VOLUME 12 | NOMOR 2 | OKTOBER 2026

p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ELEKTRIKA BORNEO

Diterbitkan oleh
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
UNIVERSITAS BORNEO TARAKAN

p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ELEKTRIKA BORNEO

Volume 12, Nomor 2, Oktober 2026

Ketua Redaksi
(Editor-in-Chief)

Fitriani Said, S.T., M.T.

Dewan Redaksi
(Editorial Board)

Abdul Muis Prasetia, S.T., M.T.

Abil Huda, S.T., M.T.

Sugeng Riyanto S.T., M.T.

Achmad Budiman, S.T., M.T.

Dr. Patria Julianto, S.T., M.T.

Dr. Syahfrizal Tachfulloh, S.T.,M.T.

Dr. Eng Linda Sartika, S.T., M.T.

Dr. Ismit Mado, S.T., M.T.

Asisten Redaksi
(Editorial Assistant)

Hendra, S.T.

Alamat Redaksi
(Address)

Gedung D Lantai 3 Kampus Universitas Borneo Tarakan
Jalan Amal Lama No. 1, Tarakan, 77123
Kalimantan Utara, Indonesia

Diterbitkan oleh:
Jurusan Teknik Elektro Universitas Borneo Tarakan

p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ELEKTRIKA BORNEO

Volume 12, Nomor 2, Oktober 2026

DAFTAR ISI

1. Perencanaan Instalasi Listrik pada Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid
Muhammad Khafid Masrukhan, Agung Trihasto dan **Hery Teguh Setiawan** ..... **90 – 97**

2. Analisis Sensitivitas Harga Tanah dalam Pemilihan *Tower Compact Lattice* dan *Tower Standar* pada Koridor SUTET 500 kV Perkotaan
Firmansyah Rizal dan **Aminullah Assagaf** ..... **98 – 106**

3. Analisis Dampak Keekonomian Investasi Infrastruktur Sektor Ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Utara Menggunakan Metode Input-Output Leontief
Jefry Sambara Palelleng dan **Tri Wahyu Adi** ..... **107 – 114**

4. Analisis dan Optimasi Desain PLTS di *Hydrogen Plant*: Studi Kasus PLTU Banten 1 Suralaya
Aditia Setiaputra dan **Marwan Rosyadi** ..... **115 – 120**

5. Implementasi Otomasi AC Ruang Kelas Berbasis Jadwal Kuliah Menggunakan *Internet of Things* dan Algoritma *Interval Merging*
Afqilla Regina Putri1 dan **Sahirul Alam** ..... **121 – 129**

6. Analisa Pengaruh Sudut Kemiringan *Solar Tracker Single Axis* pada PLTS Berbasis IoT dan *Real Time Clock* terhadap Daya Keluaran
Fitriani Said, Abil Huda dan **Rezky Septiawan** ..... **130 – 133**

7. Rancang Bangun Sistem *Solar Tracker Single Axis* pada PLTS Berbasis IOT dengan Metode *Real Time Clock* untuk *Remote Area*
Fitriani Said, Abil Huda, **Ade Ikhwan Abdillah** dan **Muhammad Zainul Fikri** ..... **134 – 139**

8. Analisis Kontingensi N-1 pada Sistem Distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik
Patria Julianto dan **Niko Juliansyah** ..... **140 – 145**

9. Desain dan Simulasi *Bidirectional DC-DC Converter* pada Baterai Sebagai Penyimpan Energi dengan Metode Kontrol *PWM*
Abil Huda, Ismit Mado dan **Anra** ..... **146 – 150**

10. Evaluasi Instalasi Listrik Gedung Fakultas Kedokteran Universitas Borneo Tarakan
Sugeng Riyanto dan **Aqsalil Fajri** ..... **151 – 157**

11. Implementasi Kontroler PID Berbasis *Internally Triggered* Triac Untuk Peredaman Arus *Starting* pada Motor Induksi Tiga Fasa
Abdul Muis Prasetia, Linda Sartika dan **Ahmad Setiawan** ..... **158 – 163**

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 90-97 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

PERENCANAAN INSTALASI LISTRIK PADA GEDUNG SD MUHAMMADIYAH SIROJUDDIN MUNGKID

Muhammad Khafid Masrukhan[1], Ir. Agung Trihasto, S.T., M.Eng., IPM.[2], Hery Teguh Setiawan, S.T., M.Eng.,[3]

[1,2,3]*Universitas Tidars, Magelang, Jawa Tengah, Indonesia*

[1]muhammad.khafid.masrukhan@students.untidar.ac.id
[2]agungtrihasto@untidar.ac.id
[3]hery.tegu.s@untidar.ac.id

Abstract*—This study aims to design the electrical installation of the SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid building based on the Indonesian Electrical Installation Standards (PUIL 2020). The research method includes field observation, building dimension measurement, electrical load inventory, lighting system calculation using the lumen method, power demand analysis, selection of conductors and protective devices, voltage drop calculation, and preparation of a Cost Budget Plan (RAB). The design results show that the lighting load is 7,890 W and the socket load is 9,920 W, resulting in a total building electrical load of 17.81 kW. With an additional 20% power reserve, the design load is determined to be 21.37 kW. The distribution system is designed using a PLN 380/220 V supply with a main conductor of NYM 3×10 mm², lighting conductors of NYM 3×1.5 mm², socket conductors of NYM 3×2.5 mm², and protection devices consisting of a 50 A MCB on the main side, 10 A MCB for lighting circuits, and 16 A MCB for socket circuits. The evaluation results indicate that the maximum voltage drop at the farthest circuit is 1.78 V or 0.81% of the nominal 220 V, which is still below the 5% maximum limit required by PUIL 2020. Based on the design power requirement, the selected subscribed power capacity is 23,000 VA. The total Cost Budget Plan (RAB) for the electrical installation is IDR 75,739,744. This study can serve as a reference for electrical installation planning in educational buildings while considering further verification of phase load balancing, grounding systems, and protection coordination in detailed design stages.

Keywords*—electrical installation, PUIL 2020, lighting, voltage drop, cost estimation.

Intisari—Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan instalasi listrik pada Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020. Penelitian dilakukan melalui observasi lapangan, pengukuran bangunan, inventarisasi beban listrik, perhitungan sistem pencahayaan menggunakan metode lumen, analisis kebutuhan daya, pemilihan penghantar dan pengaman, perhitungan susut tegangan, serta penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Hasil perencanaan menunjukkan bahwa beban penerangan sebesar 7.890 W dan beban stop kontak sebesar 9.920 W sehingga total kebutuhan daya gedung mencapai 17,81 kW. Dengan penambahan cadangan daya sebesar 20%, diperoleh daya rencana sebesar 21,37 kW. Sistem distribusi direncanakan menggunakan penghantar utama NYM 3×10 mm², penghantar penerangan NYM 3×1,5 mm², penghantar stop kontak NYM 3×2,5 mm², serta proteksi MCB 50 A, 10 A, dan 16 A sesuai fungsi sirkit. Hasil evaluasi menunjukkan susut tegangan maksimum sebesar 1,78 V atau 0,81% sehingga masih berada di bawah batas maksimum 5% menurut PUIL 2020. Berdasarkan kebutuhan daya rencana, kapasitas daya langganan yang dipilih adalah 23.000 VA. Total Rencana Anggaran Biaya (RAB) instalasi listrik yang diperoleh sebesar Rp75.739.744. Hasil penelitian ini dapat menjadi acuan perencanaan instalasi listrik bangunan pendidikan dengan memperhatikan penyempurnaan aspek pembagian beban antar fasa, sistem pembumian, dan koordinasi proteksi pada pengembangan selanjutnya.

***Kata kunci*- instalasi listrik, PUIL 2020, pencahayaan, susut tegangan, RAB.**

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik pada bangunan pendidikan terus meningkat seiring bertambahnya penggunaan perangkat pembelajaran berbasis teknologi, sistem penerangan, serta peralatan pendukung operasional sekolah [6][15][18]. Oleh karena itu, perencanaan instalasi listrik yang baik menjadi faktor penting untuk menjamin keselamatan, keandalan, dan kontinuitas pasokan energi listrik pada bangunan sekolah [2][20][27]. Perencanaan instalasi harus mengacu pada standar yang berlaku, seperti Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020 dan Standar Nasional Indonesia (SNI), agar sistem yang dirancang mampu beroperasi secara aman dan efisien [3][4][14].

SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid merupakan bangunan pendidikan yang terdiri atas dua lantai dengan berbagai fasilitas penunjang, seperti ruang kelas, ruang administrasi, perpustakaan, laboratorium, dan ruang pendukung lainnya. Aktivitas pembelajaran pada bangunan tersebut memerlukan sistem kelistrikan yang mampu melayani kebutuhan penerangan dan peralatan elektronik secara andal [7][19]. Namun, belum tersedia dokumen perencanaan instalasi listrik yang terstruktur berdasarkan standar teknis yang berlaku sehingga diperlukan kajian perencanaan yang komprehensif.

Penelitian terdahulu mengenai perencanaan instalasi listrik pada bangunan gedung umumnya berfokus pada perkantoran, rumah sakit, hotel, maupun kawasan perumahan [7][13][19]. Meskipun metode perencanaannya serupa, karakteristik beban pada bangunan sekolah memiliki perbedaan tersendiri, terutama pada dominasi beban penerangan, penggunaan peralatan pembelajaran, serta kebutuhan kenyamanan visual ruang belajar [4][20].

Oleh karena itu, diperlukan perencanaan yang mempertimbangkan karakteristik beban aktual dan kebutuhan operasional bangunan pendidikan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk merencanakan instalasi listrik pada Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid dengan meliputi perhitungan kebutuhan pencahayaan menggunakan metode lumen, analisis beban listrik, penentuan kapasitas daya, pemilihan penghantar dan sistem proteksi, evaluasi susut tegangan, serta penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB) [1][3][14][23]. Perencanaan dilakukan dengan mengacu pada PUIL 2020 dan standar pencahayaan bangunan gedung yang berlaku.

Hasil penelitian diharapkan dapat menghasilkan rancangan instalasi listrik yang sesuai dengan kebutuhan operasional gedung serta dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan instalasi listrik pada bangunan pendidikan dengan karakteristik yang serupa [6][20][25].

II. LANDASAN TEORI

Perencanaan instalasi listrik merupakan proses perancangan sistem penyaluran tenaga listrik pada suatu bangunan yang bertujuan menjamin keselamatan, keandalan, kemudahan pengoperasian, serta efisiensi penggunaan energi listrik. Dalam pelaksanaannya, perencanaan instalasi listrik harus mengacu pada Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020 dan standar terkait lainnya agar instalasi yang dirancang memenuhi aspek keselamatan manusia, perlindungan peralatan, serta keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

A. Sistem Pencahayaan dengan Metode Lumen

Perencanaan pencahayaan bertujuan menghasilkan tingkat iluminasi yang sesuai dengan fungsi ruangan sehingga aktivitas pengguna dapat dilakukan dengan nyaman dan aman. Pada penelitian ini, kebutuhan pencahayaan dihitung menggunakan metode lumen sesuai SNI 03-6575-2001. Metode ini mempertimbangkan luas ruangan, tingkat pencahayaan yang dipersyaratkan, faktor utilitas (UF), dan faktor pemeliharaan (MF).

Fluks cahaya total yang diperlukan dalam suatu ruangan dihitung menggunakan persamaan:

$$\Phi = (E \times A) / (UF \times MF) \quad (1)$$

dengan:
Φ = fluks cahaya total yang dibutuhkan (lumen)
E = tingkat pencahayaan yang direncanakan (lux)
A = luas ruangan (m^2)
UF = faktor utilitas
MF = faktor pemeliharaan

Jumlah lampu yang diperlukan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$N = \Phi / F \quad (2)$$

dengan:
N = jumlah lampu
Φ = fluks cahaya total yang dibutuhkan (lumen)
F = fluks cahaya setiap lampu (lumen)

Perhitungan ini digunakan untuk menentukan jumlah dan jenis lampu yang mampu memenuhi kebutuhan pencahayaan setiap ruangan sesuai standar yang berlaku.

B. Perhitungan *Arus Beban*

Arus beban merupakan dasar dalam menentukan ukuran penghantar dan kapasitas perangkat proteksi. Pada sistem satu fasa, arus beban dihitung menggunakan persamaan:

$$I = P / (V \times \cos \varphi) \quad (3)$$

dengan:
I = arus beban (A)
P = daya aktif (W)
V = tegangan sistem (V)
cos φ = faktor daya

Untuk sistem tiga fasa, arus beban dihitung menggunakan persamaan:

$$I = P / (\sqrt{3} \times V \times \cos \varphi) \quad (4)$$

dengan:
I = arus beban (A)
P = daya aktif (W)
V = tegangan antar fasa (V)
cos φ = faktor daya

Perhitungan arus beban diperlukan untuk menentukan kemampuan penghantar dan rating pengaman yang sesuai dengan karakteristik beban instalasi.

C. Faktor Daya dan Cadangan Daya

Faktor daya (cos φ) merupakan perbandingan antara daya aktif terhadap daya semu pada sistem tenaga listrik. Nilai faktor daya memengaruhi besarnya arus yang mengalir pada penghantar. Semakin rendah faktor daya, semakin besar arus yang dibutuhkan untuk melayani daya yang sama.

Dalam perencanaan instalasi listrik bangunan gedung, umumnya digunakan cadangan daya untuk mengantisipasi kemungkinan penambahan beban di masa mendatang. Cadangan daya dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P_r = P_t + (P_t \times \text{Cadangan}) \quad (5)$$

dengan:
P_r = daya rencana (W)
P_t = total beban terpasang (W)
Cadangan = persentase cadangan daya (%)

Penggunaan cadangan daya bertujuan meningkatkan fleksibilitas sistem apabila terjadi pengembangan fasilitas atau penambahan peralatan listrik pada masa mendatang.

D. Kemampuan Hantar Arus (KHA)

Kemampuan Hantar Arus (KHA) adalah arus maksimum yang dapat dialirkan penghantar secara terus-menerus tanpa menyebabkan kenaikan temperatur yang melebihi batas yang diizinkan. Menurut PUIL 2020, setiap penghantar harus memiliki KHA yang tidak lebih kecil dari arus yang mengalir pada penghantar tersebut. Pemilihan luas penampang penghantar harus mempertimbangkan KHA, kondisi pemasangan, suhu lingkungan, serta kemungkinan pengelompokan kabel.

Untuk menjamin keamanan instalasi, arus desain penghantar umumnya ditentukan menggunakan persamaan:

$$I\ KHA = 1{,}25 \times I_b \quad (6)$$

dengan:
I KHA = arus minimum penghantar (A)
Ib = arus beban (A)

Hubungan antara arus beban, penghantar, dan pengaman harus memenuhi ketentuan:

$$Ib \leq In \leq Iz \quad (7)$$

dengan:
Ib = arus beban
In = arus nominal pengaman
Iz = kemampuan hantar arus penghantar

Persyaratan tersebut bertujuan memastikan penghantar terlindungi dari arus lebih dan hubung singkat.

E. Sistem Proteksi

Sistem proteksi berfungsi melindungi instalasi listrik dari gangguan arus lebih, hubung singkat, maupun arus bocor yang dapat membahayakan manusia dan peralatan listrik. Perangkat proteksi yang umum digunakan pada instalasi bangunan gedung adalah Miniature Circuit Breaker (MCB), Residual Current Device (RCD), dan Residual Current Circuit Breaker with Overcurrent Protection (RCBO).

MCB digunakan sebagai pengaman terhadap arus lebih dan hubung singkat, sedangkan RCD atau RCBO digunakan untuk mendeteksi arus bocor ke tanah yang berpotensi menyebabkan sengatan listrik. Pemilihan perangkat proteksi harus disesuaikan dengan arus beban dan kemampuan hantar arus penghantar sehingga koordinasi proteksi dapat bekerja secara efektif.

F. Perhitungan Susut Tegangan

Susut tegangan merupakan selisih antara tegangan pada sumber dengan tegangan yang diterima beban akibat adanya impedansi penghantar. Nilai susut tegangan yang terlalu besar dapat menurunkan kinerja peralatan listrik dan mengurangi kualitas penyaluran energi listrik.

Untuk sistem satu fasa, susut tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta V = (2 \times I \times L \times \rho) / A \quad (8)$$

dengan:
ΔV = susut tegangan (V)
I = arus beban (A)
L = panjang penghantar (m)
ρ = tahanan jenis penghantar (Ω mm²/m)
A = luas penampang penghantar (mm²)

Persentase susut tegangan dihitung menggunakan persamaan:

$$\%\Delta V = (\Delta V / V) \times 100\% \quad (9)$$

dengan:
$\%\Delta V$ = persentase susut tegangan (%)
ΔV = susut tegangan (V)
V = tegangan nominal sistem (V)

Menurut PUIL 2020, nilai susut tegangan pada instalasi tegangan rendah harus berada dalam batas yang diizinkan agar kualitas tegangan pada sisi beban tetap terjaga.

G. Pembagian Beban Antar Fasa

Pada sistem distribusi tiga fasa, pembagian beban perlu dilakukan secara merata agar arus pada setiap fasa relatif seimbang. Ketidakseimbangan beban dapat menyebabkan arus netral meningkat, rugi-rugi daya bertambah, serta menurunkan efisiensi sistem distribusi.

Persentase pembebanan setiap fasa dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Persentase Fasa} = (P\ \text{fasa} / P\ \text{total}) \times 100\% \quad (10)$$

dengan:
P fasa = total beban pada satu fasa (W)
P total = total beban seluruh fasa (W)

Pembagian beban yang baik akan meningkatkan keandalan sistem distribusi dan memperpanjang umur peralatan listrik.

H. Sistem Pembumian

Sistem pembumian (grounding) merupakan bagian penting dalam instalasi listrik yang berfungsi mengalirkan arus gangguan ke tanah sehingga dapat mengurangi risiko sengatan listrik dan kerusakan peralatan. Sistem pembumian juga mendukung kerja perangkat proteksi arus bocor agar dapat beroperasi dengan cepat saat terjadi gangguan.

Nilai tahanan pembumian harus memenuhi ketentuan yang dipersyaratkan oleh standar instalasi listrik sehingga sistem proteksi dapat bekerja secara efektif. Oleh karena itu, perencanaan pembumian perlu menjadi bagian dari desain instalasi listrik bangunan.

I. Penentuan Daya Langganan PLN

Penentuan daya langganan PLN dilakukan berdasarkan total beban listrik yang telah ditambahkan faktor cadangan.

Kapasitas daya yang dipilih harus lebih besar atau sama dengan daya rencana sehingga seluruh beban dapat dilayani dengan aman tanpa menyebabkan pemutusan akibat kelebihan beban.

Pemilihan daya langganan dilakukan dengan menyesuaikan hasil perhitungan daya rencana terhadap standar golongan daya pelanggan yang tersedia pada PLN. Dengan demikian, sistem instalasi yang dirancang memiliki kapasitas yang memadai untuk memenuhi kebutuhan operasional saat ini maupun pengembangan beban pada masa mendatang.

III. METODE PENELITIAN

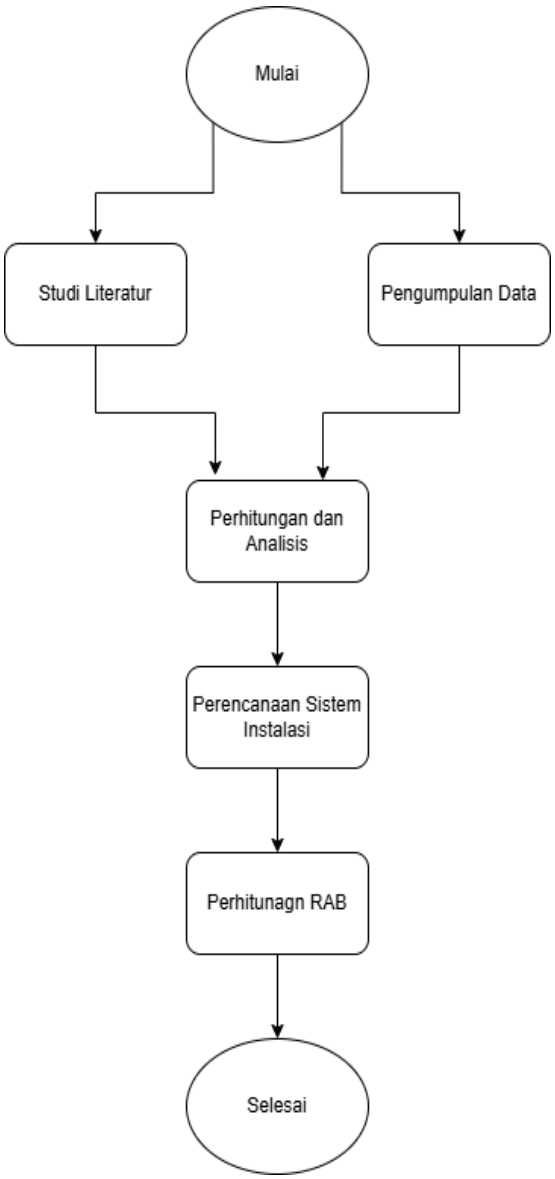
Penelitian ini menggunakan metode penelitian perencanaan (design planning research) dengan pendekatan kuantitatif deskriptif yang bertujuan menghasilkan rancangan instalasi listrik Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid berdasarkan standar Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020. Penelitian dilakukan dengan mengidentifikasi kebutuhan sistem kelistrikan bangunan melalui analisis kondisi eksisting, kebutuhan ruang, karakteristik beban, serta standar teknis yang berlaku.

Objek penelitian berupa Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid yang terdiri atas ruang kelas, ruang administrasi, ruang pendukung pembelajaran, fasilitas sanitasi, dan area penunjang lainnya. Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap kondisi bangunan, pengukuran dimensi ruang, identifikasi fungsi ruang, serta inventarisasi kebutuhan beban listrik. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari gambar bangunan, referensi teknis, standar nasional, serta literatur yang berkaitan dengan perencanaan instalasi listrik bangunan gedung.

Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data bangunan berupa luas ruang, fungsi ruang, serta kebutuhan beban listrik yang akan digunakan sebagai dasar perencanaan sistem kelistrikan. Selanjutnya dilakukan perhitungan kebutuhan penerangan menggunakan metode lumen untuk menentukan jumlah titik lampu berdasarkan standar tingkat pencahayaan yang berlaku. Setelah kebutuhan penerangan diperoleh, dilakukan perhitungan kebutuhan beban stop kontak dan peralatan listrik lainnya untuk menentukan total daya terpasang gedung.

Tahap berikutnya adalah perancangan sistem distribusi daya yang meliputi pembagian grup beban, penentuan panel distribusi, pemilihan penghantar, serta penentuan perangkat proteksi. Pemilihan penghantar dilakukan berdasarkan hasil perhitungan arus beban, kuat hantar arus (KHA), serta batas susut tegangan yang diizinkan. Selain itu, dilakukan analisis sistem proteksi melalui pemilihan perangkat pengaman yang sesuai dengan karakteristik beban dan kapasitas penghantar yang digunakan.

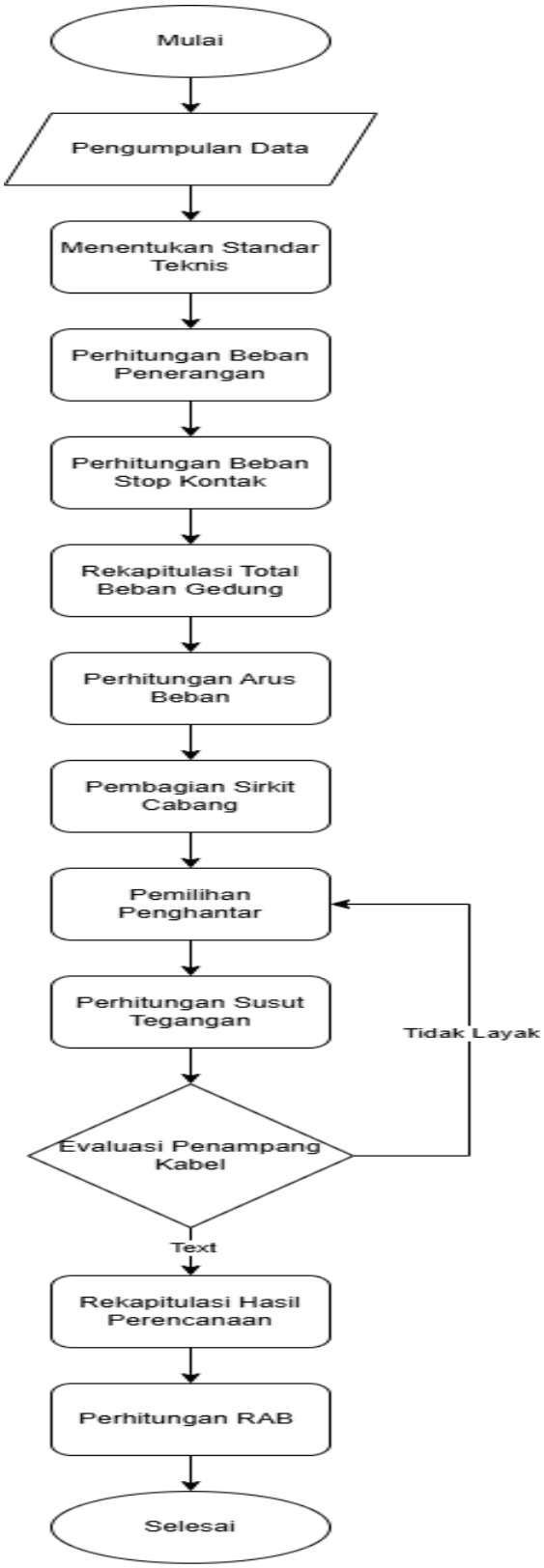
Setelah proses perencanaan sistem distribusi selesai, dilakukan evaluasi terhadap hasil rancangan melalui analisis total beban listrik, perhitungan susut tegangan, serta pemeriksaan kesesuaian hasil perencanaan terhadap standar PUIL 2020. AutoCAD digunakan sebagai alat bantu untuk menggambar denah instalasi listrik, menentukan posisi titik lampu, stop kontak, sakelar, panel, serta jalur penghantar berdasarkan hasil perhitungan. Selain itu, AutoCAD juga digunakan untuk membuat diagram satu garis sehingga menghasilkan gambar kerja yang akurat dan sesuai standar, serta menjadi dasar dalam perhitungan material dan penyusunan RAB.



Gambar 1. Gambar Diagram Alir Penelitian

Setelah proses perencanaan sistem distribusi selesai, dilakukan evaluasi terhadap hasil rancangan melalui analisis total beban listrik, perhitungan susut tegangan, serta pemeriksaan kesesuaian hasil perencanaan terhadap standar PUIL 2020. AutoCAD digunakan sebagai alat bantu untuk menggambar denah instalasi listrik, menentukan posisi titik lampu, stop kontak, sakelar, panel, serta jalur penghantar berdasarkan hasil perhitungan. Selain itu, AutoCAD juga digunakan untuk membuat diagram satu garis sehingga menghasilkan gambar kerja yang akurat dan sesuai standar, serta menjadi dasar dalam perhitungan material dan penyusunan RAB.

