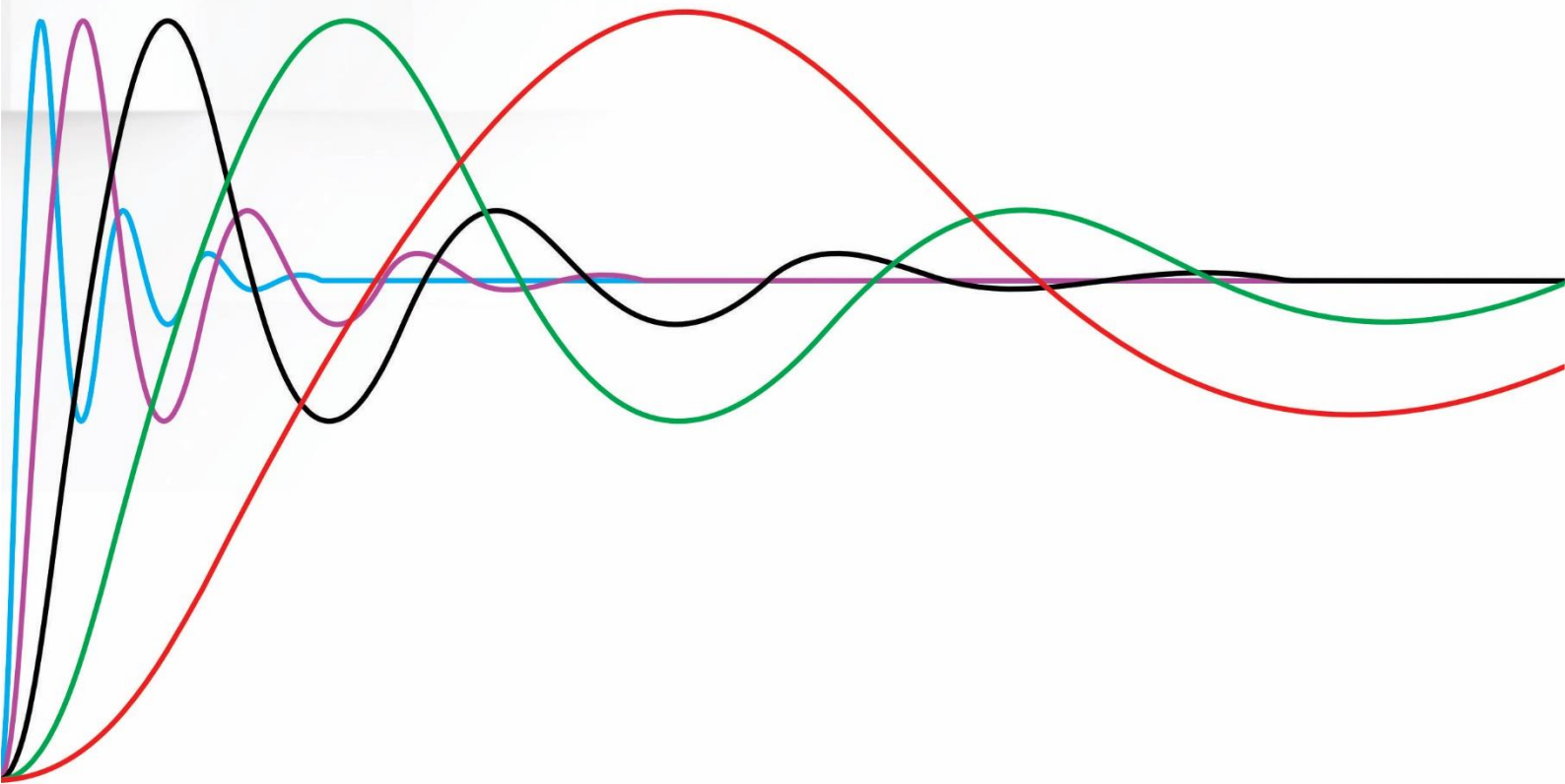


P-ISSN : 2685 - 4341
E-ISSN : 2685 - 5313

Vol. 7 No. 1, Juni 2025



Jurnal Riset Rekayasa Elektro





Jurnal Riset Rekayasa Elektro

Terbit pertama kali tahun 2019
p-ISSN : 2685-4341

Publisher

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

Editor-in-Chief

Arif Johar Taufiq, S.T., M.T.

Editorial Board

Muhamad Taufiq Tamam, S.T., M.T (Universitas Muhammadiyah Purwokerto)
Wakhyu Dwiono, ST, MT (Universitas Muhammadiyah Purwokerto)
Dr. Nelly Safitri (Politeknik Negeri Lhokseumawe)
Dr. Arfanda Anugrah Siregar, S.T.,M.Si (Politeknik Negeri Medan)
Dr. Mohammad Yanuar Hariyawan, S.T.,M.T (Institut Teknologi Telkom Surabaya)

Layout Editor

Bayu Aji Kurniawan, A.Md.T (Universitas Muhammadiyah Purwokerto)

Address

Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik dan Sains
Universitas Muhammadiyah Purwokerto
Jl. KH Ahmad Dahlan PO Box 202, Purwokerto 53182
<http://jurnalnasional.ump.ac.id/index.php/JRRE/index>
email: jurnaljrre@ump.ac.id

Jurnal Riset Rekayasa Elektro (JRRE) adalah terbitan berkala ilmiah yang diterbitkan oleh Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Muhammadiyah Purwokerto. JRRE menyajikan artikel hasil pemikiran dan penelitian serta perkembangan terkini dari Teknik Elektro. Redaksi mengundang para peneliti, dosen, dan praktisi untuk bertukar pikiran dan memajukan keilmuan di bidang teknik elektro

(JRRE) Electrical Engineering Research Journal is a periodical scientific publication published by Electrical Engineering, Faculty of Engineering and Science, Muhammadiyah University of Purwokerto. JRRE presents articles of thought and research as well as the latest developments from Electrical Engineering. Editors invite researchers, lecturers, and practitioners to exchange ideas and advance knowledge in the field of electrical engineering

Volume 7 No 1 Juni 2025

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI

i

Implementasi Ganda Modul ESP32 untuk Kontrol Pintu Otomatis dengan Monitoring *Realtime* dan *Autolock* Terjadwal melalui Web dan *Chatbot*

(1 – 10)

Waryanto, Mursalim, Tresi Aprilia, Muhammad Khozin

Simulasi dan Analisa *Time Motion* Robot Lengan 6-Axis Pada Proyek Otomasi *Heating Line* untuk Manufaktur Pegas Daun di PT.XYZ

(11 – 22)

Arini Latifah, Denny Irawan

Perancangan dan Pemodelan PLTS *Off-Grid* dengan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Superkapasitor-Baterai: Studi Kasus di Desa Karamina, Papua

(23 – 34)

Dwi Sahidin, Boy Ihsan, Tri Desmana Rachmildha, Deny Hamdani

Simulasi Potensi Sampah Provinsi DKI Jakarta sebagai Sumber Energi Berkelanjutan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSA)

(35 – 44)

Muhammad Arif, Ichsan, Leonard Lisapaly, Syamsyarief Baqaruzi

Perancangan Sistem Pengaturan Suhu dan Kelembaban pada Inkubator Bayi

(45 – 52)

M. Taufiq Tamam, Latiful Hayat, Anis Kusumawati, Chaerul Fauzi, Diaztito Syahrul Ramadhan

Design and Calculation of Single Tuned Passive Filter for Harmonic Mitigation in a 1250 kVA Distribution Transformer at PT. INKA (Persero) Madiun

(52 – 62)

Reza Sarwo Widagdo, Puji Slamet, Balok Hariadi, Almadea Chintya Anka

Implementasi Sistem Monitoring dan Pengendalian Hama Berang-Berang Bertenaga Surya dengan Integrasi Telegram

(63 – 76)

Dwi Ovelita Cahyani, Denny Irawan

PETUNJUK PENULISAN

ii

Implementasi Ganda Modul ESP32 untuk Kontrol Pintu Otomatis dengan Monitoring *Realtime* dan *Autolock* Terjadwal melalui Web dan *Chatbot*

Dual Implementation of ESP32 Modules for Automated Door Control with Real-Time Monitoring and Scheduled Autolock through Web and Chatbot Interfaces

Waryanto¹, Mursalim², Tresi Aprilia³, Muhammad Khozin⁴

^{1,3,4}Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Komputer dan Desain, Universitas Selamat Sri
^{1,3,4}Jalan Ir. Soekarno Hatta No. Km. 03, Patebon, Kendal, Indonesia

²Program Studi Ilmu Komputer, Fakultas Teknologi, Hukum dan Bisnis, Universitas Sugeng Hartono
²Jalan Ir. Soekarno No.69, Dusun I, Madegondo, Grogol, Sukoharjo, 57552, Indonesia

email: ¹waryantorastafara@gmail.com, ²mursalim.dsc@gmail.com, ³tresiapriila98@gmail.com,

⁴khozin.dsn@gmail.com

Informasi Artikel

Diajukan, 21 Oktober 2024

Diterima, 25 Maret 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

Kata Kunci :

IoT, ESP32, NTP Pool, RFID, Chatbot Telegram

ABSTRAK

Perkembangan peralatan *Smart home* menggunakan teknologi web terus mengalami perkembangan pesat dengan ditandai banyak inovasi peralatan IoT (*Internet of Things*) baik rumah maupun industri. Peralatan tersebut dapat dimonitoring dari jarak jauh melalui jaringan internet. Penelitian ini bertujuan untuk menerapkan modul ESP32 sebagai perangkat IoT untuk buka pintu otomatis yang dimonitoring melalui web dan telegram yang menggantikan kunci konvensional yang lebih efisien memudahkan untuk pengguna untuk membuka maupun mengunci pintu yang dilengkapi *Autolock system* pada waktu tertentu dengan memanfaatkan *time server NTP Pool*. Penelitian tersebut menggunakan metode pengembangan sistem *waterfall*. Metode *waterfall* terdiri dari analisis, desain, implementasi, pengujian dan perbaikan sistem. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan metode *blackbox*, sistem tersebut dapat dijalankan dengan baik sesuai yang diharapkan. Ada 7 sub pengujian dimana 6 sub pengujian berhasil dilakukan dengan persentase sebesar 86%. Sistem tersebut mampu menjalankan sensor RFID untuk mengidentifikasi tag RFID yang telah didaftarkan pada sistem untuk proses buka maupun mengunci pintu data informasi dari proses buka maupun mengunci pintu mampu terekam di dalam *database web*. Hasil pengujian pada *Autolock System* berhasil mengunci pintu pada waktu yang telah ditentukan. Selain itu, user menerima notifikasi dari *bot telegram* yang memberikan informasi *Autolock System*. Selain itu, penggunaan baterai pada perangkat tersebut dapat bertahan hingga 32,5 jam dan rata-rata latensi saat buka dan tutup pintu otomatis sebesar 16,3 detik tidak ada *delay* pada proses tersebut. Namun, pada pengiriman bot telegram masih diperlukan penelitian lebih lanjut.

ABSTRACT

The development of smart home devices using web technology is advancing rapidly, driven by numerous innovations in IoT (Internet of Things) devices for residential and industrial applications. The internet enables remote monitoring and control of such devices. This study aims to implement the ESP32 module as an IoT-based device for automatic door operation, monitored via a web application and Telegram, to replace conventional locks. The proposed system enhances efficiency and simplifies door access by incorporating an Autolock feature, which automatically locks the door at specified times using the NTP Pool time server. The research employs the waterfall system development methodology, encompassing analysis, design, implementation, testing, and system improvement. System functionality was tested using the black-box method, achieving a success rate of 86% across

Keyword :

IoT, ESP32, NTP Pool, RFID, Chatbot Telegram

seven sub-tests, with six sub-tests completed successfully. The system effectively operates RFID sensors to identify registered RFID tags, enabling secure door opening and locking. All door activity logs are recorded in a web-based database. Testing of the Autolock feature confirmed that the door was successfully locked at the designated times. Additionally, the device demonstrated a battery life of up to 32.5 hours, with an average latency of 16.3 seconds for the automatic door opening and closing processes, and no operational delays were observed. Notifications via the Telegram bot were successfully delivered, providing real-time updates on the Autolock system. However, further research is recommended to optimize the Telegram bot notification system.

1. PENDAHULUAN

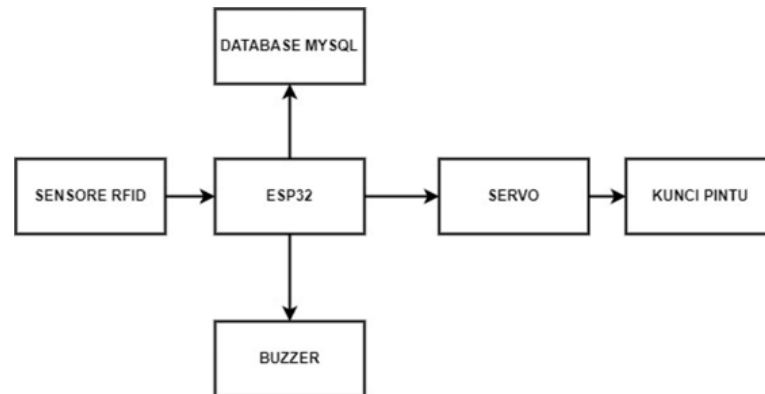
Perkembangan peralatan *smart home* atau rumah pintar yang menggunakan teknologi web terus mengalami perkembangan yang pesat. Hal tersebut ditandai dengan berbagai bentuk inovasi seperti peralatan kantor, industri dan peralatan rumah[1], [2], [3], [4], [5]. Sistem tersebut dapat dikendalikan melalui web dan juga diimplementasikan untuk pintu kamar tidur yang menggunakan perangkat ESP32 berbasis IoT (*Internet of Things*). Perangkat tersebut dijadikan sebagai *smart home security* dengan menggunakan sensor *door magnetic*[6]. Teknologi *Internet of Things* adalah infrastruktur global untuk menyediakan informasi, memungkinkan layanan yang canggih, dengan menghubungkan objek (*things*) baik fisik maupun virtual berdasarkan teknologi pertukaran informasi dan komunikasi [3]. *Smart home* merupakan istilah yang digunakan pada sebuah sistem yang dirancang guna mengendalikan dan memonitoring rumah dengan perangkat sensor, aktuator, serta elemen komputasi di dalamnya. Sistem tersebut berjalan secara independen dan dapat berkomunikasi antara satu perangkat dengan perangkat lainnya[7]. Keamanan kantor menjadi prioritas utama dalam mitigasi risiko kehilangan aset perusahaan. Keamanan akses terhadap pintu masuk perlu dilakukan secara tersistem yang efektif dan efisien. Penelitian ini dilakukan di instansi kerja yang masih menggunakan kunci manual, dimana dalam aktivitas kantor sering kali mengalami hambatan terhadap keterbatasan kunci, selain itu, kondisi tersebut berisiko hilangnya kunci utama karena sering digunakan untuk kepentingan staf. Oleh karena itu, diperlukan adanya sistem kunci yang berbasis elektronik yang dapat merekam riwayat aktifitas buka kunci tersebut. Dengan adanya teknologi RFID yang dikolaborasi dengan ESP32 ini memudahkan staf kantor untuk melakukan akses buka kunci pintu dengan lebih cepat dan efisien. Staf kantor dapat memegang kunci yang menggunakan tag RFID yang mudah dibawa[8]. Dukungan teknologi IoT mampu mewujudkan terciptanya efisiensi dan kemudahan akses buka pintu secara elektrik dalam bentuk penerapan modul ESP32 dengan sensor RFID. Sensor tersebut mampu mengidentifikasi hak akses masuk dan teknologi tersebut mampu dimonitoring melalui web[6], [9]. ESP32 mengirimkan data ke web sebagai penyedia informasi dari aktivitas buka kunci. Penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan dua modul ESP32 yang dikolaborasi dengan sensor RFID untuk buka kunci pintu otomatis. Ada beberapa penelitian terkait dengan permasalahan tersebut diantaranya adalah penelitian [6] yang melakukan kajian tentang Mikrokontroler ESP32 sebagai alat monitoring pintu berbasis web, hasil menunjukkan bahwa fungsi sistem tersebut berhasil sesuai yang diharapkan dengan menggunakan konsep *magnetic door switch*. Namun, diperlukan penambahan baterai dan sensor RFID untuk mempermudah pengguna dalam mengakses serta memberikan energi cadangan tambahan. Kemudian, penelitian [10] melakukan studi yang serupa, hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan ESP8266 berhasil digunakan dengan model NodeMCU. Namun, belum tersedia penguncian otomatis pada jam tertentu, hal tersebut dibutuhkan karena seringkali petugas mengalami kelalaian dalam mengunci pintu. Penelitian[11] melakukan penelitian tentang RFID dan *keypad matrix* dengan satu mikrokontroler yakni mikrokontroler Arduino UNO, hasil penelitian tersebut RFID mampu digunakan dengan baik. Akan tetapi, pada penelitian tersebut mengalami beberapa kendala diantaranya manajemen data internet yang tidak stabil dan diperlukan pengembangan lebih lanjut terkait dengan penambahan cadangan baterai serta penambahan mikrokontroler agar alat tersebut mampu dijalankan secara optimal.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan metode air terjun (*waterfall*) yang mempunyai tahap berurutan dimulai dari analisis, desain sistem, perakitan, pemrograman, penerapan dan testing. Metode tersebut sangat populer dan banyak digunakan pada beberapa penelitian [12], [13], [14], [15], [16] berikut tahapannya:

2.1. Analisis

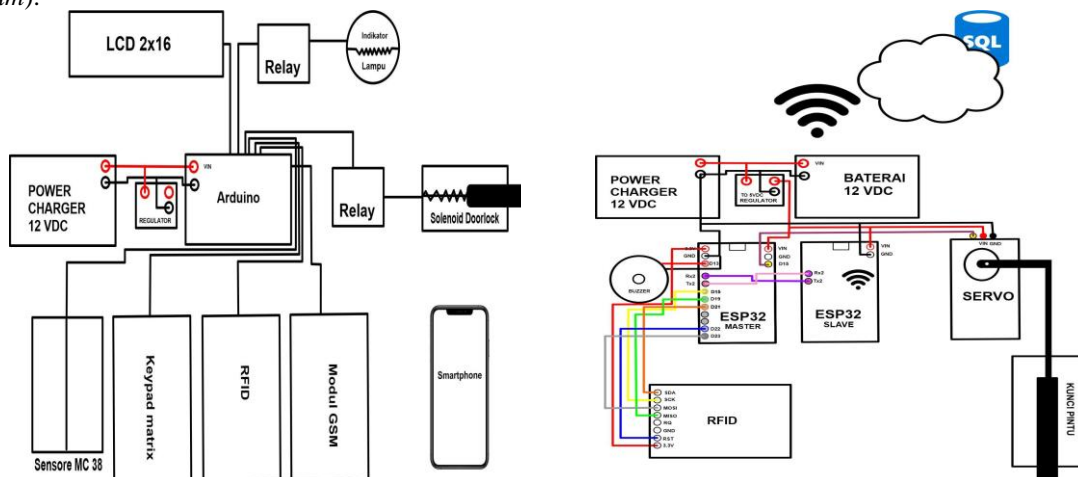
Tahapan tersebut adalah mengevaluasi kebutuhan sistem seperti: pengumpulan data melalui wawancara atau studi literatur. Tahap ini akan menghasilkan dokumen yang dibutuhkan dalam penelitian. Desain sistem dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Desain Sistem Monitoring Pintu Otomatis RFID

2.2. Desain Sistem

Tahapan ini dilakukan penyusunan konsep desain dan perancangan sistem terhadap solusi dari permasalahan penelitian dengan menggunakan perangkat pemodelan sistem seperti diagram alir data (*data flow diagram*).



Gambar 2. Penelitian [11]

Gambar 3. Penelitian yang Diusulkan

Pada Gambar 2 merupakan literatur rujukan pada penelitian ini dimana desain penelitian[11] menggunakan satu mikrokontroler dan tidak menggunakan baterai. Hal tersebut menyebabkan beberapa masalah dalam pengaturan akses data internet yang tidak stabil dan mesin akan berhenti ketika aliran listrik terputus. Sehingga, sistem *doorlock* dan sistem pengiriman data ke server tidak berfungsi. dengan demikian, sistem tidak berjalan dengan optimal Sedangkan Gambar 3 merupakan penelitian yang diusulkan menggunakan dua mikrokontroler yang memungkinkan setiap mikrokontroler memiliki tugas masing-masing sehingga kinerja sistemnya tidak terganggu dengan lainnya. Adapun pembagian fungsi antara ESP32 *master* dan ESP32 *slave* seperti Tabel 1.

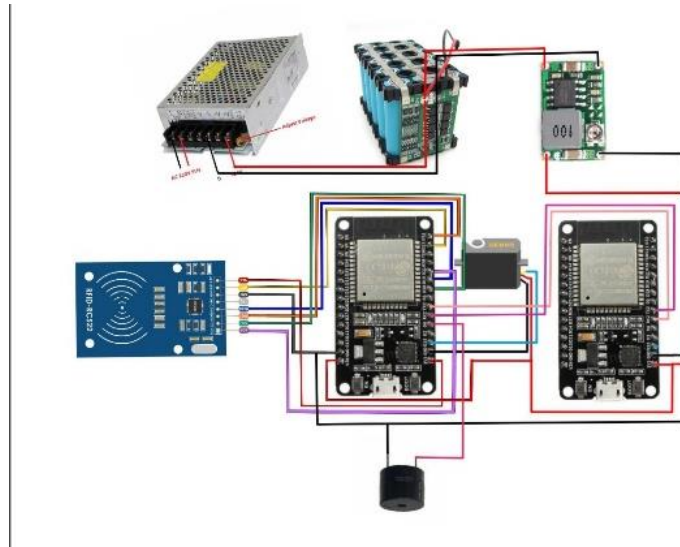
Tabel 1. Fungsi Dual ESP32 (*Master* dan *Slave*)

Fungsi EPS32 (<i>Master</i>)	Fungsi ESP32 (<i>Slave</i>)
Pembacaan sensor RFID	Manajemen jaringan internet wifi/ <i>bluetooth</i>
Mengontrol <i>servo</i>	Menerima data <i>logger</i>
Menghandle <i>buzzer</i> untuk menghasilkan suara	Mengirim data ke database pada server
Mengontrol fungsi serial ke ESP32 (<i>slave</i>)	Menerima data waktu dari Internet

Kemudian, dalam rancangannya diperlukan penambahan baterai untuk memberikan cadangan energi listrik ketika kondisi listrik padam. Jenis baterai yang digunakan adalah baterai *Lithium* yang memiliki keunggulan dalam ketahanan baterai dan cepat dalam pengisian daya[17], [18]. Sehingga, sistem monitoring pintu otomatis tersebut dapat diakses secara *realtime* dalam kondisi listrik padam dan dilengkapi teknologi *Chatbot Telegram*[19].

2.3. Perakitan

Proses perakitan *hardware* sistem yang menyesuaikan kebutuhan dari solusi permasalahan yang ada untuk menjadi sistem satu kesatuan dari kebutuhan *hardware*, proses ini melibatkan pengkabelan pada modul-modul yang dibutuhkan. Seperti pada penelitian [20] mengembangkan aplikasi prototipe berbasis *Internet of Things*.



Gambar 4. Desain Perakitan Sistem Monitoring Pintu Otomatis RFID

Pada Gambar 4 merupakan desain keseluruhan dari konsep sistem monitoring menggunakan RFID dan ESP32 ganda yang dilengkapi dengan baterai 12 VDC. Selanjutnya berikut adalah spesifikasi perangkat IoT yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Perangkat IoT yang Digunakan

<i>Hardware</i>	<i>Software</i>
ESP32 <i>microcontroller</i>	Arduino IDE
RFID MFRC522	wokwi
Tag RFID	wokwi
Servo Motor	Blynk
Grendel pintu	-
Power Supply	12 Vol
Baterai Lithium	12 VDC
Piezo Buzzer	

2.4. Pemrograman

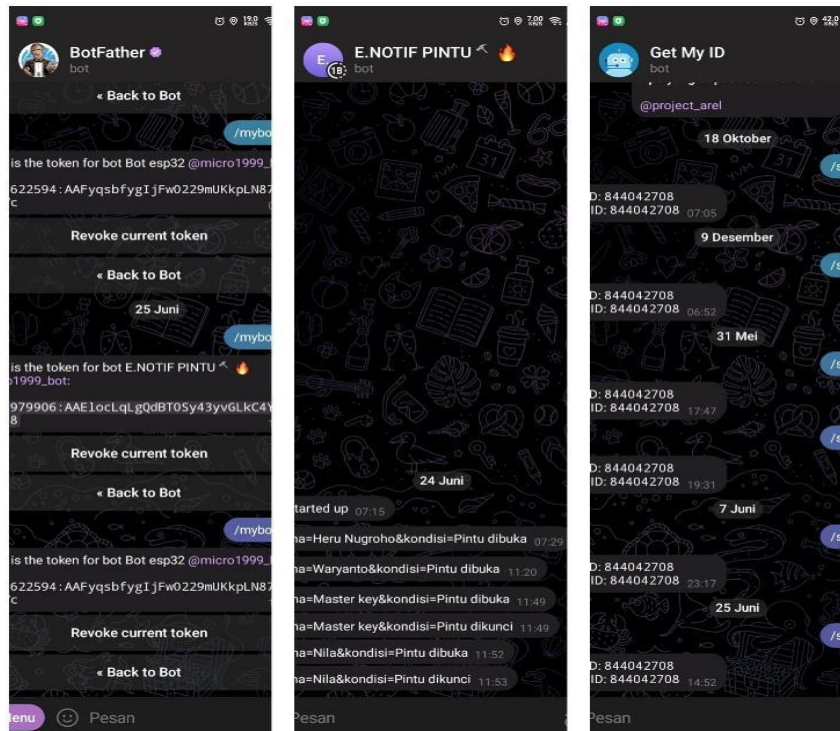
Penulisan kode program atau *coding* merupakan penerjemahan design dalam bahasa yang bisa dikenali oleh komputer. Dilakukan oleh programmer yang akan menerjemahkan kebutuhan sistem yang ditentukan. Tahapan ini merupakan tahapan secara nyata dalam mengerjakan suatu sistem. Penggunaan komputer akan dimaksimalkan dalam tahapan ini. Penulisan kode program akan dilakukan menggunakan *Arduino IDE* [21], [22].

2.5. Testing

Tahapan berikutnya adalah tahapan ujicoba atau *testing*. Tahapan ini, dilakukan pengujian sistem, mengkalibarsi perangkat yang sudah dirancang melihat apakah perangkat sudah sesuai atau belum. Kemudian, dengan tahapan ini, akan diketahui kekurangan sistem yang kemudian dilakukan pengkajian ulang dan dilakukan perbaikan terhadap sistem tersebut menjadi lebih baik[23].

3.3. Konfigurasi Chatbot Telegram

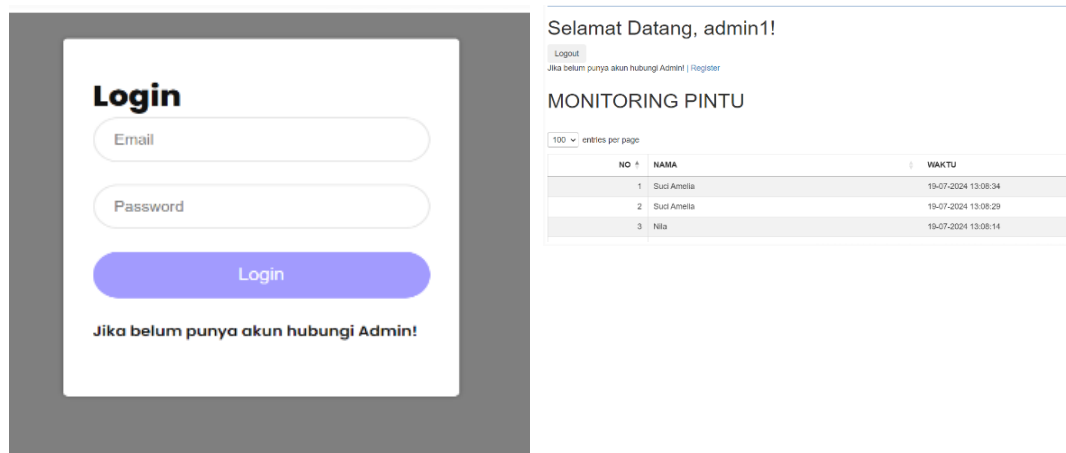
Tahapan ini, sistem web yang telah terhubung dengan ESP32, dapat konfigurasi dengan *Chatbot* dengan membuat *id* dan *username channel* pada telegram. Tujuan konfigurasi tersebut adalah untuk memberikan notifikasi secara *real time* kepada pengguna, jika pintu tertutup atau terbuka akan mengirimkan pesan kepada pengguna. Tampilan notifikasi pada Telegram dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Halaman Notifikasi *Chatbot* Menggunakan Telegram

3.4. Pemrograman Web

Bagian ini menyajikan konfigurasi tampilan *web interface* untuk memonitoring data dari aktivitas buka kunci pintu kantor yang dikirim dari ESP32 ke *database*. Sistem monitoring dilengkapi dengan hak akses khusus pengguna yang dilengkapi dengan metode enkripsi *bcrypt* yang disediakan oleh PHP Programming. Metode tersebut menggunakan fungsi khusus untuk mengenkripsi *password* yang terdaftar. Sehingga, pengguna tidak dapat mengetahui *password* orang lain. Tampilan monitoring pada web dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Halaman Monitoring Pintu Otomatis Berbasis Web

3.5. Pengujian Sistem

Dengan melakukan *trigger* pada *sensor* RFID dengan *Tag Id* yang telah didaftarkan untuk membuka kunci pintu. Berikut hasil pengujiannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Blackbox*

No	Skenario pengujian	Hasil yang diharapkan	Hasil Pengujian	Kesimpulan
1	Menempelkan <i>tag</i> kartu RFID untuk mengunci	Kunci pintu mengunci setelah menempelkan <i>tag</i> kartu pada <i>sensor</i> RFID	Sensor mampu mendeteksi kartu <i>tag</i> RFID untuk mengunci kunci pintu	Sesuai
2	Menempelkan <i>tag</i> kartu RFID untuk membuka	Kunci pintu terbuka setelah menempelkan <i>tag</i> kartu pada <i>sensor</i> RFID	<i>Sensor</i> mampu mendeteksi kartu <i>tag</i> RFID untuk membuka kunci pintu	Sesuai
3	<i>Register</i> untuk <i>login dashboard</i>	Halaman menampilkan <i>form register</i>	Halaman <i>register</i> mampu menampilkan halaman <i>register</i> sesuai dengan fungsinya	Sesuai
4	Halaman <i>dashboard</i> monitoring	Halaman mampu menampilkan <i>dashboard</i>	Halaman mampu masuk ke halaman <i>dashboard</i> monitoring	Sesuai
5	Memadamkan sumber listrik	Sistem mampu bekerja dengan baterai Cadangan	Sistem mampu bekerja dengan baterai cadangan	Sesuai
6	Notifikasi <i>chatbot</i> telegram	Telegram mampu mengirimkan hasil notifikasi kepada <i>user</i>	Beberapa kasus mengalami pending saat pengujian	Belum sesuai
7	Penjadwalan kunci pintu secara otomatis	Pintu terkunci secara otomatis menggunakan <i>time server NTP Pool</i>	Sistem berhasil mengunci pintu secara otomatis	Sesuai

3.6. Pengujian Daya Baterai

Dalam sistem kami memakai ESP32 ganda dan aksesoris RFID, buzzer, servo dan menjalankan wifi dan Bluetooth mencatat beban *Idle standby* dengan rata-rata beban arus 61,5mA. Dalam sistem kami memakai baterai cadangan dengan kapasitas 12v 2000mA dengan rumus pemakaian daya sebagai berikut:

$$\text{Daya tahan Baterai} = \frac{\text{Kapasitas baterai (mAh)}}{\text{Arus pemakaian (mA)}} \quad (1)$$

Baterai dengan kapasitas 2000 mAh dan arus pemakaian 61,5 mA dapat bertahan sekitar 32,5 jam

3.7. Pengujian Latensi

Berdasarkan dari Tabel 4 pengujian latensi akses kartu RFID sebanyak 10 kali percobaan pada sensor menghasilkan rata-rata latensi sebesar 16,3 detik. Proses tersebut, waktu antara membuka dan menutup pintu tidak ditemukan *delay*. Kemudian, saat proses tersebut berlangsung, sistem secara simultan mengirimkan data kedalam server untuk diproses pada sistem *web logger*. Selanjutnya, pada saat kondisi pintu masih terbuka diwaktu tertentu. Maka, *server* kan mengirimkan respon bahwa pintu harus ditutup, perangkat akan memproses menutup pintu secara otomatis. Hal tersebut diperlukan jika petugas tidak mengunci pintu hingga waktu tertentu.

Tabel 4. Pengujian Latensi Akses Kartu RFID

No.	Waktu Tap Kartu	Data Record Webservice	Latensi
1	22-11-2024 20.21.01	22-11-2024 20:21:18	17 detik
2	22-11-2024 20.23.00	22-11-2024 20:23:16	16 detik
3	22-11-2024 20.24.10	22-11-2024 20:24:26	16 detik
4	22-11-2024 20.26.10	22-11-2024 20:26:27	17 detik
5	22-11-2024 20.27.15	22-11-2024 20:27:31	16 detik

No.	Waktu Tap Kartu	Data Record Webserver	Latensi
6	22-11-2024 20.29.15	22-11-2024 20:29:31	16 detik
7	22-11-2024 20.31.05	22-11-2024 20:31:21	16 detik
8	22-11-2024 20.32.10	22-11-2024 20:32:26	16 detik
9	22-11-2024 20.33.30	22-11-2024 20:33:46	16 detik
10	22-11-2024 20.35.10	22-11-2024 20:35:27	17 detik

Berdasarkan dari Tabel 4 pengujian latensi akses kartu RFID sebanyak 10 kali percobaan pada sensor menghasilkan rata-rata latensi sebesar 16,3 detik. Proses tersebut, waktu antara membuka dan menutup pintu tidak ditemukan *delay*. Kemudian, saat proses tersebut berlangsung, sistem secara simultan mengirimkan data kedalam server untuk diproses pada sistem *web logger*. Selanjutnya, pada saat kondisi pintu masih terbuka diwaktu tertentu. Maka, *server* kan mengirimkan respon bahwa pintu harus ditutup, perangkat akan memproses menutup pintu secara otomatis. Hal tersebut diperlukan jika petugas tidak mengunci pintu hingga waktu tertentu.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem yang dikembangkan dapat digunakan untuk pengamanan pintu kantor bengkel di SMK Negeri 1 Kandeman menggunakan Modul ESP32 *master* dan *slave* serta sensor RFID yang mampu dimonitoring secara *realtime* menggunakan *chatbot* dan aplikasi web. Hasil pengujian sistem *blackbox* dari dari 7 sub pengujian yang dilakukan 86% berhasil dilakukan dan dinyatakan sesuai dengan kebutuhan. Ada 1 sub pengujian yang dinyatakan belum sesuai yaitu penggunaan *Chatbot* telegram mengalami beberapa kendala pending saat proses pengiriman notifikasi kepada *user*. Selain itu, penggunaan baterai pada perangkat tersebut dapat bertahan hingga 32,5 jam dan rata-rata latensi saat buka dan tutup pintu otomatis sebesar 16,3 detik tidak ada *delay* pada proses tersebut. Adapun saran penelitiannya adalah diperlukan konfigurasi pendaftaran kunci tag RFID secara tersistem melalui aplikasi web dan peningkatan keamanan *login user* agar lebih aman digunakan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Fakultas Komputer dan Desain Universitas Selamat Sri, Fakultas Teknologi, Hukum dan Bisnis Universitas Sugeng Hartono dan SMK Negeri 1 Kandeman yang memberikan akses untuk melakukan penelitian tersebut. Sehingga, penelitian ini dapat berjalan lancar hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. P. Caniogo *et al.*, *Internet of Things (IoT): Inovasi, Implementasi, dan Masa Depan*, 1st ed., vol. 1. Kab.Agam: YayasanTriEdukasiIlmiah, 2024.
- [2] M. Fauza and M. A. Muthalib, "Sistem Pengaman Pintu Otomatis menggunakan Sensor Radio Frequency Identification (RFID) berbasis Arduino Uno," *JurnalEnergiElektrik*, vol. 11, no. 1, pp. 30–37, 2022.
- [3] F. Di. Silalahi, J. Dian, and N. D. Setiawan, "Implementasi Internet of Things (IoT) dalam Monitoring Suhu dan Kelembaban Ruang Produksi Obat Non Steril Menggunakan Arduino berbasis Web," *JurnalPenelitianIlmudanTeknologiKomputer*, vol. 13, no. 2, pp. 62–68, Oct. 2021.
- [4] D. I. Mulyana, A. Wulandari, F. N. Huda, R. F. Putra, and R. Wanandi, "Implementasi Sistem Keamanan RFID pada Lingkungan Rukun Warga 015 Tegal Alur Jakarta Barat," *JurnalPengabdianIndonesia*, vol. 4, no. 1, pp. 230–237, Jan. 2023.
- [5] O. M. Hassan, A. M. Fatahillah, D. M. Fahrzi, and B. A. Kaswwar, "Rancang bangun sistem Monitoring dan Manajemen bendungan berbasis IoT," *JurnalMediaElektrik*, vol. 17, no. 3, pp. 112–116, 2020.
- [6] N. M. Nizam, H. Yuana, and Z. Wulansari, "Mikrokontroler ESP32 sebagai alat monitoring pintu berbasis Web," *JurnalMahasiswaTeknikInformatika*, vol. 6, no. 2, pp. 767–772, Oct. 2022.
- [7] R. A. Wardana and A. S. Budi, "Pengembangan Sistem Monitoring Smarthome secara Pevasif dengan Nodemcu dan Smartphone," *JurnalPengembanganTeknologiInformasidanIlmuKomputer*, vol. 5, no. 2, pp. 508–513, Jan. 2021.
- [8] K. Wirawibawa, "Pemanfaatan RFID MFRC522 dan Sistem Database untuk Pemantauan Akses Ruang dengan Identifikasi In dan Out," *JournalArticlePowerElektronik*, vol. 11, no. 1, 2022.
- [9] M. R. Thakur, "ESP32 DevKit ESP32 WROOM GPIO Pinout," <https://circuits4you.com>.
- [10] V. Ramdhani, R. Hidayat, and hendrick Hendrick, "Alat Keamanan Pintu Menggunakan E-KTP, Modul RFID dan AWS EC2 berbasis NODEMCU ESP8266," *JITSI:JurnalIlmiahTeknologiSistemInformasi*, vol. 3, no. 1, Mar. 2022.
- [11] Y. A. Surya, D. Irawan, and A. Rozaq, "Sistem Keamanan Rumah Menggunakan RFID dan Keypad Matrix dengan One Time Pad," *JurnalRisetRekayasaElektro*, vol. 5, no. 1, pp. 47–56, Jun. 2023.
- [12] A. Saravanos and M. X. Curinga, "Simulating the Software Development Lifecycle: The Waterfall Model," *Applied System Innovation*, vol. 6, no. 6, Dec. 2023, doi: 10.3390/asi6060108.
- [13] T. Aprilia and M. Achsin Samas, "Implementasi Software Requirement Specification dan Waterfall Model pada SIPODANG berbasis Android," 2024. [Online]. Available: <http://ejournal.bsi.ac.id/ejurnal/index.php/ijse>

-
- [14] T. K. Rahayu, Susanto, and Suwarjono, "Application Report Process of Islamic School Based on Pesantren Boarding Using Waterfall Model," in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing Ltd, Jul. 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1569/2/022025.
- [15] H. J. Christanto and Y. A. Singgalen, "Analysis and Design of Student Guidance Information System through Software Development Life Cycle (SDLC) dan Waterfall Model," *Journal of Information Systems and Informatics*, vol. 5, no. 1, pp. 259–270, Mar. 2023, doi: 10.51519/journalisi.v5i1.443.
- [16] S. Herawati, Y. D. P. Negara, H. F. Febriansyah, and D. A. Fatah, "Application of the Waterfall Method on a Web-Based Job Training Management Information System at Trunojoyo University Madura," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202132804026.
- [17] F. A. Perdana, "Baterai Lithium," *InkuiriJurnalPendidikanIPA*, vol. 9, no. 2, pp. 103–109, Aug. 2020.
- [18] E. E. Group, "Lithium Battery Charging: The Definitive Guide," ELBSpecialized In Providing Custom Lithium Battery Solutions.
- [19] A. D. Mulyanto, "Pemanfaatan Bot Telegram untuk Media Informasi Penelitian," *JurnalIlmuKomputerdanTeknologiInformasi*, vol. 12, no. 1, pp. 49–54, Mar. 2020.
- [20] A. Wag yana, "Prototipe Modul Praktik untuk Pengembangan Aplikasi Internet of Things (IoT)," *JurnalIlmiahSetrum:SistemKendaliTenagaElektronikaTelekomunikasiKomputer*, vol. 8, no. 2, pp. 238–427, Dec. 2019.
- [21] I. Academy, "Arduino IDE," ProgrammingDasar.
- [22] Y. Yusman, B. Bakhtiar, and U. Sari, "Rancang Bangun Sistem Smart Home dengan Arduino Uno R3 berbasis Internet of Things (IoT)," *JurnalLitek:JurnalListrikTelekomunikasiElektronika*, vol. 16, no. 1, pp. 25–29, 2019.
- [23] S. M. Mutagbal, F. R. Firdaus, and H. Rahmadi, "Pengujian Aplikasi menggunakan Black Box Testing Boundary Value ANalysis (Studi Kasus: Aplikasi Prediksi Kelulusan SMNPTN)," *JurnalIlmiahTeknologiInformasiTerapan*, vol. 1, no. 3, pp. 31–36, Feb. 2016.

