator) dengan sumber PD di tengahnya, di mana sinyal akustik menempuh jalur langsung yang ideal dan jalur pantulan (*Multipath*) yang tidak diinginkan akibat pantulan gelombang akustik oleh dinding tangki atau struktur internal. Panel kanan mengilustrasikan hasil pengukuran dalam domain waktu yang dikenal sebagai Diagram Waktu Kedatangan Sinyal (TDOA). Untuk setiap sensor (S1 hingga S4), diagram menunjukkan pulsa pertama (dari jalur langsung) diikuti oleh satu atau lebih sinyal pantulan (gaung) yang tiba lebih lambat. Adanya sinyal berganda yang tiba pada waktu berbeda ini menyebabkan sinyal *multipath*, yang secara langsung merusak validitas perhitungan Perbedaan Waktu Kedatangan (TDOA) dan menyebabkan kesalahan signifikan pada penentuan koordinat PD [4].



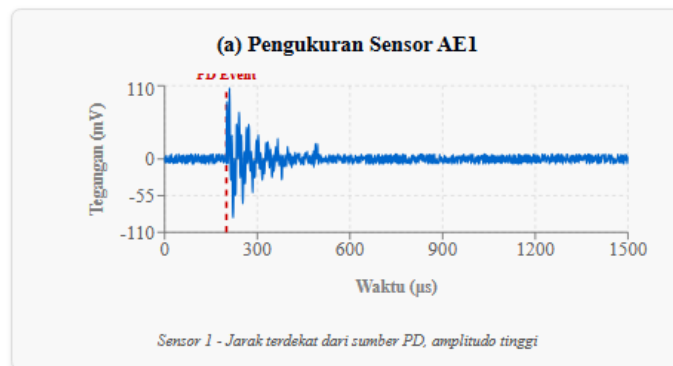
Gambar 6 Interferensi *Multipath* Dalam Lokalisasi Sumber PD Menggunakan *Acoustic Emission* (AE)

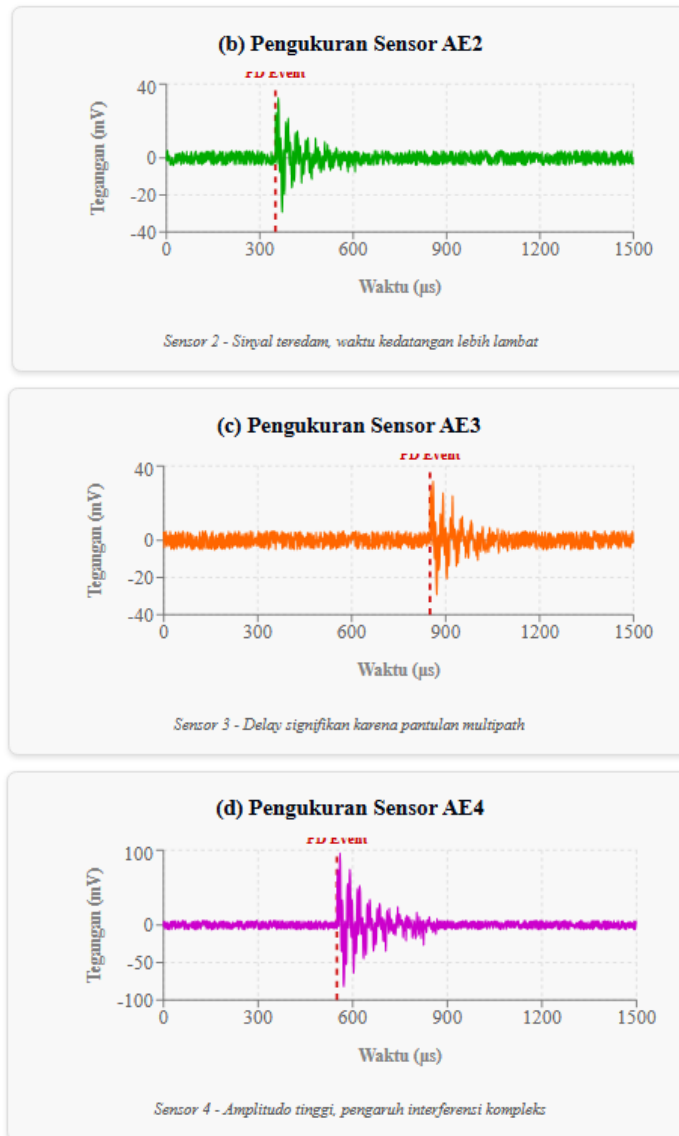
C. Teknik Pengurangan Bising dan Pemrosesan Sinyal

Setelah sinyal PD berhasil dideteksi dan dikalibrasi, langkah selanjutnya yang menjadi pilihan adalah memproses sinyal mentah yang terkontaminasi oleh bising dan pantulan untuk mencapai lokalisasi sumber PD yang akurat. Untuk mengatasi kelemahan dasar pada metode TDOA yang rentan terhadap hambatan, teknik pemrosesan sinyal ini telah berevolusi dari metode dasar TDOA menjadi berbagai algoritma canggih. Pengembangannya melalui metode domain waktu-frekuensi atau *Time-Frequency Domain Methods* seperti *Discrete Wavelet Transform* (DWT), yang efektif sebagai algoritma pemisahan PD multi-sumber ketika sinyal AE saling tumpang tindih menggunakan teknik korelasi seperti *Generalized Cross-Correlation with Phase Transformation* (GCC-PHAT), yang unggul dalam meredam kebisingan dan pantulan [17], serta simulasi numerik menggunakan *Finite Element Method* (FEM) 3D [18], [21] dan Algoritma *Particle-Swarm-Optimization Route-Searching* (PSORS) [21] dapat secara cerdas memodelkan jalur perambatan sinyal akustik di sekitar struktur internal yang menghalangi. Selain itu, teknik seperti *Invariant Extended Kalman Filter* (IEKF) digunakan untuk mitigasi noise [15], dan pendekatan berbasis *Machine Learning* [17] menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk lokalisasi yang lebih cepat. Alternatif lokalisasi online juga mencakup metode berbasis fungsi transfer elektrik [29], yang

lebih baik daripada metode akustik ketika PD terletak jauh di dalam lilitan karena redaman sinyal suara yang tinggi. Integrasi sensor sensitif dengan algoritma cerdas ini merupakan kunci untuk mewujudkan diagnosis multimetode yang akurat, yang mendukung diagnosis berbasis lokalisasi dan diagnosis multimetode (kombinasi AE dengan Pencitraan Termal atau DGA) untuk operasional peralatan tegangan tinggi yang lebih andal [12], [30].

1) Metode Domain Waktu Frekuensi atau *Time-Frequency Domain* merupakan salah satu pendekatan penting dalam analisis sinyal untuk mendeteksi dan melokalisasi PD. Teknik ini menjadi sangat relevan ketika terjadi beberapa sumber PD muncul secara bersamaan, di mana sinyal AE yang dihasilkan dapat saling tumpang tindih pada sensor. Metode ini, diterapkan menggunakan teknik seperti DWT, dimana bertindak sebagai algoritma pemisahan pada PD multi-sumber agar mengatasi tantangan identifikasi dan lokalisasi PD secara simultan menggunakan teknik AE. Metode DWT dapat digunakan untuk analisis sinyal secara bersamaan dalam domain waktu dan frekuensi. Selanjutnya dalam menganalisis sinyal dalam domain waktu-frekuensi, teknik ini juga sebagai pemisahan yang efektif antara pulsa PD yang sebenarnya bersumber dari sinyal bising dan interferensi yang ada [17]. Sehingga akan meningkatkan akurasi dalam memproses pulsa emisi akustik yang dihasilkan oleh PD. Sinyal AE yang terukur dari PD merupakan sinyal mentah yang memerlukan pemrosesan Domain Waktu-Frekuensi seperti analisis wavelet untuk diekstrak dan dianalisis. Gambar 7 merupakan contoh pengukuran hasil sinyal AE dari empat sensor berbeda yang mengilustrasikan sinyal PD mentah yang direkam dalam domain waktu (Tegangan (mV) terhadap Waktu (μ s)), dan memerlukan pemrosesan domain waktu-frekuensi seperti analisis wavelet untuk diekstrak dan dianalisis. Setiap sensor menangkap pulsa PD yang berbeda, mencerminkan jarak, redaman, dan interferensi. Misalnya, Pengukuran Sensor AE1 (a) menunjukkan sensor yang paling dekat dengan sumber PD, ditandai dengan waktu kedatangan paling awal (sekitar 200 μ s) dan amplitudo tinggi. Sebaliknya, Pengukuran Sensor AE2 (b) menunjukkan sinyal yang tereda dengan waktu kedatangan yang lebih lambat (sekitar 350 μ s), mengindikasikan jarak yang lebih jauh. Pengukuran Sensor AE3 (c) menunjukkan delay signifikan (sekitar 850 μ s) dan amplitudo rendah, yang dapat disebabkan oleh pantulan multipath atau jarak yang sangat jauh. Sementara itu, Pengukuran Sensor AE4 (d) menunjukkan amplitudo relatif tinggi dengan waktu kedatangan (sekitar 550 μ s), dengan kemungkinan pengaruh interferensi kompleks. Sinyal-sinyal mentah yang kompleks dan tumpang tindih ini memerlukan teknik seperti Discrete Wavelet Transform (DWT) (Metode Domain Waktu-Frekuensi) untuk melakukan pemisahan PD multi-sumber yang efektif, memisahkan pulsa PD sebenarnya dari bising dan interferensi sebelum lokalisasi akurat dapat dilakukan.



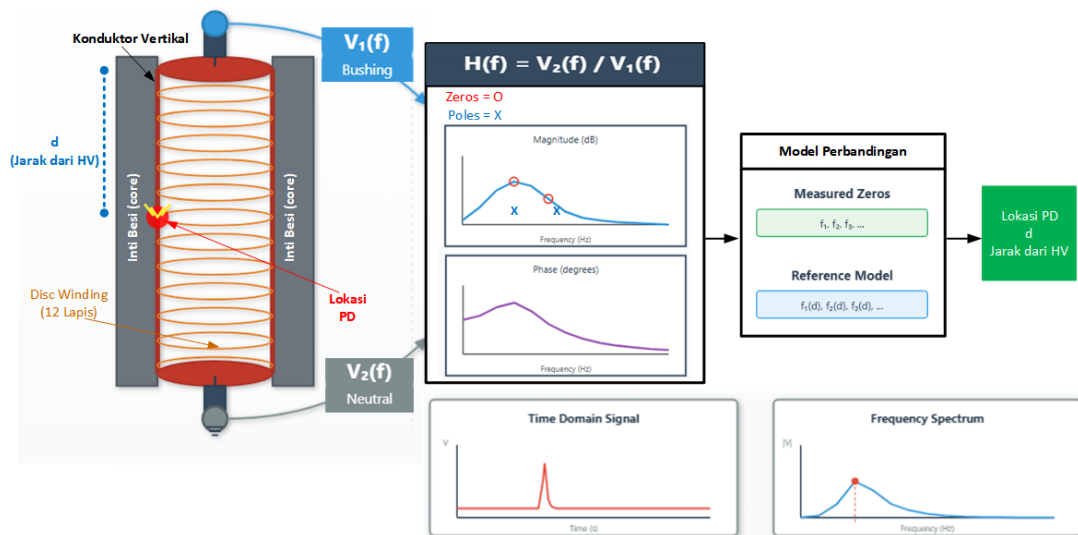


Gambar 7 Pengukuran Sinyal Menggunakan Empat Sensor AE (a) Sensor AE1, (b) Sensor AE2, (c) Sensor AE3, (d) Sensor AE4.

- 2) Teknik Pengenalan Pola (*Pattern Recognition*) dan Pembelajaran Mesin (*Machine Learning*) menjadi pilihan yang sangat penting dalam lokalisasi dan diagnosis PD karena kemampuannya dalam mengolah dan menginterpretasikan sinyal yang kompleks dan pada kondisi bising. Lokalisasi PD akustik selain bertujuan menentukan posisi sumber PD, juga sangat bergantung pada perhitungan TDOA yang menggunakan minimal empat sensor. Untuk mengatasi kebisingan dan pantulan yang merusak akurasi TDOA, studi menunjukkan bahwa metode Korelasi Silang Umum dengan Transformasi Fasa (GCC-PHAT) terbukti unggul karena kemampuannya meredam kebisingan dan pantulan. Sebagai contoh, dalam perbandingan TDOA, GCC-PHAT mengungguli GCC standar, terutama dalam konfigurasi sensor yang terpusat. Selain lokalisasi, manfaat lainnya yaitu kemampuan klasifikasi jenis PD berdasarkan intensitas gelombang AE misalnya, korona menunjukkan intensitas terkuat, diikuti oleh *creepage discharge* dan PD dalam gelembung. Selain itu juga terdapat kekurangan dari lokalisasi berbasis TDOA tradisional ini, dimana rentan terhadap hambatan propagasi sinyal. Untuk mengatasi kekurangan ini, *Machine Learning* digunakan untuk mempercepat dan meningkatkan akurasi lokalisasi, memanfaatkan kemampuan kecerdasan buatan (AI) untuk belajar dari data dan mengidentifikasi pola lokasi [17], [30], hal ini seringkali

- dikombinasikan dengan algoritma pencarian jalur (*pathfinding algorithms*) seperti Algoritma Dijkstra [18].
- 3) Simulasi Numerik dan Algoritma *Pathfinding* merupakan teknik canggih yang diterapkan untuk mengatasi kelemahan utama metode TDOA tradisional yang sangat rentan terhadap hambatan propagasi sinyal, terutama di lingkungan kompleks seperti transformator. Untuk meningkatkan akurasi TDOA, perlu dilakukan pemodelan yang kompleks terhadap jalur perambatan sinyal akustik. Langkah ini juga dilakukan melalui simulasi numerik, seperti Metode FEM 3D, yang berfungsi memodelkan struktur internal transformator inti dan belitan sebagai media propagasi sinyal [18]. Model FEM ini menciptakan representasi grid atau mesh dari komponen internal seperti *Core*, *Winding*, dan *Tank Wall* untuk memperhitungkan rute perambatan gelombang akustik secara detail. Kelemahan dasar pada TDOA adalah distorsi sinyal yang diakibatkan oleh struktur logam internal ini. Untuk mengatasinya, diterapkan *Algoritma Particle-Swarm-Optimization Route-Searching* (PSORS). Manfaat dan keunggulan algoritma PSORS ini adalah kemampuannya mencari rute perambatan sinyal akustik secara optimal, yang terbukti menghasilkan akurasi yang tidak sensitif terhadap penghalang logam, sehingga memungkinkan penentuan koordinat PD yang presisi terlepas dari kompleksitas struktur internal transformator [21]. Kekurangan dari pendekatan ini adalah tingginya kebutuhan akan model simulasi tiga dimensi yang sangat presisi. Meskipun model 3D memiliki tingkat presisi yang tinggi, serta menawarkan wawasan mendalam, namun harga biaya *hardware* yang tinggi dan waktu tunggu yang lama, menjadikannya kurang praktis untuk analisis real-time atau studi optimasi yang melibatkan banyak skenario [18].
 - 4) Teknik Filter dan Algoritma Lanjutan merupakan berbagai teknik filter dan algoritma canggih telah digunakan untuk mitigasi noise dan peningkatan akurasi lokalisasi PD, yang menjadikan perhatian utama dalam diagnostik isolasi. Salah satu contohnya adalah IEKF, yang diusulkan khusus untuk estimasi lokasi PD akustik karena kemampuannya untuk secara signifikan dapat mengurangi kesalahan estimasi dan memitigasi sifat stokastik dari kebisingan pengukuran. Keunggulan utama IEKF dibandingkan EKF konvensional terletak pada kemampuannya untuk menangani sistem nonlinier dengan lebih efektif. IEKF menggunakan istilah koreksi yang adaptif terhadap simetri sistem karena ia mengulang (mengiterasi) proses linearisasi dan pembaruan estimasi (koreksi) beberapa kali per langkah waktu. Proses iteratif ini memungkinkan IEKF untuk menemukan titik linearisasi yang lebih baik, sehingga menjadikannya lebih kuat terhadap dinamika nonlinier yang parah. Selain itu, dengan memperbaiki estimasi status secara berulang, IEKF dapat merepresentasikan ketidakpastian noise dengan lebih akurat, menjadikannya lebih kuat terhadap ketidakpastian noise pengukuran dibandingkan EKF yang hanya melakukan satu kali pembaruan [15]. Selain itu, metode *Time Reversal* (TR) juga digunakan untuk lokalisasi PD dengan cara merekam sinyal PD baik elektromagnetik maupun akustik, serta membalikkan waktu sinyal tersebut, dan mempropagasi ulangnya kembali ke medium secara numerik untuk menciptakan fokus energi yang presisi tepat pada sumber PD. Metode ini menjadi unggul karena dapat mencapai lokalisasi akurat bahkan dengan jumlah sensor yang minimal [10]. Selanjutnya, pendekatan berbasis *Machine Learning* (ML) dan *Deep Learning* (DL) telah menunjukkan hasil yang menjanjikan untuk lokalisasi PD yang lebih cepat dan akurat, dengan memanfaatkan kemampuan kecerdasan buatan (AI) untuk belajar dari data dan mengidentifikasi pola lokasi [17]. Pendekatan ini sering dikombinasikan dengan algoritma pencarian jalur (*pathfinding algorithms*) seperti Algoritma Dijkstra [18] untuk menghasilkan data pelatihan yang efisien tanpa melalui simulasi elektromagnetik yang mahal dan memakan waktu. Kekurangan dari IEKF adalah kompleksitas model yang dibutuhkan [15], sementara ML atau DL memerlukan dataset pelatihan yang besar dan berkualitas tinggi [17].
 - 5) Teknik Lokalisasi PD salah satunya *Electrical Transfer Function-based PD Localization* (ETFL) merupakan metode *online* inovatif yang dikembangkan untuk menentukan sumber lokasi PD secara presisi di dalam belitan transformator. Metode ini menjadi alternatif yang lebih baik daripada metode akustik ketika PD terletak berada jauh di dalam lilitan, karena dalam kondisi tersebut redaman sinyal suara akan tinggi. Cara kerjanya didasari pada analisis respons lilitan yang diukur pada terminal, di

mana lokasi PD ditentukan dengan membandingkan respons frekuensi dari fungsi transfer yang didapatkan (menggunakan sinyal tegangan yang diukur pada *bushing* dan ujung netral) dengan nilai referensi. Keunggulannya adalah kemampuan untuk mendeteksi PD jauh di dalam lilitan, namun kekurangannya adalah bahwa PD hanya memengaruhi posisi titik nol (zeros) dari fungsi transfer, sementara titik kutub (poles) tetap stasioner karena bergantung pada sistem. Dengan membandingkan frekuensi titik nol yang diperoleh dari model lilitan dengan hasil eksperimen, lokasi PD dapat ditentukan [29]. Metode ini unggul untuk diagnosis online dan didasarkan pada prinsip fisik yang kuat, tetapi membutuhkan model lilitan transformator yang sangat akurat dan mungkin rentan terhadap interferensi elektromagnetik karena sifat pengukurannya yang elektrik. Gambar 8 merupakan konsep lokalisasi PD Berbasis ETFL di dalam Belitan Transformator yang mengilustrasikan proses penentuan Lokasi PD menggunakan pengukuran respons frekuensi listrik. Sistem ini menggambarkan metode ETFL untuk menentukan lokasi PD dalam belitan transformator tipe *disc winding* berlapis. Lokasi PD yang ditandai dengan lingkaran merah dan percikan kuning yang terjadi di antara belitan kawat, dengan jarak d dari terminal tegangan tinggi (HV *bushing* berwarna biru). Kemudian sinyal tegangan diukur oleh kedua sensor dalam domain frekuensi diantaranya, $V_1(f)$ pada terminal HV dan $V_2(f)$ pada terminal netral (terhubung ke ground berwarna abu-abu). Bagian analisis Fungsi Transfer menghitung rasio $H(f) = V_2(f) / V_1(f)$, menghasilkan grafik *magnitude* dan *phase*. Karakteristik ini ditandai dengan Zeros (lingkaran merah) pada grafik *magnitude* dimana Frekuensi di mana $H(f)$ bernilai nol, posisinya berubah tergantung pada lokasi PD. Selanjutnya Poles (tanda silang biru) merupakan titik-titik kutub yang stabil karena hanya bergantung pada karakteristik sistem transformator. Lokasi PD kemudian ditentukan melalui pencocokan pola. Frekuensi zeros yang terukur dari sistem secara aktual dibandingkan dengan database model referensi yang berisi prediksi zeros untuk setiap kemungkinan posisi d . Algoritma pencocokan pola menemukan nilai d (ditampilkan dalam kotak hijau) yang menghasilkan pola zeros paling mendekati hasil pengukuran, memberikan informasi lokasi kerusakan yang krusial untuk pemeliharaan prediktif. Grafik domain waktu dan domain frekuensi representatif menunjukkan bagaimana pulsa PD (domain waktu) diubah menjadi spektrum frekuensi dengan puncak-puncak yang berhubungan dengan karakteristik zeros (domain frekuensi).



Gambar 8 Konsep Lokalisasi PD Berbasis Fungsi Transfer Elektrik (ETFL) di dalam Belitan Transformator

- 6) Aplikasi Diagnosis dan Pemantauan Kondisi seperti pada peralatan transformator agar menjadi efektif perlu didasarkan pada dua strategi yang saling melengkapi yaitu diagnosis berbasis lokalisasi dan diagnosis multimetode. Diagnosis berbasis lokalisasi menggunakan informasi posisi PD sebagai

data yang krusial secara spesifik mendiagnosis penyebab PD, seperti keberadaan gelembung di area tertentu. Informasi lokasi ini juga membantu mengidentifikasi jenis dan tingkat keparahan gangguan isolasi untuk perencanaan strategi pemeliharaan dan perbaikan yang tepat. Karena PD dapat menghasilkan berbagai bentuk energi, termasuk sinyal akustik, elektrik, dan termal. Strategi ini dilengkapi dengan diagnosis multimetode, yaitu penerapan beberapa metode diagnostik secara bersamaan untuk penilaian kondisi yang lebih menyeluruh. Sebagai contoh, kombinasi metode AE, yang sangat efektif untuk lokalisasi PD karena non-invasif dan kebal terhadap EMI saat transformator beroperasi *online*. dengan metode lain seperti Pencitraan Termal (*Thermal Imaging*) atau DGA, memungkinkan penilaian komprehensif terhadap kondisi transformator. Manfaat utama dari integrasi berbagai metode ini adalah karena metode kimia seperti DGA, meskipun sensitif, tidak dapat menyediakan informasi lokasi. Oleh karena itu, diagnosis multimetode menjadi sangat penting untuk mencegah kerusakan fatal dan pemadaman listrik yang tidak terencana [12].

III. KESIMPULAN

Diagnosis efektif dan andal terhadap *Partial Discharge* (PD), selanjutnya dapat dilakukan dengan konvergensi antara teknologi sensor mutakhir dan algoritma pemrosesan sinyal yang cerdas. Kemajuan teknologi sensor, dapat mengatasi kelemahan pada sensor elektrik tradisional (IEC 60270) yang sensitif terhadap PD lemah, lalu rentan terhadap EMI (tidak efektif untuk penggunaan *online*) dan tidak menyediakan informasi sumber lokalisasi PD. Kekurangan ini telah dapat diatasi oleh sensor *Ultra High Frequency* (UHF) dan sensor induktif (HFCT) yang memiliki imunitas superior (ketahanan yang lebih tinggi) terhadap EMI dan SNR untuk pemantauan *online*. Selanjutnya untuk jenis lain yaitu sensor akustik (AE) fungsinya dapat dioptimalkan menggunakan model KLM untuk mengetahui sumber lokalisasi spasial (ketika penentuan posisi) melalui perhitungan *Time Difference of Arrival* (TDOA) dan sensor akustik jenis serat optik (FOAS) juga memiliki imunitas total terhadap EMI. Kemudian, pada proses kalibrasi terdapat kelemahan pada sensor non-elektrik yaitu rentan terhadap interferensi *multipath* yang merusak akurasi TDOA. Mengatasi keterbatasan ini, teknik pemrosesan sinyal juga telah berkembang pesat melampaui TDOA dasar, menggunakan algoritma seperti GCC-PHAT untuk meredam kebisingan, Algoritma PSORS dikombinasikan dengan FEM 3D untuk memodelkan jalur perambatan sinyal di sekitar penghalang internal, serta metode ETFL sebagai alternatif lokalisasi elektrik *online* di dalam lilitan transformator. Integrasi antara sensor dengan algoritma cerdas juga dapat didukung oleh *Machine Learning* dan *Deep Learning*. Sehingga strategi ini dapat memunculkan diagnosis multimetode (seperti kombinasi AE dengan DGA atau Pencitraan Termal) yang dapat memberikan informasi lokasi PD yang akurat. Ke depannya dapat dijadikan solusi, pendeteksian PD bisa berfokus pada diagnosis multimetode, yaitu menggabungkan data dari berbagai sensor (AE, UHF, DGA) serta berbeda jenis (data heterogen), dan menganalisisnya secara real-time menggunakan *Deep Learning* untuk menemukan pola lokasi dan kerusakan yang sangat kompleks. Selain itu, diperlukan pengembangan Sensor Nirkabel Pasif yang tidak memerlukan kabel daya untuk memudahkan pemasangan dan meningkatkan imunitas terhadap EMI. Terakhir, sistem lokalisasi harus menggunakan model adaptif yang dapat mengkalibrasi ulang kecepatan rambat sinyal suara secara dinamis (misalnya, menyesuaikan perhitungan lokasi berdasarkan perubahan suhu atau jenis minyak transformator) sehingga menghasilkan perencanaan pemeliharaan prediktif yang jauh lebih cepat, akurat, dan efektif dalam mencegah kerusakan fatal pada peralatan tegangan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi, and M. Siegel, "Diagnostic Measurements for Power Transformers," *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 347, May 2016.
- [2] S. Li and J. Li, "Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective," *High Volt.*, vol. 2, no. 2, pp. 69–82, Jun. 2017.
- [3] A. Hekmati and R. Hekmati, "Optimum acoustic sensor placement for partial discharge allocation in transformers," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 11, no. 5, pp. 586–593, Aug. 2017.