Alur penelitian secara umum dapat ditunjukkan melalui tahapan identifikasi kebutuhan sistem, pengumpulan data, analisis kebutuhan daya, perancangan sistem instalasi listrik, evaluasi hasil perencanaan, serta penyusunan dokumen teknis instalasi.



Gambar 2. Gambar Diagram Alir Perhitungan

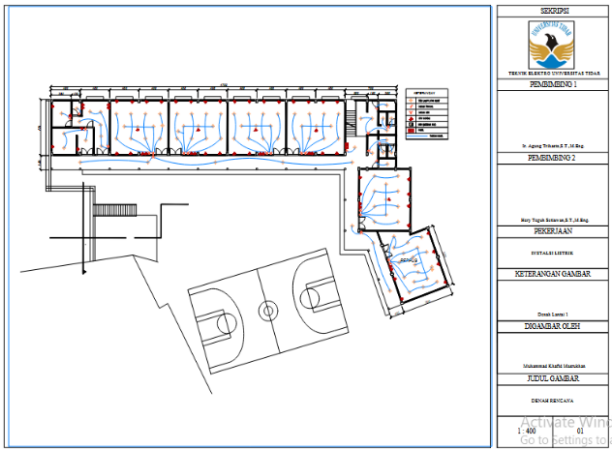
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan instalasi listrik pada Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid dilakukan berdasarkan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020 dan Standar Nasional Indonesia (SNI) mengenai sistem pencahayaan bangunan gedung. Tahapan perencanaan meliputi analisis kebutuhan pencahayaan, perhitungan beban listrik, penentuan kapasitas daya, pemilihan penghantar dan sistem proteksi, evaluasi susut tegangan, serta penyusunan Rencana Anggaran Biaya (RAB). Hasil perencanaan kemudian dianalisis untuk mengetahui kesesuaian rancangan terhadap aspek keselamatan, keandalan, efisiensi, dan kelayakan teknis.

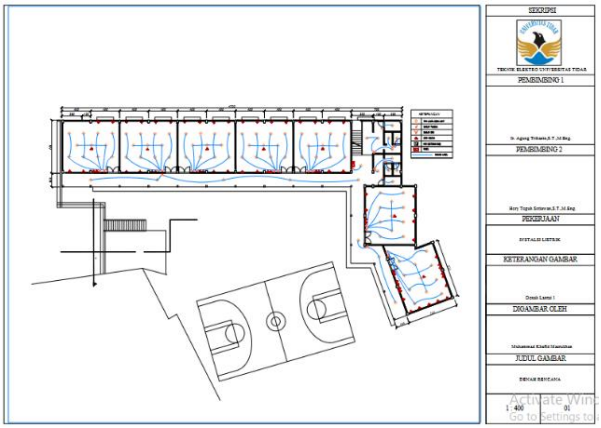
A. Perencanaan Sistem Pencahayaan

Perencanaan sistem pencahayaan dilakukan menggunakan metode lumen dengan mempertimbangkan luas ruangan, tinggi pemasangan armatur, faktor utilitas, serta faktor depresiasi. Metode ini digunakan untuk memperoleh jumlah lampu yang mampu menghasilkan tingkat pencahayaan sesuai standar SNI 03-6575-2001 pada setiap ruangan.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa instalasi menggunakan 192 unit lampu LED**,** yang terdiri atas 150 unit LED 5.750 lumen**,** 12 unit LED 1.725 lumen, dan 30 unit LED 840 lumen. Pemilihan lampu LED didasarkan pada efisiensi energi, umur pakai yang panjang, serta kemampuan menghasilkan distribusi cahaya yang merata. Berdasarkan hasil perhitungan, seluruh ruang belajar, ruang administrasi, laboratorium, perpustakaan, toilet, dan area pendukung telah memenuhi kebutuhan tingkat pencahayaan sesuai standar sehingga diharapkan mampu menciptakan lingkungan belajar yang nyaman dan mendukung aktivitas pembelajaran.



Gambar 3. Denah Inastalasi Listrik dan Penerangan Lantai 1



Gambar 4. Denah Inastalasi Listrik dan Penerangan Lantai 2

B. Analisis Beban Listrik

Analisis beban dilakukan untuk menentukan kebutuhan daya listrik gedung berdasarkan seluruh peralatan yang digunakan pada masing-masing ruangan. Beban terdiri atas beban penerangan dan beban stop kontak yang dihitung berdasarkan jenis serta jumlah peralatan listrik.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa beban penerangan sebesar 7.890 W, sedangkan beban stop kontak sebesar 9.920 W, sehingga total beban listrik gedung mencapai 17.810 W (17,81 kW). Beban stop kontak memberikan kontribusi terbesar terhadap konsumsi daya karena digunakan untuk melayani berbagai peralatan seperti komputer, monitor, printer, proyektor, laptop, speaker, dispenser, dan perangkat pendukung pembelajaran lainnya. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi listrik gedung sekolah saat ini lebih didominasi oleh penggunaan peralatan elektronik dibandingkan sistem penerangan.

Untuk mengantisipasi kemungkinan penambahan beban pada masa mendatang, digunakan faktor cadangan sebesar 20%, sehingga diperoleh daya rencana sebesar 21,37 kW. Penambahan cadangan daya bertujuan memberikan fleksibilitas apabila terjadi peningkatan kebutuhan energi tanpa harus melakukan perubahan besar terhadap sistem instalasi yang telah dirancang.

Tabel I
Rekapitulasi Beban

Jenis Beban	Nilai
Penerangan	7.890 W
Stop kontak	9.920 W
Total	17.810

C. Perencanaan Sistem Distribusi dan Proteksi

Sistem distribusi dirancang menggunakan suplai PLN tiga fasa 380/220 V dengan pembagian beban ke dalam beberapa sirkit agar distribusi arus lebih merata dan sistem proteksi bekerja secara selektif. Pembagian sirkit juga mempermudah proses pengoperasian dan pemeliharaan karena gangguan yang terjadi pada satu sirkit tidak memengaruhi keseluruhan sistem instalasi.

Pemilihan penghantar dilakukan berdasarkan kemampuan hantar arus sesuai ketentuan PUIL 2020. Penghantar utama menggunakan kabel NYM 3 × 10 mm², penghantar sirkit penerangan menggunakan NYM 3 × 1,5 mm², sedangkan penghantar sirkit stop kontak menggunakan NYM 3 × 2,5 mm².Pemilihan ukuran penghantar tersebut mempertimbangkan besarnya arus beban, keamanan instalasi, serta kemungkinan pengembangan beban pada masa mendatang.

Sistem proteksi menggunakan MCB 50 A sebagai pengaman utama, MCB 10 A untuk sirkit penerangan, dan MCB 16 A untuk sirkit stop kontak. Kombinasi penghantar dan perangkat proteksi tersebut telah memenuhi ketentuan PUIL 2020 sehingga mampu memberikan perlindungan terhadap arus lebih maupun hubung singkat sekaligus menjaga keandalan sistem distribusi tenaga listrik.

Tabel II
Pemilihan Penghantar dan Proteksi

Sirkit	Kabel	MCB
Utama	NYM 3×10 mm²	50 A
Lampu	NYM 3×1,5 mm²	10 A
Stop kontak	NYM 3×2,5 mm²	16

D. Analisis Susut Tegangan

Evaluasi kualitas sistem distribusi dilakukan melalui perhitungan susut tegangan pada sirkit terjauh. Berdasarkan hasil perencanaan, panjang penghantar sirkit terjauh adalah 36 m dengan arus beban sebesar 3,54 A. Menggunakan penghantar NYM 3 × 2,5 mm² diperoleh nilai susut tegangan sebesar 1,78 V atau 0,81% terhadap tegangan nominal 220 V. Nilai tersebut masih berada jauh di bawah batas maksimum 5% yang dipersyaratkan dalam PUIL 2020.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran penghantar yang dipilih telah sesuai dengan kebutuhan instalasi. Nilai susut tegangan yang rendah menunjukkan bahwa energi listrik dapat disalurkan secara efisien tanpa penurunan tegangan yang signifikan pada sisi beban. Dengan demikian, kualitas tegangan yang diterima oleh seluruh peralatan listrik tetap terjaga sehingga mampu mendukung keandalan operasional gedung sekolah.

E. Penentuan Daya Langganan PLN

Penentuan daya langganan dilakukan berdasarkan hasil perhitungan daya rencana sebesar 21,37 kW. Karena kapasitas tersebut tidak tersedia dalam standar golongan daya pelanggan PLN, dipilih kapasitas 23.000 VA sebagai daya tersambung. Kapasitas ini berada di atas kebutuhan daya rencana sehingga mampu melayani seluruh beban penerangan dan stop kontak secara bersamaan sekaligus menyediakan cadangan daya apabila terjadi penambahan peralatan listrik pada masa mendatang.

F. Analisis Rencana Anggaran Biaya

Selain analisis teknis, penelitian juga melakukan evaluasi terhadap aspek ekonomi melalui penyusunan Rencana Anggaran Biaya berdasarkan Analisis Harga Satuan Pekerjaan (AHSP) dan Permen PUPR Nomor 1 Tahun 2022. Komponen biaya meliputi pekerjaan penerangan, pemasangan stop kontak, penghantar dan pipa instalasi, panel distribusi, perangkat proteksi, biaya tenaga kerja, serta biaya pemasangan daya langganan PLN.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa total biaya yang diperlukan untuk pembangunan instalasi listrik Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid sebesar Rp75.739.744. Nilai tersebut telah mencakup seluruh kebutuhan material, perlengkapan instalasi, tenaga kerja, biaya pemasangan daya PLN, serta overhead dan keuntungan. Dengan adanya perhitungan RAB, pelaksanaan pembangunan instalasi dapat dilakukan secara lebih terencana, efisien, dan sesuai dengan spesifikasi teknis yang telah ditetapkan.

Tabel III
Rekapitulasi RAB

Uraian	Jumlah (Rp)
Subtotal Penerangan	12.101.854
Subtotal Stop kontak	2.010.725
Subtotal Kabel & pipa	22.939.000
Subtotal Panel & pengaman	1.377.734
Subtotal Tenaga kerja	7.425.000
Subtotal Langgan PLN	23.000.000
Jumlah Subtotal	**68.854.313**
Overhead & Profit (10%)	6.885.431
TOTAL RAB INSTALASI LISTRIK	**75.739.744**

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa perencanaan instalasi listrik Gedung SD Muhammadiyah Sirojuddin Mungkid sesuai ketentuan Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020. Hasil perencanaan menunjukkan total kebutuhan daya sebesar 17,81 kW, yang meningkat menjadi 21,37 kW setelah ditambahkan cadangan daya sebesar 20%. Sistem distribusi menggunakan penghantar NYM 3×10 mm² pada jalur utama, NYM 3×1,5 mm² untuk sirkit penerangan, dan NYM 3×2,5 mm² untuk sirkit stop kontak dengan sistem proteksi MCB yang sesuai terhadap kapasitas penghantar. Nilai susut tegangan maksimum sebesar 1,78 V (0,81%) masih berada di bawah batas maksimum 5%, sehingga kualitas penyaluran energi listrik memenuhi persyaratan teknis.

Selain memenuhi aspek keselamatan dan keandalan, rancangan instalasi juga layak diterapkan dari aspek ekonomi dengan total Rencana Anggaran Biaya (RAB) sebesar Rp75.739.744. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai acuan dalam perencanaan instalasi listrik pada bangunan pendidikan yang memiliki karakteristik serupa serta dapat dikembangkan pada penelitian berikutnya melalui analisis efisiensi energi, sistem pembumian, maupun pemanfaatan energi terbarukan.

REFERENSI

[1] M. Agrimansyah, N. Amin, dan M. Sarjan, "Perancangan instalasi listrik pada gedung markas komando direktorat kepolisian perairan dan udara Kepolisian Daerah Sulawesi Tengah di Desa Wani," Foristek, 2021, doi: 10.54757/fs.v10i2.39.

[2] S. Anwar, "Sistem proteksi tegangan sentuh pada instalasi listrik berbasis Earth Leakage Circuit Breaker (ELCB)," Al Ulum Jurnal Sains dan Teknologi, 2021, doi: 10.31602/ajst.v6i2.5230.

[3] Badan Standardisasi Nasional, SNI 03-6575-2001: Tata Cara Perancangan Sistem Pencahayaan Buatan pada Bangunan Gedung, 2001.

[4] Badan Standardisasi Nasional, SNI 6197:2020: Konservasi Energi Sistem Pencahayaan pada Bangunan Gedung, 2020.

[5] Bezprozvannych, M. Grynyshyna, dan Y. Moskvitin, "Requirements for cables as categories of construction products and thermal resistance of power cables," Electrical Engineering & Electromechanics, 2024, doi: 10.20998/2074-272X.2024.1.08.

[6] Calipayan dan A. Espinola, "Compliance of building wiring installations in public infrastructure buildings: Implications for electrical safety and energization in Surigao del Sur," Jurnal Kejuruteraan, 2025, doi: 10.17576/jkukm-2025-37(5)-0770.

[7] M. Dian, W. F., dan M. Arsyad, "Study of electrical installation planning at Pratama Jagoi Babang Hospital," Telecommunications, Computers, and Electricals Engineering Journal, 2023, doi: 10.26418/telectrical.v1i2.69984.

[8] R. Diana, "Integrasi sains dan nilai Islami dalam mengenal sumber energi di SD Islam Nusantara Pekalongan," Jurnal Bintang Pendidikan Indonesia, 2025, doi: 10.55606/jubpi.v3i1.3569.

[9] Heydt, "Distribution transformer loading: Probabilistic modeling and diversity factor," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 38, hlm. 842–849, 2023, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3199999.

[10] Irawati, A. Sunardi, G. Wawan, D. Karikasari, dan R. Gazali, "Penataan instalasi listrik Rumah Tahfidz Qur'an An-Nur Cirebon Jawa Barat," Swadimas: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, 2024, doi: 10.56486/swadimas.vol2no1.414.

[11] Irman, L. Latifah, R. Ruskardi, dan M. Arief, "Pemilihan kabel instalasi listrik untuk bangunan gedung berdasarkan kualitas tahanan isolasi," Jurnal ELIT, 2022, doi: 10.31573/elit.v3i1.406.

[12] IEEE Standards Association, IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book), 1994.

[13] R. Joto, M. Barran, dan R. Marzuq, "Analisis perencanaan sistem jaringan distribusi listrik dan perkembangan beban pada perumahan The Grand Kenjeran Surabaya," Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan, 2023, doi: 10.33795/elposys.v9i3.649.

[14] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020, 2020.

[15] A. Khairi, P. Wibowo, dan R. Rahmaniar, "Analisis statistik konsumsi energi listrik pada gedung kantor Desa Pematang Johar Kecamatan Labuhan Deli Kabupaten Deli Serdang," Uranus: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains dan Informatika, 2025, doi: 10.61132/uranus.v3i1.737.

[16] R. Kurniawan dan A. Feinnudin, "Assessing the implementation of the energy management system in the first ISO 50001 building in Indonesia," Indonesian Journal of Energy, 2021, doi: 10.33116/ije.v4i2.125.

[17] N. Lembang, D. Lembang, dan Y. La Elo, "Pemeliharaan dan perbaikan instalasi penerangan rumah di Kabupaten Fakfak," JMM (Jurnal Masyarakat Mandiri), 2023, doi: 10.31764/jmm.v7i4.16422.

[18] W. Nurtiyanto dkk., "Perancangan instalasi kelistrikan untuk menghindari bahaya listrik dan sesuai ketentuan standarisasi di SMP Negeri 1 Tajur Halang," Swadimas: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, 2025, doi: 10.56486/swadimas.vol3no2.79471.

[19] Pancane, R. Silitonga, dan I. Asna, "Perencanaan instalasi listrik di Hotel dan Villa Maua Nusa Penida," Jurnal Ilmiah Telsinas Elektro, Sipil dan Teknik Informasi, 2022, doi: 10.38043/telsinas.v5i1.3664.

[20] Patiang, "Assessing the conformance of school buildings to electrical standards," Pantao (International Journal of the Humanities and Social Sciences), 2025, doi: 10.69651/pijhss0402152.

[21] PT PLN (Persero), Standar Penyambungan Pelanggan Tegangan Rendah, 2021.

[22] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 1 Tahun 2022 tentang

Pedoman Penyusunan Perkiraan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2022.

[23] International Electrotechnical Commission, IEC 60364-4-43: Low-Voltage Electrical Installations – Part 4-43: Protection for Safety – Protection Against Overcurrent, 2017.

[24] International Electrotechnical Commission, IEC 60364-5-52: Low-Voltage Electrical Installations – Part 5-52: Selection and Erection of Electrical Equipment – Wiring Systems, 2021.

[25] R. Setiawan, "Perancangan alat peraga RCBO sebagai proteksi instalasi rumah tangga," Jurnal Qua Teknika, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.35457/quateknika.v15i01.4359.

[26] N. Suarpur dan A. Paramitha, "Perancangan sistem informasi pengelolaan rencana anggaran biaya (RAB) pada perusahaan konstruksi berbasis web (studi kasus CV. Osa Karya Mandiri)," Smart Techno (Smart Technology, Informatics and Technopreneurship), 2023, doi: 10.59356/smart-techno.v3i2.68.

[27] S. Szultka, S. Czapp, A. Tomaszewski, dan H. Ullah, "Evaluation of fire hazard in electrical installations due to unfavorable ambient thermal conditions," Fire, 2023.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 98-106 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ANALISIS SENSITIVITAS HARGA TANAH DALAM PEMILIHAN TOWER COMPACT LATTICE DAN TOWER STANDAR PADA KORIDOR SUTET 500 KV PERKOTAAN

Firmansyah Rizal[1], Aminullah Assagaf[2]

[12]*Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia*

[1]e-mail.firmansyah2410701@itpln.ac.id

Abstract*— The development of 500 kV Extra High Voltage Overhead Transmission Lines in urban areas is constrained by limited land availability and high land acquisition costs. This study evaluates the technical and financial feasibility of the 18.3 km Muara Tawar–Bekasi transmission corridor by comparing Compact Lattice Towers and conventional towers using technical, financial, and land-price sensitivity analyses. A corridor-based approach integrating technical performance, spatial requirements, land costs, and investment feasibility is adopted. Both tower designs satisfy technical requirements. Compared with conventional towers, Compact Lattice Towers reduce the right-of-way (ROW) width from 34 m to 28 m, decreasing land acquisition and ROW compensation costs by 54.00% and 17.20%, respectively, despite a 29.30% increase in construction cost. Both alternatives remain financially feasible, with B/C > 3.79, NPV > IDR 3.0 trillion, and IRR > 19,89 %. The economic break-even land price is approximately IDR 3.03 million/m², below which conventional towers are more economical, whereas Compact Lattice Towers are preferable above this threshold. The proposed approach provides a quantitative basis for tower selection in urban transmission corridors.

Keywords*—Compact Lattice Tower; land acquisition cost sensitivity; transmission corridor; transmission investment; 500 kV transmission line.

Intisari—Pembangunan Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV di wilayah perkotaan menghadapi keterbatasan lahan dan tingginya biaya pembebasan lahan. Penelitian ini mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km dengan membandingkan Tower Compact Lattice dan Tower Standar menggunakan analisis teknis, finansial, dan sensitivitas harga tanah. Penelitian menerapkan pendekatan berbasis koridor yang mengintegrasikan aspek teknis, kebutuhan ruang, biaya lahan, dan kelayakan investasi. Kedua alternatif memenuhi persyaratan teknis. Tower Compact Lattice mengurangi lebar *right-of-way* (ROW) dari 34 m menjadi 28 m, sehingga menurunkan biaya pembebasan lahan sebesar 54,00% dan biaya kompensasi ROW sebesar 17,20%, meskipun biaya konstruksi meningkat 29,30%. Kedua alternatif layak secara finansial dengan B/C > 3,79, NPV > Rp3,0 triliun, dan IRR > 19,89%. Titik keseimbangan ekonomi diperoleh pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m²; di bawah nilai tersebut Tower Standar lebih ekonomis, sedangkan di atasnya Tower Compact Lattice lebih ekonomis. Pendekatan ini memberikan dasar kuantitatif dalam pemilihan desain tower pada koridor transmisi perkotaan.

***Kata kunci*—Tower Compact Lattice; investasi transmisi; koridor transmisi; sensitivitas biaya pembebasan lahan; SUTET 500 kV.**

I. PENDAHULUAN

Pengembangan jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi merupakan aspek penting dalam meningkatkan keandalan, fleksibilitas, dan efisiensi sistem ketenagalistrikan. Sesuai RUPTL 2025–2034, jaringan transmisi 500 kV menjadi tulang punggung sistem interkoneksi nasional untuk mendukung pertumbuhan beban, integrasi energi baru terbarukan (EBT), dan pemenuhan kriteria keandalan N-1. Salah satu proyek strategis yang mendukung tujuan tersebut adalah Jalur Looping Jakarta, termasuk koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi yang berperan dalam meningkatkan kapasitas transfer daya dan keandalan sistem Jawa–Bali [1].

Meskipun memiliki peran strategis, pembangunan SUTET 500 kV di wilayah perkotaan menghadapi berbagai kendala, terutama keterbatasan lahan, tingginya harga tanah, dan kebutuhan right-of-way (ROW) yang besar. Kondisi tersebut menyebabkan biaya pembebasan lahan menjadi salah satu komponen utama dalam investasi proyek dan sering kali menjadi faktor pembatas dalam pengembangan infrastruktur transmisi. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, PT PLN (Persero) mengembangkan Tower Compact Lattice 500 kV yang memiliki dimensi struktur lebih ramping sehingga membutuhkan tapak tower dan ROW yang lebih kecil dibandingkan tower standar. Namun, penggunaan Tower Compact Lattice juga mengakibatkan basic span yang lebih pendek sehingga jumlah tower yang diperlukan menjadi lebih banyak. Kondisi ini menimbulkan trade-off antara peningkatan biaya konstruksi dan pengurangan biaya lahan akibat kebutuhan ruang yang lebih kecil [3], [11], [14], [15].

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas aspek teknis dan ekonomi pada pembangunan saluran transmisi. Fauzi dan Sidqi [3] mengevaluasi perubahan desain SUTET 500 kV dari tower standar menjadi Tower Compact Lattice dan menunjukkan bahwa desain compact lattice mampu mengurangi kebutuhan ruang tanpa mengurangi kemampuan penyaluran daya. Sementara itu, Nugraha et al. [1] menunjukkan pentingnya evaluasi biaya siklus hidup dalam penentuan alternatif pembangunan transmisi. Namun, penelitian-penelitian tersebut masih berfokus pada karakteristik teknis atau biaya pada tingkat unit tower dan belum mempertimbangkan pengaruh perbedaan basic span terhadap jumlah tower, kebutuhan lahan, kebutuhan ROW, dan struktur investasi pada tingkat koridor transmisi secara keseluruhan. Selain itu, pengaruh harga tanah terhadap

pemilihan desain tower juga masih belum banyak dievaluasi secara kuantitatif, khususnya pada koridor transmisi perkotaan yang memiliki keterbatasan ruang dan harga lahan yang tinggi [4], [5], [9], [16].

Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi teknis dan finansial pembangunan koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi dengan membandingkan Tower Compact Lattice dan tower standar. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan pendekatan berbasis koridor transmisi yang mengintegrasikan karakteristik teknis, kebutuhan ruang, biaya pembebasan lahan, dan kinerja investasi dalam satu kerangka analisis. Evaluasi finansial dilakukan menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP) [2], [8], [18], serta dilengkapi analisis sensitivitas harga tanah [4], [9], [16].

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan kerangka evaluasi yang menghubungkan perbedaan basic span, kebutuhan ruang, struktur biaya investasi, dan sensitivitas harga tanah pada tingkat koridor transmisi. Selain membandingkan kelayakan teknis dan finansial kedua alternatif tower, penelitian ini juga mengidentifikasi titik keseimbangan ekonomi yang memengaruhi pemilihan desain tower [4], [5]. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar kuantitatif dalam pengambilan keputusan investasi transmisi pada kawasan perkotaan dengan keterbatasan lahan dan harga tanah yang tinggi.

II. LANDASAN TEORI

A. Kemampuan Penyaluran Daya pada Sistem Transmisi Tiga Fasa

Kemampuan penyaluran daya menunjukkan kapasitas sistem transmisi dalam menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke pusat beban. Pada sistem tenaga listrik tiga fasa, daya aktif yang dapat disalurkan dipengaruhi oleh tegangan sistem, arus penghantar, dan faktor daya. Besarnya daya aktif dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) [15].

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \emptyset \tag{1}$$

dengan P adalah daya aktif (W), V adalah tegangan saluran (V), I adalah arus saluran (A), dan $\cos \emptyset$ adalah faktor daya. Persamaan (1) menunjukkan bahwa kapasitas penyaluran daya dipengaruhi oleh tegangan sistem, arus penghantar, dan faktor daya. Pada sistem interkoneksi, penggunaan transmisi tegangan ekstra tinggi diperlukan untuk menyalurkan daya dalam kapasitas besar secara efisien. Peningkatan level tegangan memungkinkan transfer daya yang lebih besar dengan arus yang lebih rendah, sehingga rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada saluran dapat diminimalkan serta keandalan operasi sistem tenaga listrik dapat ditingkatkan [11], [15].

B. Desain Tower Transmisi dan Kelayakan Teknis

Tower transmisi merupakan struktur penyangga konduktor yang dirancang untuk memenuhi persyaratan keselamatan dan keandalan sistem tenaga listrik [11], [14], [15]. Karakteristik desain tower memengaruhi beberapa parameter teknis saluran, seperti kapasitas penyaluran daya, *electrical clearance*, *ground clearance*, kebutuhan *right of way* (ROW), serta tingkat paparan medan listrik dan medan magnet.

Electrical clearance dan *ground clearance* digunakan untuk memastikan terpenuhinya jarak aman penghantar terhadap objek di sekitarnya dan permukaan tanah sesuai standar keselamatan yang berlaku [14], [15]. Selain itu, kebutuhan ROW berpengaruh terhadap ruang koridor transmisi dan kebutuhan lahan, sedangkan medan listrik dan medan magnet digunakan untuk mengevaluasi tingkat paparan elektromagnetik di sekitar saluran transmisi [6], [7], [10], [13].

C. Indikator Kelayakan Finansial

Evaluasi kelayakan investasi dilakukan menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit-Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP) [2], [8], [18]. NPV digunakan untuk mengukur nilai tambah ekonomi proyek berdasarkan selisih antara nilai kini manfaat dan biaya, sedangkan IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi yang diperoleh pada kondisi NPV sama dengan nol. B/C Ratio menggambarkan rasio antara manfaat dan biaya yang telah didiskontokan, sementara PBP menunjukkan waktu yang diperlukan untuk memulihkan investasi awal. Proyek dinyatakan layak apabila memiliki NPV positif, IRR yang lebih tinggi daripada tingkat diskonto, B/C Ratio lebih besar dari satu, serta PBP yang lebih pendek dari umur ekonomis proyek [18].

$$NPV = \sum_{t=0}^{N} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \tag{2}$$

$$\sum_{t=0}^{N} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0 \tag{3}$$

$$B/C\ Ratio = \frac{Present\ Worth\ of\ Benefits}{Present\ Worth\ of\ Costs} \tag{4}$$

$$Payback\ Period = \text{Jumlah tahun sebelum pelunasan penuh} + \frac{Biaya\ yang\ belum\ dilunasi\ pada\ awal\ tahun}{Arus\ kas\ sepanjang\ tahun\ pelunasan\ penuh} \tag{5}$$

CF_t adalah arus kas (*cash flow*) pada tahun ke-t, r adalah tingkat diskonto (*discount rate*), t adalah tahun ke-t selama umur proyek dan N adalah umur proyek.