Simulasi dan Analisa *Time Motion* Robot Lengan 6-Axis Pada Proyek Otomasi *Heating Line* untuk Manufaktur Pegas Daun di PT.XYZ

Simulation and Time Motion Analysis of 6-Axis Arm Robot on Heating Line Automation Project for Leaf Spring Manufacturing at PT.XYZ

Arini Latifah¹, Denny Irawan²

^{1,2} Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

^{1,2} Jl. Sumatera No.101, Kec. Kebomas, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61121, Indonesia

email: ¹arinilatifah16@gmail.com, ²den2mas@umg.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 5 Mei 2025
Diterima, 22 Mei 2025
Diterbitkan, 10 Juni 2025

Kata Kunci :

Manufaktur, Otomasi, Robot,
Studi Kelayakan

Keyword :

Manufacturing, Automation,
Robot, Feasibility Study

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan studi kelayakan berbasis simulasi terhadap penerapan sistem otomasi menggunakan robot lengan 6-axis pada lini produksi *heating* di industri manufaktur pegas daun. Studi kelayakan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Roboguide* untuk menganalisis kelayakan teknis, waktu siklus, dan produktivitas dari sistem yang diusulkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem robotik mampu mengurangi waktu siklus transfer material sebesar 50%, di mana waktu siklus transfer robot tercatat 17 detik, dibandingkan dengan 34 detik pada transfer manual. Penggunaan robot juga berhasil mengoptimalkan suhu pemanasan material, dengan suhu yang tercatat 920°C, lebih rendah 5% dibandingkan dengan transfer manual 970°C, yang berdampak pada efisiensi bahan bakar dari *heating furnace*. Dalam hal produktivitas, sistem robotik meningkatkan output produksi hingga 200%, dengan biaya operasional yang berkurang 64%, serta biaya manufaktur per unit yang turun hingga 82%. Secara keseluruhan, simulasi ini mengindikasikan bahwa integrasi robot lengan dalam sistem otomasi dapat meningkatkan efisiensi biaya, kualitas produk, serta daya saing industri manufaktur.

ABSTRACT

This study aims to conduct a feasibility analysis based on simulation regarding the implementation of an automation system using a 6-axis robotic arm in the heating production line of a leaf spring manufacturing industry. The feasibility study is carried out using *Roboguide* software to analyze the technical feasibility, cycle time, and productivity of the proposed system. The simulation results indicate that the robotic system can reduce the material transfer cycle time by 50%, with the robot's transfer cycle recorded at 17 seconds, compared to 34 seconds for manual transfer. The use of the robot also successfully optimized the material heating temperature, with a recorded temperature of 920°C, 5% lower than the manual transfer at 970°C, which contributes to improved fuel efficiency in the heating furnace. In terms of productivity, the robotic system increases production output by up to 200%, with operational costs reduced by 64%, and the manufacturing cost per unit decreased by 82%. Overall, this simulation suggests that the integration of robotic arms into automation systems can enhance cost efficiency, product quality, and the competitiveness of the manufacturing industry.

1. PENDAHULUAN

Pegas daun (*leaf spring*) merupakan komponen vital dalam industri manufaktur otomotif, terutama dalam sistem suspensi kendaraan. Fungsinya yang utama adalah meredam guncangan dan mengontrol transfer energi yang berpotensi merusak chassis kendaraan, sehingga pegas daun berperan penting dalam meningkatkan keamanan dan kenyamanan pengendara. Dalam konteks ini, industri manufaktur pegas daun dituntut untuk mampu memenuhi standar kualitas yang tinggi, mengoptimalkan biaya produksi, serta menjamin ketepatan

waktu pengiriman. Keberhasilan dalam hal ini sangat penting untuk memastikan daya saing dan keberlanjutan industri otomotif secara keseluruhan [1].

Robot lengan memiliki peran penting pada penerapan industri 4.0 dalam manufaktur otomotif dengan meningkatkan kemampuan sistem otomasi pada tugas-tugas seperti *assembly*, *welding*, dan *material handling*, peran robot lengan tersebut berdampak pada peningkatan produktivitas serta penurunan biaya produksi [2], [3]. Dengan integrasi antara robot lengan dan sistem otomasi pada industri manufaktur otomotif banyak keuntungan yang dapat didapatkan, Namun juga terdapat sejumlah tantangan baik dari segi teknis seperti integrasi sistem otomasi dan robot lengan maupun dari segi non-teknis seperti kebutuhan tenaga kerja yang memiliki keahlian khusus dalam mengoperasikan dan merawat sistem yang telah diimplementasikan [4].

Dalam proses integrasi robot, pemrograman pada robot dapat dikategorikan menjadi 2 tipe yaitu *Offline programming* dan *online programming*. *Online programming* merupakan pemrograman yang membutuhkan robot aktual dimana operator menggerakkan robot pada posisinya dengan menggunakan *teach pendant*, sedangkan *offline programming* adalah pemrograman yang tidak membutuhkan robot aktual dalam proses pengembangan program pergerakan dan logika yang akan diimplementasikan [5], Sehingga pengembangan dan uji coba program robot dapat dilakukan tanpa mengganggu produksi, meminimalisir *down-time* dari proses produksi [6], [7]. Pemrograman *offline* dilakukan melalui perangkat lunak salah satu perangkat lunak yang digunakan adalah Roboguide. Roboguide merupakan perangkat lunak simulasi robot yang dikembangkan oleh FANUC yang memberikan *user* kemampuan untuk mendesain lingkungan virtual yang kompleks serta mensimulasikan robot pada lingkungan tersebut [8]. Roboguide juga memiliki beberapa fitur seperti simulasi *cycle-time* [9], serta integrasi dengan PLC dan HMI untuk melakukan simulasi *Hardware-in-Loop* (HiL) [10].

Integrasi sistem otomasi dan robot lengan pada lini produksi pegas daun menjadi salah satu solusi efektif untuk memastikan tercapainya aspek kualitas, efisiensi, dan ketepatan waktu pengiriman,. Dengan sistem otomasi robotik, variabilitas dari produk yang dihasilkan berkurang, memberikan kontribusi pada peningkatan konsistensi dan kualitas produk [11]. Selain itu, sistem otomasi memungkinkan pengurangan tenaga kerja untuk proses manual, yang menjadikan biaya produksi berkurang [12]. Penggunaan sistem otomasi juga dapat mempercepat waktu siklus produksi atau *cycle-time* produksi yang secara linear meningkatkan kapasitas produksi dari sebuah lini produksi, hal ini dikarenakan sistem otomasi dapat mengerjakan pekerjaan repetitif tanpa henti [13]. Maka dari itu, sistem otomasi pada industri manufaktur pegas daun merupakan sebuah solusi efektif yang mampu meningkatkan performa produksi baik dari segi kualitas maupun kuantitas, serta memberikan dampak positif pada efisiensi biaya operasional produksi [14].

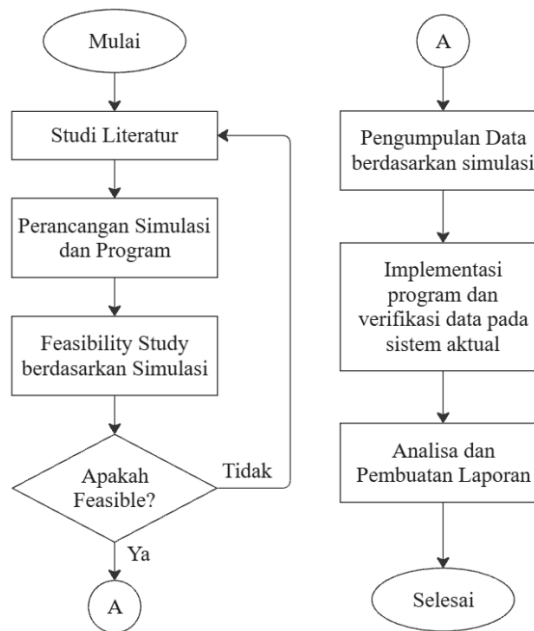
Feasibility study berbasis simulasi pada aplikasi robot dalam sistem otomasi industri manufaktur otomotif memberikan keuntungan berupa peningkatan efisiensi, akurasi, dan efektivitas biaya pada proyek yang dikerjakan. Simulasi memberikan representasi pergerakan sistem yang akurat dari sistem aktual, sehingga implementasi pada line produksi dapat dilakukan dengan tepat dan presisi, meningkatkan tingkat kesuksesan proyek yang dijalankan [15]. Selain itu, simulasi virtual memfasilitasi pemrograman *offline* yang memberikan kesempatan untuk melakukan pengembangan dan *debugging* sebelum instalasi pada *line* produksi dilakukan [16], Sehingga pengetesan dari program pergerakan dan logika robot dapat dilakukan tanpa mengganggu lini produksi [17], [18]. Pengetesan yang dilakukan melalui *offline programming* dapat mendeteksi potensi bahaya sehingga kerugian berupa kerusakan pada mesin maupun *safety* dari operator dapat dihindarkan dengan pembuatan dan implementasi standar operasi mesin yang tepat guna dan akurat [15], [19]. Maka dari itu, dengan melakukan *feasibility study* berbasis simulasi secara komprehensif, pengurangan waktu *commissioning* dan percepatan waktu *deployment* dari sistem otomasi dapat dicapai sehingga dapat mengurangi *down time* dari produksi.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, akan dilakukan *feasibility study* berbasis simulasi dengan menggunakan perangkat lunak Roboguide pada sistem transfer *camber* di lini produksi heating pada manufaktur pegas daun untuk meningkatkan efisiensi dari integrasi sistem robot dan sistem otomasi baik pada fase instalasi maupun fase produksi.

Penelitian ini mengarah pada *feasibility study* dari proyek otomasi transfer *heating production line* pada industri manufaktur pegas daun dimana proyek otomasi memodifikasi proses transfer konvensional yang menggunakan tenaga manusia menjadi proses transfer otomatis menggunakan 2 buah robot lengan. Studi kelayakan dilakukan menggunakan perangkat lunak Roboguide untuk meneliti kelayakan teknis, waktu-siklus, serta produktivitas dari sistem yang telah dirancang. Metodologi penelitian terbagi menjadi beberapa tahapan yang terstruktur. Penelitian memiliki 4 tahapan utama yaitu perancangan simulasi dan pemrograman pada

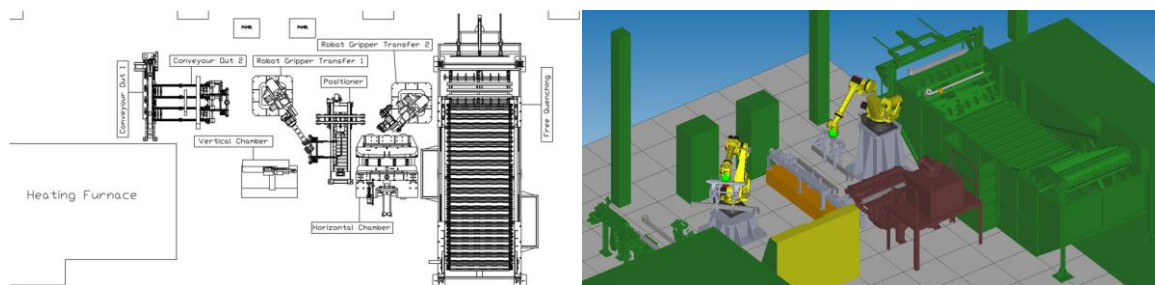
Roboguide, analisa kelayakan teknis sistem pada Roboguide, implementasi program serta verifikasi data pada sistem aktual, dan analisa produktivitas dari sistem yang akan diimplementasikan, Gambar 1 merupakan *flowchart* yang memvisualisasikan tahapan-tahapan yang akan dilakukan pada penelitian ini.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

2.1. Perancangan Simulasi dan Pemrograman

Perancangan simulasi dilakukan di dalam lingkungan virtual Roboguide, dengan memanfaatkan aset tiga dimensi yang disediakan oleh Roboguide serta desain tiga dimensi dari sistem yang akan dibangun, yang dihasilkan melalui perangkat lunak eksternal. Aset-aset ini digunakan untuk membangun lingkungan virtual tiga dimensi yang merepresentasikan sistem yang sedang dikembangkan. Penataan dan penempatan aset tersebut dilakukan berdasarkan *layout* yang telah dirancang pada modifikasi sistem aktual. *Layout* ini mengacu pada sistem terdahulu yang menggunakan transfer konvensional dengan tenaga manusia. Dengan demikian, penyesuaian dilakukan untuk menggantikan sistem transfer manual dengan sistem transfer otomatis yang memanfaatkan dua buah robot lengan 6-axis. Gambar 2 memperlihatkan perbandingan antara *layout* dua dimensi dari sistem terdahulu dan lingkungan virtual yang telah dibuat di dalam Roboguide.



Gambar 2. Perbandingan *Layout* 2D dan Lingkungan 3D pada Perangkat Lunak Roboguide

Setelah membangun lingkungan 3 dimensi pada Roboguide, langkah selanjutnya adalah pemilihan model robot lengan 6-axis dan kontroler yang sesuai dengan kebutuhan sistem. Pada penelitian ini, robot tipe R2000i/165F dan kontroler Robot R30i Plus dipilih untuk diterapkan pada sistem transfer yang akan dibangun. Roboguide menyediakan pilihan untuk memilih model robot, kontroler, serta perangkat lunak yang digunakan pada kontroler tersebut. Selain itu, desain dan data terkait *workpiece* yang akan dikerjakan, yaitu KR-15 yang merupakan varian dengan spesifikasi terberat pada spesifikasi kerja yang telah dirancang untuk lini produksi *Heating Line*, akan dimasukkan ke dalam lingkungan 3 dimensi. Dengan memilih varian dengan spesifikasi terberat, seluruh varian produk dapat direpresentasikan dalam simulasi karena konfigurasi *payload* pada robot

dapat mengakomodasi varian-varian lain yang lebih ringan. Dengan memasukkan data *workpiece* yang akurat, simulasi yang dibangun semakin mendekati sistem aktual dan memberikan gambaran yang lebih realistis terhadap kinerja sistem. Data parameter terkait simulasi, spesifikasi kerja, serta spesifikasi dari varian KR-15 yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Parameter Simulasi Sistem

Parameter	Keterangan
Model Robot	R2000i/165F
Model Kontroler	R30iB Plus
Versi Perangkat Lunak	V9.10
Versi Workcell	HandlingPRO

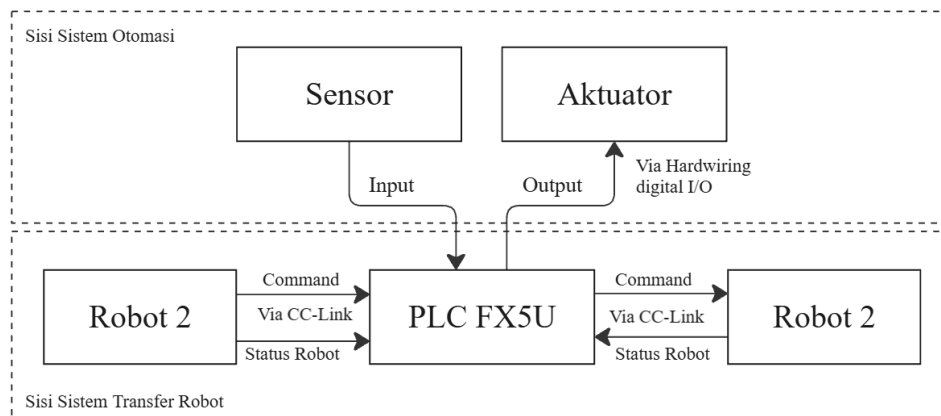
Tabel 2. Tabel Spesifikasi Kerja

Keterangan	Spesifikasi Kerja
Panjang Material	750 mm – 2500 mm
Lebar Material	70 mm – 120 mm
Tebal Material	26mm – 48 mm
Berat Material	Maksimal 45 kg

Tabel 3. Spesifikasi Material Tipe KR-15

Panjang	Lebar	Tebal	Berat
965 mm	100 mm	38 mm	43 kg

Setelah dilakukan konfigurasi sistem pada perangkat lunak Roboguide, dilakukan proses pemrograman *offline* pada Roboguide. Pemrograman *offline* dilakukan dengan beberapa tahap, pertama dilakukan pemetaan *input* dan *output digital* sebagai sarana komunikasi antara robot dan PLC, kemudian dilakukan konfigurasi komunikasi antara robot dan PLC via protokol komunikasi *CC-Link*, dimana Robot 1 dan 2 akan bertindak sebagai *slave* dan PLC sebagai *master* konfigurasi komunikasi ini dapat dilihat pada Gambar 3. Selanjutnya, dilakukan pemrograman pergerakan dengan menyimpan posisi robot pada titik-titik tertentu untuk menentukan jalur pergerakan, memilih tipe pergerakan seperti *linear* atau *joint*, serta mengatur kecepatan dan akselerasi pada setiap pergerakan. Terakhir dilakukan pemrograman logika dengan memasukkan syarat-syarat dan trigger dari PLC, serta memberikan informasi mengenai posisi robot kepada PLC. Terdapat 4 program yang akan dibuat pada tahap ini, pertama adalah program *manual run* untuk menggerakkan robot dengan instruksi operator via *Human Machine Interface* (HMI), kedua adalah program *auto run* untuk menggerakkan robot secara otomatis sesuai sekuens dari sistem *heating line*, ketiga adalah program *homing* yang digunakan untuk menggerakkan robot dari posisi mana saja kembali ke posisi *home* atau posisi awal.

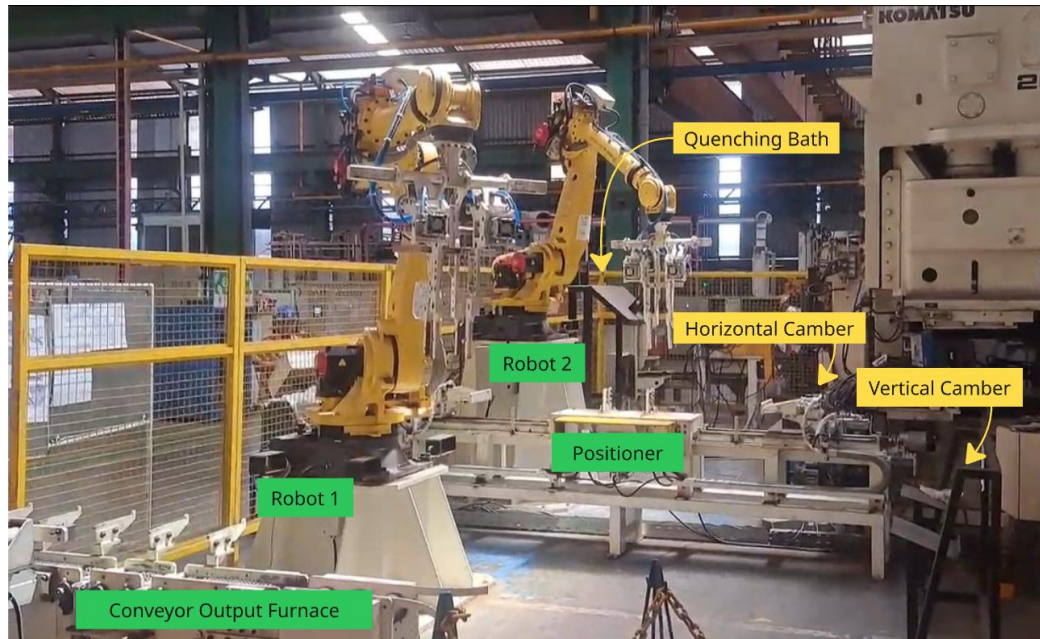


Gambar 3. Skema Sistem Transfer Otomatis

2.2. Pengujian pada Sistem *Hardware-in-Loop*

Setelah dilakukan pemrograman *offline* kemudian dilakukan pengujian dengan melibatkan dua buah robot dan sistem otomasi yang diajarkan dengan metode *Hardware-in-Loop*. Metode HiL dilakukan dengan

tujuan percobaan integrasi sistem, verifikasi data dari simulasi, dan melakukan uji coba sistem secara keseluruhan tanpa mengganggu aktivitas produksi pada lini produksi yang akan diotomasi. Dalam pengujian HiL yang akan dilakukan, sistem diposisikan berdasarkan desain *layout* yang telah dibuat. Sistem tambahan seperti *conveyor output furnace* dan *material positioner* diinstall dan difungsikan seperti pada sistem aktual nantinya berjalan, sedangkan sistem *vertical* dan *horizontal press camber* akan digantikan dengan meja peraga untuk menaruh material. Fungsi kerja *vertical* dan *horizontal press camber* akan direpresentasikan dengan lampu LED yang menandakan status dari mesin. Pada sisi robot, robot akan dikonfigurasi dan di *backup* dengan program hasil dari pemrograman *offline*. Akan ditambahkan fungsi *timer* untuk mengukur waktu dari tiap-tiap sekuens pergerakan dari robot. Pada Gambar 4 dapat dilihat area untuk pengujian HiL dengan dua robot yang telah dipasang oleh *gripper*.



Gambar 4. Layout untuk Proses Pengujian HiL

Pengujian juga dilakukan dengan membawa berbagai macam *workpiece* dari beberapa varian yang terdapat pada menu sistem *Heating Line*. Pengujian ini dimaksudkan untuk melihat kinerja robot dalam mengakomodasi berbagai macam varian produk, kinerja dilihat dari *lead time* dari masing-masing varian dengan pengaturan kecepatan yang sama. Pengujian dilakukan untuk menguji stabilitas dan fleksibilitas sistem terhadap variasi varian produk.

2.3. Analisa Produktivitas

Analisis produktivitas dalam penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi dampak implementasi sistem otomasi berbasis robot lengan 6-axis pada lini produksi *heating line*. Tujuan utama dari analisa produktivitas ini adalah untuk mengukur sejauh mana sistem baru meningkatkan output produksi serta efisiensi operasional dibandingkan dengan sistem konvensional yang sebelumnya digunakan. Perhitungan *Return on Investment* juga akan dilakukan pada sistem yang diajukan.

Pertama, analisa produktivitas dimulai dengan membandingkan waktu siklus antara sistem konvensional dan sistem otomasi berbasis robot lengan 6-axis yang diajukan. Waktu siklus dari masing-masing sistem digunakan untuk menghitung jumlah produk yang dihasilkan dalam satuan waktu. Hasil analisa dapat digunakan untuk menentukan kapasitas produksi dari sistem otomasi yang akan diimplementasikan. Untuk menghitung kapasitas produksi per-*shift* waktu siklus akan dibagi dengan waktu kerja selama satu *shift* dikurangi *downtime* mesin untuk melakukan *set-up* dan persiapan, kemudian hasil akan dikalikan dengan konstanta *availability* mesin yang merupakan rata-rata *availability* mesin pada PT.XYZ yaitu sebesar 80%. Perhitungan kapasitas produksi akan menjadi acuan penentuan target dari sistem otomasi yang akan diimplementasikan

$$\text{Kapasitas Produksi} = \frac{(\text{Waktu dalam satu shift} - \text{Waktu Downtime Mesin}) \times 3600}{\text{Waktu siklus mesin}} \times 0.8 \quad (1)$$

Selain itu, untuk memastikan efisiensi dari sistem, dilakukan juga perbandingan biaya operasional per-unit yang mencakup biaya *manpower* dan energi karena pada sistem ini dilakukan penghematan biaya operasional untuk *manpower* yang dialihkan pada energi yang dibutuhkan oleh sistem otomasi. Pada sistem robot juga dapat ditarik data pemakaian kWh dalam satu hari dari perangkat lunak Roboguide sehingga perhitungan biaya operasional bisa dihitung lebih akurat. Selain itu, perhitungan dari biaya manufaktur per kilogram juga akan dilakukan untuk mengetahui perbandingan dan penghematan yang dilakukan dalam aktivitas produksi. Diketahui pada sistem *heating line* yang akan diotomasi pada satu hari, rata-rata terdapat 4 kali set-up sehingga diketahui secara harian terdapat rata-rata 3 varian yang dikerjakan. Dari data yang didapatkan terdapat 2 varian yang dikerjakan secara reguler. Dari data output produksi *Heating Line*, didapatkan rata-rata berat dari satu buah produk yang keluar dari lini produksi adalah 27 kg. Data tersebut akan digunakan dalam perhitungan biaya manufaktur per kilogram. Rumus dari perhitungan tersebut dapat ditemui pada persamaan (2) dan (3).

$$\text{Biaya Operasional} = (\text{Jumlah manpower} \times \text{gaji manpower}) + \text{Biaya energi} \quad (2)$$

$$\text{Biaya Manufaktur} = \frac{\text{Biaya Operasional}}{\text{Output dalam Kg}} \quad (3)$$

Kemudian, perhitungan ROI juga dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas investasi dalam sistem otomasi. ROI dihitung dengan mengukur penghematan biaya yang dihasilkan dari peningkatan produktivitas dan pengurangan biaya tenaga kerja. ROI dihitung dengan membagi hasil penghematan dari sistem yang diajukan dengan total investasi dikalikan 100%. Dihitung juga *break-even point* atau BEP dari sistem berdasarkan penghematan sistem, dari hasil penghematan pertahun akan dikalkulasikan berapa tahun sistem akan mencapai BEP. Perumusan ROI dapat dilihat pada rumus (4)

$$\text{ROI} = \frac{\text{Penghematan per Tahun}}{\text{Biaya Investasi}} \times 100\% \quad (4)$$

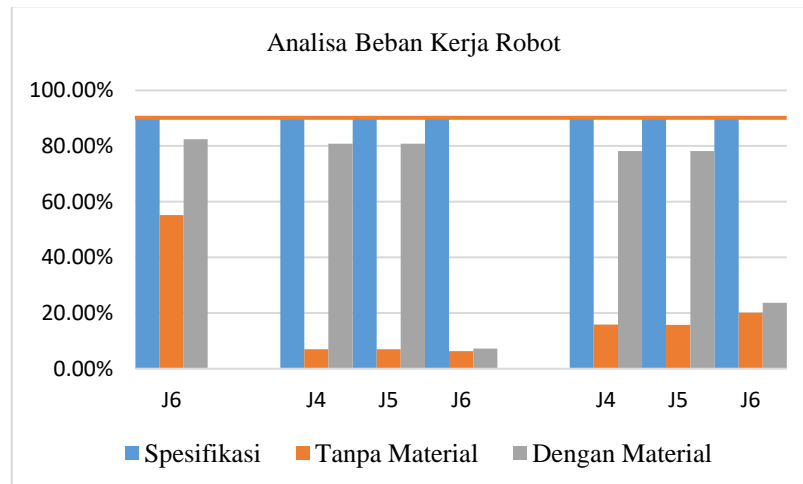
$$\text{BEP} = \frac{\text{Biaya Investasi}}{\text{Penghematan per Tahun}} \quad (5)$$

Biaya investasi mencakup 2 buah robot FANUC model R2000i/165F yang dibeli dengan harga diskon atas pembelian dengan jumlah banyak yang dilakukan PT.XYZ, biaya unit mekanik tambahan yaitu positioner yang, serta perangkat elektrik berupa sensor dan aktuator juga akan dihitung. Dikarenakan instalasi dilakukan oleh departemen proyek maka biaya instalasi akan dihitung dengan biaya *manpower* yang mengeksekusi proyek dikalikan jangka waktu 6 bulan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat beberapa hasil dan analisa yang didapatkan pada penelitian yaitu studi kelayakan teknis, waktu siklus sistem, dan produktivitas. Pertama dilakukan analisa terhadap kelayakan teknis beban muat terhadap spesifikasi robot. Dimana dilakukan ekstraksi data berupa data berat, serta koordinat pusat masa dan inersia pada sumbu x, y, z dari gripper robot dan material KR-15 pada perangkat lunak Solidworks, Material KR-15 digunakan sebagai acuan material terberat pada menu dikarenakan bobot material KR-15 berada pada 95% daripada bobot maksimal spesifikasi sistem. Kemudian dilakukan kalkulasi pada perangkat lunak Roboguide dan didapatkan hasil momen inersia terhadap J4, J5, dan J6 dari robot. Pada Gambar 5 terlihat bahwa dengan dan tanpa beban material, beban kerja dari robot masih sesuai dengan spesifikasi dari robot tipe R2000i/165F dimana presentase beban kerja pada lengan J4-J5 robot masih berada pada presentase 82.42%, hal ini masih dapat diterima karena beban kerja maksimal robot adalah 90% dari spesifikasi robot. Sehingga, varian-varian lain yang memiliki bobot kurang dari varian KR-15 dapat diakomodasi oleh sistem transfer yang dikerjakan.

Setelah dilakukan validasi terkait *payload* dari *workpiece* dilakukan pengujian waktu siklus dari robot baik dari simulasi maupun dengan metode HiL, pertama dibandingkan hasil simulasi dari perangkat lunak Roboguide dan metode HiL.



Gambar 5. Analisa Beban Kerja Robot

Dilakukan pengujian dan pengambilan data waktu siklus kedua robot baik dari simulasi dan dari metode HiL dengan kecepatan optimal yang didapatkan yaitu 85%. Dari data yang diperoleh, terdapat deviasi antara waktu siklus pada simulasi dan metode HiL, dimana waktu pada simulasi Robot 1 dan Robot 2 memiliki waktu siklus *Home-Home* yang lebih cepat dibandingkan metode HiL, dimana pada Robot 1 terdapat deviasi sebesar 0.21 detik dan pada Robot 2 terdapat deviasi sebesar 0.4 detik. Deviasi yang dialami tidak terlalu signifikan dikarenakan konfigurasi *payload* yang sudah sesuai antara simulasi dan kondisi aktual. Perbedaan didapatkan karena terdapat penyesuaian posisi yang dilakukan pada metode HiL pada robot 1 dan robot 2, pergeseran posisi tersebut mengakibatkan perbedaan waktu tempuh antara satu titik posisi ke titik posisi lainnya. Sehingga pada metode HiL dan metode simulasi terdapat perbedaan *lead time* sebesar 1 detik. Perbandingan antara waktu siklus dari data simulasi dan metode HiL dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan Waktu Siklus Simulasi dan HiL

Simulasi		Metode HiL	
Keterangan	Waktu	Keterangan	Waktu
<i>Home-Home</i> Robot 1	17.44 detik	<i>Home-Home</i> Robot 1	17.65 detik
<i>Home-Home</i> Robot 2	15.05 detik	<i>Home-Home</i> Robot 2	15.45 detik
<i>Lead Time</i>	46.9 detik	<i>Lead Time</i>	47.51 detik

Setelah itu, dilakukan pengujian untuk berbagai tipe varian pada metode HiL untuk menguji stabilitas dan fleksibilitas robot terhadap varian produksi dari lini produksi *heating*. Pengujian dilakukan dengan 4 tipe yaitu KR-15, MSM 02358-01, MSM 03630-02, dan MSM 02838-01. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem stabil dalam melakukan transfer dengan berbagai macam varian. Tidak ada perbedaan waktu antara 1 varian dengan varian lainnya. Hal ini dapat terjadi karena konfigurasi *payload* yang telah diset-up pada robot merupakan *payload* dengan varian terberat, sehingga varian-varian dibawah konfigurasi tersebut dapat teratasi dengan *tuning* robot terhadap *payload* terberat. Tabel 5 menunjukkan data *lead time* dari masing-masing varian pada pengujian HiL.

Tabel 5. Pengujian Metode HiL dengan Berbagai Varian Produk

Tipe Varian Produk	Waktu
KR-15	47.51 detik
MSM 02358-01	47.5 detik
MSM 03630-02	47.49 detik
MSM 02838-01	47.5 detik

Dari hasil pengujian metode HiL didapatkan waktu siklus untuk kedua robot, kemudian dilakukan analisa pergerakan waktu untuk menentukan waktu *feeding* dari *furnace*, Pada tabel 6 terlihat didapatkan waktu siklus untuk *feeding* dari *furnace* adalah 17 detik, dibandingkan dengan transfer manusia yang memiliki waktu *feeding* 34 detik. Selain itu waktu material dari keluar *furnace* hingga masuk pada proses *quenching* adalah 47.5 detik sedangkan transfer manusia membutuhkan waktu 72 detik. Hal ini berefek pada suhu pemanasan

dari *heating furnace*. Waktu proses transfer berpengaruh pada kebutuhan suhu pemanasan material dimana semakin lama waktu proses transfer maka semakin tinggi pula suhu yang harus dicapai oleh material. Hal ini dikarenakan terdapat standar proses *quenching* membutuhkan suhu diatas 750°C. Dengan konstanta pendinginan material sebesar 3°C per detik didapati bahwa suhu pemanasan material pada sistem transfer menggunakan robot adalah 920°C dimana suhu pemanasa 5% lebih rendah bila dibandingkan dengan suhu pada transfer manusia berefek pada efisiensi bahan bakar yang digunakan pada *furnace*. Penurunan suhu *heating furnace* juga berdampak pada efisiensi energi yang dibutuhkan oleh *heating furnace* khususnya pada sumber energi gas. Dimana pada transfer manusia kebutuhan gas akan cenderung lebih tinggi karena kebutuhan pemanasan yang semakin tinggi, dibandingkan sistem transfer berbasis robot lengan 6-axis yang membutuhkan suhu pemanasan yang lebih rendah. Selain itu, suhu proses *quenching* juga lebih tinggi 3% bila dibandingkan dengan proses dengan transfer manusia, Hal ini berdampak pada kualitas produk dimana suhu proses *quenching* dengan menggunakan robot berada pada suhu optimal dari standar yaitu 780°C. Tabel 6 memuat perbandingan waktu siklus dari masing-masing metode.