- [4] F. Witos *et al.*, “Calibration and Laboratory Testing of Computer Measuring System 8AE-PD Dedicated for Analysis of Acoustic Emission Signals Generated by Partial Discharges Within Oil Power Transformers,” *Arch. Acoust.*, vol. 42, no. 2, pp. 297–311, 2017.
- [5] H. Chai, B. T. Phung, and S. Mitchell, “Application of UHF Sensors in Power System Equipment for Partial Discharge Detection: A Review,” *Sensors*, vol. 19, no. 5, p. 1029, Feb. 2019.
- [6] W. Sikorski, “Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers,” *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1826, Apr. 2019.
- [7] C. Gao *et al.*, “Partial Discharge Localization inside Transformer Windings via Fiber-Optic Acoustic Sensor Array,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 34, no. 3, pp. 1198–1205, Jun. 2019.
- [8] M. Ghorat *et al.*, “High-Resolution FBG-Based Fiber-Optic Sensor with Temperature Compensation for PD Monitoring,” *Sensors*, vol. 19, no. 23, p. 5240, Nov. 2019.
- [9] N. A. Akashah *et al.*, “A review: Partial discharge detection using acoustic sensor on high voltage transformer,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1432, p. 012004, 2020.
- [10] H. Karami *et al.*, “Partial Discharge Localization Using Time Reversal: Application to Power Transformers,” *Sensors*, vol. 20, no. 6, p. 1655, Mar. 2020.
- [11] G. Ma *et al.*, “Optical sensors for power transformer monitoring: A review,” *High Volt.*, vol. 5, no. 6, pp. 642–659, Dec. 2020.
- [12] F. Witos, A. Olszewska, Z. Opilski, A. Lisowska-Lis, and G. Szerszeń, “Application of Acoustic Emission and Thermal Imaging to Test Oil Power Transformers,” *Energies*, vol. 13, no. 22, p. 5955, Nov. 2020.
- [13] H. Besharatifard *et al.*, “Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 6, p. 3010, Mar. 2022.
- [14] H. Besharatifard, S. Hasanzadeh, E. Heydarian-Forushani, and S. M. Muyeen, “Acoustic Based Localization of Partial Discharge Inside Oil-Filled Transformers,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 55288–55297, 2022.
- [15] W. Al-Masri *et al.*, “Partial Discharge Localization in Power Transformers Using Invariant Extended Kalman Filter,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, 2023.
- [16] Y. Otake and K. Tajiri, “Study of Localization of Partial Discharges in Oil-filled Transformers using Acoustic Emission Signals,” in *4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management, Tokyo, Japan*, Sep. 2023.
- [17] J. Q. Chan, W. J. K. Raymond, H. A. Illias, and M. Othman, “Partial Discharge Localization Techniques: A Review of Recent Progress,” *Energies*, vol. 16, no. 1, p. 302, Dec. 2023.
- [18] C. P. Beura, J. Wolters, and S. Tenbohlen, “Application of Pathfinding Algorithms in Partial Discharge Localization in Power Transformers,” *Sensors*, vol. 24, no. 3, p. 892, Jan. 2024.
- [19] Y. Wang *et al.*, “Acoustic Sensors for Monitoring and Localizing Partial Discharge Signals in Oil-Immersed Transformers under Array Configuration,” *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4704, Jul. 2024.
- [20] C. P. Beura, M. Beltle, S. Tenbohlen, and M. Siegel, “Quantitative Analysis of the Sensitivity of UHF Sensor Positions on a 420 kV Power Transformer Based on Electromagnetic Simulation,” *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 3, Dec. 2019.
- [21] Y. B. Wang *et al.*, “Acoustic Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers Using a Particle-Swarm-Optimization-Route-Searching Algorithm,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 24, no. 6, pp. 3647–3654, Dec. 2017.
- [22] H. D. Ilkhechi and M. H. Samimi, “Applications of the Acoustic Method in Partial Discharge Measurement: A Review,” *Open Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2021.
- [23] F. Liu, Y. Shi, S. Zhang, and W. Wang, “Localization for Dual Partial Discharge Sources in Transformer Oil Using Pressure-Balanced Fiber-Optic Ultrasonic Sensor Array,” *Sensors*, vol. 24, no. 14, p. 4450, Jul. 2024.
- [24] A. Rodrigo-Mor, F. A. Muñoz, and L. C. Castro-Heredia, “Principles of Charge Estimation Methods Using High-Frequency Current Transformer Sensors in Partial Discharge Measurements,” *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2489, Apr. 2020.
- [25] J. Zbojovský, A. Hyseni, and J. Petráš, “Partial Discharge Activity Inductive Sensors and the Application of Magnetic Materials,” *Sensors*, vol. 25, no. 2, p. 5896, Feb. 2025.
- [26] Z. Xu *et al.*, “Passive Wireless Partial Discharge Sensors with Multiple Resonances,” *Micromachines*, vol. 15, no. 5, p. 656, May 2024.
- [27] A. N. Hamoodi, S. A. Hamoodi, and R. A. Mohammed, “Partial discharge calibrator of a cavity inside high-voltage insulator,” *Open Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 468–476, 2022.
- [28] Y. Otake and K. Tajiri, “Enhanced Method for Localization of Partial Discharges in Oil-Filled Transformers Using Acoustic Emission Signals,” in *4th Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management, Tokyo, Japan*, Sep. 2023.
- [29] A. Hamidi, M. Salehi, A. Setayeshmehr, and J. M. Maritz, “Electrical Modeling of High Voltage Windings of Power Transformers for Online Partial Discharge Localization,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 3549634, Mar. 2025.
- [30] [M. Mondal and G. B. Kumbhar, “Partial Discharge Localization in a Power Transformer: Methods, Trends, and Future Research,” *IETE Tech. Rev.*, vol. 33, no. 6, pp. 589–598, 2016.

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

Ni Ketut Hariyawati Dharmi ^{1*)}, Reza Zanarsyah Putra ²⁾, Fauzia haz ³⁾

^{1,2)}Program Studi Teknik Elektro
Universitas Jenderal Achmad Yani
Jalan Terusan Jend. Sudirman PO.BOX 148 Cimahi 40531

^{*)}Korespondensi: niketuthd@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Sebagai wilayah dengan tingkat urbanisasi dan pembangunan pemukiman yang pesat, Kecamatan Cibitung menghadapi tantangan dalam pemerataan kualitas jaringan 4G. Optimasi cakupan jaringan 4G menjadi kebutuhan yang sangat penting. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan optimasi jaringan 4G LTE di Kecamatan Cibitung dengan metode *coverage planning* melalui tahapan perhitungan *link budget* untuk memperoleh nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL). Selanjutnya, digunakan dua model propagasi, yaitu Okumura-Hata dan Cost-231, guna menghitung estimasi luas cakupan per sel serta kebutuhan jumlah *site*. Simulasi optimasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Atoll* untuk menganalisis sebaran cakupan sinyal berdasarkan parameter *Reference Signal Received Power* (RSRP). Metode ini dipilih untuk mendapatkan estimasi jangkauan yang mampu mengurangi area *blank spot* dan menjangkau seluruh wilayah penelitian. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan model propagasi Okumura-Hata diperlukan sebanyak 16 *site* BTS sedangkan model propagasi Cost-231 memerlukan 21 *site* BTS untuk mencakup seluruh wilayah. Berdasarkan parameter RSRP, cakupan dengan kualitas baik ($RSRP \geq -100$ dBm) pada model Okumura-Hata mencapai 35,120 km² atau 97,95%, sementara pada model Cost-231 hanya 14,921 km² atau 41,5% dari total wilayah. Hal ini membuktikan bahwa pemilihan model propagasi dan optimasi *coverage* yang tepat sangat mempengaruhi pada implementasi optimasi jaringan 4G di wilayah dengan karakteristik wilayah urban.

Kata kunci: 4G LTE, *coverage planning*, RSRP

Abstract

As a region with rapid urbanization and residential development, Cibitung District faces challenges in achieving equitable 4G network quality. Optimization of 4G coverage has become an essential need. Therefore, this study focuses on optimizing the 4G LTE network in Cibitung District using the coverage planning method through link budget calculations to obtain the Maximum Allowable Path Loss (MAPL). Two propagation models, Okumura-Hata and Cost-231, were then used to estimate the coverage area per cell and the required number of sites. The optimization simulation was conducted using Atoll software to analyze signal coverage distribution based on the Reference Signal Received Power (RSRP) parameter. This method was chosen to estimate coverage capable of reducing blank spots and reaching the entire study area. The results show that using the Okumura-Hata model requires 16 BTS sites, while the Cost-231 model requires 21 BTS sites to cover the entire region. Based on RSRP, good-quality coverage ($RSRP \geq -100$ dBm) using the Okumura-Hata model reaches 35.120 km² or 97.95%, while the Cost-231 model only covers 14.921 km² or 41.5% of the total area. This proves that appropriate propagation model selection and coverage optimization strongly influence 4G network implementation in urban areas.

Keywords: 4G LTE, *coverage planning*, RSRP

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telekomunikasi di Indonesia, khususnya jaringan 4G LTE, telah memberikan dampak yang signifikan membuat masyarakat dapat menikmati layanan internet lebih cepat dan stabil, mulai dari 10 Mbps hingga 1 Gbps. Peningkatan ini mendukung berbagai aktivitas digital seperti halnya *streaming* video tanpa *buffer*, konferensi video, dan aktivitas lain yang berbasis internet. Teknologi 5G

sudah diperkenalkan pada Indonesia, Akan tetapi 4G masih merupakan pondasi konektivitas digital sebab jangkauannya yang lebih besar serta infrastruktur yang kokoh.

Info Makalah:

Dikirim : 29-10-2025
Revisi 1 : 17-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-85974992595
e-mail : niketuthd@lecture.unjani.ac.id

Cibitung merupakan salah satu kecamatan yang terletak di wilayah timur Kabupaten Bekasi, Jawa Barat, yang memiliki tingkat urbanisasi yang cukup tinggi. Kawasan ini menjadi pusat perkembangan industri dan perumahan, yang berkontribusi pada peningkatan kebutuhan akan akses data yang cepat dan stabil, untuk mendukung berbagai kegiatan ekonomi dan sosial masyarakat. Cibitung menghadapi tantangan besar dalam hal pengembangan infrastruktur telekomunikasi, khususnya terkait dengan jaringan 4G LTE. Dalam optimasi *coverage* jaringan, penting untuk mempertimbangkan penempatan *new site* guna menjangkau area pemukiman yang belum bisa terpenuhi setelah adanya

perkembangan di daerah-daerah yang baru dibangun perumahan.

Adapun beberapa penelitian sebelumnya yang mendukung penelitian ini seperti yang dilakukan oleh Hajjar Yuliana, Sofyan Basuki dan Salita Ulitia Prini yang berjudul "*Optimization of Low Site Density Area for 4G Network in Urban City*" membahas tentang optimasi jaringan 4G pada area dengan kepadatan rendah sehingga menimbulkan *blank spot*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan beberapa *site* baru dapat meningkatkan cakupan sinyal dengan nilai RSRP di atas -80dBm dari 75,19% menjadi 94,08% serta menurunkan area dengan sinyal buruk di bawah -90 dBm dari 24,81% menjadi 5,93%. Penelitian ini membuktikan bahwa optimasi berbasis *coverage* efektif untuk meningkatkan kualitas jaringan, khususnya di wilayah urban yang memiliki distribusi *site* tidak merata [1]. Ada juga penelitian dari Muhammad Hafidh dan rekan membahas upaya mengatasi masalah *bad coverage* pada jaringan 4G LTE 1800 MHz di wilayah Tanjakan Mauk, Tangerang Selatan. Hasil pengukuran awal menunjukkan bahwa sebagian besar area masih memiliki kualitas sinyal di bawah target KPI. Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan optimasi dengan metode *physical tuning* yang mencakup pengaturan arah antena (*azimuth*), *mechanical* dan *electrical tilting*, pengaturan daya pancar (*power configuration*), serta penyesuaian tinggi antena. Setelah dilakukan optimasi, terjadi peningkatan signifikan pada performa jaringan, di mana nilai RSRP naik dari 76,12% menjadi 92,94%, SINR dari 91,79% menjadi 95,35%, dan RSRQ dari 71,38% menjadi 96,84%, seluruhnya berhasil memenuhi target KPI. Hasil ini menunjukkan bahwa penyesuaian parameter antena dalam proses optimasi dan optimasi dapat meningkatkan cakupan dan kualitas layanan jaringan 4G LTE secara signifikan [2]. Ada juga penelitian dari Edy Budiman dan Ummul Hairah berjudul "*Kinerja Jaringan 4G LTE Operator Mobile di Ibu kota Kalimantan Timur di masa Pandemi Covid19*" dengan metode pengukuran kualitas sinyal jaringan menggunakan *walk-test*, pengukuran sinyal 4G LTE ketiga operator jaringan seluler umumnya mengalami perubahan nilai RSRP, RSRQ, dan SNR. Beberapa titik ukur mengalami penurunan kekuatan sinyal yang disebabkan karena faktor *loss* propagasi seperti keberadaan pepohonan yang lebat dan tinggi, kepadatan jaringan dan cuaca menyebabkan perambatan seperti difraksi/hamburan dan pemantulan. Faktor lainnya juga disebabkan dari jarak BTS atau pemancar terhadap UE (penerima) menyebabkan lemahnya penerimaan sinyal dari perangkat pengguna [3]. Beberapa penelitian tersebut relevan dengan tantangan yang dihadapi dalam optimasi jaringan 4G di daerah pemukiman seperti Kecamatan Cibitung, yang di mana faktor pembangunan yang melebar dan tingkat kepadatan semakin meningkat dapat berpengaruh signifikan terhadap kualitas jaringan.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis kebutuhan jumlah *site* jaringan 4G LTE yang dapat memenuhi kebutuhan wilayah Kecamatan Cibitung dengan metode *coverage planning*. Optimasi *coverage planning* merupakan proses penting dalam perancangan jaringan seluler yang bertujuan untuk menentukan sejauh mana sinyal dari sebuah stasiun pemancar (*site*) dapat diterima oleh perangkat pengguna (*User Equipment/UE*) atau penerima lainnya. Proses ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menghitung area maksimum yang masih dapat dijangkau oleh sinyal dengan kualitas yang memadai, sehingga layanan komunikasi dapat diberikan secara optimal kepada pengguna di area tersebut. Dalam *coverage planning*, terdapat beberapa komponen utama yang harus diperhatikan, antara lain pengukuran radio frekuensi di lapangan, perhitungan *link budget*, serta penerapan model propagasi gelombang radio. Pengukuran radio frekuensi dilakukan untuk mengetahui kondisi nyata sinyal di lapangan, sedangkan *link budget* digunakan untuk menghitung keseimbangan antara daya pancar dan daya terima dengan mempertimbangkan berbagai faktor kehilangan (*losses*) dalam perjalanan sinyal. Sementara itu, model propagasi digunakan untuk memprediksi penyebaran sinyal berdasarkan lingkungan geografis dan karakteristik medan. Dengan demikian, hasil dari optimasi

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)

jangkauan ini menjadi dasar dalam menentukan penempatan *site* yang efisien dan memastikan kualitas layanan jaringan tetap terjaga [4].

Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis dan mengidentifikasi perbandingan *coverage* dari penggunaan model propagasi Okumura-Hata dan Cost-231 pada optimasi jaringan 4G LTE menggunakan metode *coverage planning* di wilayah Kecamatan Cibitung. Okumura-Hata adalah model prediksi *path loss* yang digunakan dalam komunikasi seluler untuk memperkirakan atenuasi sinyal antara pemancar dan penerima dalam lingkungan perkotaan, pinggiran kota, dan pedesaan yang didasarkan pada data empiris yang dikumpulkan oleh Okumura dan kemudian disederhanakan oleh Hata untuk memudahkan penggunaannya dalam optimasi jaringan seluler. Karena sifatnya yang sederhana dan cukup andal, model Okumura-Hata kemudian dikembangkan lebih lanjut oleh *European Co-operative for Scientific and Technical Research* (COST) menjadi model COST 231. Pengembangan ini ditujukan untuk memperluas cakupan frekuensi hingga 2000 MHz. Model ini juga dilengkapi dengan faktor koreksi yang dapat digunakan untuk memperkirakan *path loss* di berbagai jenis lingkungan, seperti wilayah pedesaan, *sub urban*, maupun perkotaan. Model COST 231 berlaku untuk frekuensi antara 1500 MHz hingga 2000 MHz, dengan ketentuan bahwa seluruh parameter lainnya tetap mengikuti ketentuan dalam model Hata [5].

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. Proses penelitian diawali dengan menentukan area yang akan diamati sebagai lokasi optimasi jaringan. Setelah area ditentukan, dilakukan pengumpulan informasi geografis terkait wilayah tersebut yaitu Kecamatan Cibitung sebagai dasar dalam optimasi. Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis *coverage planning* dengan perhitungan *link budget* untuk mengetahui kebutuhan daya dan jangkauan sinyal yang optimal. Berdasarkan hasil perhitungan *link budget* dilakukannya perhitungan model propagasi dan perhitungan jumlah BTS yang dibutuhkan untuk wilayah tersebut. Dari hasil beberapa perhitungan itu ditentukanlah titik *new site* menggunakan bantuan *Google Earth Pro*. *Google Earth Pro* merupakan salah satu perangkat lunak geospasial yang digunakan untuk menampilkan representasi permukaan bumi dalam bentuk virtual. Sistem kerja *Google Earth Pro* didasarkan pada penggabungan berbagai sumber data, seperti citra satelit, fotografi udara, serta informasi dari *Geographic Information System* (GIS), sehingga menghasilkan visualisasi bumi yang lebih detail dan interaktif [6].

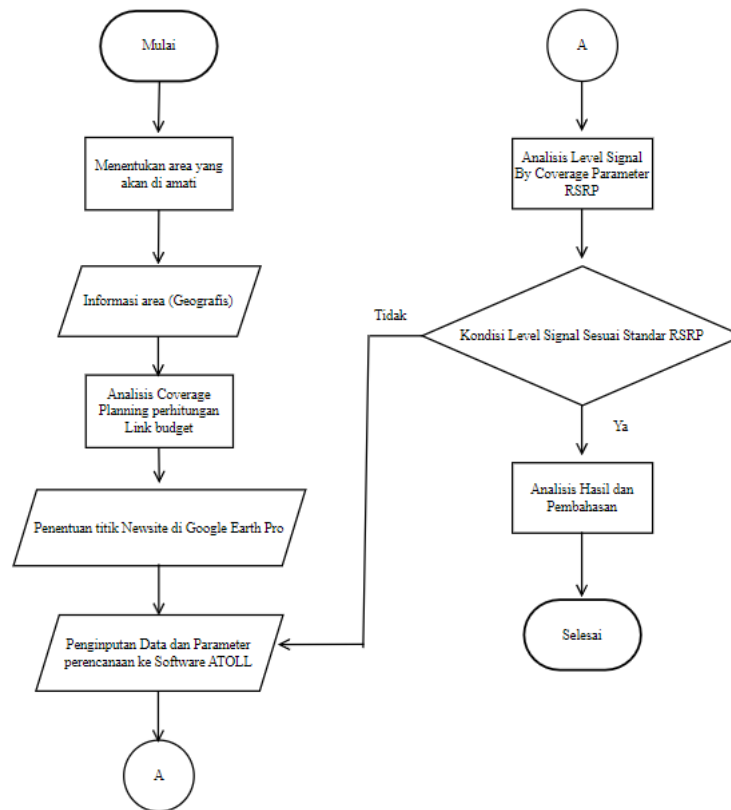
Titik tersebut kemudian digunakan dalam proses *input* data dan parameter *link budget* juga di-*input* ke dalam *software* optimasi jaringan *Atoll*. *Atoll* adalah perangkat lunak optimasi radio yang dilengkapi dengan berbagai alat dan fitur terpadu untuk mendukung pembuatan proyek optimasi jaringan, baik untuk *microwave* maupun optimasi radio dalam satu *platform*. Aplikasi ini memungkinkan perancang jaringan melakukan simulasi dan analisis secara komprehensif. Selain itu, *Atoll* menyediakan berbagai jenis studi prediksi cakupan area yang dapat dikonfigurasi sesuai kebutuhan optimasi, sehingga hasil perhitungan dapat disesuaikan dengan kondisi jaringan yang dirancang [5].

Selanjutnya dilakukan analisis level sinyal berdasarkan parameter RSRP untuk mengevaluasi kualitas cakupan. RSRP (*Reference Signal Received Power*) merupakan ukuran rata-rata daya sinyal LTE yang diterima oleh perangkat pengguna (UE), dihitung dari *resource elements* yang memuat *reference signal* dalam rentang *bandwidth* tertentu. Nilai RSRP mencerminkan seberapa kuat sinyal LTE yang diterima; semakin kecil nilainya, maka semakin lemah pula sinyal yang diterima oleh pengguna. RSRP juga dapat digunakan untuk menentukan apakah pengguna berada dalam jangkauan cakupan suatu sel. Jika pengguna berada di luar jangkauan, maka layanan LTE tidak dapat diakses. Selain itu, RSRP memiliki peran penting dalam membantu proses seleksi dan reseleksi sel, serta *handover* antar sel, karena memberikan informasi kepada UE mengenai kualitas sinyal berdasarkan perhitungan *path loss* [7].

Tabel 1 Standar Nilai *Signal Strength RSRP* [8]

Category	Range nilai RSRP
Very Good	$(-80) \leq x$
Good	$(-90) \leq x < (-80)$
Normal	$(-100) \leq x < (-90)$
Bad	$(-110) \leq x < (-100)$
Very Bad	$(-120) \leq x < (-110)$

Jika kondisi level sinyal belum sesuai dengan standar RSRP, maka dilakukan penyesuaian ulang terhadap data optimasi sebelumnya. Namun jika hasilnya telah sesuai, maka dilanjutkan pada tahap akhir berupa analisis hasil dan pembahasan, yang menjadi dasar dalam pengambilan kesimpulan terhadap kualitas jaringan di area studi.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

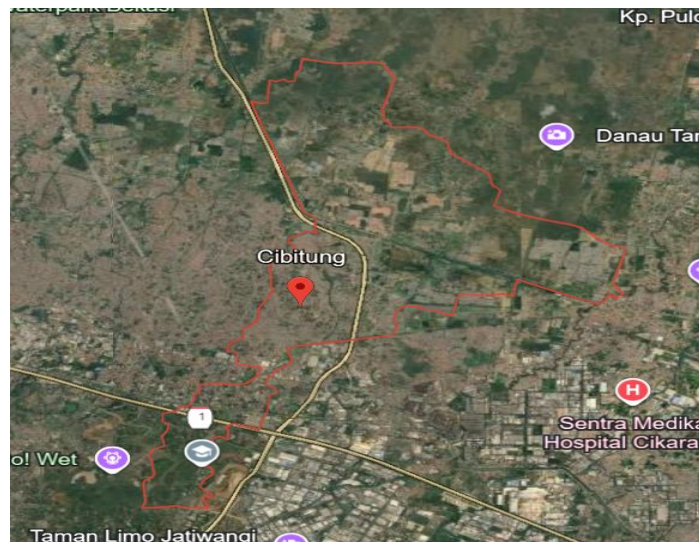
B. Lokasi Penelitian

Cibitung adalah sebuah kecamatan yang terletak di Kabupaten Bekasi, Provinsi Jawa Barat, Indonesia. Cibitung berada di sebelah timur Jakarta, dengan jarak sekitar 30 km dari pusat ibu kota. Secara geografis, Cibitung terletak pada koordinat sekitar $6^{\circ}17'42''S$ $107^{\circ}00'00''E$. Kecamatan Cibitung termasuk dalam wilayah aglomerasi Jakarta, dan saat ini menjadi daerah yang cukup berkembang, terutama karena kedekatannya dengan Jakarta dan kawasan industri di sekitar Bekasi. Cibitung juga memiliki akses transportasi yang baik, terutama melalui Jalan Tol Jakarta-Cikampek dan jalur kereta api, yang membuatnya menjadi daerah yang strategis untuk industri dan pemukiman. Kecamatan Cibitung, yang terletak di Kabupaten Bekasi, Jawa Barat (Gambar 2), memiliki batas-batas wilayah sebagai berikut:

1. Sebelah Utara: Berbatasan dengan Kecamatan Tarumajaya, Kabupaten Bekasi.
2. Sebelah Selatan: Berbatasan dengan Kecamatan Tambun Selatan dan Kecamatan Setu, Kabupaten Bekasi.
3. Sebelah Barat: Berbatasan dengan Kecamatan Jatiasih, Kota Bekasi.
4. Sebelah Timur: Berbatasan dengan Kecamatan Cikarang Pusat, Kabupaten Bekasi.

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)



Gambar 2 Area lokasi Penelitian Kecamatan Cibitung

Berdasarkan data sebaran penduduk di Kecamatan Cibitung (Tabel 2), dapat diketahui bahwa Desa Wanasari merupakan wilayah dengan persentase penduduk tertinggi, yaitu sebesar 40,41% dari total populasi kecamatan, diikuti oleh Desa Wanajaya sebesar 20,63% dan Desa Sukajaya sebesar 12,40%. Tingginya persentase ini juga sejalan dengan tingkat kepadatan penduduk yang signifikan, terutama di Wanasari yang memiliki kepadatan mencapai 18.062,07 jiwa/km², menjadikannya sebagai wilayah dengan tingkat hunian terpadat. Sebaliknya, Desa Sarimukti menjadi wilayah dengan sebaran penduduk terendah, yakni hanya 2,01% dari total populasi dan kepadatan sebesar 941,01 jiwa/km², yang mengindikasikan karakteristik wilayah yang lebih jarang penduduk. Secara keseluruhan, rata-rata kepadatan penduduk Kecamatan Cibitung berada pada angka 7.151,42 jiwa/km².