Dalam penelitian ini, evaluasi kelayakan finansial dilakukan menggunakan pendekatan discounted cash flow (DCF) selama umur ekonomis aset transmisi 40 tahun. Arus kas tahunan dihitung dengan menggunakan tingkat diskonto (discount rate) sebesar 6,19%. Biaya operasi dan pemeliharaan meliputi biaya pemeliharaan, kepegawaian, dan administrasi dengan asumsi eskalasi sebesar 2,8% per tahun. Sementara itu, manfaat proyek diperoleh dari pendapatan jasa penyaluran energi listrik, yang dihitung berdasarkan energi tersalur tahun pertama sebesar 3.714,24 GWh, pertumbuhan beban tahunan sebesar 3,64%, dan tarif penyaluran sebesar Rp55/kWh.

D. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan suatu variabel terhadap kinerja investasi proyek. Metode ini membantu mengidentifikasi variabel yang paling berpengaruh terhadap indikator kelayakan finansial serta menilai ketahanan proyek terhadap kondisi yang tidak pasti [4], [5], [9], [16].

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif komparatif untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif desain tower pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi, yaitu Tower Standar dan Compact Lattice Tower. Evaluasi dilakukan untuk menganalisis pengaruh perbedaan karakteristik geometris kedua desain tower terhadap kemampuan penyaluran daya, kebutuhan ruang, biaya investasi, dan kelayakan finansial proyek.

Data penelitian merupakan data sekunder yang diperoleh dari PT PLN (Persero), meliputi Kajian Kelayakan Proyek (KKP) SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi Tahun 2018, dokumen desain Tower Standar dan Compact Lattice Tower, dokumen kontrak proyek SUTET 500 kV Tahun 2019, Standar PLN (SPLN), serta data Zona Nilai Tanah (ZNT) dari Kementerian ATR/BPN. Data tersebut mencakup parameter teknis, karakteristik tower, kebutuhan lahan, harga tanah, dan biaya investasi. Seluruh data diverifikasi melalui pemeriksaan konsistensi antar dokumen sebelum digunakan dalam analisis.

A. Metode Analisis Teknis

Analisis kelayakan teknis dilakukan dengan membandingkan kinerja Tower Standar dan Compact Lattice Tower pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi menggunakan parameter operasi yang identik, sehingga perbedaan hasil analisis hanya dipengaruhi oleh karakteristik geometris masing-masing desain tower. Evaluasi meliputi kapasitas arus, kapasitas daya aktif, electrical clearance, minimum approach distance (MAD), ground clearance, kebutuhan right-of-way (ROW), medan listrik, dan medan magnet. Analisis dilakukan pada sistem transmisi 500 kV dengan frekuensi 50 Hz, konfigurasi double circuit, menggunakan konduktor 450-A1/SA1A-54/7 dengan konfigurasi quad bundle, faktor daya 0,90, serta kondisi pembebanan maksimum (maximum loading) dan lendutan konduktor maksimum (maximum sag).

Perbedaan karakteristik geometris kedua alternatif tower menyebabkan perbedaan jumlah tower, kebutuhan lahan tapak (tower footprint), dan kebutuhan right-of-way (ROW), yang selanjutnya memengaruhi biaya investasi. Jumlah tower ditentukan berdasarkan panjang koridor transmisi sebesar 18,3 km dan basic span masing-masing alternatif menggunakan Persamaan (1).

$$N = {}^{L}/_{S} \qquad (6)$$

di mana N adalah jumlah tower, L adalah panjang koridor transmisi, dan S adalah basic span. Dengan basic span sebesar 320 m untuk Compact Lattice Tower dan 450 m untuk Tower Standar, diperoleh kebutuhan masing-masing sebanyak 58 unit dan 41 unit. Perhitungan ini merupakan estimasi pada tingkat perencanaan dengan asumsi panjang trase tetap dan basic span konstan, sehingga belum mempertimbangkan penyesuaian lokasi tower akibat perubahan arah trase, kondisi topografi, maupun kendala lapangan yang umumnya ditetapkan pada tahap Detail Engineering Design (DED). Distribusi jenis tower selanjutnya ditentukan menggunakan metode *weighted average* berdasarkan komposisi jenis tower pada dokumen desain proyek SUTET 500 kV Looping Jakarta, yang mencakup koridor Muara Tawar–Bekasi. Pada kedua alternatif, jumlah tower tension tipe FF ditetapkan tetap sebanyak dua unit sebagai tower terminal, sedangkan sisa tower didistribusikan ke dalam tower suspension tipe AA serta tower tension tipe BB, CC, DD, dan EE berdasarkan proporsi rata-rata masing-masing sebesar 56%, 18%, 14%, 4%, dan 5%. Distribusi tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan lahan tapak, kebutuhan material, dan estimasi biaya investasi pada masing-masing alternatif.

Kapasitas arus dihitung berdasarkan kemampuan hantar arus konduktor sesuai spesifikasi desain, sedangkan kapasitas daya aktif dihitung menggunakan parameter operasi sistem tiga fasa. Selanjutnya, electrical clearance, minimum approach distance (MAD), ground clearance, kebutuhan right-of-way (ROW), medan listrik, dan medan magnet dihitung berdasarkan konfigurasi geometris masing-masing tower sesuai dokumen desain dan standar yang berlaku. Hasil perhitungan setiap parameter kemudian dibandingkan dengan kriteria evaluasi sebagaimana disajikan pada Tabel I.

Tabel I
Kriteria Evaluasi Teknis

Parameter	Kriteria Evaluasi	Acuan
Kapasitas arus	≥ 2.292 A	KKP SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi
Kapasitas daya aktif	≥ 1.786 MW	KKP SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi
Electrical Clearance	≥ 3,10 m	IEC 61936-1
Minimum Approach Distance (MAD)	≥ 3,4708 m	IEC 61472:2013
Ground Clearance	≥ 12,50 m	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
ROW horizontal	14 m (Compact Lattice Tower); 17 m (Tower Standar)	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
Medan listrik maksimum	≤ 10 kV/m	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025
Medan magnet maksimum	≤ 1.000 μT	Permen ESDM No. 13 Tahun 2025

Suatu alternatif dinyatakan memenuhi persyaratan teknis apabila seluruh parameter hasil analisis memenuhi kriteria evaluasi yang ditetapkan dalam standar dan regulasi tersebut.

B. Model Analisis Finansial

Evaluasi kelayakan finansial dilakukan menggunakan metode Discounted Cash Flow (DCF) untuk menghitung Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP). Model arus kas disusun berdasarkan investasi awal (capital expenditure), biaya operasi dan pemeliharaan (operation and maintenance), serta manfaat tahunan yang diperoleh dari jasa penyaluran energi listrik selama umur ekonomis proyek. Investasi dimodelkan menggunakan skema disbursement, sedangkan manfaat dan biaya operasi dihitung setiap tahun hingga akhir umur proyek. Seluruh parameter yang digunakan dalam model finansial ditunjukkan pada Tabel II.

Tabel II
Asumsi Dasar Analisis Finansial

Parameter	Nilai
Tahun dasar biaya	2025
Umur ekonomis proyek	40 tahun
Tingkat diskonto	6,19%
Daya saluran	530 MW
Faktor daya	0,9
Faktor utilisasi saluran	80%
Energi tersalur tahun pertama	3.714,24 GWh
Pertumbuhan beban	3,64% per tahun
Tarif jasa penyaluran	Rp55/kWh
Biaya O&M tahun pertama	Rp22,99 miliar
Eskalasi O&M	2,8% per tahun
Skema *disbursement*	20% (Year 0); 24% (Year 1); 48% (COD) (Year 3); 8% (Year 4)
Dasar arus kas	Pre-tax cash flow
Nilai sisa aset	0

Energi listrik yang disalurkan pada tahun ke-t dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$E_t = P \times 8760 \times LF \times (1+g)^{t-1} \quad (7)$$

dengan E_t adalah energi listrik yang disalurkan pada tahun ke-t (kWh), P adalah daya saluran (kW), LF adalah faktor utilisasi saluran, dan g adalah pertumbuhan beban tahunan.

Manfaat tahunan dihitung berdasarkan energi listrik yang disalurkan dan tarif jasa penyaluran sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut.

$$Benefit_t = E_t \times T \quad (8)$$

dengan $Benefit_t$ adalah manfaat pada tahun ke-t, sedangkan T adalah tarif jasa penyaluran (Rp/kWh).

Biaya operasi dan pemeliharaan dihitung menggunakan persamaan berikur.

$$O\&M_t = O\&M_0(1+i)^{t-1} \quad (9)$$

dengan $O\&M_t$ adalah biaya operasi dan pemeliharaan pada tahun ke-t, $O\&M_0$ adalah biaya operasi dan pemeliharaan tahun pertama, dan i adalah tingkat eskalasi biaya operasi tahunan.

C. Model Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan menggunakan one-way sensitivity analysis untuk mengevaluasi pengaruh perubahan harga tanah terhadap kelayakan finansial Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang paling membedakan kedua alternatif melalui biaya pembebasan lahan tapak tower dan kompensasi right-of-way (ROW), sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan konstan. Analisis dilakukan pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m² dengan menghitung kembali indikator Benefit Cost Ratio (B/C), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP) pada setiap skenario.

Untuk menentukan batas perubahan keunggulan ekonomi kedua alternatif, dilakukan analisis titik keseimbangan (*equilibrium point*) menggunakan interpolasi linier berdasarkan dua skenario harga tanah yang mengapit perubahan nilai NPV. Hubungan antara harga tanah dan NPV dinyatakan sebagai

$$NPV = a + bH \quad (10)$$

dengan NPV adalah *Net Present Value* (Rp), H adalah harga tanah (Rp/m²), a adalah konstanta, dan $b$adalah gradien persamaan linier yang dihitung menggunakan

$$b = \frac{NPV_2 - NPV_1}{H_2 - H_1} \quad (11)$$

sedangkan konstanta diperoleh dari

$$a = NPV_1 - bH_1 \quad (12)$$

Titik keseimbangan diperoleh ketika kedua alternatif menghasilkan nilai NPV yang sama,

$$NPV_{Compact} = NPV_{Standar} \quad (13)$$

sehingga harga tanah pada titik keseimbangan dihitung dengan

$$H = \frac{a_s - a_c}{b_c - b_s} \quad (14)$$

Nilai H menunjukkan harga tanah ketika kedua alternatif memiliki kelayakan finansial yang setara.

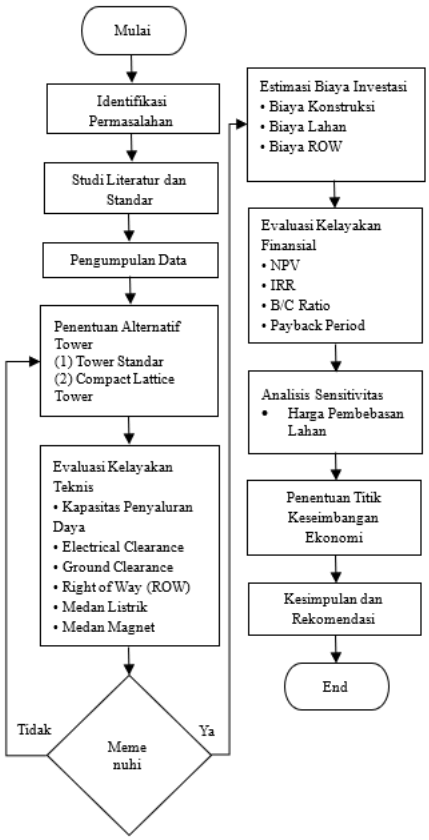
D. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan finansial dua alternatif desain tower, yaitu Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Alur penelitian yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan, studi literatur, serta pengumpulan data teknis dan finansial yang diperlukan. Berdasarkan data tersebut, ditetapkan dua alternatif desain tower yang menjadi objek analisis, yaitu Tower Standar dan Tower Compact Lattice. Selanjutnya, kedua alternatif dievaluasi berdasarkan aspek teknis yang meliputi kapasitas penyaluran daya, electrical clearance, ground clearance, kebutuhan right of way (ROW), serta

karakteristik medan listrik dan medan magnet untuk memastikan kesesuaiannya dengan persyaratan teknis yang berlaku.

Alternatif yang memenuhi seluruh persyaratan teknis kemudian dievaluasi dari aspek ekonomi melalui penyusunan estimasi biaya investasi yang mencakup biaya konstruksi, biaya pembebasan lahan tapak tower, dan biaya kompensasi right of way (ROW). Berdasarkan komponen biaya tersebut, disusun model arus kas menggunakan parameter finansial pada Tabel I sebagai dasar perhitungan indikator kelayakan investasi, yaitu Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP).



Gambar 1. Alur Penelitian

Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang paling membedakan struktur investasi Tower Standar dan Tower Compact Lattice, sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan tetap. Hasil analisis sensitivitas selanjutnya digunakan untuk menentukan titik keseimbangan ekonomi (*equilibrium point*), yaitu harga tanah ketika kedua alternatif menghasilkan nilai *Net Present Value* (NPV) yang sama. Hasil dari seluruh tahapan analisis menjadi dasar dalam menentukan alternatif desain tower yang paling layak secara teknis dan finansial untuk pembangunan koridor SUTET 500 kV di kawasan perkotaan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini membandingkan Tower Standar dan Tower Compact Lattice pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km berdasarkan parameter teknis dan finansial yang telah ditetapkan pada Bab III. Evaluasi dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh perbedaan karakteristik kedua desain terhadap kebutuhan ruang, biaya investasi, kelayakan finansial, serta sensitivitas harga tanah pada pembangunan koridor transmisi.

Hasil analisis disajikan secara bertahap, diawali dengan evaluasi karakteristik teknis yang memengaruhi jumlah tower, kebutuhan tapak, dan lebar right-of-way (ROW). Selanjutnya dilakukan analisis biaya investasi, evaluasi kelayakan finansial menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Benefit Cost Ratio (B/C), dan Payback Period (PBP), serta analisis sensitivitas harga tanah untuk mengevaluasi pengaruh perubahan biaya pembebasan lahan terhadap kinerja investasi kedua alternatif desain.

A. Kelayakan Teknis

Hasil evaluasi teknis kedua alternatif tower ditunjukkan pada Tabel III. Berdasarkan hasil evaluasi, Tower Standar dan Tower Compact Lattice sama-sama memenuhi seluruh persyaratan teknis yang berlaku untuk saluran transmisi 500 kV sehingga keduanya layak diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi. Kedua alternatif memiliki kapasitas arus sebesar 3.497 A dan kapasitas daya aktif sebesar 2.726 MW, yang berada di atas kebutuhan sistem masing-masing sebesar 2.292 A dan 1.786 MW. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua desain memiliki kapasitas yang memadai untuk mendukung penyaluran daya pada koridor transmisi tanpa mengalami keterbatasan dari sisi kemampuan penghantar.

Tabel III
Hasil Evaluasi Kelayakan Teknis

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Kriteria
Kapasitas Arus	3.497 A	3.497 A	Memenuhi
Kapasitas Daya Aktif	2.726 MW	2.726 MW	Memenuhi
Electrical Clearance	3,5 m	4,4 m	Memenuhi
Minimum Approach Distance	3,5 m	4,4 m	Memenuhi
Ground Clearance	17,88 m	16,745 m	Memenuhi
Margin Ground Clearance	5,38 m	4,245 m	Memenuhi
ROW Horizontal	14,00 m	17,0 m	Memenuhi
Medan Listrik Maksimum	7,10 kV/m	7,51 kV/m	Memenuhi
Medan Magnet Maksimum	32,36 μT	34,62 μT	Memenuhi

Perbedaan utama kedua alternatif terletak pada karakteristik geometris struktur tower. Tower Standar memiliki electrical clearance dan minimum approach distance yang lebih besar dibandingkan Tower Compact Lattice sehingga memberikan margin keselamatan listrik yang lebih tinggi. Namun demikian, seluruh parameter

pada Tower Compact Lattice tetap memenuhi batas minimum yang dipersyaratkan, sehingga kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan operasi yang setara.

Sebaliknya, Tower Compact Lattice menunjukkan keunggulan pada aspek efisiensi ruang. Konfigurasi struktur yang lebih kompak menghasilkan ground clearance yang lebih tinggi serta mengurangi kebutuhan right-of-way (ROW) horizontal dari 17 m menjadi 14 m (atau dari 34 m menjadi 28 m untuk konfigurasi dua sirkit). Pengurangan ROW tersebut menjadi keunggulan pada pembangunan saluran transmisi di kawasan perkotaan karena dapat mengurangi kebutuhan ruang koridor dan potensi pembebasan lahan. Hasil ini sejalan dengan penelitian Fauzi dan Sidqi [3] yang menunjukkan bahwa Tower Compact Lattice mampu mengurangi kebutuhan ruang koridor transmisi dibandingkan tower standar. Selain itu, Tower Compact Lattice menghasilkan medan listrik maksimum sebesar 7,10 kV/m dan medan magnet maksimum sebesar 32,36 μT, lebih rendah dibandingkan Tower Standar (7,51 kV/m dan 34,62 μT), meskipun seluruh nilai masih berada jauh di bawah batas yang dipersyaratkan.

Perbedaan karakteristik geometris tersebut juga memengaruhi konfigurasi koridor transmisi. Tower Compact Lattice memiliki *basic span* sebesar 320 m, sedangkan Tower Standar memiliki *basic span* sebesar 450 m, sehingga untuk panjang koridor yang sama diperlukan jumlah tower yang lebih banyak pada Tower Compact Lattice. Dengan demikian, Tower Compact Lattice menawarkan efisiensi penggunaan ruang yang lebih baik, sedangkan Tower Standar lebih efisien dari sisi jumlah tower yang dibutuhkan.

Secara keseluruhan, kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan teknis yang setara karena seluruh parameter memenuhi persyaratan desain saluran transmisi 500 kV. Perbedaan utama keduanya bukan terletak pada kemampuan penyaluran daya, melainkan pada karakteristik geometris yang memengaruhi kebutuhan ROW dan jumlah tower. Karakteristik tersebut selanjutnya menjadi dasar dalam analisis biaya investasi dan kelayakan finansial pada subbab berikutnya.

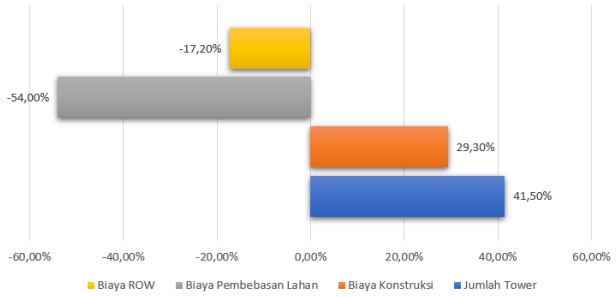
B. Biaya Investasi

Perbedaan biaya investasi antara Tower Compact Lattice dan Tower Standar dipengaruhi oleh jumlah tower, kebutuhan lahan tapak tower, dan kebutuhan *right-of-way* (ROW) pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi sepanjang 18,3 km. Dengan *basic span* sebesar 320 m, Tower Compact Lattice membutuhkan 58 unit tower, lebih banyak dibandingkan Tower Standar yang membutuhkan 41 unit dengan *basic span* sebesar 450 m. Namun, Tower Compact Lattice memiliki kebutuhan ROW yang lebih kecil, yaitu 28 m (14 m per sisi) dibandingkan 34 m (17 m per sisi) pada Tower Standar, serta dimensi tapak tower yang lebih kecil, yaitu 15 × 15 m hingga 20 × 20 m dibandingkan 25 × 25 m hingga 42 × 42 m pada Tower Standar.

Perbedaan karakteristik tersebut menghasilkan struktur biaya investasi yang berbeda. Basic span yang lebih pendek pada Tower Compact Lattice meningkatkan jumlah tower sebesar 41,50 %, sehingga kebutuhan fondasi, pekerjaan sipil, material struktur, dan pekerjaan erection juga meningkat. Akumulasi komponen tersebut menyebabkan biaya konstruksi Tower Compact Lattice menjadi 29,30% lebih tinggi dibandingkan Tower Standar. Sebaliknya, dimensi tapak tower yang lebih kecil dan kebutuhan ROW yang lebih sempit mengurangi total luas tapak tower sebesar 53,14% dan luas ROW sebesar 17,65%, sehingga biaya pembebasan lahan berkurang sebesar 54,0% dan biaya ROW berkurang sebesar 17,20% dibandingkan Tower Standar.

Tabel IV
Perbandingan Kebutuhan Infrastruktur, Lahan, dan Biaya

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Selisih
Jumlah Tower	58 unit	41 unit	41,50%
Total Luas Tapak Tower	14.945 m²	31.892 m²	-53,14%
Total Luasan ROW	512.400 m²	622.200 m²	-17,65%
Biaya Konstruksi	Rp400 Miliar	Rp309 Miliar	29,30%
Biaya Pembebasan Lahan	Rp36 Miliar	Rp79 Miliar	-54,00%
Biaya ROW	Rp189 Miliar	Rp229 Miliar	-17,20%



Gambar 2. Persentase perubahan komponen investasi dibandingkan tower standar.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa struktur biaya kedua alternatif ditentukan oleh *trade-off* antara biaya konstruksi dan biaya pengadaan lahan. Tower Compact Lattice memerlukan biaya konstruksi yang lebih tinggi akibat bertambahnya jumlah tower, namun mampu menekan biaya pengadaan lahan melalui pengurangan luas tapak tower dan ROW. Sebaliknya, Tower Standar memiliki biaya konstruksi yang lebih rendah, tetapi membutuhkan biaya lahan yang lebih besar akibat dimensi tapak dan ROW yang lebih lebar. Dengan demikian, keunggulan finansial masing-masing alternatif bergantung pada besarnya kontribusi kedua komponen biaya tersebut terhadap total investasi. Oleh karena itu, analisis sensitivitas harga tanah dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja finansial kedua alternatif serta mengidentifikasi nilai harga tanah ambang (*break-even point*) ketika preferensi investasi beralih dari Tower Standar ke Tower Compact Lattice.

C. Kelayakan Finansial

Hasil evaluasi kelayakan finansial ditunjukkan pada Tabel V. Seluruh indikator menunjukkan bahwa Tower Compact Lattice dan Tower Standar memenuhi kriteria kelayakan investasi. Kedua alternatif memiliki nilai

Benefit Cost Ratio (B/C) lebih besar dari satu, Net Present Value (NPV) bernilai positif, Internal Rate of Return (IRR) lebih tinggi daripada tingkat diskonto, serta Payback Period (PBP) yang masih berada dalam umur ekonomis proyek. Dengan demikian, kedua alternatif layak diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi.

Tabel V
Hasil Evaluasi Kelayakan Finansial

Parameter	Tower Compact Lattice	Tower Standar	Selisih
Benefit Cost Ratio (B/C)	3,79	3,85	-1,58%
Net Present Value (NPV)	Rp 3.064 miliar	Rp 3.081 miliar	-0,55%
Internal Rate of Return (IRR)	19,89%	20,16%	-1,35%
Payback Period (PBP)	8 Tahun 4 Bulan	8 Tahun 3 Bulan	+ 1 Bulan

Meskipun demikian, Tower Standar menunjukkan kinerja finansial yang sedikit lebih baik dibandingkan Tower Compact Lattice. Nilai B/C Tower Standar sebesar 3,85, lebih tinggi 1,58% dibandingkan Tower Compact Lattice (3,79). Nilai NPV Tower Standar mencapai Rp3.081 miliar, lebih tinggi 0,55% dibandingkan Tower Compact Lattice sebesar Rp3.064 miliar. Demikian pula, IRR Tower Standar sebesar 20,16%, lebih tinggi 1,35% dibandingkan Tower Compact Lattice (19,89%), sedangkan PBP Tower Standar lebih cepat 1 bulan, yaitu 8 tahun 3 bulan, dibandingkan 8 tahun 4 bulan pada Tower Compact Lattice.

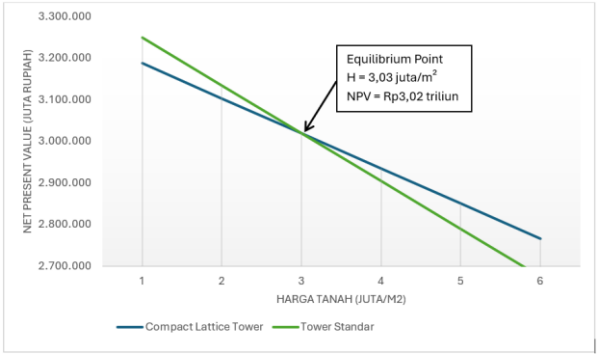
Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan biaya konstruksi akibat bertambahnya jumlah tower pada Tower Compact Lattice belum sepenuhnya dapat diimbangi oleh penghematan biaya pembebasan lahan dan biaya ROW pada kondisi dasar analisis. Meskipun demikian, selisih seluruh indikator finansial relatif kecil, yaitu kurang dari 2%, sehingga kedua alternatif masih memiliki tingkat kelayakan investasi yang hampir setara.

Hasil ini juga menunjukkan bahwa evaluasi pada kondisi dasar belum cukup untuk menentukan alternatif yang paling ekonomis karena kinerja finansial kedua desain dipengaruhi oleh struktur biaya investasi yang berbeda. Oleh karena itu, analisis sensitivitas harga tanah dilakukan untuk mengevaluasi perubahan kinerja finansial kedua alternatif terhadap variasi harga tanah serta mengidentifikasi nilai harga tanah ambang (break-even point) ketika preferensi investasi beralih dari Tower Standar ke Tower Compact Lattice.

D. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan harga tanah terhadap kelayakan finansial Tower Compact Lattice dan Tower Standar menggunakan indikator Benefit Cost Ratio (B/C), Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP). Harga tanah dipilih sebagai variabel sensitivitas karena merupakan komponen biaya yang membedakan kebutuhan investasi kedua alternatif melalui biaya pembebasan lahan tapak tower dan kompensasi right-of-way (ROW), sedangkan parameter teknis dan finansial lainnya dipertahankan konstan. Hasil analisis disajikan pada Tabel VI.

Hasil analisis menunjukkan bahwa kenaikan harga tanah menurunkan kelayakan finansial kedua alternatif yang ditunjukkan oleh penurunan nilai B/C, NPV, dan IRR serta peningkatan PBP. Pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m², NPV Tower Compact Lattice menurun sebesar Rp422 miliar, sedangkan Tower Standar menurun sebesar Rp575 miliar, sehingga menunjukkan bahwa Tower Standar lebih sensitif terhadap kenaikan harga tanah. Perbedaan tersebut disebabkan oleh kebutuhan lahan tapak dan ROW Tower Standar yang lebih besar sehingga proporsi biaya lahan dalam investasi menjadi lebih tinggi dibandingkan Compact Lattice Tower.



Gambar 3. Hubungan harga tanah terhadap Net Present Value (NPV) Tower Standar dan Tower Compact Lattice.