Tabel 6 Perbandingan Waktu Siklus Transfer Robot dan Manusia

Keterangan	Transfer Robot	Transfer Manusia	Presentase
Lead Time	47.5	72	64%
Cycle Time	17	34	50%
Suhu Proses Quenching	778°C	754°C	103%
Suhu Pemanasan Material	920°C	970°C	95%

Pada sisi produktivitas, sistem transfer otomatis berbasis robot lengan 6-axis memiliki waktu siklus yang lebih cepat yang berdampak pada peningkatan kapasitas produksi. Dengan menggunakan waktu siklus yang didapatkan pada pengujian HiL, dapat dilakukan kalkulasi kapasitas produksi dari sistem transfer otomatis dengan menggunakan rumus (3). Dengan rata-rata set-up terjadi 3 kali dalam 1 *shift* dan *availability* mesin berada pada angka 80%. Maka didapatkan kapasitas produksi dari sistem terbaru adalah 1270 produk per-*shift*. Dibandingkan dengan target sistem aktual yang saat ini hanya berada pada 600 produk per-*shift*, sehingga sistem transfer otomatis berbasis robot 6-axis meningkatkan kapasitas produksi sebesar 212% dari sistem aktual. Selain itu, sistem transfer otomatis berbasis robot 6-axis hanya membutuhkan 2 *manpower* untuk pengoperasiannya. Dibandingkan dengan transfer manusia yang membutuhkan 6 *manpower*, sistem transfer otomatis berbasis robot menawarkan biaya operasional yang lebih murah bila dibandingkan dengan sistem transfer berbasis manusia. Perbandingan biaya operasional dilakukan antara kedua sistem, dimana biaya operasional pada sistem transfer robot hanya bergantung pada 2 *manpower* dan harga energi listrik yang dibutuhkan oleh robot, sedangkan biaya operasional sistem transfer manusia bergantung pada biaya 6 *manpower*. Data kwh robot didapatkan melalui *software* Roboguide sebesar 28.17 kWh per *shift* atau seharga Rp 28.077. Dengan menggunakan gaji *manpower* berdasarkan Upah Minimum Kerja yang diterapkan di Kabupaten Gresik, didapatkan gaji *manpower* dalam 1 hari adalah Rp 195,935.00, sehingga dalam satu hari biaya operasional dari transfer berbasis manusia didapatkan sebesar Rp 1,175,610.00 dan transfer berbasis robot didapatkan sebesar Rp 419.947.04, Terlihat terjadi penurunan biaya operasional sebesar 64% dari biaya operasional metode sebelumnya. Data dari perbandingan produktivitas antara sistem transfer robot dan manusia dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Produktivitas Sistem Transfer Manusia dan Robot

Keterangan	Transfer Robot	Transfer Manusia	Presentase
Kapasitas Produksi	1270	600	212%
Tenaga Kerja	2	6	33%
Biaya Operasi	Rp 419,947.04	Rp 1,175,610.00	36%

Kemudian dihitung presentase ROI dari sistem transfer otomatis berbasis robot lengan 6-axis, pertama dibutuhkan data investasi atau *Capital Expenditure* yang dibutuhkan dalam proses instalasi sistem. Dikarenakan instalasi dilakukan oleh department *in-house* dari PT. XYZ maka investasi instalasi akan dihitung dari total gaji *manpower* yang mengerjakan selama 6 bulan proyek berlangsung dimana terdapat 3 *manpower* yang mengerjakan proyek sehingga didapatkan biaya instalasi sebesar Rp 104,400,000.00. Kemudian harga 2 set robot Fanuc tipe R2000i/165F yang didapatkan dengan harga Rp 600,000,000.00. Selanjutnya biaya fabrikasi sistem mekanikal tambahan seperti *positioner* dan *C/V output heating* oleh vendor eksternal didapatkan penawaran dengan harga Rp 84,000,000.00. Selanjutnya dihitung penghematan yang dilakukan dalam 1 tahun dengan implementasi sistem yang telah dibuat. Dari perbandingan biaya operasional antara sistem transfer berbasis manusia dan robot, didapatkan penghematan dalam setahun sebesar Rp253,902,768.00. Penghematan

dicapai dengan pengurangan *manpower* sebanyak 4 orang yang digantikan dengan energi yang dibutuhkan Robot. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rumus (4) dan (5). Dimana didapatkan ROI dari sistem sebesar 32.2% dan BEP selama 3 tahun 2 bulan. Data biaya investasi ROI dan BEP dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Biaya Investasi, ROI, dan BEP sistem transfer otomatis berbasis robot lengan 6-axis

Keterangan	Investasi
Fanuc Robot set 2 pcs	Rp 600,000,000.00
Fabrikasi	Rp 84,000,000.00
Instalasi	Rp 104,400,000.00
Total	Rp 788,400,000.00
ROI	32.20%
BEP	3 tahun 2 bulan

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini terdapat kesimpulan dan saran atau rekomendasi yang didapatkan, berikut merupakan hasil kesimpulan dan saran yang didapatkan.

4.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian metode *Hardware-in-Loop* yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem otomasi berbasis robot lengan 6-axis pada lini produksi *heating* di industri manufaktur pegas daun memberikan dampak yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi operasional, produktivitas, dan kualitas produk secara keseluruhan. Sistem robotik yang diusulkan berhasil mengurangi waktu siklus transfer material hingga 50%, dengan waktu siklus transfer robot yang tercatat hanya 17 detik untuk berbagai tipe varian, dibandingkan dengan 34 detik pada metode transfer manual. Keunggulan ini tidak hanya mempercepat proses produksi tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada *furnace*, di mana suhu pemanasan material yang dihasilkan oleh sistem robotik lebih optimal, yaitu 920°C, yang lebih rendah 5% dibandingkan dengan suhu pada metode manual yang mencapai 970°C. Efisiensi energi yang lebih baik ini turut mengurangi konsumsi bahan bakar *furnace*, yang secara langsung berkontribusi pada pengurangan biaya operasional.

Lebih jauh lagi, hasil pengujian menunjukkan peningkatan kapasitas produksi yang signifikan bila dibandingkan dengan sistem aktual. Terjadi kenaikan kapasitas produksi sebesar 212% atau sebesar 1270 produk per-*shift*, dibandingkan dengan sistem aktual yang saat ini memiliki kapasitas produksi sebanyak 600 produk per-*shift*. Sementara, jumlah tenaga kerja yang dibutuhkan berkurang drastis, dari 6 tenaga kerja pada metode manual menjadi hanya 2 tenaga kerja pada sistem robotik. Hal ini berimbas pada pengurangan biaya operasional sebesar 64%, yang menjadikan sistem robotik lebih ekonomis dan kompetitif.

Dalam tinjauan finansial dihitung nilai *Return of Investment* (ROI) dan *Break-even Point* (BEP) dengan penghematan biaya operasional sebesar 64% didapatkan nilai ROI sebesar 32,2% mengindikasikan efektivitas dari investasi sistem transter otomatis berbasis robot lengan 6-axis yang akan diimplementasikan. Selain itu, dengan hanya penghematan didapatkan BEP selama 3 tahun 2 bulan, menunjukkan bahwa investasi dalam sistem robotik ini akan memberikan keuntungan dalam jangka menengah dan panjang. Dengan peningkatan kapasitas produksi sebesar 212% kapabilitas peningkatan *revenue* dari output produk juga semakin meningkat, dapat disimpulkan sistem transfer otomatis yang diajukan tidak hanya mengurangi biaya operasional namun meningkatkan daya sayng industri.

Dengan mempertimbangkan hasil-hasil tersebut, penerapan sistem otomasi berbasis robot lengan 6-axis terbukti menjadi solusi yang sangat efektif untuk menghadapi tantangan-tantangan yang ada dalam industri manufaktur, khususnya pada sektor otomotif. Pengurangan biaya, peningkatan kualitas produk, serta efisiensi operasional yang dihasilkan dari sistem robotik ini memberikan kontribusi besar terhadap daya saing industri. Oleh karena itu, integrasi robot lengan dalam sistem otomasi tidak hanya memberikan keuntungan dari segi teknis, tetapi juga merupakan langkah strategis yang mendukung keberlanjutan dan pertumbuhan industri manufaktur di masa depan. Hal ini semakin mempertegas bahwa robotika dan otomasi memainkan peran penting dalam memodernisasi lini produksi, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan kinerja industri secara keseluruhan. Penggunaan sistem otomasi pada lingkungan industri manufaktur memiliki dampak yang signifikan khususnya pada biaya operasional dari industri tersebut. Pada penelitian ini, sistem otomasi yang dirancang memiliki produktivitas yang lebih tinggi 200% bila dibandingkan dengan lini produksi yang menggunakan sistem transfer konvensional yang masih menggunakan manusia. Selain itu, biaya operasional juga dapat diturunkan dengan pengurangan biaya *manpower* yang digantikan dengan biaya operasional robot dengan penurunan yang signifikan hingga 64%. Sehingga dalam jangka panjang, penggunaan robot pada sistem transfer *heating line* pada PT. XYZ dapat memberikan keuntungan yang berkelanjutan.

4.2. Saran

Setelah penelitian dilakukan terdapat beberapa saran dan rekomendasi yang ditemukan terkait sistem dan penelitian yang dilakukan. Pertama adalah efisiensi penggunaan robot, pada penelitian ini digunakan dua buah robot lengan 6-axis untuk melakukan proses transfer satu buah produk dari *output furnace* hingga *input quenching bath*. Penggunaan dua buah robot untuk melakukan satu tugas secara sekuensial mempercepat proses waktu siklus namun memakan biaya investasi yang lebih tinggi, rekomendasi dari penulis adalah utilisasi *axis* ke-7 atau J7 dimana robot dapat bergerak pada suatu sumbu, dengan mengimplementasikan penambahan *axis* diharapkan biaya investasi dari sistem yang diajukan dapat berkurang. Kedua, adalah peningkatan fleksibilitas dan ekspansibilitas dari sistem transfer, pada saat ini sistem transfer yang diajukan hanya dapat mengerjakan varian terberat yaitu KR-15, ketika terdapat penambahan produk dengan berat lebih, maka sistem tidak dapat mengakomodasi varian tersebut. Perhitungan ekspansibilitas dan fleksibilitas dari sistem harus diperhitungkan sebelum proses desain dan fabrikasi dilakukan untuk memberikan ruang kepada *user* untuk meningkatkan spesifikasi produk yang dapat dikerjakan pada sistem yang dibuat, sebagai contoh penggunaan model robot bias diubah ke R2000i/210F yang memiliki spesifikasi *payload* yang lebih tinggi. Ketiga, adalah penambahan analisa hasil kualitas produk yang dihasilkan dari sistem, dimana pada saat ini proyek masih belum pada tahap implementasi sehingga data untuk kualitas belum dapat diambil dan diverifikasi, ada baiknya dipenelitian kedepan, dapat diukur *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) yang tidak hanya menyangkut *availability* dan *productivity* dari sistem, Namun juga *quality* dari sistem. Terakhir, adalah penambahan analisa profitabilitas dari sistem yang diimplementasikan berdasarkan harga produk di pasaran. Dengan adanya sistem bagaimana nantinya produk bias makin bersaing, dan bagaimana keuntungan hasil produk mempengaruhi BEP dari sistem yang diajukan juga dapat dianalisa secara mendalam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. A. Gök, "Prototype production and investigation of mechanical properties of leaf springs used in air suspension systems," *Eng. Solid Mech.*, vol. 12, no. 1, pp. 33–40, 2024, doi: 10.5267/j.esm.2023.7.004.
- [2] S. Sanjeev Vyaas, G. Shamsudeen Babu, S. S. Raghulnath, P. Manikandan, and E. Joel, "Robotic Arm for Industry Automation," in *Intelligent Robots and Cobots*, 1st ed., V. Ramasamy, S. Balamurugan, and S. Peng, Eds., Wiley, 2025, pp. 203–220. doi: 10.1002/9781394198252.ch10.
- [3] M. Gooroochurn, "Robotics and Automation in Industry 4.0," in *Intelligent and Sustainable Engineering Systems for Industry 4.0 and Beyond*, 1st ed., Boca Raton: CRC Press, 2025, pp. 71–91. doi: 10.1201/9781003511298-4.
- [4] R. Adekola Adebayo, N. Constance Obiuto, I. Clinton Festus-Ikhuoria, and O. Kayode Olajiga, "Robotics in Manufacturing: A Review of Advances in Automation and Workforce Implications," *Int. J. Adv. Multidiscip. Res. Stud.*, vol. 4, no. 2, pp. 632–638, Mar. 2024, doi: 10.62225/2583049X.2024.4.2.2549.
- [5] P. Pasang, P. Kerdsonmya, J. Kunanopadol, V. Mettanant, and T. Katejanekarn, "Simulation of a welding station with RobotStudio," *Sci. Eng. Health Stud.*, p. 24040010, Dec. 2024, doi: 10.69598/sehs.18.24040010.
- [6] F. Müller, M. Koch, and A. Hasse, "User Study to Validate the Performance of an Offline Robot Programming Method That Enables Robot-Independent Kinesthetic Instruction through the Use of Augmented Reality and Motion Capturing," *Robotics*, vol. 13, no. 3, p. 35, Feb. 2024, doi: 10.3390/robotics13030035.
- [7] H. Fu, Y. Bai, R. Sun, and C. Pang, "Technical analysis and research based on offline programming software for robots," in *International Conference on Advanced Manufacturing Technology and Manufacturing Systems (ICAMTMS 2022)*, Q. Deng, Ed., Shijiazhuang, China: SPIE, Aug. 2022, p. 105. doi: 10.1117/12.2645794.
- [8] Petroleum-Gas University of Ploiesti, Romania, D.-L. Baboi, J. Andreoiu, Petroleum-Gas University of Ploiesti, Romania, G. Bucur, and Petroleum-Gas University of Ploiesti, Romania, e-mail:gbucur@upg-ploiesti.ro, "ARC WELDING ROBOTIC FLEXIBLE CELL SIMULATION USING ROBOGUIDE SOFTWARE," *Romanian J. Pet. Gas Technol.*, vol. 5 (76), no. 1, pp. 145–158, Aug. 2024, doi: 10.51865/JPGT.2024.01.11.
- [9] A. A. Santos, J. Haladus, F. Pereira, C. Felgueiras, and R. Fazenda, "Simulation Case Study for Improving Painting Tires Process Using the Fanuc Roboguide Software," in *Flexible Automation and Intelligent Manufacturing: Establishing Bridges for More Sustainable Manufacturing Systems*, F. J. G. Silva, A. B. Pereira, and R. D. S. G. Campilho, Eds., in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 517–524. doi: 10.1007/978-3-031-38241-3_58.
- [10] N. Rawashdeh, R. Bondalapati, P. Patil, G. S. Ajmani, and S. Akki, "Hardware-in-the-loop Simulation of a Programmable Logic Controller, Industrial Robots and Conveyor Systems Using RoboGuide," in *2024 22nd International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, Amman, Jordan: IEEE, Sep. 2024, pp. 132–137. doi: 10.1109/REM63063.2024.10735684.
- [11] B. Lal, V. S. N, M. A. Kumar, N. Chinthamu, and S. Pokhriyal, "Development of Product Quality with Enhanced Productivity in Industry 4.0 with AI Driven Automation and Robotic Technology," in *2023 Second International*

- Conference on Augmented Intelligence and Sustainable Systems (ICAISS), Trichy, India: IEEE, Aug. 2023, pp. 184–189. doi: 10.1109/ICAISS58487.2023.10250736.
- [12] H. Zhang, “Optimization and Efficiency Improvement of Robot-based Industrial Production Process,” *Int. J. New Dev. Eng. Soc.*, vol. 8, no. 2, 2024, doi: 10.25236/IJNDES.2024.080214.
- [13] H. K. Banga, P. Kalra, R. Kumar, S. Singh, and C. I. Pruncu, “Optimization of the cycle time of robotics resistance spot welding for automotive applications,” *J. Adv. Manuf. Process.*, vol. 3, no. 3, p. e10084, Jul. 2021, doi: 10.1002/amp2.10084.
- [14] M. Zhang, “Practical Analysis of Mechanical Automation Technology in Automobile Manufacturing,” *J. Electron. Res. Appl.*, vol. 7, no. 5, pp. 26–31, Sep. 2023, doi: 10.26689/jera.v7i5.5367.
- [15] Z. Zhang, R. Dershan, A. M. S. Enayati, M. Yaghoubi, D. Richert, and H. Najjaran, “A High-Fidelity Simulation Platform for Industrial Manufacturing by Incorporating Robotic Dynamics Into an Industrial Simulation Tool,” *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 9123–9128, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3190096.
- [16] L. Zhang and Z. Yu, “Industrial robot simulation manufacturing based on big data and virtual reality technology,” *J. Robot. Intell. Agents Artif. Intell.*, vol. 14, no. 1, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1515/pjbr-2022-0124>.
- [17] M. Gautam, H.-M. Yonamine, and F. Christophe, “Robotic Simulation to implementation: An industrial case study,” presented at the The Eleventh International Conference on Engineering Computational Technology, Montpellier, France, pp. 1–8. doi: 10.4203/cc.2.16.2.
- [18] W. A. Szulc and P. Czop, “The Effectiveness of a Robotic Workstation Simulation Implementation in the Automotive Industry Using a Closed-Form Solution of the Absolute Orientation Problem,” *Robotics*, vol. 13, no. 11, p. 161, Oct. 2024, doi: 10.3390/robotics13110161.
- [19] L. Klingel, A. Heine, S. Acher, N. Dausend, and A. Verl, “Simulation-Based Predictive Real-Time Collision Avoidance for Automated Production Systems,” in *2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, Auckland, New Zealand: IEEE, Aug. 2023, pp. 1–6. doi: 10.1109/CASE56687.2023.10260637.

Perancangan dan Pemodelan PLTS *Off-Grid* dengan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis Supercapacitor-Baterai: Studi Kasus di Desa Karamina, Papua

Design and Modeling of Off-Grid Solar Power Plant with Hybrid Energy Storage Based on Supercapacitor-Battery: A Case Study in Karamina Village, Papua

Dwi Sahidin¹, Boy Ihsan², Tri Desmana Rachmildha³, Deny Hamdani⁴

¹Program Studi Teknik Listrik – Politeknik Negeri Cilacap

¹Jl. Dr. Soetomo No.1, Sidakaya, Kab. Cilacap, Jawa Tengah 53212, Indonesia

²Program Studi Teknik Elektro S1 – Universitas Riau

²Simpang Baru, Kec. Tampan, Kota Pekanbaru, Riau 28293, Indonesia

^{3,4}Sekolah Teknik Elektro dan Informatika – Institut Teknologi Bandung

^{3,4}Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kec. Cobleng, Kota Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

email: ¹dwisahidin@pnc.ac.id, ²boy.ihsan@lecturer.unri.ac.id, ³trides@konversi.ee.itb.ac.id,

⁴denyhamdani@itb.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 20 April 2025

Diterima, 25 Mei 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

Kata Kunci :

Energi Terbarukan, Solar PV, Penyimpanan Energi, Supercapacitor, Baterai

Keyword :

Renewable Energy, Solar PV, Energy Storage, Supercapacitor, Battery

ABSTRAK

Desa Karamina di Papua merupakan wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik PLN. Penelitian ini bertujuan merancang dan memodelkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid dengan penyimpanan energi hibrida berbasis superkapasitor dan baterai. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB dan Simulink untuk mengevaluasi kinerja sistem terhadap variasi radiasi matahari, perubahan beban, serta kondisi inrush current. Hasil menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus pada kondisi dinamis. Supercapacitor efektif meredam fluktuasi daya dan mengurangi arus riak pada baterai, sehingga memperpanjang umur baterai. Integrasi superkapasitor-baterai dalam sistem PLTS off-grid memberikan solusi andal dan efisien untuk elektrifikasi daerah terpencil seperti Desa Karamina.

ABSTRACT

Karamina Village in Papua is a remote area not yet connected to the national electricity grid. This study aims to design and model an off-grid Solar Power Plant (PLTS) system integrated with hybrid energy storage combining supercapacitors and batteries. Simulations were conducted using MATLAB and Simulink to evaluate the system's performance under varying solar irradiance, load fluctuations, and inrush current conditions. The results show that the system is capable of maintaining voltage and current stability under dynamic operating conditions. The supercapacitor effectively mitigates power fluctuations and reduces the ripple current on the battery, thereby extending its lifespan. At night, the battery supplies power to the load, while during the day, solar energy is used for recharging. The system also demonstrates resilience against transient disturbances. The integration of supercapacitor-battery storage in an off-grid PLTS system provides a reliable and efficient solution for electrifying remote areas such as Karamina Village.

1. PENDAHULUAN

Pembangkitan listrik dari sumber energi terbarukan terus tumbuh dari tahun ke tahun, baik dalam skala besar dan terhubung secara *on-grid* maupun dalam skala yang lebih kecil berupa microgrid yang terhubung secara *off-grid*, meskipun ada anomali penggunaan energi dan listrik global terkait dengan pandemi COVID-19 [1]. Energi terbarukan merupakan alternatif yang sangat baik untuk mencapai tujuan *green energy* yang bebas dari emisi karbon, dimana hal ini sudah dicanangkan semenjak Paris Agreement. Meskipun masih muncul tantangan dari pembangkit listrik energi terbarukan seperti adanya sifat intermittensi [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian dan pengembangan telah meningkat secara substansial dan telah menjadikan sumber energi terbarukan dari solar fotovoltaik (PV) sebagai sumber energi alternatif yang layak untuk dimanfaatkan. Tren peningkatan penggunaan energi listrik PV terkait dengan peningkatan efisiensi sel surya serta peningkatan teknologi manufaktur panel surya [3]. Untuk mendukung pengoperasian dari solar PV, integrasi dari Sistem Penyimpanan Energi Baterai (BESS) telah meningkat di beberapa tahun terakhir ini karena fleksibilitas, densitas energi yang tinggi, dan efisiensinya [4]. Selain itu pula muncul tantangan lain yaitu jaringan listrik utama tidak dapat mengaliri listrik ke daerah-daerah terpencil di berbagai wilayah di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Dengan demikian, elektrifikasi daerah-daerah terpencil menjadi mungkin dengan munculnya mikrogrid [5].

Di daerah pedesaan yang sering kali tidak memiliki akses ke jaringan listrik PLN, sistem *off-grid* merupakan satu-satunya solusi untuk pasokan listrik bagi konsumen. Untuk beban skala mikro seperti rumah kecil, biasanya digunakan generator diesel atau bensin [6]. Elektrifikasi dengan penggunaan energi terbarukan di daerah pedesaan terpencil dengan akses terbatas atau tidak ada sama sekali ke pasokan listrik dapat meningkatkan kualitas hidup masyarakat yang tinggal di daerah tersebut. Teknologi energi terbarukan dapat memainkan peran penting dalam pembangkitan listrik, karena perluasan jaringan listrik utama bukanlah pilihan yang hemat biaya di beberapa daerah tertentu [7].

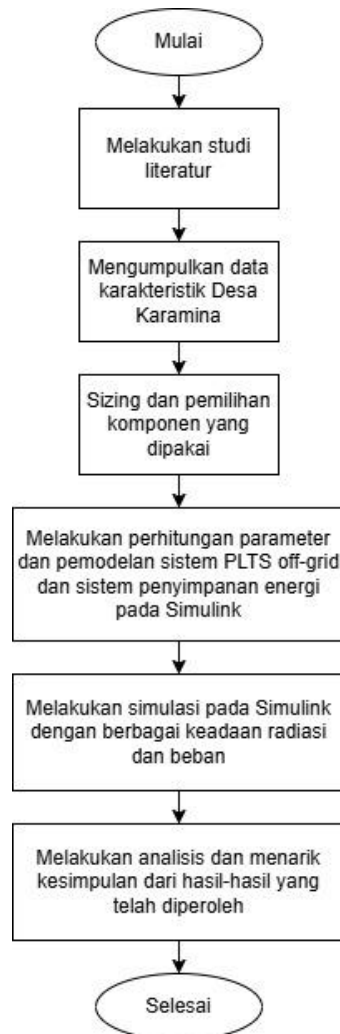
Pada penelitian [8] menyajikan sebuah model elektrifikasi pedesaan dengan menggunakan solar PV. Disimpulkan bahwa elektrifikasi pedesaan dengan solar PV adalah solusi yang paling tepat untuk memenuhi kebutuhan energi. Pada penelitian [9] meneliti mengenai penerimaan masyarakat pedesaan terhadap proyek pembangkit energi terbarukan mandiri. Dua survei dilakukan sebelum dan sesudah pemasangan energi terbarukan. Hasilnya secara keseluruhan, penduduk pedesaan pada umumnya mendukung proyek energi terbarukan dan juga teknologi energi terbarukan. Pada penelitian [10] membahas manfaat penggunaan software simulasi untuk pengembangan sistem energi terbarukan yang dirancang dan perbaikan desain yang dicapai dari hasil simulasi energi terbarukan. Pada penelitian [11] menyajikan optimalisasi sistem PLTS *off-grid* dengan penyimpanan baterai, yang dirancang khusus untuk mengatasi tantangan fluktuasi radiasi surya, perubahan tuntutan beban, dan umur baterai dalam aplikasi wilayah terpencil.

Sejalan dengan penggunaan solar PV untuk daerah pedesaan terpencil, penggunaan baterai sebagai pendukung sistem energi terbarukan menjadi sangat penting. Masalah muncul dengan penggunaan BESS karena terkadang tidak memperhatikan umur baterai. Padahal baterai sebagai pendukung utama energi terbarukan solar PV yang bersifat intermiten merupakan investasi yang cukup tinggi. Pada penelitian [12] dilakukan desain pembangkit energi terbarukan yang diintegrasikan dengan baterai dan superkapasitor yang diimplementasikan di daerah terpencil. Hasilnya, integrasi yang sukses antara sistem energi terbarukan hibrida dan sistem penyimpanan energi hibrida dapat digunakan untuk mengembangkan akses energi yang andal dan berkelanjutan wilayah terpencil. Pada penelitian [13] untuk meningkatkan masa pakai baterai dengan mengurangi arus pengisian dan menjaga SoC (*State of Charge*) baterai pada nilai yang lebih rendah jika daya PV cukup untuk memasok beban. Pada penelitian [14] mengembangkan sistem penyimpanan energi hibrida (HESS) yang meningkatkan kualitas daya dengan menggabungkan penyangga energi dalam penyimpanan listrik. Tujuannya adalah untuk memperdalam pemahaman tentang teknologi energi terbarukan dan memperkuat kemampuan analitis dalam sistem energi terbarukan. Sistem yang dibangun mengintegrasikan teknologi superkapasitor dalam HESS, yang memungkinkannya untuk memasok daya awal ke beban dan mengelola arus masuk secara efektif. Pada penelitian [15] dan [16] menunjukkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan integrasi superkapasitor pada sistem penyimpanan energi dapat mengurangi siklus *charge-discharge* baterai dan menstabilkan transien daya, sehingga memperpanjang umur baterai yang digunakan pada PLTS.

Pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan perancangan dan pemodelan dari PLTS yang diintegrasikan dengan penyimpanan energi hibrida superkapasitor-baterai untuk Desa Karamina, Papua, dimana penelitian-penelitian sebelumnya belum banyak mengeksplorasi pemanfaatan superkapasitor dalam konteks desa terpencil di Indonesia secara terintegrasi. Analisis yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi profil tegangan, arus, daya dan SoC akibat variasi radiasi matahari, perubahan beban, serta kondisi *inrush current*.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, metode penelitian yang digunakan ditunjukkan melalui diagram alir pada Gambar 1. Penelitian ini bersifat eksperimen yang berbasis simulasi. Perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini adalah Simulink untuk pemodelan sistem PLTS *off-grid* yang bertujuan untuk melihat profil tegangan dan arus sistem. MATLAB digunakan untuk melakukan pemodelan matematis sistem PLTS *off-grid* yang bertujuan untuk melihat profil daya.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.1. Objek Penelitian

Pada penelitian ini, lokasi yang dijadikan sebagai objek penelitian adalah Desa Karamina di Papua. Sebuah desa yang belum teraliri listrik terletak di kabupaten Yalimo distrik Benawa. Desa Karamina memiliki luas wilayah sebesar 36,4749 km². Desa ini memiliki 50 kepala keluarga dengan total jumlah populasi sebanyak 100 jiwa [15].

2.1.1. Potensi Energi Matahari Desa Karamina

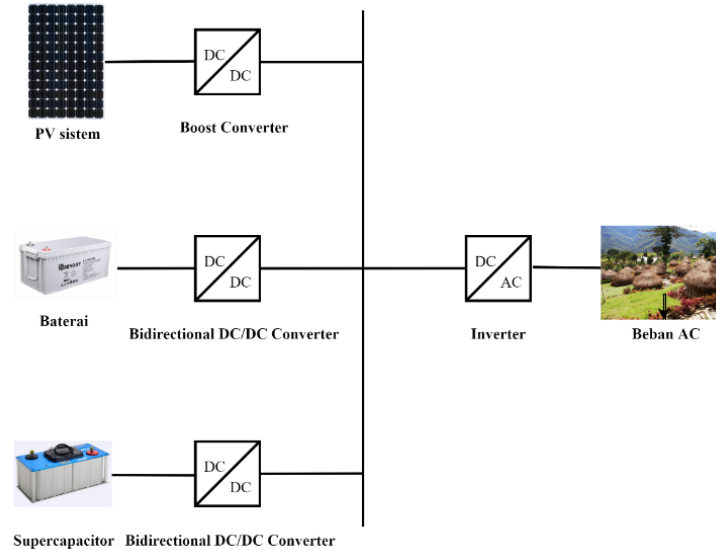
Berdasarkan data Global Solar Atlas, rata-rata harian radiasi sinar matahari yang mencapai permukaan tanah atau disebut nilai *Global Horizontal Irradiance* (GHI) pada Desa Karamina adalah sebesar 4,905 kWh/m² per hari dengan nilai radiasi langsung dari matahari atau *Direct Normal Irradiance* (DNI) sebesar 3,124 kWh/m² per hari.

2.1.2. Beban Listrik Desa Karamina

Pemodelan beban pada penelitian ini menggunakan model beban rumah tangga dengan total bangunan yang harus dilistriki di Desa Karamina sebanyak 28 bangunan. Besar energi harian yang dikonsumsi beban rumah tangga pada daerah 3T adalah sebesar 600 Wh berdasarkan pada kriteria dari Direktorat Jenderal Energi. Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE). Maka jumlah beban harian yang harus disuplai untuk Desa Karamina adalah sebesar 16,8 kWh dengan kurva beban harian mengacu pada beban tipikal di *rural areas*.

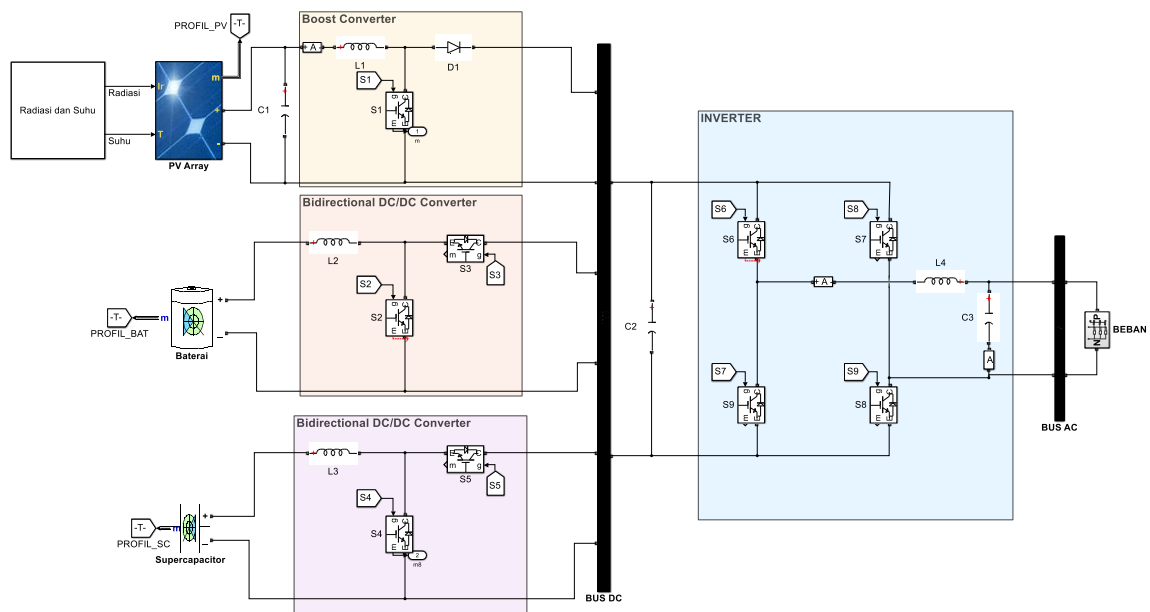
2.2. Pemodelan Sistem PLTS Off-Grid dengan Penyimpanan Energi Hibrida pada Simulink

Perancangan dan pemodelan PLTS *off-grid* dengan sistem *hybrid energy storage* yang terdiri dari baterai dan superkapasitor dapat menyediakan daya yang dibutuhkan beban dengan baik, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram rangkaian PLTS *Off-Grid*

Sistem ini terdiri dari PV *array* sebagai pembangkit energi listrik, baterai dan superkapasitor sebagai peralatan penyimpanan energi, seperti terlihat pada Gambar 3 mengenai pemodelan secara menyeluruh sistem PLTS *off-grid* pada Matlab/Simulink. Terminal keluaran PV terhubung dengan *boost converter* yang berfungsi untuk menaikkan tegangan dan aktuatur dari algoritma MPPT. Sistem PV ini juga dilengkapi dengan sebuah *inverter* untuk menyuplai daya ke beban AC dan dua *bidirectional DC-DC converter* untuk mengatur *charge* dan *discharge* daya pada superkapasitor dan baterai. Simulasi pada Simulink bertujuan untuk melihat profil tegangan, arus, daya dan kualitas daya sistem, terutama dalam rentang waktu yang pendek. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi parameter pada PLTS *off-grid* yang digunakan pada penelitian ini.

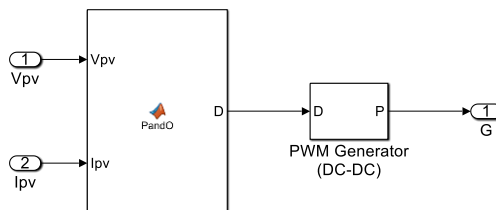


Gambar 3. Diagram Rangkaian PLTS *Off-Grid* yang Digunakan dalam Penelitian

Tabel 1. Parameter Komponen pada PLTS Off-Grid

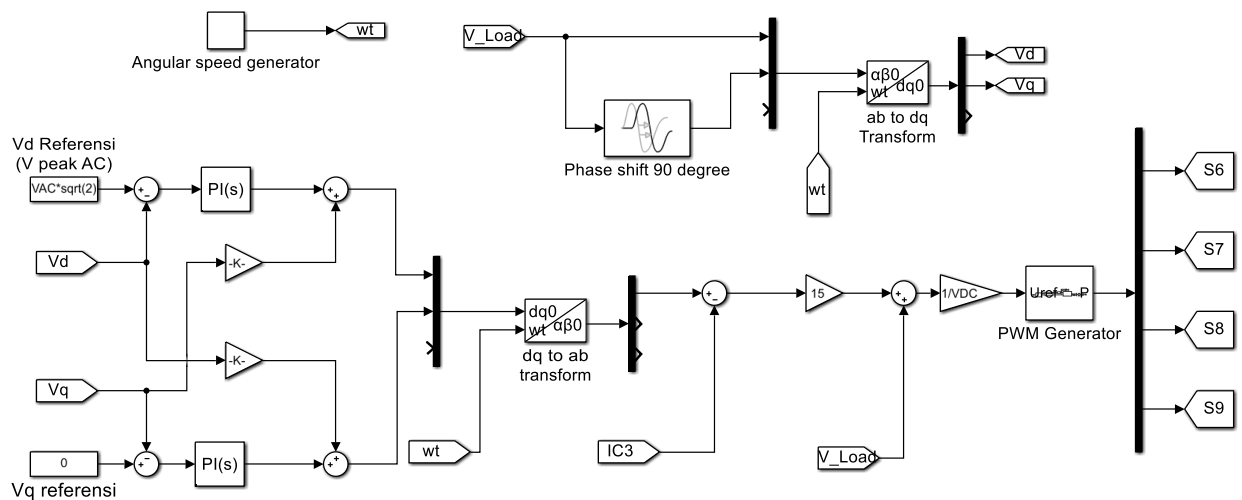
Spesifikasi Sistem	Parameter	Nilai	Satuan
Modul Surya	Jumlah sel per modul	120	Sel
	Dimensi	1721 x 1016 x 30	mm
	Berat	19,5	kg
	Rating daya	360	W
	Tegangan <i>open circuit</i>	44,1	V
	Arus hubung singkat	10,23	A
	Tegangan pada titik daya maksimum	37,7	V
	Arus pada titik daya maksimum	9,55	A
	Temperatur operasi	- 40 s/d +85	°C
	Efisiensi panel	20,6	%
Baterai	Tegangan nominal	12	V
	Kapasitas	200	Ah
	Berat	58	kg
	Temperatur operasi	0 - 50	°C
	Resistansi Internal	3	mΩ
Superkapasitor	Tegangan kerja	48	V
	Kapasitansi	165	F
	<i>Equivalent series resistance</i>	6	mΩ
	Energi tersimpan	53	Wh
	Arus maksimum	1900	A
	Berat	13,7	kg
Konverter	Jumlah Siklus Maksimum	1000000	Kali
	Rating daya AC	8000	W
	Daya maksimum PV array	5000 (Opsional 10000)	W
	Tegangan baterai	48	V
	Tegangan AC	220/230/240	V
	Frekuensi Tegangan AC	50/60	Hz
	Efisiensi <i>inverter</i>	88%	
	Efisiensi solar <i>charger</i>	98%	

Boost converter digunakan sebagai penggerak dari algoritma MPPT untuk melacak titik maksimum pembangkitan daya panel surya. *Boost converter* dilengkapi dengan MPPT agar PV selalu dapat membangkitkan daya maksimum secara terus-menerus walaupun dalam keadaan nilai iradiasi dan suhu yang berubah-ubah. Skema *switching* yang digunakan adalah skema *pulse width modulation* (PWM) dengan besar nilai sinyal *control* yang diatur oleh MPPT. Algoritma MPPT yang digunakan adalah *Perturb and Observe* (P&O). Algoritma tersebut diimplementasikan dalam suatu Simulink *block* seperti pada Gambar 4.