Tabel 2 Jumlah penduduk di kelurahan area Kecamatan Cibitung

Desa/Kelurahan	Persentase Penduduk (%)	Kepadatan Penduduk (per km ²)	Rasio Jenis Kelamin Penduduk
Cibuntu	9,61	4.395,17	101,74
Wanasari	40,41	18.062,07	101,49
Wanajaya	20,63	11.796,65	103,10
Sukajaya	12,40	6.728,57	103,51
Kertamukti	6,35	2.773,38	102,39
Muktiwari	8,59	5.578,17	102,43
Sarimukti	2,01	941,01	101,21
Kecamatan Cibitung	100,00	7.151,42	102,15

C. Coverage Planning 4G LTE

Dalam Spesifikasi Jaringan 4G LTE yang dibutuhkan dalam perencanaan jaringan menggunakan metode *coverage planning* dengan frekuensi 1800 MHz atau 1.8 GHz terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk menunjang hal tersebut, yaitu spesifikasi *loss* (Tabel 3) dan spesifikasi perangkat (Tabel 4). Beberapa parameter tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *link budget*, *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL), serta estimasi jangkauan atau *coverage* jaringan LTE yang direncanakan sesuai.

Perhitungan *link budget* bertujuan untuk mengetahui nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL), yaitu batas maksimum redaman jalur transmisi yang masih memungkinkan komunikasi berjalan dengan baik. Nilai MAPL inilah yang menjadi dasar untuk menentukan cakupan sinyal (*coverage area*) suatu stasiun pemancar. Semakin besar nilai MAPL, maka semakin luas area yang dapat dicakup oleh sinyal. Perhitungan *link budget* dilakukan berdasarkan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 3 Spesifikasi Loss Saluran

Spesifikasi Loss Saluran	Nilai
$LOSS_{Feeder}$	0.68 dB
$LOSS_{splitter}$	7,9 dB
$LOSS_{combiner}$	30 dB
$LOSS_{connector}$	0,15 dB

Tabel 4 Spesifikasi Perangkat

Spesifikasi Perangkat	Nilai
Daya pancar antenna Tx	43 dBm
Receiver sensitivity	-101 dBm
Interference margin	5,23 dB
Tx Antenna Gain	17 dBi
Tx Antenna Height	25 m
Rx Antenna Gain	0 dBi
Rx Antenna Height	1,1 m

Tabel 5 Data link budget

Transmitter (Tx)		
BS TX power	43 dBm	A
BS Antenna Gain	17 dBi	B
Loss saluran	33,83 dB	C
EIRP	26,17x dBm	D = A+B-C
Receiver (Rx)		
UE Noise Figure	7 dB	E
Thermal Noise	-103,98 dBm	F = 10 log (k.T.BW) + 30
Receiver Noise Floor	-97 dBm	G = E + F
SINR	-4 dB	H
Receiver Sensitivity	-101 dBm	I = G + H
Load Factor	70%	J
Interference margin	5,23 dB	K = 10 log (1-J)
Rx Antenna Gain	0 dBi	L
Body Loss	3 dB	M
Log normal fading margin	4 dB	N
MAPL	116,17 dB	O = D-I-K+L-M-N

Persamaan untuk model propagasi Okumura-Hata ditunjukkan pada persamaan (1), sedangkan persamaan untuk model propagasi Cost-231 ditunjukkan pada persamaan (2) berikut.

$$L_{P(urban)} = 69,55 + 26,16 \log(f_c) + [44,9 - 6,55 \log(h_{rx})] \log(d) - 13,82 \log(h_{rx}) - a(h_{rx}) \text{ dB} \quad (1)$$

$$LP(Urban) = 46,33 + 33,9 \log(fc) - 13,82 \log_{10}(htx) + a(hm) + [44,9 - 6,55 \log(htx)] \log(d) + Cm \quad (2)$$

Keterangan:

L = Path loss

Fc = Frekuensi (MHz) = 1800 MHz

ht = Tinggi antenna pemancar = 35 Meter

hr = Tinggi antenna penerima = 1.1 Meter

d = jarak (km)

a(hm) = koreksi tinggi antenna penerima (dB)

Cm = Faktor koreksi lingkungan = 3dB

III. HASIL DAN DISKUSI

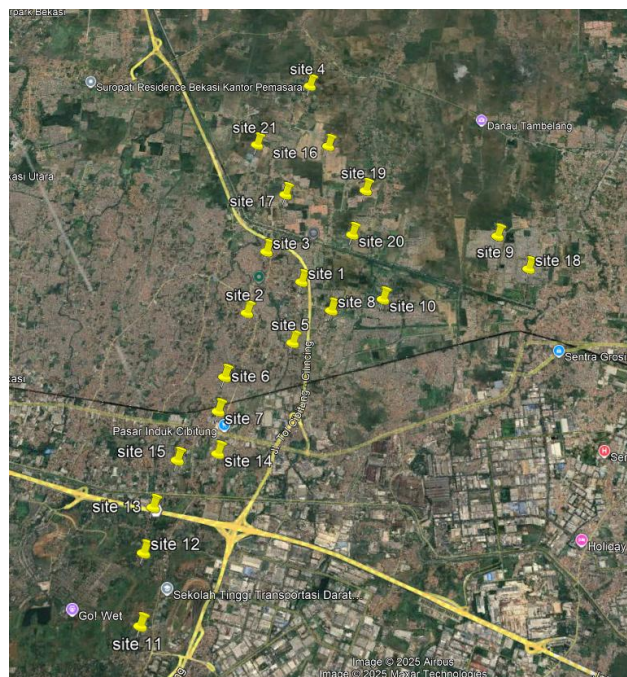
A. Optimasi New site Jaringan 4G LTE

Berdasarkan data spesifikasi pada Tabel 3 dan Tabel 4, dilakukan perhitungan propagasi dan optimasi jaringan yang dilakukan pada wilayah penelitian, yaitu Kecamatan Cibitung, Kabupaten Bekasi. Kecamatan Cibitung memiliki luas wilayah sebesar 35,79 km² dan merupakan salah satu daerah yang mengalami pertumbuhan pemukiman serta aktivitas masyarakat yang cukup pesat. Oleh karena itu, dilakukannya percobaan untuk membandingkan dua model propagasi yaitu model propagasi Okumura-Hata dan juga Cost-231 sebagai kebutuhan terhadap jaringan telekomunikasi yang handal dan merata untuk mendukung mobilitas dan komunikasi warga Kecamatan Cibitung.

Pada model propagasi Okumura-Hata yang berdasarkan hasil perhitungan nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) sebesar 122,2 dB dan parameter teknis lainnya seperti frekuensi 1800 MHz, tinggi antena pemancar 35 meter, serta tinggi antena penerima 1,1 meter, diperoleh jarak jangkauan efektif satu BTS sebesar 0,44 km. Selanjutnya, dilakukan perhitungan luas cakupan per sel (Acell) hasilnya menunjukkan bahwa satu sel dengan jangkauan 2,26 km. Dari luas total wilayah Cibitung sebesar 35,79 km², maka jumlah *Base Transceiver Station* (BTS) yang dibutuhkan untuk menjangkau seluruh area secara teoritis adalah sebanyak 16 *site*. Jumlah ini diperoleh dengan membagi luas wilayah dengan luas cakupan per sel.

Pada model propagasi Cost-231 yang berdasarkan hasil perhitungan menggunakan parameter yang sama yaitu frekuensi 1800 MHz, tinggi antena pemancar 35 meter, tinggi antena penerima 1,1 meter, serta faktor koreksi lingkungan urban (Cm) sebesar 3 dB. Nilai koreksi tinggi antena penerima (a(hm)) diperoleh sebesar -1,11 dB. Berdasarkan nilai *Maximum Allowable Path Loss* (MAPL) yang telah dihitung sebelumnya, yaitu sebesar 122,2 dB dan dengan menggunakan persamaan model propagasi Cost-231 diperoleh jarak jangkauan efektif satu BTS sebesar 0,39 km. Selanjutnya, dilakukan perhitungan luas cakupan per sel (Acell) hasilnya menunjukkan bahwa satu sel mencakup area seluas 1,78 km. Dengan luas total Kecamatan Cibitung sebesar 35,79 km², maka jumlah BTS yang dibutuhkan untuk mencakup seluruh wilayah secara teoritis adalah sebanyak 21 *site*. Jumlah ini lebih banyak dibandingkan perhitungan menggunakan model Okumura-Hata, yang hanya membutuhkan 16 *site*.

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan model propagasi untuk menentukan jumlah *new site* yang diperlukan, tahap selanjutnya adalah proses penentuan lokasi penempatan titik *new site*. Proses ini dilakukan dengan memanfaatkan *Software Google Earth Pro* sebagai media pemetaan. Lokasi *new site* ditunjukkan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3 Titik *new site* pada *Google Earth* di kecamatan Cibitung

Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat bahwa titik-titik *new site* yang direncanakan telah disesuaikan dengan kebutuhan jaringan di lapangan, khususnya pada area yang diperkirakan memerlukan penambahan *site* baru. Penentuan lokasi ini mempertimbangkan berbagai faktor, salah satu pertimbangan penting adalah adanya kemungkinan pembangunan permukiman baru di beberapa area tersebut, sehingga penambahan *site* dilakukan untuk mengantisipasi peningkatan permintaan layanan jaringan di masa mendatang. Dengan demikian, penempatan *new site* ini tidak hanya berfokus pada kebutuhan jaringan saat ini, tetapi juga memperhitungkan proyeksi kebutuhan layanan telekomunikasi di wilayah tersebut secara berkelanjutan.

B. Penempatan New Site

Pada Gambar 3 ditampilkan persebaran lokasi *new site* secara keseluruhan di area penelitian, yaitu wilayah Kecamatan Cibitung. Selanjutnya, pada Gambar 4 hingga Gambar 24 ditunjukkan tampilan jarak dekat dari masing-masing posisi *new site* yang telah dipetakan menggunakan *software Google Earth Pro*.



Gambar 4 *New site 1*



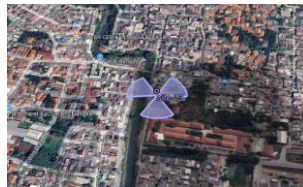
Gambar 5 *New site 2*



Gambar 6 *New site 3*



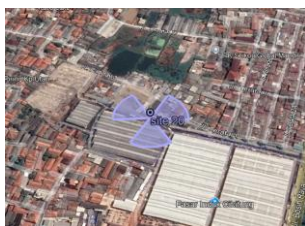
Gambar 7 *New site 4*



Gambar 8 *New site 5*



Gambar 9 *New site 6*



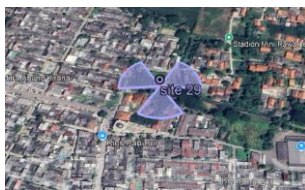
Gambar 10 *New site 7*



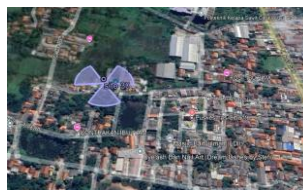
Gambar 11 *New site 8*



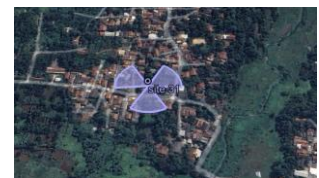
Gambar 12 *New site 9*



Gambar 13 *New site 10*



Gambar 14 *New site 11*



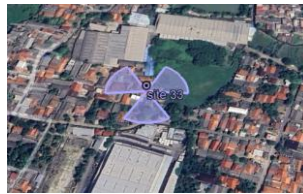
Gambar 15 *New site 12*

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)



Gambar 16 *New site 13*



Gambar 17 *New site 14*



Gambar 18 *New site 15*



Gambar 19 *New site 16*



Gambar 20 *New site 17*



Gambar 21 *New site 18*



Gambar 22 *New site 19*



Gambar 23 *New site 20*



Gambar 24 *New site 21*

Penempatan *new site 1* berada di tengah-tengah area permukiman seperti Perumahan Taman Wanasari Indah, serta dekat dengan fasilitas umum seperti SPBU, bengkel mobil, dan rumah makan. Kepadatan permukiman ini menunjukkan tingginya kebutuhan akan layanan yang stabil dan berkualitas. Selain itu, posisi *site* yang berada relatif terbuka dan jauh dari bangunan tinggi memungkinkan penyebaran sinyal secara optimal ke tiga sektor antenna tanpa banyak hambatan fisik. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,097797 dan *Latitude* -6,241073 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site 2* berada di tengah-tengah area permukiman padat seperti Perumahan citra villa wanasari cibitung, area dengan kepadatan penduduk tinggi. Selain itu, lokasi ini relatif dekat dengan jalur utama Jalan Raya dan pusat aktivitas komersial seperti MR. DIY, yang berpotensi menambah jumlah pengguna jaringan di area tersebut. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,086584 dan *Latitude* -6,246401 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site 3* di tengah kawasan permukiman padat di Kelurahan Wanasari dengan tujuan untuk memperkuat cakupan jaringan dan menjaga kualitas sinyal di area bertrafik tinggi. Lokasi ini dikelilingi oleh kompleks perumahan seperti Perumahan Regency 1 Wanasari, Perumahan Villa Wanasari, serta area komersial kecil di sekitar Jalan Raya Bosih. Sekolah juga ada disekitarnya diantara lain SDN Wanasari 12, SDIT Fitrah Hanniah, dan beberapa lainnya. Tingginya jumlah pengguna *smartphone* di kawasan ini membuat kebutuhan kapasitas jaringan semakin meningkat. *Site* ini juga berada dekat dengan fasilitas umum seperti Lapangan Bola Wanasari, kantor kelurahan, serta pusat aktivitas masyarakat di sepanjang Jalan Raya Bosih yang menjadi jalur utama pergerakan pengguna. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,091278 dan *Latitude* -6,234021 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site 4* berada di area pemukiman Kampung Tanah Ungkuk yang memiliki kepadatan penduduk menengah hingga tinggi. Lokasi ini dipilih untuk memperluas jangkauan jaringan di wilayah perbatasan antara area padat penduduk dan lahan terbuka seperti persawahan di sisi barat dan selatan. Pemilihan titik ini bertujuan untuk mengoptimalkan *coverage* sinyal di Kecamatan Cibitung yang

sebelumnya berpotensi mengalami *blank spot* karena jarak dari *site* terdekat. Di sekitar *site* terdapat fasilitas publik seperti Masjid Nurul Falah, Musholla Nurul Iman, dan Lapangan Bola Desa Sarimukti yang sering digunakan masyarakat untuk kegiatan bersama. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,101872 dan *Latitude* -6,197439 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 5 berada di kawasan dengan kepadatan penduduk tinggi seperti Villa Mutiara Jaya dan area Selang Nangka, sehingga kebutuhan layanan telekomunikasi di wilayah ini cukup besar. *Site* ini juga berdekatan dengan Jl. Villa Mutiara dan akses ke Tol Cibitung–Cimanggis, yang membuatnya strategis untuk melayani pengguna yang beraktivitas atau melintas di jalur tersebut. Selain itu, adanya fasilitas umum seperti Pasar Rengas dan beberapa pusat aktivitas masyarakat di sekitarnya menambah pentingnya ketersediaan jaringan dengan kualitas baik. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,095101 dan *Latitude* -6,253356 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 6 berada di area pemukiman padat dengan pola jalan yang rapat, seperti Jl. Cemp, Jl. Mawar, dan Jl. Kp. Utan. Selain itu, titik ini berdekatan dengan fasilitas umum yang ramai pengunjung seperti Stasiun Cibitung, tempat ibadah dan Pasar Kaget Pondok Tanah Mas yang membutuhkan sinyal baik dan stabil untuk mendukung kegiatan masyarakat. Berdasarkan lingkungan padat penduduk ini kebutuhan jaringan pasti meningkat. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,081491 dan *Latitude* -6,258847 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 7 berada di kawasan dengan aktivitas masyarakat yang tinggi. Area ini berada di sekitar Pasar Induk Cibitung yang menjadi pusat perdagangan dan pergerakan masyarakat, sehingga membutuhkan koneksi jaringan yang stabil untuk mendukung komunikasi dan transaksi digital. Selain itu, lingkungan sekitar terdiri dari permukiman padat serta berada dekat dengan akses utama seperti Jl. Raya Bitung dan Jl. Bosih Raya yang memiliki lalu lintas pengguna cukup besar. Hasil penempatan *New site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,079858 dan *Latitude* -6,265487 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 8 berada di sekitar Perumahan Kirana Cibitung dan Golden Cibitung yang merupakan area pemukiman padat dengan aktivitas komunikasi yang tinggi. Lokasi ini memiliki posisi strategis di pertemuan beberapa jalur utama seperti Jl. Sarasa, Jl. Raya Edelweiss, serta akses menuju beberapa kompleks perumahan baru yang sedang berkembang. Berdasarkan analisis trafik data, area ini memiliki tingkat kepadatan pengguna yang signifikan, terutama pada jam sibuk karena tingginya penggunaan layanan internet untuk keperluan sehari-hari. Selain itu, posisi *site* yang dekat dengan gerbang perumahan juga memudahkan distribusi sinyal ke area sekitar termasuk Perumahan Pesona Gading Cibitung 1 serta area komersial di sekitarnya. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,103167 dan *Latitude* -6,247551 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 9 berada di kawasan pemukiman padat Perumahan Puri Lestari. Area ini memiliki konsentrasi pengguna yang tinggi dengan kebutuhan akses data besar karena aktivitas penduduk sehari-hari, termasuk penggunaan layanan digital dan komunikasi berbasis internet. Lokasi *site* berada di titik strategis yang dikelilingi oleh jalan utama seperti, Jl. Puri Lestari Utama, dekat dengan pusat aktivitas masyarakat seperti Area komersial, Klinik Hanania, dan beberapa tempat ibadah. Serta penempatan *site* ini memudahkan distribusi sinyal ke perumahan terdekat yang cukup besar juga yaitu Perumahan Gramapuri Persada. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,137758 dan *Latitude* -6,235401 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 10 berada di kawasan pemukiman padat di sekitar Perumahan Kirana Cikarang yang memiliki kebutuhan layanan komunikasi cukup tinggi. Selain itu, keberadaan fasilitas umum seperti Puskesmas Wanajaya, lapangan bulu tangkis, pasar, serta akses ke beberapa perumahan besar seperti Kirana Cibitung dan Taman Kirana menambah urgensi penguatan sinyal di wilayah ini. Posisi *site* juga strategis karena berada di tengah area dengan tingkat aktivitas masyarakat tinggi, sehingga mampu mendukung kebutuhan jaringan baik untuk komunikasi sehari-hari maupun aktivitas ekonomi. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,113544 dan *Latitude* -6,246312 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter. Dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)

Penempatan *new site* 11 berada di area sekitar yang didominasi oleh pemukiman serta adanya fasilitas umum seperti Puskesmas Cibuntu dan institusi pendidikan Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi. Selain itu, lokasi ini memiliki akses yang strategis ke jalan utama yang menghubungkan kawasan pemukiman dengan area industri di sekitar Cibitung–Setu. Penempatan *new site* ini bertujuan untuk optimalisasi atau *blank spot* pada perencanaan sehingga pembangunan *site* baru diperlukan untuk meningkatkan kualitas jaringan telekomunikasi. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,063519 dan *Latitude* -6,303685 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 12 berada di area sekitar yang didominasi oleh pemukiman serta adanya fasilitas umum seperti Lapangan Sepak Bola (Bintang Muda) dan institusi pendidikan Sekolah Tinggi Transportasi Darat. Selain itu, lokasi ini cukup menunjang jalan utama Cibitung–Setu. Penempatan *new site* ini bertujuan untuk optimalisasi atau *blank spot* pada optimasi sehingga pembangunan *site* baru diperlukan untuk meningkatkan kualitas jaringan telekomunikasi. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,064621 dan *Latitude* -6,29069 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 13 berada di area pemukiman yang tingkat kepadatannya rendah namun terdapat Jl. Tol MBZ, serta beberapa perusahaan seperti AMP PT. Marga Sarana Raya dan PT. Leli Duta Trans. Penempatan *new site* ini bertujuan untuk optimalisasi atau *blank spot* pada optimasi sehingga pembangunan *site* baru di titik ini diperlukan untuk meningkatkan kualitas jaringan telekomunikasi. Hasil penempatan *New site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,066672 dan *Latitude* -6,282473 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 80, kedua 200 dan ketiga pada 320.

Penempatan *new site* 14 berada di area pemukiman padat serta dikelilingi oleh beberapa perusahaan yaitu PT. Cipta Aneka Agung, PT. Suri Nusantara, dan juga beberapa fasilitas umum seperti Masjid Ar-Ridhwan, Gor Anda Bandminton. Lokasi ini memungkinkan potensi peningkatan penggunaannya sehingga penambahan *site* di titik ini akan menunjang jaringan yang baik dan stabil. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,079311 dan *Latitude* -6,273622 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 15 berada di kawasan pemukiman padat Perumahan Metland Tambun. Area ini memiliki konsentrasi pengguna yang tinggi dengan kebutuhan akses data besar karena aktivitas penduduk sehari-hari. Lokasi *site* berada di titik strategis yang dikelilingi oleh jalan utama perumahan seperti Jl. Biduri Raya, beberapa area komersial, Masjid Al-Kautsar, dan Gor Tambun. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,071611 dan *Latitude* -6,274074 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 16 berada di kawasan Perumahan Logam Bangun Setia 2 yang memiliki kepadatan penduduk tinggi serta didominasi oleh area pemukiman padat. Lokasi ini juga berada di dekat fasilitas umum seperti minimarket, musholla, dan akses jalan utama yang menghubungkan perumahan dengan wilayah sekitar. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,105511 dan *Latitude* -6,212346 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 17 berada di kawasan perumahan padat penduduk yang berada di sekitar Bumi Sakinah 4 Muktiwari dan Perumahan Berkah. Lokasi ini strategis karena berada di dekat jalur akses utama yang menghubungkan beberapa kompleks perumahan, serta berada pada area yang sebelumnya teridentifikasi memiliki potensi *blank spot*. Selain itu, posisi *site* yang berdekatan dengan fasilitas umum seperti tempat kebugaran dan toko bangunan memungkinkan cakupan sinyal dapat mendukung aktivitas komunikasi dan layanan digital masyarakat sekitar. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,095995 dan *Latitude* -6,222168 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 18 berada di kawasan pemukiman padat Perumahan Gramapuri Cikarang, khususnya di sekitar Jl. Edelweis 7 dan Jl. Hanyutangi Raya, yang memiliki aktivitas masyarakat cukup tinggi. Di area ini terdapat berbagai fasilitas umum dan komersial seperti Masjid Jami Hamzah, Gedung Serbaguna Gramapuri Persada, Satria Gym Club Gramapuri, serta Dagger Vape Gramapuri Persada yang menjadi pusat interaksi warga. Selain itu, di sekitarnya juga Gor Gramapuri Persada, dan beberapa toko serta warung makan yang menunjang kebutuhan harian warga. Hasil penempatan *new site* ini

menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,143036 dan *Latitude* -6,24294 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 19 berada di kawasan perumahan padat penduduk dan fasilitas umum di Desa Kertamukti. *Site* ini berada di dekat Perumahan AsriNet Cibitung, Perumahan Griya Hasanah Kertamukti, dan Perumahan Kertamukti Asri Residence yang memiliki jumlah penduduk cukup tinggi. Selain itu, di sekitar lokasi juga terdapat beberapa fasilitas penting seperti Kantor Desa Kertamukti, Lapangan Desa Kertamukti, dan toko komersial yang melayani kebutuhan harian warga. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,11229 dan *Latitude* -6,22294 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 60, kedua 180 dan ketiga pada 300.

Penempatan *new site* 20 berada di kawasan yang menghubungkan beberapa kompleks perumahan padat penduduk dan area komersial di wilayah Cibitung. *Site* ini terletak di dekat Perumahan Tirta Alam Cibitung dan Galaxy Prima Residence, serta lokasi ini juga berada dekat dengan Jl. Raya Kali CBL yang merupakan jalur penghubung antar wilayah, sehingga dapat memberikan cakupan jaringan yang baik bagi pengguna yang melintas. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,108729 dan *Latitude* -6,232144 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

Penempatan *new site* 21 berada di kawasan Perumahan Permata Muktiwari Residence yang strategis untuk memperluas cakupan sinyal di wilayah dengan pertumbuhan penduduk yang cepat. Lokasi ini dikelilingi oleh berbagai fasilitas dan area perumahan seperti Masjid An-Nur Permata Muktiwari Residence, dan beberapa usaha lokal. Lokasi ini juga berada di area pengembangan pemukiman baru yang berpotensi mengalami peningkatan jumlah pengguna dalam beberapa tahun ke depan, sehingga diperlukan sinyal yang stabil untuk mendukung aktivitas komunikasi sehari-hari dan melengkapi kebutuhan area *blank spot*. Hasil penempatan *new site* ini menghasilkan koordinat dengan *Longitude* 107,09964 dan *Latitude* -6,210558 serta tinggi BTS atau *eNodeB* 35 meter, dengan menempatkan *Azimuth* pada tiga sektor yang pertama 20, kedua 140 dan ketiga pada 260.