Hubungan antara harga tanah dan NPV kedua alternatif pada Gambar 3 menunjukkan tren linier dengan gradien yang berbeda sehingga menghasilkan titik keseimbangan (equilibrium point). Berdasarkan interpolasi linier diperoleh titik keseimbangan pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m² dengan nilai NPV sekitar Rp3,02 triliun. Pada harga tanah di bawah nilai tersebut, Tower Standar memberikan NPV yang lebih tinggi karena biaya konstruksinya lebih rendah. Sebaliknya, pada harga tanah di atas Rp3,03 juta/m², Compact Lattice Tower menghasilkan NPV yang lebih tinggi karena kebutuhan lahan yang lebih kecil mampu mengurangi peningkatan biaya investasi. Pada skenario harga tanah Rp6 juta/m², NPV Compact Lattice mencapai Rp2.765 miliar, lebih tinggi sekitar Rp91 miliar dibandingkan Tower Standar sebesar Rp2.674 miliar

Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik kebutuhan lahan memengaruhi keunggulan ekonomi relatif kedua alternatif pada koridor transmisi perkotaan. Namun, titik keseimbangan Rp3,03 juta/m² hanya berlaku untuk asumsi penelitian ini, termasuk konfigurasi tower, struktur biaya investasi, tarif jasa penyaluran, tingkat diskonto, dan parameter finansial lainnya. Selain itu, penelitian ini menggunakan *one-way sensitivity analysis* dengan hanya memvariasikan harga tanah, sedangkan biaya konstruksi, tingkat diskonto, inflasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta keterlambatan proyek diasumsikan tetap. Oleh karena itu, hasil penelitian ini merepresentasikan pengaruh perubahan harga tanah secara terisolasi dan belum menggambarkan seluruh ketidakpastian investasi.

Tabel VI
Perbandingan Sensitivitas Kelayakan Finansial terhadap Perubahan Harga Tanah

Harga Tanah	Benefit Cost Ratio		Payback Period		Net Present Value		Internal Rate of Return	
(Rp Juta/m²)	Compact Lattice	Standar	Compact Lattice (Tahun-Bulan)	Standar (Tahun-Bulan)	Compact Lattice (Miliar Rp)	Standar (Miliar Rp)	Compact Lattice (%)	Standar (%)
1	4,27	4,56	7-5	7-0	3.187	3.249	22,06%	23,37%
2	3,93	4,05	8-1	7-10	3.103	3.134	20,52%	21,06%
3	3,64	3,64	8-8	8-8	3.018	3.019	19,21%	19,22%
4	3,39	3,31	9-4	9-6	2.934	2.904	18,08%	17,71%
5	3,17	3,03	9-11	10-5	2.850	2.789	17,09%	16,45%
6	2,98	2,8	10-7	11-3	2.765	2.674	16,21%	15,37%

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil evaluasi kelayakan teknis, kelayakan finansial, dan analisis sensitivitas harga tanah terhadap Tower Standar dan Tower Compact Lattice pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Tower Standar dan Tower Compact Lattice memenuhi seluruh persyaratan teknis untuk diterapkan pada koridor SUTET 500 kV Muara Tawar–Bekasi. Kedua alternatif memiliki kapasitas penyaluran daya sebesar 2.726 MW, melebihi kebutuhan sistem sebesar 1.786 MW, serta memenuhi persyaratan *electrical clearance*, *minimum approach distance* (MAD), *ground clearance*, medan listrik, dan medan magnet sesuai standar yang berlaku.
2. Tower Compact Lattice memberikan efisiensi penggunaan ruang yang lebih baik dibandingkan Tower Standar. Penggunaan Tower Compact Lattice mampu mengurangi lebar *right-of-way* (ROW) total dari 34 m menjadi 28 m, sehingga mengurangi luas tapak tower sebesar 53,1% dan kebutuhan ROW sebesar 17,7%. Namun, pengurangan kebutuhan ruang tersebut diikuti oleh bertambahnya jumlah tower akibat *basic span* yang lebih pendek.
3. Perbedaan karakteristik geometris kedua alternatif menghasilkan *trade-off* pada struktur biaya investasi. Tower Compact Lattice memerlukan biaya konstruksi 29,3% lebih tinggi, tetapi mampu menurunkan biaya pembebasan lahan sebesar 54,0% dan biaya kompensasi ROW sebesar 17,2% dibandingkan Tower Standar.
4. Kedua alternatif dinyatakan layak secara finansial pada kondisi dasar analisis. Tower Compact Lattice menghasilkan Benefit Cost Ratio (B/C) sebesar 3,79, Net Present Value (NPV) sebesar Rp3.064 miliar, Internal Rate of Return (IRR) sebesar 19,89%, dan Payback Period (PBP) selama 8 tahun 4 bulan, sedangkan Tower Standar menghasilkan B/C sebesar 3,85, NPV sebesar Rp3.081 miliar, IRR sebesar 20,16%, dan PBP selama 8 tahun 3 bulan. Perbedaan indikator finansial yang relatif kecil menunjukkan bahwa kedua alternatif memiliki tingkat kelayakan investasi yang hampir setara, meskipun pada kondisi dasar Tower Standar memberikan kinerja finansial yang sedikit lebih baik.
5. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa Tower Standar lebih sensitif terhadap kenaikan harga tanah dibandingkan Tower Compact Lattice. Pada rentang harga tanah Rp1–6 juta/m², NPV Tower Standar menurun sebesar Rp575 miliar, sedangkan Tower Compact Lattice menurun sebesar Rp422 miliar. Titik keseimbangan (*equilibrium point*) diperoleh pada harga tanah sekitar Rp3,03 juta/m², sehingga Tower Standar lebih ekonomis pada harga tanah di bawah nilai tersebut, sedangkan Tower Compact Lattice lebih ekonomis pada harga tanah di atasnya. Hasil ini menunjukkan bahwa harga tanah merupakan parameter penting dalam pemilihan desain tower pada koridor transmisi perkotaan dengan karakteristik seperti pada penelitian ini.
6. Hasil penelitian ini dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan desain tower SUTET 500 kV pada kawasan perkotaan berdasarkan karakteristik harga lahan. Penelitian selanjutnya disarankan mempertimbangkan parameter investasi lainnya, seperti biaya konstruksi, tingkat diskonto, inflasi, biaya operasi dan pemeliharaan, serta risiko proyek agar evaluasi investasi menjadi lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan penghargaan kepada Institut Teknologi PLN (ITPLN) atas dukungan akademik yang diberikan selama proses penelitian. Penghargaan juga diberikan kepada PT PLN (Persero) Kantor Pusat atas dukungan institusional, kesempatan penelitian, serta penyediaan data dan informasi yang berperan penting dalam penyelesaian studi ini.

REFERENSI

[1] H. Nugraha, Z. O. Silalahi, and N. I. Sinisuka, “The Use of Life Cycle Cost Analysis to Determine the Most Effective Cost of Installation of 500 kV Java-Sumatra Power Interconnection System,” IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, vol. 3, no. 4, pp. 191–197, Dec. 2016.

[2] Z. Asbah and A. Assagaf, “Kelayakan Finansial PLTA Run-of-River dengan Integrasi Mekanisme Article 6: Studi

Kasus PLTA Watunohu," Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia, vol. 11, no. 4, pp. 3116–3128, Apr. 2026.

[3] M. F. Fauzi and A. Sidqi, "Analisis Teknis dan Keekonomian Perubahan Desain SUTET 500 kV dari Tower Normal Menjadi Tower Compact Lattice (Studi Kasus: SUTET 500 kV Balaraja–Cikupa)," Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan, vol. 5, no. 2, pp. 682–691, Jun. 2026.

[4] Y. Cao, M. Mohammadian, V. Pirouzfar, C.-H. Su, and A. Khan, "Break Even Point Analysis of Liquefied Natural Gas Process and Optimization of Its Refrigeration Cycles with Technical and Economic Considerations," Energy, vol. 237, Art. no. 121643, 2021.

[5] J. Garcia-Barberena, A. Monreal, and M. Sanchez, "The BEPE—Break-Even Price of Energy: A Financial Figure of Merit for Renewable Energy Projects," Renewable Energy, vol. 71, pp. 584–588, 2014.

[6] M. Syukri, S. Syukriyadin, A. Alfisyahrin, R. H. Siregar, and I. Iqbar, "Dampak Medan Magnet Pembangunan Jaringan Listrik PLTA Luteung 16 MW terhadap Kesehatan Masyarakat," JPMA: Jurnal Pengabdian Masyarakat As-Salam, vol. 3, no. 2, pp. 57–62, 2023.

[7] Yusmartato, R. Nasution, and A. Hasibuan, "Analisis Kopling Elektromagnetik pada Transmisi Tegangan Tinggi 150 kV (Aplikasi: PT PLN Persero Unit Tragi Sei Rotan)," Journal of Electrical Technology, vol. 3, no. 2, pp. 97–104, Jun. 2018.

[8] P. A. K. Ray, R. S. Wibowo, and F. A. Pamuji, "Studi Kelayakan Pemasangan PLTS 80 kW pada Sistem Kelistrikan PT Indonesia Kendaraan Terminal," Jurnal Teknik ITS, vol. 10, no. 1, pp. B1–B7, 2021.

[9] P. P. R. Tenawaheng, C. Utomo, and I P. A. Wiguna, "Analisis Sensitivitas Investasi Apartemen Begawan," Jurnal Teknik ITS, vol. 10, no. 1, pp. D25–D30, 2021.

[10] D. Fahmi, I. M. Yulistya, D. A. Asfani, and Y. Afif, "Analisis Distribusi Medan Listrik pada Isolator Gantung Jenis Polimer Akibat Pengaruh Kontaminan," Jurnal Nasional Teknik Elektro, vol. 4, no. 2, pp. 182–189, Sep. 2015.

[11] Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and above, 3rd ed. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2005.

[12] I. N. Khoirudin, S. Anam, and M. Pujiantara, "Studi Kelayakan Pemasangan Kabel Laut 150 kV Pakning–Bengkalis untuk Menurunkan Biaya Pokok Produksi (BPP) di Pulau Bengkalis," Jurnal Teknik ITS, vol. 12, no. 1, pp. B50–B55, 2023.

[13] J. Tarigan, U. Situmeang, and Monice, "Studi Kuat Medan Listrik Tower 213–214 Section Duri Bagan Batu," SainETIn: Jurnal Sains, Energi, Teknologi dan Industri, vol. 6, no. 2, pp. 56–65, 2022.

[14] IEEE Standards Association, IEEE Guide for Overhead Alternating Current (AC) Transmission Line Design, IEEE Std 1863-2024 (Revision of IEEE Std 1863-2019). New York, NY, USA: IEEE, 2024.

[15] R. D. Begamudre, Extra High Voltage AC Transmission Engineering, 3rd ed. New Delhi, India: New Age International Publishers, 2006.

[16] A. Nur, B. T. Wijaya, H. Febriansyah, I. Riyanto, and T. Tafonao, "Analisis Sensitivitas Break Even Point terhadap Perubahan Harga dan Volume Penjualan," PT AN Consulting: Jurnal ANC, vol. 1, no. 3, pp. 51–58, May–Jun. 2025.

[17] D. Lock, Project Management, 9th ed. Aldershot, U.K.: Gower Publishing Ltd., 2007.

[18] E. F. Brigham and P. R. Daves, Intermediate Financial Management, 9th ed. Mason, OH, USA: Thomson South-Western, 2007.

[19] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 188.K/TL.03/MEM.L/2025 tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Tahun 2025–2034. Jakarta, Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2025.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 107-114 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ANALISIS DAMPAK KEEKONOMIAN INVESTASI INFRASTRUKTUR SEKTOR KETENAGALISTRIKAN DI PROVINSI KALIMANTAN UTARA MENGGUNAKAN METODE INPUT OUTPUT LEONTIEF

Jefry Sambara Palelleng[1], Tri Wahyu Adi[2]

[1,2]*Institut Teknologi PLN, Jakarta Barat, DKI Jakarta, Indonesia*

[1]jefry2310123@itpln.ac.id

Abstract*—The development of electricity infrastructure is essential to support economic growth, industrial development, and community welfare, particularly in regions with isolated electrical systems and limited power supply. The government, through PT PLN (Persero), allocates significant budget for investment in the electricity sector. In addition to accurate financial studies, an analysis of the economic impact of these investments is required. One of the projects implemented by PT PLN (Persero) are the construction of 150 kV High Voltage Overhead Lines and 150 kV Substations on Tanjung Selor – Tidang Pale – Malinau route in North Kalimantan. This study aims to analyze the impact of the investment in this project on regional economic growth and its influence on other industrial sectors. The analysis measures direct, indirect, and multiplier effects, as well as linkage analysis using the Leontief Input-Output method based on transaction data from 52 industrial sectors. Research findings indicate that the investment allocated for the project's generated a multiplier effect of 2.623, derived from both direct and indirect impacts which represent the highest value among all sectors. Backward and forward linkage indices analysis both result value greater than 1, indicates the electricity sector is a leading sector that capable to driving economic growth across other sectors in the province.

***Keywords*—Electricity infrastructure, investment, economic impact, input-output analysis, economic growth.**

I*ntisari*—Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan khususnya di daerah dengan sistem kelistrikan yang masih terisolasi dengan suplai listrik terbatas sangat diperlukan untuk mendukung perkembangan ekonomi, industri dan kesejahteraan masyarakat. Pemerintah melalui PT PLN (Persero) mengalokasikan anggaran yang cukup besar untuk investasi di sektor ketenagalistrikan. Selain kajian finansial yang akurat, diperlukan juga analisis dampak keekonomian dari investasi tersebut. Salah satu proyek yang dilaksanakan PT PLN (Persero) adalah pembangunan Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dan Gardu Induk 150 kV pada jalur Tanjung Selor – Tidang Pale - Malinau di Provinsi Kalimantan Utara. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak investasi proyek tersebut terhadap pertumbuhan ekonomi wilayah dan pengaruhnya terhadap sektor industri lainnya melalui pengukuran parameter dampak langsung, dampak tidak langsung, dampak pengganda dan analisis keterikatan menggunakan metode Input-Output Leontief berdasarkan data transaksi 52 sektor industri di Provinsi Kalimantan Utara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa investasi yang dikeluarkan untuk pembangunan proyek tersebut menghasilkan efek pengganda sebesar 2,623 dari dampak langsung dan tidak langsung yang terjadi dan menjadi yang tertinggi dibanding sektor lainnya. Analisis indeks keterikatan ke belakang dan ke depan bernilai > 1, menunjukkan bahwa sektor ketenagalistrikan merupakan sektor unggulan yang dapat mendorong pertumbuhan ekonomi pada sektor-sektor lain di Provinsi Kalimantan Utara.

***Kata Kunci*—Infrastruktur ketenagalistrikan, investasi, dampak ekonomi, analisis input-output, pertumbuhan ekonomi.**

I. PENDAHULUAN

Sebagai Provinsi yang baru terbentuk di tahun 2012, Provinsi Kalimantan Utara terus berbenah meningkatkan perekonomian di semua sektor, yang berdampak langsung pada tingginya permintaan kebutuhan listrik. Sampai dengan akhir tahun 2025 suplai kebutuhan listrik di Kalimantan Utara masih didominasi oleh sistem yang terisolasi, yaitu sistem kelistrikan yang berdiri sendiri dan belum terhubung dengan sistem kelistrikan di daerah lain. Pada beberapa daerah yang terisolasi, kurangnya akses untuk mendapatkan listrik terbukti menghambat perkembangan pada berbagai sektor penggerak utama dalam perekonomian daerah tersebut [1].

Pemerintah Indonesia melalui PT PLN (Persero) melakukan langkah strategis untuk pengembangan sistem kelistrikan di Kalimantan dengan menghubungkan seluruh sistem kelistrikan di wilayah Kalimantan Utara dan sekaligus terhubung dengan sistem kelistrikan di wilayah Kalimantan Timur dan Kalimantan Selatan melalui jaringan transmisi Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV yang dikenal dengan nama Jaringan Interkoneksi Kalimantan [2].

PT PLN (Persero) mengalokasikan anggaran yang cukup besar setiap periodenya untuk investasi infrastruktur ketenagalistrikan. Terdapat infrastruktur yang perhitungan finansial proyeknya positif tetapi ada juga infrastruktur yang secara operasional tidak dapat mengembalikan besarnya biaya investasi yang telah dikeluarkan sehingga pelaksanaannya dilakukan melalui penugasan dari Pemerintah kepada Badan Usaha Milik Negara untuk pemenuhan kewajiban pelayanan publik atau *Public Service Obligation* (PSO) yang disertai dengan dukungan finansial melalui kebijakan subsidi. Pemberian subsidi terhadap proyek infrastruktur, salah satunya harus memperhitungkan dampak dari hadirnya proyek tersebut terhadap sistem perekonomian [3].

Penelitian ini bertujuan untuk mengukur dan menganalisis seberapa besar pengaruh investasi infrastruktur ketenagalistrikan terhadap sisi eksternal

Perusahaan dan bagaimana pengaruh investasi tersebut terhadap sektor-sektor lain dalam sistem perekonomian.

Penelitian ini menghadirkan kebaharuan dalam pengembangan analisis terkait dampak suatu investasi terhadap kondisi perekonomian suatu wilayah melalui penggunaan data investasi yang aktual dan analisis pada satu kategori sektor serta lokasi yang spesifik yaitu pada level Provinsi Kalimantan Utara, sehingga dapat diperoleh hasil yang lebih akurat dan tajam dibandingkan dengan analisis pada tingkat Nasional. Selain itu, penelitian ini juga dapat digunakan sebagai salah satu alat analisis pendukung kajian keekonomian dalam penyusunan dokumen Kajian Kelayakan Proyek.

Analisis dilakukan dengan menggunakan metode analisis Input–Output Leontief, yaitu metode yang digunakan untuk melihat keterkaitan antara suatu sektor produksi dengan sektor produksi lainnya dalam suatu perekonomian dalam periode waktu tertentu [4]. Data input-ouput mengacu pada data transaksi antarsektor yang dikeluarkan oleh Badan Pusat Statistik Provinsi Kalimantan Utara untuk 52 sektor industri.

II. LANDASAN TEORI

Infrastruktur ketenagalistrikan secara umum terdiri dari pembangkit, transmisi, gardu induk dan sistem distribusi. Pembangkit listrik adalah fasilitas atau sistem yang menghasilkan energi listrik dengan mengubah energi primer menjadi energi listrik. Pembangkit listrik umumnya diklasifikasikan menurut jenis energi primernya [5].

Jaringan transmisi digunakan untuk menyalurkan energi listrik dari pembangkit ke gardu induk atau dari gardu induk ke gardu induk lainnya. Jaringan transmisi dapat berupa kabel atau kawat penghantar (konduktor) yang dipasang melalui saluran udara, tertanam di dalam tanah ataupun di bawah laut/sungai. Pemakaian konduktor untuk jaringan transmisi pada umumnya lebih banyak digunakan karena nilai investasinya yang ekonomis dan keunggulannya dalam hal kemudahan untuk melakukan perubahan desain maupun rute yang dilalui dibanding dengan menggunakan kabel.

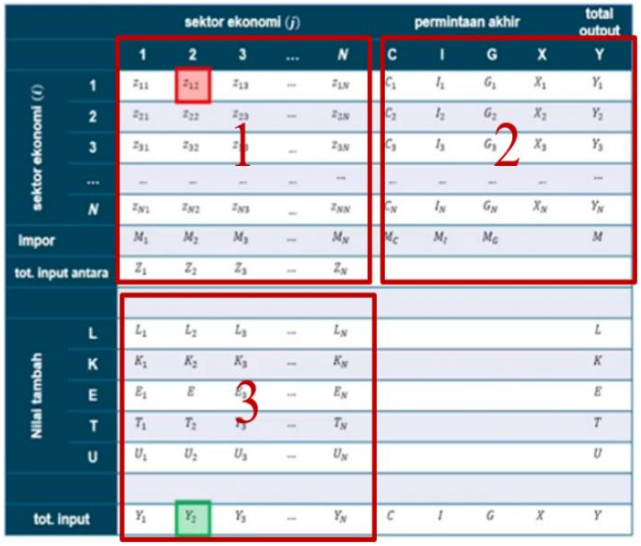
Tabel I
Klasifikasi Jaringan Transmisi Saluran Udara Menurut Tegangan Nominal Operasi

Jenis	Tegangan Nominal
Saluran Udata Tegangan Tinggi (SUTT)	35 kV – 230 kV
Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET)	> 230 kV
Saluran Udara Tegangan Tinggi Arus Searah (SUTTAS)	250 kV dan 500 kV

Sumber: Permen ESDM 13, 2025

Perhitungan keekonomian pada investasi infrastruktur ketenagalistrikan dilakukan dengan analisis *Input-Output* (IO) yang dikembangkan oleh Profesor Wassily Leontief. Menurut Leontief [6] transaksi individual itu seperti atom dan molekul individual, terlalu banyak untuk diamati dan dijelaskan secara rinci. Tetapi dimungkinkan, seperti halnya partikel fisik, untuk mengurangi jumlah transaksi tersebut menjadi suatu tatanan dengan mengklasifikasikan dan menggabungkannya ke dalam kelompok-kelompok. Model IO Leontief dibangun dari data ekonomi yang diamati untuk wilayah geografis tertentu (negara, provinsi, kabupaten, dll.). Model ini memperhatikan aktivitas sekelompok industri yang memproduksi barang (output) dan mengonsumsi barang dari industri lain (input) dalam proses memproduksi output masing-masing industri.

Informasi fundamental yang digunakan dalam analisis IO berkaitan dengan arus produk dari setiap sektor industri, yang dianggap sebagai produsen, ke masing-masing sektor itu sendiri dan sektor lainnya, yang dianggap sebagai konsumen. Informasi dasar yang menjadi dasar pengembangan model IO ini dituangkan dalam tabel transaksi antar industri yang disebut tabel IO [4].



Gambar 1. Struktur Tabel Input-Output

Tabel IO pada dasarnya terdiri atas beberapa tabel yang dituangkan dalam suatu sistem kuadran. Kuadran pertama memuat arus transaksi antar sektor, pada kuadran pertama inilah terlihat transaksi input dan output dari suatu sektor yaitu hubungan antara suplai dan permintaan yang terjadi antarsektor. Kuadran kedua merupakan permintaan akhir dan output total yang dirinci menurut sektor, kuadran ketiga memuat informasi input primer yang dipergunakan maupun output yang dihasilkan masing-masing sektor, kuadran keempat berisi jumlah input primer yang juga merupakan jumlah permintaan akhir dan output total [7], [8]. Kuadran keempat ini biasanya jarang ditunjukkan dalam tabel IO.

Model IO Leontief yang dituangkan dalam Tabel IO memiliki beberapa asumsi dasar dalam penyusunannya yaitu homogen (keseragaman), setiap sektor ekonomi hanya memproduksi satu jenis barang dan jasa dengan input tunggal (seragam) dan tidak ada substitusi otomatis terhadap input dari output sektor yang lain. Proporsional (kesebandingan), hubungan antara input dan output setiap sektor mengikuti fungsi linier. Artinya, perubahan output suatu sektor akan sebanding dengan perubahan pada input sektor tersebut. Penjumlahan, total efek dari kegiatan produksi di berbagai sektor merupakan penjumlahan dari efek kegiatan masing-masing sektor terpisah. Interdependensi, setiap sektor tidak berdiri sendiri dan memiliki keterkaitan, hasil produksi dari suatu sektor dapat dipakai oleh sektor lainnya.

Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa output adalah penjumlahan dari transaksi input antara dan permintaan akhir yang dapat disajikan dalam bentuk persamaan

$$z_{n1} + z_{n2} + \cdots + z_{nn} + F_n = Y_n \quad \text{.....(1)}$$

Nilai koefisien teknis dari masing-masing sektor diperoleh dengan persamaan berikut

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{Y_j} \quad \text{.....(2)}$$

Subsitusi persamaan (2) ke dalam persamaan (1) diperoleh persamaan baru sebagai berikut

$$a_{11}Y_1 + a_{12}Y_2 + \cdots + a_{1n}Y_n + F_1 = Y_1$$
$$a_{21}Y_1 + a_{22}Y_2 + \cdots + a_{2n}Y_n + F_2 = Y_2$$
$$a_{n1}Y_1 + a_{n2}Y_2 + \cdots + a_{nn}Y_n + F_n = Y_n$$

Jika dituliskan dalam bentuk matriks, diperoleh matriks sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}$$

Penyederhanaan matriks dalam bentuk persamaan menjadi:

$$AY + F = Y$$

Atau

$$F = Y(I - A)$$
$$Y = (I - A)^{-1}F \quad \text{.....(3)}$$

Dengan penjelasan matriks sebagai berikut:

A : Matriks koefisien teknis
Y : Matriks jumlah input/output
F : Matriks permintaan akhir
I : Matriks identitas
(I – A) : Matriks Leontief
$(I – A)^{-1}$: Matriks kebalikan Leontief

Matriks $(I-A)^{-1}$ atau matriks kebalikan Leontief inilah yang menunjukkan seberapa besar kenaikan output di sektor *i* jika ada kenaikan satu unit permintaan akhir di sektor *j*. Matriks ini disebut juga sebagai matriks pengganda.

Persamaan (3) selanjutnya dapat digunakan untuk menganalisis struktur ekonomi terkait dampak langsung (*direct effect*) dan dampak tidak langsung (*indirect effect*) dari suatu investasi. Dampak langsung menjelaskan perubahan pada suatu industri akibat perubahan permintaan akhir pada industri tersebut. Dampak langsung merupakan dampak yang pertama kali diterima ketika terjadi perubahan permintaan akhir dan efeknya hanya terjadi terhadap sektor yang secara langsung mendapatkan gangguan atau perubahan terhadap permintaan akhir tersebut [9]. Sedangkan dampak tidak langsung menjelaskan perubahan *output* dari industri tersebut dan industri-industri lainnya akibat adanya perubahan permintaan akhir [10]. Nilai dampak langsung dari setiap industri ditunjukkan oleh nilai baris pada matriks perubahan permintaan akhir, sedangkan dampak tidak langsungnya di representasikan oleh nilai dalam kolom matriks perubahan *output* (disebut sebagai total dampak) dikurangi dengan nilai dampak langsungnya.

Pada matriks kebalikan Leontief dapat diperoleh juga nilai keterkaitan dari dua sisi, yaitu sisi permintaan atau *Backward Linkage* (BL) dan sisi penawaran atau *Forward Linkage* (FL). *Backward Linkage* atau keterkaitan ke belakang menggambarkan derajat ketergantungan suatu sektor terhadap sektor-sektor di hulu dalam struktur produksi [4]. Sedangkan *Forward Linkage* didefinisikan sebagai keterkaitan ke depan yang menggambarkan sensitivitas suatu sektor dalam mendorong aktivitas produksi di sektor-sektor hilir [11]. Secara sederhana keterkaitan ke belakang dapat dipahami sebagai fokus pada sisi permintaan atau seberapa besar suatu sektor tertentu mampu "belanja" ke sektor lain. Sedangkan keterkaitan ke depan berfokus pada sisi penawaran atau seberapa besar suatu sektor tertentu dapat "melayani" kebutuhan produksi sektor lain.