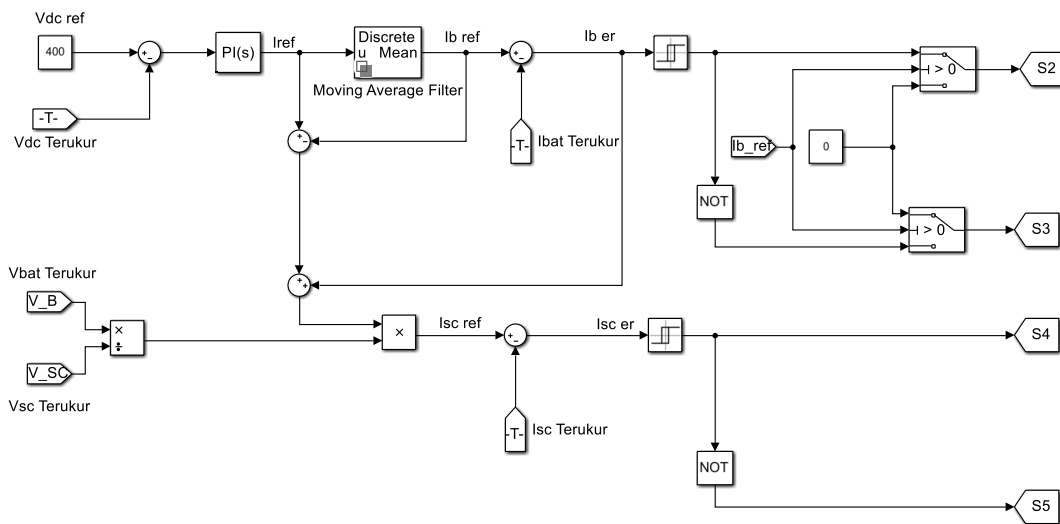
Gambar 4. Pemodelan kendali MPPT *boost converter* pada Simulink

Pemodelan *inverter* pada Simulink menggunakan topologi *full-bridge* satu fasa yang dirancang untuk mengubah tegangan DC 400 V menjadi tegangan AC 220 Vrms dengan frekuensi sebesar 50 Hz. Supaya *Inverter* menyuplai tegangan keluaran (*root mean square*) rms sebesar 220 V dengan frekuensi 50 Hz secara konsisten, dibutuhkan suatu sistem kontrol. Metode kontrol yang digunakan adalah *synchronous reference frame PI controller* (SRFPI) seperti terlihat pada Gambar 5. Untuk mengontrol tegangan keluaran *inverter*, SRFPI menggunakan tegangan keluaran *inverter* sebagai referensi, bersama dengan *inner current loop* dan *voltage feed forward loop* untuk meningkatkan stabilitas ketahanan sistem. Dimana sinyal umpan balik untuk *inner current loop* menggunakan arus yang terukur pada *filter* kapasitor. Untuk menghasilkan sinyal D-Q dari gelombang 1 fasa maka perlu dibangkitkan dulu sinyal α - β dengan menggeser sinyal terukur sebesar 90°.



Gambar 5. Pemodelan kontrol inverter pada Simulink

Bidirectional DC-DC converter (BDC) digunakan untuk menghubungkan sisi *energy storage* yang mempunyai tegangan yang lebih rendah, yaitu 48 V, dengan sisi BUS DC yang memiliki tegangan lebih tinggi, yaitu 400 V. Dengan adanya *bidirectional DC-DC converter* ini, *energy storage* dapat mengirim daya ke sistem (*discharging*) atau menerima daya dari sistem (*charging*). Dalam sistem PV penelitian ini terdapat dua BDC, yaitu BDC yang menghubungkan baterai ke bus DC dan BDC yang menghubungkan superkapasitor ke bus DC. Proses *charge* dan *discharge* baterai dan superkapasitor diatur dengan menggunakan strategi kontrol yang diimplementasikan pada kedua BDC agar baterai dan superkapasitor dapat membantu PV menyuplai daya beban secara berkelanjutan. Strategi kontrol yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 6. Pada gambar tersebut terlihat bahwa tegangan pada bus DC digunakan sebagai referensi dari sistem kontrol, kemudian PI controller akan menghasilkan sinyal arus yang harus disuplai dan diserap sistem HESS. Sinyal arus tersebut dibagi oleh *moving average filter* dan menghasilkan arus yang harus disuplai dan diserap baterai dan superkapasitor.

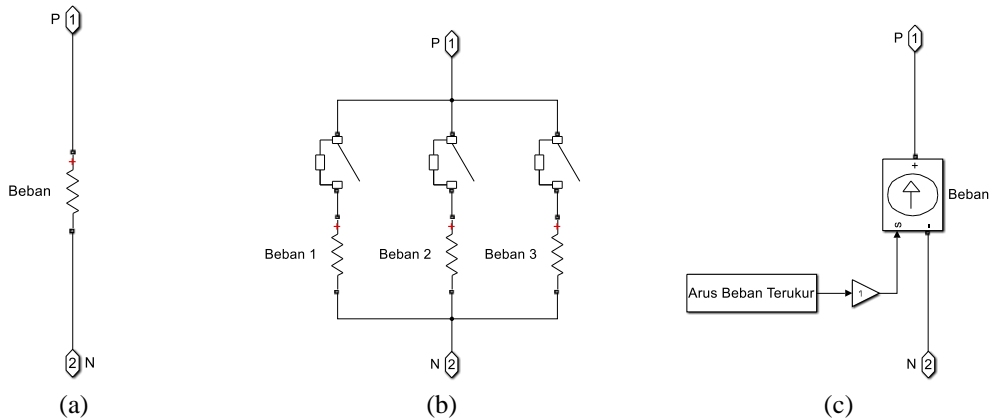


Gambar 6. Strategi Kontrol BDC pada Simulink

2.3. Pemodelan Beban

Pada Simulink dilakukan simulasi PLTS *off-grid* pada 3 kondisi beban, yaitu pada kondisi beban konstan atau berubah dalam bentuk *step*, pada kondisi beban Desa Karamina dan pada kondisi beban menarik arus *inrush current*, seperti pada Gambar 7. Beban listrik adalah beban 1 fasa dengan tegangan sebesar 220 V dan frekuensi 50 Hz. Untuk model beban berubah atau beban Desa Karamina, besar beban diatur dengan menggunakan *breaker*, seperti pada Gambar 7 (b). Sedangkan untuk beban *inrush current*, seperti pada Gambar 7 (c), beban dimodelkan sebagai sumber arus. Dimana besar arus yang mengalir disesuaikan dengan hasil

pengukuran pada laboratorium dengan menggunakan beban seperti pada Tabel 2. Kemudian, beban-beban tersebut dinyalakan dan dimatikan beberapa kali dengan kombinasi yang berbeda sehingga diperoleh data *inrush current*.



Gambar 7. Pemodelan beban pada Simulink (a) beban konstan (b) beban berubah atau beban Desa Karamina (c) beban *inrush current*

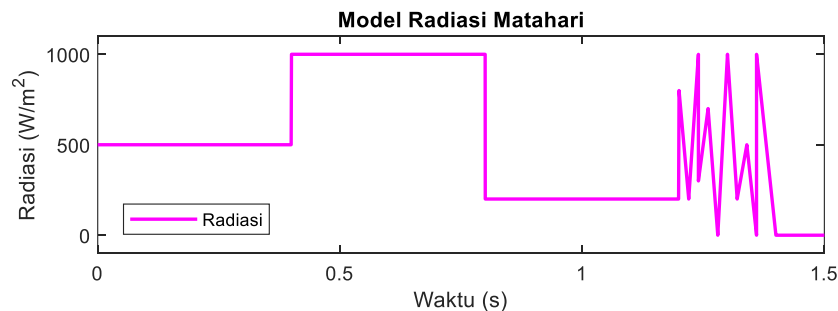
Tabel 2. Detail Beban yang Diukur di Laboratorium

Beban	Daya (W)
Pemanas (<i>resistor bank</i>)	1800
Lampu LED (32x2 W + 5 x 11 W)	119
Pompa air dengan <i>dimmer</i>	130
Beban motor (<i>drill</i>)	850

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

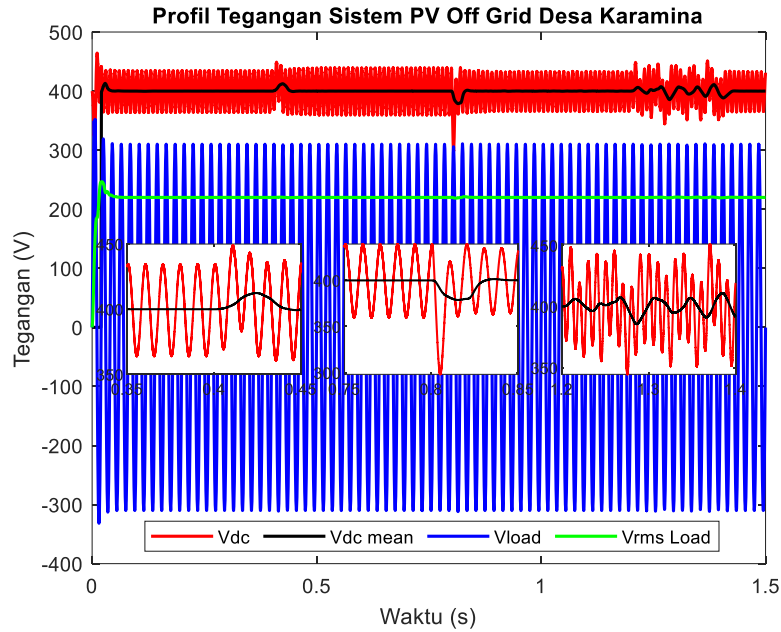
3.1. Profil PLTS Off-grid Akibat Perubahan Radiasi

Pada skema ini dilakukan simulasi kenaikan dan penurunan nilai radiasi yang diterima PV, seperti pada Gambar 8. Pada awal simulasi PV menerima radiasi sebesar 500 W/m², pada waktu simulasi 0,4 detik radiasi naik menjadi 1000 W/m², pada waktu simulasi 0,8 detik turun menjadi 200 W/m², kemudian terjadi perubahan naik turun yang cepat dari rentang 1,2 s sampai 1,4 s dan akhirnya PV tidak menerima radiasi sama sekali pada 1,4 detik sampai 1,5 detik. Simulasi dilakukan dengan beban konstan sebesar 3,5 kW dan suhu konstan sebesar 25° C.

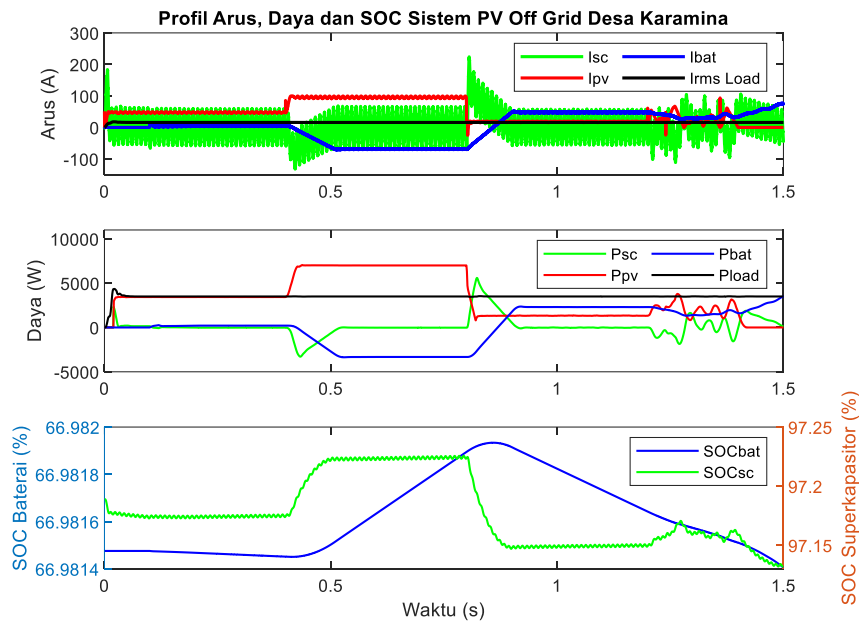


Gambar 8. Kenaikan dan Penurunan Nilai Radiasi

Pada Gambar 9 menunjukkan profil tegangan bus DC dan tegangan beban selama simulasi pada Simulink. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa tegangan beban (gelombang AC dan rms) tidak terganggu akibat adanya kenaikan dan penurunan radiasi. Sedangkan tegangan pada sisi bus DC mengalami kenaikan pada saat radiasi matahari naik dan mengalami penurunan pada saat radiasi matahari turun. Namun kondisi perubahan tegangan tersebut tidak berlangsung lama (kurang dari 0,05 s), karena *energy storage* dapat menyuplai kekurangan atau menyerap kelebihan daya beban tersebut. Begitu juga pada saat terjadi perubahan radiasi yang sangat cepat dari waktu simulasi 1,2 – 1,4 detik, *energy storage* selalu berusaha menjaga tegangan agar tetap berada pada nilai 400 V.



Gambar 9. Profil Tegangan Sistem Akibat Perubahan Radiasi Matahari



Gambar 10. Profil Arus, Daya Dan SoC Sistem Akibat Perubahan Beban

Pada Gambar 10 menunjukkan profil arus, daya dan SoC sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina akibat perubahan radiasi matahari. Pada rentang 0,4 – 0,8 detik, produksi daya PV lebih besar daripada konsumsi daya beban, sehingga baterai mengalami proses *charge*, hal ini ditunjukkan oleh nilai SoC baterai yang meningkat. Pada waktu simulasi 0,8 - 1,2 detik terjadi kenaikan beban, daya yang dikonsumsi beban lebih besar dari daya yang diproduksi PV sehingga baterai mengalami proses *discharge*, hal ini ditunjukkan oleh SoC baterai yang menurun. Sedangkan pada saat perubahan radiasi yang cepat, dari waktu simulasi 1,2 hingga 1,4 detik, walaupun PV sempat mengalami kenaikan daya yang lebih besar dari daya beban, namun karena adanya superkapasitor, baterai tidak mengalami perubahan dari proses *discharge* ke *charge*. Hal ini dapat meningkatkan atau memperpanjang umur baterai. Karena proses *charge* dan *discharge* yang terjadi berulang-ulang dapat mengurangi siklus hidup baterai. Sedangkan untuk superkapasitor, SoC cenderung konstan dan hanya akan berubah drastis pada saat transien atau perubahan daya. Pada Gambar 10 juga menunjukkan bahwa dengan penambahan superkapasitor arus yang harus disuplai oleh *energy storage* dapat dipisah, dimana arus riak akan disuplai oleh superkapasitor. Sehingga arus yang disuplai oleh baterai akan menjadi lebih konstan jika dibandingkan dengan hasil simulasi sistem tanpa superkapasitor. Perbandingan dengan penelitian [15]

menunjukkan bahwa penggunaan superkapasitor dapat memperpanjang umur baterai dan menjaga stabilitas tegangan sistem lebih baik dibandingkan sistem yang hanya menggunakan baterai.

Tabel 3. Ringkasan Hasil Simulasi Perubahan Radiasi

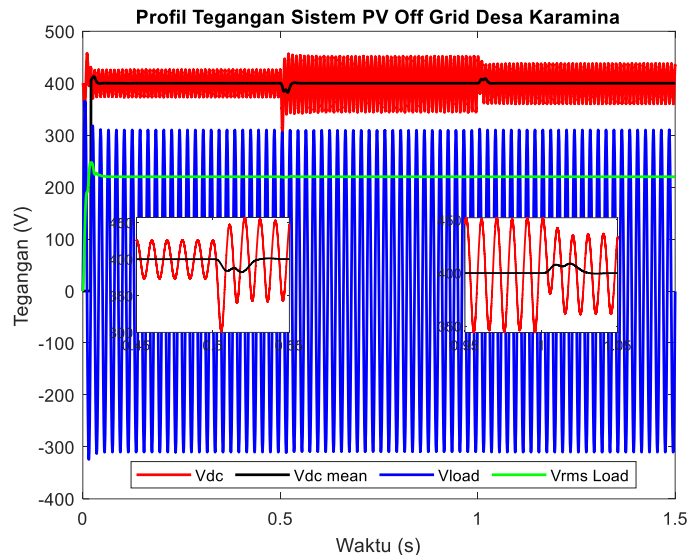
Parameter	Hasil Pengamatan
Tegangan AC beban	Stabil pada 220V
Tegangan Bus DC	Fluktuatif, cepat dikoreksi oleh HESS
SoC Baterai	Stabil pada transien berkat superkapasitor
Arus riak	Ditangani oleh superkapasitor

3.2. Profil Sistem PLTS Off-Grid akibat Perubahan Beban

Naik atau turunnya beban dapat mempengaruhi profil tegangan dan arus pada sistem tenaga listrik, terutama pada sistem *weakgrid*. Oleh sebab itu pada bagian ini dibahas tentang profil sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina saat terjadi perubahan beban.

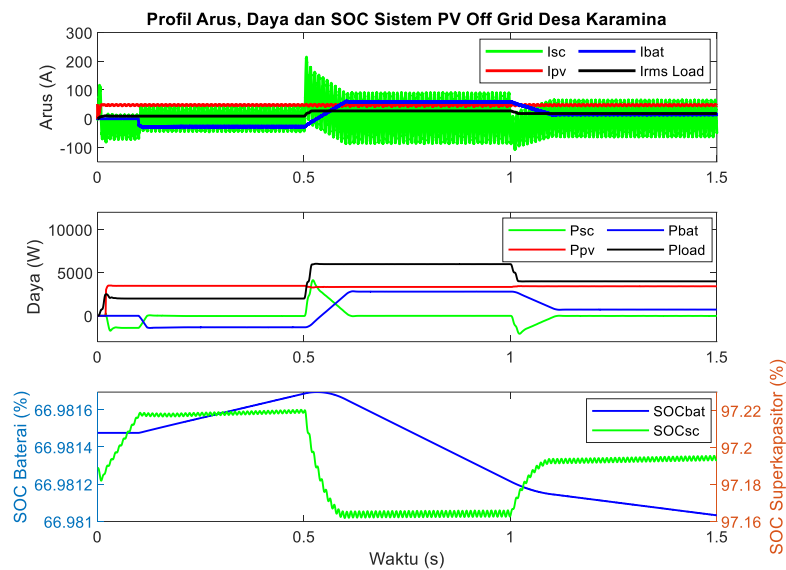
3.2.1. Simulasi Perubahan Beban

Pada skema ini dilakukan simulasi kenaikan dan penurunan beban. Pada awal simulasi beban yang disuplai sistem adalah sebesar 2 kW, kemudian pada waktu simulasi 0,5 detik beban naik menjadi 6 kW dan kemudian turun menjadi 4 kW pada waktu simulasi 1 detik. Sedangkan radiasi matahari diatur konstan pada nilai 500 W/m². Pada Gambar 11 menunjukkan profil tegangan bus DC dan beban. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa tegangan beban (gelombang AC dan rms) tidak terganggu akibat adanya kenaikan dan penurunan beban. Sedangkan tegangan pada sisi bus DC mengalami penurunan pada saat beban naik dan mengalami kenaikan pada saat beban turun. Namun kondisi perubahan tegangan tersebut tidak berlangsung lama (kurang dari 0,05 s), karena *energy storage* dapat menyuplai kekurangan atau menyerap kelebihan daya beban tersebut.



Gambar 11. Profil Tegangan Sistem Akibat Perubahan Beban

Pada Gambar 12 menunjukkan profil arus, daya dan SoC sistem PLTS *off-grid* Desa Karamina akibat perubahan beban. Pada rentang 0 – 0,5 detik, produksi daya PV lebih besar daripada konsumsi daya beban, sehingga baterai mengalami proses *charge*, hal ini ditunjukkan oleh nilai SoC baterai yang meningkat. Pada detik 0,5 terjadi kenaikan beban yang menyebabkan daya yang dikonsumsi beban lebih besar dari daya yang diproduksi PV sehingga baterai mengalami proses *discharge*, hal ini ditunjukkan oleh SoC baterai yang menurun. Sedangkan untuk superkapasitor, yang selalu melakukan proses *charge* dan *discharge*, SoC cenderung konstan dan hanya akan berubah drastis pada saat transien atau perubahan daya. Pada Gambar 12 juga menunjukkan bahwa dengan penambahan superkapasitor arus yang harus disuplai oleh *energy storage* dapat dipisah, dimana arus riak akan disuplai oleh superkapasitor. Sehingga arus yang disuplai oleh baterai akan menjadi lebih konstan jika dibandingkan dengan hasil simulasi sistem tanpa superkapasitor. Studi ini menguatkan hasil pada penelitian [13] dan [14] bahwa superkapasitor efektif dalam memitigasi beban dinamis dan menjaga kestabilan arus pada sistem *hybrid*.



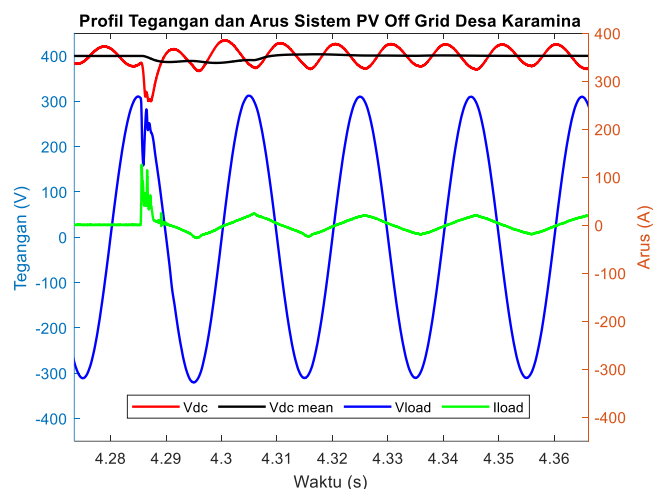
Gambar 12. Profil Arus, Daya dan SoC Sistem Akibat Perubahan Beban

Tabel 4. Ringkasan Hasil Simulasi Perubahan Beban

Parameter	Hasil Pengamatan
Tegangan AC beban	Tetap stabil
Tegangan Bus DC	Fluktuasi sesaat, dikoreksi oleh superkapasitor
SoC Baterai	Menurun saat beban tinggi, naik saat beban rendah
Arus suplai oleh Baterai	Lebih konstan dibanding sistem tanpa superkapasitor

3.2.2. Simulasi Inrush Transient Current

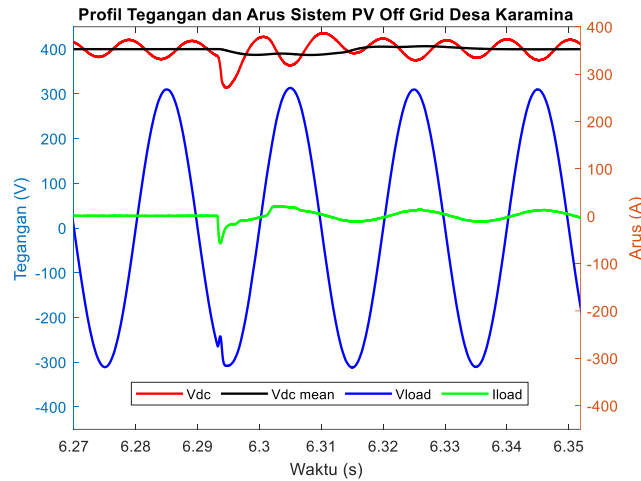
Pada skema ini dilakukan simulasi *inrush transient current*. Kondisi ini terjadi saat beban non linier yang menarik *inrush current* dinyalakan. Pada awal simulasi tidak ada beban yang disuplai sistem, kemudian beban dinyalakan dan dimatikan berulang kali, sehingga menghasilkan arus seperti pada Gambar 13 bagian arus beban (*Iload*). Pada saat terjadi kenaikan beban dari tanpa menjadi berbeban, *inrush transient current* yang ditarik oleh beban menyebabkan tidak hanya bus DC yang mengalami penurunan tegangan sementara, namun juga terjadi *voltage dip* pada tegangan AC. Namun, tingkat keparahan dari *voltage dip* akan berkurang sebanding dengan berkurangnya tingkat keparahan *inrush transient current*. Seperti pada Gambar 14, dengan nilai *inrush peak* yang lebih rendah dan *rising time* yang lebih lambat, *voltage dip* yang terjadi semakin sedikit.



Gambar 13. Profil Tegangan dan Arus Sistem pada Kondisi *Inrush Current*

Salah satu cara untuk memitigasi *voltage dip* yang diakibatkan oleh *inrush current* pada *microgrid* atau *weakgrid* adalah dengan penambahan *auxiliary supply* yang terhubung secara paralel dengan keluaran *inverter*.

Auxiliary supply ini hanya akan menyuplai daya atau arus frekuensi tinggi saja. Sehingga, saat terjadi *inrush transient current*, *auxiliary supply* akan menyerap atau menyuplai kelebihan daya dan mengurangi tingkat keparahan *voltage dip* yang terjadi. Perbandingan dengan literatur [17] menunjukkan bahwa solusi *auxiliary supply* searah dengan pendekatan umum mitigasi *transient current* pada mikrogrid.



Gambar 14. Profil Tegangan dan Arus Sistem pada Kondisi Keparahan *Inrush Current* yang Lebih Rendah

Tabel 5. Ringkasan Hasil Simulasi *Inrush Current*

Parameter	Hasil Pengamatan
Tegangan AC beban	Tetap stabil
Tegangan Bus DC	Fluktuasi sesaat, dikoreksi oleh superkapasitor
SoC Baterai	Menurun saat beban tinggi, naik saat beban rendah

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan memodelkan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berbasis penyimpanan energi hibrida superkapasitor-baterai untuk Desa Karamina, Papua. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kestabilan tegangan dan arus meskipun terjadi fluktuasi radiasi matahari maupun perubahan beban. Superkapasitor terbukti efektif dalam merespons perubahan daya secara cepat dan mengurangi arus riak yang diterima oleh baterai, sehingga memperpanjang umur baterai serta meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Pada kondisi tanpa sinar matahari, baterai mampu menyuplai daya ke beban, sementara di siang hari energi dari panel surya digunakan untuk mengisi ulang baterai. Sistem yang dirancang terbukti handal untuk memenuhi kebutuhan energi harian masyarakat Desa Karamina yang berada di wilayah tanpa akses listrik PLN, sekaligus menjadi model solusi elektrifikasi untuk daerah-daerah terpencil lainnya di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. M. Haegel and S. R. Kurtz, "Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (Version 2)," *IEEE J Photovolt*, vol. 12, no. 6, pp. 1265–1272, 2022, doi: 10.1109/JPHOTOV.2022.3206532.
- [2] B. Chegari, M. Tabaa, E. Simeu, and M. El Ganaoui, "Optimal energy management of a hybrid system composed of PV, Wind turbine, pumped hydropower storage and battery storage to achieve a complete energy self-sufficiency in residential buildings," *IEEE Access*, vol. 12, no. September, pp. 126624–126639, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3454149.
- [3] J. T. Bialasiewicz, "Renewable energy systems with photovoltaic power generators: Operation and modeling," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 7, pp. 2752–2758, 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.920583.
- [4] S. Ganesan, U. Subramaniam, A. A. Ghodke, R. M. Elavarasan, K. Raju, and M. S. Bhaskar, "Investigation on sizing of voltage source for a battery energy storage system in microgrid with renewable energy sources," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 188861–188874, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3030729.
- [5] F. R. Albogamy *et al.*, "Real-Time Scheduling for Optimal Energy Optimization in Smart Grid Integrated with Renewable Energy Sources," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 35498–35520, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3161845.
- [6] R. Raff, V. Golub, D. Topic, G. Knezevic, and J. Perok, "Optimization of the off-grid systems based on renewable energy for power supply in rural areas," *International Conference on the European Energy Market, EEM*, vol. 2019-Septe, 2019, doi: 10.1109/EEM.2019.8916573.
- [7] J. O. Oladigbolu, M. A. M. Ramli, and Y. A. Al-Turki, "Feasibility study and comparative analysis of hybrid renewable power system for off-grid rural electrification in a typical remote village located in Nigeria," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 171643–171663, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024676.

- [8] B. Hachim, D. Dahlioui, and A. Barhdadi, "Electrification of rural and arid areas by solar energy applications case study: Boumhaout village in south of Morocco," *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, pp. 1–4, 2018, doi: 10.1109/IRSEC.2018.8702978.
- [9] A. Zaharim *et al.*, "Public acceptance on stand-alone renewable energy project in rural area of Malaysia," *Energy and Sustainability in Small Developing Economies, ES2DE 2017 - Proceedings*, 2017, doi: 10.1109/ES2DE.2017.8015349.
- [10] F. Bartyzel and P. Oclón, "Simulation software for design improvement," *2023 8th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2023*, p. 10193173, 2023, doi: 10.23919/SpliTech58164.2023.10193173.
- [11] M. I. Hossain, M. Tanvir Islam Mim, T. Banik, M. R. Jany, M. Mukter Hossain Emon, and A. Shufian, "Decentralized Solar PV/Battery-based Energy Management for Isolated Areas," *2024 IEEE 3rd International Conference on Robotics, Automation, Artificial-Intelligence and Internet-of-Things, RAAICON 2024 - Proceedings*, pp. 188–193, 2024, doi: 10.1109/RAAICON64172.2024.10928452.
- [12] M. F. Elmorshedy, M. R. Elkadeem, K. M. Kotb, I. B. M. Taha, and D. Mazzeo, "Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors," *Energy Convers Manag*, vol. 245, no. July, p. 114584, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114584.
- [13] H. W. Yan *et al.*, "Battery Lifetime Extension in a Stand-Along Microgrid with Flexible Power Point Tracking of Photovoltaic System," *IEEE J Emerg Sel Top Power Electron*, vol. 11, no. 2, pp. 2281–2290, 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3212702.
- [14] R. Alfanz, A. Nugraha, M. Otong, M. F. Haekal, W. Martiningsih, and M. F. Fauzy, "Design and Development of An Automatic Energy Buffer System and Hybrid Energy Storage on PV System Using Supercapacitors," *2024 International Conference on Informatics Electrical and Electronics, ICIEE 2024 - Proceedings*, p. 2024, 2024, doi: 10.1109/ICIEE63403.2024.10920392.
- [15] B. Ihsan, D. Sahidin, T. D. Rachmildha, and D. Hamdani, "Peningkatan Umur Baterai pada PLTS Off-grid menggunakan Penyimpanan Energi Hibrida Berbasis," vol. 06, no. 1, pp. 77–84, 2024.
- [16] B. Ihsan, "Perancangan Dan Analisis Sistem PV Off-Grid Dengan Sistem Hybrid Energy Storage," *Thesis, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung*, 2021.
- [17] B. Ihsan, A. Matthee, F. Leferink, T. D. Rachmilda, and D. Hamdani, "Active Transient EMI Stabilization," *Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, p. 2021, 2021.

Simulasi Potensi Sampah Provinsi DKI Jakarta sebagai Sumber Energi Berkelanjutan melalui Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa)

Simulation of Waste in DKI Jakarta Province as a Sustainable Energy Resource via Waste-to-Energy Power Plants (PLTSa)

Muhammad Arif¹, Ichsan², Leonard Lisapaly³, Syamsyarief Baqaruzi⁴

^{1,2,3}Program Studi Magister Teknik Elektro, Universitas Kristen Indonesia

Jl. Mayjen Sutoyo No 2. Jakarta 13630, Indonesia

⁴Program Studi S1 Teknik Elektro, Institut Teknologi Sumatera

Jl. Terusan Ryacudu Lampung Selatan 35365, Indonesia

email: *¹arif.unila@gmail.com, ²ichsan.ichsan@uki.ac.id, ³leonard.lisapaly@uki.ac.id,

⁴syamsyarief.baqaruzi@el.itera.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 22 April 2025

Diterima, 25 Mei 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

Kata Kunci :

Sampah organik, energi terbarukan, PLTSa, regresi linier, prediksi kapasitas listrik

Keyword :

Renewable energy, waste-to-energy plants, linear regression, electrical capacity forecasting

ABSTRAK

Pemanfaatan sampah sebagai sumber energi terbarukan menjadi salah satu solusi strategis untuk mengatasi permasalahan sampah dan mendukung transisi energi bersih, khususnya di wilayah metropolitan seperti DKI Jakarta. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi potensi kapasitas listrik yang dapat dihasilkan melalui pengolahan sampah organik menggunakan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa). Metode yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif dengan analisis regresi linier berganda berdasarkan data historis tahun 2011–2023, meliputi jumlah penduduk, volume timbulan sampah harian, dan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) harga berlaku. Simulasi dilakukan untuk memproyeksikan kapasitas daya listrik dari tahun 2024 hingga 2043 dengan mempertimbangkan bahwa hanya 53% dari total timbulan sampah merupakan sampah organik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kapasitas daya listrik harian pada tahun 2024 diperkirakan mencapai 1.652,87 kW dan meningkat hingga 2.766,24 kW pada tahun 2043. Peningkatan ini disebabkan oleh bertambahnya jumlah penduduk dan volume sampah, serta didukung efisiensi sistem insinerasi sebesar 80% dan efisiensi generator 90%. Studi ini menegaskan bahwa integrasi pendekatan teknis dan prediktif dapat memperkuat validitas perencanaan sistem PLTSa jangka panjang untuk mendukung target energi berkelanjutan di Indonesia.

ABSTRACT

One way to solve the problem of waste and help the switch to clean energy is to use trash as a green energy source. This is especially important in big cities like DKI Jakarta. This study seeks to assess the potential energy capacity that may be generated from organic waste processing utilizing Waste-to-Energy Power Plant (PLTSa) technology. The employed methodology is a descriptive quantitative technique utilizing multiple linear regression analysis, grounded in historical data from 2011 to 2023, encompassing population metrics, daily waste generation volumes, and Gross Regional Domestic Product (GRDP) at current prices. Simulations were performed to forecast electrical capacity from 2024 to 2043, taking into account that only 53% of total garbage creation consists of organic waste. The simulation findings indicate that the daily power capacity is projected to attain 1,652.87 kW in 2024 and escalate to 2,766.24 kW by 2043. The rise is attributed to population growth and increased waste volume, bolstered by an incineration system efficiency of 80% and a generator efficiency of 90%. This study verifies that the amalgamation of technical and predictive methodologies can enhance the credibility of long-term PLTSa system planning to facilitate sustainable energy objectives in Indonesia.

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan Undang-Undang Ketenagalistrikan No. 30 Tahun 2009, Indonesia diamanatkan untuk memastikan ketersediaan listrik yang terjangkau, berkelanjutan, dan berkualitas. Pada 2025, pemerintah menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23%, dengan komposisi sebagai berikut: Batu bara (55%), Gas alam (22%) Bahan bakar cair (0,4%) dan Energi Baru Terbarukan (23%)[1][2]. Namun, realisasi hingga 2023 menunjukkan EBT hanya berkontribusi 14,5% dari total energi primer[3], sementara batu bara mendominasi 65%. Pertumbuhan kebutuhan listrik nasional 6,9% per tahun dan proyeksi kapasitas tambahan 170 GW (2019–2038) memicu ketergantungan pada sumber fosil, terutama untuk sektor industri (35%), rumah tangga (28%), dan transportasi (20%)[4], [5]. Peralihan mendasar dari dominasi bahan bakar fosil ke energi terbarukan akan memberikan dampak yang signifikan terhadap berbagai aspek kehidupan seperti kondisi ekonomi, sosial, dan lingkungan. Tahun 2016 jumlah timbulan sampah di Indonesia mencapai 65.200.000 ton per tahun dengan penduduk sebanyak 261.115.456 orang[6].

Proyeksi penduduk Indonesia menunjukkan angka penduduk yang terus bertambah dan tentunya akan meningkatkan jumlah timbulan sampah. Harus dilakukan suatu upaya agar Target SDGs 12.5 yang menyatakan negara secara substansial mengurangi timbulan sampah melalui pencegahan, pengurangan, daur ulang, dan penggunaan kembali dapat dicapai[7]. Langkah pemerintah tertuang dalam Pepres 97 Tahun 2017 yang menargetkan pengurangan sampah rumah tangga dan sampah sejenis sampah rumah tangga sebesar 30% dan penanganannya sebesar 70%. Pada tahun 2030 setiap negara secara substansial mengurangi timbulan sampah melalui pencegahan, pengurangan, daur ulang, dan penggunaan kembali[8]. Hal ini merupakan target *Sustainable Development Goals* (SDGs) untuk dapat menjamin pola produksi dan konsumsi yang berkelanjutan (SDGs target 12.5)[9]. Hal ini sejalan dengan target pengurangan dan penanganan sampah rumah tangga (SRT) dan sampah sejenis sampah rumah tangga (SSRT) pada Peraturan Presiden (Pepres) Republik Indonesia Nomor 97 Tahun 2017 tentang Kebijakan dan Strategi Nasional Pengelolaan SRT dan SSRT.

Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Provinsi DKI Jakarta menghasilkan 11,25 juta ton timbulan sampah selama periode 2019-2022. Sepanjang 2022, Provinsi DKI Jakarta memproduksi 3,11 juta ton timbulan sampah, terbanyak keempat di Indonesia. Volume timbulan sampah tersebut naik tipis 0,97% dibanding 2021, tetapi menjadi level tertinggi dalam empat tahun terakhir. Jakarta Timur mendominasi volume timbulan sampah di Provinsi DKI Jakarta tahun sepanjang 2019-2022. Jumlahnya mencapai 3,33 juta ton atau setara 29,6% dari total volume timbulan sampah Provinsi DKI Jakarta selama empat tahun terakhir. Berikutnya, Jakarta Selatan menempati urutan kedua wilayah dengan volume timbulan sampah terbanyak di DKI sebanyak 2,81 juta ton sepanjang 2019-2022. Lalu, posisinya diikuti oleh Jakarta Barat yang memiliki volume timbulan sampah sebanyak 2,18 juta ton. Volume timbulan sampah di Jakarta Utara tercatat sebanyak 1,96 juta ton selama empat tahun terakhir. Kemudian, Jakarta Pusat tercatat memiliki 927,89 ribu ton timbulan sampah sepanjang 2019-2022 Sementara, Kepulauan Seribu merupakan wilayah dengan volume timbulan sampah paling sedikit di Provinsi DKI Jakarta. Dalam empat tahun terakhir, hanya ada 25,49 ribu ton timbulan sampah di wilayah tersebut. Adapun SIPSN KLHK mencatat, rata-rata ada sekitar 30,84 ribu ton timbulan sampah harian yang dihasilkan di DKI Jakarta sepanjang 2019-2022[10].

2. METODE PENELITIAN

Sampah dapat didefinisikan sebagai residu dari aktivitas manusia maupun alam yang keberadaannya tidak lagi memiliki nilai guna, baik secara ekonomi maupun fungsional[5]. Bahan ini umumnya tidak diinginkan lagi karena tidak dapat digunakan ulang, telah mengalami degradasi, dan berpotensi menjadi agen pencemar lingkungan, khususnya dalam konteks kualitas udara dan kelestarian ekosistem. Secara umum, sampah dipandang sebagai limbah padat yang mencakup material organik dan anorganik[11], serta dianggap tidak memiliki nilai ekonomis dan harus dikelola dengan cermat agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Dalam beberapa kondisi tertentu, limbah masih dapat dikonversi atau dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku dalam proses produksi lainnya[12]. Secara konseptual, limbah merujuk pada substansi buangan dari aktivitas manusia maupun hewan yang dapat berbentuk gas, cair, padat, maupun lumpur[10].

Berdasarkan karakteristiknya, sampah diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu sampah organik dan sampah anorganik. Sampah anorganik terdiri dari material padat, cenderung kering, serta sulit terurai oleh aktivitas biologis mikroorganisme, untuk sampah organik cenderung memiliki kandungan air yang lebih tinggi, umumnya berasal dari sisa-sisa aktivitas pertanian atau konsumsi domestik. Material ini memiliki rantai karbon yang relatif pendek, sehingga mudah terdegradasi secara alami oleh mikroorganisme[13][8].

Upaya untuk mendapatkan estimasi yang akurat mengenai potensi energi listrik yang dapat dihasilkan dari limbah padat atau sampah, diperlukan pendekatan analitis yang cermat serta berdasarkan pada asumsi-asumsi teknis yang rasional. Proyeksi nilai energi harus disandarkan pada nilai kalor rata-rata (*Higher Heating Value/HHV*) yang representatif terhadap komposisi umum sampah yang dianalisis[14]. HHV tersebut dapat

diperoleh melalui pendekatan estimatif berbasis data komposisi unsur pembentuk sampah, atau secara lebih presisi melalui uji eksperimental menggunakan alat kalorimeter[15].

Signifikansi komposisi jenis sampah sangat memengaruhi karakteristik termal saat proses konversi berlangsung[16]. Apabila terdapat komposisi dominan dari suatu jenis sampah yang melebihi ambang 15–50% dari total muatan, hal tersebut dapat memberikan pengaruh yang substansial terhadap proses pembakaran, baik dari segi efisiensi maupun stabilitas temperatur. Untuk mencapai pembakaran termal yang optimal dalam sistem PLTSa (Pembangkit Listrik Tenaga Sampah), suhu operasi harus dijaga di atas 800 °C dengan waktu tinggal gas pembakaran minimal 2 detik untuk memastikan destruksi sempurna terhadap senyawa organik volatil[17].

Perhitungan nilai kalor dari total volume sampah yang masuk memungkinkan untuk menentukan potensi konversi energi menjadi tenaga listrik melalui generator. Di Indonesia, nilai kalor rata-rata dari sampah domestik berkisar antara 1000 hingga 2000 kilokalori per kilogram, dan dalam konteks perhitungan konservatif dapat diasumsikan nilai rerata sebesar 1500 kkal/kg. Nilai konversi energi kalor ke energi listrik berkisar 0,00116 kWh per kilokalori, sehingga total potensi energi per hari dapat dihitung sebagai hasil kali antara total massa sampah, nilai kalor rerata, dan konversi ke satuan energi listrik dengan persamaan berikut

$$E_{\text{kalor}} = m \times HHV \tag{1}$$

$$E_{\text{listrik}} = E_{\text{kalor}} \times 0,00116 \tag{2}$$

$$p \frac{E_{\text{Listrik}}}{t} \tag{3}$$

$$T > 800^{\circ}\text{C} \text{ dan } t_{\text{residensi}} > 2 \text{ detik} \tag{4}$$

Total energi kalor yang dihasilkan dari sampah dapat ditentukan dengan mengalikan jumlah massa sampah yang tersedia per hari dengan nilai kalor tinggi rata-rata (HHV) dari sampah tersebut, yang biasanya dinyatakan dalam satuan kilokalori per kilogram. Setelah didapatkan nilai total energi kalor[18], langkah selanjutnya adalah mengkonversinya menjadi energi listrik menggunakan faktor konversi standar, di mana satu kilokalori setara dengan sekitar 0,00116 kilowatt-jam energi listrik.

Mengidentifikasi hubungan antara variabel bebas (*independen*) dengan variabel terikat (*dependen*), metode regresi linier dapat digunakan sebagai pendekatan kuantitatif dalam memodelkan pola hubungan data[19]. Regresi linier sangat berguna dalam memprediksi nilai suatu variabel berdasarkan informasi variabel lainnya, dengan asumsi bahwa hubungan yang terjadi bersifat linier dan konsisten. Model regresi linier sederhana secara umum dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$Y = a + bX + \varepsilon \tag{5}$$

Dimana Y adalah variabel terikat (*dependent variable*), X adalah variabel bebas (*independent variable*), a adalah konstanta (*intersep*), b adalah koefisien regresi yang menunjukkan seberapa besar perubahan pada Y akibat perubahan satu satuan pada X, dan epsilon merupakan galat dari residual model. Nilai a dan b dapat diperoleh melalui proses estimasi menggunakan metode kuadrat terkecil, yaitu dengan meminimalkan jumlah kuadrat selisih antara nilai observasi dengan nilai prediktif berbasis data lingkungan atau energi. Nilai koefisien hubungan jika bernilai negatif, maka akan mendekati nilai -1. Jika tidak ada hubungan, maka akan mendekati nilai 0, sementara jika dua variabel memiliki hubungan positif, maka nilai hubungannya akan mendekati 1. Tingkat antara variabel dapat dilihat pada Tabel 1.

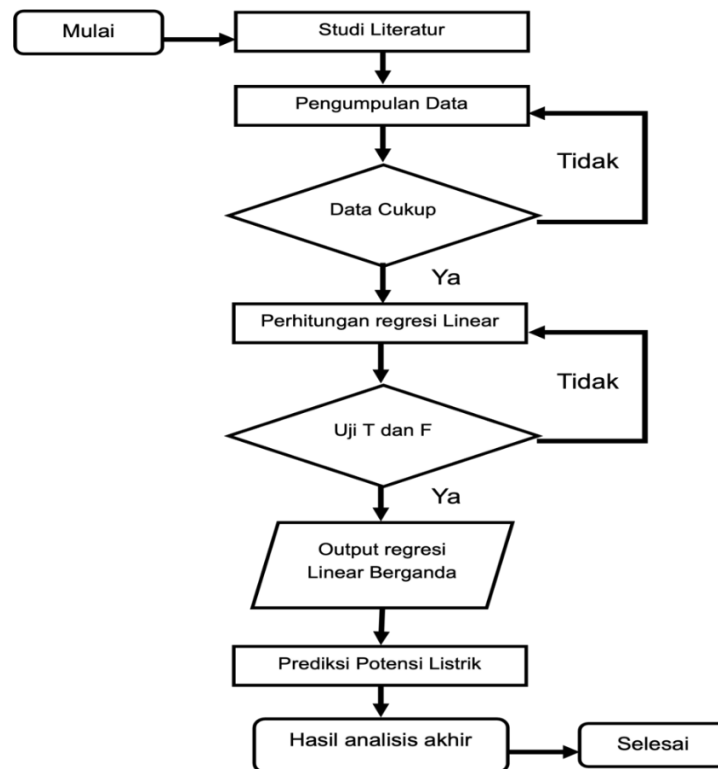
Tabel 1. Interpretasi Nilai Koefisien Korelasi (r):

Rentang Nilai r	Interpretasi
$-1,00 \leq r \leq -0,80$	Berkorelasi kuat, secara negatif
$-0,79 \leq r \leq -0,50$	Berkorelasi sedang, secara negatif
$-0,49 \leq r \leq 0,49$	Berkorelasi lemah
$0,50 \leq r \leq 0,79$	Berkorelasi sedang, secara positif
$0,80 \leq r \leq 1,00$	Berkorelasi kuat, secara positif

Tabel 2. Alur Regresi dan Korelasi

Aspek	Deskripsi
Tujuan Regresi Linier Berganda	Digunakan untuk memperkirakan permintaan/kebutuhan dalam jangka waktu tahunan.
Fungsi Regresi Linier Berganda	Persamaan digunakan untuk menentukan hubungan antara satu variabel terikat dengan dua atau lebih variabel bebas.
Keterangan Variabel	Y = variabel terikat; A = konstanta; b_1, b_2, \dots, b_n = koefisien regresi; X_1, X_2, \dots, X_n = variabel bebas.
Koefisien Korelasi (r) Jenis Korelasi	Digunakan untuk mengetahui kekuatan hubungan linier antar variabel bebas. 1) Korelasi positif: perubahan searah, 2) Korelasi negatif: perubahan berlawanan, 3) Korelasi nihil: tidak ada pola hubungan.
Interpretasi Nilai r	$-1,00 \leq r \leq -0,80$: kuat negatif; $-0,79 \leq r \leq -0,50$: sedang negatif; $-0,49 \leq r \leq 0,49$: lemah; $0,50 \leq r \leq 0,79$: sedang positif; $0,80 \leq r \leq 1,00$: kuat positif.
Koefisien Determinasi (R ²)	Digunakan untuk mengetahui seberapa besar variasi variabel Y dijelaskan oleh variabel-variabel X.
Interpretasi Nilai R ²	0: Tidak ada korelasi; >0 s.d. 0,49: lemah; 0,50: moderat; 0,51–0,99: kuat; 1,00: sempurna.
Software Pendukung	SPSS (Statistical Package and Service Solutions) digunakan untuk analisis statistik berbasis data numerik.
Uji Normalitas Data	Digunakan untuk mengecek apakah data berdistribusi normal (nilai signifikansi > 0,05).
Metode Uji Normalitas	Manual: Chi Square, Liliefors; SPSS: Kolmogorov-Smirnov.

Analisis dilakukan secara deduktif, yaitu dengan menurunkan kesimpulan dari teori-teori umum yang telah ada ke dalam interpretasi terhadap variabel-variabel spesifik dalam penelitian ini. Tujuan akhirnya adalah membangun suatu model prediktif yang dapat digunakan untuk perencanaan strategis jangka panjang. Penelitian ini mengadopsi metode peramalan untuk memperoleh proyeksi nilai selama dua dekade ke depan. Terdapat lima parameter utama yang dianalisis, yaitu: jumlah penduduk, volume sampah yang dihasilkan, jumlah pelanggan listrik, Produk Regional Domestik Bruto (PRDB) atas dasar harga berlaku, dan konsumsi listrik di wilayah Provinsi DKI Jakarta. Seluruh data diperoleh untuk rentang waktu tahun 2011 hingga 2023, dan digunakan sebagai basis dalam membangun model prediktif melalui metode regresi linier berganda.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

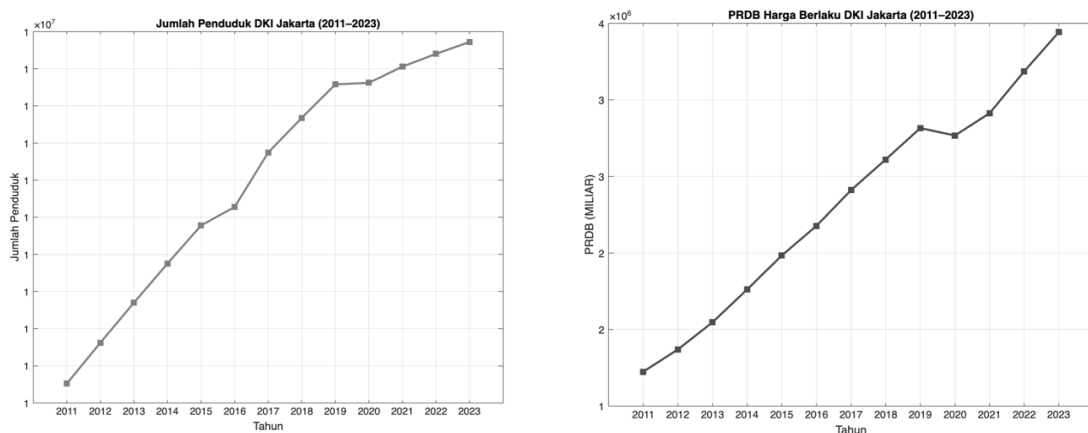
Data Penelitian untuk memprediksi kapasitas listrik yang dapat dihasilkan dari pengolahan sampah di Provinsi DKI Jakarta selama 20 tahun ke depan, yaitu mulai tahun 2024 hingga 2043. Prediksi ini didasarkan pada analisis data historis yang diperoleh dari tahun 2011 hingga 2023. Data yang digunakan meliputi jumlah penduduk yang diperoleh dari Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi DKI Jakarta, data Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) atas dasar harga berlaku yang diperoleh dari Dinas Perindustrian, Perdagangan, Koperasi, Usaha Kecil dan Menengah Provinsi DKI Jakarta, serta data volume sampah yang dihimpun dari Dinas Lingkungan Hidup Provinsi DKI Jakarta. Seluruh data tersebut digunakan sebagai variabel utama dalam membangun model peramalan kapasitas listrik yang dihasilkan dari potensi energi limbah di wilayah tersebut.

Tabel 3. Data Penelitian

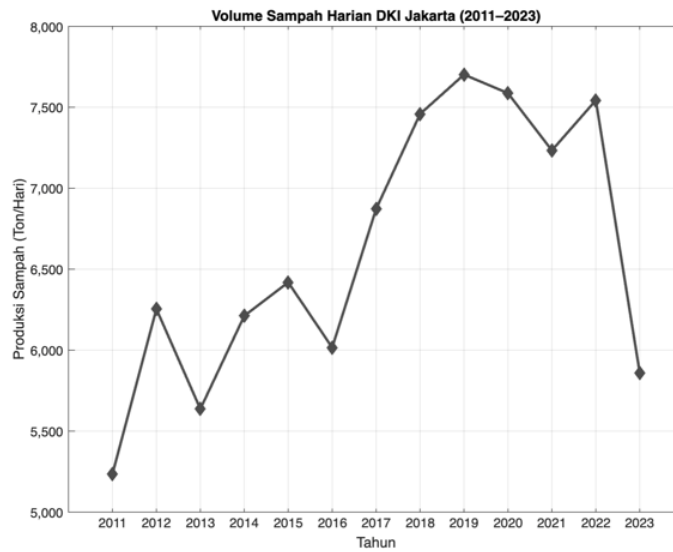
Tahun	Tahun Ke-	Volume Sampah /Hari (Ton)	PRDB (Harga Berlaku)	Jumlah Penduduk
2011	1	5235.63	1224218.48	9752100
2012	2	6254.38	1369432.63	9862100
2013	3	5636.9	1547037.77	9969946
2014	4	6212.05	1761407.06	10075310
2015	5	6419.14	1983420.52	10177924
2016	6	6016.3	2176632.85	10227628
2017	7	6872.18	2410374.39	10374235
2018	8	7458.53	2610615.02	10467629
2019	9	7702.07	2815636.16	10557810
2020	10	7587.49	2767273.49	10562100
2021	11	7233.82	2912885.34	10605681
2022	12	7543.42	3186469.91	10640007
2023	13	5858.91	3442980.93	10672100

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data hasil penelitian yang terdapat pada tabel sebelumnya, dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan produksi sampah, hal ini dapat dilihat dari Volume sampah yang merupakan variabel *dependent*, dari tahun 2011 hingga tahun 2023 selalu mengalami peningkatan. Peningkatan volume sampah yang dihasilkan di Provinsi DKI Jakarta setiap tahunnya terjadi karena beberapa faktor yang memengaruhi diantaranya PDRB harga berlaku dan Jumlah penduduk sebagai variabel *independent*. Untuk lebih jelasnya, data hasil penelitian digambarkan dalam bentuk grafik.

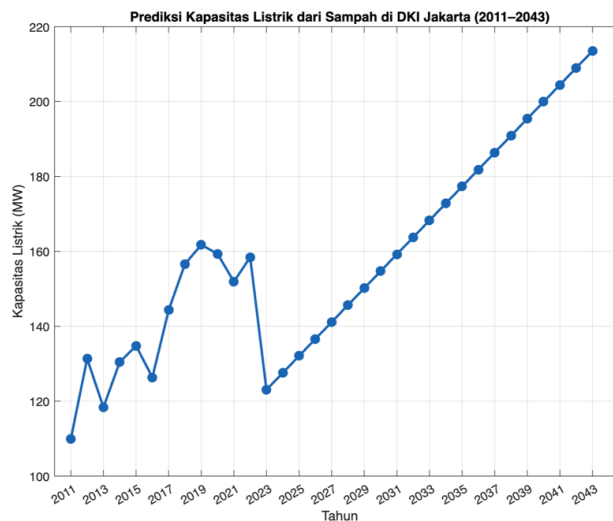


Gambar 2. Jumlah Penduduk dan PRDB DKI Jakarta 2011-2023



Gambar 3. Produksi Sampah DKI Jakarta 2011-2023

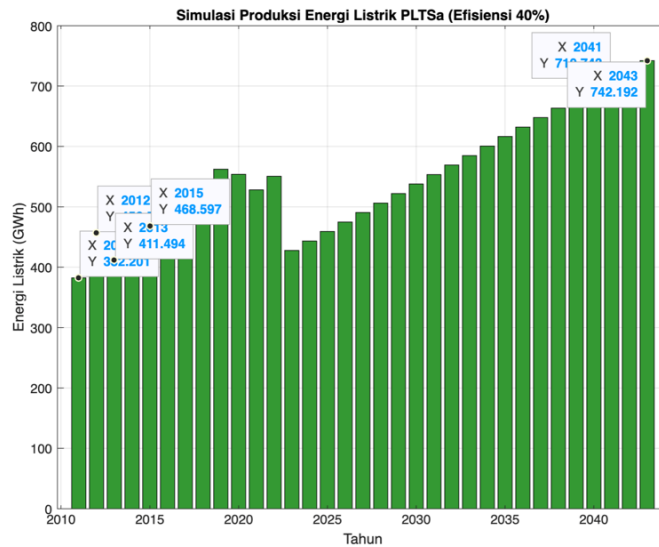
Berdasarkan data hasil penelitian yang terdapat gambar diatas dapat diketahui bahwa terjadi peningkatan produksi sampah, hal ini dapat dilihat dari Volume sampah yang merupakan variabel *dependent*, dari tahun 2011 hingga tahun 2023 dapat terlihat pertumbuhan produksi sampah dari tahun 2011 s.d 2023. Produksi sampah tertinggi terjadi pada tahun 2019 yaitu 7.702,07 ton/hari. Sedangkan pada tahun 2019 sampai 2021 terjadi penurunan produksi sampah yaitu dari 7.702,07 ton/hari sampai 7.233,82 ton/hari dikarenakan COVID-19. Pada penelitian ini volume sampah merupakan variable *dependent* (Y).



Gambar 4. Prediksi Kapasitas PLTSA DKI Jakarta

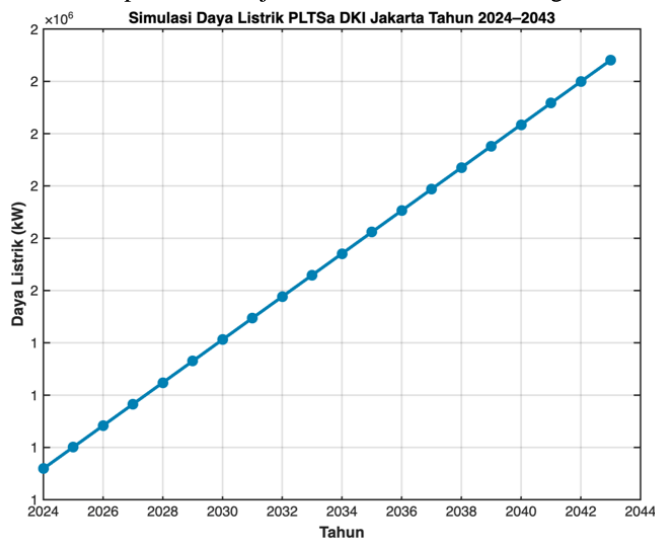
Hasil simulasi yang dilakukan terhadap potensi produksi energi listrik dari sampah di Provinsi DKI Jakarta selama periode 2011 hingga 2043, diperoleh tren peningkatan kapasitas listrik seiring pertumbuhan volume timbulan sampah. Dengan menggunakan pendekatan konversi 1 ton sampah menghasilkan sekitar 0.5 MWh listrik dan asumsi efisiensi sistem PLTSA sebesar 40%, estimasi kapasitas listrik harian yang dapat dihasilkan pada tahun 2023 adalah sebesar 123.04 MW, dengan produksi energi tahunan mencapai sekitar 1.079 GWh.

Prediksi untuk tahun 2043 menunjukkan bahwa kapasitas listrik harian dari pengolahan sampah diperkirakan akan meningkat hingga mencapai 213.51 MW, dengan total produksi energi tahunan sebesar 1.871 GWh. Kenaikan ini selaras dengan tren peningkatan volume sampah harian dari 5.858 ton/hari pada tahun 2023 menjadi sekitar 10.167 ton/hari pada tahun 2043.



Gambar 5. Simulasi Produksi PLTSa DKI Jakarta

Simulasi ini menegaskan bahwa pemanfaatan sampah sebagai sumber energi memiliki kontribusi yang signifikan dalam mendukung transisi energi bersih di wilayah perkotaan padat seperti Jakarta. Selain itu, integrasi pendekatan forecasting linier terhadap parameter sosial-ekonomi seperti jumlah penduduk dan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) juga memperkuat validitas proyeksi jangka panjang sistem PLTSa sebagai salah satu strategi pengelolaan sampah berkelanjutan dan diversifikasi energi terbarukan.



Gambar 6. Simulasi Daya PLTSa DKI Jakarta

Hasil yang kami peroleh berhasil mengestimasi potensi daya listrik yang dapat dihasilkan melalui pengolahan sampah organik di Provinsi DKI Jakarta menggunakan teknologi insinerasi. Tidak seluruh jenis sampah dapat diolah melalui proses pembakaran, karena hanya sekitar 53% dari total timbulan sampah merupakan sampah organik yang dapat dikonversi menjadi energi. Berdasarkan proyeksi rata-rata timbulan sampah harian selama periode 2024–2043 sebesar 8.950,64 ton/hari, diperoleh volume sampah organik sebesar 4.743.839,20 kg/hari, atau setara dengan 197.659,97 kg/jam.

Selanjutnya, perhitungan nilai kalor total dilakukan menggunakan nilai kalor rata-rata sampah organik sebesar 161,1 kJ/kg. Maka total energi panas teoritis dari pembakaran diperoleh sebesar:

$$Q_f = m \times CV = 197.659,97 \times 161,1 = 31.843.021,17 \text{ kJ/jam}$$

Dengan efisiensi proses pembakaran (η) sebesar 80%, maka energi termal yang efektif digunakan menjadi:

$$Q = \eta \times Q_f = 0,8 \times 31.843.021,17 = 25.474.416,93 \text{ kJ/jam}$$

Energi ini digunakan untuk memanaskan air menjadi uap, sehingga menghasilkan laju aliran massa uap (\dot{m}) berdasarkan entalpi input dan output uap sebagai berikut:

$$\dot{m} = \frac{Q}{h_2 - h_1} = \frac{25.474.416,93}{2637,6 - 125,8} = 10.141,90 \text{ kg/jam}$$

Kemudian, daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin dihitung menggunakan keluaran kerja turbin sebesar 673,82 kJ/kg, sehingga:

$$N_{\text{efektif}} = \dot{m} \times W_t = 10.141,90 \times 673,82 = 6.833.815,06 \text{ kJ/jam}$$

Jika dikonversi ke Watt nilainya menjadi 1.89 MW. Dengan mempertimbangkan efisiensi generator sebesar 90%, maka daya listrik aktual yang dihasilkan sebesar 1.701 MW. Hasil ini menunjukkan bahwa dari proses insinerasi sampah organik sebesar 8.950,64 ton/hari, dapat membangkitkan daya listrik sebesar 1,701 MW.

4. KESIMPULAN

Simulasi yang dilakukan terhadap proyeksi volume sampah harian di Provinsi DKI Jakarta selama periode tahun 2024 hingga 2043, diperoleh hasil bahwa potensi daya listrik yang dapat dihasilkan melalui teknologi insinerasi (PLTSA) mengalami tren peningkatan seiring dengan meningkatnya timbulan sampah. Perhitungan dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa hanya 53% dari total volume sampah merupakan sampah organik yang dapat diolah secara termal. Pendekatan menggunakan nilai kalor rata-rata sebesar 161,1 kJ/kg, efisiensi proses pembakaran sebesar 80%, dan efisiensi generator sebesar 90%, simulasi menunjukkan bahwa kapasitas daya listrik yang dihasilkan pada tahun 2024 adalah sebesar 1.652,87 kW, dan terus meningkat hingga mencapai sekitar 2.766,24 kW pada tahun 2043.

Kenaikan ini mencerminkan peningkatan signifikan dalam kontribusi energi terbarukan dari pengolahan sampah organik perkotaan. Hasil ini memperkuat argumen bahwa pemanfaatan sampah melalui teknologi PLTSA dapat menjadi solusi strategis untuk mendukung transisi energi bersih dan pengelolaan sampah yang berkelanjutan di wilayah metropolitan seperti DKI Jakarta. Namun, untuk implementasi nyata, faktor teknis, lingkungan, serta kebijakan harus dipertimbangkan secara integratif guna mengoptimalkan kapasitas dan keberlanjutan sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Fierda, I. Ismail, F. N. A. Mohamad, and L. H. Nur, "Article Review: The Policy Implementation of Waste to Energy Power Plant – Pilot Project in Surabaya, Indonesia," *E3S Web Conf. 2020 1st Int. Conf. Renew. Energy Res. Chall. ICoRER 2019*, vol. 190, pp. 1–6, 2020, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019000009>.
- [2] G. B. Muntoha, D. S. N. Afifah, and D. Hayuhantika, "Potensi Pantai Sine Kabupaten Tulungagung Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)," *J. Ris. Rekayasa Elektro*, vol. 5, no. 2, pp. 115–128, doi: <https://doi.org/10.30595/jrre.v5i2.19650>.
- [3] R. R. Al Hakim, "Model Energi Indonesia, Tinjauan Potensi Energi Terbarukan untuk Ketahanan Energi di Indonesia: Sebuah Ulasan," *ANDASIH J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 1, no. 1, Apr. 2020, doi: 10.57084/andasih.v1i1.374.
- [4] G. Otviriyanti, A. M. Fani, N. R. Yusuf, K. A. Haris, P. Alfatri, and W. Purwanta, "A study on the implementation of a circular economy in municipal solid waste management in the new capital city of Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1201, no. 1, p. 012005, Jun. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1201/1/012005.
- [5] J. Bai *et al.*, "Promoting decarbonization in waste and energy sectors in Delhi (India) through circular economy and resource recovery: A low carbon transition towards renewable energy," *Energy Rep.*, vol. 13, pp. 2106–2128, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.egy.2025.01.066.
- [6] J. P. Simanjuntak, R. A. M. Napitupulu, and P. Lumbangaol, "Rancangan Fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Sampah: Studi Kasus di Kota Medan Sumatera Utara," *SPROCKET J. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 84–93, Feb. 2022, doi: 10.36655/sprocket.v3i2.636.
- [7] M. Hemmati, N. Bayati, and T. Ebel, "Life cycle sustainability assessment of waste-to-electricity plants for 2030 power generation development scenarios in western Lombok, Indonesia under multi-criteria decision-making approach," *J. Build. Eng.*, vol. 95, p. 110335, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.job.2024.110335.
- [8] N. P. W. Romianingsih, "Waste to energy in Indonesia: opportunities and challenges," *J. Sustain. Soc. Eco-Welf.*, vol. 1, no. 1, Jul. 2023, doi: 10.61511/jssew.v1i1.2023.180.
- [9] N. A. Basri, A. T. Ramli, and A. S. Aliyu, "Malaysia energy strategy towards sustainability: A panoramic overview of the benefits and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 1094–1105, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.056.
- [10] B. Annisa, "Asesmen Aliran Kritis Sistem Pengelolaan Sampah Perkotaan di TPA Sampah," *SPECTA J. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 41–53, Nov. 2019, doi: 10.35718/specta.v1i2.80.
- [11] M. N. Fiqih, S. Syaiful, and R. S. Aminda, "PENEMPATAN BAK SAMPAH ORGANIK, ANORGANIK, DAN B3 DENGAN KONSEP GO GREEN PERUMAHAN BUDI AGUNG RW 03/RT 05," *J. Pengabd. Masy. UIKA Jaya Sink.*, vol. 1, no. 2, p. 71, Jul. 2023, doi: 10.32832/jpmuj.v1i2.1907.

- [12] B. Anggoro, A. Aprilian, and B. Halimi, "Potency of waste to energy - Bandung City case study," *Int. Conf. High Volt. Eng. Power Syst. ICHVEPS 2017 - Proceeding*, vol. 2017-Janua, pp. 135–139, 2017, doi: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225929.
- [13] I. Febriadi, "Pemanfaatan Sampah Organik Dan Anorganik Untuk Mendukung Go Green Concept Di Sekolah," *Abdimas Papua J. Community Serv.*, vol. 1, no. 1, pp. 32–39, Feb. 2019, doi: 10.33506/pjcs.v1i1.348.
- [14] A. Gani, R. Mamat, M. Nizar, S. Yana, M. H. M. Yasin, and S. M. Rosdi, "Prospects for renewable energy sources from biomass waste in Indonesia," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 10, pp. 1–14, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100880>.
- [15] A. Dashti *et al.*, "Review of higher heating value of municipal solid waste based on analysis and smart modelling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 151, p. 111591, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111591.
- [16] B. Alfaresi and F. Ardianto, "Desain dan Perancangan Miniatur Alat Penyaring Sampah Otomatis Berbasis PLC," *Electr. J. Rekayasa Dan Tek. Elektro*, vol. 16, no. 2, pp. 129–137, 2022.
- [17] S. A. T. Muawad *et al.*, "Waste-to-energy production of alternative energy source using landfill technology," *Proc. Int. Conf. Comput. Control Electr. Electron. Eng. 2019 ICCCEEE 2019*, pp. 2–6, 2019, doi: 10.1109/ICCCEEE46830.2019.9071024.
- [18] P. Jayadi, N. R. Hidayati, S. Saifulloh, S. Hamid, S. Shuib, and S. N. Ismail, "Forecasting Waste Generation with Increment Linear Regression Technique: A Case Study of SIMASKOT Application," *J. Comput. Sci. Adv.*, vol. 2, no. 5, pp. 297–306, Oct. 2024, doi: 10.70177/jzca.v2i5.1369.
- [19] J. Yang, L. Zhang, W. Wang, and Z. Qiu, "A Regression Analysis on the Effects of Factors on Plastic Waste Production," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 603, no. 1, p. 012013, Nov. 2020, doi: 10.1088/1755-1315/603/1/012013.

Perancangan Sistem Pengaturan Suhu dan Kelembaban pada Inkubator Bayi

Design of Temperature and Humidity Control System in Baby Incubator

M. Taufiq Tamam^{1*}, Latiful Hayat², Anis Kusumawati³, Chaerul Fauzi⁴,
Diaztito Syahrul Ramadhan⁵

^{1,2,4,5}Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

³Fakultas Kedokteran, Universitas Muhammadiyah Purwokerto

^{1,2,3,4,5}Jl. KH. Ahmad Dahlan Dukuhwaluh Kembaran Banyumas, 53182, Indonesia

email: ^{*}1tamam@ump.ac.id, ²latifulhayat@ump.ac.id, ³aniskusumawati@ump.ac.id, ⁴chairulfauzi27@gmail.com,

⁵diaztitosyahrul45@gmail.com

Informasi Artikel

Diajukan, 27 April 2025

Diterima, 25 Mei 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

Kata Kunci :

Bayi premature, Inkubator bayi,
Mikrokontroler, Suhu,
Kelembaban

Keyword :

Premature babies, Baby
incubator, Microcontroller,
Temperature, Humidity

ABSTRAK

Bayi yang baru lahir khususnya yang lahir dalam kondisi prematur, perlu mendapat perhatian khusus. Kondisi lingkungan yang harus diperhatikan adalah faktor suhu dan kelembaban. Agar faktor-faktor tersebut sesuai dengan kebutuhan bayi, maka bayi harus diletakkan pada ruang inkubator yang dapat diatur besaran suhu dan kelembabannya. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat sistem pengaturan suhu dan kelembaban pada inkubator bayi. Suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator diatur pada nilai yang tetap sesuai dengan besaran yang dibutuhkan untuk perkembangan bayi. Perubahan suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator dideteksi oleh sensor. Perubahan suhu dan kelembaban yang terjadi diumpan balikkan dan dibandingkan dengan suhu dan kelembaban acuan yang selanjutnya akan mengaktifkan rangkaian mikrokontroler untuk mengembalikan kepada besaran yang sudah ditetapkan. Dengan demikian suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator akan dijaga pada besaran yang konstan. Hasil uji coba menunjukkan alat ini memiliki tingkat kesalahan untuk pengaturan suhu sebesar 0,2946%, dan pengaturan kelembaban sebesar 0,1095%.

ABSTRACT

Newborn babies, especially those born prematurely, need special attention. Environmental conditions that must be considered are temperature and humidity factors. In order for these factors to suit the baby's needs, the baby must be placed in an incubator room where the temperature and humidity can be regulated. This research aims to design and create a system for regulating temperature and humidity in baby incubators. The temperature and humidity in the incubator room are set at constant values according to the amounts needed for the baby's development. Changes in temperature and humidity in the incubator room are detected by sensors. The changes in temperature and humidity that occur are fed back and compared with the reference temperature and humidity which will then activate the microcontroller circuit to return to the predetermined quantities. In this way, the temperature and humidity in the incubator room will be maintained at a constant level. Test results show that this tool has an error rate for setting temperature of 0.2946%, and setting humidity of 0.1095%

1. PENDAHULUAN

Ketika masih dalam kandungan, bayi hidup dalam perut ibunya dengan temperatur yang sama dengan temperatur tubuh ibunya (36°C-37°C). Ketika baru dilahirkan, bayi (terutama bayi prematur) belum dapat menyesuaikan diri terhadap temperatur di luar lingkungan. Saat-saat paling rawan bagi bayi adalah sesaat setelah bayi baru lahir. Salah satu prosedur standart *pasca neonatal* adalah semua bayi baru lahir harus dimasukkan ke dalam inkubator, jangka waktu yang dibutuhkan tergantung dari tingkat kesehatan, daya tahan dan sistem organ bayi itu sendiri.

Inkubator bayi merupakan salah satu dari sekian banyak alat kedokteran yang sangat dibutuhkan ketersediaannya di rumah sakit atau puskesmas. Inkubator bayi berfungsi untuk menjaga suhu tubuh bayi dalam batas normal terutama untuk bayi yang lahir prematur. Bayi prematur adalah bayi yang lahir kurang dari 37 minggu dan memiliki berat badan kurang dari 2500 gram. Oleh karena itu, bayi prematur memerlukan penanganan khusus. Inkubator sangat dibutuhkan untuk memberi kehangatan bagi bayi prematur. Bayi prematur beresiko mengalami hipotermia (suhu tubuh yang rendah) karena pada bayi prematur keadaan jaringan lemak di bawah kulit kurang atau masih tipis. Inkubator juga bermanfaat untuk meminimalkan resiko kontak bayi prematur dengan orang dan lingkungan yang berpotensi menularkan penyakit karena pada bayi prematur fungsi organnya masih belum sempurna [1].

Suhu inkubator bayi dijaga dalam batas normal sekitar 33°C sampai 35°C. Selain itu, kelembaban relatif sebesar 40% sampai 60% perlu dipertahankan juga untuk membantu stabilitas suhu tubuh bayi [2]. Inkubator bayi dengan ukuran 60cm x 40cm x 30cm yang terbuat dari bahan acrylic dengan memanfaatkan sensor suhu dan kelembaban DHT11 dan mikrokontroler DT-AVR *Low Cost Micro System*. Pemanas digunakan untuk menjaga suhu inkubator sedangkan kipas digunakan untuk menjaga kelembaban dan suhu inkubator [3].

Inkubator bayi tanpa listrik dengan memanfaatkan pipa tembaga lekuk datar yang diisi air panas sebagai pemasok energi panas. Capaian suhu rata-rata di dalam ruang inkubator sebesar 34,2°C. IC LM35 digunakan sebagai sensor suhu [4]. *Baby incubator* dengan sistem monitoring sentral menggunakan *wireless serial* dengan hasil pengamatan disimpan dalam *database*. Besaran yang diamati adalah suhu dan kelembaban. Pengiriman data dalam kondisi *line of sight* mencapai jarak 0-220m sedangkan dalam kondisi *non line of sight* mencapai jarak 0-180m [5].