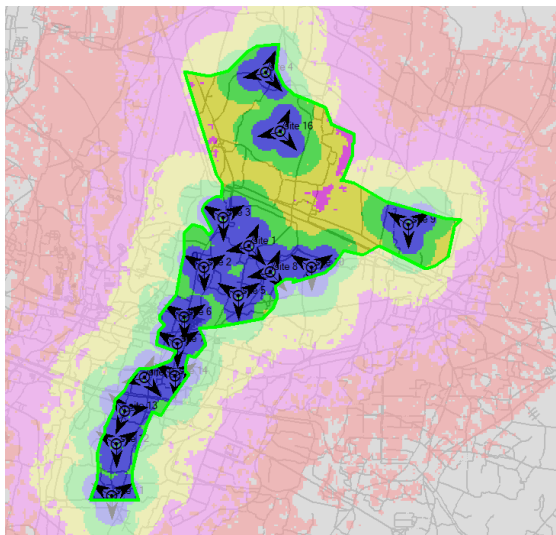
C. Hasil dan Analisis Coverage

Hasil simulasi menggunakan *software Atoll* setelah dilakukannya optimasi dan penempatan *new site* menggunakan metode *coverage planning* dengan model propagasi Okumura-Hata di area Kecamatan Cibitung ditunjukkan pada Gambar 25, sementara hasil simulasi menggunakan *software Atoll* setelah dilakukannya optimasi dan penempatan *new site* menggunakan metode *coverage planning* dengan model propagasi Cost-231 di area Kecamatan Cibitung ditunjukkan pada Gambar 26.

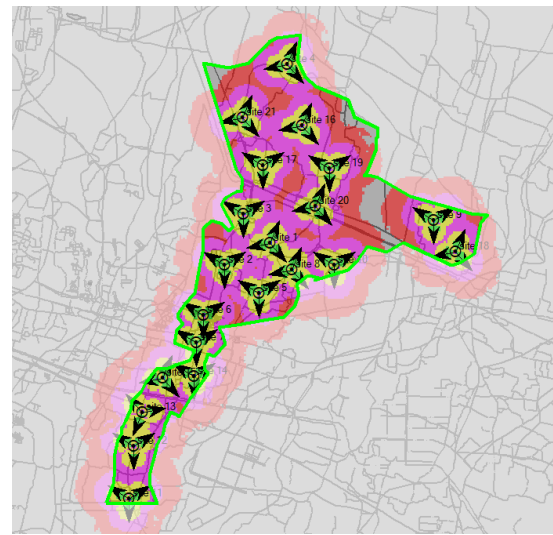
Berdasarkan hasil simulasi menggunakan model propagasi Okumura-Hata pada *software Atoll* dengan jumlah 16 *site* yang didapat dari perhitungan kebutuhan cakupan wilayah, diperoleh distribusi sinyal berdasarkan parameter RSRP untuk wilayah Kecamatan Cibitung yang memiliki luas 35,79 km² dengan karakteristik kepadatan urban. Hasil simulasi ini memperlihatkan perbedaan kualitas sinyal pada berbagai rentang nilai *decibel milliwatts* (dBm), yang direpresentasikan melalui variasi warna *legend Atoll* pada Tabel 6. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan model propagasi Cost-231 pada *software Atoll* dengan jumlah 21 *site* yang didapat dari perhitungan kebutuhan cakupan wilayah, diperoleh distribusi sinyal berdasarkan parameter RSRP untuk wilayah Kecamatan Cibitung yang memiliki luas 35,79 km² dengan karakteristik kepadatan urban. Hasil simulasi ini memperlihatkan perbedaan kualitas sinyal pada berbagai rentang nilai *decibel milliwatts* (dBm), yang direpresentasikan melalui variasi warna *legend Atoll* pada Tabel 6.

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)



Gambar 25 Hasil Simulasi Coverage Propagasi Okumura-Hata berdasarkan Software Atoll pada wilayah Kecamatan Cibitung



Gambar 26 Hasil Simulasi Coverage Cost-231 berdasarkan Software Atoll pada wilayah Kecamatan Cibitung

Pada Tabel 6 disajikan hasil perbandingan kalkulasi luas cakupan jaringan yang diperoleh dari dua model propagasi, yaitu Okumura-Hata dan Cost-231. Perhitungan ini dilakukan pada wilayah Kecamatan Cibitung yang memiliki karakteristik urban dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi serta total luas wilayah mencapai 35,79 km². Hasil cakupan dari masing-masing model propagasi tersebut divisualisasikan melalui representasi warna pada legend perangkat lunak *Atoll*, sehingga memudahkan dalam mengidentifikasi perbedaan kualitas sinyal di setiap area. Melalui visualisasi ini dapat diketahui seberapa luas area yang tercakup dengan kualitas sinyal tertentu, sekaligus menunjukkan variasi distribusi sinyal yang dihasilkan oleh kedua model propagasi.

Tabel 6 Hasil kalkulasi perbandingan model propagasi Okumura-Hata dengan Cost-231

Legend	Range RSRP	Okumura-Hata		Cost-231	
		Surface (km ²)	% of Covered Area	Surface (km ²)	% of Covered Area
	(-80 ≤ RSRP < 0 dBm)	17,808	49,667%	0,11	0,322%
	(-90 ≤ RSRP < -80 dBm)	8,815	24,585%	3,933	11,684%
	(-100 ≤ RSRP < -90 dBm)	8,498	23,701%	10,878	31,83%
	(-110 ≤ RSRP < -100 dBm)	0,735	2,05%	13,165	38,522%
	(-120 ≤ RSRP < -110 dBm)	0	0%	6,03	17,644%
Total		35,855 km²	100%	34,175 km²	95,5%
	RSRP > -100 dBm	35,120	97,95%	14,921	41,85%
	RSRP < -100 dBm	0,735	2,05%	19,195	53,65%

Berdasarkan Tabel 6, hasil perbandingan model propagasi Okumura-Hata dan Cost-231 menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan dalam memprediksi cakupan sinyal RSRP di wilayah penelitian. Pada rentang (-80 ≤ RSRP < 0 dBm), model Okumura-Hata menghasilkan cakupan yang sangat dominan, yaitu sebesar 17,808 km² atau 49,67% dari total wilayah, sedangkan model Cost-Hata hanya memprediksi 0,11 km² atau 0,322%. Hal ini menunjukkan bahwa model Okumura-Hata cenderung memberikan estimasi sinyal kuat yang lebih luas dibandingkan Cost-231. Pada rentang (-90 ≤ RSRP < -80 dBm), kedua model menunjukkan hasil yang relatif seimbang, yaitu 8,81 km² (24,585%) untuk Okumura-Hata dan 3,933 km² (11,68%) untuk Cost-231. Pada rentang (-100 ≤ RSRP < -90 dBm), di mana Okumura-Hata hanya memprediksi 8,498 km² (23,702%), sedangkan Cost-231 memprediksi jauh lebih besar, yaitu 10,878 km² (31,83%). Perbedaan signifikan terlihat pada rentang (-110 ≤ RSRP < -100 dBm), di mana Okumura-Hata hanya memprediksi 0,735 km² (2,05%), sementara Cost-231 mencapai 13,165 km² (38,522%).

Bahkan pada rentang ($-120 \leq \text{RSRP} < -110$ dBm), Okumura-Hata tidak memprediksi cakupan sama sekali, sedangkan Cost-Hata masih memprediksi cukup besar yaitu 6,03 km² (17,64%). Secara total, cakupan dengan $\text{RSRP} \geq -100$ dBm pada model Okumura-Hata mencapai 35,120 km² atau 97,95% dari wilayah, sedangkan pada model Cost-231 hanya 14,921 km² atau 41,85%. Cakupan dengan $\text{RSRP} < -100$ dBm pada Okumura-Hata hampir nol (0,735%), sementara pada Cost-Hata mencapai 53,65%. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa hasil dari model propagasi Okumura-Hata cukup baik digunakan dalam optimasi jaringan ini karena masih memiliki keunggulan dalam hal estimasi cakupan sinyal secara makro seperti sifatnya yang memberikan cakupan sinyal luas dan memprediksi area layanan secara menyeluruh. Dengan begitu perencanaan optimasi jaringan, model ini dapat membantu operator atau perencana jaringan menentukan estimasi jumlah *site* awal yang dibutuhkan lebih proporsional dan realistis, karena mampu menunjukkan distribusi cakupan dengan porsi sinyal baik yang lebih dominan serta area sinyal lemah yang relatif kecil. Sedangkan Cost-231 masih menunjukkan hasil cakupan yang terlalu jauh dari harapan karena lebih dominannya sinyal lemah dibanding sinyal kuat meski memiliki jumlah BTS yang lebih banyak, diketahui juga bahwa model propagasi ini merupakan pembaruan dari model propagasi okumura, lebih presisi dan akurat terhadap kondisi lapangan dalam mempertimbangkan berbagai hambatan fisik, seperti ketinggian atau kepadatan bangunan, dan jenis permukaan, sehingga hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya pelemahan sinyal.

IV. KESIMPULAN

Pada optimasi jaringan 4G di wilayah Kecamatan Cibitung menggunakan metode *coverage planning* dengan luas wilayah 35,79 km² dan karakteristik urban, hasil perhitungan berdasarkan masing-masing propagasi menunjukkan kebutuhan jumlah *site* sebesar 16 *site* untuk model propagasi Okumura-Hata dan 21 *site* untuk model propagasi Cost-231. Jumlah ini dihitung berdasarkan luas cakupan tiap sel, jarak jangkauan sinyal, dan faktor lingkungan. Perbedaan jumlah *site* ini menunjukkan bahwa pemilihan model propagasi berpengaruh signifikan terhadap estimasi kebutuhan infrastruktur jaringan. Berdasarkan parameter *Reference Signal Received Power* (RSRP), hasil perbandingan antara model propagasi Okumura-Hata dan model propagasi Cost-231 menunjukkan terjadinya perbedaan yang cukup signifikan dalam cakupan area atau kualitas level sinyal. cakupan dengan kualitas baik $\text{RSRP} \geq -100$ dBm pada model Okumura-Hata mencapai 35,120 km² atau 97,95% dari wilayah, sedangkan pada model Cost-231 hanya 14,921 km² atau 41,85%. Model propagasi Okumura-Hata cukup baik digunakan dalam optimasi jaringan ini karena masih memiliki keunggulan dalam hal estimasi cakupan sinyal secara makro seperti sifatnya yang memberikan cakupan sinyal luas dan memprediksi area layanan secara menyeluruh, sedangkan Cost-231 masih menunjukkan hasil cakupan yang terlalu jauh dari harapan karena lebih dominannya sinyal lemah dibanding sinyal kuat meski memiliki jumlah BTS yang lebih banyak. Diketahui juga bahwa model propagasi ini merupakan pembaruan dari model propagasi Okumura-Hata, lebih presisi dan akurat terhadap kondisi lapangan dalam mempertimbangkan berbagai hambatan fisik, seperti ketinggian atau kepadatan bangunan, dan jenis permukaan, sehingga hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya pelemahan sinyal.

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat diimplementasikan oleh operator telekomunikasi di lapangan secara langsung guna menunjang kebutuhan akan layanan jaringan yang masih belum ter-cover dari keseluruhan wilayah sehingga dapat memfasilitasi penduduk dengan kualitas jaringan yang baik dan merata. Pengembangan pada penelitian berikutnya yaitu dilakukannya simulasi lanjutan menggunakan model propagasi lainnya, seperti model propagasi 3GPP untuk melihat perbandingan performa cakupan jaringan yang lebih lengkap. Pengembangan pada penelitian berikutnya juga dapat dikembangkan dengan metode *capacity planning* agar optimasi jaringan tidak hanya mempertimbangkan cakupan wilayah, tetapi juga kebutuhan kapasitas lalu lintas data pengguna. Dengan metode tersebut, jumlah *site* yang direncanakan dapat lebih disesuaikan dengan jumlah penduduk, kepadatan trafik, pola penggunaan data, serta proyeksi pertumbuhan layanan internet di wilayah Kecamatan Cibitung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Yuliana, S. Basuki, and S. U. Prini, "Optimization of Low *Site* Density Area for 4G Network in Urban City," *J. Elektron. dan Telekomun.*, vol. 21, no. 2, p. 98, 2021, doi: 10.14203/jet.v21.98-103.
- [2] P. Tanjakan and M. Tangerang, "3 1,2,3," vol. 6, no. 1, pp. 208–216, 2019.
- [3] E. Budiman, U. Hairah, P. Studi Informatika Fakultas Teknik Universitas Mulawarman, S. -Kalimantan Timur, and J. Kuaro Kampus Gunung Kelua Unmul, "Kinerja Jaringan 4G LTE Operator Mobile di Ibukota Kalimantan Timur dimasa Pandemi Covid19 Mobile Operator 4G Network Performance in Capital of East Kalimantan during the Covid19 Pandemic", doi: 10.30818/jpkm.2021.

Optimasi Jaringan 4G LTE Menggunakan Metode Coverage Planning dengan Frekuensi 1800 MHz di Kecamatan Cibitung

(Ni Ketut Hariyawati Dharmi, Reza Zanarsyah Putra, Fauzia haz : Halaman 122 - 136)

- [4] Achmad Aznul Putratama, "Optimasi Optimalisasi Jaringan 4g Lte Fdd 1800 MHz Berdasarkan *Link budget* Di Universitas Hasanuddin," 2022.
- [5] T. G. A. S. Putra, P. K. Sudiarta, I. G. A. K. Diafari, and J. T. Elektro, "Analisis Pengaruh Model Propagasi dan Perubahan Tilt Antena Terhadap *Coverage Area* Sistem Long Term Evolution Menggunakan Software *Atoll*," 2015.
- [6] M. I. MI and Y. Saragih, "Perancangan Jaringan Fiber To the Home (Ftth) Menggunakan Aplikasi Google Earth Pro," *Aisyah J. Informatics Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 49–57, 2023, doi: 10.30604/jti.v5i1.133.
- [7] M. Saiful Bayudin *et al.*, "Pengujian Drive Test Untuk Menentukan Kualitas Layanan Jaringan 4G LTE Di Kota Lhokseumawe," *J. Tektro*, vol. 5, no. 1, p. 64, 2021.
- [8] R. Efriyendro and Y. Rahayu, "Analisa Perbandingan Kuat Sinyal 4G LTE Antara Operator Telkomsel dan XL AXIATA Berdasarkan Paramater Drive Test Menggunakan Software G-NetTrack Pro Di Area Jalan Protokol Panam," *J. Online Mhs.*, vol. 4, no. 2, pp. 1–9, 2017.

**ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE)
PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN
MENGGUNAKAN WIRESHARK**

**Nivika Tiffany Somantri^{1*)}, Nicko Wahyudi²⁾, Atik Charisma³⁾, Hajjar Yuliana⁴⁾,
Sofyan Basuki⁵⁾, Ade Sena Permana⁶⁾.**

^{1,2,3,4,5,6)}Program Studi Teknik Elektro
Universitas Jenderal Achmad Yani

Jalan Terusan Jend. Sudirman PO.BOX 148 Cimahi 40531

²⁾Program Studi Teknik Mesin, Universitas Jenderal Achmad Yani

^{*)}Korespondensi : nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Kinerja jaringan WiFi yang optimal merupakan kebutuhan mendesak di lingkungan akademis, terutama untuk mendukung proses belajar, penelitian, dan komunikasi. Dalam era digital, permintaan akan kualitas jaringan yang tinggi semakin meningkat seiring dengan ketergantungan yang besar pada akses internet untuk berbagai aktivitas akademik. Oleh karena itu, evaluasi kualitas jaringan WiFi di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani menjadi fokus utama dalam penelitian ini, dengan tujuan memastikan jaringan memenuhi standar kualitas yang dibutuhkan. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan observasi untuk menganalisis parameter Kualitas Layanan (QoS) jaringan WiFi seperti throughput, packet loss, delay, dan jitter. Metode kuantitatif dipilih karena mampu memberikan data yang objektif dan terukur secara akurat, sedangkan pendekatan observasi memungkinkan peneliti mengamati langsung lalu lintas internet dan mengukur parameter QoS di lokasi yang diteliti. Pengujian dilakukan selama tiga hari untuk mendapatkan data yang representatif dari kondisi jaringan WiFi di gedung tersebut. Dari hasil pengujian yang dilakukan, diketahui bahwa kualitas jaringan WiFi di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani sebesar : Throughput rata-rata sebesar 1406,76 Kbps, Packet loss rata-rata sebesar 0%, Delay rata-rata sebesar 70,21 ms, Jitter rata-rata sebesar 85,96 ms. Dengan rata-rata indeks keseluruhan parameter Quality of Service sebesar 3,25 dan masuk kedalam kategori Bagus menurut standarisasi TIPHON.

Kata kunci : Wi-Fi, Throughput, Packet Loss, Delay, Jitter.

Abstract

WiFi performance is a pressing need in academic, especially to support learning, research, and communication. In the digital era, the demand for high network quality is increasing along with the heavy dependence on internet access for various academic activities. Therefore, the evaluation of the WiFi network quality in Jenderal Achmad Yani University is focus of this study, the network meets the required quality standards. This study uses a quantitative method with an observational approach to analyze the Quality of Service (QoS) parameters such as throughput, packet loss, delay, and jitter. The quantitative method was chosen because it is able to provide objective and accurately measured data, while the observational approach allows researchers to directly observe internet traffic and measure QoS parameters. Testing was conducted for three days to obtain representative data on the condition of the WiFi network in the building. From the test results conducted, it is known that the quality of the network in the Faculty of Engineering Achmad Yani University is: Average throughput of 1406.76 Kbps, packet loss of 0%, delay of 70.21 ms, jitter of 85.96 ms. With an average overall index of QoS parameters of 3.25 and included in the Good category according to TIPHON.

Keywords : Wi-Fi, Throughput, Packet Loss, Delay, Jitter.

I. PENDAHULUAN

Info Makalah:

Dikirim : 05-12-2025
Revisi 1 : 19-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 22-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-89686107919
e-mail : nivika.tiffany@lecture.unjani.ac.id

Teknologi jaringan nirkabel atau WiFi telah menjadi sangat penting dalam mendukung aktivitas akademik di lingkungan kampus, termasuk di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani. Keandalan dan kinerja jaringan WiFi yang optimal sangat diperlukan untuk menjamin kelancaran proses belajar mengajar, penelitian, dan komunikasi antar civitas akademika. Oleh karena itu, analisis parameter Quality of Service (QoS) pada jaringan WiFi menjadi relevan dalam upaya meningkatkan kualitas layanan yang diberikan. Banyaknya perangkat elektronik dan jaringan WiFi lain di sekitar kampus dapat menyebabkan interferensi sinyal yang

mengganggu kinerja jaringan. Setiap ruangan di gedung memiliki karakteristik lingkungan yang berbeda, seperti tebal dinding dan jumlah peralatan yang terhubung, yang dapat mempengaruhi kualitas sinyal WiFi. Infrastruktur jaringan yang tidak dikelola dengan baik dapat menimbulkan masalah pada stabilitas dan kinerja jaringan. Dalam era digital saat ini, permintaan akan kualitas layanan jaringan yang tinggi semakin meningkat, terutama di lingkungan akademis yang sangat bergantung pada akses internet untuk berbagai aktivitas. Analisis QoS pada jaringan WiFi di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani tidak hanya relevan untuk meningkatkan kinerja jaringan di lingkungan kampus, tetapi juga dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi jaringan secara lebih luas.

Penggunaan alat analisis jaringan seperti Wireshark telah menjadi praktik umum di industri teknologi informasi. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan rekomendasi berharga bagi pengelola jaringan dan dapat diterapkan oleh institusi lain yang menghadapi tantangan serupa. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki potensi untuk memberikan manfaat yang signifikan dalam meningkatkan kualitas layanan jaringan WiFi, yang pada akhirnya akan mendukung pencapaian tujuan akademis dan operasional di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani.

Ada beberapa penelitian yang sudah ada sebelumnya seperti penelitian yang berjudul "ANALISIS QUALITY OF SERVICE (QOS) JARINGAN INTERNET KANTOR PUSAT KING BUKOPIN DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK". Penelitian ini dibuat oleh Muhamad Hasbi dan Naldo Rafli Saputra pada tahun 2021. Penelitian ini mempunyai tujuan untuk menganalisis kualitas jaringan internet di Kantor Pusat KB BUKOPIN [1]. Kemudian penelitian berjudul "Analisis Quality of Service (QoS) Jaringan Internet Pada Website Flexible-Learning Universitas Kristen Satya Wacana". Penelitian ini dibuat oleh Irianto Liling Tasik dan Rissal Efendi pada tahun 2024. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis mutu jaringan ketika mengakses situs web Flexible-Learning Universitas Kristen Satya Wacana dengan menggunakan Wireshark [2].

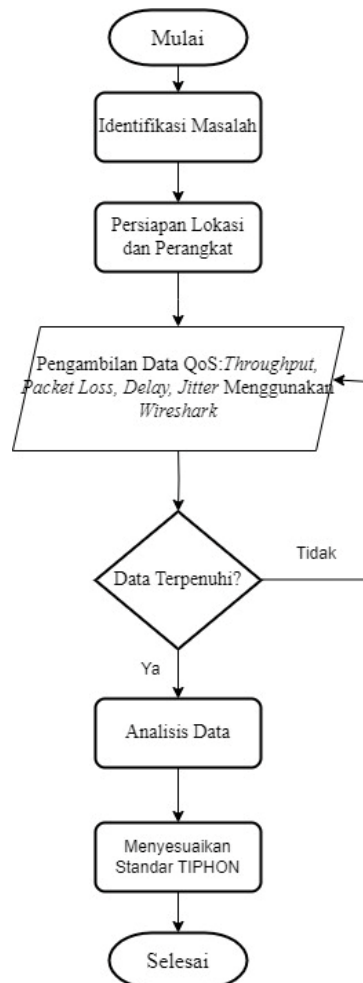
Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka dilakukanlah penelitian yang menjadi dasar penulis untuk menyusun penelitian "ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK" untuk mengetahui kualitas jaringan wifi serta mungkin ada sedikit solusi untuk masalah yang terjadi.

ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK

(Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, dkk : Halaman 137 - 145)

II. METODE

A. Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Perangkat yang Dibutuhkan

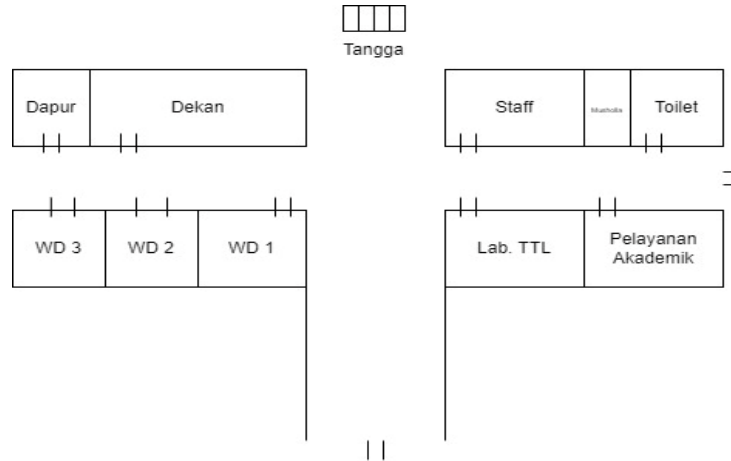
Tabel 2. Perangkat yang Dibutuhkan

Pengangkat Keras	1 buah laptop, wifi gedung fakultas teknik
Perangkat Lunak	<i>Wireshark, Microsoft Excel, Microsoft Word</i>

Pada tabel 1 merupakan perangkat utama yang dibutuhkan untuk penelitian ini. Yang pertama ada laptop berfungsi sebagai perangkat utama untuk menjalankan perangkat lunak analisis dan pemantauan jaringan. Laptop ini harus memiliki spesifikasi yang cukup baik untuk menjalankan perangkat lunak analisis dengan lancar. Yang kedua ada *wifi* gedung fakultas sebagai objek yang akan diteliti. Yang ketiga ada *wireshark* yang digunakan untuk menangkap dan menganalisis paket data yang melintas di jaringan. Ini membantu dalam memeriksa berbagai parameter *QoS* seperti *packet loss, delay, jitter, dan*

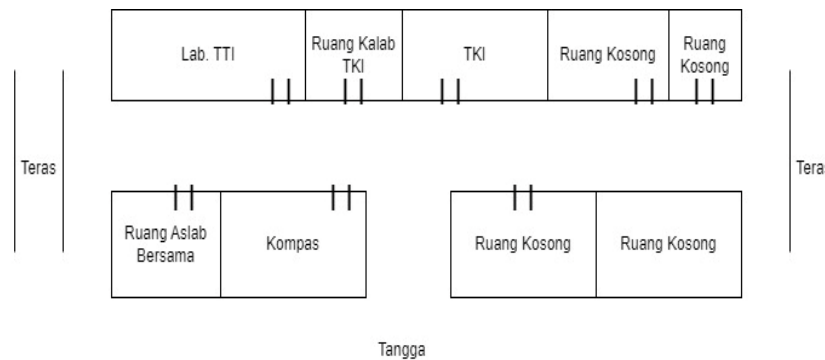
throughput. *Wireshark* menangkap paket-paket data dari jaringan *wifi* lalu dapat menguraikan dan menampilkan informasi rinci tentang paket data, termasuk waktu kedatangan, ukuran paket, dan informasi protokol. Yang keempat ada *microsoft excel* yang digunakan untuk mengolah, menganalisis, dan menyajikan data hasil tangkapan dari *Wireshark* lalu menggunakan rumus dan fungsi untuk menghitung statistik *QoS* seperti total *delay*, total *jitter*, dan lainnya. Yang terakhir ada *microsoft word* untuk mendokumentasikan hasil analisis dan menyusun laporan.

C. Denah Fakultas Teknik



Gambar 1. Denah Lantai 1

Gambar 2 merupakan gambar denah lantai 1 dari gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani. Di sebelah kiri denah terdapat ruang dekan, wakil dekan 1, 2, dan 3, dan ada dapur. Lalu ditengah ada tangga untuk akses ke lantai 2. Di sebelah kanan denah terdapat ruang staff, lab ttl, pelayanan akademik, toilet, dan mushola.



Gambar 3. Denah Lantai 2

Gambar 3 merupakan gambar denah lantai 2 dari gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani. Di sebelah kiri tangga ada ruangan lab tti, ruang kalab tki, ruang aslab bersama, dan lab kompas. Disebelah kanan tangga terdapat ruang lab tki dan beberapa ruangan yang tidak terpakai.