Backward Linkage : $$BL_j = \sum_{i=1}^{n} b_{ij}$$

Index Backward Linkage : $$IBL_j = n.\frac{\sum_{i=1}^{n} b_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}.\sum_{j=1}^{n} b_{ij}}$$

Forward Linkage : $$FL_i = \sum_{j=1}^{n} b_{ij}$$

Index Forward Linkage : $$IFL_i = n.\frac{\sum_{j=1}^{n} b_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}.\sum_{j=1}^{n} b_{ij}}$$

BLj : *backward linkage*, jumlah kolom pada matriks kebalikan Leontief untuk sektor j
IBLj : *index backward linkage*, nilai rata-rata normalisasi untuk BLj
FLi : *forward linkage*, jumlah baris pada matriks kebalikan Leontief untuk sektor i
IFLi : Indeks forward linkage, nilai rata-rata normalisasi untuk FLi
n : Jumlah seluruh sektor dalam matriks kebalikan Leontief

Indeks dampak keterikatan dapat digunakan untuk menentukan kedudukan suatu sektor dengan klasifikasi sebagai berikut [10], [11]:

Tabel II
Klasifikasi Sektor Berdasarkan Indeks Keterikatan

Nilai Indeks Keterikatan	Klasifikasi	Keterangan
IBL > 1 dan IFL > 1	Sektor Unggulan / Sektor Kunci	Merupakan penggerak utama ekonomi
IBL > 1 dan IFL < 1	Sektor Strategis	Merupakan penarik bagi sektor penyedia di hulu

Nilai Indeks Keterikatan	Klasifikasi	Keterangan
IBL < 1 dan IFL > 1	Sektor Pendukung	Merupakan pemasok utama bagi sektor lain di hilir
IBL<1 dan IFL<1	Bukan Sektor Prioritas/ Sektor terisolasi	Sektor dengan pengaruh sangat kecil

III. METODE PENELITIAN

Desain penelitian menggunakan metode kuantitatif terapan dengan desain studi kasus berdasarkan analisis *input-output* yang terjadi dalam skema transaksi antarsektor. Analisis *input–output* Leontief digunakan untuk menghitung dampak keekonomian dari suatu investasi pada sektor tertentu. Penelitian ini termasuk kategori terapan (*applied research*) karena diarahkan untuk dapat dimanfaatkan secara praktis dalam proses perencanaan dan evaluasi investasi suatu proyek.

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh proyek infrastruktur ketenagalistrikan di Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara yang dibangun oleh PLN yang terdiri dari proyek Pembangkit, Gardu Induk dan Jaringan Transmisi yang memiliki data teknis dan finansial terdokumentasi. Adapun sampel penelitian merupakan bagian dari populasi tersebut yang dipilih dengan teknik pengambilan sampel berdasarkan pertimbangan tertentu yang mencakup ketersediaan dan kelengkapan data historis biaya investasi proyeknya, dilakukan terhadap beberapa proyek Gardu Induk 150 kV dan Transmisi 150 kV yang terkontrak dan dalam tahap penyelesaian pekerjaan dan lokasinya berada di wilayah administratif Kalimantan Utara.

Teknik analisis kuantitatif dilakukan dengan menggunakan data transaksi antarsektor pada 52 industri berdasarkan data terbaru di provinsi Kalimantan Utara saat ini yang dikeluarkan oleh BPS untuk tahun anggaran 2021 [12]. Data tersebut selanjutnya dikembangkan ke dalam beberapa tahapan perhitungan berbasis matriks menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel hingga terbentuk matriks kebalikan Leontief. Matriks kebalikan Leontief inilah yang digunakan untuk melakukan analisis injeksi investasi.

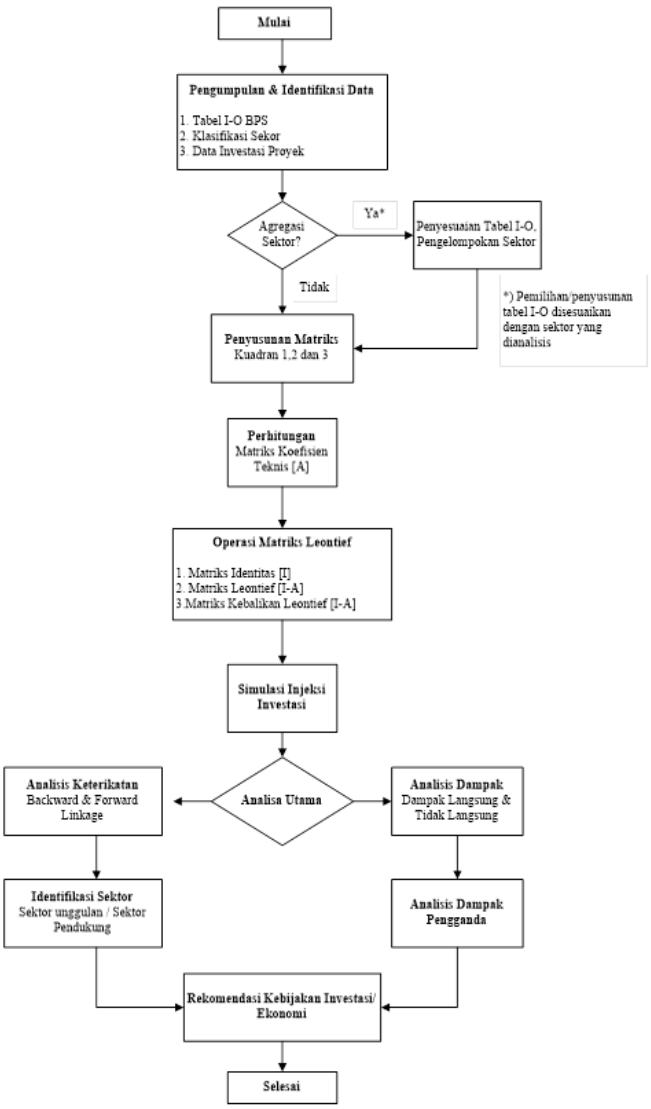
Tabel III
Daftar 52 Sektor Industri

Kode	Nama Sektor	Kode	Nama Sektor
I-01	Pertanian Tanaman Pangan	I-28	Ketenagalistrikan
I-02	Pertanian Tanaman Hortikultura Semusim, Hortikultura Tahunan, dan Lainnya	I-29	Pengadaan Gas dan Produksi Es
I-03	Perkebunan Semusim dan Tahunan	I-30	Pengadaan Air, Pengelolaan Sampah, Limbah, dan Daur Ulang
I-04	Peternakan	I-31	Konstruksi
I-05	Jasa Pertanian dan Perburuan	I-32	Perdagangan Mobil, Sepeda Motor dan Reparasinya
I-06	Kehutanan dan Penebangan Kayu	I-33	Perdagangan Besar dan Eceran, Bukan Mobil dan Sepeda Motor
I-07	Perikanan	I-34	Angkutan Rel
I-08	Pertambangan Minyak, Gas dan Panas Bumi	I-35	Angkutan Darat
I-09	Pertambangan Batubara dan Lignit	I-36	Angkutan Laut
I-10	Pertambangan Bijih Logam	I-37	Angkutan Sungai Danau dan Penyeberangan
I-11	Pertambangan dan Penggalian Lainnya	I-38	Angkutan Udara
I-12	Industri Batubara dan Pengilangan Migas	I-39	Pergudangan dan Jasa Penunjang Angkutan, Pos dan Kurir
I-13	Industri Makanan dan Minuman	I-40	Penyediaan Akomodasi
I-14	Industri Pengolahan Tembakau	I-41	Penyediaan Makan Minum
I-15	Industri Tekstil dan Pakaian Jadi	I-42	Jasa Informasi dan Komunikasi
I-16	Industri Kulit, Barang dari Kulit dan Alas Kaki	I-43	Jasa Perantara Keuangan
I-17	Industri Kayu, Barang dari Kayu dan Gabus dan Barang Anyaman dari Bambu, Rotan dan Sejenisnya	I-44	Asuransi dan Dana Pensiun
I-18	Industri Kertas dan Barang dari Kertas, Percetakan dan Reproduksi Media Rekaman	I-45	Jasa Keuangan Lainnya
I-19	Industri Kimia, Farmasi dan Obat Tradisional	I-46	Jasa Penunjang Keuangan
I-20	Industri Karet, Barang dari Karet dan Plastik	I-47	Real Estate
I-21	Industri Barang Galian bukan Logam	I-48	Jasa Perusahaan
I-22	Industri Logam Dasar	I-49	Administrasi Pemerintahan, Pertahanan dan Jaminan Sosial Wajib
I-23	Industri Barang dari Logam, Komputer, Barang Elektronik,	I-50	Jasa Pendidikan

Kode	Nama Sektor	Kode	Nama Sektor
	Optik dan Peralatan Listrik		
I-24	Industri Mesin dan Perlengkapan YTDL	I-51	Jasa Kesehatan dan Kegiatan Sosial
I-25	Industri Alat Angkutan	I-52	Jasa Lainnya
I-26	Industri Furnitur		
I-27	Industri Pengolahan Lainnya, Jasa Reparasi dan Pemasangan Mesin dan Peralatan		

Sumber: Diolah dari kaltara.bps.go.id

Desain penelitian dikembangkan dalam tahapan sistematis penelitian sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Desain Penelitian

Tahapan untuk mengubah tabel atau matriks IO menjadi matriks kebalikan Leontief mengikuti urutan sebagai berikut:

1) Penyusunan matriks koefisen teknis, Dilakukan dengan membagi setiap elemen transaksi antarsektor dalam matriks IO dengan jumlah total input pada masing-masing sektor sesuai dengan persamaan (2.2) sehingga diperoleh matriks A.
2) Penyusunan matriks [I – A] atau matriks Leontief, Pembentukan matriks ini dilakukan dengan operasi pengurangan matriks identitas [I] dengan matriks [A] berordo sama (52 x 52)
3) Penyusunan matriks kebalikan Leontief, matriks kebalikan Leontief adalah operasi inverse dari matriks [I – A] atau dituliskan sebagai $[I - A]^{-1}$

Selanjutnya dilakukan analisis terhadap dua parameter utama yaitu analisis dampak dan analisis keterikatan untuk mengetahui apakah investasi yang dikeluarkan pada sektor ketenagalistrikan memiliki dampak terhadap pertumbuhan ekonomi di Kalimantan Utara, sehingga dapat digunakan sebagai alat pendukung untuk penyusunan rekomendasi kebijakan dalam pelaksanaan investasi.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metode pemilihan sampel dengan pertimbangan tertentu yang sudah ditetapkan, diperoleh data proyek infrastruktur SUTT 150 kV dan GI 150 kV di wilayah Kalimantan Utara sebagai berikut:

Tabel IV
Rekapitulasi Data Investasi Infrastruktur Ketenagalistrikan

Proyek Infrastruktur Ketenagalistrikan	Nilai Investasi (Miliar Rupiah)
SUTT 150 kV di sepanjang Tanjung Selor - Tidang Pale - Malinau	554,9
GI 150 kV di Tanjung Selor, Tidang Pale, Malinau	188,6

Dari hasil rekapitulasi tersebut diketahui jumlah total nilai investasi sebesar 743,5 miliar rupiah. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai input utama injeksi investasi pada dalam penelitian ini.

Injeksi investasi pada dasarnya merupakan perubahan nilai pada permintaan akhir yang dilambangkan oleh matriks [ΔF], untuk memperoleh hasil pada output yang baru yang dilambangkan dengan matriks [ΔY].

$$\Delta Y = (I - A)^{-1}.\Delta F$$

Secara teknis, injeksi investasi dilakukan dengan operasi matematika berupa perkalian antara matriks kebalikan Leontief berordo (52 x 52) dengan matriks investasi berordo (52 x 1). Matriks investasi yang dimaksud adalah matriks yang terdiri dari 52 baris dan 1 kolom, dengan nilai elemen pada setiap barisnya merupakan representasi sektor yang mendapatkan injeksi investasi. Karena penelitian ini dilakukan terhadap sektor ketenagalistrikan, maka nilai injeksi investasi yang digunakan adalah nilai total investasi infrastruktur SUTT 150 kV dan GI 150 kV yang telah dihitung sebelumnya dan ditempatkan pada kode sektor 28 (baris ke-28) matriks investasi sesuai dengan urutan kode klasifikasi. Sementara untuk nilai elemen sektor lainnya semuanya bernilai nol.

Nilai hasil perkalian pada matriks [ΔY] merupakan informasi utama untuk menganalisis dampak injeksi investasi sektor ketenagalistrikan terhadap seluruh parameter ekonomi yang diteliti, termasuk di dalamnya adalah dampak langsung, dampak tidak langsung dan efek pengganda yang dihasilkan.

Dampak langsung atau dampak yang pertamakali terjadi sebagai akibat dari respon pemenuhan permintaan akhir pada sektor ketenagalistrikan, secara teknis adalah nilai dari injeksi investasi itu sendiri. Pada penelitian ini dampak langsung yang terjadi terhadap perekonomian di Provinsi Kalimantan Utara melalui perubahan permintaan akhir pada sektor ketenagalistrikan adalah 743,5 miliar rupiah.

Selanjutnya dampak tidak langsung atau dampak lanjutan akibat adanya injeksi investasi pada sektor ketenagalistrikan akan terjadi pada sektor-sektor industri lain dan pada sektor ketenagalistrikan itu sendiri. Perhitungan dengan metode Leontief menitikberatkan terhadap perubahan pada permintaan akhir, sehingga dampak lanjutan yang dihitung pada matriks output adalah dampak yang terjadi pada sektor-sektor di sisi hulu yang berperan memberi input bahan baku untuk sektor ketenagalistrikan. Karena jumlah sektor yang dipengaruhi lebih banyak, maka dampak tidak langsung jumlahnya lebih besar dari dampak langsung.

Tabel V
Nilai Dampak Tidak Langsung Akibat Injeksi Investasi pada Sektor Ketenagalistrikan

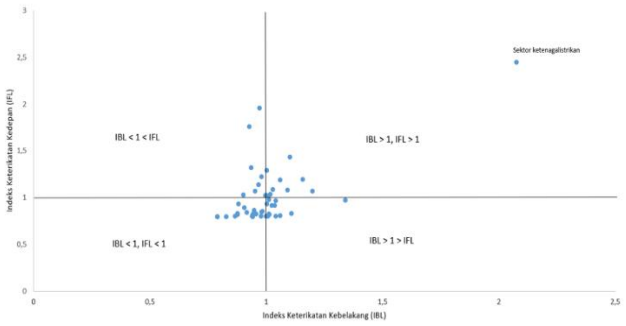
Kode Sektor	Dampak Tidak Langsung (Rupiah)	Kode Sektor	Dampak Tidak Langsung (Rupiah)
I-01	213.181.622	I-28	735.207.838.658
I-02	112.500.457	I-29	84.582.862
I-03	1.227.058.495	I-30	184.305.475
I-04	257.280.736	I-31	5.412.805.658
I-05	15.132.691	I-32	2.581.990.539
I-06	561.900.075	I-33	20.966.729.080
I-07	2.811.506.598	I-34	-
I-08	290.748.853.053	I-35	3.978.898.364
I-09	58.896.880	I-36	4.997.922.454
I-10	-	I-37	2.306.444.419
I-11	735.589.300	I-38	8.794.079.274
I-12	-	I-39	2.115.000.021
I-13	10.184.702.535	I-40	753.201.163
I-14	-	I-41	7.752.135.135
I-15	602.412	I-42	3.944.999.698
I-16	3.972.532	I-43	17.767.512.779
I-17	790.368.928	I-44	387.604.026
I-18	261.138.462	I-45	9.316.358.563
I-19	24.906.941	I-46	3.112.863.482
I-20	6.756.971	I-47	1.248.827.540
I-21	124.265.431	I-48	50.102.128.920
I-22	-	I-49	6.049.686.161
I-23	915.204.324	I-50	707.869.148
I-24	14.129.059	I-51	133.428.821
I-25	6.482.162.689	I-52	3.193.227.977
I-26	15.050.734		
I-27	793.517.653		

Jumlah keseluruhan dari dampak tidak langsung yang terjadi adalah sebesar 1.207, 45 miliar rupiah. Sehingga diperoleh total dampak keekonomian akibat adanya injeksi investasi pada sektor ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Utara sebesar 1,95 triliun rupiah yang merupakan penjumlahan dampak langsung dan dampak tidak langsung yang terjadi.

Dampak pengganda atau *multiplier effect* yang ditimbulkan adalah sebesar 2,62, dihitung dengan membandingkan total dampak dengan nilai investasi yang dikeluarkan. Nilai tersebut merepresentasikan besarnya faktor pengali yang dimiliki oleh sektor ketenagalistrikan, yang berarti bahwa setiap 1 rupiah yang di investasikan pada sektor ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Utara, akan bermultiplikasi menjadi 2,62 rupiah melalui mekanisme transaksi antarsektor.

Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa injeksi investasi sebesar 743,5 miliar rupiah yang dilakukan oleh PLN pada sektor ketenagalistrikan memberikan dampak yang positif terhadap perekonomian regional di Provinsi Kalimantan Utara. Dari daftar 52 sektor industri yang dianalisis, terdapat 47 sektor yang tercatat mendapatkan dampak tidak langsung berupa kenaikan transaksi ekonomi yang nilainya mencapai 1,20 triliun rupiah. Sementara 5 sektor yang tidak tercatat dampaknya adalah sektor-sektor yang kegiatan industrinya belum ada di Provinsi Kalimantan Utara.

Hasil dari analisis keterikatan diperoleh nilai IBL dan IFL sebesar 2,07 dan 2,44 nilai tersebut merupakan yang tertinggi dibanding sektor-sektor lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sektor ketenagalistrikan merupakan sektor unggulan atau sektor kunci yang menjadi penggerak utama dalam sistem perekonomian di Provinsi Kalimantan Utara.



Gambar 3. Sebaran Indeks Keterikatan 52 Sektor Industri di Provinsi Kalimantan Utara

Berdasarkan sebaran indeks keterikatan pada gambar 3, diketahui bahwa selain sektor ketenagalistrikan, secara keseluruhan terdapat 11 sektor yang memiliki nilai IBL>1 dan IFL>1 yang merupakan sektor unggulan atau sektor kunci yang menjadi penggerak utama ekonomi karena memiliki kemampuan ganda yaitu sebagai penarik bagi sektor di sisi hulu sekaligus sebagai pemasok ke sektor di sisi hilir. Kemudian terdapat 12 sektor dengan nilai IBL>1 dan IFL<1 yang tergolong sebagai sektor strategis, 8 sektor dengan nilai IBL<1 dan IFL>1 yang tergolong sebagai sektor pendukung dan 21 sektor dengan nilai IBL<1 dan IFL<1 yang masih tergolong sektor terisolasi.

Tabel VI
Rekapitulasi Nilai dan Indeks Keterikatan 52 Sektor Industri Provinsi Kalimantan Utara

Kode Sektor	BL	IBL	FL	IFL
I-01	1,112733	0,879826	1,169637	0,924819
I-02	1,107459	0,875656	1,027062	0,812087
I-03	1,285848	1,016706	1,302762	1,030080
I-04	1,159501	0,916804	1,056115	0,835059
I-05	1,108270	0,876297	1,048042	0,828675
I-06	1,173433	0,927821	2,216306	1,752409
I-07	1,182485	0,934978	1,660880	1,313239
I-08	1,267826	1,002456	1,624863	1,284761
I-09	1,273343	1,006818	1,005875	0,795334
I-10	1,046879	0,827755	1,000000	0,790689
I-11	1,145543	0,905768	1,121077	0,886423
I-12	1,000000	0,790689	1,000000	0,790689
I-13	1,394225	1,102399	1,804871	1,427091
I-14	1,000000	0,790689	1,000000	0,790689
I-15	1,190580	0,941378	1,000191	0,790840
I-16	1,264170	0,999565	1,002133	0,792375
I-17	1,517324	1,199731	1,345731	1,064055
I-18	1,244556	0,984057	1,067578	0,844122
I-19	1,317049	1,041376	1,005048	0,794680
I-20	1,096483	0,866977	1,003650	0,793575
I-21	1,401234	1,107940	1,046255	0,827262
I-22	1,000000	0,790689	1,000000	0,790689
I-23	1,210986	0,957513	1,043396	0,825002
I-24	1,187559	0,938990	1,002005	0,792274
I-25	1,265337	1,000488	1,284065	1,015296
I-26	1,237048	0,978121	1,006584	0,795895
I-27	1,199895	0,948744	1,082670	0,856056
I-28	2,623788	2,074600	3,087765	2,441462
I-29	1,695743	1,340806	1,224044	0,967838
I-30	1,192344	0,942773	1,026220	0,811421
I-31	1,240285	0,980680	1,539938	1,217612
I-32	1,294571	1,023603	1,148103	0,907793
I-33	1,227506	0,970575	2,470975	1,953773
I-34	1,000000	0,790689	1,000000	0,790689
I-35	1,300202	1,028055	1,369069	1,082508
I-36	1,462360	1,156272	1,506522	1,191191
I-37	1,269644	1,003893	1,169602	0,924791
I-38	1,205481	0,953161	1,343197	1,062051
I-39	1,277635	1,010212	1,281659	1,013394
I-40	1,282340	1,013932	1,030298	0,814645
I-41	1,379181	1,090503	1,359702	1,075101
I-42	1,277980	1,010485	1,234948	0,976460
I-43	1,140285	0,901610	1,296362	1,025019
I-44	1,280193	1,012234	1,038885	0,821435
I-45	1,259509	0,995880	1,284475	1,015620
I-46	1,315414	1,040084	1,212066	0,958367
I-47	1,198080	0,947308	1,059196	0,837495
I-48	1,222563	0,966667	1,433756	1,133655
I-49	1,310640	1,036309	1,150969	0,910059
I-50	1,238950	0,979625	1,061715	0,839487
I-51	1,339948	1,059482	1,013880	0,801664
I-52	1,341022	1,060331	1,495285	1,182306

Nilai keterikatan ke belakang (BL) dan indeks daya penyebaran (IBL) yang tinggi menunjukkan bahwa sektor ketenagalistrikan memiliki kemampuan yang sangat besar dalam mempengaruhi sektor-sektor lain di sisi hulu. Adanya perubahan permintaan akhir pada sektor ketenagalistrikan akan memicu kenaikan produksi pada sektor-sektor lain di sisi hulu untuk memenuhi kebutuhan permintaan sektor ketenagalistrikan. Kenaikan produksi pada sektor-sektor tersebut menciptakan peningkatan transaksi dalam matriks IO antarsektor sedemikian rupa sehingga terjadi efek multiplikasi yang nilainya mencapai 2,623 kali dari besarnya investasi yang dikeluarkan pada sektor ketenagalistrikan.

Meskipun analisis model Leontief digunakan untuk mendapatkan matriks kebalikan Leontief atau matriks pengganda, tetapi informasi tentang nilai keterikatan ke depan (FL) dan indeks derajat kepekaan (IFL) juga terindikasi dalam analisis tersebut. Hanya saja model Leontief tidak dapat menunjukkan lebih rinci sektor-sektor mana saja yang akan memanfaatkan produk dari sektor ketenagalistrikan dan berapa jumlah transaksi masing-masing sektor yang akan memanfaatkan produk tersebut.

Hasil analisis seluruh parameter menunjukkan sektor ketenagalistrikan secara konsisten selalu unggul pada masing-masing kategori dibandingkan dengan sektor lainnya. Kondisi tersebut membuktikan bahwa saat ini sektor ketenagalistrikan merupakan sektor kunci utama dalam menggerakkan aktivitas ekonomi sehingga dapat dijadikan salah satu prioritas oleh Pemerintah pusat dan Pemerintah Provinsi Kalimantan Utara dalam upaya untuk mempercepat pertumbuhan perekonomian wilayah.

Sementara itu, masih banyaknya sektor industri yang masuk kedalam kelompok sektor terisolasi, antara lain disebabkan oleh belum terbentuknya rantai pasok lokal dalam Provinsi Kalimantan Utara karena statusnya yang merupakan Provinsi yang baru berdiri, sehingga masih banyak sektor-sektor industri yang ekosistemnya baru mulai terbentuk, akibatnya sebagian besar kebutuhan masih mengandalkan pasokan dari luar wilayah. Karena transaksi antarsektor yang terjadi dalam wilayah sangat minim, maka sektor dalam kelompok terisolasi ini memiliki hubungan ketergantungan yang kecil dengan sektor-sektor lain. Di satu sisi ini membuat sektor-sektor kelompok ini mampu bertahan jika terjadi krisis atau gangguan dalam rantai pasok, tetapi dalam konteks peningkatan pertumbuhan ekonomi, sektor-sektor tersebut perlu didorong agar dapat keluar dari kelompok terisolasi. Karena itu peran sektor ketenagalistrikan menjadi sangat vital dalam mengembangkan sektor industri lainnya yang masih tergolong ke dalam sektor terisolasi tersebut agar dapat berkembang menjadi sektor pendukung, sektor strategis atau bahkan menjadi sektor unggulan yang baru

seiring dengan semakin pesatnya pertumbuhan ekonomi wilayah

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, investasi PLN yang diasumsikan sebagai perubahan permintaan akhir pada sektor ketenagalistrikan untuk pembangunan infrastruktur GI 150 kV dan SUTT 150 kV di Provinsi Kalimantan Utara menghasilkan total dampak sebesar 1,95 triliun rupiah, yang terbagi kedalam dampak langsung sebesar 743,5 miliar rupiah dan dampak tidak langsung sebesar 1,20 triliun rupiah. Investasi tersebut memiliki pengaruh besar bagi sektor-sektor industri lain, yang ditunjukkkan oleh sebaran dampak tidak langsung yang terjadi pada hampir seluruh sektor industri yang ada di Provinsi Kalimantan Utara. Efek pengganda (*multiplier effects*) sektor ketenagalistrikan adalah yang tertinggi dibanding sektor lainnya dengan nilai 2,623, menunjukkan bahwa setiap 1 rupiah yang di investasikan pada sektor ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Utara, akan bermultiplikasi menjadi 2,623 rupiah melalui mekanisme transaksi antarsektor. Nilai IBL dan IFL yang lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa sektor ketenagalistrikan merupakan sektor unggulan atau sektor kunci yang memiliki pengaruh baik di sisi hulu maupun di sisi hilir yang berkontribusi besar untuk pertumbuhan ekonomi wilayah di Provinsi Kalimantan Utara. Investasi pada sektor ketenagalistrikan memiliki peran yang sangat vital dalam rantai pasok perekonomian lokal Provinsi Kalimantan Utara. Karena itu sektor ketenagalistrikan dapat dijadikan salah satu prioritas oleh Pemerintah Provinsi dalam upaya percepatan pertumbuhan ekonomi wilayah.

REFERENSI

[1] Sansuadi, “Evaluasi Ketimpangan Pembangunan Infrastruktur Ketenegalistrikan di Indonesia: Dampak dan Upaya Pemerataan Akses Energi,” Journal of Innovation Research and Knowledge, 2025.

[2] K. ESDM, Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2025-2034, Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, 2025.

[3] T. W. Adi, “Influence of fuel price, electricity price, fuel consumption on operating cost, generation and operating income: a case study on PLN,” International Journal of Energy Sector Management, 2022.

[4] R. E. Miller dan P. D. Blair, Input-output analysis: Foundations and extensions (3rd ed.), Cambridge University Press, 2021.