Pengaturan suhu ruang inkubator bayi dengan menggunakan SCR dan mikrokontroler AT89S51. SCR berfungsi sebagai saklar yang digunakan untuk mengatur pemanas dari lampu pijar [6]. Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) pada inkubator bayi memungkinkan untuk memonitor dari jarak jauh. Klinik-klinik persalinan yang berada di daerah pinggiran dapat memanfaatkan teknologi ini [7]. Penggunaan notifikasi Whatsapp untuk monitoring suhu dan kelembaban pada inkubator bayi. Sensor DHT11 digunakan untuk mendeteksi suhu dan kelembaban. Jika kondisi suhu dan kelembaban diluar batas yang diijinkan akan muncul peringatan dan notifikasi pada Whatsapp [8].

Sistem monitoring inkubator bayi dengan memanfaatkan media *bluetooth* untuk sistem komunikasi. Parameter yang dimonitor adalah berat bayi, suhu tubuh bayi, dan detak jantung bayi. Hasil parameter terukur ditampilkan pada LCD [9]. Kontrol kestabilan suhu pada inkubator bayi menggunakan Matlab/Simulink dan mikrokontroler Arduino Uno. Nilai suhu dapat dipertahankan tetap pada 36°C sesuai dengan batas nilai yang dibutuhkan dalam inkubator bayi [10]. Monitoring dan pengaturan suhu pada inkubator bayi berbasis web dengan menggunakan *Thinspeak* sehingga proses monitoring bisa dilakukan secara *real time*. Hal ini memudahkan dokter/perawat dalam proses monitoring [11].

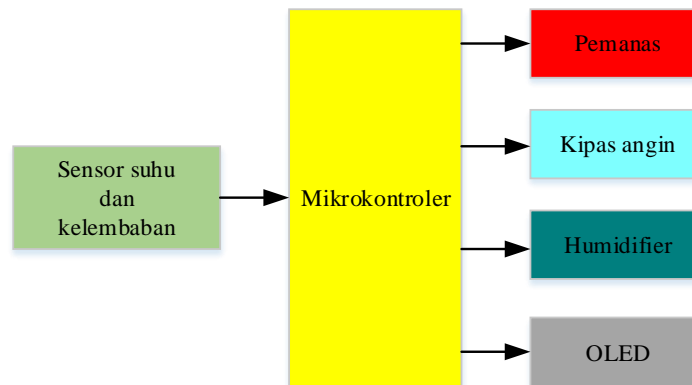
Inkubator bayi multifungsi berbasis ESP32 yaitu inkubator bayi yang dilengkapi dengan fototerapi dan ayunan mekanis. Inkubator bayi multifungsi ini memiliki kemampuan untuk menghangatkan tubuh bayi, terapi sinar bayi kuning, dan dapat menenangkan bayi ketika menangis [12]. Sistem dari inkubator bayi ini akan secara otomatis menyalakan atau mematikan kipas, *heater* atau *humidifier* sesuai dengan batas suhu dan kelembaban yang telah diatur. Pengaturan batas suhu inkubator bayi dapat diatur pada sebuah *Graphical User Interface* (GUI). Pada GUI, pengguna dapat mengisi dan menampilkan biodata bayi, aktivitas bayi, tingkat bilirubin bayi dan batas suhu inkubator yang diinginkan [13].

Purwarupa alat ukur parameter fisis inkubator bayi untuk mendukung program kemandirian produk dalam negeri. Parameter yang diukur terdiri dari pengukuran temperatur udara ruang inkubator, temperatur matras, kelembaban, kecepatan aliran udara dan tingkat kebisingan. Parameter-parameter hasil pengukuran ditampilkan pada LCD [14]. Penelitian ini membandingkan antara 2 kontroler yaitu kontroler *On-Off* dan PID *Simulated Annealing* yang merupakan kontrol PID yang parameternya disetel menggunakan metode *simulated annealing*. Kedua metode tersebut diaplikasikan pada inkubator dengan disertai 3 gangguan berupa variasi suhu udara luar yang mempengaruhi suhu di dalam inkubator [15]. Perancangan alat ukur suhu dan kelembaban menggunakan sensor DHT22 pada sistem pengkondisi udara di kereta rel diesel listrik [16].

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu tentang sistem pengaturan inkubator bayi, maka yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengembangan dan penerapan smart *baby incubator*. Parameter-parameter yang diperlukan antara lain suhu dan kelembaban ruang inkubator bayi. Suhu dan kelembaban ruang inkubator bayi akan dijaga tetap pada besaran yang diinginkan. Selain itu besaran suhu dan kelembaban yang terukur juga ditampilkan pada OLED (Organic LED) sehingga dapat dibaca oleh petugas jaga.

2. METODE PENELITIAN

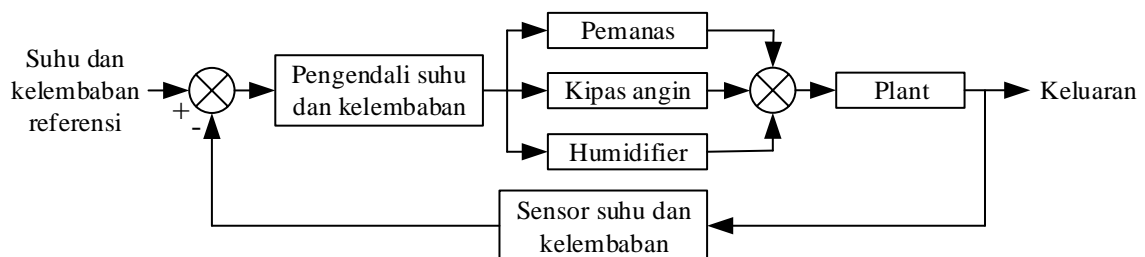
Secara garis besar diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1 yang memberikan penjelasan secara visual tentang bagaimana konsep penelitian, aliran informasi dan infrastruktur apa saja yang terlibat atau yang dibutuhkan.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem

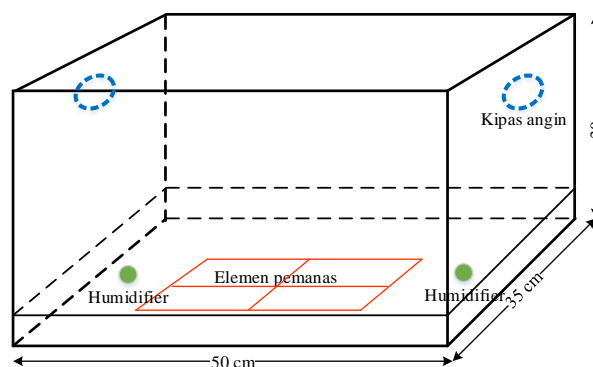
Sensor suhu dan kelembaban digunakan untuk mendeteksi perubahan suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator. Suhu diatur pada besaran 35°C sedangkan kelembaban pada besaran 55%. Suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator akan dibandingkan dengan suhu referensi. Jika terjadi selisih antara suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator dengan suhu dan kelembaban referensi, maka kontroler akan memerintahkan aktuator untuk mengembalikan besaran suhu dan kelembaban tersebut ke nilai referensi. Hasil pembacaan suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator ditampilkan pada OLED.

Proses atau hubungan fungsi dari masing-masing elemen pengaturan suhu dan kelembaban ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil pembacaan sensor suhu dan kelembaban diumpunbalikkan dan dibandingkan dengan suhu dan kelembaban referensi.



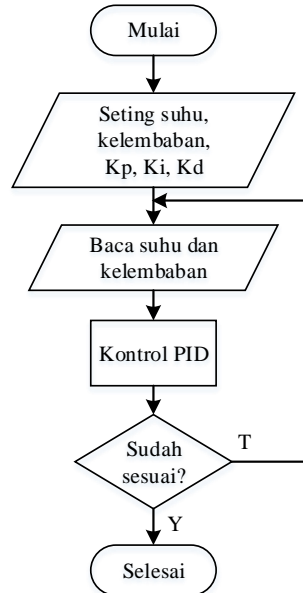
Gambar 2. Fungsi Alih Pengaturan Suhu dan Kelembaban

Gambar 3 menunjukkan desain kotak inkubator dengan ukuran 50cm x 35cm x 30cm. Elemen pemanas dan humidifier diletakkan di bagian bawah kotak inkubator, sedangkan di sisi kanan dan kiri dipasang kipas angin untuk membuang udara panas di dalam ruang inkubator.

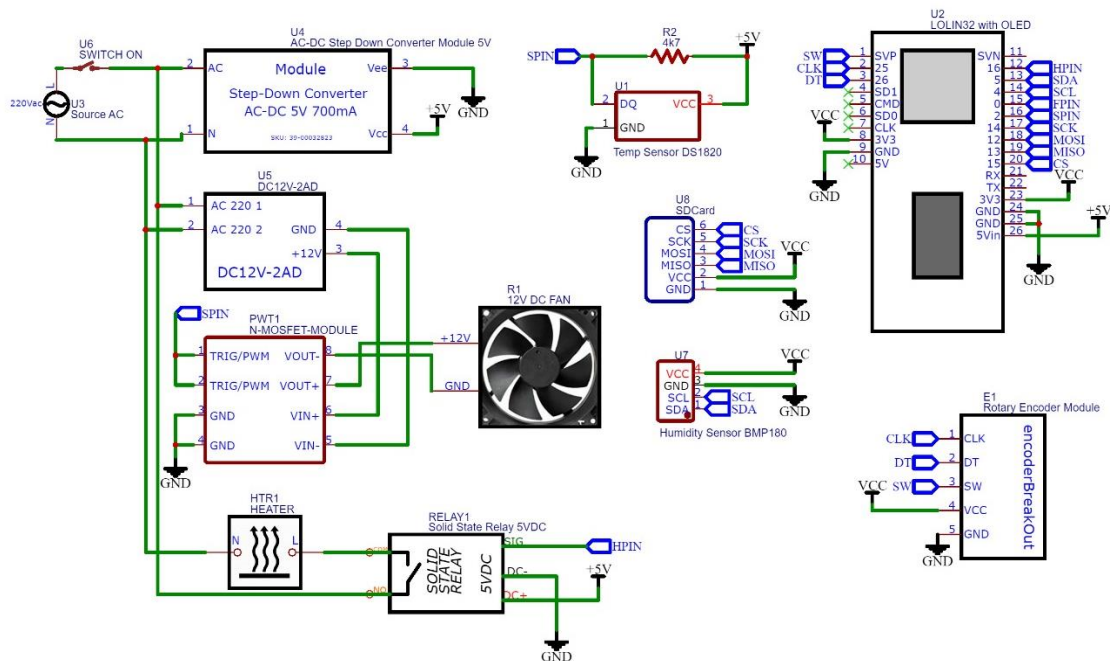


Gambar 3. Desain Kotak Inkubator

Gambar 4 menunjukkan diagram alir proses pengaturan suhu dan kelembaban pada ruang inkubator bayi. Suhu diatur pada besaran 35°C. sedangkan kelembaban pada besaran 55%. Proses pengujian dilakukan pada ruangan dengan suhu kamar (25°C). Perhitungan parameter-parameter PID dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols, yaitu dengan cara mengukur berapa lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu yang diinginkan [17]. Skema rangkaian secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Diagram alir sistem kendali suhu dan kelembaban



Gambar 5. Skema Rangkaian Lengkap

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian OLED

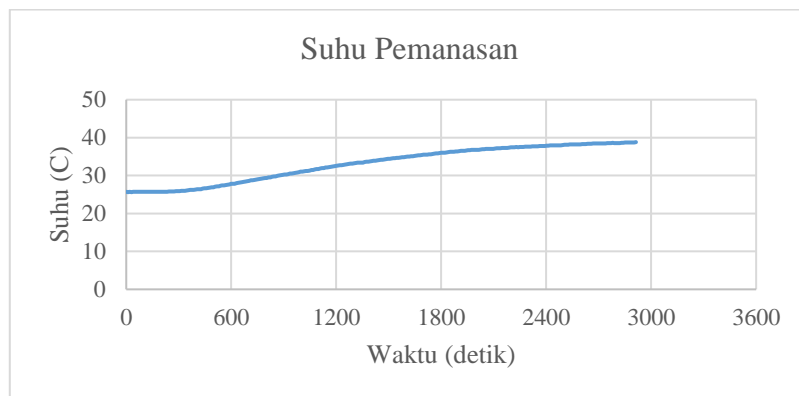
Pengujian OLED bertujuan untuk mengetahui pembacaan pengukuran suhu dan kelembaban sudah bisa ditampilkan pada OLED. Gambar 6 menunjukkan contoh tampilan hasil pengukuran suhu dan kelembaban pada OLED. Informasi yang ditampilkan pada OLED adalah suhu (°C) dan kelembaban (%) di dalam ruang inkubator.



Gambar 6. Contoh Tampilan pada OLED

3.2. Pengujian Sensor Suhu

Pengujian sensor suhu bertujuan untuk mengetahui kinerja sensor suhu yang digunakan. Dalam pengujian ini digunakan empat buah pemanas (*heater*) dengan daya masing 15 Watt. Pengujian dilakukan selama 2,5 jam dengan referensi suhu 35°C. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu 35°C dari suhu ruangan 25°C adalah 1699 detik (sekitar 28 menit). Grafik waktu pemanasan ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik Waktu Pemanasan

Perhitungan parameter-parameter PID menggunakan metode Ziegler-Nichols mulai pada suhu 25° dan mencapai suhu 35°C membutuhkan waktu 28 menit.

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta P} \quad (1)$$

ΔT adalah perubahan suhu (35°C - 25°C = 10°C)

ΔP adalah perubahan masukan (nilai PWM dari 0-255).

$$K = \frac{10}{255} = 0,039 \quad (2)$$

$$Kp = \frac{1,2 \times T}{K \times L} \quad (2)$$

$$Ti = 2L \quad (3)$$

$$Td = 0,5L \quad (4)$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} \quad (5)$$

$$Kd = Kp.Td \quad (6)$$

K_p : Penguatan Proposional

L : *Dead time* = 300 detik

T : Waktu Konstan = 900 detik

T_i : Waktu Integral

T_d : Waktu Derivatif

$$K_p = \frac{1,2 \times T}{K \times L} = \frac{1,2 \times 900}{0,039 \times 300} = \frac{1080}{11,7} = 92,307$$

$$T_i = 2L = 2 \times 300 = 600$$

$$T_d = 0,5L = 0,5 \times 300 = 150$$

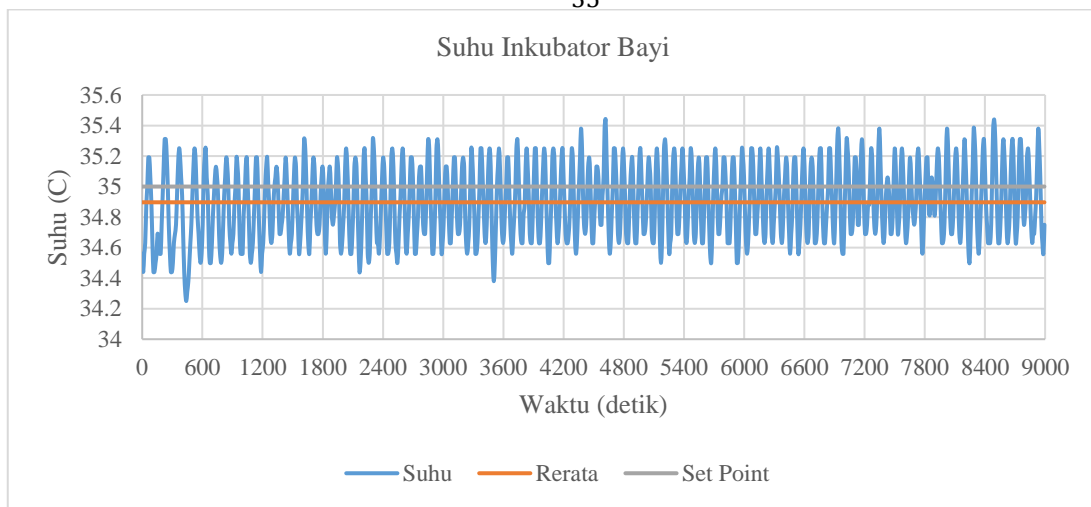
$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{92,307}{600} = 0,154$$

$$K_d = K_p \cdot T_d = 92,307 \times 150 = 13.846,05$$

Sehingga diperoleh parameter-parameter $K_p = 92,307$; $K_i = 0,154$; $K_d = 13.846,05$.

Gambar 8 menunjukkan grafik hasil pengujian sensor suhu dengan rata-rata suhu yang terukur adalah $34,8969^\circ\text{C}$. Suhu tertinggi terukur $35,44^\circ\text{C}$ dan suhu terendah terukur $34,25^\circ\text{C}$. Perubahan suhu terjadi karena pengaruh suhu ruangan di sekitar inkubator. Berdasarkan nilai referensi suhu dan suhu rata-rata yang terukur dapat dihitung selisih atau penyimpangan suhu yang terjadi.

$$\text{Prosentase kesalahan} = \frac{|34,8969 - 35|}{35} \times 100\% = 0,2946\%$$

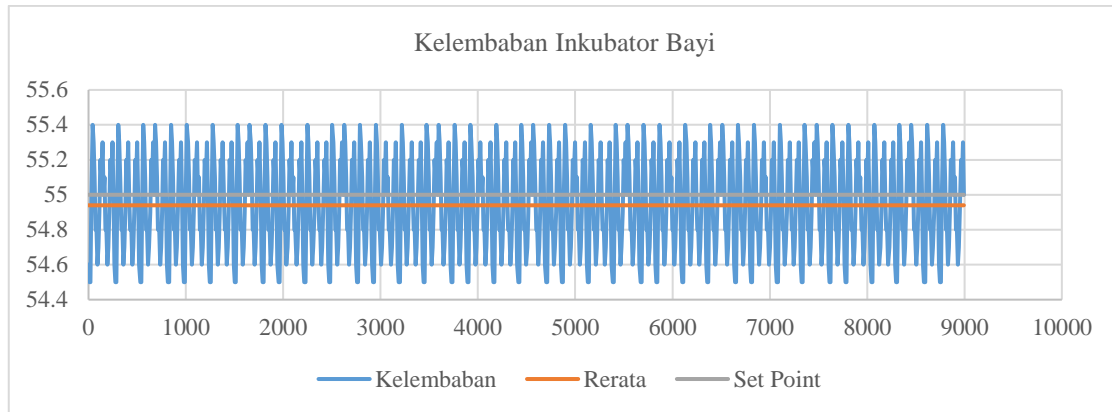


Gambar 8. Grafik Hasil Pengujian Sensor Suhu

3.3. Pengujian Sensor Kelembaban

Pengujian sensor kelembaban bertujuan untuk mengetahui kinerja sensor kelembaban yang digunakan. Pengujian dilakukan selama 2,5 jam dengan referensi kelembaban relatif 55%. Dari grafik pada Gambar 9 dapat diketahui rata-rata kelembaban yang terukur adalah 54,9398%. Kelembaban tertinggi terukur 55,4% dan kelembaban terendah terukur 54,5%. Perubahan kelembaban terjadi karena pengaruh kelembaban ruangan di sekitar inkubator. Berdasarkan nilai referensi kelembaban dan kelembaban rata-rata yang terukur dapat dihitung selisih atau penyimpangan kelembaban yang terjadi.

$$\text{Prosentase kesalahan} = \frac{|54,9398 - 55|}{55} \times 100\% = 0,1095\%$$



Gambar 9. Grafik Hasil Pengujian Sensor Kelembaban

4. KESIMPULAN

Sistem yang dibuat pada penelitian ini sudah dapat bekerja sesuai dengan perencanaan, yaitu dapat mengendalikan suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator bayi. Perhitungan parameter-parameter PID dengan metode Ziegler-Nichols diperoleh $K_p = 92,307$; $K_i = 0,154$; $K_d = 13.846,05$. Hasil pengaturan suhu dan kelembaban di dalam ruang inkubator memiliki nilai kesalahan yang relatif kecil dari suhu dan kelembaban yang diinginkan. Pengaturan suhu memiliki kesalahan 0,2946% sedangkan pengaturan kelembaban memiliki kesalahan 0,1095%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Muhammadiyah Purwokerto yang telah menjadi penyandang dana untuk kegiatan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Budiono, (2012), *Disain Dan Pembuatan Inkubator Berdasarkan Distribusi Temperatur*, JURNAL GAMMA, Volume 8, Nomor 1, ISSN: 2086-3071, pp. 140 – 147.
- [2] Surasmi, A., Handayani, S., dan Kusuma, H.N., (2003), *Perawatan Bayi Risiko Tinggi*. Jakarta: Penerbit Buku Kedokteran EGC.
- [3] Lapono, L. A. S., (2016), *Sistem Pengontrolan Suhu Dan Kelembaban Pada Inkubator Bayi*, Jurnal Fisika, Vol. 1, No.1, pp. 12-17.
- [4] Wihantoro, Aziz, A. N., Effendi, M., dan Raharjo, S. A., (2013), *Kinerja Inkubator Bayi dengan Pemanas Tanpa Listrik yang Dilengkapi Unit Pemantau Suhu dan Kelembaban Udara*, Indonesian Journal of Applied Physics, Vol. 3, No. 1, ISSN: 2089 – 0133, pp. 1-9.
- [5] Utomo, A. S., Satrya, A. B., dan Tapparar, Y., (2018), *Monitoring Baby Incubator Sental Dengan Komunikasi Wireless*, Jurnal SIMETRIS, Vol. 9, No. 1, ISSN: 2252-4983, pp. 225-230.
- [6] Sugito, H., dan Suryono, (2009), *Rancang Bangun Sistem Pengaturan Suhu Ruang Inkubator Bayi Berbasis Microcontroller AT89S51*, Berkala Fisika, Vol. 12, No. 2, ISSN: 1410 – 9662, pp. 55-62.
- [7] Zulfadli, (2021), *Inkubator Bayi Berbasis IOT untuk Klinik*, Jurnal Sistem Informasi, ISSN P: 2598-599X; E: 2599-0330, pp. 45-51.
- [8] Rahsidin, D., Ritzkal, dan Hendrawan, A. H., (2019), *Sistem Monitoring Suhu dan Kelembaban Inkubator Bayi dengan Teknologi Whatsapp*, Seminar Nasional Sains dan Teknologi, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, p - ISSN: 2407 – 1846, e - ISSN: 2460 – 8416, pp.1-9.
- [9] Hidayati, Q., Yanti, N., dan Jamal, N., (2019), *Sistem Monitoring Inkubator Bayi*, JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN KOMPUTER TRIAC, Vol. 6, No. 2, ISSN 2615-5788, Print (2615-7764), pp. 51-55.
- [10] Nurcahya, B., Widhiada, I. W., dan Widhiada, I. D. G. A., (2016), *Sistem Kontrol Kestabilan Suhu Pada Inkubator Bayi Berbasis Arduino Uno Dengan Matlab/Simulink*, Jurnal METTEK Vol. 2, No. 1, ISSN 2502-3829, pp. 35 – 42.
- [11] Amelia, M., (2020), *Sistem Monitoring dan Pengontrolan Suhu pada Inkubator Bayi Berbasis Web*, JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL), Volume 06, Number 02, ISSN: 2302-3309, pp. 104-112.
- [12] Fadilla, R. R., Idhil, A.N. I. I., Anggraini, M. A. P., Dewi, A.K., Sanjaya, M.R., Nurrohman, M. Y., dan Rahmadwati, (2020), *Sistem Monitoring Inkubator Bayi Multifungsi dengan Fototerapi dan Ayunan Mekanis Berbasis ESP32*, Jurnal EECCIS Vol. 14, No. 3, p-ISSN: 1978-3345, e-ISSN(Online): 2460-8122, pp. 115-119.
- [13] Setyaningsih, E., Tommy, dan Tanudjaja, H., (2019), *Sistem Pemantauan Inkubator Bayi Menggunakan Jaringan Wifi dan Berbasis Database*, T E S L A, VOL. 21, NO. 2, pp. 145-155.

- [14] Handayani, I. N., Ma'murotun, dan Wisana, I. D. G. H., (2023), *Alat Ukur Parameter Fisik Inkubator Bayi: Suhu, Kelembaban, Aliran Udara dan Tingkat Kebisingan*, Jurnal Sains dan Teknologi, Volume 12, Number 1, P-ISSN: 2303-3142 E-ISSN: 2548-8570, pp. 148-155.
- [15] Utama, Y.A. K., dan Hidayat, D. T., (2020), *Desain Metode PID-Simulated Annealing Sebagai Kontrol Temperatur Pada Inkubator Bayi*, Jurnal JE-Unisla, Vol. 5, No. 1, P-ISSN: 25020986, E-ISSN: 26860635, pp. 342-348.
- [16] Putri, S. A., Salim, A. T. A., Bisono, R. M., Indarto, B., dan Nurdiansyah, R. T., (2022), *Rancang Bangun Alat Ukur Temperatur dan Kelembapan Sistem Pengkondisi Udara pada Kereta Rel Diesel Elektrik*, TELKA, Vol. 8, No. 2, ISSN (e): 2540-9123, ISSN (p): 2502-1982, pp. 126-137.
- [17] Supriyanto, H., Suryatini, F., Martawireja, A. R. H., dan Rudiansyah, H., (2022), *Impelentasi Kontroler PID Dengan Metode Tuning Ziegler-Nichols Dan Cohen-Coon Pada Sistem SCADA Kendali Level Air*, JTT (Jurnal Teknologi Terapan), Vol. 8, No. 2, p-ISSN 2477-3506, e-ISSN 2549-1938, pp. 149-157.

Design and Calculation of Single Tuned Passive Filter for Harmonic Mitigation in a 1250 kVA Distribution Transformer at PT. INKA (Persero) Madiun

Reza Sarwo Widagdo¹, Puji Slamet², Balok Hariadi³, Almadea Chintya Anka⁴

^{1,2,3,4}Department of Electrical Engineering, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

Jl. Semolowaru No. 45 Surabaya, East Java, Indonesia

email: ¹rezaswidagdo@untag-sby.ac.id, ²pujislamet@untag-sby.ac.id, ³balokhariadi@untag-sby.ac.id,

⁴almadea1653.d@gmail.com

Informasi Artikel

Diajukan, 31 Desember 2024

Diterima, 30 Mei 2025

Diterbitkan, 10 Juni 2025

Keyword :

Passive Filter, Harmonics, Single-Tuned, Power Quality

ABSTRACT

In an effort to enhance quality and customer satisfaction, PT. INKA continues to innovate and improve its products, evidenced by increasingly advanced railway facilities. This study provides reference data for PT. INKA (Industri Kereta Api) Madiun in designing a filter to enhance power quality in transformers, prevent equipment damage caused by harmonics, and ensure the reliability of the protection system. The research, conducted at PT. INKA (Persero) Madiun, specifically focused on Trafo Station B, using a quantitative method with a descriptive approach to systematically and accurately describe variables. Measurements before filter installation showed current THD values of 28,50%, 4,0%, and 2,4% in phases R, S, and T, and voltage THD values of 1,51%, 1,55%, and 1,57%. After the filter was installed, current THD decreased to 11,07%, 1,37%, and 1,09%, and voltage THD to 0,87%, 0,85%, and 0,81%. Based on simulations using ETAP software, the passive single-tuned filter design successfully reduced harmonic distortion with specifications of a 2285 μ F capacitor, a 0,00308732 H inductor, and a 0,011-ohm resistor. The findings demonstrate the filter's effectiveness in improving power quality and ensuring system reliability.

1. INTRODUCTION

In electrical power system distribution, train production facilities represent one of the largest energy consumers, primarily due to the extensive use of electrical equipment in their operations, including office areas. According to researchers [1], nearly all electrical devices incorporate electronic components. These include common appliances such as air conditioners, fans, water pumps, computers, and others. Researchers [2] highlight that while electronic devices contribute to increased efficiency and ease of use, they also introduce challenges to power quality. This is because such devices are classified as electronic loads, which are known sources of harmonics. Harmonics are defined as periodic waveforms whose frequencies are integer multiples of the fundamental system frequency. As noted by researchers [3], the presence of harmonics can distort the main sinusoidal waveform. Similarly, researchers [4] point out that harmonics alter the ideal waveform, transforming it into a distorted, non-sinusoidal form. Researchers [5] further stress the significance of managing harmonic distortion, especially in environments with high energy consumption such as office buildings and industrial sectors, where losses can be substantial. These findings underscore the critical importance of analyzing harmonic phenomena, especially considering that modern power systems still predominantly operate using alternating current (AC), where ideally sinusoidal waveforms are expected.

The issue of power quality, influenced by consumer loads, is partly due to the use of nonlinear loads. A nonlinear load is characterized by a situation in which the output waveform does not align with the input voltage in each half-cycle, resulting in current and voltage waveforms that deviate from their ideal sinusoidal forms, often leading to distortion [6]. While the electrical energy supplied to the load typically has a sinusoidal waveform, the use of nonlinear loads causes the waveform shape to change. These loads cause the current flowing through the system to differ from the sinusoidal voltage waveform. Nonlinear loads refer to electronic equipment that uses semiconductor components as switches, which contributes to current distortion. The presence of nonlinear loads leads to the generation of harmonics in the electrical power system. Harmonics are high-frequency waves that are integer multiples of the system's fundamental frequency. These harmonics cause deviations in the frequency of both current and voltage, which significantly impact power quality. As a result, the current and voltage waveforms become non-sinusoidal, with the harmonic frequencies overlapping with the fundamental frequency, leading to further distortion.

One of the consequences of harmonics is the generation of heat in electrical equipment [7]. Distribution transformers, which are key components in power systems, are particularly affected by harmonics. A distribution transformer is designed to step down the voltage from 20 kV to 380/220 V for use by various loads. These transformers are directly connected to the loads, particularly nonlinear loads used by consumers, making them susceptible to harmonic distortion. The presence of harmonics in distribution transformers results in a factor-k value, which represents the influence of harmonic load currents at different frequencies. This factor leads to derating of the transformer and an increase in power losses [8]. To mitigate these effects, two types of filters are commonly used to reduce harmonic distortion: active filters and passive filters. Active filters utilize active components such as operational amplifiers (Op-Amps) and transistors, while passive filters rely on passive components like resistors, capacitors, and inductors. Passive filters offer advantages such as lower equipment costs compared to active filters, as well as the ability to improve power quality by compensating for reactive power. One example of a passive filter is the single-tuned passive filter, which is designed to reduce harmonics at a specific order or operating frequency [9].

Previous research has focused on the design of a single-tuned passive filter to reduce harmonics in nonlinear loads. The objective is to mitigate harmonics by placing the designed filter between the power source and five types of nonlinear loads: energy-saving lamps, fluorescent lamps, refrigerators, televisions, and pump motors. The study's results demonstrate a reduction in the Total Harmonic Distortion (THD) of the current from 17.8% before installation to 10.2% after the filter was applied. The THD value of the voltage also decreased from 3.8% to 2.5% [10]. This study analyzes the design of a passive filter to suppress harmonics in nonlinear load installations. The research involves designing a passive filter to mitigate harmonics, with simulations conducted using MATLAB. The measurements indicate that the initial voltage THD was 9.41%, and the current THD was 15.05%. After the filter was installed, the voltage THD decreased to 6.61%, and the current THD dropped to 10.40%. Additionally, the power factor improved from 0.971 to 0.992 [11]. For this study, the author chose a 1250 kVA transformer due to its large load capacity. The single-tuned passive filter was selected to minimize harmonics, as harmonic measurements of the transformer showed that the only values exceeding the standard were at the third harmonic order. The effectiveness of the single-tuned passive filter in reducing harmonics serves as a reference for assessing the impact of its installation.

2. RESEARCH METHODS

In this study, the methodology used to design and calculate a single tuned passive filter for harmonic mitigation in a 1250 kVA distribution transformer at PT. INKA (Persero) Madiun involves several key steps. The process begins with an analysis of the existing electrical system, including measurements of harmonic distortion at the load and distribution network. Next, an appropriate filter type, namely the single tuned passive filter type, is selected and designed to attenuate the dominant harmonic frequencies. The filter's dimensions and specifications are calculated based on the measured harmonic data, utilizing calculation methods in accordance with international standards. Simulation analysis and field testing are also conducted to ensure that the designed filter effectively reduces harmonic distortion and improves the power quality at the facility.

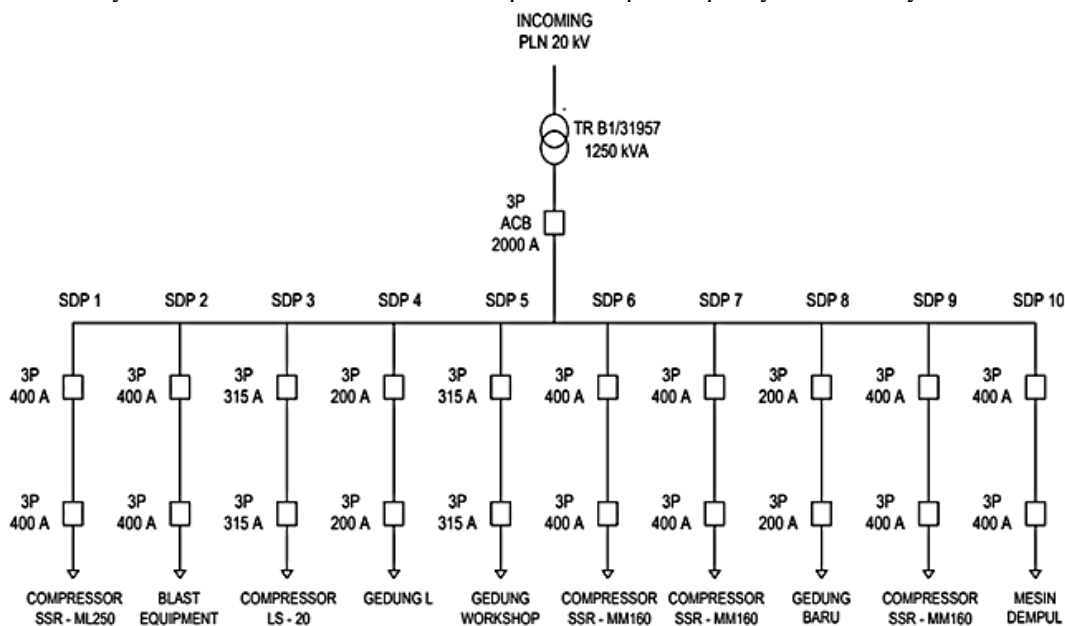


Figure 1. Single Line Diagram of 1250 kVA Distribution Transformer PT. INKA (PERSERO) Madiun

2.1. Harmonis Analysis

In this section, a harmonic analysis is performed to identify the level of harmonic distortion in the existing electrical system at PT. INKA (Persero) Madiun. Measurements are taken at various points within the distribution network and at the 1250 kVA distribution transformer, which is the focus of this study. The obtained harmonic data is then analyzed to determine the dominant frequencies and the total harmonic distortion (THD) present, using appropriate harmonic analysis tools. The results of this analysis provide insights into the impact of harmonics on power quality and serve as the foundation for designing the single tuned passive filter aimed at mitigating harmonics in the system. The initial calculations required are data from THD (Total Harmonic Distortion) and TDD with the following equations [12]:

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}{I_1^2}} \tag{1}$$

Where THDI represents the Total Harmonic Distortion (THD) of the current component in percentage, I_h represents the harmonic current value at order h in amperes, I_1 represents the fundamental current value in amperes, and h is the harmonic order. Both I and I_h are obtained using a power quality analyzer HIOKI 3169-20 set to a 3P4W (three-phase-four-wire) cable configuration. After obtaining the highest THDI value during the measurement period, the TDD value at that time can be determined using the following equation [12]:

$$TDD_I = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}{I_L^2}} \tag{2}$$

Where TDD represents the THDI value of the maximum current component in percentage, I_h represents the harmonic current value at order h in amperes, I_L represents the fundamental current value at peak load in amperes, and h is the harmonic order (3, 5, 7, etc.). The TDD value is essential in assessing the overall harmonic distortion in the electrical system, as it helps to quantify the impact of harmonics on system performance. Higher TDD values indicate a greater presence of harmonic currents, which can lead to equipment malfunctions and inefficiencies.

Table 1. Voltage Harmonics Standard Based on IEEE 519-2014 [13]

<i>Bus Voltage V at PCC</i>	<i>Individual Harmonics</i>	<i>Total Harmonic Distortion (%)</i>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 < V$	1.0	1.5*

Table 2. Current Distortion Limits For 120V to 69 kV Systems [14]

<i>Maximum harmonic current distortion in percent of I_L</i>						
<i>Individual harmonic order (odd harmonic)^{a, b}</i>						
<i>I_{sc}/I_L</i>	<i>3 < h < 11</i>	<i>11 < h < 17</i>	<i>17 < h < 23</i>	<i>23 < h < 35</i>	<i>35 < h < 50</i>	<i>TDD</i>
$< 20^c$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15	7	6,0	2,5	1,4	20,0

After obtaining the TDD value that indicates the maximum harmonic content present in the system, the next required data is the IHDI value at the time when the THD value is highest, using the following equation [12]:

$$IHD_I = \sqrt{\frac{I_h^2}{I_1^2}} \tag{3}$$

Where IHDI represents the harmonic current distortion (IHD) value at harmonic order h in percentage, I_h represents the harmonic current value at order h in amperes, and I_1 represents the fundamental current value in amperes. This IHDI parameter will later be needed for designing a passive filter at a specific harmonic order.