D. Wifi yang Ada di Gedung Fakultas Teknik

Tabel 3. Wifi di Gedung Fakultas

NO	SSID
1	INDIHOME-FAKULTAS TEKNIK
2	Dekanan
3	Administrasi I
4	AkademikFT
5	LAB TE

ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK

(Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, dkk : Halaman 137 - 145)

Pada tabel 3 merupakan *wifi* yang ada di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani. Pertama ada INDIHOME yang terletak di lantai 1 dan berada diantara ruang WD 1 dan Lab TTL, kemudian ada Dekanan yang terletak di dekat ruangan WD 1, kemudian Administrasi1 yang terletak di ruangan staff, kemudian AkademikFT yang terletak di ruang pelayanan akademik, dan LAB TE berada di lantai 2 lebih tepatnya di ruangan lab Kompas.

E. Parameter yang Digunakan

Berikut merupakan parameter yang diperlukan pada pengujian ini yang digunakan sebagai perbandingan untuk mengetahui kualitas jaringan yang diuji termasuk kedalam kategori bagus atau tidak menurut standarisasi dari TIPHON.

Tabel 4. Indeks Parameter *QoS* Menurut TIPHON

Nilai	Persentase (%)	Indeks
3,8 – 4	95 – 100	Sangat Bagus
3 – 3,79	75 – 94,75	Bagus
2 – 2,99	50 – 74,75	Sedang
1 – 1,99	25 – 49,75	Buruk

Tabel 5. Indeks kategori parameter *Throughput* menurut TIPHON

<i>Throughput</i> (Kbps)	Indeks	Kategori
>2100 Kbps	4	Sangat Bagus
1200-2100 Kbps	3	Bagus
700-1200 Kbps	2	Sedang
338-700 Kbps	1	Jelek
0-338 Kbps	0	Sangat Jelek

Tabel 6. Indeks kategori parameter *Packet Loss* menurut TIPHON

<i>Packet Loss</i>	Indeks	Kategori
0 %	4	Sangat Bagus
3 %	3	Bagus
15 %	2	Sedang
<25 %	1	Jelek

Tabel 7. Indeks kategori parameter *Delay* menurut TIPHON

Besar <i>Delay</i>	Indeks	Kategori
<150 ms	4	Sangat Bagus
150 s/d 300 ms	3	Bagus
300 s/d 450 ms	2	Sedang
>450 ms	1	Jelek

Tabel 8. Indeks kategori parameter *Jitter* menurut TIPHON

<i>Jitter</i>	Indeks	Kategori
0 ms	4	Sangat Bagus
0 s/d 75 ms	3	Bagus
75 s/d 125 ms	2	Sedang
125 s/d 225 ms	1	Jelek

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisis Matematis

1. Hari Jumat 2 Agustus 2024

A. INDIHOME

$$\text{Throughput} = \frac{3294116}{20,263} = 162585,03 \text{ bytes/s} = 1300680,24 \text{ bits/s}$$

$$\text{Packet loss} = \frac{(3522-3522)}{3522} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{Delay rata-rata} = \frac{20,26281}{3522} = 0,005753 \text{ s} = 5,753 \text{ ms}$$

$$\text{Jitter} = \frac{0,422839}{3522} = 0,00012 \text{ s} = 0,12 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk hari jumat 2 agustus diperoleh untuk *wifi* indihome mendapat nilai *throughput* 1300 Kbps dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *throughput* TIPHON, *packet loss* mendapat nilai 0% dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *packet loss* TIPHON, *delay* mendapat nilai 5,753 ms dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *delay* TIPHON, *jitter* mendapat nilai 0,12 ms dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *jitter* TIPHON.

B. Dekanan

$$\text{Throughput} = \frac{3103501}{12,284} = 252645,799 \text{ bytes/s} = 2021166,392 \text{ bits/s}$$

$$\text{Packet loss} = \frac{(3252-3252)}{3252} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{Delay rata-rata} = \frac{12,28399}{3252} = 0,003777 \text{ s} = 3,777 \text{ ms}$$

$$\text{Jitter} = \frac{6,19504}{3252} = 0,001904 \text{ s} = 1,9 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk hari jumat 2 agustus diperoleh untuk *wifi* dekanan mendapat nilai *throughput* 2021 Kbps dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *throughput* TIPHON, *packet loss* mendapat nilai 0% dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *packet loss* TIPHON, *delay* mendapat nilai 3,777 ms dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *delay* TIPHON, *jitter* mendapat nilai 1,9 ms dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *jitter* TIPHON.

C. Administrasi1

$$\text{Throughput} = \frac{4483585}{13,546} = 330989,591 \text{ bytes/s} = 2647961,728 \text{ bits/s}$$

$$\text{Packet loss} = \frac{(3885-3885)}{3885} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{Delay rata-rata} = \frac{13,54552}{3885} = 0,003486 \text{ s} = 3,48 \text{ ms}$$

$$\text{Jitter} = \frac{13,55704}{3885} = 0,003489 \text{ s} = 3,48 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk hari jumat 2 agustus diperoleh untuk *wifi* Administrasi1 mendapat nilai *throughput* 2647 Kbps dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *throughput* TIPHON, *packet loss* mendapat nilai 0% dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *packet loss* TIPHON, *delay* mendapat nilai 3,48 ms dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *delay* TIPHON, *jitter* mendapat nilai 3,48 ms dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *jitter* TIPHON.

D. AkademikFT

ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK

(Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, dkk : Halaman 137 - 145)

$$\text{Throughput} = \frac{2826201}{102,865} = 27474,855 \text{ bytes/s} = 219798,84 \text{ bits/s}$$

$$\text{Packet loss} = \frac{(3170-3170)}{3170} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{Delay rata-rata} = \frac{102,865}{3170} = 0,03244 \text{ s} = 32,44 \text{ ms}$$

$$\text{Jitter} = \frac{100,8612}{3170} = 0,031817 \text{ s} = 31,81 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk hari jumat 2 agustus diperoleh untuk *wifi* AkademikFT mendapat nilai *throughput* 219 Kbps dengan indeks 0 masuk kedalam kategori sangat jelek menurut standar *throughput* TIPHON, *packet loss* mendapat nilai 0% dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *packet loss* TIPHON, *delay* mendapat nilai 32,44 ms dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *delay* TIPHON, *jitter* mendapat nilai 31,81 ms dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *jitter* TIPHON.

E. Lab TE

$$\text{Throughput} = \frac{3481344}{10,325} = 3371761,743 \text{ bytes/s} = 26974093,944 \text{ bits/s}$$

$$\text{Packet loss} = \frac{(3720-3720)}{3720} \times 100\% = 0\%$$

$$\text{Delay rata-rata} = \frac{10,3245}{3720} = 0,002775 \text{ s} = 2,77 \text{ ms}$$

$$\text{Jitter} = \frac{8,48276}{3720} = 0,00228 \text{ s} = 2,28 \text{ ms}$$

Berdasarkan hasil perhitungan untuk hari jumat 2 agustus diperoleh untuk *wifi* Lab TE mendapat nilai *throughput* 26974 Kbps dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *throughput* TIPHON, *packet loss* mendapat nilai 0% dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *packet loss* TIPHON, *delay* mendapat nilai 2,77 ms dengan indeks 4 masuk kedalam kategori sangat bagus menurut standar *delay* TIPHON, *jitter* mendapat nilai 2,28 ms dengan indeks 3 masuk kedalam kategori bagus menurut standar *jitter* TIPHON.

B. Analisis Hasil Pengukuran

Pengujian dilakukan selama 7 hari, dimana hasil rata-rata dari pengujian sebagai berikut.

Tabel 9. Hasil Rata-rata Keseluruhan

SSID	Throughput (Kbps)	Packet Loss (%)	Delay (ms)	Jitter (ms)
Indihome	1385,42	0%	50,83	50,05
Dekanan	488,57	0%	30,71	30,50
Administrasi I	479,42	0%	108,97	188,88
Akademik FT	685,42	0%	119,67	119,48
LAB TE	3995	0%	40,91	40,93
Rata - rata	1406,76	0%	70,21	85,96
Indeks	3	4	4	2

Pada tabel 9 merupakan hasil rata-rata keseluruhan wifi di gedung fakultas. LAB TE memiliki *throughput* tertinggi sebesar 3995 Kbps, menunjukkan bahwa ini adalah SSID dengan kecepatan transfer data tertinggi. Administrasi1 memiliki *throughput* terendah sebesar 479,42 Kbps. *Packet loss* 0% pada semua SSID menunjukkan bahwa tidak ada paket yang hilang selama pengujian. Dekanan memiliki *delay* terendah sebesar 30,71 ms, menunjukkan waktu respons yang paling cepat. Administrasi1 memiliki *delay* tertinggi sebesar 108,97 ms, yang dapat menunjukkan masalah latensi. Dekanan juga memiliki *jitter* terendah sebesar 30,50 ms. Administrasi1 memiliki *jitter* tertinggi sebesar 188,88 ms, menunjukkan ketidakstabilan dalam waktu *delay* yang dapat mempengaruhi kualitas layanan seperti VoIP atau video *streaming*. *Throughput* rata-rata sebesar 1406,76 Kbps dengan indeks 3, *Packet loss* rata-rata sebesar 0% dengan indeks 4, *Delay* rata-rata sebesar 70,21 ms dengan indeks 4, *Jitter* rata-rata sebesar 85,96 ms dengan indeks 2. Kinerja Buruk pada Administrasi1 dan Akademik FT: Penyebabnya adalah kemacetan jaringan atau beban pengguna yang tinggi. *Jitter* dan *delay* yang tinggi sering kali disebabkan oleh persaingan *bandwidth* yang ketat atau perangkat keras yang tidak mampu menangani beban jaringan yang besar secara efisien. Kinerja Baik pada LAB TE: Kecepatan *throughput* yang tinggi dan *delay* rendah menunjukkan bahwa jaringan ini memiliki kapasitas yang memadai dan tidak terlalu banyak digunakan pada waktu tertentu. Juga, perangkat keras yang lebih baik atau manajemen *bandwidth* yang efisien dapat berkontribusi pada kinerja yang baik. Untuk kinerja yang paling baik ada pada pengujian pertama hari jumat tanggal 2 Agustus dengan indeks *QoS* 3,45. Ini terjadi pada jam yang tidak sibuk dan sedikit pengguna yang terhubung. Untuk kinerja yang paling buruk ada pada pengujian kelima hari jumat tanggal 30 Agustus dengan indeks *QoS* 2,3. Ini terjadi pada saat jam sibuk dan lebih banyak pengguna yang terhubung ke jaringan.

IV. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian dan pengukuran maka didapati hasil kualitas jaringan wifi yang ada di Gedung Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani yaitu : *Throughput* rata-rata sebesar 1406,76 Kbps, *Packet loss* rata-rata sebesar 0%, *Delay* rata-rata sebesar 70,21 ms, *Jitter* rata-rata sebesar 85,96 ms. Dengan rata-rata indeks keseluruhan parameter Quality of Service sebesar 3,25 dan masuk kedalam kategori Bagus menurut standarisasi TIPHON.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. Febriani, "Analisis Kinerja Jaringan Nirkabel dengan Quality of Service (QoS) pada Protokol IEEE 802.11n," J. Ilm. Teknol. Inf. Asia, vol. 14, no. 2, pp. 129–138, Jul. 2020, doi: 10.35115/ajiti.v14i2.896.
- [2] F. F. Syach, S. R. A. Pradana, and A. P. Kirana, "Analisis Performansi Quality of Service (QoS) pada Jaringan WiFi dengan Menggunakan Wireshark," J. Pengemb. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput., vol. 4, no. 1, pp. 214–220, Jan. 2020.
- [3] R. E. A. Saputra and S. W. Purnami, "Analisis Quality of Service (QoS) pada Jaringan Wireless Menggunakan Wireshark di Gedung Rektorat Universitas X," J. Tek. Elektro dan Komput., vol. 9, no. 2, pp. 97–106, Sep. 2021.
- [4] R. A. Y. Pratama, I. P. A. Bayupati, and D. M. Wiharta, "Evaluasi Quality of Service pada Jaringan Wireless LAN Menggunakan Metode Simple Additive Weighting," J. Nas. Teknol. dan Sist. Inf., vol. 6, no. 2, pp. 91–100, Aug. 2020, doi: 10.25037/TECHSI.V6I2.150.
- [5] L. H. Pranoto and S. Hadi, "Analisis Perbandingan Kualitas Jaringan WiFi Berdasarkan Parameter QoS di Lingkungan Kampus," Building of Informatics, Technology and Science (BITS), vol. 3, no. 3, pp. 362–370, Dec. 2021.
- [6] K. M. Putra, D. Perdana, and R. F. Sari, "Pengukuran Kualitas Layanan Jaringan WiFi menggunakan Wireshark dan Analisis Berdasarkan Standar TIPHON," J. Edukasi dan Penelitian Inform., vol. 6, no. 2, pp. 242–247, Jun. 2020.

ANALISIS PARAMETER QOS (QUALITY OF SERVICE) PADA JARINGAN WIFI DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI DENGAN MENGGUNAKAN WIRESHARK

(Nivika Tiffany Somantri, Nicko Wahyudi, Atik Charisma, dkk : Halaman 137 - 145)

- [7] A.K. A. G. Wiguna and I. K. A. S. Wibawa, "Analisis Quality of Service pada Jaringan Wireless dengan Tools Wireshark di Lingkungan Perkantoran," *J. SPEKTRUM*, vol. 7, no. 1, pp. 50–57, Mar. 2020.
- [8] J. D. Y. L. Nababan, S. Sinaga, and E. B. Nababan, "Analisis Kinerja Jaringan Wireless Berdasarkan Parameter Quality of Service (QoS) Menggunakan Wireshark," *J. MEDIA Inform. BUDIDARMA*, vol. 5, no. 1, pp. 114–121, Jan. 2021, doi: 10.30865/mib.v5i1.2683.
- [9] A. G. S. Utama, I. M. A. Suyadnya, and I. P. A. Bayupati, "Pengukuran Kualitas Jaringan Wi-Fi dengan Parameter QoS dan Tools Wireshark di Area Kampus," *J. Teknol. Inf. dan Komput.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, Mar. 2021.
- [10] M. S. Asrori, A. Fanani, and A. B. Pantow, "Analisis Kualitas Jaringan Wireless LAN Menggunakan Wireshark Berdasarkan Parameter QoS," *J. Tek. Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 6, no. 2, pp. 218–227, Aug. 2020.
- [11] M. F. R. Nasution, M. A. Muslim, and A. I. Kistijantoro, "Analisis Performansi Jaringan Nirkabel IEEE 802.11ac: Studi Kasus di Gedung Perkuliahan," *J. RESTI (Rekayasa Sist. dan Teknol. Inform.)*, vol. 4, no. 5, pp. 902–909, Oct. 2020, doi: 10.29207/resti.v4i5.2248.
- [12] S. A. Pramono and A. B. Pantow, "Optimasi dan Analisis QoS pada Jaringan WiFi Menggunakan Metode Channel Bonding dan Wireshark," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 10, no. 3, pp. 123–132, Dec. 2021.
- [13] A. Wijaya and I. P. A. Bayupati, "Evaluasi Kinerja Jaringan Wi-Fi Berdasarkan Standar ITU-T G.1010 dengan Wireshark," *J. Ilm. Merpati (Menara Penelit. Akad. Teknol. Inform.)*, vol. 9, no. 1, pp. 49–58, Apr. 2021.
- [14] R. Firriana, R. R. Isnanto, and A. Fanani, "Analisis Perbandingan Kinerja Jaringan WiFi 2.4 GHz dan 5 GHz Berdasarkan Parameter QoS di Lingkungan Pendidikan," *J. Transform.*, vol. 18, no. 1, pp. 33–42, Feb. 2021.
- [15] Y. I. K. Mahardika, I. M. A. Suyadnya, and D. G. H. Divayana, "Analisis Quality of Service untuk Mendukung Kegiatan Belajar Mengajar Online pada Jaringan Kampus," *J. Teknol. Inf. dan Ilmu Komput.*, vol. 8, no. 3, pp. 567–574, Jun. 2021, doi: 10.25126/jtiik.2021834688.

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangraai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31

Muhammad Arfan ^{1*)}, Warnisa Gulo ²⁾, Muhammad Khairul Amri Rosa ³⁾,
Alex Surapati ⁴⁾, Natsir Habibullah ⁵⁾

Program Studi Teknik Elektro
Universitas Bengkulu
Jl. W.R Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371A, Indonesia

^{*}Korespondensi : marfan@unib.ac.id

Abstrak

Metode penyangraian kopi konvensional sering menghadapi kendala inkonsistensi mutu akibat ketergantungan pada keahlian operator dan ketiadaan regulasi termal yang presisi. Penelitian ini bertujuan merancang bangun sistem penyangraai kopi otomatis berbasis mikrokontroler Arduino Uno yang terintegrasi dengan sensor SHT-31 untuk pengendalian suhu dan kelembapan uap secara real-time. Sistem menerapkan logika kontrol threshold dengan *setpoint* suhu 90°C dan kelembapan 12% untuk mengotomasi aktuator motor servo pada katup gas. Pengujian operasional dilakukan menggunakan variasi beban biji kopi 50, 100, 150, dan 200 gram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa biji berbanding lurus dengan durasi penyangraian, dengan rentang waktu 12,46 menit untuk beban 50 gram (hasil *dark roast*) hingga 21,16 menit untuk 200 gram (hasil *light roast*). Akurasi pembacaan sensor tervalidasi dengan nilai *error* sebesar 2,62% dibandingkan termometer standar. Sistem kendali terbukti efektif menstabilkan parameter iklim mikro dan menghentikan proses secara otomatis saat target tercapai, sehingga menjamin konsistensi kualitas produk akhir.

Kata kunci : Arduino Uno, Kontrol Otomatis, Penyangraai Kopi, SHT-31, Suhu dan Kelembapan

Abstract

Conventional coffee roasting methods often face challenges regarding quality inconsistency due to a high reliance on operator proficiency and the absence of precise thermal regulation. This study aims to design and build an automatic coffee roasting system based on the Arduino Uno microcontroller integrated with an SHT-31 sensor for real-time monitoring of steam temperature and humidity. The system applies threshold control logic with a setpoint of 90°C temperature and 12% humidity to automate the servo motor actuator on the gas valve. Operational testing was conducted using coffee bean load variations of 50, 100, 150, and 200 grams. The results showed that increasing bean mass was directly proportional to roasting duration, ranging from 12.46 minutes for a 50-gram load (dark roast) to 21.16 minutes for 200 grams (light roast). Sensor reading accuracy was validated with an error value of 2.62% compared to a standard thermometer. The control system proved effective in stabilizing microclimate parameters and terminating the process automatically upon reaching targets, thereby ensuring final product consistency.

Keywords : Arduino Uno, Automatic Control, Coffee Roaster, SHT-31, Temperature and Humidity

I. PENDAHULUAN

Penyangraian (*roasting*) merupakan tahapan krusial dalam rantai produksi kopi karena proses ini menginduksi transformasi fisik dan kimiawi signifikan yang menentukan kualitas sensorik akhir produk. Selama proses penyangraian, biji kopi mengalami serangkaian reaksi kimia kompleks yang bertanggung jawab atas pembentukan profil aroma, rasa, dan warna yang khas [1], [2].

Meskipun memegang peranan vital, metode penyangraian tradisional atau manual sering kali dihadapkan pada kendala teknis yang fundamental. Masalah utama yang sering ditemui adalah ketergantungan yang

tinggi pada profisiensi operator. Hal ini menyebabkan variabilitas hasil yang signifikan antar batch,

Info Makalah:

Dikirim : 17-12-2025
Revisi 1 : 19-12-2025
Revisi 2 : -
Diterima : 24-12-2025

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-859-2589-2074
e-mail : marfan@unib.ac.id

sehingga konsistensi mutu produk sulit dicapai [1], [2]. Selain itu, instrumen penyangraian konvensional sering kali tidak memiliki mekanisme regulasi termal yang presisi. Ketidakmampuan dalam mengontrol suhu secara akurat dapat mengakibatkan distribusi panas yang tidak merata, yang berujung pada defek fisik seperti scorching (pembakaran sebagian) atau over-roasting [3], [4]. Kapasitas mesin yang tidak terukur—terlalu besar atau terlalu kecil—juga sering kali menjadi inefisiensi tersendiri bagi skala usaha mikro [2].

Tantangan utama dalam industri penyangraian, khususnya pada skala kecil dan menengah, adalah inkonsistensi parameter proses. Variasi suhu dan kelembapan yang tidak terkontrol dapat berdampak fatal terhadap kualitas produk. Suhu yang berfluktuasi atau terlalu tinggi (*over-roasting*) tidak hanya mendegradasi aroma yang diinginkan, tetapi juga memicu pembentukan senyawa berbahaya seperti akrilamida dan menurunkan kadar senyawa bioaktif yang bermanfaat [4], [5]. Penelitian spesifik mengindikasikan bahwa kombinasi presisi, seperti suhu 190°C dengan durasi 11 menit, diperlukan untuk mengoptimalkan profil antioksidan dan rasa [6], sementara kelembapan relatif yang terjaga dapat membantu preservasi senyawa fenolik selama proses berlangsung [7], [8].

Pengendalian presisi terhadap variabel suhu dan kelembapan menjadi imperatif dalam proses penyangraian modern. Stabilitas kedua parameter ini tidak hanya menjamin perkembangan karakteristik organoleptik yang optimal [9], [10], tetapi juga memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap kinetika reaksi kimia, seperti reaksi Maillard dan pirolisis, yang menentukan komposisi kimiawi akhir [11], [12]. Sebaliknya, kegagalan dalam mengendalikan parameter proses dapat mendegradasi kualitas kopi, mulai dari munculnya profil rasa yang tidak diinginkan (*off-flavors*) hingga kerusakan senyawa bioaktif penting [13], [14].

Permasalahan mendasar pada sistem penyangraian konvensional terletak pada keterbatasan instrumentasi dan kontrol. Banyak sistem yang masih bergantung pada pengendalian manual atau menggunakan sensor berbiaya rendah dengan akurasi terbatas, seperti DHT11. Penggunaan sensor dengan spesifikasi rendah ini sering kali menghasilkan data yang tidak linier dan rentan terhadap *noise*, yang berujung pada inkonsistensi hasil penyangraian [15], [16]. Ketidakakuratan pembacaan sensor ini menghambat pencapaian profil suhu dan kelembapan yang presisi yang disyaratkan untuk kualitas kopi spesialti. Oleh karena itu, integrasi teknologi sensor mutakhir menjadi solusi imperatif untuk mengatasi permasalahan tersebut. Penggunaan sensor presisi tinggi seperti SHT-31, yang menawarkan akurasi suhu $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan $\pm 2\%$ RH serta stabilitas jangka panjang yang lebih baik, menawarkan keandalan yang jauh lebih tinggi dibandingkan sensor konvensional [15], [16]. Penerapan sistem kontrol otomatis berbasis sensor presisi ini diharapkan mampu meminimalisir ketergantungan pada skill operator, mencegah degradasi senyawa aktif, serta menjamin keamanan dan konsistensi mutu produk kopi akhir.

Tinjauan literatur menunjukkan adanya evolusi dalam pengembangan teknologi penyangraian kopi, namun masih menyisakan celah teknologi (*research gap*) pada aspek kendali otomatisasi presisi. Sa'po *et al.* [17] mengembangkan mesin penyangrai tipe rotary berkapasitas 3 kg yang berhasil mencapai kematangan merata, namun sistem ini tidak memiliki kontrol suhu dan kelembapan sehingga sangat bergantung pada operator. Senada dengan hal tersebut, Fiatno *et al.* [18] merancang mesin tipe silinder horizontal dengan penggerak motor wiper, namun kelemahan utamanya tetap pada ketiadaan sistem kendali parameter lingkungan mikroklimat dalam tabung. Nazura dan Dhafir [19] juga merancang mesin dengan elemen pemanas listrik, tetapi sistem ini hanya berfokus pada sumber panas tanpa integrasi kontrol umpan balik terhadap kondisi biji kopi. Bahroin dan Budijono [2] telah mengimplementasikan thermocontrol dan pengaturan putaran menggunakan PWM (*Pulse Width Modulation*). Meskipun telah terdapat kontrol suhu, mekanisme penghentian proses masih dilakukan secara manual, yang berpotensi menyebabkan inkonsistensi jika operator tidak sigap. Wicaksono [21] berfokus pada pengukuran kadar air menggunakan teknik LIBS (*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*). Penelitian ini memberikan

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31

(Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah : Halaman 146 - 157)

wawasan mendalam mengenai parameter fisik biji kopi namun tidak menawarkan solusi rekayasa untuk pengendalian proses penyangraian itu sendiri.

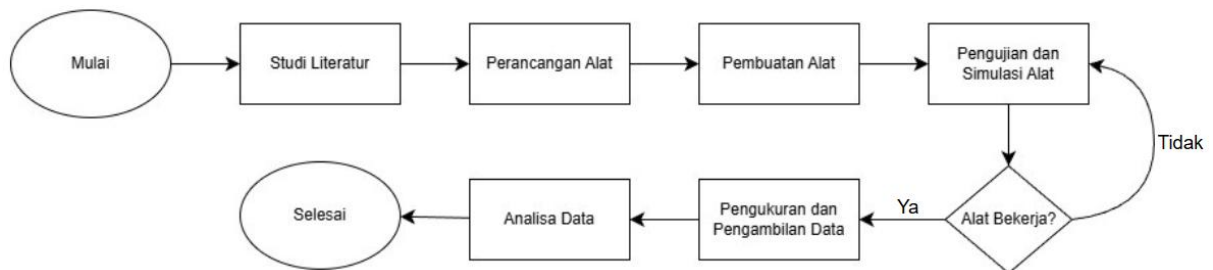
Berangkat dari keterbatasan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini mengisi celah dengan mengintegrasikan sensor SHT-31 yang mampu mengukur suhu dan kelembapan uap secara simultan, serta menggunakan aktuator motor servo untuk mengotomatisasi regulasi aliran gas berdasarkan *setpoint* yang telah ditentukan.