[5] T. W. Adi, Pwenary dan E. Prabowo, “Nuclear Energy Generation, Fossil Fuel Price, Energy Mix Generation, Economic Growth, FDI Inflow and CO2 Emission:ACase Study on Developed and Developing Countries in the Asia Pacific Region,” International Journal of Energy Economics and Policy, 2023.

[6] W. W. Leontief, “Input-Output Economics,” Scientific American, p. vol. 185 No. 4, 1951.

[7] J. Oosterhaven, “Rethinking Input-Output Analysis: A Spatial Perspective,” Springer Nature, 2019.

[8] M. Djojodipuro dan S. Sudigno, Tabel Input-Output Regional: Kegunaan dan Cara Penyusunannya, EKI, 1987.

[9] K. F. UI, “DatAcademy Series,” 25 June 2023. [Online]. Available: http://www.youtube.com/@kanopifebui1782.

[10] Y. D. Nugroho, “Analisis Dampak Keterikatan dan Pengganda sebagai Identifikasi Lever Sector (Pendekatan Tabel Input-Output 2020 estimasi),” 2021.

[11] A. O. Hirshman, The Strategy of Economic Develeopment, Yale University Press, 1958.

[12] B. P. Kaltara, Tabel Input Output Provinsi Kalimantan Utara, Tanjung Selor: BPS Provinsi Kalimantan Utara, 2021

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 115-120 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ANALISIS DAN OPTIMASI DESIGN PLTS DI HYDROGEN PLANT: STUDI KASUS PLTU BANTEN 1 SURALAYA

Aditia Setiaputra[1], Marwan Rosyadi[2]

[1,2]*Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara, Jakarta, Indonesia*

[1] aditia2410728@itpln.ac.id
[2] marwanrosyadi@itpln.ac.id

Abstract*—The Indonesian government's commitment to achieving Net Zero Emissions (NZE) by 2060. PT PLN has been developing a hydrogen ecosystem through the establishment of Hydrogen Refueling Stations and the production of green hydrogen utilizing existing hydrogen plant at their power generation facilities. Current solar power plant installed in Banten 1 Suralaya CFPP is unable to fully meet the electricity demand required for green hydrogen production. The existing PV system generates 37.145 MWh of electricity, whereas the annual energy demand of the hydrogen production equipment reaches 178.681 MWh. Monte Carlo simulation results indicate an energy deficit ranging 383-387 kWh per day for green hydrogen production. An added PV system was selected from several alternatives using the Analytical Hierarchy Process based on predefined criteria and alternatives. The selected location was the Maintenance Workshop area. System design and annual energy production were evaluated using PVsyst 8.0.6 simulation software. The simulation results show, added PV system can fully supply the hydrogen production equipment with NRE during the period from 09:00 AM to 03:00 PM. During these hours, PV generation exceeds the hydrogen production load demand, resulting in surplus energy that cannot be exported due to inverter operating limitations. Therefore, the integration of a Battery Energy Storage System is recommended to improve energy utilization. From techno-economic assessment shows the feasibility of the proposed project, with an initial investment cost of USD 38,704, a Net Present Value (NPV) of USD 4,077, an Internal Rate of Return (IRR) of 11.54%, and a payback period of 7 years.

***Keywords*—Green Hydrogen; Solar Power Plant; Battery Energy Storage System; Analytical Hierarchy Process; Net Present Value; Internal Rate Return; Payback Period.**

I*ntisari*—Target pemerintah untuk mencapai Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060 membuat PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) berkomitmen untuk mengembangkan sistem ketenagalistrikan berbasis Energi Baru Terbarukan (EBT). PT PLN (Persero) berupaya untuk berinovasi dalam pembangunan ekosistem hidrogen di Indonesia dengan membangun Hydrogen Refueling Station dan memproduksi Green Hydrogen dengan memanfaatkan Hydrogen Plant di lokasi pembangkit. Terdapat PLTS di PLTU Banten 1 Suralaya namun belum dapat memenuhi kebutuhan energi listrik untuk tercapainya target Green Hydrogen. Produksi PLTS yang terpasang saat ini 37,145 MWh. Kebutuhan energi listrik untuk peralatan elektrolisa air sebesar 178,681 MWh. Berdasarkan simulasi Monte Carlo terdapat defisit energi listrik untuk tujuan Green Hydrogen sebesar 383-387 KWh per hari. Lokasi Workshop Pemeliharaan dipilih sesuai hasil pemilihan lokasi dari kriteria dan alternatif yang ada dengan metode Analytical Hierarchy Process (AHP). Simulasi dilakukan dengan bantuan software PVSyst 8.0.6 untuk mendapatkan design dan perkiraan produksi energi listrik tahunan. Dari simulasi didapatkan hasil jika ditambahkan energi listrik yang dipasok dari PLTS area Workshop Pemeliharaan, peralatan produksi hidrogen dapat disuplai penuh dari energi terbarukan pada rentang waktu jam 09:00 – 15:00. Hasil produksi dari PLTS justru berlebih pada rentang waktu tersebut sehingga fenomena yang terjadi adalah inverter akan menahan energi yang akan disuplai ke grid. Direkomendasikan untuk penambahan Battery Energy Storage System (BESS). Hasil analisis ekonomi-teknik, didapatkan: Biaya Investasi Awal USD 38.704, Net Present Value USD 4.077. Internal Return Rate 11,54% dan Payback Period selama 7 Tahun.

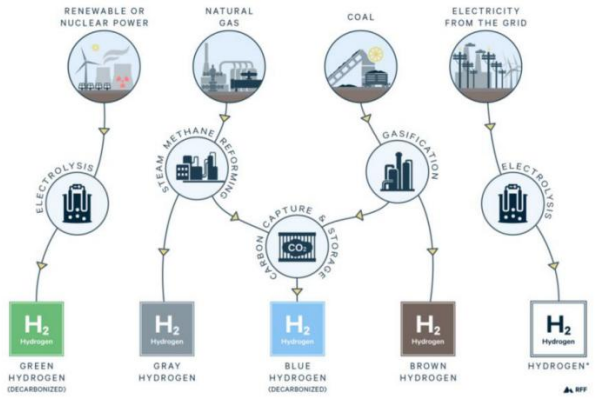
***Kata Kunci*—Green Hydrogen; Pembangkit Listrik Tenaga Surya; Battery Energy Storage System; Analytical Hierarchy Process; Net Present Value; Internal Rate Return; Payback Period.**

I. PENDAHULUAN

Sektor ketenagalistrikan menjadi salah satu sektor penting pada suatu negara. Ketahanan energi untuk sumber energi ketenagalistrikan menjadi fokus saat ini. Pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi terus meningkat setiap tahun di seluruh dunia, sehingga menjadikan pertumbuhan tingkat kebutuhan akan tenaga listrik. Sedangkan jumlah energi fosil dari tahun ke tahun semakin berkurang dan memiliki dampak yang negatif bagi lingkungan terutama iklim. Salah satu solusi untuk memenuhi kebutuhan energi dunia dan mengurangi pencemaran lingkungan adalah dengan mengganti energi fosil ke energi baru terbarukan. (Direktorat Jenderal Energi Baru, 2024). Pemerintah Republik Indonesia melalui PT. Perusahaan Listrik Negara (Persero) berkomitmen untuk mengembangkan sistem ketenagalistrikan di masa depan terutama di sisi pemangkitan energi listrik, akan mengarah kepada pengembangan pembangkit dengan teknologi yang rendah emisi dan ramah lingkungan. PLN telah melakukan simulasi Skenario NZE 2060 dengan prinsip least cost optimization. Capital expenditure (capex) untuk VRE, khususnya PLTS dan PLTB, diperkirakan akan mengalami penurunan yang cukup signifikan di masa mendatang dibandingkan harga saat ini. (PT. PLN, 2025)

Selain pengembangan pembangkit listrik berbasis renewable energy, PT PLN (Persero) berupaya untuk berinovasi dalam pembangunan ekosistem hydrogen diIndonesia secara end to end. PT PLN (Persero)

membangun Hydrogen Refueling Station (HRS) atau stasiun pengisian kendaraan hydrogen. Hydrogen merupakan langkah strategis dalam transisi energi karena kendaraan berbasis hydrogen dianggap tidak mengeluarkan emisi. Pengembangan kendaraan hydrogen diharapkan dapat berkontribusi untuk mengurangi impor BBM sebesar 1,59 juta liter/tahun dan ditargetkan dapat menurunkan emisi CO2 sebesar 4,15 juta Kg/tahun dengan asumsi 1 liter bbm RON 92 setara dengan 2,6 kg emisi CO2. Hydrogen merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan yang cocok untuk bahan bakar pada direct combustion atau digunakan pada fuel cells. (Klebanoff, et al., 2021) Hydrogen dapat dihasilkan dari berbagai macam teknologi dan material dasar yang digunakan dalam proses produksinya. (Krupnick, 2020) Berbagai proses produksi hydrogen dapat dilihat pada Gambar 1.2. Saat ini 95% hydrogen diproduksi dengan bahan bakar batubara. Sehingga dapat disebut hydrogen "abu-abu". Hidrogen "Hijau", dianggap sebagai proses produksi hydrogen yang paling ramah lingkungan karena menggunakan Renewable Energy Sources (RES) dalam proses produksinya. Terdapat beberapa penelitian tentang teknologi elektrolisa air yang digunakan untuk produksi hidrogen, diantaranya: Alkaline Water Electrolyzer; Proton Exchange Membran; Anion Exchange Membran. Penelitian tersebut memanfaatkan Analythical Hierarchy Process (AHP) sebagai tools untuk mendapatkan teknologi yang paling sesuai untuk digunakan. (S, Wijaya, & Budiman, Water Electrolysis Technology Selection for Green Hydrogen Production in Coastal Isolated Area, 2024)



Gambar 1. Teknologi untuk Produksi Hidrogen.
Sumber: (Krupnick, 2020)

(S, Wijaya, Purwanto, & Budiman, 2024) dalam penelitiannya telah memaparkan potensi dan tantangan pengembangan Green Hydrogen di Indonesia. PT. PLN (Persero) memiliki 22 hydrogen plant, terdiri dari 21 green hydrogen plant dengan produksi 199 Ton/tahun yang menggunakan sumber tenaga listrik dari Solar PV dan 1 green hydrogen plant di PLTP Kamojang yang menghasilkan 4 Ton /tahun. Total produksi hydrogen sebesar 203 Ton/tahun. Dimana 75 Ton/tahun digunakan untuk kebutuhan pada pendingin Generator dan 128 Ton/tahun digunakan untuk pengisian mobil hydrogen. Untuk mendukung hydrogen hijau maka untuk proses produksi pada hydrogen plant ditargetkan dapat menggunakan sumber tenaga listrik dari EBT dan tidak lagi menggunakan sumber tenaga listrik dari PLTU berbahan bakar batubara. Hydrogen hijau murni milik PT PLN (Persero) baru tersedia satu unit yaitu milik PLTP Kamojang dimana proses produksi dalam hydrogen plant menggunakan listrik yang dihasilkan dari panas bumi.

PLTU Banten 1 Suralaya, dengan kapasitas 1x625 MW, memiliki sebuah hydrogen plant untuk memproduksi hidrogen yang digunakan sehari-hari untuk kebutuhan pendingin generator. PLTU Banten 1 Suralaya berencana untuk berkontribusi dalam pengembangan ekosistem kendaraan listrik berbahan bakar hydrogen dengan rencana produksi sebesar 0,2 Ton/tahun. Agar tercipta ekosistem hydrogen hijau, sumber tenaga listrik yang digunakan untuk proses produksi direncanakan menggunakan sistem hybrid. Sumber tenaga listrik disuplai dari energi surya saat sumber cahaya matahari melimpah dan akan disuplai dari Unit Auxiliarry Transformer (UAT) dimalam hari atau saat panel surya tidak berproduksi. Dalam proses analisis design saat proyek pembangunan baru sebuah PLTS, salah satu bagian penting adalah analisis beban yang terhubung dengan PLTS. Hal ini untuk meminimalisir fenomena energi yang tidak termanfaatkan (*curtailed energy*) akibat dari beban yang terhubung dengan PLTS lebih rendah dari kapasitas produksi PLTS terutama jika sistem tersebut tidak terintegrasi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS). Berbeda dengan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya yang berfokus pada Hybrid Renewable System di pulau Enggano (S, Wijaya, Putra, & Budiman, 2025), penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk menganalisis dan mengoptimasi design dari PLTS serta melakukan analisis ekonomi teknik untuk penambahan PLTS di area PLTU Banten 1 Suralaya.

II. METODE PENELITIAN

A. Observasi Lapangan

PLTU Banten 1 Suralaya memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang telah terpasang pada pertengahan tahun 2023. Untuk peletakan dari panel surya diposisikan diatas daru gedung fire fighting building. Panel Surya yang digunakan di PLTU Banten 1 Suralaya adalah tipe Monocrystalline Module, produksi dari Trina Solar dengan output maksimal 575 wp. Total panel surya yang terpasang sebanyak 54 panel, dengan daya maksimum sebesar 31,050 kWp. Outputan dari panel surya masuk ke inverter untuk dirubah ke dalam tegangan AC agar dapat sinkron dengan jaringan dari Unit Auxiliary Transformer yang digunakan sebagai sumber energi listrik untuk peralatan electrolyzer pada Hydrogen Plant. Inverter yang digunakan pada sistem PLTS ini menggunakan type Huawei Sun2000 25kTL-M5. Pemasangan panel surya terletak diatas Fire Fighting House dengan menempati luasan area 25 m x 9,6 m. Jumlah panel surya terdiri dari 54 panel dengan menggunakan konfigurasi seri dan paralel dengan ujung rangkaian terhubung ke inverter.

Peralatan produksi hidrogen pada hydrogen plant yang digunakan di PLTU Banten 1 Suralaya menggunakan prinsip elektrolisa air untuk memisahkan gas hidrogen dan oksigen. Kapasitas produksi gas hidrogen sebesar 5 m3/h. Air yang digunakan adalah air demineral atau air yang sudah melalui proses pada water treatment untuk menghilangkan kandungan mineral. Parameter kunci dalam proses produksi hidrogen adalah tegangan dan arus

pada electrolyzer. Laju proses elektrolisis dalam produksi hidrogen tergantung dari besaran arus yang mengalir dalam elektroda. Sumber energi listrik pada peralatan elektrolisa air berasal dari jaringan unit auxiliary transforemer dengan sistem tiga fasa dan menggunakan empat kabel. Tegangan pada power supply tersebut dapat diatur dengan menggunakan thyristor pada water cooling.

B. Analisis Performa PLTS Terpasang

Dalam analisis performa dari PLTS dalam penelitian ini, data yang akan dilakukan analisis adalah dalam rentang waktu bulan April 2025 sampai bulan Maret 2026. Dengan 23 hari durasi waktu maintenance bersamaan dengan masa pemeliharaan dari unit pembangkit, sehingga total data dalam penelitian ini didapat 342 hari. Produksi listrik dari PLTS secara bulanan dapat dilihat pada Tabel I.

PLTS yang terpasang saat ini terhubung secara on-grid dengan sistem jaringan untuk suplai tenaga listrik pada sistem electrolyzer. Listrik yang dihasilkan dari PLTS dialirkan inverter untuk merubah dari sistem DC menjadi sistem AC agar dapat terhung dengan jaringan.

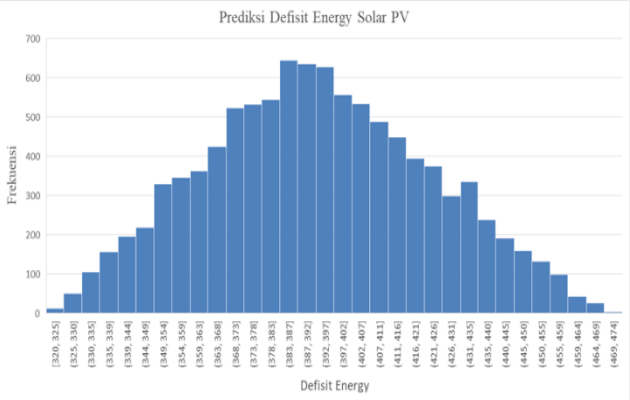
Pada peralatan electrolyzer tidak terdapat peralatan metering yang secara khusus terpasang untuk mengetahui kebutuhan energi listrik, oleh karena itu untuk perhitungan kebutuhan energi listrik dalam penelitian kali ini dilakukan perhitungan secara manual berdasarkan trending arus dan tegangan yang didapat dari data log sheet bidang operasi.

Tabel I
Produksi PLTS dan Kebutuhan Daya Electrolyzer

Bulan	Produksi (KWh)	Konsumsi Energi Listrik Electrolyzer (KWh)
Apr-25	3496,11	14533,09
May-25	3537,88	14891,64
Jun-25	3345,38	14405,98
Jul-25	3692,04	14881,31
Aug-25	4008,92	14882,03
Sep-25	3847,06	14397,46
Oct-25	3883,49	14884,97
Nov-25	2881,39	14396,19
Dec-25	2466,49	14880,76
Jan-26	2644,01	14856,81
Feb-26	2624,00	13431,21
Mar-26	719,22	3842,79
Total	37145,99	178681,70

C. Proyeksi Defisit Kebutuhan Energi Hijau

Untuk mencapai target produksi hidrogen hijau dimana pasokan energi listrik yang digunakan dalam proses produksi hidrogen berasal dari Energi Baru Terbarukan (EBT), maka dalam penelitian ini akan dianalisis kemampuan produksi dari PLTS yang terpasang dibandingkan dengan kebutuhan konsumsi energi listrik untuk peralatan electrolyzer. Selanjutnya dilakukan metode monte carlo untuk pembuatan prognosa defisit kebutuhan energi listrik untuk pengoperasian electrolyzer. Monte Carlo banyak digunakan untuk mengestimasi outputan dari metode stokastik dengan percobaan banyak iterasi. (Barutcu, Sharma, Bokoro, & Celik, 2024) Parameter utama yang akan digunakan dalam simulasi monte carlo adalah Produksi Listrik dari PLTS (KWh) dan Konsumsi Energi Listrik Electrolyzer (KWh). Percobaan dalam simulasi menggunakan 10000 kali iterasi. Dari pemodelan didapat proyeksi rata-rata desfisit kekurangan energi listrik dari sumber energi baru terbarukan untuk tercapainya program hidrogen hijau sebesar 392,70 KWh per hari. Frekuensi tertinggi berada pada rentang defisit 383-387 KWh per hari dengan lebih dari 644 kali.



Gambar 2. Proyeksi Defisit Hasil Pemodelan Monte Carlo

D. Design Penambahan PLTS

Pembuatan design untuk penambahan PLTS di Area PLTU Banten 1 Suralaya menggunakan perangkat lunak Pvsyst 8.0.6. Lokasi untuk penambahan panel surya direncanakan ada di empat lokasi. Sebelum dilakukan design penambahan PLTS dilakukan pemetaan dan pengambilan data potensi energi surya di wilayah PLTU Banten 1 Suralaya. Data yang digunakan berasal dari NASA yang terhubung dengan software Pvsyst 8.0.6. Hasil simulasi dari software PVSyst 8.0.6, produksi energi listrik untuk empat lokasi yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel II.

Tabel II
Simulasi Produksi Energi ke Grid

	Workshop Pemeliharaan (MWh)	Rooftop Boiler (MWh)	Outfall (MWh)	Administrasi Pemeliharaan (MWh)
Jan	9,62	20,53	6,427	2,831
Feb	9,02	19,81	5,882	2,731
Mar	10,64	24,26	6,668	3,345
April	9,79	23,01	5,806	3,172
Mei	9,73	23,59	5,464	3,252
Jun	9,01	22,22	4,934	3,062
Jul	9,88	24,24	5,465	3,342
Aug	10,91	26,02	6,282	3,588
Sept	11,26	25,79	6,842	3,555
Okt	10,94	24,2	7,003	3,336
Nov	9,68	20,8	6,457	2,867
Des	9,55	20,32	6,516	2,801
Total	120,04	274,79	73,748	37,882

E. Analytical Hierarchy Process (AHP)

Analytical Hierarchy Process (AHP) merupakan metode yang digunakan dalam pengambilan keputusan dari beberapa kriteria dan alternatif (Saaty, 1987) Hasil dari metode dalam penentuan kriteria yang dipakai dalam pemilihan lokasi pembangunan PLTS, yang didapat dari dua expert dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel III. Untuk hasil kombinasi pembobotan dari Expert 1 dan Expert 2, maka didapat Harga Terendah dalam biaya pembangunan sebesar 57,2% dan menjadi prioritas utama dalam kriteria pemilihan lokasi PLTS. Selanjutnya Akses Pemeliharaan memiliki pembobotan 23%, Produksi Listrik sebesar 14,9% dan Luas Area sebesar 4,9%, dengan Consistency Ratio (CR) sebesar 1,9 untuk kombinasi dari Expert 1 dan Expert 2 atau dianggap konsisten dalam pengisian pairwise comparison.

Setelah didapatkan pembobotan terhadap beberapa kriteria, selanjutnya dilakukan pembobotan terhadap beberapa alternatif lokasi yang akan dipilih dalam penelitian kali ini. Hasil pembobotan alternatif lokasi yang didapat dari para expert yang menjadi nara sumber didapatkan hasil seperti nampak pada Tabel 4. Pembobotan alternatif lokasi secara kombinasi didapatkan nilai pembobotan terbesar untuk alternatif lokasi yaitu di Workshop Pemeliharaan dengan 45%, diikuti oleh Gedung Pemeliharaan sebesar 27,5%, selanjutnya ada Rooftop Boiler sebesar 17,6% dan terakhir ada area Outfall dengan 9,9%. *Consistency Ratio* (CR) dalam pemilihan alternatif lokasi pada penelitian ini sebesar 5,0.

Tabel III
Pembobotan Kriteria Pemilihan Lokasi PLTS

Participant	Harga Terendah	Produksi Listrik	Akses Pemeliharaan	Luas Area	CRmax
Expert 1	56,7	23,6	16,1	3,6	8,7
Expert 2	51,9	8,7	32,9	6,5	8,6
Combined	57,2	14,9	23,0	4,9	1,9

Tabel IV
Pembobotan Alternatif Lokasi Penambahan PLTS

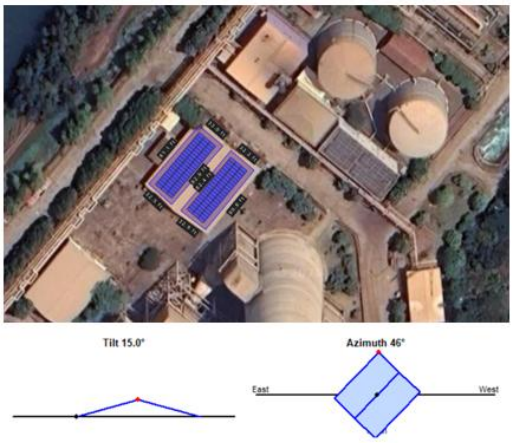
Participant	Workshop Pemeliharaan	Gedung Administrasi Pemeliharaan	Outfall	Rooftop Boiler	Crmax
Expert 1	38,6	27,5	16,3	17,5	6,8
Expert 2	51,2	26,3	6,2	16,3	8,4
Combined	45,0	27,5	9,9	17,6	5,0

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Lokasi PLTS yang dipilih adalah yang memiliki pembobotan terbesar baik secara kriteria maupun alternatif yang telah dipaparkan dalam bab sebelumnya yaitu Wokrshop Pemeliharaan. Spesifikasi dari PLTS yang akan digunakan dalam penelitian ini ada dalam Tabel V.

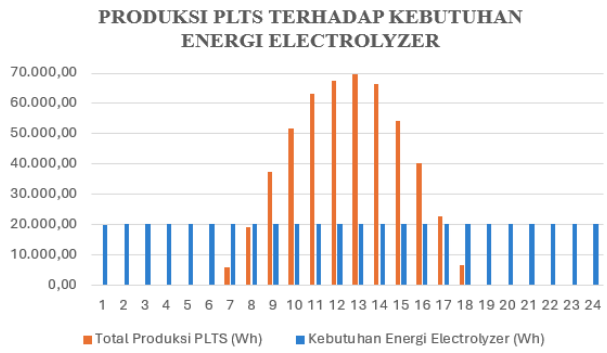
Tabel V
Spesifikasi Teknik Design PLTS Area Workshop Pemeliharaan

Spesifikasi	Parameter
PV Module	Trina Solar
Model	TSM-NEG19RC-570
Unit Nom Power (Wp)	570
Jumlah PV Modul (unit)	132
Nominal standard Test Condition (KWp)	77
Pmpp (KWp)	71.1
U mpp (Volt)	533
I mpp (Ampere)	133
Total Module Area (m2)	527
Inverter Manufacture	Huawei Technologies
Model	SUN2000-25KTL-M5-400V
Unit Nominal Power (Kwac)	25
Jumlah Inverter (Unit)	5
Total Power (KWac)	113
Operating Voltage (Volt)	200-1000
Max Power (KWac)	27,5
Pnom Ratio DC:AC	0,91



Gambar 3. Design dan Rencana Lokasi Pemabngunan PLTS. Sumber: PVSyst

Dari simulasi didapatkan hasil jika ditambahkan energi listrik yang dipasok dari PLTS area Workshop Pemeliharaan, peralatan produksi hidrogen dapat disuplai penuh dari energi terbarukan pada rentang waktu jam 09:00 – 15:00. Hasil produksi dari PLTS justru berlebih pada rentang waktu tersebut sehingga fenomena yang terjadi adalah inverter akan menahan energi yang akan disuplai ke grid. Jika pembangunan PLTS tidak dilengkapi dengan Battery Energy Storage System (BESS) akan terdapat energi yang tidak termanfaatkan. Hasil produksi total harian PLTS yang terdapat saat ini jika ditambahkan dengan hasil simulasi pemasangan PLTS baru area Workshop Pemeliharaan didapatkan total sebesar 504.726,37 KWh. Total kebutuhan energi harian peralatan electrolyzer sebesar 484.436,30 KWh, sehingga Green Hidrogen dapat dicapai jika sudah terintegrasi dengan BESS. Selama BESS belum terpasang, green hydrogen hanya dapat dicapai pada rentang waktu jam 09:00 – 15:00. Hal ini juga sesuai dengan simulasi harian dimana menurut hasil simulasi, produksi PLTS sebesar 397,43 KWh sedangkan defisit kebutuhan energi listrik untuk peralatan electrolyzer sesuai prediksi dengan metode monte carlo sebesar 383-387 KWh per hari.



Gambar 4 Simulasi Produksi PLTS Terhadap Kebutuhan Energi Electrolyzer

Dalam analisis ekonomi-teknik yang dilakukan dalam penelitian kali ini, akan dihitung biaya Investasi Awal, Net Present Value (NPV), Internal Rate Of Return (IRR), dan Payback Period. (Paradongan, et al., 2024) Perhitungan analisis ekonomi-teknik dilakukan untuk penambahan PLTS pada Area Workshop Pemeliharaan. Inputan Data Finansial dapat dilihat pada Tabel VI.