2.2. Single Tuned Type Passive Filter Design

The Single Tuned Type Passive Filter is a widely utilized passive filter design that focuses on attenuating specific frequencies within electrical or electronic systems. This type of filter is characterized by a single resonant frequency, which can be tuned to effectively eliminate unwanted frequency components from an input signal. Typically, the design consists of passive components such as resistors (R), inductors (L), and

capacitors (C), which are strategically arranged to achieve the desired frequency response. Single Tuned Filters are commonly applied in power systems to mitigate harmonic distortions and high-frequency noise, ensuring improved signal quality and system stability. The design and performance of such filters are critical in applications requiring precise frequency control and minimal interference. Previously, the IHDI value, in addition to being used for designing filters, can also be used to calculate the performance degradation of transformers (Derating Factor). To calculate the Derating Factor, the following equation [15] can be used:

$$\text{Derating Factor} = \frac{1}{k} \times 100\% \quad (4)$$

Where the value of the Derating Factor indicates the maximum load that a transformer can handle due to the presence of harmonics. To calculate the value of factor K, the following equation can be used [15]:

$$K = \left[1 + \frac{e}{1+e} \left(\frac{I_1}{I} \right)^2 \sum_{n=2}^N n^q \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Where e represents the eddy current losses caused by the sinusoidal current at the fundamental frequency divided by the losses due to DC current at the reference temperature, q is the exponential constant (the value used is 1,7), I_1 represents the fundamental current (A), and I_n represents the harmonic current at order n (A).

After obtaining the Derating Factor value, the next step is to design the passive filter. This filter serves to minimize the disturbances caused by harmonics. At this stage, the required data is the IHD_I values to determine at which harmonic order the harmonics do not meet the standard [16]. After identifying the harmonic order that does not comply with the standard, a passive filter is designed to reduce the harmonics at that order. Some parameters for designing the filter include the capacitor (C), inductor (L), and resistor (R) for each order, using the following formula [16]:

$$X_C = \frac{kV^2}{Q_{comp}} \quad (6)$$

Where,

X_C = Capacitor reactance (Ω)

kV = Voltage

Q_{comp} = Reactive power compensation (kVAR)

After the capacitive reactance (X_C) value is determined, the next step is to calculate the required capacitance (C) for the capacitor, with the calculation as follows [16]:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (7)$$

Where,

C = Capacitor value (Farad)

f_0 = Frequency system (Hz)

X_C = Capacitor reactance (Ω)

To determine the inductor value in a single tuned passive filter, the inductive reactance (X_L) value must be calculated. After calculating the inductive reactance (X_L), the inductance (L) value for the inductor component can be determined [16].

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (8)$$

Where,

X_L = Inductor reactance (Ω)

X_C = Capacitor reactance (Ω)

h_n = n^{th} harmonic order

From the calculation results of the inductive reactance value (X_L) above, it can be seen that the harmonics to be filtered are harmonics of the 3th order. So, the characteristic reactance value of the filter can be determined.

$$X_n = h_n X_L \quad (9)$$

Where,

X_n = Filter characteristic reactance (Ω)

h_n = n^{th} harmonic order

X_L = Inductor reactance (Ω)

From the results of the calculation of the inductive reactance value (X_L), the inductance value (L) required for the inductor can be determined so that the calculation is as follows [16].

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} \quad (10)$$

Where,

L = Inductance value of passive filter (H)

X_L = Inductor reactance (Ω)

f_0 = Frequency system (Hz)

In this simulation, the filter quality factor value (Q) selected is 100. To determine the value of resistance (R) on the single tuned passive filter resistor, it can be calculated using the following equation [16].

$$R = \frac{X_n}{Q} \quad (11)$$

Where,

R = Resistance value of passive filter (Ω)

X_n = Filter characteristic reactance (Ω)

Q = Quality Factor

3. RESULT AND ANALYSIS

This section presents the results and analysis of the design and calculation of a single tuned passive filter for harmonic mitigation in a 1250 kVA distribution transformer at PT. INKA (Persero) Madiun. The calculations include the selection of filter component values, frequency response analysis, and the estimation of harmonic reduction achieved after the filter installation. Additionally, the discussion will evaluate the performance of the filter in reducing harmonic distortion in the power distribution system and its impact on the operational efficiency of the transformer. The obtained results will be compared to relevant standards and guidelines to ensure the effectiveness of the filter design in improving power quality.

3.1. Determining the R, L, and C values in Passive Filters

When determining the filter value to reduce harmonics, the correct capacitor value must be ensured. If the harmonic current is small while the capacitor capacity is larger, a new issue, such as over-capacitance, may arise. This condition can lead to an increase in temperature on other equipment, one of which is the conductor, due to the rise in current and voltage. After the identification process, the next step is to determine the power factor (pf) value. Then, calculate the required capacitance and inductance values for the passive filter. To obtain the capacitance value (C) in a single tuned passive filter, the reactive power of the capacitor (Q_{Comp}) and the capacitive reactance (X_C) values must be determined. It is assumed that the power factor improvement is 0,95, so the calculation is as follows:

$$\begin{aligned} Q_{comp} &= \sqrt{\left(\frac{P_1}{PF_1}\right)^2 - P_1^2} - \sqrt{\left(\frac{P_1}{PF_2}\right)^2 - P_1^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{229}{0,77}\right)^2 - 229^2} - \sqrt{\left(\frac{229}{0,95}\right)^2 - 229^2} = 114,9 \text{ kVAR} = 0,0115 \text{ MVAR} \end{aligned}$$

After determining the Q_{Comp} value required to meet the reactive power of the harmonic source, the next step is to calculate the capacitive reactance (X_C) using the following equation:

$$X_C = \frac{kV^2}{Q_{Comp}} = \frac{0,4^2}{0,115} = 1,39 \text{ k}\Omega = 1390 \Omega$$

After determining the capacitive reactance (X_C) value, the next step is to calculate the required capacitance (C) for the capacitor, with the calculation as follows:

$$C = \frac{1}{2\pi f_0 X_C} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 1390} = 0,00229116 \text{ F} = 2285 \mu\text{F}$$

The focus of the filter design is a single tuned filter at the 3rd order. Therefore, after the frequency is set to $3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$, the attenuation of the harmonic frequency must meet the requirements for the use of capacitor and inductor components.

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 150)^2 \times 0,00229116} = 0,00308732 \text{ H}$$

$$X_L = \omega_L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot (0,00308732) \text{ H} = 0,9694 \Omega$$

A resistor component with a very small value is also needed to conduct the harmonic current. The filter quality factor (Q) for the single tuned filter is chosen between 30 and 60. In this filter design, the value of Q is chosen to be 30. Therefore, the resistor value can be calculated as follows:

$$R = \frac{X_n}{Q} = \frac{0,00308732}{30} = 0,011 \Omega$$

Table 3. Passive Filter Specifications Based on Calculations

Parameter	Value
Q_{Comp}	114,9 kVAR
XC	1390 Ω
XL	0,969 Ω
C	2285 μ F
L	0,00308732 H
R	0,011 Ω

3.2. Simulation Result

The field measurement results are compared and the measured values are shown in Table 4. The current THD values obtained using the harmonics analyzer for phases R, S, and T are 28.5%, 4.0%, and 2.4%, respectively. In contrast, according to the ETAP software modeling, the current THD before filter implementation is 28.50%, 4.90%, and 2.40% for phases R, S, and T, respectively.

Table 4. Comparison of Total Harmonic Distortion Values

THD Value	Measurement Result		
	Harmonics Analyzer	ETAP 19 Simulation	
Current (%)	Real Time	Without Filter	Using Filter
R	28,5%	28,50%	11,07%
S	4,0%	4,0%	1,37%
T	2,4%	2,4%	1,09%
Voltage (%)	Realtime	Without Filter	Using Filter
R	1,51%	1,51%	0,87 %
S	1,55%	1,55%	0,85 %
T	1,54 %	1,54 %	0,81 %

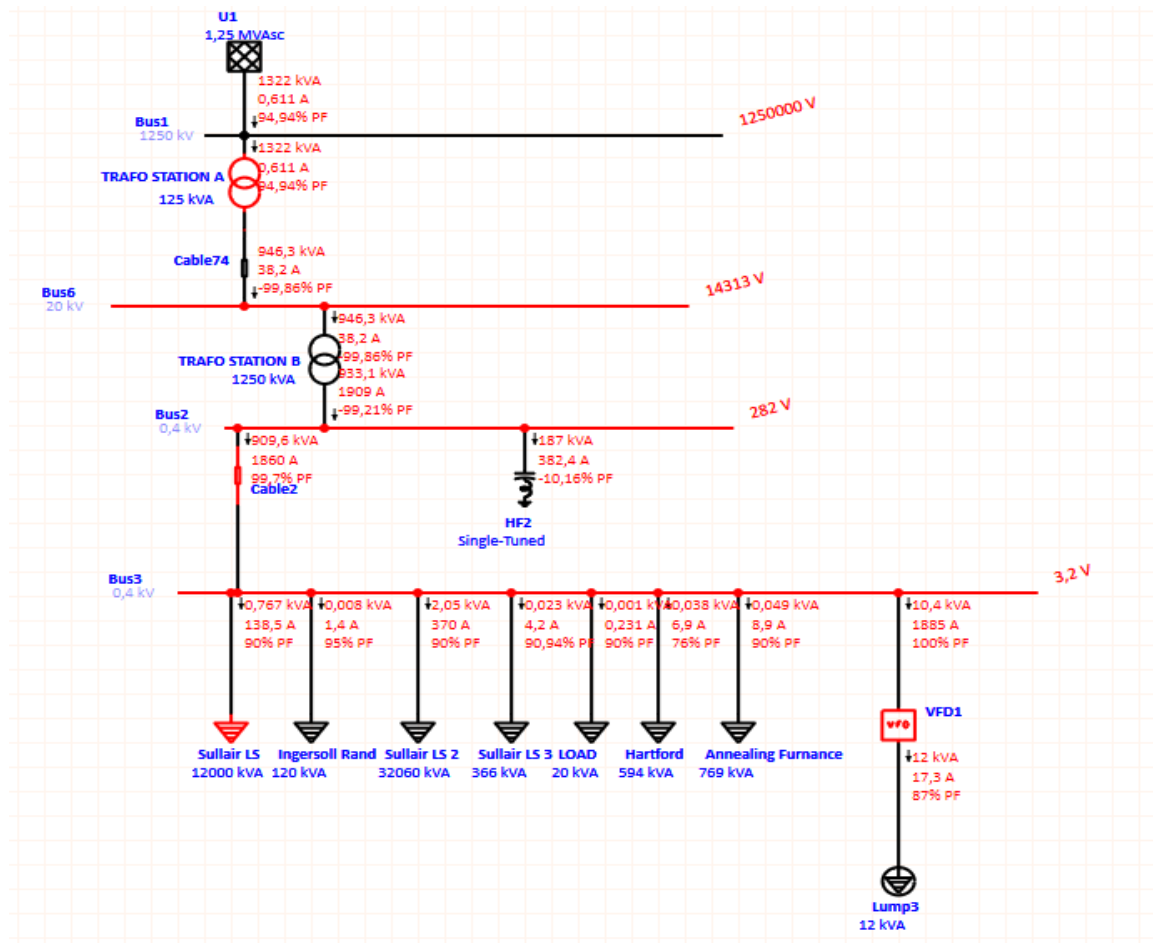


Figure 2. Harmonic Analysis Before Implementing Passive Filters

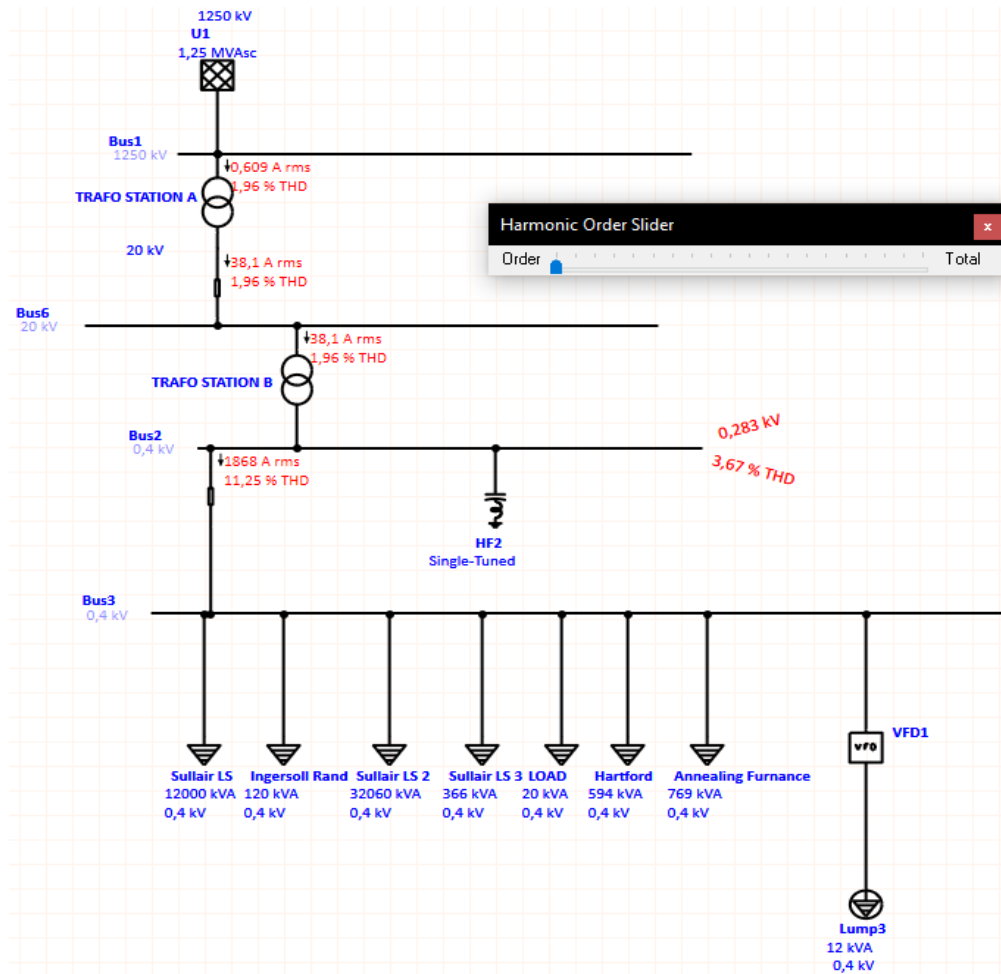
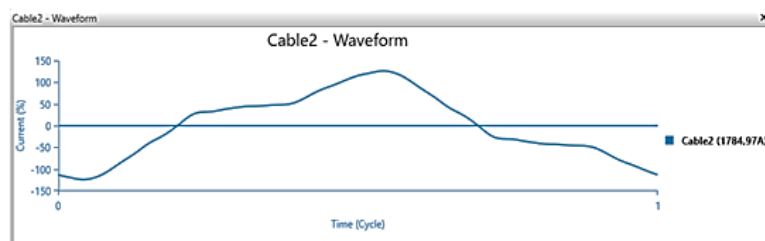
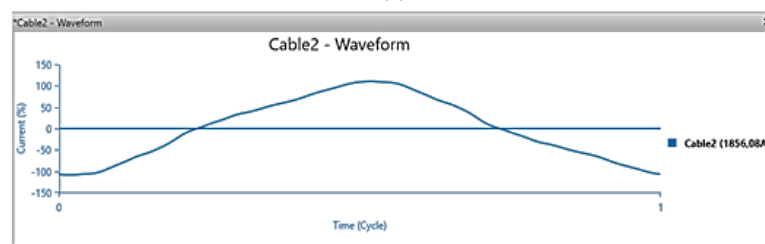


Figure 3. Harmonic Analysis After Implementing Passive Filters

Based on Figure 2 and Figure 3, THD values for phases R, S, and T decreased to 11.07%, 1.37%, and 1.09%, respectively, while THDv for the same phases also reduced from 1.51%, 1.55%, and 1.57%. Active power at bus 1 dropped from 909.6 kVA with 1860 A and a 99.7% power factor to 820.5 kVA with 1736 A and a 99.4% power factor after the filter was installed at bus 2. The simulation shows the single-tuned passive filter effectively reduces power losses.

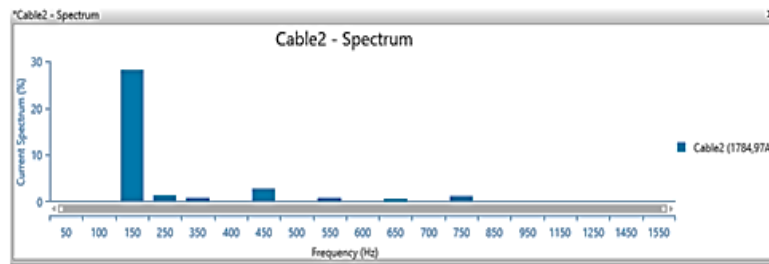


(a)

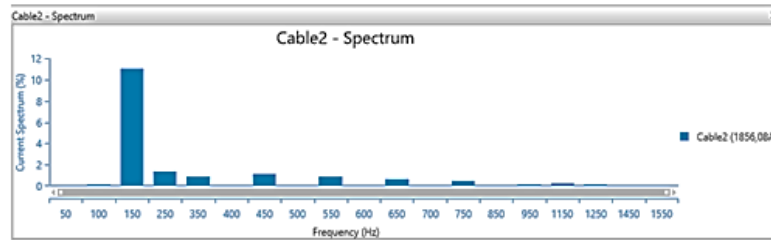


(b)

Figure 4. Waveform Distortion Due to Harmonics: Before (a) and After (b) Passive Filter Installation



(a)



(b)

Figure 5. Spectrum Harmonics: Before (a) and After (b) Passive Filter Installation

The analysis of harmonic distortion before and after the installation of a passive filter can be summarized as follows. In the waveform before the passive filter installation (Figure 4a), the current signal shows significant distortion, deviating from the ideal sinusoidal shape. The peak current amplitude is 1784,97 A, indicating the presence of harmonics typically caused by non-linear loads such as inverters, rectifiers, or electronic devices. These harmonics reduce system efficiency and can generate excessive heat in electrical equipment. After the installation of the passive filter (Figure 4b), the current waveform becomes smoother and closer to an ideal sinusoidal shape, reflecting a reduction in harmonic distortion. The peak current amplitude increases to 1856,08 A, showing that the passive filter not only mitigates harmonic components but also optimizes current flow. This improvement highlights the effectiveness of the passive filter in enhancing power quality and protecting electrical systems from the adverse effects of harmonics.

The harmonic spectrum analysis reveals significant improvements after the installation of a passive filter. Before the filter installation (Figure 5a), the spectrum shows considerable harmonic components, especially at lower harmonic orders such as the 3rd harmonic (150 Hz), which reaches approximately 30% of the fundamental. Higher-order harmonics, including those at 250 Hz, 350 Hz, and beyond, are also present, contributing to overall harmonic distortion. After the filter installation (Figure 5b), the dominant 3rd harmonic is significantly reduced to around 12%, and higher-order harmonics are minimized to negligible levels. This reduction in harmonic content indicates a substantial improvement in power quality, with the passive filter effectively mitigating harmonic distortion and enhancing system reliability and efficiency.

The findings of this study demonstrate that the application of a passive filter significantly reduces harmonic distortion in electrical systems, both in the time and frequency domains. Prior to the installation of the filter, the current waveform exhibited severe distortion, with a peak current of 1784,97 A, indicating the presence of substantial harmonic components commonly introduced by nonlinear loads such as inverters and rectifiers. After the filter installation, the waveform became smoother and more sinusoidal, and the peak current increased to 1856,08 A, suggesting improved current flow efficiency and a reduction in reactive power circulation. These results are consistent with previous research that also reported enhanced power quality through harmonic mitigation using passive filters [17]. However, the present study provides additional insight through a more detailed quantitative harmonic spectrum analysis. Specifically, the third-order harmonic, which initially reached 30% of the fundamental component, was reduced to approximately 12%, and higher-order harmonics were effectively suppressed to negligible levels. This contrasts with earlier studies that primarily reported reductions in THD without discussing the behavior of individual harmonic orders or changes in peak current values [18]. Therefore, this research contributes further evidence that passive filters not only attenuate harmonic distortion but also enhance the overall efficiency and reliability of power systems.

3.3. Discussion

The use of a Single Tuned Passive Filter for harmonic mitigation in a 1250 kVA distribution transformer system presents several limitations. Primarily, Single Tuned Passive Filter are effective only for a specific harmonic frequency typically the dominant one and are not suitable for mitigating multiple harmonic orders. This limits their performance in systems with varying or complex harmonic spectra. Additionally, Single Tuned

Passive Filter are sensitive to changes in load conditions. Variations in load can shift harmonic frequencies, reducing the filter's effectiveness or causing detuning [19]. The risk of resonance, particularly if the filter is not properly coordinated with system impedance, may also result in voltage or current amplification at certain frequencies, potentially harming equipment. Single Tuned Passive Filter have a fixed filtering capacity and are not adaptive to real-time harmonic variations, unlike active filters. Furthermore, they contribute reactive power to the system, which may negatively impact power factor and require additional compensation. Therefore, while Single Tuned Passive Filter are cost-effective and suitable for stable harmonic conditions, their application in dynamic or high-distortion environments should be carefully evaluated [20].

The implementation of a single tuned passive filter presents several practical benefits for industrial power systems. The filter effectively reduces specific harmonic orders, thereby improving power quality and decreasing Total Harmonic Distortion (THD). This enhancement leads to more stable voltage and current waveforms, which are critical for the reliable operation of sensitive equipment. Furthermore, by mitigating harmonic currents, the filter helps protect electrical components from overheating and premature failure, while also reducing energy losses in the distribution network. These improvements contribute to greater system efficiency and lower operational costs. From a regulatory perspective, the use of passive filters supports compliance with harmonic standards such as IEEE 519, helping industries avoid penalties and ensuring system compatibility. In addition, compared to active solutions, passive filters offer a more economical and low-maintenance approach, making them suitable for small to medium-scale applications. In conclusion, the study demonstrates that single tuned passive filters provide a practical, cost-effective, and efficient solution for harmonic mitigation in various industrial settings.

4. CONSLUSION

Based on the results of the calculations and simulations, it can be concluded that the measurement and analysis of Total Harmonic Distortion (THD) at the transformer station B, before the filter installation, showed the following THD values for the current: 28,50% for phase R, 4,0% for phase S, and 2,4% for phase T. For voltage, the THD values were 1,51% for phase R, 1,55% for phase S, and 1,57% for phase T. After the filter was installed, the THDi values decreased significantly to 11,07% for phase R, 1,37% for phase S, and 1,09% for phase T. Meanwhile, the THDv values dropped to 0,87% for phase R, 0,85% for phase S, and 0,81% for phase T. The simulation and analysis results using ETAP software showed that the single-tuned passive filter designed to reduce the total harmonic distortion in the SDP Transformer used a capacitor of 2285 μF , an inductor of 0,00308732 H, and a resistor of 0,011 ohms.

REFERENCE

- [1] Widagdo, R. S., Andriawan, A. H., & Tauladan, I. S. (2023). Harmonic Mitigation with Active Filter in Coal Boiler Plant PT. Salim Ivomas Pratama. *Jurnal ELEMENTER (Elektro dan Mesin Terapan)*, 9(2), 235-245.
- [2] Widagdo, R. S., Andriawan, A. H., Slamet, P., Budiono, G., Wardah, I. A., & Hartayu, R. (2023, November). Harmonic Mitigation Using Passive Filters in 3-Phase Inverters to Improve Power Quality on Microgrid. In *2023 International Conference on Advanced Mechatronics, Intelligent Manufacture and Industrial Automation (ICAMIMIA)* (pp. 295-300). IEEE.
- [3] Yang, N. C., & Adinda, E. W. (2021). Matpower-based Harmonic Power Flow Analysis for Power Systems with Passive Power Filters. *IEEE Access*, 9, 167322-167331.
- [4] Riaz, M. T., Afzal, M. M., Aaqib, S. M., & Ali, H. (2021, March). Analysis and evaluating the effect of harmonic distortion levels in industry. In *2021 4th International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)* (pp. 1-7). IEEE.
- [5] Widagdo, R. S., Slamet, P. S., & Pangestu, C. (2024). Analysis of the Effectiveness of Using Active Filters and Passive Filters in Reducing Harmonics Using a Power Simulator (PSIM) at PT. Delta Jaya Mas. *Wahana: Tridarma Perguruan Tinggi*, 76(2), 8-28.
- [6] Fernando, Y. (2024). Analisis Penyempurnaan Nilai Harmonisa Pada Gardu Traksi Kereta Rel Listrik (KRL) Jalur Pesing-Duri Menggunakan Filter Pasif. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 18(2), 112-120.
- [7] Rizkiawan, M. A., Kurniawan, E., & Ramza, H. (2024). Analisis Kualitas Daya Menggunakan Filter Daya Harmonik Aktif Berbasis PV. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, 6(2), 154-163.
- [8] Anam, C., Rohiem, N. H., & Sulistyowati, R. (2023). Analisa Harmonisa Pada Unit Crane RTG (Rubber Tyred Gantry) Di PT. Nilam Port Terminal Indonesia. *Jurnal FORTECH*, 4(1), 7-19.
- [9] Yurliandri, F. (2022). Aplikasi Filter Pasif Sebagai Pereduksi Gelombang Cacat Akibat Pemakaian Beban Non-Linier. *MSI Transaction on Education*, 3(1), 1-14.
- [10] Sungkowo, H. (2017). Perancangan Filter Pasif Single Tuned Filter Untuk Mereduksi Harmonisa Pada Beban Non-Linier Penelitian pengaruh penggunaan beban-beban non-linear terhadap nilai harmonisa pada konsumen domestik khususnya pada jenis perumahan dengan kapasitas daya 450 VA. *Jurnal Eltek*, 11(1), 146-157.
- [11] Prasetjo, H. (2012). Analisa Perancangan Filter Pasif Untuk Meredam Harmonik Pada Instalasi Beban Nonlinear. *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 13(1), 57-67.
- [12] Melo, I. D., Pereira, J. L., Variz, A. M., & Ribeiro, P. F. (2020). Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement. *Electric power systems research*, 180, 106128.

- [13] Snyder, R. V., Macchiarella, G., Bastioli, S., & Tomassoni, C. (2021). Emerging trends in techniques and technology as applied to filter design. *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 317-344.
- [14] Ko, W. H., & Tuomainen, M. (2022). Design and application of a single-tuned passive harmonic filter to suppress harmonic distortion and resonance for railway traction power systems—A case study. *IET Electrical Systems in Transportation*, 12(2), 153-164.
- [15] Shakeri, S., Esmaeili, S., & Koochi, M. H. R. (2021). Passive harmonic filter design considering voltage sag performance-applicable to large industries. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(3), 1714-1722.
- [16] Aljarrah, R., Ayaz, M. S., Salem, Q., Al-Omary, M., Abuishmais, I., & Al-Rousan, W. (2023). Application of passive harmonic filters in power distribution system with high share of PV systems and non-linear loads. *International Journal of Renewable Energy Research*, 13(1), 401-411.
- [17] Ishaya, M. M., Adegboye, O. R., Agyekum, E. B., Elnaggar, M. F., Alrashed, M. M., & Kamel, S. (2023). Single-tuned passive filter (STPF) for mitigating harmonics in a 3-phase power system. *Scientific Reports*, 13(1), 20754.
- [18] Park, B., Lee, J., Yoo, H., & Jang, G. (2021). Harmonic mitigation using passive harmonic filters: Case study in a steel mill power system. *Energies*, 14(8), 2278.
- [19] Almutairi, M. S., & Hadjiloucas, S. (2019). Harmonics mitigation based on the minimization of non-linearity current in a power system. *Designs*, 3(2), 29.
- [20] Meng, J., Jiang, L., & Wang, Y. (2020, August). Study on the Influence of Harmonics on Load Loss of Transformer. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 555, No. 1, p. 012126). IOP Publishing.

Implementasi Sistem Monitoring dan Pengendalian Hama Berang-Berang Bertenaga Surya dengan Integrasi Telegram

Implementation of A Solar-Powered Beaver Pest Monitoring and Control System with Telegram Integration

Dwi Ovelita Cahyani¹, Denny Irawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik

^{1,2} Jl. Sumatera No. 101, Randuagung, Gresik 61121, Indonesia

email: ^{*}1dwiovelitac14@gmail.com, ²den2mas@umg.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 10 Mei 2025

Diterima, 17 Juni 2025

Diterbitkan, 24 Juni 2025

Kata Kunci :

Panel Surya, Sensor Ultrasonik, Hama, Telegram, Berang-Berang

ABSTRACT

Karena porsi makan mereka 20% dari berat tubuhnya, berang-berang adalah salah satu hama yang paling merugikan petani ikan. Meskipun berbagai metode tradisional telah digunakan untuk membasmi hama ini, metode-metode ini dianggap tidak efektif dan tidak efisien. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membantu petani tambak mengatasi dan mengoptimalkan pengendalian hama berang-berang. Sistem ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama dan terintegrasi dengan Telegram, bersama dengan sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor PIR untuk mendeteksi hama. Selain itu, panel surya 10Wp dengan baterai 12V 5Ah berfungsi sebagai catu daya, yang memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor HC-SR04 dan PIR mendeteksi objek dengan akurat hingga 4 meter dengan error rata-rata < 0,2% dibandingkan jarak sebenarnya. Selain itu, panel surya bekerja paling baik pada cuaca cerah dengan suhu 31°C, menghasilkan nilai tegangan tertinggi 12,2V, tetapi pada cuaca mendung, dengan suhu 26°C, nilai tegangan hanya 10,4V. Ini menunjukkan adanya korelasi antara tegangan yang diserap dan cuaca, dengan nilai tegangan yang lebih tinggi cenderung meningkat ketika suhu lebih tinggi dan sebaliknya. Efektivitas sistem ini dibuktikan dapat mengurangi keberadaan hama sebesar 83,33% dihitung berdasarkan berdasarkan pengamatan terhadap 6 ekor hama (jumlah data terbatas). Data yang dihasilkan dikirim dalam bentuk notifikasi melalui Telegram secara *real-time*.

ABSTRACT

Because their food intake accounts for 20% of their body weight, otters are one of the most detrimental pests to fish farmers. Despite the use of various traditional methods to eradicate this pest, these methods are considered ineffective and inefficient. Therefore, this study aims to help fish farmers monitor and optimize the control of otter pests. The system uses ESP32 as the main microcontroller and is integrated with Telegram, along with HC-SR04 ultrasonic sensors and PIR sensors to detect pests. In addition, a 10Wp solar panel with a 12V 5Ah battery serves as a power supply, allowing the system to operate independently. The results showed that the HC-SR04 and PIR sensors detected objects accurately up to 4 meters with an average error of <0.2% compared to the actual distance. In addition, the solar panel worked best in sunny weather with a temperature of 31°C, producing the highest voltage value of 12.2V, but in cloudy weather, with a temperature of 26°C, the voltage value was only 10.4V. This shows a correlation between the voltage absorbed and the weather, with higher voltage values tending to increase when the temperature is higher and vice versa. The effectiveness of this system has been proven to reduce the presence of pests by up to 83.33%, calculated based on the results of observations of 6 pests (limited data). The resulting data is sent in the form of notifications via Telegram in real-time.

Keyword :

Solar Panel, Ultrasonic Sensor Pest, Telegram, Beaver

1. PENDAHULUAN

Dengan melimpahnya sumber daya laut dan wilayah perairan yang luas di Indonesia, sektor budidaya perikanan menjadi sektor penting dalam perekonomian negara, bahkan kemungkinan untuk menembus pasar ekspor[1]. Kementerian Kelautan dan Perikanan Dirjen Penguatan Daya Saing Produk Kelautan dan Perikanan menyatakan bahwa periode September 2024, nilai ekspor perikanan di Indonesia meningkat sebesar 3,1% dari periode tahun sebelumnya dengan total volume ekspor sebesar 1,02 juta ton hingga mencapai USD 4,23 miliar[2]. Dengan peningkatan tersebut, kota Gresik menjadi pemasok perikanan terbesar di Jawa Timur.

Budidaya perikanan dapat mengurangi import ikan dari luar negeri, sehingga memberi manfaat ekonomi bagi para petani ikan dalam negeri[1]. Seperti pada umumnya pertanian, tentu terdapat permasalahan yang merugikan petani ikan karena menyebabkan terhambatnya produksi, bahkan mengakibatkan gagal panen salah satunya adalah hama. Di pertanian tambak terdapat berbagai macam hama yaitu leseh, ular air, kelompok ikan predator dan sero atau biasa disebut berang-berang[3].

Berang-berang merupakan salah satu hama yang merugikan karena makanan utama berang-berang adalah ikan, sehingga petani ikan merasa tidak nyaman karena porsi makan berang-berang 20% dari berat tubuhnya per hari[4]. Karena kerugian yang disebabkan oleh hewan tersebut cukup signifikan, para petani tambak mencoba berbagai cara untuk mengatasi permasalahan tersebut. Banyak metode konvensional yang dilakukan yaitu dengan menjaga tambak pada malam hari, memasang jaring atau perangkap, menyempatkan wewangian sekeliling tambak, memukul kaleng bekas atau benda apapun yang menghasilkan suara keras[5]. Metode tersebut tentu memerlukan waktu dan tenaga tambahan yang menjadi faktor penghambat efisiensi dalam pemberdayaan Sumber Daya Manusia (SDM).

Berdasarkan penelitian sebelumnya, sistem deteksi hama pertanian ini pernah dibahas diantaranya yaitu penelitian yang dilakukan oleh Septa Yudha Prasetya et al (2020) yang membahas tentang sistem pendeteksi hama menggunakan metode CNN (*Convolution Neural Network*) untuk pengolah Gambar dan metode *Fast Fourier Transform* untuk pengolah suara[1], Alfian Maghfuri et al (2023) yang mana penelitian tersebut menggunakan Node MCU sebagai pemroses data dengan input sensor yang diam ditempat atau tidak bergerak untuk memindai area[6]. Pada penelitian yang dilakukan Silvia Agustin et al (2021) membahas tentang panel surya sebagai catu daya yang menyuplai ATmega 328 untuk mengendalikan output berupa suara bising dari speaker[7]. Namun, penelitian ini tidak dilengkapi dengan sistem monitoring untuk memudahkan pemilih dalam memantau area sawah.

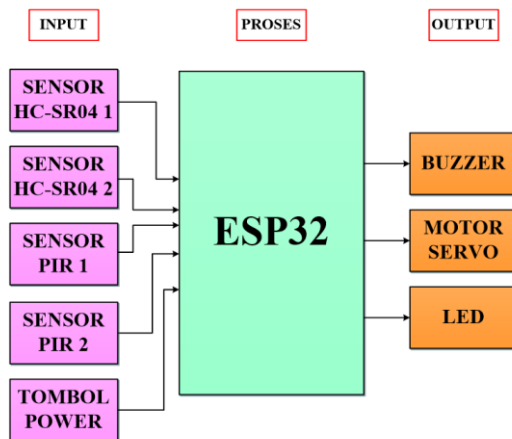
Dari uraian di atas, penelitian spesifik tentang sistem monitoring pengontrol hama berang-berang masih sedikit, sebagian besar penelitian tentang pengendalian hama terfokus pada wilayah persawahan. Oleh karena itu, penulis menciptakan teknologi baru berupa implementasi sistem pengendali hama berang-berang berbasis tenaga surya yang terintegrasi Telegram. Sistem ini dirancang menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler yang populer karena harganya yang terjangkau[8] dengan fitur lengkap yang terintegrasi dengan internet[9], apabila sensor mendeteksi berang-berang maka ESP32 akan mengirimkan notifikasi melalui Telegram secara *real-time* dan mengaktifkan *buzzer* untuk mengusir objek. Sensor yang digunakan yaitu sensor ultrasonik dan sensor PIR yang terpasang pada motor servo yang berputar 180 derajat[10], sehingga memungkinkan sensor untuk mengkondisikan area tambak yang luas. Penelitian ini diharapkan dapat membantu petani ikan dalam memantau area tambak secara fleksibel, sehingga memungkinkan pengoptimalan tenaga dan waktu untuk pemeliharaan lainnya. Selain itu, sistem ini menggunakan *solar cell* sebagai catu daya untuk mengatasi keterbatasan sumber listrik di tambak, sekaligus meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya operasional.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan cara mengumpulkan data penelitian untuk mengimplementasikan tahapan rencana yang telah dibuat. Penelitian ini menggunakan metode berupa eksperimen dengan tahapan yang pertama perancangan sistem, perancangan panel surya, kalibrasi sensor, implementasi kemudian yang terakhir pengujian sistem.