Berdasarkan deskripsi perancangan dan rumusan masalah, tujuan penelitian ini secara implisit diarahkan pada tiga aspek utama rekayasa sistem kendali: 1). Rekayasa sistem kendali presisi dilakukan dengan mengembangkan arsitektur perangkat keras dan lunak untuk alat roasting kopi yang mampu melakukan akuisisi data suhu dan kelembapan secara real-time menggunakan sensor SHT-31, serta mengotomatisasi respon aktuator (motor servo dan *solenoid valve*) untuk menjaga stabilitas proses. 2). Karakterisasi termodinamika penyangraian dilakukan dengan mengevaluasi dinamika perubahan suhu dan kelembapan uap air yang dilepaskan biji kopi selama proses penyangraian untuk menentukan titik optimal kematangan (*light, medium, dark*) berdasarkan data kuantitatif, bukan sekadar estimasi visual. 3). Validasi efisiensi sistem terhadap variasi beban dilakukan dengan menganalisis korelasi antara massa biji kopi (beban kerja) dengan durasi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *setpoint* suhu dan kelembapan, guna membuktikan efektivitas sistem kendali dalam menghasilkan produk yang konsisten pada berbagai kondisi pembebanan.

II. METODE

A. Desain Penelitian

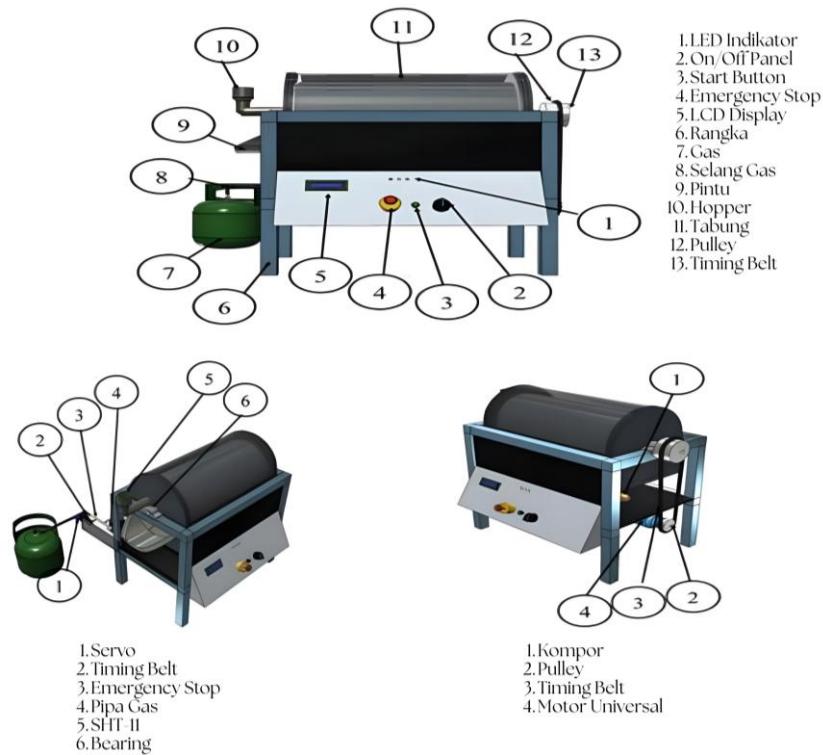
Penelitian ini termasuk dalam jenis Rancang Bangun (*Design and Build*) atau penelitian rekayasa (*engineering research*) yang berfokus pada pembuatan alat penyangrai kopi dengan sistem kontrol otomatis. Pendekatan eksperimental digunakan untuk menguji kinerja alat yang telah dirancang dengan memvariasikan beban biji kopi untuk menganalisis respons suhu dan kelembapan. Tahapan penelitian dimulai dari Studi Literatur, Perancangan Alat, Pembuatan Alat, Pengujian dan Simulasi Alat, Pengambilan Data, hingga Analisa Data. Diagram alur penelitian secara visual dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alur Penelitian

B. Perancangan Sistem Mekanik

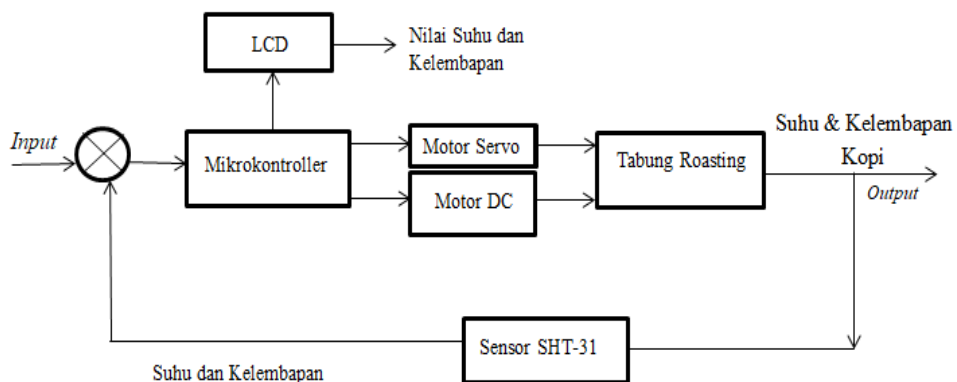
Perancangan aspek mekanikal difokuskan pada konstruksi chamber penyangraian berbentuk tabung sepanjang 28 cm yang difabrikasi menggunakan material kombinasi Stainless Steel 304 setebal 1 mm dan plat baja hitam 2 mm untuk menjamin durabilitas termal dan higienitas produk. Sistem ini dirancang dengan kapasitas pemrosesan maksimal 500 gram, di mana mekanisme rotasi biji kopi digerakkan oleh Motor Universal AC/DC yang mentransmisikan torsi melalui sistem pulley dan timing belt guna memastikan kerataan penyangraian. Sumber panas utama berasal dari kompor gas LPG 3 kg yang intensitas apinya diregulasi secara otomatis melalui integrasi motor servo pada regulator dan solenoid valve. Desain mekanik juga mencakup cerobong uap sebagai jalur sirkulasi udara sekaligus lokasi strategis penempatan sensor untuk memonitor kondisi iklim mikro uap secara real-time, sebagaimana diilustrasikan pada desain teknis Gambar 2.



Gambar 2 Desain Mekanik

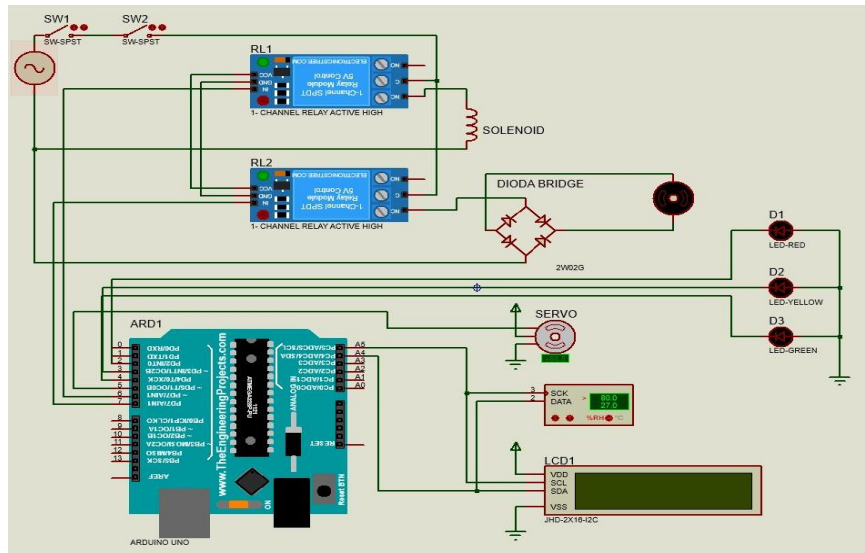
C. Perancangan Sistem Elektronik

Arsitektur sistem elektronik dibangun berdasarkan diagram blok sistem pada Gambar 3 yang memetakan aliran data dari input, pemrosesan, hingga aktuasi. Pusat kendali sistem menggunakan mikrokontroler Arduino Uno yang terhubung dengan skema rangkaian elektronik pada Gambar 4 meliputi modul Relay 2 Channel untuk manajemen daya Motor DC dan solenoid valve, serta driver untuk Motor Servo MG996 sebagai pengatur katup gas. Akuisisi data lingkungan dilakukan oleh sensor presisi SHT-31, sementara kebutuhan daya seluruh sistem disuplai melalui sumber tegangan AC 220V yang disesuaikan melalui adaptor dan penyearah untuk kebutuhan komponen DC maupun beban AC.



Gambar 3 Diagram Blok Sistem

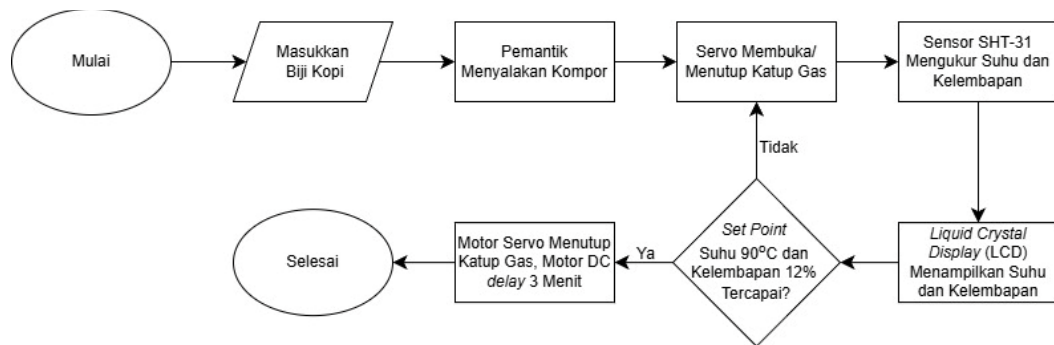
Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31
 (Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah : Halaman 146 - 157)



Gambar 4 Skema Rangkaian Elektronik

D. Perancangan Perangkat Lunak

Pengembangan perangkat lunak didasarkan pada algoritma kontrol yang dijabarkan dalam diagram alir sistem pada Gambar 5. Logika kendali yang diterapkan berbasis metode threshold control (On-Off), di mana sistem secara kontinu membandingkan pembacaan sensor dengan nilai *setpoint* suhu 90°C dan kelembapan 12% untuk menentukan aksi motor servo dalam menutup aliran gas secara otomatis saat target tercapai. Antarmuka pengguna difasilitasi oleh LCD 16x2 untuk visualisasi data real-time, didukung oleh komunikasi serial untuk pencatatan data (*logging*) menggunakan PLX-DAQ pada komputer. Komunikasi antar modul menggunakan protokol I2C untuk pembacaan sensor SHT-31 dan sinyal PWM untuk pengendalian posisi sudut motor servo.



Gambar 5 Diagram Alir Sistem

E. Spesifikasi Komponen

Instrumen utama pengukuran menggunakan sensor SHT-31 yang memiliki spesifikasi tegangan operasi 2,15–5,5 V dengan rentang pengukuran suhu -40°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$ serta kelembapan 0–100% RH, yang menawarkan akurasi tinggi sebesar $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ untuk suhu dan $\pm 2^{\circ}\text{C}$ RH untuk kelembapan melalui antarmuka komunikasi I2C. Unit pemrosesan data mengandalkan mikrokontroler Arduino Uno berbasis chip ATmega328 dengan tegangan operasi 5V dan input yang direkomendasikan 7-12V. Sistem aktuasi didukung oleh Motor Universal AC/DC 220V dengan kecepatan 32 rpm dan torsi 20 N.m, Motor Servo MG996 dengan torsi hingga 11 kgfcm dan rotasi maksimal 180 derajat, serta Solenoid Valve tipe *Normally Closed* (NC) bertegangan 220V AC. Komponen pendukung operasional meliputi LCD 16x2, LED indikator status (Merah, Kuning, Hijau), serta tombol navigasi *Start* dan *Emergency Stop* untuk keamanan sistem.

F. Kalibrasi dan Setup

Validasi akurasi instrumen dilakukan melalui prosedur kalibrasi yang membandingkan pembacaan sensor SHT-31 terhadap termometer referensi pada kondisi uap penyangraian, yang kemudian dianalisis nilai error absolut dan persentase penyimpangannya. Parameter kontrol sistem ditetapkan pada nilai ambang batas (*threshold*) suhu 90°C dan target kelembapan 12% sebagai acuan pemutusan suplai panas. Prosedur operasional awal (*setup*) dimulai dengan menghubungkan catu daya, memuat biji kopi ke dalam tabung, dan menekan tombol start yang secara berurutan akan memicu pembukaan katup gas oleh servo, pengaktifan pemantik kompor, serta rotasi tabung penyangrai oleh motor DC21.

G. Metode Pengujian

Evaluasi sistem dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu pengujian fungsional dan operasional. Pengujian fungsional mencakup verifikasi kinerja mikrokontroler melalui program dasar, validasi pembacaan sensor SHT-31, analisis karakteristik putaran Motor DC terhadap variasi tegangan, presisi sudut servo, serta respons tampilan LCD. Selanjutnya, pengujian operasional dilaksanakan dengan memvariasikan beban biji kopi sebesar 50 gram, 100 gram, 150 gram, dan 200 gram untuk menghasilkan berbagai tingkatan sangrai mulai dari *Light* hingga *Dark roast* dengan durasi proses berkisar antara 12,46 menit hingga 21,16 menit. Parameter kunci yang diukur meliputi profil kenaikan suhu dan penurunan kelembapan terhadap waktu, durasi total penyangraian hingga mencapai *setpoint*, serta observasi visual terhadap tingkat kematangan atau perubahan warna biji kopi secara kualitatif.

H. Metode Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode statistik deskriptif, khususnya perhitungan *Error Absolut* dan *Persentase Error (%)* untuk mengkuantifikasi akurasi sensor SHT-31 terhadap alat ukur standar termometer. Pengolahan dan visualisasi data didukung oleh perangkat lunak Arduino IDE untuk pemrograman dan pemantauan real-time via Serial Monitor, serta pemanfaatan fitur PLX-DAQ untuk perekaman data (*data logging*) secara terstruktur ke dalam format *spreadsheet* (Excel) guna memudahkan analisis komparatif performa sistem terhadap variasi beban yang diberikan.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Pengujian Mikrokontroler

Mikrokontroler yang digunakan pada penelitian ini adalah mikrokontroller Arduino uno. Mikrokontroler ini digunakan sebagai pengendali dari setiap bagian komponen yang terhubung secara keseluruhan pada alat yang akan dibuat pada penelitian ini. Pengujian mikrokontroler ini dilakukan agar dapat diketahui apakah mikrokontroler dapat bekerja dengan baik. Pengujian mikrokontroler ini dilakukan dengan menggunakan software Arduino IDE. dimana program *Blink* diunggah pada software tersebut, selanjutnya akan terlihat lampu indikator LED pada Arduino akan berkedip atau aktif.

B. Pengujian Sensor SHT-31

Pengujian sensor SHT-31 dilakukan terlebih dahulu agar dapat diketahui apakah sensor dapat mendeteksi suhu dan kelembapan dengan baik atau tidak. Berdasarkan pengujian ini juga dapat diketahui keakuratan pengukuran suhu dan kelembapan dengan menggunakan sensor SHT-31. Pengujian sensor SHT-31 dilakukan dengan menghubungkan pin 5V, GND, A4, dan A5 pada pin-pin sensor SHT-31. Setelah pin-pin dihubungkan dilanjutkan dengan mengupload kode program pada aplikasi Arduino uno IDE. Jika kode program pada Arduino uno IDE berhasil di upload maka hasil output dan pengukuran suhu dan kelembapan berdasarkan pengukuran sensor SHT-31 dapat dilihat pada serial monitor.

C. Pengujian Sensor SHT-31 dengan Thermometer

Pengujian kali ini dilakukan dengan membandingkan sensor SHT-31 dengan thermometer pada hasil uap penyangraian biji kopi. Pengujian sensor dapat dilihat pada Tabel 1.

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31
 (Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah : Halaman 146 - 157)

Tabel 1 Hasil Pengujian Sensor SHT-31 dengan Thermometer

Waktu (Menit)	Sensor SHT-31 (°C)	Termometer (°C)	Selisih
0	27,94	27,4	0,54
2	31,97	31,6	0,37
4	33,59	32,6	0,99
6	47,88	46,3	1,58
8	54,67	52,8	1,87
10	66,63	64,3	2,33
12	68,74	66,8	1,94
14	72,97	70,0	2,97
16	85,56	83,8	1,76
18	90,01	87,7	2,31
20	92,36	90,0	2,36

Penelitian ini menguji sensor SHT-31 untuk membandingkan hasil pengukuran suhunya dengan termometer standar melalui variasi waktu dan suhu. Selama proses pengujian, sensor menunjukkan respons yang konsisten mengikuti kenaikan suhu penyangraian. Studi ini kemudian menghitung nilai galat (*error*) dengan mengomparasi data pembacaan sensor SHT-31 dan termometer. Secara spesifik pada menit ke-20, perhitungan nilai galat antara kedua alat tersebut menggunakan Persamaan 1 berikut.

$$e(\%) = \frac{92,36-90,0}{90,0} \times 100\% = 2,62\% \quad (1)$$

Perhitungan tersebut menunjukkan nilai galat pengukuran suhu pada menit ke-20 sebesar 2,62%. Nilai ini merepresentasikan selisih pembacaan antara sensor SHT-31 dan termometer.

D. Pengujian Motor Universal AC/DC

Pengujian ini bertujuan memverifikasi kinerja motor universal dalam memutar tabung penyangrai (*roasting*). Sistem ini menggunakan motor DC *gearbox* tipe 80ZY145C-22030/60JX56 dengan tegangan kerja 220 Volt. Prosedur pengujian menerapkan variasi tegangan tanpa beban serta memanfaatkan tachometer dan multimeter untuk merekam kecepatan putar, arus, dan tegangan. Tabel 2 menyajikan data hasil pengukuran kecepatan dan konsumsi arus motor tersebut.

Tabel 2 Hasil Pengujian Motor Universal AC/DC

Tegangan (V)	Arus (A)	Kecepatan (RPM)
20	0,06	10,1
40	0,063	32,1
60	0,074	52,3
80	0,090	61,1
100	0,093	70,2
120	0,101	91,5
140	0,112	119,1
160	0,120	126,5
180	0,113	140,8

200	0,110	182,4
220	0,125	220,1

Analisis data pada Tabel 2 mengonfirmasi bahwa spesifikasi motor tersebut memenuhi kriteria operasional untuk alat *roasting* dan pengembangan riset berikutnya.

E. Pengujian Motor Servo

Pengujian fungsional motor servo bertujuan memastikan keandalan komponen sebelum proses perakitan alat. Osiloskop merekam sinyal PWM dari Arduino Uno untuk menganalisis sudut rotasi, lebar pulsa, dan tegangan RMS pada lima titik uji (0°, 45°, 90°, 145°, dan 180°). Melalui mekanisme ini, osiloskop memvisualisasikan sinyal perintah Arduino menjadi bentuk gelombang yang terukur. Tabel 3 menyajikan data kuantitatif nilai pulsa dan tegangan yang dihasilkan dari setiap sudut.

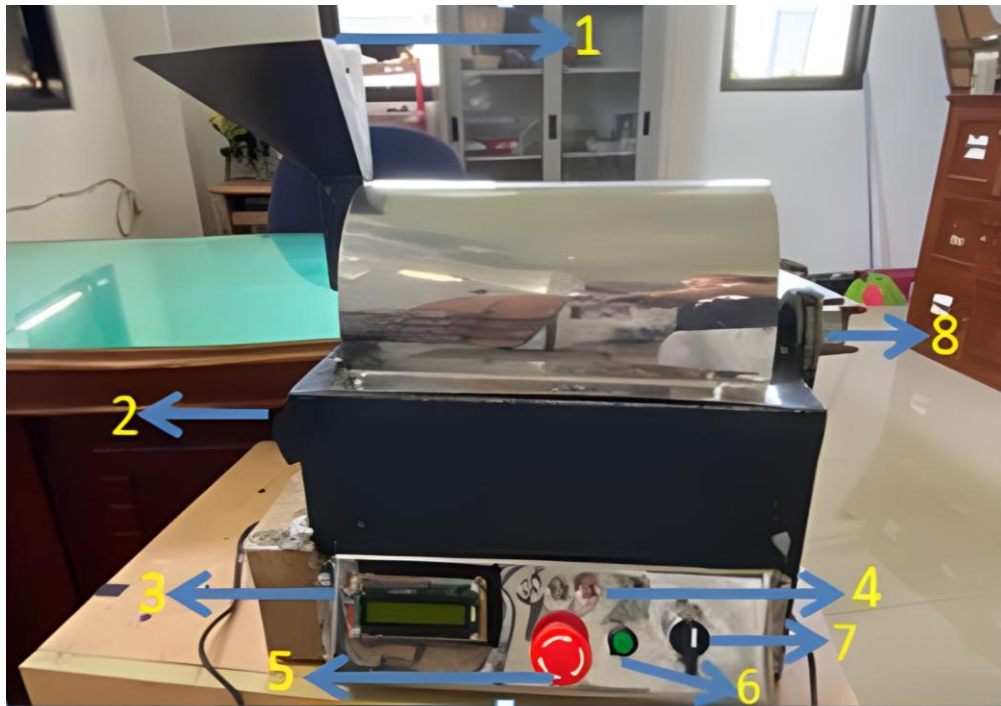
Tabel 3 Hasil Pengujian Motor Servo

No	Sudut (°)	Nilai Pulsa	Pulse Width (ms)	Rms (V)
1.	0	1	0,55	1,13
2.	45	1	1,10	1,52
3.	90	1	1,470	1,82
4.	145	1	1,790	2,01
5.	180	1	2,410	2,33

F. Bentuk Fisik Alat Roasting Kopi

Alat penyangrai biji kopi ini menggunakan kontrol suhu dan kelembapan dengan sensor SHT-31 sebagai basis operasionalnya. Konstruksi alat terdiri dari komponen krusial seperti sensor SHT-31, motor DC, tabung penyangrai, LCD, *emergency stop*, motor servo, dan saklar yang terintegrasi untuk menghasilkan sangraian yang optimal. Gambar 12 memperlihatkan detail realisasi fisik dari perancangan alat tersebut.

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31
 (Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah : Halaman 146 - 157)



- Keterangan:
- | | |
|---------------------------|-------------------|
| 1. Hopper | 5. Emergency Stop |
| 2. Pintu Keluar Biji Kopi | 6. Start Button |
| 3. LCD | 7. Saklar Motor |
| 4. LED | 8. Pulley |

Gambar 5 Mesin Penyangrai Biji Kopi

G. Hasil Pengujian Sistem Kontrol Alat Roasting Kopi

Penelitian ini menguji sistem kontrol alat penyangrai secara langsung menggunakan biji kopi di dalam tabung untuk memverifikasi kinerja mesin. Prosedur tersebut mencakup empat skenario percobaan dengan variasi massa biji kopi, yaitu 50 gram, 100 gram, 150 gram, dan 200 gram. Tabel 4 menyajikan data hasil pengujian dari variasi beban tersebut.

Tabel 4 Hasil Pengujian Sistem Kontrol Alat Roasting Kopi

No	Berat (Gram)	Waktu (Menit)	Suhu (°C)	Kelembapan (%)
1.	50	12,46	25,71 – 104,59	70,69 – 12
2.	100	16,93	30,18 – 111,87	68,25 – 12
3.	150	19,25	32,9 - 116,80	62,05 – 12
4.	200	21,16	30,07 - 117,16	68,72 – 12

Sistem penyangrai memproses variasi massa biji kopi (50, 100, 150, dan 200 gram) sembari merekam data suhu dan kelembapan setiap detik hingga motor servo menutup katup gas secara otomatis. Data menunjukkan bahwa meskipun *setpoint* suhu (90°C) dan kelembapan (12%) bernilai konstan, durasi untuk mencapainya bervariasi. Sampel 50 gram mencapai target dalam 12,46 menit, sedangkan sampel 200 gram membutuhkan waktu 21,16 menit. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan massa biji kopi memperbesar kapasitas penyerapan panas dan volume uap air yang harus dibuang, sehingga memperlambat laju pencapaian suhu dan kelembapan target.

Variasi massa biji kopi secara signifikan memengaruhi profil penyangraian yang dihasilkan. Percobaan menunjukkan gradasi hasil mulai dari *dark roast* pada massa 50 gram, *medium dark roast* (100 gram),

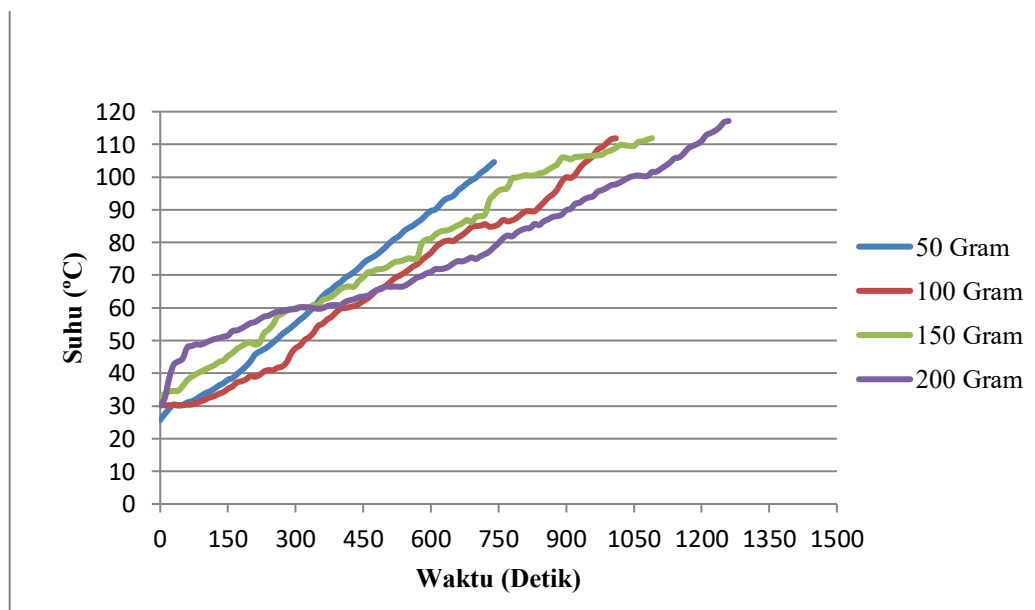
medium roast (150 gram), hingga *light roast* pada massa 200 gram. Fenomena ini mengonfirmasi bahwa massa yang lebih ringan mempercepat laju penyangraian sehingga menghasilkan warna yang lebih gelap. Gambar 6 memvisualisasikan perbandingan tingkat kematangan produk tersebut.