Tabel VI
Finansial Data Input

Parameter	Nilai	Sumber
Kapasitas PLTS	75,24 KWp	Simulasi PVSyst 8.0.6
Investasi Awal	514 USD/KW	PLN Indonesia Geothermal (PLN I-Geo)
Produksi Energi Tahunan	120,04 MWh	Simulasi PVSyst 8.0.6
Biaya Pokok Produksi	0,058 USD/KWh	Data PLN
Diskonto	10%	Indonesia LCOE by IESR (Reform, 2026)
Inflasi	2,92%	Badan Pusat Statistik (Statistik, 2026)
Biaya Pemeliharaan	773 USD /Tahun	Asumsi 2% dari Biaya Investasi Awal per tahun sesuai standar industri PLTS (IRENA, 2025)
Umur PLTS	20 Tahun	Asumsi

Hasil dari analisis ekonomi – teknik proyek penambahan PLTS di area Worksop Pemeliharaan dapat dinyatakan layak, dengan Biaya Investasi Awal, *Net Present Value*, *Internal Return of Rate*, dan *Payback Periode* dipaparkan pada Tabel 7. Sebagai *benchmarking,* pada penelitian yang sejenis dan dengan kapasitas yang tidak jauh berbeda, penulis menggunakan penelitian dari (Fahmi & Rarasati, 2026) dimana dalam penelitiannya membandingkan tiga lokasi yang berbeda: kantor pemerintahan dengan kapasitas 136 kWp; fasilitas pendidikan 101,68 kWp; bangunan fasilitas ibadah 163,8 kWp; mendapatkan nilai NPV >1 untuk fasilitas pendidikan dan bangunan tempat ibadah sehingga secara kajian ekonomi dapat dikategorikan layak.

Tabel VII
Analisis Ekonomi Teknik

Indikator	Nilai
Biaya Investasi Awal (USD)	38.704
NPV (USD)	4.077
IRR	11,54%
Simple Payback Period (tahun)	7,08

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan:

1) Produksi PLTS yang terpasang saat ini 37,145 MWh. Kebutuhan energi listrik untuk peralatan elektrolisa air sebesar 178,681 MWh. Berdasarkan simulasi Monte Carlo terdapat defisit energi listrik untuk tujuan Green Hydrogen sebesar 383-387 KWh per hari.
2) Berdasarkan Analytical Hierarchy Process (AHP), dari 4 kriteria dan 4 alternatif lokasi dipilih area Workshop Pemeliharaan untuk lokasi pembangunan penambahan PLTS.
3) Dari simulasi didapatkan hasil jika ditambahkan energi listrik yang dipasok dari PLTS area Workshop Pemeliharaan, peralatan produksi hidrogen dapat disuplai penuh dari energi terbarukan pada rentang waktu jam 09:00 – 15:00. Hasil produksi dari PLTS justru berlebih pada rentang waktu tersebut sehingga fenomena yang terjadi adalah *curtailed energy* atau energy justru tidak termanfaatkan karena pembangunan PLTS tidak dilengkapi dengan *Battery Energy Storage System* (BESS), sehingga integrasi

dengan BESS sangat direkomendasikan untuk studi lanjutan.

4) Hasil analisis ekonomi-teknik, didapatkan: Biaya Investasi Awal USD 38.704, Net Present Value USD 4.077. Internal Return Rate 11,54% dan Payback Period selama 7 Tahun.

Beberapa keterbatasan dalam penelitian ini, diantaranya:

1) Keterbatasan periode pengambilan data. Penelitian dilakukan selama 1 tahun sehingga kurang dapat menangkap fenomena alam yang terjadi di Indonesia seperti fenomena La Nina dan El Nino dan seberapa besar dampaknya terhadap kinerja dari PLTS.
2) AHP dalam penelitian kali ini hanya terbatas kepada 2 expert. Hal ini dapat mempengaruhi hasil dari AHP karena hasil menjadi kurang optimal dan dapat lebih cenderung kepada kepentingan masing-masing expert.

Saran dari penulis untuk penelitian berikutnya, diantaranya yaitu:

1) Dilakukan analisis sensitivitas ekonomi untuk melihat seberapa besar pengaruh dari perubahan diskonto dapat berpengaruh kepada NPV dan kelayakan proyek.
2) Dilakukan kajian mendalam tentang sizing dan keekonomian saat sistem terintegrasi dengan Battery Energy Storage System (BESS)
3) Dapat dilakukan replikasi metodologi untuk beberapa unit pembangkit lain di PLN Group untuk mendapatkan kesimpulan yang lebih tergeneralisasi.

REFERENSI

[1] Barutcu, I. C., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Celik, E. (2024). Application of Monte Carlo simulation and stochastic fractional search algorithm for solar PV placement considering diverse solar radiations. *Energy Reports*. doi:https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.12.070

[2] Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan. (2024). LAPORAN KINERJA DITJEN EBTKE 2024.

[3] Fahmi, A., & Rarasati, A. D. (2026). Rooftop photovoltaic in public buildings: Technical and financial evidence from multi-year operational data in Indonesia. *Next Energy*. doi:https://doi.org/10.1016/j.nxener.2026.100770

[4] IRENA. (2025). Renewable Power Generation Costs in 2024. p. 100.

[5] Klebanoff, L. E., Caughlan, S. A., Madsen, R. T., Conard, C. J., Leach, T. S., & Jr., T. B. (2021). Comparative study of a hybrid research vessel utilizing batteries or hydrogen fuel cells. *International journal of Htdrogen Energy, 46*(76), 38051-38072.

[6] Krupnick, J. B. (2020, Februari 27). *Investment tax Credits for hydrogen storage.* (Resources for the Future) Retrieved November 13, 2025, from https://www.rff.org/publications/issue-briefs/investment-tax-credits-hydrogen-storage/

[7] Paradongan, H. T., Hakam, D. F., Wiryono, S. K., Prahastono, I., Aditya, I. A., Banjarnahor, K. M., . . . Asekomeh, A. (2024, March 27). Techno-economic feasibility study of solar photovoltaic power plant using RETScreen to achieve Indonesia energy transition. *Heliyon*. doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27680

[8] PT. Perusahaan Listrik Negara. (2025, Mei 26). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL). *2025-2034*, p. 77.

[9] Reform, I. f. (2026). *Indonesia LCOE Calculator by IESR*. Retrieved June 08, 2026, from https://iesr.or.id/pustaka/levelized-cost-of-electricity-in-indonesia/

[10] S, A., Wijaya, F. D., & Budiman, A. (2024). Water Electrolysis Technology Selection for Green Hydrogen Production in Coastal Isolated Area. *Engineering Journal*. doi:10.4186/ej.2024.28.11.1

[11] S, A., Wijaya, F. D., Purwanto, M. R., & Budiman, A. (2024). GREEN HYDROGEN IN INDONESIA: AN OVERVIEW OF PRESENT STATUS, CHALLENGES, AND FUTURE POTENTIAL. *EMERG*. doi:https://doi.org/10.37410/EMERG.2024.4.05

[12] S, A., Wijaya, F. D., Putra, J. T., & Budiman, A. (2025). Optimization of Hybrid Renewable Energy System with Hydrogen Energy Storage for Enhanced Sustainability in Remote Areas: A Case Study of Enggano Island, Indonesia. *Solar Energy and sustainable Development*. doi:https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i2.618

[13] Statistik, B. P. (2026, Januari). *Badan Pusat Statistik Press Release*. Retrieved Juni 8, 2026, from https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2026/01/05/2527/inflasi-year-on-year--y-on-y--pada-desember-2025-sebesar-2-92-persen.html

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 121-129 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

IMPLEMENTASI OTOMASI AC RUANG KELAS BERBASIS JADWAL KULIAH MENGGUNAKAN *INTERNET OF THINGS* DAN ALGORITMA *INTERVAL MERGING*

Afqilla Regina Putri[1], Sahirul Alam[2]

[1,2]*Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia*

[1]afqillareginaputri@mail.ugm.ac.id
[2]sahirul.alam@mail.ugm.ac.id

Abstract*— Air conditioner (AC) usage in campus classrooms is often inefficient because units may remain operating when rooms are unoccupied. This study designs and implements an IoT-based classroom AC control and monitoring system that integrates schedule-driven automation, a web dashboard, a PHP RESTful API served by Nginx, an ESP8266-based AC control node, and an independent ESP32-based wattmeter node. The scheduling mechanism applies interval merging to consolidate overlapping class schedules into unified operating windows while retaining manual override capability. The system was evaluated through functional testing, backend performance testing across eight RESTful API endpoints, and a preliminary one-day energy consumption scenario consisting of four class sessions. All functional scenarios were successfully completed, while the average Time to First Byte (TTFB) ranged from 8.38 to 27.21 ms and the average throughput ranged from 7.47 to 274.59 kbps. In the preliminary energy test, cumulative AC energy consumption decreased from 39.6 kWh under the baseline scenario to 27.0 kWh with schedule-based automation, corresponding to a reduction of 12.6 kWh (31.8%). These results indicate the potential of schedule-driven IoT automation to reduce unnecessary AC operation, although further multi-day testing and measurement validation are required to confirm the energy-saving performance under varying operating conditions.

***Keywords*—AC Energy Efficiency, Cron Job Automation, Internet of Things, RESTful API, Schedule Merging.**

Intisari— Penggunaan *air conditioner* (AC) pada ruang kelas kampus sering kali tidak efisien karena unit AC dapat tetap beroperasi ketika ruangan tidak digunakan. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem kontrol dan *monitoring* AC ruang kelas berbasis IoT yang mengintegrasikan otomasi berbasis jadwal, *web dashboard*, RESTful API berbasis PHP yang dilayani Nginx, *node* kontrol AC berbasis ESP8266, dan *node wattmeter* independen berbasis ESP32. Mekanisme penjadwalan menerapkan *interval merging* untuk menggabungkan jadwal kuliah yang tumpang tindih menjadi jendela operasi terpadu dengan tetap menyediakan fungsi *manual override*. Sistem dievaluasi melalui pengujian fungsional, pengujian performa *backend* pada delapan *endpoint* RESTful API, serta skenario awal pengujian konsumsi energi selama satu hari yang terdiri atas empat sesi perkuliahan. Seluruh skenario fungsional berhasil dijalankan, dengan rata-rata *Time to First Byte* (TTFB) sebesar 8,38–27,21 ms dan *throughput* rata-rata sebesar 7,47–274,59 kbps. Pada pengujian energi awal, konsumsi energi kumulatif AC menurun dari 39,6 kWh pada kondisi baseline menjadi 27,0 kWh dengan otomasi berbasis jadwal, atau berkurang sebesar 12,6 kWh (31,8%). Hasil ini menunjukkan potensi otomasi IoT berbasis jadwal dalam mengurangi operasi AC yang tidak diperlukan, meskipun pengujian multi-hari dan validasi pengukuran lebih lanjut diperlukan untuk mengonfirmasi kinerja penghematan energi pada berbagai kondisi operasional.

***Kata Kunci*—Efisiensi Energi AC, *Internet of Things*, Otomasi *Cron Job*, Penggabungan Jadwal, RESTful API.**

I. PENDAHULUAN

Konsumsi energi listrik pada bangunan pendidikan terus meningkat seiring meluasnya penggunaan perangkat pendingin ruangan. *Air conditioner* (AC) merupakan salah satu kontributor terbesar konsumsi energi listrik pada gedung-gedung di negara beriklim tropis, termasuk Indonesia. Sebuah penelitian mengenai konsumsi energi gedung universitas beriklim tropis menemukan bahwa penggunaan AC di Escola Politécnica Universidade Federal da Bahia mencapai 36% dari total konsumsi energi listrik gedung [1]. Kondisi serupa juga terjadi di gedung perkantoran Malaysia, di mana AC menyumbang hingga 53% dari total konsumsi energi bangunan institusi [2].

Permasalahan yang umum dijumpai di lingkungan kampus adalah unit AC yang tetap beroperasi ketika ruangan tidak digunakan atau tidak dinyalakan sesuai kebutuhan karena pengoperasiannya masih bergantung pada intervensi pengguna. Sebuah studi pada Gedung Utama BPISDKP mencatat bahwa unit AC pada 13 ruangan dapat beroperasi lebih dari 24 jam tanpa pengendalian yang efisien [4]. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya mekanisme kontrol yang dapat menyesuaikan waktu operasi AC dengan penggunaan ruangan secara lebih sistematis.

Perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk mengotomatisasi dan memantau perangkat listrik dari jarak jauh secara *real-time* [11]. RESTful API juga banyak digunakan dalam komunikasi perangkat IoT karena sederhana, skalabel, dan kompatibel dengan teknologi *web* [5], [12]. Sejumlah penelitian telah mengembangkan sistem kontrol dan *monitoring* AC berbasis IoT, antara lain *monitoring* suhu dan konsumsi energi menggunakan NodeMCU ESP8266 dan platform Blynk [3], *monitoring* dan kontrol AC berbasis *web* menggunakan ZigBee dan ESP8266 [6], pengelolaan suhu AC untuk infrastruktur *eco-smart* [7], serta *monitoring* AC berbasis IoT untuk mendukung pemeliharaan fasilitas [2].

Pendekatan berbasis jadwal akademik juga telah digunakan untuk menyesuaikan operasi AC dengan penggunaan ruang kelas, dengan penghematan energi yang dilaporkan pada beberapa penelitian berkisar antara 20% hingga 45,75% [4], [9], [10].

Meskipun pendekatan berbasis jadwal dapat mengurangi ketergantungan pada pengoperasian manual, pengolahan jadwal secara independen dapat menimbulkan masalah ketika terdapat beberapa jadwal yang tumpang tindih pada ruangan dan hari yang sama. Setiap entri jadwal dapat menghasilkan pasangan perintah ON/OFF tersendiri sehingga muncul *trigger* yang redundan atau konflik waktu operasi. Permasalahan ini menjadi relevan pada pengelolaan ruang kelas yang digunakan oleh beberapa kegiatan perkuliahan dengan rentang waktu yang saling beririsan. Oleh karena itu, data jadwal perlu diproses terlebih dahulu menjadi jendela operasi AC yang konsisten sebelum digunakan oleh sistem otomasi.

Interval merging merupakan pendekatan komputasional untuk mengonsolidasikan sejumlah interval waktu yang saling tumpang tindih menjadi interval yang tidak redundan. Secara umum, interval terlebih dahulu diurutkan berdasarkan waktu mulai, kemudian dipindai secara linear untuk menentukan apakah suatu interval perlu digabungkan dengan interval sebelumnya. Dengan proses pengurutan berkompleksitas O(n log n) dan pemindaian linear O(n), kompleksitas keseluruhan pendekatan ini adalah O(n log n) [16]. Karakteristik tersebut memungkinkan kumpulan jadwal yang berubah secara dinamis diproses secara efisien sebelum digunakan sebagai dasar pembentukan *trigger* operasi [17]. Dalam konteks penelitian ini, *interval merging* digunakan untuk mengonsolidasikan jadwal perkuliahan yang saling tumpang tindih pada ruangan dan hari yang sama sehingga tidak menghasilkan pasangan perintah ON/OFF yang redundan.

Kontribusi penelitian ini bukan pada pengembangan algoritma *interval merging* baru, melainkan pada penerapannya sebagai bagian dari arsitektur otomasi AC berbasis IoT yang terintegrasi dengan data jadwal akademik. Sistem menggabungkan rekalkulasi *trigger* secara otomatis ketika jadwal ditambah, diubah, atau dihapus, *Automation Engine* berbasis *cron job*, mekanisme *manual override*, RESTful API, serta monitoring konsumsi daya melalui *node* IoT independen. Integrasi tersebut dirancang untuk menghasilkan jendela operasi AC yang konsisten berdasarkan jadwal sekaligus tetap memungkinkan intervensi pengguna ketika diperlukan.

Berdasarkan pendekatan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem IoT untuk kontrol dan *monitoring* AC ruang kelas berdasarkan data jadwal perkuliahan serta mengevaluasi fungsionalitas, performa *backend*, dan dampak awalnya terhadap konsumsi energi. Sistem mengintegrasikan *web dashboard*, RESTful API, perangkat ESP8266 untuk kontrol AC melalui inframerah, *node* ESP32 untuk *monitoring* daya, serta *Automation Engine* berbasis *cron job* dan *interval merging* untuk mengelola jendela operasi AC.

II. METODE PENELITIAN

A. Arsitektur Sistem

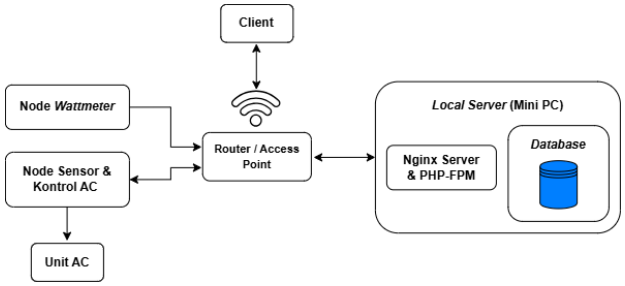
Arsitektur sistem dirancang untuk mengintegrasikan empat komponen utama yang saling berkomunikasi, yaitu *Node* IoT, Infrastruktur Jaringan Lokal, Mini PC *(Local Server)*, dan Sisi *Client*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Rincian alat dan bahan perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel I dan Tabel II.

Tabel I
Perangkat Keras Sistem

Komponen	Spesifikasi	Fungsi
Server local (Mini PC)	Intel NUC 11 Pro, Celeron N5105, RAM 8 GB, NVMe 512 GB	Menjalankan Nginx, PHP-FPM, MariaDB
Router Wi-Fi	TP-Link TL-WR820N, IEEE 802.11b/g/n, 2,4 GHz	Jaringan lokal antar-komponen
Node sensor & kontrol AC	ESP8266 + DHT11 + IR transmitter	Untuk membaca suhu dan kelembaban, eksekusi ON/OFF AC
Node wattmeter	ESP32 + SCT-013 + ZMPT101B	Ukur arus dan tegangan AC secara simultan
Unit AC	Panasonic CS/CU-YN18WKJ (2 PK)	Objek kendali dan monitoring

Tabel II
Perangkat Lunak Sistem

Komponen	Spesifikasi/Versi	Fungsi
OS server	Ubuntu 22	Menjalankan Nginx dan MariaDB
Backend	PHP (Vanilla, OOP)	Membangun RESTful API
Frontend	HTML5, CSS3, JS (ES Modules)	Antarmuka *dashboard*
Framework CSS	Bootstrap 5	*Layout* responsif
Library visualisasi	Chart.js	Grafik konsumsi daya
DBMS	MariaDB	Data operasional dan log sensor
Web server	Nginx	Reverse proxy HTTP
Tools pengujian	Postman, Chrome DevTools, Wireshark, Mockoon	Uji fungsional, TTFB, *throughput*



Gambar 1. Arsitektur Sistem Kontrol dan Monitoring AC

Node IoT terdiri atas dua mikrokontroler independen: *Node* Sensor & Kontrol AC (ESP8266) yang membaca suhu/kelembaban dan mengeksekusi perintah ON/OFF via IR *transmitter*, serta *Node Wattmeter* (ESP32) yang membaca arus dan tegangan AC secara simultan. Kedua *node* terhubung ke Mini PC melalui Infrastruktur Jaringan Lokal (router Wi-Fi). Pada Mini PC dijalankan dua lapisan layanan: *Application Layer*, berupa RESTful API yang dilayani Nginx sebagai *web server* [13] dengan PHP-FPM sebagai prosesor *backend* melalui *front controller* yang mendelegasikan permintaan ke empat *controller* (Room, Schedule, Sensor, Ac), dan *Automation Engine* (cron_automation.php) yang dipicu *scheduler* sistem operasi setiap satu menit; serta *Data Layer*, berupa MariaDB [15] dengan dua skema terpisah untuk data operasional dan data log sensor. Sisi *Client* berupa *web dashboard* yang diakses melalui browser.

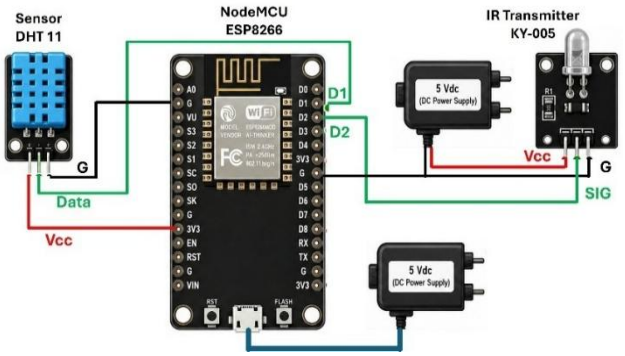
Kontrol AC pada arsitektur ini berjalan melalui dua jalur yang berdampingan. Pada jalur otomatis, *Automation Engine* membaca jadwal dan status *override* langsung dari *Data Layer*, kemudian mengirimkan perintah ON/OFF langsung ke *Node* IoT tanpa melalui *Application Layer*. Pada jalur manual, perintah dari Sisi *Client* dikirimkan langsung ke *Node* IoT agar eksekusi fisik instan, dengan status hasilnya kemudian disinkronkan ke *Data Layer* melalui *Application Layer* agar tetap konsisten dan dapat dibaca kembali oleh *Automation Engine* maupun sesi *client* lain.

B. Perancangan dan Implementasi Perangkat Keras

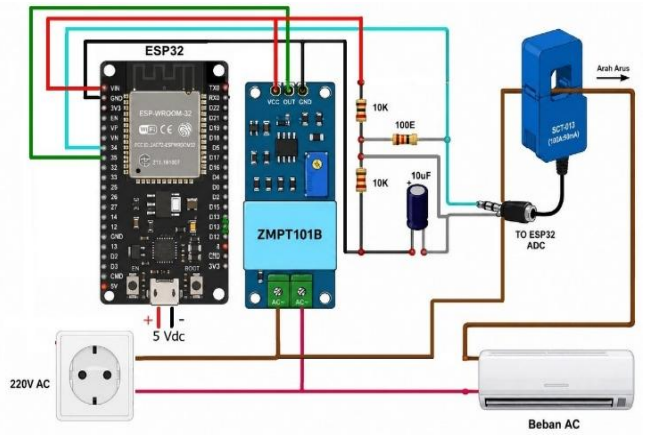
Perangkat keras IoT dirancang terintegrasi langsung dengan sistem informasi jadwal kuliah agar beroperasi secara kontekstual tanpa bergantung pada sensor kehadiran (PIR) yang rawan bias deteksi. Rancangan skematik memisahkan fungsi *Node* Sensor & Kontrol AC dari *Node Wattmeter*, sehingga kedua fungsi berjalan independen dan tidak saling mengganggu.

Rancangan skematik *Node* Sensor & Kontrol AC ditunjukkan pada Gambar 2. *Node*MCU ESP8266 dihubungkan dengan sensor DHT11 melalui satu jalur data (GPIO) untuk membaca suhu dan kelembaban ruangan secara periodik, serta dengan modul IR *transmitter* melalui pin D5 sebagai jalur keluaran sinyal inframerah menuju unit AC.

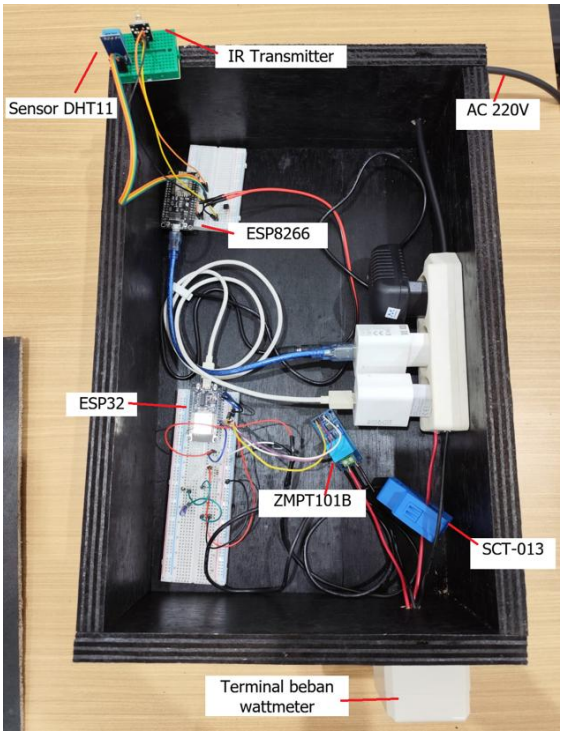
Berdasarkan Gambar 2, ketika perintah menyala diterima dari server, mikrokontroler memancarkan satu kode sinyal inframerah tetap hasil *capture-and-replay*, dengan konfigurasi *mode* Cool, suhu target 25°C, serta kecepatan kipas dan *swing* otomatis; *firmware* tidak mendukung pengubahan parameter tersebut secara dinamis karena fungsi kendali pada penelitian ini hanya mencakup *power ON/OFF*. Selain itu, *firmware Node* Sensor & Kontrol AC juga menjalankan *web server* lokal dengan dua *endpoint*, yaitu GET /status untuk melaporkan status daya AC terkini dan POST /control untuk menerima perintah ON/OFF dari server.



Gambar 2. Skematik *Node* Sensor & Kontrol AC



Gambar 3. Skematik *Node Wattmeter*



Gambar 4. Purwarupa Perangkat IoT

Rancangan skematik *Node Wattmeter* ditunjukkan pada Gambar 3. ESP32 dihubungkan dengan sensor arus SCT-013 yang bertipe *split-core current transformer*, dipasang non-invasif *(clamp-on)* pada kabel fasa AC tanpa perlu memutus rangkaian, serta dengan sensor tegangan ZMPT101B yang mengukur tegangan AC hingga 250V melalui isolasi galvanis yang memisahkan sirkuit tegangan tinggi dari sirkuit mikrokontroler. Kedua sensor terhubung ke dua kanal masukan analog terpisah pada ESP32. Nilai bacaan mentah dari kedua kanal analog dikalikan dengan faktor kalibrasi agar nilainya mendekati alat ukur pembanding yaitu *wattmeter* digital fisik. Selanjutnya, hasil pengukuran daya dikirimkan ke server setiap lima detik melalui permintaan HTTP GET. Hasil implementasi perangkat keras IoT dalam bentuk purwarupa awal ditunjukkan pada Gambar 4. Perangkat ini dipasang di setiap unit AC untuk otomasi pengontrolan dan monitoring konsumsi daya.

C. Perancangan dan Implementasi Perangkat Lunak

Basis data dirancang dengan dua skema terpisah pada MariaDB: skema operasional yang bersifat relasional *(rooms, ac_status, ac_overrides, schedules, ac_triggers)* dan skema climasense_sensor_log yang bersifat *insert-only* berfrekuensi tinggi *(sensor_logs)*, sehingga performa *query* operasional tidak terbebani volume penulisan data sensor. Ringkasan relasi setiap tabel terhadap tabel *rooms* disajikan pada Tabel III. *Backend* RESTful API dibangun dengan pola *front controller*: seluruh permintaan HTTP diterima oleh index.php, diurai menjadi *resource, id,* dan *action*, lalu didelegasikan ke salah satu dari empat *controller* (Room, Schedule, Sensor, Ac) sesuai Tabel IV. Koneksi basis data menerapkan pola Singleton (getDB() dan getSensorDB()) memanfaatkan ekstensi PDO PHP [14] agar setiap *controller* menggunakan satu koneksi yang sama tanpa membuka handle baru, sementara konfigurasi alamat *Node* IoT per ruangan dipusatkan pada berkas iot.php lengkap dengan mekanisme *fallback* dan batas *timeout* agar kegagalan komunikasi ke satu *Node* IoT tidak menghambat proses otomasi ruangan lain. Sebelum *routing*, index.php menetapkan *header* CORS dan JSON, sementara kombinasi *resource/id/action/method* yang tidak cocok dikembalikan sebagai HTTP 404.