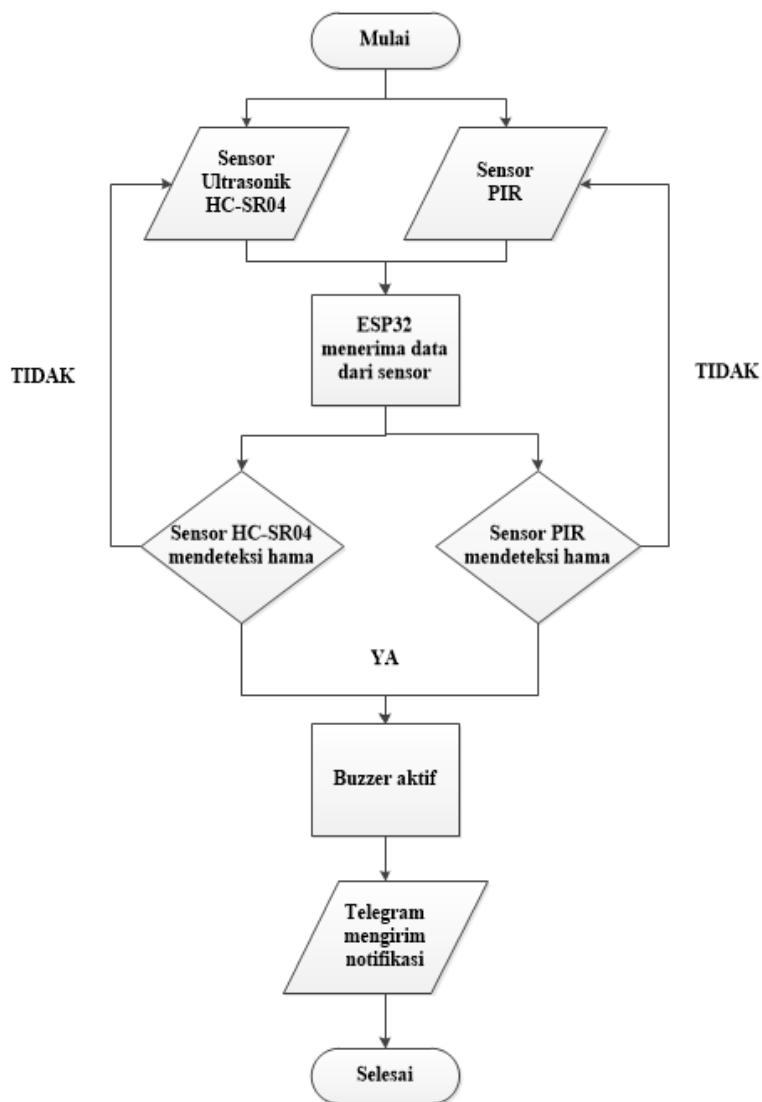
2.1. Perancangan Sistem

Proses perancangan sistem ini menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama yang diprogram menggunakan perangkat lunak Arduino IDE (*Integrated Development Environment*). Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode program ke papan mikrokontroler[11]. Sedangkan, untuk monitoring sistem ini menggunakan perangkat lunak Telegram. Salah satu fitur Telegram dapat digunakan untuk monitoring dan mengendalikan alat melalui pesan teks[12]. Gambaran umum dari proses pembuatan sistem pada penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



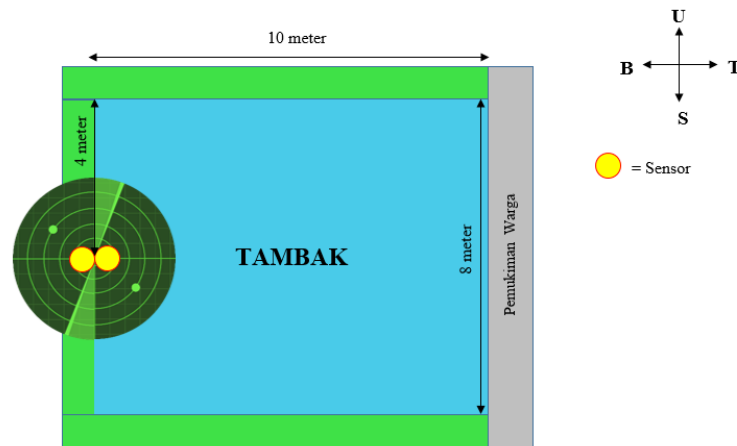
Gambar 1. Diagram Blok Sistem Monitoring Hama Berang-Berang

Dari Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa terdapat tiga tahap yaitu *input*, *proses*, dan *output*. Masukan data sistem diperoleh dari dua buah sensor HC-SR04 dan dua buah sensor PIR (*Passive Infrared*) yang terpasang pada masing-masing motor servo secara vertikal, bertujuan agar sensor dapat memindai area secara maksimal. ESP32 berfungsi sebagai pemroses data dengan keluaran *buzzer* untuk mengusir hama dan lampu LED sebagai indikator. Penjelasan alur kerja sistem disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Sistem Monitoring Hama Berang-Berang

Sesuai Gambar 2, prinsip kerja dari sistem dimulai dari sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor PIR mengambil data untuk diproses oleh ESP32. Sensor ultrasonik HC-SR04 mendeteksi adanya hama berdasarkan jarak, sedangkan sensor PIR mendeteksi adanya hama berdasarkan pancaran inframerah. Ketika sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor PIR mendeteksi adanya hama, maka *buzzer* akan diaktifkan untuk mengusir keberadaan hama tersebut, kemudian sistem akan mengirimkan pesan kepada pengguna melalui aplikasi Telegram. Di dalam Telegram terdapat fitur khusus pemberitahuan sekaligus mengendalikan secara otomatis melalui sebuah virtual robot dengan memanfaatkan bot API (*Application Programming Interface*)[13]. Dengan adanya fitur tersebut, sistem monitoring ini menjadi lebih responsif dan efisien.

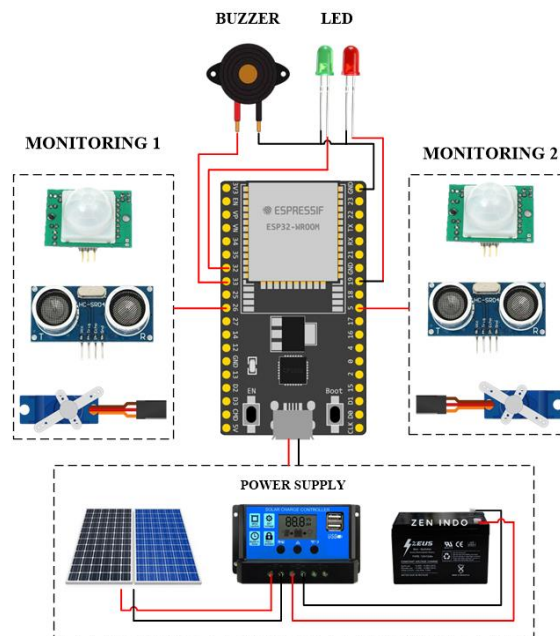


Gambar 3. Desain Perancangan di Lapangan

Gambar 3 menunjukkan ilustrasi dari desain perancangan sistem di lapangan, terlihat bahwa sensor ditempatkan di bagian barat tengah tambak untuk memaksimalkan pemindaian hama, sehingga seluruh area tambak yang rawan dilewati berang-berang terpantau dengan baik. Sensor ini diposisikan menghadap jalur akses dan tambak bertujuan untuk mencegah masuknya berang-berang ke area tambak serta mengusir jika berang-berang terlanjur masuk tambak.

2.2. Perancangan *Hardware*

Pada bagian ini, desain *hardware* dirancang untuk mengetahui tata letak komponen dan memastikan komponen terhubung dengan tepat agar sistem dapat bekerja secara optimal dan sesuai. Adapun perancangan desain *hardware* dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain Perancangan *Hardware*

Untuk tata letak pin lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah ini.

Tabel 1. Tata Letak Desain Perancangan *Hardware*

Komponen Input	Pin ESP32	Komponen Output	Pin ESP32
Sensor HC-SR04 1	- Trig : G25 - Echo : G27	Buzzer	G33
Sensor HC-SR04 2	- Trig : G16 - Echo : G4	LED 1	G32
Sensor PIR 1	G12	LED 2	G19
Sensor PIR 2	G2	Motor Servo 1	G13
Power Supply	V.in	Motor Servo 2	G0

Dari Tabel 1 terdapat daftar komponen *input* dan *output* sistem beserta pin ESP32 yang digunakan untuk menghubungkan masing-masing komponen. Berdasarkan Tabel 1 sensor ultrasonik HC-SR04 memiliki dua pin yang dihubungkan ke ESP32 yaitu, pin *Trigger (Trig)* untuk memulai pengukuran dan pin *Echo* untuk menerima pantulan ultrasonik[14] yang terhubung pada pin G25 dan G27. Hal itu dikarenakan sensor ultrasonik membutuhkan komunikasi dua arah dengan ESP32, sedangkan komponen lainnya memiliki satu pin saja, yang mana data dikirim langsung setelah sensor mendeteksi suatu perubahan.

2.3. Perancangan Panel Surya

Perancangan panel surya meliputi perhitungan kebutuhan daya sistem untuk menentukan kapasitas panel surya dan baterai selama pemakaian satu hari. Penentuan ini sangat penting karena berpengaruh terhadap tingkat efisiensi dan keefektifan panel surya sebagai catu daya pada sistem ini. Untuk perhitungan kebutuhan daya sistem menggunakan persamaan (1).

$$Wh = P \times h \tag{1}$$

Keterangan

Wh = Daya Pemakaian per hari (Watt *hours*)

P = Daya beban yang dipakai (Watt)

h = Lama pemakaian per jam (jam)

Tabel 2. Kebutuhan Daya Sistem

No.	Komponen	Daya (Watt)	Pemakaian (Jam)	Jumlah	Total Daya (Wh)
1.	Sensor HC-SR04	0,1	12	4	4,8
2.	Sensor PIR	0,1	12	2	2,4
3.	Motor Servo	1,25	12	2	30
4.	Buzzer	0,15	0.16	1	0,024
5.	LED	0,1	12	2	2,4
Total Daya :					36,624

Informasi yang disajikan dalam Tabel 2 mencakup kebutuhan daya beban sistem yang diasumsikan pemakaian 12 jam sesuai perhitungan persamaan (1) diatas. Setelah mengetahui jumlah daya yang dibutuhkan sistem, langkah selanjutnya adalah menentukan kapasitas panel surya. Di Indonesia rata-rata penyerapan matahari yang optimal berlangsung selama 5 jam per hari[15], sehingga kapasitas panel surya dapat dihitung menggunakan persamaan (2).

$$Wp = \frac{Wh}{t} \tag{2}$$

Keterangan

Wp = Kapasitas panel surya (Watt *peak*)

Wh = Daya Pemakaian per hari (Watt *hours*)

t = Lama penyinaran matahari optimal per hari (jam)

Menurut hasil perhitungan menggunakan persamaan (2), dengan penyinaran matahari optimal selama 5 jam, penelitian ini membutuhkan kapasitas panel surya sebesar 7,3 Wp untuk memenuhi kebutuhan daya sistem sebesar 36,624 Wh. Namun, sistem dirancang menggunakan panel surya sebesar 10 Wp untuk memenuhi kebutuhan daya beban jika panel bekerja maksimal.

Selain menentukan kapasitas panel surya, diperlukan penentuan kapasitas baterai untuk menyimpan energi yang berasal dari penyerapan panel surya. Perhitungan kapasitas baterai untuk sistem ini dihitung menggunakan persamaan (3) sebagai berikut.

$$Ah = \frac{Wh}{v} \tag{3}$$

Keterangan

- Ah = Kapasitas baterai (Ampere hours)
- Wh = Daya Pemakaian per hari (Watt hours)
- V = Tegangan baterai (Volt)

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (3) menunjukkan bahwa penelitian ini membutuhkan kapasitas baterai sebesar 3,052 Ah dengan daya pemakaian per hari sebesar 36,624 Wh dan tegangan baterai sebesar 12 Volt. Oleh karena itu, untuk memastikan sistem dapat bekerja dengan baik diperlukan baterai sebesar 12 V 5 Ah.

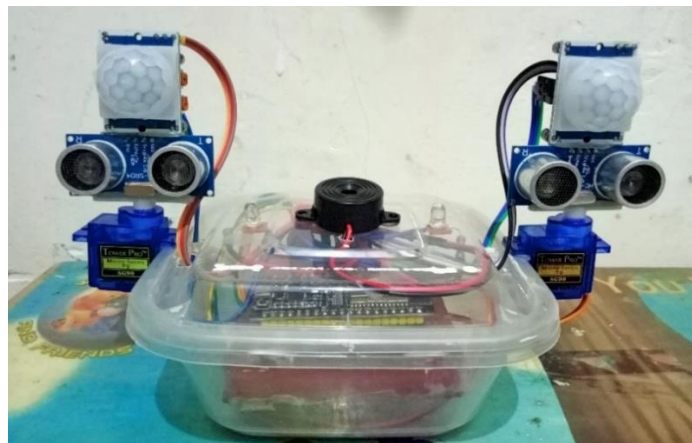
2.4. Perhitungan Efektivitas Sistem

Keefektifan sistem dapat dilihat dari berapa kali alat memberikan output yang sesuai saat mendeteksi berang-berang. Untuk mengetahui seberapa efektif alat terhadap pengaruh keberadaan berang – berang, digunakan pendekatan kuantitatif melalui perhitungan dengan rumus sebagai berikut.

$$\text{Efektivitas Alat (\%)} = \frac{\text{Jumlah berang-berang yang terdeteksi}}{\text{Total percobaan}} \times 100 \tag{4}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

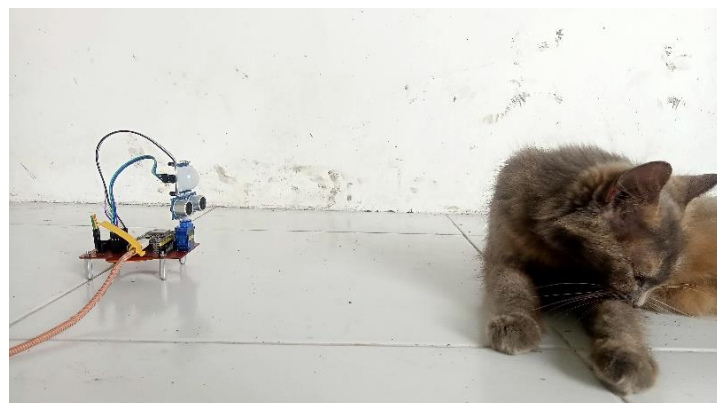
Setelah pembuatan alat selesai, langkah berikutnya adalah pengujian alat tersebut. Dalam proses pengujian ini, beberapa aspek yang dianalisis meliputi pengujian sensor ultrasonik, sensor PIR, panel surya, serta pengujian secara keseluruhan dan sistem Telegram. Hasil prototipe perancangan sistem disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Prototipe Perancangan Sistem

3.1. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dibagi menjadi dua bagian yakni pengujian sensor ultrasonik HC-SR04 dan sensor PIR. Pengujian ini dilakukan 9 kali dengan pengambilan data reaksi sensor terhadap objek yang terdeteksi. Tujuan dari pengujian tersebut yaitu untuk mengetahui kinerja sensor sesuai fungsi atau tidak. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi sensor terhadap nilai aktualnya. Pengujian sensor disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6 Pengujian Sistem

Data yang diambil dari pengujian ini adalah reaksi sensor terhadap suatu objek. Objek yang digunakan berupa kucing. Hasil data pengujian sensor ultrasonik dan sensor PIR ditunjukkan Tabel 3 dan Tabel 4. Untuk mencari nilai eror pada pengujian digunakan persamaan (5).

$$Error (\%) = \frac{(Nilai \text{ Aktual} - Nilai \text{ Sensor})}{Nilai \text{ Aktual}} \times 100 \quad (5)$$

Tabel 3. Data Pengujian Sensor HC-SR04

No.	Sensor HC-SR04	Aktual (cm)	Error (%)
1.	10.00	10.05	0.498
2.	50.00	50.13	0.259
3.	100.00	100.09	0.090
4.	150.00	150.25	0.166
5.	200.00	200.15	0.075
6.	250.00	250.20	0.080
7.	300.00	300.10	0.033
8.	350.00	350.00	0.000
9.	400.00	400.50	0.125
Rata-Rata Error			0.147

Sesuai Tabel 3, hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai jarak yang terdeteksi sensor ultrasonik HC-SR04 dengan nilai jarak aktual memiliki rata-rata eror sebesar 0,147% yang artinya sensor HC-SR04 dinyatakan akurat. Hal ini relevan dengan penelitian yang dilakukan oleh M. Zikri et al (2022) bahwa sensor HC-SR04 mampu mendeteksi hingga jarak 4 meter dengan baik[16].

Tabel 4. Data Pengujian Sensor PIR

No.	Sensor PIR	Aktual (cm)	Error (%)
1.	10.00	10.00	0.000
2.	50.00	50.02	0.040
3.	100.00	100.06	0.060
4.	150.00	150.00	0.000
5.	200.00	200.10	0.050
6.	250.00	250.05	0.020
7.	300.00	300.04	0.013
8.	350.00	350.03	0.009
9.	400.00	400.00	0.000
Rata-Rata Error			0.021

Dapat dilihat pada Tabel 4 bahwa perbandingan jarak yang terdeteksi oleh sensor PIR dengan jarak aktual memiliki rata-rata eror sebesar 0,021% yang berarti sensor PIR dinyatakan akurat. Ditinjau dari penelitian yang dilakukan oleh Dilan et al (2024), sensor PIR hanya mampu mendeteksi jarak 1-2 meter saja[17]. Sedangkan, pada penelitian ini sensor mampu mendeteksi hingga jarak 4 meter.

Pada sistem ini, penggunaan sensor ultrasonik dan sensor PIR dimaksudkan untuk meningkatkan kinerja dan akurasi dalam proses deteksi. Sensor ultrasonik bekerja dengan memanfaatkan pantulan gelombang suara untuk mendeteksi keberadaan objek secara lurus di depan sensor. Mekanisme ini menjadikan sensor ultrasonik sangat presisi dalam mengukur jarak secara langsung ke arah tertentu. Di sisi lain, sensor PIR memiliki cakupan sudut deteksi yang luas yaitu mencapai 110° sehingga memungkinkan sensor memantau area yang lebih lebar. Korelasi kedua sensor ini sangat penting karena dapat mengurangi kesalahan deteksi dan meningkatkan responsifitas dalam mengaktifkan *buzzer*.

3.2. Pengujian Panel Surya

Pada tahap pengujian kedua adalah pengujian panel surya. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui waktu, suhu serta kondisi cuaca yang memungkinkan panel surya menyerap energi secara maksimal. Pengujian panel surya disajikan pada Gambar 7.



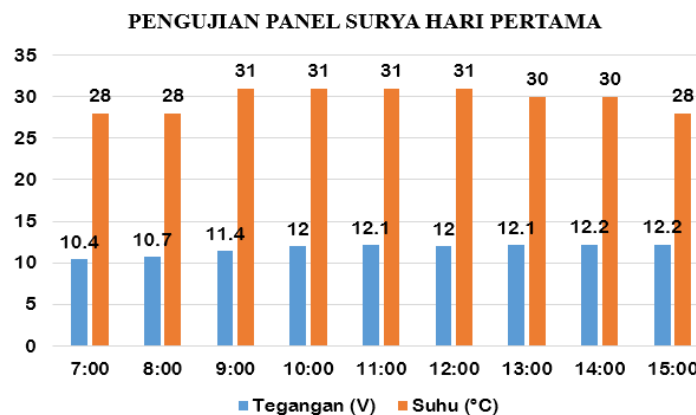
Gambar 7. Pengujian Panel Surya

Pengujian dilakukan 2 kali dengan pengambilan data setiap 1 jam sekali. Untuk pengujian hari pertama dilakukan pada tanggal 10 Februari 2025, hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengujian Panel Surya Hari Pertama

Tanggal	Pukul (WIB)	Tegangan (V)	Cuaca	Suhu (°C)
10/2/2025	07.00	10,4	Mendung	26°
	08.00	10,7	Berawan	28°
	09.00	11,4	Berawan	28°
	10.00	12,0	Berawan	31°
	11.00	12,1	Berawan	31°
	12.00	12,0	Mendung	28°
	13.00	12,1	Mendung	28°
	14.00	12,2	Berawan	28°
	15.00	12,2	Berawan	31°

Dari pengujian panel surya pada hari pertama tanggal 10 Februari 2025, pengukuran dilakukan pukul 07.00 hingga 15.00 WIB. Pengukuran tersebut menghasilkan nilai tegangan terendah yaitu 10,4V saat cuaca mendung dan nilai tegangan tertinggi mencapai 12,2V saat cuaca berawan dengan suhu 31°C. Dapat dilihat grafik perbandingan antara tegangan dan suhu sepanjang waktu pengukuran hari pertama pada Gambar 8.



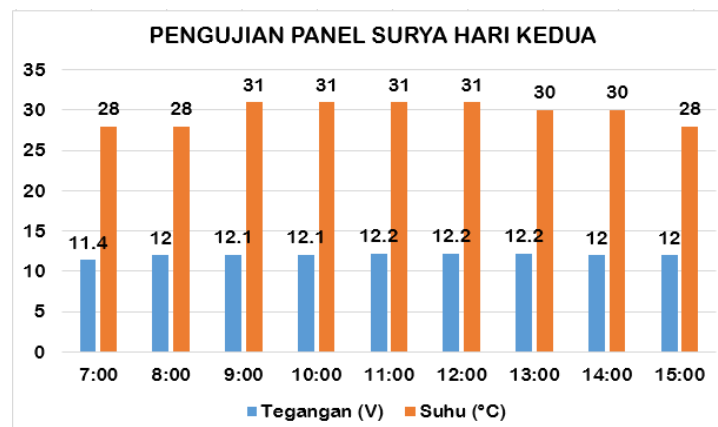
Gambar 8. Grafik Pengujian Panel Surya Hari Pertama

Sedangkan, pengujian kedua dilakukan tanggal 11 Februari 2025, untuk hasil pengujian hari kedua dapat dilihat pada Tabel 6. Pengujian panel surya hari kedua menghasilkan penyerapan energi yang lebih stabil berkisar antara 12-12,2V. Hal tersebut terjadi pukul 09.00 s.d 13.00 WIB saat cuaca cerah dengan suhu 31°C. Dilihat dari Tabel 6, nilai tegangan terendah yaitu 11,4V saat cuaca mendung dengan suhu 28°C dan nilai tegangan tertinggi yaitu 12,2V saat cuaca cerah dengan suhu 31°C.

Tabel 6. Pengujian Panel Surya Hari Kedua

Tanggal	Pukul (WIB)	Tegangan (V)	Cuaca	Suhu (°C)
11/2/2025	07.00	11,4	Mendung	28°
	08.00	12,0	Berawan	28°
	09.00	12,1	Cerah	31°
	10.00	12,1	Cerah	31°
	11.00	12,2	Cerah	31°
	12.00	12,2	Cerah	31°
	13.00	12,2	Cerah	30°
	14.00	12,0	Mendung	30°
	15.00	12,0	Mendung	28°

Dari pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa adanya korelasi antara kondisi cuaca dengan tegangan yang diserap oleh panel surya, yang mana nilai tegangan cenderung tinggi saat cuaca cerah dan suhu tinggi, namun tegangan akan mengalami penurunan ketika cuaca mendung dengan suhu rendah di pagi dan sore hari. Grafik perbandingan tegangan dan suhu pada pengujian hari kedua dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Pengujian Panel Surya Hari Kedua

3.3. Pengujian Keseluruhan

Pengujian terakhir yaitu pengujian keseluruhan sistem. Pengujian ini dilakukan di tambak Sidayu, tepatnya berada di Desa Purwodadi, Sidayu, Kabupaten Gresik. Tujuannya adalah untuk memastikan kinerja sistem sesuai dengan yang diharapkan serta sinkronisasi antara *hardware* dan *software* pada sistem ini.



Gambar 10. Pengujian Alat di Tambak

Dari Gambar 10 menunjukkan hasil pengujian alat secara nyata di lapangan. Dapat dilihat bahwa panel surya diletakkan menghadap matahari langsung sebagai sumber listrik sistem. Di sisi lain, sensor diletakkan di pinggir tambak dan terhubung ke panel surya melalui kabel 11 meter.



Gambar 11. Penempatan Panel Surya di Tambak

Gambar 11 menunjukkan instalasi panel surya di area tambak. Panel diletakkan menghadap ke arah timur agar memaksimalkan proses penyerapan energi di pagi sampai siang hari.



Gambar 12. Penempatan Sensor di Tambak

Gambar 12 menunjukkan penempatan sensor di pinggir tambak. Sensor diletakkan sedikit lebih rendah dan dekat dengan permukaan air agar tidak mengganggu jalur akses pemilik tambak.

Tabel 7. Hasil Pengujian Alat

Tanggal	Pukul (WIB)	Monitor 1		Monitor 2		Jumlah	Buzzer
		HC-SR04	PIR	HC-SR04	PIR		
20/2/2025	02.29	0	low	234	high	1	high
	02.37	150	high	0	low	1	high
	02.42	128	low	0	low	0	low
	03.24	197	low	289	high	1	high
	03.28	0	low	79	high	1	high
	03.29	30	low	361	high	1	high

Dari Tabel 7 terlihat bahwa sensor HC-SR04 akan mencatat jarak objek dan sensor PIR berstatus *high* jika mendeteksi berang-berang. Ketika sensor HC-SR04 tidak mendeteksi apapun, maka sensor PIR berstatus

low. Buzzer akan aktif jika salah satu sensor mendeteksi adanya objek, baik pada sistem monitoring 1 maupun 2. Selain itu, ketika sensor HC-SR04 berhasil mendeteksi jarak namun sensor PIR berstatus *low* berarti objek tersebut bukan berang-berang sehingga *buzzer* tetap aktif *low*. Pada Tabel 7 menunjukkan jumlah berang-berang yang terdeteksi dalam satu waktu. Untuk itu sesuai persamaan (4), dapat dihitung efektivitas alat dalam mencegah hama sebagai berikut.

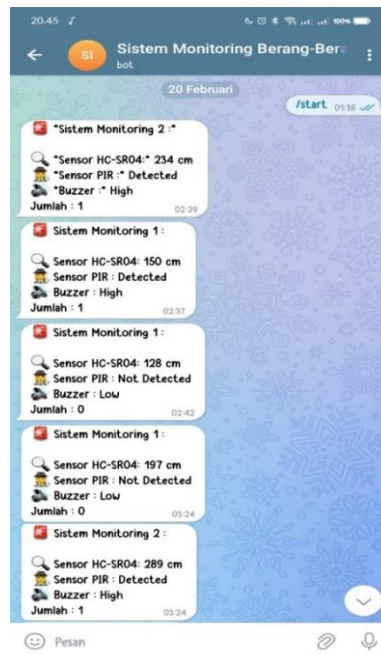
Diketahui,

- Jumlah berang-berang yang terdeteksi = 5 ekor (ditandai dengan *buzzer* aktif *high*)
- Total percobaan terdeteksi berang-berang = 6 kali, maka :

$$\text{Efektivitas Alat (\%)} = \frac{5}{6} \times 100 = 83,33\%$$

Sesuai data Tabel 7, diasumsikan bahwa terjadi serangan hama sebanyak 6 ekor perharinya. Dengan menggunakan alat ini, sebanyak 5 ekor hama berhasil dideteksi dan dicegah masuk ke tambak sehingga hanya 1 ekor yang berhasil lolos. Efektivitas alat dalam mengurangi serangan hama sebesar 83,33% ini dihitung berdasarkan berdasarkan pengamatan terhadap 6 ekor hama (jumlah data terbatas). Efektivitas alat dapat meningkat apabila jumlah data yang diamati semakin banyak sehingga persentase keberhasilan dan keakuratan akan semakin tinggi.

Data yang dihasilkan dari sistem saat mendeteksi adanya berang-berang akan dikirim menuju Telegram dalam bentuk notifikasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 13.




Gambar 13. Hasil Monitoring Data Pengujian di Telegram

Adapun fitur *chatbot* yang diintegrasikan dengan ESP32 dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perintah *ChatBot*

Perintah <i>ChatBot</i>	Fungsi Perintah	Respon <i>ChatBot</i>
<code>/start</code>	Untuk memulai chat	

Perintah ChatBot	Fungsi Perintah	Respon ChatBot
/status	Untuk menampilkan semua data monitoring sistem secara <i>real-time</i>	

Dari seluruh pengujian diatas menunjukkan sistem berjalan sesuai prinsip kerjanya. Dengan memanfaatkan bot Telegram yang dapat mengirimkan notifikasi sekaligus perintah untuk monitoring tambak secara *real-time* terbukti efektif.

4. KESIMPULAN

Pembacaan sensor HC-SR04 dan sensor PIR terbukti akurat dalam mendeteksi objek hingga jarak 4 meter dengan rata-rata eror kurang dari 0,2% dibandingkan dengan jarak aktual. Integrasi sistem dengan Telegram juga terbukti berhasil yang mana Telegram memberikan notifikasi dan dapat melakukan monitoring jarak jauh secara *real-time* melalui *chatbot*. Selain itu, panel surya sebagai catu daya terbukti efektif dengan penyerapan energi maksimal pada cuaca cerah dengan suhu 31°C yang menghasilkan nilai tegangan tertinggi yaitu 12,2V. Oleh karena itu, memungkinkan sistem beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada sumber listrik konvensional.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa sistem monitoring pengendali hama berang-berang menggunakan Telegram berbasis tenaga surya beroperasi dengan baik dengan efektivitas alat dalam mengurangi keberadaan hama sebesar 83,33% dihitung berdasarkan data 6 ekor hama (data kecil). Efektivitas alat dapat meningkat apabila jumlah data yang diamati semakin banyak sehingga persentase keberhasilan dan keakuratan akan semakin tinggi. Namun, pengujian sistem ini belum dilakukan secara menyeluruh dalam skala besar. Selain itu, sensor yang digunakan memiliki jangkauan terbatas hingga 4 meter dan tidak memiliki ketahanan terhadap air, mengingat habitat berang-berang berada di area perairan. Untuk penelitian lebih lanjut, disarankan untuk mempertimbangkan penggunaan sensor dengan jangkauan deteksi yang lebih luas dan tahan terhadap kondisi lingkungan basah, serta memperbanyak jumlah data observasi agar hasil pengukuran lebih akurat dan efisiensi kinerja alat mencapai hasil yang maksimal.

REFERENCE

- [1] S. Y. Prasetya, I. K. Somawirata, A. Soetedjo, and R. P. M. D. L., "Sistem Deteksi Hama Pada Kolam Budidaya Ikan Berbasis Audio dan Video," *J. Bumigora Inf. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 119–129, 2020, doi: 10.30812/bite.v2i2.911.
- [2] K. K. dan Perikanan, "Surplus Ekspor Perikanan Melonjak Jadi Kado Spesial HUT Ke-25 KKP," in *Oktober*, Jakarta: Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2024. [Online]. Available: <https://kkp.go.id/news/news-detail/surplus-ekspor-perikanan-melonjak-jadi-kado-spesial-hut-ke-25-kkp-ROQY.html>
- [3] I. Ramadhani and H. Ariefi, "Analisis Usaha Budidaya Ikan Lele (*Clarias sp*) Pada Kelompok Budidaya di Kampung Buana Bakti Kecamatan Kerinci Kanan Kabupaten Siak," *J. Sos. Ekon. PESISIR*, vol. 2, no. 4, pp. 17–25, 2021.
- [4] M. Bowden-Parry, E. Postma, and N. J. Boogert, "Effects of food type and abundance on begging and sharing in Asian small-clawed otters (*Aonyx cinereus*)," *PeerJ*, vol. 8, 2020, doi: 10.7717/peerj.10369.
- [5] R. Simanjuntak, "KONFLIK BERANG-BERANG (SUBFAMILI : LUTRINAE) DENGAN PETANI IKAN AIR TAWAR DI KOTA PADANG," Universitas Andalas, 2019. [Online]. Available: <http://scholar.unand.ac.id/id/eprint/48297>
- [6] D. Ngadirejo, "Perancangan alat pengusir hama pertanian menggunakan gelombang frekuensi berbasis nodemcu di desa ngadirejo kecamatan widang," *Pros. Senakama*, vol. 2, pp. 713–722, 2023.
- [7] Nonik Silvia Agustin, K. Joni, Diana Rahmawati, and A. K. Saputro, "Microcontroller-based Bird Pest Repellent in Rice Plants," *Procedia Eng. Life Sci.*, vol. 1, no. 1, 2021, doi: 10.21070/pels.v1i1.762.
- [8] A. Wagyana and Rahmat, "Prototype Modul Praktik untuk Pengembangan Aplikasi Internet of Things (IoT)," *J. Ilm. Setrum*, vol. 8, no. 1, pp. 238–247, 2019.
- [9] M. Nizam, H. Yuana, F. T. Informasi, U. Islam, B. Blitar, and M. D. Switch, "MIKROKONTROLER ESP 32 SEBAGAI ALAT MONITORING PINTU BERBASIS WEB," *J. Mhs. Tek. Inform.*, vol. 6, no. 2, pp. 767–772, 2022.
- [10] R. Al Hayubi, S. Aulia, and D. A. Gunawan, "Implementasi Sistem Penggerak Servo SG 90 Berbasis Arduino Uno dengan Kontrol Sudut Dinamis," *Mars J. Tek. Mesin, Ind. Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 6, pp. 130–140, 2024, doi: <https://doi.org/10.61132/mars.v2i6.535>.

- [11] U. M. Tyas *et al.*, “Implementasi Aplikasi Arduino Ide Pada Mata Kuliah Sistem Digital,” *J. Pendidik. dan Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2023.
- [12] D. A. N. Kontrol, K. Air, and M. Esp, “Telegram untuk monitoring dan kontrol kualitas air menggunakan esp32,” *JUPI (Jurnal Ilm. Penelit. dan Pembelajaran Inform.*, vol. 9, no. 3, pp. 1292–1306, 2024, doi: <https://doi.org/10.29100/jupi.v9i3.5329>.
- [13] Haripuddin, E. S. Rahman, Massikki, and M. I. Burhan, “SMART HOME BERBASIS IoT MENGGUNAKAN TELEGRAM MESSENGER,” *J. MEDIA Elektr.*, vol. 20, no. 2, pp. 8–13, 2023.
- [14] D. Abreu, J. Toledo, and B. Codina, “Low-Cost Ultrasonic Range Improvements for an Assistive Device,” *MDPI*, no. 12, pp. 1–24, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/s21124250>.
- [15] J. P. Senaen, A. Rampengan, and F. Tumimomor, “Analisis Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Tegangan Dan Arus Pada Panel Surya Di Universitas Negeri Manado,” *J. Arjuna Publ. Ilmu Pendidikan, Bhs. dan Mat.*, vol. 1, no. 6, pp. 220–231, 2023, doi: <https://doi.org/10.61132/arjuna.v1i6.327>.
- [16] M. H.M.Zikri, I.Muhammad, “Perancangan Perangkat Keras Alat Pengusir Hama Burung menggunakan Sensor Ultrasonik berbasis Arduino Uno,” *J. Ilm. Mhs. Pertan.*, vol. 7, no. 4, pp. 945–953, 2022.
- [17] A. Nurfauzan, Ruslan, and Sanatang, “Pengembangan Alat Pengusir Hama Tikus di Lahan Persawahan Menggunakan Sensor PIR dan Penguatan Ultrasonik untuk Petani,” *INTEC J. Inf. Technol. Educ. J.*, vol. 2, no. 3, pp. 12–19, 2023.

Volume 7 No 1 Juni 2025

1. KETENTUAN UMUM

Artikel yang diterima yaitu artikel yang belum pernah dipublikasikan dalam jurnal apapun berupa atau tidak dalam status telah diterima (*accepted*) untuk dipublikasikan

2. PETUNJUK PENULISAN

2.1. Diketik dengan spasi 1 dalam kertas ukuran A4 dengan jenis huruf Time New Roman 10. Tulisan yang akan dimuat menggunakan bahasa Indonesia maupun bahasa Inggris yang baik.

2.2. Susunan artikel terdiri dari : Judul (Bahasa dan English), Nama Penulis, Abstrak (Bahasa dan English), Kata Kunci (maksimal 5), Pendahuluan, Metode Penelitian, Hasil dan Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terima kasih (optional) dan Daftar Pustaka.

2.3. Ketentuan Penulisan Artikel :

- a. **Judul** : Judul dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris (Kapital setiap kata)
 - b. **Nama Penulis** : ditulis lengkap tidak disingkat tanpa gelar, disertai nama dan alamat institusi, beserta email korespondensi
 - c. **Abstrak** ditulis dalam bahasa Indonesia dan Inggris, terdiri dari 100-250 kata dan memuat tentang : Latar belakang singkat jika ada, Tujuan dan atau ruang lingkup penelitian, Metode (singkat) yang digunakan, Ringkasan hasil /finding, Simpulan. Abstrak ditulis dengan font time new roman 9
 - d. **Kata kunci** ditulis dalam bahasa Indonesia dan Inggris, maksimal 5 kata
 - e. **Pendahuluan** : berisi kondisi atau masalah yang melatar belakangi atau menginspirasi pelaksanaan kegiatan penelitian. Berisi kajian review literatur atau penelitian sebelumnya secara singkat. Data – data yang mendukung penelitian dari paper-paper yang lain dan paragraph terakhir berisi tujuan penelitian (tidak memuat tinjauan teori). Pernyataan kesenjangan (orisinalitas) atau kontribusi kebaruan (novelty statement) atau beda unik penelitian ini dibanding penelitian sebelumnya , juga dari sisi penting tidaknya penelitian tersebut dilakukan
 - f. **Metode Penelitian** : menguraikan cara yang digunakan untuk menyelesaikan masalah. Meliputi alat, bahan dan metode yang digunakan dalam pemecahan masalah
 - g. **Hasil dan Pembahasan** : Menjelaskan tentang hasil atau luaran peneliti yang membahas tentang perbedaan antara hasil dengan teoritis ataupun dengan penelitian lain yang relevan. Penjelasan dapat menggunakan tabel, gambar dan chart yang memudahkan pembaca dalam memahami isi artikel.
 - h. **Kesimpulan** : ditulis secara ringkas tetapi menggambarkan substansi kesimpulan hasil penelitian dan rekomendasi dari hasil penelitian. Kesimpulan menjawab permasalahan atau tujuan penelitian atau menghasilkan sebuah teori baru
 - i. **Ucapan Terima Kasih** : ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak yang pantas ,terutama kepada lembaga atau orang yang benar benar membantu penelitian , misalnya : kepada pemberi dana penelitian , fasilitas , bahan , atau saran
 - j. **Daftar Pustaka** : Daftar pustaka dan citation ditulis dengan font time new roman 9. Daftar Pustaka disusun berdasarkan urutan sitasi dalam artikel dan diberi nomor, model IEEE Transactions on Industrial Electronics. Penulisan daftar pustaka dan sitasi harus menggunakan software reference manager (e.g. Mendeley) untuk memudahkan dalam editing dan review. Minimal 15 referensi
-