Gambar 6 (a) Berat 50 Gram Tipe *Dark Roast*, (b) Berat 100 Gram Tipe *Medium Dark Roast*, (c) Berat 150 Gram Tipe *Medium Roast*, dan (d) Berat 200 Gram Tipe *Light Roast*.

H. Grafik Data Hasil Pengujian Sistem Kontrol Alat Roasting kopi

Visualisasi data hasil pengujian mencakup variasi massa biji kopi sebesar 50, 100, 150, dan 200 gram untuk memfasilitasi pengamatan karakteristik parameter. Penulis menyajikan data tersebut dalam dua kategori hubungan, yaitu perbandingan suhu terhadap waktu dan kelembapan terhadap waktu. Detail kedua grafik tersebut tersaji pada Gambar 7 dan 8.



Gambar 7 Grafik Perbandingan Suhu Terhadap Waktu

Rancang Bangun Sistem Kendali Presisi Suhu dan Kelembapan pada Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sensor SHT-31

(Muhammad Arfan, Warnisa Gulo, Muhammad Khairul Amri Rosa, Alex Surapati, Natsir Habibullah : Halaman 146 - 157)

Gambar 7 menyajikan profil suhu terhadap waktu untuk setiap variasi massa (50–200 gram), yang memperlihatkan kenaikan suhu berbanding lurus dengan durasi proses hingga titik *setpoint*. Peningkatan ini berlangsung karena sistem terus memicu pembakaran untuk memenuhi target parameter suhu dan kelembapan yang telah ditentukan.

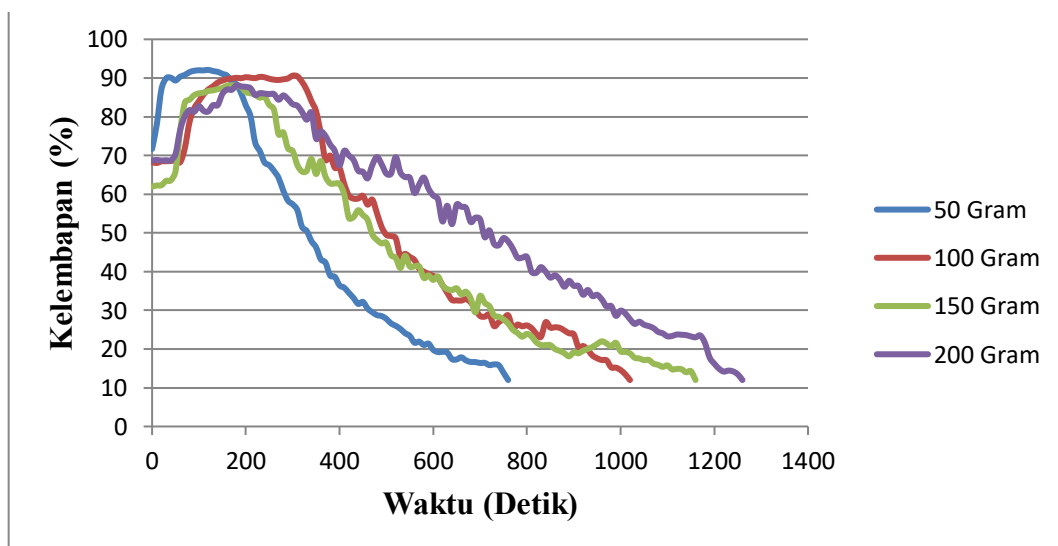
Analisis data menunjukkan bahwa massa 50 gram mencapai *setpoint* tercepat dalam 12,46 menit, diikuti oleh massa 100 gram (16,93 menit), 150 gram (19,25 menit), dan 200 gram (21,16 menit). Peningkatan massa biji kopi secara langsung memperpanjang durasi proses karena sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk memaksimalkan penyerapan panas dan mereduksi kelembapan.

Sistem mencatatkan suhu di atas *setpoint* 90°C pada beberapa pengujian karena mekanisme kontrol mengharuskan pemenuhan target kelembapan 12% sebagai syarat terminasi proses. Gambar 8 menyajikan grafik respons kelembapan terhadap waktu tersebut.

Gambar 8 memvisualisasikan profil kelembapan terhadap waktu untuk variasi massa 50, 100, 150, dan 200 gram. Pada fase inisial, proses pemanasan memicu evaporasi air permukaan yang menyebabkan lonjakan nilai kelembapan sesaat. Selanjutnya, peningkatan suhu secara bertahap mereduksi kadar air hingga menyentuh *setpoint* 12%.

Volume pelepasan uap air selama penyangraian menentukan laju penurunan kelembapan. Massa biji kopi yang lebih besar mengandung total air yang lebih banyak, sehingga menuntut waktu penguapan yang lebih lama untuk mencapai target. Sebaliknya, massa yang lebih kecil mempercepat proses tersebut. Fenomena ini sejalan dengan hukum gas ideal ($PV = nRT$), di mana kenaikan suhu (T) meningkatkan energi kinetik molekul dan tekanan uap (P). Mekanisme termodinamika ini memacu pelepasan uap air dari pori-pori biji kopi, yang secara progresif menurunkan nilai kelembapan.

Visualisasi data ini membuktikan kemampuan sistem kontrol dalam menyesuaikan parameter operasional dan waktu penyangraian secara responsif berdasarkan beban massa biji kopi.



Gambar 8 Grafik Perbandingan Kelembapan Terhadap Waktu

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merealisasikan rancang bangun alat penyangrai (*roasting*) kopi berbasis kontrol suhu dan kelembapan. Konstruksi alat memiliki dimensi kerangka 33 cm dan tabung 28 cm dengan kapasitas muatan maksimal 500 gram. Sistem mengintegrasikan sensor SHT-31 serta motor servo yang berperan sebagai aktuator pengatur katup gas otomatis. Menggunakan material utama besi dan pelat,

alat ini mampu memantau dan mengendalikan parameter suhu serta kelembapan uap secara real-time selama proses penyangraian.

Penelitian ini menguji empat variasi massa biji kopi (50, 100, 150, dan 200 gram) yang menunjukkan bahwa peningkatan massa berbanding lurus dengan durasi pencapaian *setpoint*. Massa 50 gram mencapai target suhu 90°C dan kelembapan 12% dalam 12,46 menit, sedangkan massa 200 gram memerlukan waktu hingga 21,16 menit. Selama proses tersebut, sistem kontrol mendemonstrasikan stabilitas kinerja melalui respons penutupan katup gas otomatis saat target tercapai. Korelasi terbalik antara kenaikan suhu dan penurunan kelembapan ini memvalidasi efektivitas alat dalam meregulasi parameter penyangraian secara presisi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. W. Wibowo, R. D. Atmaja, and M. A. Murti, "Preliminary Studies for Cracking Sound Identification During Coffee Roasting," in 2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA), Surabaya, Indonesia: IEEE, 2023, pp. 215–219.
- [2] P. C. Ayu, I. W. A. Wijaya, I. G. A. P. R. Agung, and I. W. Rinas, "Design of coffee roaster with controlled temperature system to maintain the sustainability of coffee roasting process," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 1302, no. 1, 2024.
- [3] O. A. Ogunjirin, M. O. Olabanji, and O. T. Ojo, "Instrumentation of NCAM developed coffee roasting machine," IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 445, no. 1, 2020.
- [4] E. Getaneh, S. W. Fanta, and N. Satheesh, "Effect of Broken Coffee Beans Particle Size, Roasting Temperature, and Roasting Time on Quality of Coffee Beverage," J. Food Qual., vol. 2020, 2020.
- [5] I. Laukalja, Z. Kruma, and I. Cinkmanis, "Impact of the Roast Level on Chemical Composition of Coffee from Colombia," Proc. Latv. Acad. Sci., Sect. B: Nat., Exact, Appl. Sci., vol. 76, no. 3, pp. 348–354, 2022.
- [6] D. Prajna, J. C. K. H. S. Putra, H. K. Purwadaria, and S. Sutrisno, "Roasting optimization of robusta coffee beans and their effect on the antioxidant related compound," BIO Web Conf., vol. 120, 2025.
- [7] G. Budryn, E. Nebesny, J. Oracz, and T. Rachwał-Rosiak, "Influence of roasting conditions on fatty acids and oxidative changes of Robusta coffee oil," Eur. J. Lipid Sci. Technol., vol. 114, no. 9, pp. 1052–1061, 2012.
- [8] D. Żyżelewicz, G. Budryn, J. Oracz, H. Antolak, D. Kregiel, and M. Kaczmarek, "The influence of the roasting process conditions on the polyphenol content in cocoa beans, nibs and chocolates," Food Res. Int., vol. 89, pp. 918–929, 2016.
- [9] B. Heyd, E. Broyart, G. Trystram, and A. Voilley, "Physical model of heat and mass transfer in a spouted bed coffee roaster," Drying Technol., vol. 25, no. 4, pp. 621–633, 2007.
- [10] R. Wulandari, A. C. Nugraha, R. A. W. Yudha, and S. Roseno, "Heat transfer through a clay furnace in a coffee roasting machine to produce coffee with a distinctive aroma," in AIP Conference Proceedings, vol. 2900, 2023.
- [11] X. Wang and L.-T. Lim, "Physicochemical Characteristics of Roasted Coffee," in Coffee in Health and Disease Prevention, Elsevier Inc., 2015, pp. 247–254.
- [12] F. Wei and M. Tanokura, "Chemical Changes in the Components of Coffee Beans during Roasting," in Coffee in Health and Disease Prevention, Elsevier Inc., 2015, pp. 83–91.
- [13] W. B. Sunarharum, T. S. Y. Putri, and S. M. Ulfa, "Sensory and Physicochemical Characteristics of Two Common Roast Defects in Robusta Coffee," Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol., vol. 12, no. 1, pp. 339–346, 2022.
- [14] M. Bolka and S. Emire, "Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans," Food Sci. Nutr., vol. 8, no. 11, pp. 6120–6131, 2020.
- [15] I. V. Shtykova and T. A. Shinkevich, "Investigation of a Nonlinear Sar Model of the Temperature of the Exhaust Gases of the Firing Machine in the Presence of Noise in the Control Error," in AIP Conference Proceedings, vol. 2467, 2022.
- [16] L. Li and G. Zhou, "Method of variable universe fuzzy control base on inverse-model decoupling for green tea baking," Trans. Chinese Soc. Agric. Eng., vol. 30, no. 5, pp. 238–245, 2014.
- [17] S. Sa'po, M. Jusman, dan M. Arif, "Rancang Bangun Mesin Penyangrai Biji Kopi Kapasitas 3 Kg Type Rotary," Skripsi, Politeknik Ati Makassar, Makassar, 2021.
- [18] A. Fiatno, Y. Yusmita, G. Aprinaldi, E. Putri, dan M. Habibil, "Rancang Bangun Mesin Roasting Kopi Tipe Silinder Horizontal Kapasitas 2 Kg," Skripsi, Universitas Pahlawan, Bangkinang, 2023.
- [19] F. Nazura dan M. Dhafir, "Desain Mesin Penyangrai Kopi Menggunakan Sumber Elemen Pemanas Listrik (Heater) dan Tenaga Penggerak Motor Listrik," J. Ilm. Mhs. Pertan., vol. 7, no. 1, 2022.
- [20] A. Bahroin, A. P. Budijono, dan R. Budi, "Rancang Bangun Sistem Kontrol Suhu Dan Putaran Pada Mesin Penyangrai Kopi Semi Otomatis," J. Tek. Mesin, vol. 2, no. 3, pp. 35–39, 2016.
- [21] P. E. Wicaksono, "Penentuan Kadar Kandungan Air Pada Biji Kopi Arabika dengan Teknik Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)," Skripsi, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya, 2018.

Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma

Bunga Wahyudiani¹⁾, Azmi Hafizat Muzada²⁾, Asep Najmurokhman^{1*)}

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Jenderal Achmad Yani
Jalan Terusan Jend. Sudirman, Cimahi 40531

²Instrument Leader, PT Sanbe Farma, Jl. Industri Cimareme No. 8, Cimareme,
Kec. Padalarang, Kabupaten Bandung Barat

^{*}Korespondensi : asep.najmurokhman@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Sistem *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) memiliki peran vital dalam industri farmasi, khususnya untuk menjamin kualitas serta kesinambungan produksi pada unit *Water for Injection* (WFI) di *Large Volume Parenteral* (LVP) PT Sanbe Farma. Penelitian ini bertujuan menganalisis efisiensi dan performa SCADA dalam memonitor serta mencatat parameter *flow rate* dan konduktivitas WFI pada Plant LVP. Metode yang digunakan meliputi pengamatan data *real-time*, analisis tren historis, perhitungan efisiensi, serta evaluasi performa berdasarkan ketersediaan data, reliabilitas pencatatan, interval sampling, deteksi kejadian, dan konsistensi nilai. Hasil analisis menunjukkan tingkat ketersediaan data SCADA mencapai 100% pada semua parameter, dengan rata-rata indeks performa di atas 96%. Hal ini menandakan sistem mampu mendeteksi anomali secara *real-time* sekaligus merekam data tanpa kehilangan interval. Efisiensi monitoring *flow rate* pada Mei 2025 tercatat 85%, namun menurun menjadi 70% di Juni 2025 akibat gangguan proses. Sebaliknya, efisiensi monitoring konduktivitas WFI pada Cold maupun *Hot loop* berada di atas 99%. Analisis statistik memperlihatkan *variability index* 100% dan *peak-to-average ratio* tinggi, yang mengindikasikan akurasi sistem dalam menangkap fluktuasi ekstrem. Secara keseluruhan, SCADA di PT. Sanbe Farma unit 3 bekerja dengan reliabilitas tinggi, menjaga kualitas pemantauan proses, serta mendukung deteksi dini potensi gangguan, sehingga layak dijadikan acuan pemeliharaan dan peningkatan sistem kendali di industri farmasi.

Kata kunci : efisiensi sistem, Large Volume Parenteral, monitoring data, SCADA, Water for Injection

Abstract

The *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) system is essential in pharmaceutical manufacturing, particularly for ensuring product quality and operational continuity in the *Water for Injection* (WFI) process at the *Large Volume Parenteral* (LVP) facility of PT Sanbe Farma. This study evaluates the efficiency and performance of SCADA in monitoring and logging WFI flow rate and conductivity. The assessment involves real-time data observation, historical trend analysis, efficiency measurement, and performance evaluation based on data availability, logging reliability, sampling frequency, event detection, and value consistency. Findings show that SCADA achieved 100% data availability for all monitored parameters, with a performance index consistently above 96%, indicating strong capability for real-time anomaly detection and uninterrupted data recording. Flow-rate monitoring efficiency reached 85% in May 2025 but declined to 70% in June 2025 due to process issues. In contrast, conductivity monitoring in both Cold and Hot loops remained highly efficient, exceeding 99%. Statistical results also revealed a 100% variability index and a high peak-to-average ratio, demonstrating the system's accuracy in capturing dynamic fluctuations. Overall, the SCADA system in PT Sanbe Farma Unit 3 provides reliable monitoring performance and supports early disturbance detection, making it a strong basis for system maintenance and improvement.

Keywords : data monitoring, Large Volume Parenteral, SCADA, system efficiency, Water for Injection

I. PENDAHULUAN

Air merupakan salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan manusia, baik untuk konsumsi, sanitasi, maupun keperluan industri [1]–[4]. Dalam sektor industri, terutama industri farmasi, air tidak hanya digunakan sebagai bahan pelarut, tetapi juga menjadi komponen penting dalam berbagai proses produksi,

seperti pencucian peralatan, pelarutan bahan aktif, formulasi produk, hingga sebagai bahan baku dalam pembuatan obat injeksi [5], [6]. Oleh karena itu, kualitas air yang digunakan harus memenuhi standar yang sangat ketat, mengingat air yang terkontaminasi dapat berdampak langsung terhadap mutu, keamanan, dan efektivitas produk farmasi yang dihasilkan. Industri farmasi di Indonesia, termasuk PT Sanbe Farma yang berlokasi di Kabupaten Bandung Barat dituntut untuk mematuhi standar nasional maupun internasional dalam proses produksinya, seperti CPOB (Cara Pembuatan Obat yang Baik) dan GMP (*Good Manufacturing Practices*). Salah satu aspek penting dalam standar tersebut adalah pengendalian kualitas air secara menyeluruh, mencakup aspek fisik, kimia, dan mikrobiologis. Sistem pengolahan air di fasilitas *Water Treatment Plant* (WTP) menjadi sangat krusial dan harus diawasi secara ketat untuk memastikan bahwa air yang digunakan memenuhi spesifikasi farmasi, khususnya *Water for Injection* (WFI).

Info Makalah:

Dikirim : 17-12-2025;

Revisi 1 : 19-12-2025;

Revisi 2 : -

Diterima : 25-12-2025.

Penulis Korespondensi:

Telp : +62-81321815649

e-mail : asep.najmurrokhman@lecture.unjani.ac.id

Sistem *Water for Injection* (WFI) merupakan salah satu infrastruktur kritical dalam produksi obat *Large Volume Parenteral* (LVP). Kualitas, kontinuitas, dan *traceability* air WFI menentukan keselamatan produk akhir serta kepatuhan terhadap persyaratan regulatori. Dalam praktik industri farmasi modern, kegagalan pasokan atau kontaminasi WFI dapat menyebabkan penarikan *batch*, gangguan produksi, dan risiko keselamatan pasien, sehingga pemantauan *real-time* dan pencatatan data yang andal menjadi kebutuhan mutlak. Dalam produksi LVP, seperti cairan infus NaCl 0,9% atau Dextrose yang memiliki volume lebih dari 100 mL, kualitas WFI menjadi parameter yang sangat kritis. WFI harus memenuhi spesifikasi farmasi internasional, termasuk batas konduktivitas, suhu, dan parameter lainnya yang ditetapkan oleh *United States Pharmacopeia* (USP) dan *European Pharmacopoeia* (EP) [7], [8]. Untuk menjamin konsistensi kualitas air, penerapan teknologi otomasi, dan sistem kendali modern sangat diperlukan. Salah satu sistem yang umum digunakan dalam pengawasan dan pengendalian proses industri adalah *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) [9].

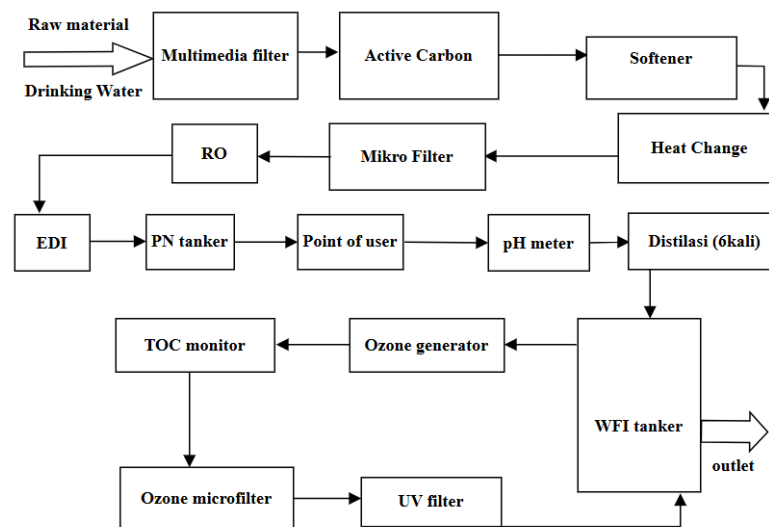
Sistem SCADA memungkinkan pemantauan parameter kualitas air secara *real-time* melalui antarmuka manusia-mesin (HMI/*Human Machine Interface*), pencatatan data historis data *logging*, sistem alarm, serta kendali otomatis berdasarkan masukan dari sensor dan perangkat pengendalian [10], [11]. PT. Sanbe Farma menerapkan sistem SCADA pada unit WFI yang digunakan dalam proses pembuatan produk LVP. Sistem ini mengintegrasikan data dari berbagai instrumen, seperti *flow rate*, suhu dan konduktivitas, untuk dipantau dan direkam secara berkelanjutan. Dengan adanya sistem SCADA, pengawasan terhadap parameter kualitas air menjadi lebih efisien, akurat, dan minim risiko *human error* dan memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat melalui analisis data historis. Penerapan SCADA yang terdesain dengan baik mampu memusatkan pengawasan banyak subsistem (pompa, boiler, distilasi/produksi WFI, sistem distribusi) sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan respons terhadap gangguan [12], [13].

Seiring berkembangnya paradigma Industri 4.0, integrasi SCADA dengan IoT (*Internet-of-Things*), sistem analitik waktu-nyata, dan lapisan *big data* membuka peluang peningkatan efisiensi lebih lanjut [14]. Sistem tidak hanya melakukan pemantauan dan pencatatan, tetapi juga deteksi anomali otomatis, prediksi kegagalan (*predictive maintenance*), optimasi penggunaan energi, serta perbaikan kualitas keputusan operasional. Implementasi teknologi *data-driven* ini telah diangkat dalam literatur farmasi sebagai elemen kunci transformasi digital pabrik terregulasi, walaupun tantangan kepatuhan data, validasi sistem, dan integritas data tetap menjadi isu kritis [15]. Tinjauan sistematis pada pengembangan sistem air dan sistem air cerdas menunjukkan arsitektur berlapis (*perception/transducer layer*, komunikasi/*protocol layer*, serta aplikasi/analitik *layer*) yang menekankan pentingnya interoperabilitas sensor, latensi komunikasi, dan kebijakan alarm yang tepat untuk menjaga kualitas air. Dalam konteks WFI, sensitivitas parameter seperti suhu dan konduktivitas menuntut *sampling* dan pencatatan dengan frekuensi dan resolusi memadai agar analisis tren dan investigasi deviasi dapat dilakukan secara meyakinkan [16].

Namun demikian, beberapa penelitian 2025 juga menyoroiti celah efisiensi pada implementasi SCADA di industri: desain antarmuka operator yang kurang optimal, konfigurasi alarm yang menghasilkan *alarm flood*, keterbatasan kemampuan historian untuk menangani volume data tinggi, serta integrasi yang lemah antara data SCADA dan platform analitik lanjutan. Selain itu, aspek keamanan siber dan validasi sistem otomatis menjadi hambatan yang sering mengurangi manfaat praktis investasi digital, termasuk dalam pabrik WFI di sektor LVP [17].

II. METODE

WFI adalah air dengan tingkat kemurnian sangat tinggi yang digunakan dalam industri farmasi, terutama untuk produksi sediaan injeksi seperti *Large Volume Parenteral (LVP)* dan *Small Volume Parenteral (SVP)*. Menurut standar British Pharmacopoeia (BP) dan European Pharmacopoeia (EP), WFI harus memenuhi sejumlah persyaratan mutu yang ketat untuk menjamin keamanan, sterilitas, dan efikasi produk akhir. Proses pembuatan WFI diperlihatkan dalam Gambar 1.

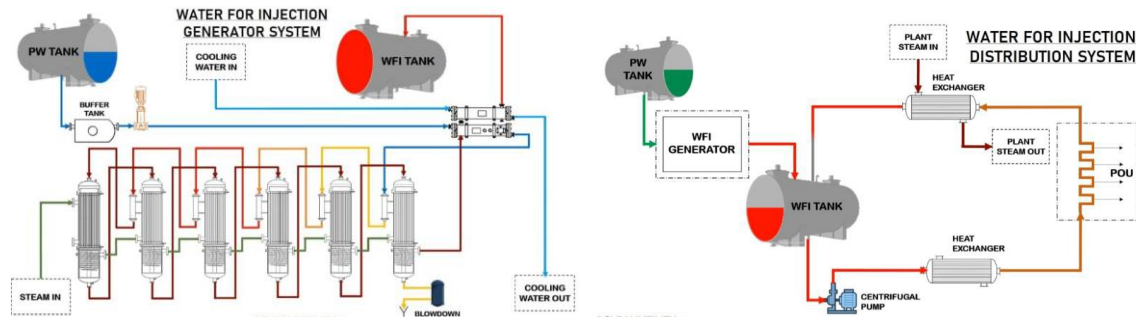


Gambar 1. Tahapan proses pembuatan WFI

Bahan baku yang dialirkan dalam sistem WFI mengandung berbagai senyawa kontaminan. Kontaminan ini berpotensi membentuk biofilm yang dapat merusak sistem maupun produk steril, sehingga diperlukan penggunaan multimedia filter. Tahap berikutnya adalah penghilangan klorin, kloramin, pestisida, dan kontaminan lainnya menggunakan karbon aktif. Selanjutnya, softener berbasis resin yang mampu mengikat ion kalsium (Ca^{2+}) ditambahkan untuk menghilangkan kandungan Ca^{2+} , karena keberadaan ion ini dapat menimbulkan ketidakcocokan (inkompatibilitas). Heat exchanger digunakan untuk menjaga proses sterilisasi dengan memanfaatkan uap panas, baik untuk sterilisasi peralatan maupun produk. Proses dilanjutkan dengan mikrofiltrasi, yang berfungsi menyaring partikel berukuran mikro. Sebagian kontaminan berukuran nano sehingga produk pada tahap ini belum sepenuhnya steril. Tahap selanjutnya adalah *Reverse Osmosis (RO)*, kemudian dilakukan *Electrodeionization (EDI)* atau *ion exchange* untuk menghilangkan ion-ion sisa yang masih terdapat pada air hasil RO. Terakhir, dilakukan pengecekan pH untuk memastikan kesesuaian pH WFI dengan proses penggunaannya. Hal ini penting agar tidak menimbulkan iritasi pada tubuh saat diaplikasikan.

Proses selanjutnya terjadi dalam sistem generator WFI seperti diperlihatkan dalam Gambar 2. Air murni dari PW Tank dipompa menuju *buffer tank* sebelum masuk ke unit evaporator bertingkat. Pada tahap ini, air dipanaskan menggunakan *steam in* sehingga terjadi proses penguapan dan pemisahan kontaminan. Uap yang terbentuk kemudian melewati serangkaian kolom pemisah untuk memastikan hanya uap murni yang digunakan, sementara sisa kotoran atau mineral dibuang melalui *blowdown*. Uap murni selanjutnya dikondensasikan kembali menggunakan *cooling water in* yang mengalir pada penukar panas, sehingga

menghasilkan air injeksi (WFI) dengan kemurnian tinggi. Air hasil kondensasi murni ini kemudian dialirkan dan disimpan di WFI Tank untuk digunakan dalam proses farmasi atau industri, sedangkan air pendingin keluar melalui jalur *cooling water out*. Selanjutnya, air dari *WFI Tank* dipompakan menggunakan *centrifugal pump* menuju jalur distribusi yang dilengkapi dengan *heat exchanger* untuk menjaga suhu dan mencegah kontaminasi mikroba. *Plant steam* digunakan sebagai media pemanas dalam *heat exchanger*, kemudian keluar sebagai *plant steam out* setelah transfer panas. Air WFI yang telah terjaga sterilitas dan suhunya kemudian didistribusikan menuju *POU (Point of Use)* sesuai kebutuhan di fasilitas farmasi, sambil terus bersirkulasi melalui sistem agar kualitas dan kemurniannya tetap terjaga.



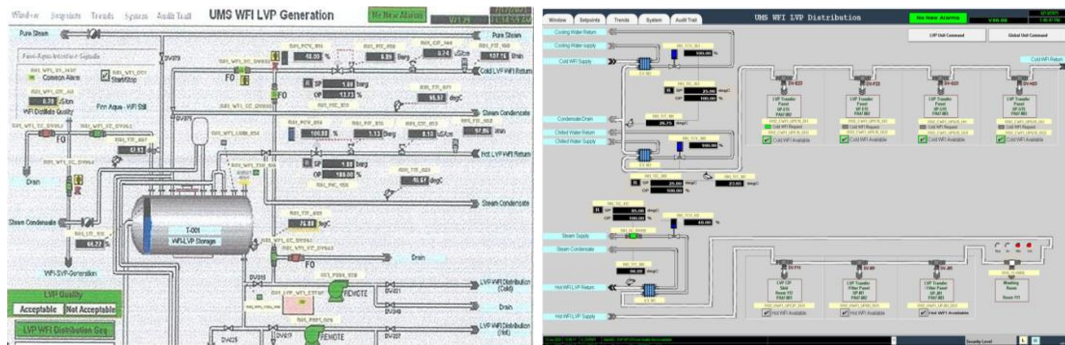
Gambar 2. Sistem Generator WFI dan distribusinya

SCADA merupakan sistem yang dirancang untuk mengakuisisi data dan menggunakannya dalam pengendalian suatu objek atau proses. Sistem ini menggabungkan teknologi telemetri dengan akuisisi data, mencakup proses pengumpulan informasi dari lapangan, pengiriman data ke pusat kontrol, analisis, pengambilan keputusan, serta penyajian data pada tampilan operator. Untuk keperluan tersebut, sebuah *tools Human Machine Interface (HMI)* dibuat untuk menampilkan data proses kepada operator serta memberikan sarana bagi operator untuk melakukan pengendalian sistem. Informasi yang disajikan dalam HMI umumnya berbentuk grafis, baik berupa animasi, grafik, maupun tren, sehingga memudahkan operator dalam memahami data yang ditampilkan dan mendukung kegiatan pemantauan. HMI dapat digunakan sebagai alat kontrol maupun visualisasi status, baik secara manual maupun melalui komputer dengan tampilan *real-time*. Pada umumnya, sistem HMI beroperasi secara *online* dan *real-time* dengan membaca data yang dikirimkan melalui port I/O dari sistem kendalinya. Beberapa port yang sering digunakan antara lain port COM, USB, RS232, maupun port serial. Tampilan *dashboard* HMI yang digunakan diperlihatkan dalam Gambar 3, sedangkan tampilan HMI untuk sistem generator WFI dan distribusinya diberikan dalam Gambar 4.



Gambar 3. Tampilan *dashboard* HMI SCADA

Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma (Bunga Wahyudiani, Azmi Hafizat Muzada, Asep Najmurokhman : Halaman 158 - 166)



Gambar 4. Tampilan dashboard HMI untuk proses generator WFI dan distribusinya

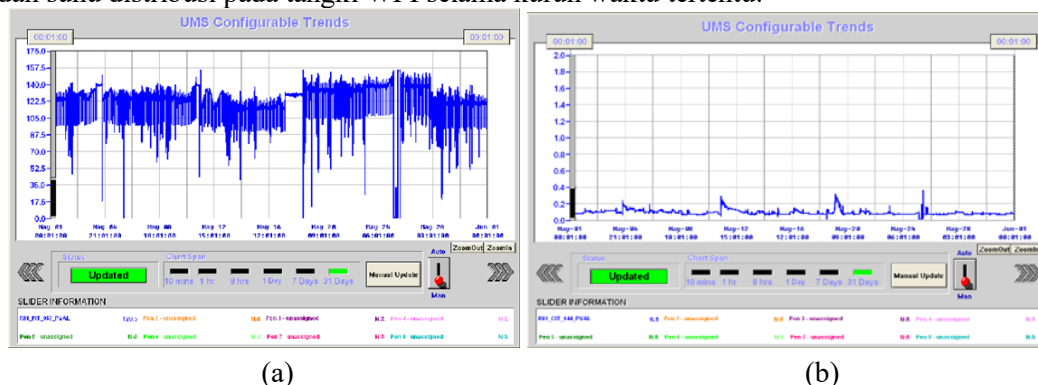
Data diperoleh melalui sistem SCADA yang mencatat parameter proses secara *real-time* dengan interval pencatatan 1 menit (1.440 data per hari). Parameter utama yang diamati adalah *flow rate* pada WFI LVP Tank, konduktivitas WFI *Cold Loop* dan *Hot loop*, serta suhu distribusi dan tangki WFI. Sementara itu, analisis tren historis dilakukan untuk memperoleh informasi terkait dengan kestabilan operasi (apakah parameter sesuai dengan standar proses), fluktuasi atau anomali (*spike*, lonjakan, atau nilai mendekati nol), dan konsistensi jangka panjang dalam periode (Mei–Agustus 2025).

Performa sistem SCADA dievaluasi berdasarkan lima indikator utama yaitu *data availability*, *logging reliability*, *sampling interval*, *event detection*, dan konsistensi nilai. *Data availability* diukur dari tingkat ketersediaan data tanpa kehilangan interval, sedangkan *logging reliability* adalah ukuran konsistensi pencatatan selama periode monitoring. *Sampling interval* merupakan kesesuaian waktu pencatatan tiap 1 menit, sedangkan *event detection* dan konsistensi nilai berturut-turut mengukur kemampuan sistem mendeteksi anomali secara *real-time* dan kestabilan data dalam batas operasional. Untuk mendukung evaluasi performa, dilakukan analisis statistik sederhana terhadap data SCADA, yaitu rentang (*range*) nilai ekstrem, *variability index* (VI) = $(Range / Max) \times 100\%$, dan *Peak-to-Average Ratio* (PAR) = $Max / Average$. Sementara itu, efisiensi sistem dihitung berdasarkan kesesuaian parameter aktual dengan standar operasional, yaitu sebagai berikut:

- Efisiensi *Flow rate* = $(Jumlah\ data\ sesuai\ standar / Total\ data) \times 100\%$
- Efisiensi Suhu Distribusi = $(Suhu\ rata-rata\ aktual / Suhu\ target\ ideal) \times 100\%$
- Efisiensi Konduktivitas = $(Jumlah\ data \leq 1,3\ \mu S/cm / Total\ data) \times 100\%$

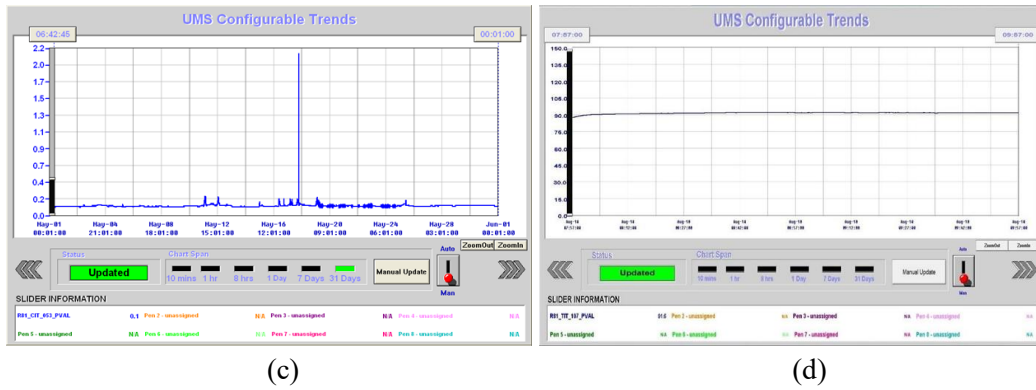
III. HASIL DAN DISKUSI

Hasil penelitian diperoleh dari pengamatan dan analisis data SCADA pada unit WFI – LVP di PT Sanbe Farma dengan menggunakan data periode Mei – Agustus 2025. Data yang diamati meliputi *flow rate*, konduktivitas WFI *Cold* dan *Hot Loop*, serta suhu distribusi pada tangki WFI. Gambar 5 memperlihatkan tampilan data *real time* dari dashboard HMI SCADA untuk *flow rate*, konduktivitas WFI *Cold* dan *Hot Loop*, dan suhu distribusi pada tangki WFI selama kurun waktu tertentu.



(a)

(b)



Gambar 5. Data secara *real time flow rate* (a), konduktivitas WFI *Cold* (b) dan *Hot Loop* (c), dan suhu distribusi pada tangki WFI (d) dalam kurun waktu tertentu

Hasil pengamatan memperlihatkan *flow rate* di bulan Mei 2025 berada di kisaran 120-130 L/min dengan efisiensi monitoring 85%. Sistem SCADA berhasil mendeteksi penurunan sesaat dengan cepat tanpa kehilangan data. Indeks performa rata-rata 98,6%. Selanjutnya, pada bulan Juni 2025 terjadi fluktuasi lebih besar dengan *spike* ke 0 L/min akibat gangguan pompa dan proses. Efisiensi menurun menjadi 70%, namun sistem SCADA tetap mencatat semua data dengan indeks performa 96%. Tabel 1 merangkum data performa *flow rate* selama periode Mei-Juni 2025.

Tabel 1. Data Performa *Flow rate*

Bulan	Data Availability	Logging Reliability	Sampling Interval	Event Detection	Konsistensi Nilai	Efisiensi	Indeks Performa
Mei	100%	100%	100%	98%	95%	85%	98,6%
Juni	100%	100%	100%	95%	85%	70%	96,0%

Sementara itu, nilai konduktivitas WFI Cold pada bulan Mei berada di kisaran 0,1–0,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ yang berada di bawah ambang batas ($\leq 1,3 \mu\text{S}/\text{cm}$), sehingga nilai efisiensi konduktivitasnya 100% dan indeks performa 99,8%. Hasil observasi *Hot Loop* di bulan Mei 2025, mayoritas data di kisaran 0,1–0,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, terdapat satu lonjakan kecil namun masih terdeteksi sehingga efisiensinya lebih dari 99%. Observasi data *Cold Loop* di bulan berikutnya menghasilkan nilai konduktivitas rata-rata 0,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dengan nilai maksimum 7 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai *variability index* dari data tersebut sebesar 100% dan *Peak-to-Average Ratio* (PAR) berjumlah 87,5 menunjukkan sistem mampu menangkap fluktuasi ekstrem, sedangkan efisiensinya bernilai 99,95 %. Sementara itu, *Hot loop* di bulan berikutnya memperlihatkan rata-rata konduktivitasnya 0,12 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dengan nilai maksimum 1,57 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Parameter lainnya berturut-turut *variability index*, PAR, dan efisiensinya bernilai 100 %, 13,08, dan 99 %. Tabel 2 memperlihatkan data monitoring konduktivitas WFI.

Tabel 2. Hasil Monitoring Konduktivitas WFI

Loop	Bulan	Rata-rata ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Maks ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Efisiensi	Variability Index	PAR	Indeks Performa
<i>Cold Loop</i>	Mei	0,1–0,3	<1,3	100%	-	-	99,8%
<i>Hot loop</i>	Mei	0,1–0,3	<1,3	>99%	-	-	99%
<i>Cold Loop</i>	Juni	0,08	7,0	99,95%	100%	87,5	Sangat baik
<i>Hot loop</i>	Juni	0,12	1,57	99%	100%	13,08	Sangat baik

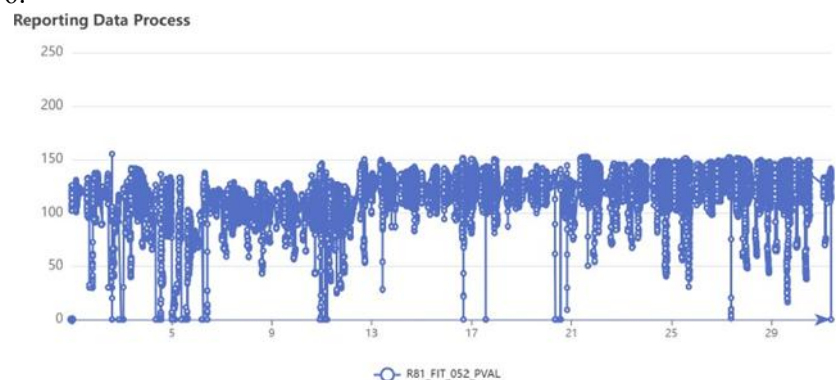
***Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma
(Bunga Wahyudiani, Azmi Hafizat Muzada, Asep Najmurokhman : Halaman 158 - 166)***

Observasi lainnya dilakukan pada tangki distribusi WFI. Berdasarkan data pada grafik UMS *Configurable Trends* untuk LVP WFI Distribution tanggal 10 Agustus 2025, proses pemanasan (sanitasi) menggunakan WFI HOT menunjukkan data suhu minimum 84,5 °C pada pukul 07:57:00, suhu maksimum 92,0 °C pada pukul 09:23:00, dan persyaratan standar lebih dari 80 °C selama 120 menit. Selama periode 07:57:00 – 09:57:00 (total 120 menit), suhu selalu berada di atas batas minimal (80 °C), sehingga persyaratan sanitasi terpenuhi. Observasi menunjukkan perubahan nilai suhu tanpa fluktuasi ekstrem, yang menandakan kontrol SCADA bekerja optimal dalam mempertahankan kondisi proses. Efisiensi suhu dapat dihitung sebagai rasio antara suhu aktual rata-rata terhadap suhu maksimum ideal, sehingga diperoleh nilai 95,9%. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem SCADA mampu menjaga suhu mendekati target dengan deviasi minimal. Sementara itu, *performance* sanitasi dihitung berdasarkan durasi pencapaian suhu standar dibandingkan dengan total waktu proses mengikuti formula:

$$\text{Performance (\%)} = (\text{Durasi di atas } 80^{\circ}\text{C} / \text{Total Durasi Proses}) \times 100\%$$

Karena total durasi proses 120 menit dan sepanjang durasi tersebut suhu selalu berada di atas batas minimal, maka *performance*-nya bernilai 100 %. Hal ini berarti suhu tidak pernah turun di bawah batas minimal.

Pengamatan lainnya dilakukan pada *flow return* WFI LVP Tank. Observasi menunjukkan bahwa aliran balik (*flow return*) memiliki nilai minimum 31,0 L/min pada 09 Juli 2025. Nilai rata-rata aliran adalah 215,87 L/min dan nilai maksimum mencapai 310,0 L/min. Persyaratan minimum aliran yang ditetapkan adalah 95 L/min. Selama periode pemantauan, nilai aliran selalu berada di atas batas minimum yang ditentukan, sehingga proses memenuhi kriteria spesifikasi. Efisiensi aliran dihitung sebagai rasio antara aliran rata-rata terhadap aliran maksimum dan diperoleh nilai 69,64%. Efisiensi aliran sebesar 69,64% menunjukkan bahwa sistem SCADA mampu menjaga aliran dalam kisaran stabil meskipun tidak selalu berada pada kapasitas maksimum. *Snapshot* grafik dari observasi *flow return* WFI LVP Tank diberikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Grafik perubahan *flow return* WFI LVP Tank

Berdasarkan data pemantauan SCADA pada periode Juli 2025, suhu rata-rata pada tangki WFI LVP adalah sebesar 79,7°C dengan suhu maksimum 123,84°C dan minimum 0°C. Persyaratan operasional yang ditetapkan adalah suhu lebih dari 70°C. Data ini menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan suhu rata-rata di atas batas minimum yang dipersyaratkan, sehingga memenuhi kriteria penerimaan untuk proses produksi rutin. Di lain pihak, efisiensi suhu dihitung berdasarkan rasio suhu rata-rata terhadap suhu target minimal dan diperoleh nilai 113,86%. Nilai ini mengindikasikan bahwa sistem beroperasi 13,86% di atas batas minimum yang dipersyaratkan, yang berarti margin keamanan cukup baik untuk menjamin kestabilan proses. Performa SCADA dalam pemantauan suhu tangki WFI LVP dapat dinilai sangat baik karena sistem mampu mendeteksi fluktuasi suhu dan mencatat nilai ekstrem (maksimum dan minimum) secara akurat. Meskipun terdapat pembacaan suhu minimum 0°C yang

kemungkinan disebabkan oleh gangguan sensor atau perawatan, data secara keseluruhan menunjukkan kestabilan yang memadai. Suhu maksimum yang tercatat yaitu 123,84°C menunjukkan bahwa sistem juga mampu menjalankan siklus sanitasi termal bila diperlukan.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada sistem SCADA di unit *Water for Injection* (WFI) – *Large Volume Parenteral* (LVP) PT Sanbe Farma, dapat disimpulkan bahwa sistem ini memiliki tingkat keandalan yang sangat tinggi dalam mendukung proses monitoring dan logging data. Tingkat ketersediaan data (*data availability*) mencapai 100% pada seluruh parameter yang diamati, menunjukkan bahwa selama periode pengamatan tidak terjadi kehilangan data, gap pencatatan, maupun *downtime* sistem. Pada parameter *flow rate*, efisiensi monitoring bulan Mei tercatat sebesar 85% dengan indeks performa rata-rata 98,6%, sedangkan pada bulan Juni efisiensi menurun menjadi 70% akibat gangguan mekanis pada pompa dan proses, namun sistem SCADA tetap berfungsi optimal dalam mencatat seluruh anomali dengan indeks performa 96%. Untuk parameter konduktivitas WFI, baik pada Cold Loop maupun *Hot loop*, efisiensi monitoring tercatat di atas 99% dengan konsistensi nilai yang stabil di kisaran 0,1–0,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sesuai standar farmasi internasional (USP dan EP). Analisis statistik menunjukkan nilai *variability index* (VI) mencapai 100% dan *Peak-to-Average Ratio* (PAR) tinggi, yang menandakan sistem mampu menangkap fluktuasi ekstrem secara akurat dan real-time. Pada aspek distribusi dan tangki WFI, SCADA terbukti efektif menjaga parameter suhu dan aliran dalam batas yang dipersyaratkan. Proses sanitasi menggunakan WFI Hot tercatat selalu memenuhi standar suhu minimal 80 °C selama 120 menit dengan efisiensi 95,9% dan performa 100%, menunjukkan sistem kendali bekerja optimal dalam mempertahankan kondisi proses. Demikian pula, pengamatan flow return pada WFI Tank menunjukkan aliran rata-rata 215,87 L/min, jauh di atas standar minimum 95 L/min dengan performa 100%. Pemantauan suhu tangki WFI menunjukkan sistem mampu menjaga suhu rata-rata 79,7 °C di atas standar minimum 70 °C, meskipun terdapat nilai ekstrem akibat anomali sensor, namun secara keseluruhan performa tetap sangat baik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani dan PT. Sanbe Farma yang telah memberikan fasilitas dalam melakukan penelitian dan memperoleh data penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Kılıç, “The importance of water and conscious use of water,” *Int. J. Hydrol.*, vol. 4, no. 5, pp. 239–241, 2020, doi: 10.15406/ijh.2020.04.00250.
- [2] A. Wutich, A. Y. Rosinger, A. Brewis, J. Stoler, and W. Jepson, “Measuring Human Water Needs,” *Am. J. Hum. Biol.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.1002/ajhb.23350.
- [3] C. J. Perry, R. Allen, P. Droogers, A. Kilic, and R. Q. Grafton, “Water Consumption, Measurements and Sustainable Water Use,” Technical Report at The Global Commission on the Economics of Water, the Government of the Netherlands, 2023.
- [4] N. M. Arwin *et al.*, *Air Minum untuk Kehidupan: Kualitas, Regulasi, dan Inovasi*. Yayasan Kita Menulis, 2024.
- [5] S. Ringa, “Sustainable water management in the pharmaceutical industry,” <https://www.a3p.org/en/sustainable-water-management-in-the-pharmaceutical-industry/>. (diakses tanggal 30 Agustus 2025).
- [6] E. Strade, D. Kalnina, and J. Kulezycka, “Water efficiency and safe re-use of different grades of water - Topical issues for the pharmaceutical industry,” *Water Resour. Ind.*, vol. 24, no. May, p. 100132, 2020, doi: 10.1016/j.wri.2020.100132.
- [7] “Sistem Distilasi WFI: Standar Emas untuk Kemurnian Air Farmasi,” *Shandong Eagle Pharma Machinery Co., Ltd (WEMAC)*, 2025. <https://www.wemacpharma.com/id/WFI-Distillation-Systems-The-Gold-Standard-for-Pharmaceutical-Water-Purity> (diakses tanggal 9 September 2025).
- [8] “Water for Injection (WFI): Providing High Quality Pharmaceutical Water to Meet Industry Needs and Global Regulations,” *Xylem*, 2025. <https://www.xylem.com/en-id/applications/water-for-injection-wfi/>.

***Analisis Efisiensi Sistem SCADA Dalam Monitoring Dan Data Logging Pada Plant Water for Injection (WFI) di Large Volume Parenteral (LVP) PT. Sanbe Farma
(Bunga Wahyudiani, Azmi Hafizat Muzada, Asep Najmurokhman : Halaman 158 - 166)***

(diakses tanggal 3 September 2025).

- [9] D. F. Akbar, G. F. Tambunan, S. I. B. Siringoringo, R. N. Warnata, A. Irawan, and R. W. A. Rozak, "Implementasi Dan Perkembangan Sistem SCADA Di Industri : Tinjauan Dari Sudut Pandang Pakar," *J. Pengabd. Masy. Pemberdayaan, Inov. dan Perubahan*, vol. 3, no. 3, pp. 122–129, 2023.
- [10] Ruwanto, D. Ridwan, A. A. Masriwilaga, H. Kabir, and D. Komaludin, "Implementasi Sistem Supervisory Control and Data Acquisition untuk Proses Koagulasi pada Instalasi Pengolahan Air Berbasis Programmable Logic Controller dan Human Machine Interface Supervisory Control and Data Acquisition System Implementation for The Coa," *TELEKONTRAN*, vol. 11, no. 1, pp. 74–83, 2023.
- [11] M. R. Abdilah, "Perancangan Sistem SCADA untuk Monitoring Kualitas Air Limbah dan Gas IPAL Komunal," Skripsi Program Studi Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang, 2023.
- [12] A. Z. Manurung, M. Dwiyaniti, and N. Muhammad, "Kinerja Sistem Monitoring SCADA Pada PLANT Sistem Pendingin dan AHU," *Prosiding Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-11*, 2025, vol. 11, no. 1, pp. 590–597.
- [13] A. Mughaid, S. Alzu'bi, A. A. A. Alkhatib, A. AlZioud, A. Al Ghazo, and I. AL-Aiash, "Simulation-based framework for authenticating SCADA systems and cyber threat security in edge-based autonomous environments," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 140, no. April, p. 103078, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2025.103078>.
- [14] A. L. Sidiq, K. Dewi, B. J. Nugroho, and P. S. P. Pranida, "Integrasi Sistem IoT Berbasis Multi-Sensor Untuk Pemantauan Real-Time Kualitas Air Limbah Laboratorium Teknik," *J. Kumparan Fis.*, vol. 7, no. 3, pp. 106–113, 2024.
- [15] R. K. Koppichetti, "Enterprise Data Lakes for Pharmaceutical Manufacturing: Enabling Digital Transformation in a Regulated Industry," *J. Adv. Dev. Res.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–17, 2023.
- [16] D. Quintana, L. C. Felix-herran, J. C. Tudon-martinez, and J. D. J. Lozoya-santos, "On Smart Water System Developments: A Systematic Review," *Water*, vol. 17, p. 2571, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/w17172571>.
- [17] S. Wang, Y. Vidal, and F. Pozo, "Recent advances in wind turbine condition monitoring using SCADA data : A," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 267, p. 111838, 2026, doi: [10.1016/j.ress.2025.111838](https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111838).