Tabel III
Entitas Utama Basis Data Operasional

Tabel	**Relasi thd. *rooms***	**Fungsi**
ac_status	*One-to-one*	Status AC terkini (*power*, mode, suhu, kelembaban)
ac_overrides	*One-to-* (0 atau 1)	Status *override* manual yang sedang berlaku
schedules	*One-to-many*	Data jadwal kegiatan akademik per ruangan
ac_triggers	*One-to-many*	Jendela waktu ON/OFF hasil *schedule merging*
sensor_logs	Relasi logis *(room_code)*	Log historis sensor (skema terpisah)

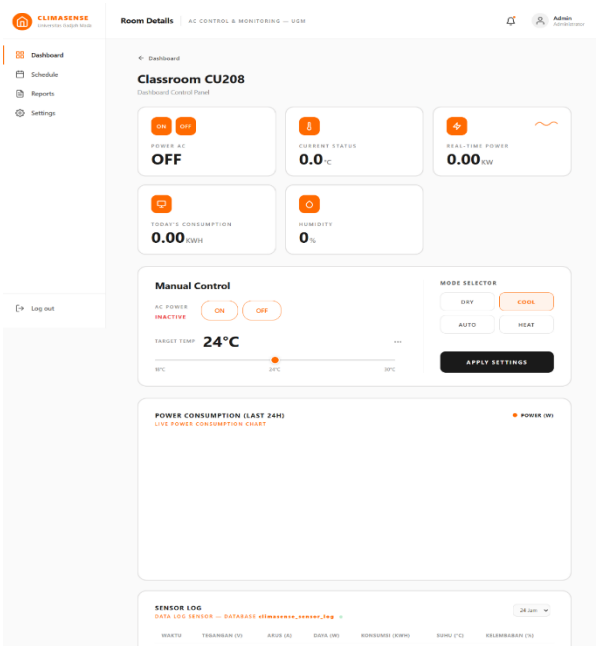
Tabel IV
Endpoint RESTful API Utama

Method	***Endpoint***	***Controller* / Fungsi**
GET/POST	/rooms	RoomController: CRUD ruangan & status AC
POST/PUT/ DELETE	/schedules/ {id}	ScheduleController: CRUD jadwal, memicu recalcTriggers()
GET	/ac-triggers	ScheduleController: jendela waktu hasil merging
GET/POST	/rooms/{id}/ control	AcController: baca/sinkron status kendali AC
POST	/sensor/ {room_id}	SensorController: simpan data sensor dari *Node* IoT
GET	/sensor/ {room_id} /history	SensorController: riwayat sensor untuk grafik

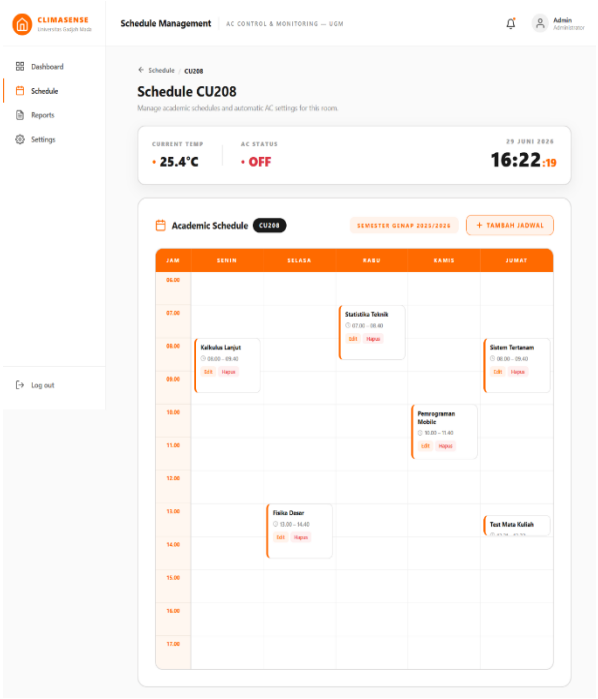
Inti kebaruan penelitian pada sisi *backend* terletak pada fungsi recalcTriggers() di dalam ScheduleController, yang dipanggil otomatis setiap kali terjadi operasi tambah, ubah, atau hapus jadwal. Fungsi ini menerapkan algoritma *interval merging* melalui empat tahap: (1) menghapus *trigger* lama pada ruangan dan hari terkait; (2) mengambil dan mengurutkan seluruh jadwal berdasarkan waktu mulai; (3) memindai jadwal secara satu-arah untuk mendeteksi tumpang tindih - dua interval $[s_1, e_1]$ dan $[s_2, e_2]$ digabung menjadi $[\min(s_1, s_2), \max(e_1, e_2)]$ apabila $s_2 \leq e_1$; dan (4) menyimpan jendela waktu gabungan ke tabel *ac_triggers*. Tahap pengurutan menggunakan *merge sort* berkompleksitas O(n log n) [16], dilanjutkan pemindaian linear O(n), sehingga kompleksitas keseluruhan algoritma adalah O(n log n); pendekatan ini terbukti menghasilkan alokasi sumber daya penjadwalan yang lebih optimal dibandingkan penanganan interval secara independen [17].

Otomasi berbasis jadwal dijalankan oleh *Automation Engine* (cron_automation.php) sebagai skrip PHP CLI yang dipicu *Cron Job server* setiap satu menit, independen dari sesi browser. Algoritmanya terdiri atas empat tahap: membaca seluruh ruangan terdaftar, memeriksa apakah waktu saat ini berada dalam jendela *ac_triggers*, memeriksa keberadaan *override* manual pada *ac_overrides*, dan memperbarui *ac_status* beserta mengirim perintah HTTP melalui cURL ke *Node* IoT apabila status target berbeda dari status saat ini.

Frontend dibangun sebagai *Single Page Application* modular menggunakan HTML5, *framework* Bootstrap 5 [18], dan Vanilla JavaScript, dengan prinsip *thin client* seluruh keputusan evaluasi jadwal dilakukan di *backend* sehingga *frontend* tidak memuat logika *timer* apa pun. Kontrol manual direalisasikan pada fungsi buttonPower() melalui dua tahap: mengirim perintah langsung ke *Node* IoT agar eksekusi fisik instan, kemudian menyinkronkan status hasilnya ke *backend*. Hasil implementasi antarmuka ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Halaman *Room Details*



Gambar 6. Halaman *Schedule Management*

Halaman *Room Details* (Gambar 5) menyajikan tiga kelompok informasi utama: kartu kondisi ruangan *real-time* (status daya, suhu, daya terpakai, energi harian, kelembaban), panel *Manual Control* (tombol ON/OFF, *slider* suhu, pemilihan mode), serta grafik tren konsumsi daya 24 jam menggunakan Chart.js [19] yang diperbarui berkala melalui *polling* data sensor. Halaman *Schedule Management* (Gambar 6) menampilkan kalender mingguan visual (grid akademik Senin-Jumat) dengan setiap kegiatan perkuliahan diplot sebagai blok berwarna menggunakan *absolute positioning* berdasarkan jam mulai dan durasi, dilengkapi tombol Edit dan Hapus pada setiap blok jadwal serta modal Tambah Jadwal merupakan representasi visual langsung dari data yang diproses oleh algoritma recalcTriggers().

D. Algoritma Penggabungan Jadwal *(Interval Merging)*

Tanpa penggabungan interval, setiap baris jadwal dapat menghasilkan pasangan *trigger* ON/OFF secara independen. Kondisi ini berpotensi menimbulkan *trigger* yang redundan ketika terdapat dua atau lebih jadwal yang saling tumpang tindih pada ruangan dan hari yang sama. Oleh karena itu, algoritma *interval merging* digunakan untuk mengonsolidasikan jadwal yang tumpang tindih menjadi satu jendela waktu operasi AC sebelum dievaluasi oleh *Automation Engine*.

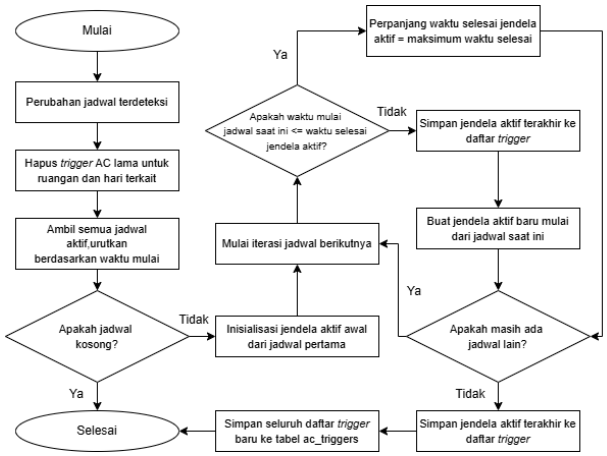
Secara formal, dua interval yang telah diurutkan berdasarkan waktu mulai, ($[s_1,e_1]$) dan ($[s_2,e_2]$), digabung menjadi ($[\min(s_1,s_2), \max(e_1,e_2)]$) apabila ($s_2 \leq e_1$). Algoritma diwujudkan dalam fungsi *recalcTriggers*() pada *ScheduleController* dan dijalankan setiap kali terjadi operasi tambah, ubah, atau hapus jadwal. Proses pada Gambar 7 terdiri atas empat tahap, yaitu menghapus *trigger* lama pada ruangan dan hari terkait, mengurutkan seluruh jadwal berdasarkan waktu mulai menggunakan *merge sort* O(n log n) [16], melakukan pemindaian linear O(n) untuk menggabungkan interval yang tumpang tindih, dan menyimpan jendela hasil penggabungan ke tabel *ac_triggers* beserta *schedule_ids*.

Sebagai contoh, terdapat tiga jadwal pada hari yang sama, yaitu [08:00–09:40], [09:30–11:00], dan [13:00–14:40]. Karena jadwal kedua dimulai sebelum jadwal pertama berakhir, dua interval pertama digabung menjadi [08:00–11:00], sedangkan jadwal ketiga tetap tersimpan sebagai interval terpisah. Dengan demikian, sistem menghasilkan dua jendela operasi pada *ac_triggers* alih-alih tiga pasangan *trigger* independen.

Perubahan jadwal ditangani melalui proses rekalkulasi tersebut. Apabila suatu kelas dibatalkan dan jadwal dihapus dari sistem, *recalcTriggers*() menghapus trigger sebelumnya dan membangun kembali jendela operasi berdasarkan jadwal yang masih aktif. Jika waktu perkuliahan diperpanjang dan perubahan tersebut diperbarui pada data jadwal, *trigger* juga dihitung ulang secara otomatis. Untuk perubahan operasional yang belum tercatat pada jadwal, seperti perkuliahan yang berlangsung lebih lama dari waktu yang direncanakan, pengguna dapat menggunakan mekanisme manual *override* agar status AC tidak langsung diubah oleh evaluasi jadwal otomatis.

Kompleksitas waktu keseluruhan algoritma adalah O(n log n), yang didominasi oleh proses pengurutan, sedangkan pemindaian interval memiliki kompleksitas O(n). Tabel *ac_triggers* hasil penggabungan selanjutnya menjadi acuan bagi *Automation Engine* (cron_automation.php) yang mengevaluasi status target AC setiap satu menit.

Algoritma pada implementasi saat ini hanya menggabungkan interval yang saling tumpang tindih dan belum menerapkan ambang minimum jeda ON/OFF untuk menggabungkan dua jadwal yang terpisah oleh jeda singkat. Oleh karena itu, *interval merging* pada penelitian ini ditujukan terutama untuk menghilangkan *trigger* yang redundan akibat jadwal yang tumpang tindih dan tidak diklaim secara khusus sebagai mekanisme pencegahan *short cycling* pada seluruh kondisi operasi.



Gambar 7. *Flowchart* Algoritma Penggabungan Jadwal (*recalcTriggers*())

E. Skenario Pengujian

Pengujian sistem dilakukan melalui tiga tahap. Pertama, pengujian fungsional *(black-box testing)* terhadap sembilan skenario yang mencakup manajemen ruangan, kendali manual AC, pemantauan kondisi ruangan, manajemen jadwal, otomasi penjadwalan, dan responsivitas antarmuka pada tiga kategori *viewport* (mobile, tablet, desktop). Kedua, pengujian performa sistem terhadap delapan *endpoint* RESTful API, meliputi *Time to First Byte* (TTFB) yang diukur melalui panel *Timing* pada Google Chrome DevTools, dan *throughput* yang diukur melalui aplikasi Wireshark dengan menghitung rasio *Bytes* terhadap *Time Span* pada *Capture File Properties*, dikonversi ke kbps. Setiap *endpoint* diuji sepuluh kali pengulangan untuk memperoleh nilai minimum, maksimum, dan rata-rata. Ketiga, pengujian dampak efisiensi energi dilakukan dengan membandingkan konsumsi daya AC pada kondisi *baseline* (tanpa otomasi) dan kondisi dengan sistem kontrol dan otomatisasi AC pada pola jadwal empat sesi perkuliahan dalam satu hari.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Fungsionalitas

Pengujian *black-box* dilakukan terhadap sembilan skenario yang merepresentasikan seluruh fitur utama *dashboard*, sebagaimana dirangkum pada Tabel V. Seluruh skenario dinyatakan berhasil (100% *pass rate*), termasuk pengujian penggabungan jadwal tumpang tindih yang menghasilkan satu baris data baru pada tabel *ac_triggers*, transisi otomatis AC menyala dan mati tepat waktu yang terkonfirmasi melalui log terminal cron_automation.php *(STATE CHANGE DETECTED)*, serta *manual override* yang terbukti mampu mempertahankan status manual pengguna tanpa ditimpa oleh hasil evaluasi jadwal berikutnya.

Tabel V
Rekapitulasi Hasil Pengujian Fungsionalitas

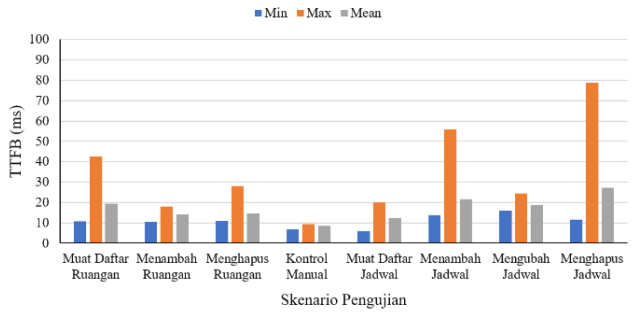
No	Skenario Pengujian	Status
1	Tambah/hapus ruangan	Berhasil
2	Kendali manual ON/OFF AC	Berhasil
3	Pemantauan suhu, kelembaban, daya, dan energi harian	Berhasil
4	Grafik konsumsi daya 24 jam dan tabel log sensor	Berhasil
5	Validasi tambah, ubah, dan hapus jadwal	Berhasil
6	Penggabungan jadwal tumpang tindih (recalcTriggers)	Berhasil
7	Transisi otomatis ON/OFF AC tepat waktu	Berhasil
8	*Manual override* di tengah jadwal aktif	Berhasil
9	Responsivitas antarmuka (mobile, tablet, desktop)	Berhasil

B. Hasil Pengujian Performa Sistem

Pengujian TTFB, yaitu metrik performa web yang mengukur durasi sejak permintaan dikirim hingga *byte* pertama respons diterima [20], terhadap delapan *endpoint* RESTful API menunjukkan rata-rata berkisar antara 8,38 ms hingga 27,21 ms, sebagaimana disajikan pada Tabel VI dan Gambar 8. *Endpoint* Kontrol Manual ON/OFF mencatatkan TTFB rata-rata terendah (8,38 ms) karena hanya melakukan pembaruan satu kolom status pada basis data. Sebaliknya, *endpoint* Tambah Jadwal, Ubah Jadwal, dan Hapus Jadwal menunjukkan TTFB yang lebih tinggi (18,84-27,21 ms), konsisten dengan beban komputasi tambahan dari eksekusi fungsi recalcTriggers() pada setiap operasi jadwal.

Tabel VI
Hasil Pengujian TTFB (ms)

Skenario	Min	Max	Mean
Muat Daftar Ruangan	10,79	42,60	19,34
Tambah Ruangan	10,39	17,96	14,11
Hapus Ruangan	11,07	28,02	14,58
Kontrol Manual ON/OFF	6,86	9,28	8,38
Muat Daftar Jadwal	6,01	20,04	12,39
Tambah Jadwal	13,92	55,88	21,52
Ubah Jadwal	15,93	24,34	18,84
Hapus Jadwal	11,63	78,72	27,21

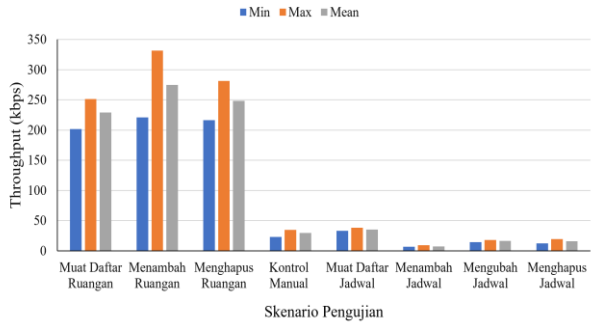


Gambar 8. Perbandingan TTFB Kedelapan *Endpoint*

Tabel VII
Hasil Pengujian *Throughput* (kbps)

Skenario	Min	Max	Mean
Muat Daftar Ruangan	201,58	251,43	228,98
Tambah Ruangan	220,86	331,47	274,59
Hapus Ruangan	216,42	281,64	248,56

Skenario	Min	Max	Mean
Kontrol Manual ON/OFF	23,23	34,56	29,72
Muat Daftar Jadwal	33,02	38,31	35,15
Tambah Jadwal	6,62	9,46	7,47
Ubah Jadwal	14,39	17,76	16,24
Hapus Jadwal	12,65	19,45	15,90



Gambar 9. Perbandingan *Throughput* Kedelapan *Endpoint*

Hasil pengujian *throughput* pada Tabel VII dan Gambar 9 memperkuat pola yang sama: *endpoint* manajemen ruangan mencapai *throughput* tertinggi (228,98-274,59 kbps) karena *time span* transaksi yang singkat, sedangkan *endpoint* manajemen jadwal mencatatkan *throughput* terendah (7,47-16,24 kbps) akibat *time span* yang jauh lebih panjang (5,16-14,96 detik) selama proses rekalkulasi dan penggabungan jadwal berlangsung. Hal ini menegaskan bahwa performa transfer data *backend* lebih dipengaruhi oleh kompleksitas komputasi pada sisi server dibandingkan besar kecilnya volume data yang dipertukarkan.

C. Hasil Pengujian Dampak Efisiensi Energi

Pengujian dampak efisiensi energi mengadaptasi metodologi studi kasus lapangan pada ruang kelas CU208 di lingkungan kampus Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, dengan membandingkan pola konsumsi daya AC pada kondisi *baseline* (tanpa otomasi) dan kondisi dengan sistem kontrol dan otomatisasi AC, menggunakan pola jadwal kuliah harian dengan empat sesi perkuliahan sebagaimana dirangkum pada Tabel VIII.

Pengujian dilakukan selama 1 hari untuk tiap skenario (*baseline* dan otomasi). Namun pengujian tidak dilakukan pada saat perkuliahaan riil berlangsung, melainkan menggunakan skenario seperti pada Tabel VIII. Ruang kelas memiliki 4 unit AC masing-masing berkapasitas 2 PK dengan jenis standard. Pengujian dilakukan pada cuaca cerah dengan suhu luar ruangan berkisar antara 24°C hingga 31°C. Kontrol AC hanya bersifat on-off dengan suhu setpoint 24°C. Selain itu, pada saat jeda perkuliahan, pintu ruangan dibuka agar skenario mendekati kondisi biasanya.

Jeda antar sesi umumnya berlangsung sekitar 20 menit, kecuali jeda antara Sesi 2 dan Sesi 3 yang mencapai sekitar 80 menit rentang jeda panjang inilah yang menjadi fokus utama pengujian, karena pada praktiknya AC sering kali tetap menyala tanpa termanfaatkan selama periode tersebut. Pengujian juga mencakup periode pasca-kuliah (±60 menit setelah Sesi 4 berakhir) sebagai potensi hemat tambahan sebelum dilakukan pengecekan manual terhadap ruangan. Pada kondisi *baseline*, AC dibiarkan menyala terus-menerus sejak Sesi 1 dimulai (07:15) hingga periode pasca-kuliah berakhir (16:55), termasuk pada seluruh periode jeda, untuk merepresentasikan kebiasaan pengguna yang tidak mematikan AC secara manual saat ruangan tidak digunakan. Pada kondisi dengan sistem kontrol dan otomatisasi AC, AC dikendalikan sepenuhnya oleh mekanisme *schedule merging* dan *cron job automation*, sehingga hanya menyala pada jendela waktu hasil penggabungan jadwal *(ac_triggers)* dan mati otomatis pada seluruh periode jeda, termasuk jeda panjang antara Sesi 2 dan Sesi 3 serta periode pasca-kuliah.

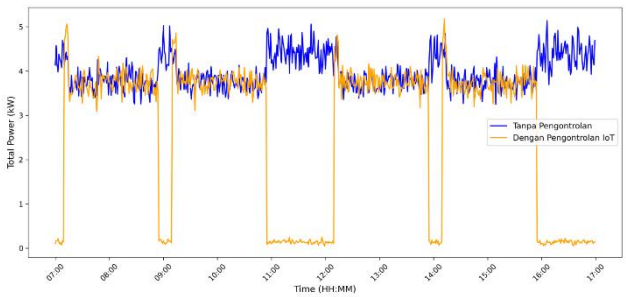
Tabel VIII
Skenario Pengujian Dampak Efisiensi Energi

Sesi/Jeda	Waktu	Durasi	Kondisi Baseline	Kondisi Otomasi AC
Sesi 1	07:15–08:55	100 mnt	AC menyala	AC menyala
Jeda 1	08:55–09:15	20 mnt	AC tetap menyala	AC mati otomatis
Sesi 2	09:15–10:55	100 mnt	AC menyala	AC menyala
Jeda Panjang	10:55–12:15	80 mnt	AC tetap menyala	AC mati otomatis
Sesi 3	12:15–13:55	100 mnt	AC menyala	AC menyala
Jeda 2	13:55–14:15	20 mnt	AC tetap menyala	AC mati otomatis
Sesi 4	14:15–15:55	100 mnt	AC menyala	AC menyala
Pasca Kuliah	15:55–16:55	60 mnt	AC tetap menyala	AC mati otomatis

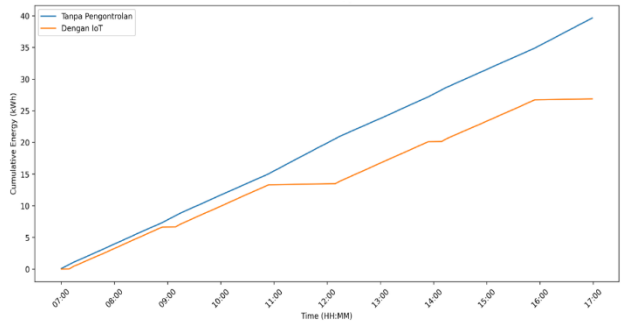
Hasil pengujian konsumsi daya pada sistem disajikan pada Gambar 10 sebagai perbandingan antara kondisi tanpa pengontrolan (*baseline*) dan kondisi ketika mekanisme otomasi berbasis IoT diterapkan. Pada skenario *baseline*, unit AC tetap beroperasi selama periode jeda antar sesi meskipun ruangan tidak sedang digunakan, sehingga konsumsi energi tetap berlangsung. Kondisi tersebut juga dipengaruhi oleh pintu ruangan yang dibiarkan terbuka selama jeda, sehingga beban pendinginan tetap terjadi atau bahkan meningkat. Sebaliknya, pada skenario dengan otomasi, sistem mengendalikan operasi AC berdasarkan jadwal yang telah ditentukan dan secara otomatis mematikan unit ketika tidak terdapat aktivitas terjadwal. Penerapan mekanisme ini menurunkan konsumsi daya selama periode jeda. Perbedaan kedua skenario terlihat pada pola kurva konsumsi daya, di mana kondisi otomasi menunjukkan area di bawah kurva yang lebih kecil dibandingkan kondisi *baseline*, yang mengindikasikan berkurangnya penggunaan energi selama periode pengujian.

Gambar 11 menunjukkan kurva energi kumulatif pada kondisi *baseline* yang terus meningkat sepanjang periode jeda, sedangkan pada kondisi dengan sistem yang dikembangkan, kurva melandai selama jeda, terutama pada rentang jeda panjang antara Sesi 2 dan Sesi 3 membuktikan bahwa *schedule merging* dan *cron job automation* efektif

mengeliminasi konsumsi energi yang tidak produktif tanpa intervensi manual.



Gambar 10. Perbandingan konsumsi daya AC (*baseline* vs otomasi IoT)



Gambar 11. Perbandingan *Cumulative Energy Consumption*

Secara kuantitatif, total konsumsi energi kumulatif menurun dari 39,6 kWh *(baseline)* menjadi 27,0 kWh (dengan otomasi), setara efisiensi energi sebesar 32,2%. Besarnya efisiensi ini bersifat spesifik terhadap kepadatan jadwal ruangan yang diuji, dan penggabungan jadwal yang berdekatan turut mencegah *short cycling* yang justru dapat menurunkan efisiensi energi akibat lonjakan daya saat AC pertama kali dinyalakan.

IV. KESIMPULAN

Sistem IoT untuk pengontrolan dan *monitoring* AC ruang kelas berbasis jadwal kuliah berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan RESTful API, *web dashboard*, perangkat ESP8266 untuk kontrol AC, node ESP32 untuk *monitoring* daya, serta *Automation Engine* berbasis *cron job*. Algoritma *interval merging* digunakan untuk menggabungkan jadwal yang saling tumpang tindih menjadi jendela operasi yang konsisten, sedangkan mekanisme *manual override* memungkinkan pengguna mempertahankan kendali ketika diperlukan. Seluruh sembilan skenario pengujian fungsional berhasil dijalankan (100%), sementara pengujian terhadap delapan *endpoint* API menghasilkan TTFB rata-rata 8,38–27,21 ms dan *throughput* rata-rata 7,47–274,59 kbps.

Pada pengujian awal selama satu hari untuk masing-masing skenario, konsumsi energi kumulatif menurun dari 39,6 kWh pada kondisi *baseline* menjadi 27,0 kWh pada kondisi otomasi, atau berkurang sebesar 12,6 kWh (31,8%). Hasil tersebut menunjukkan potensi otomasi berbasis jadwal dalam mengurangi operasi AC yang tidak diperlukan, terutama selama periode jeda dan setelah kegiatan berakhir. Namun, nilai penghematan tersebut masih merupakan hasil awal dari skenario pengujian yang terbatas sehingga belum dapat digeneralisasi untuk berbagai pola jadwal dan kondisi operasional.

Penelitian selanjutnya dapat memperluas pengujian selama beberapa hari dengan variasi pola jadwal dan kondisi operasional serta menggunakan analisis statistik untuk mengonfirmasi konsistensi penghematan energi. Evaluasi keandalan sistem pada gangguan jaringan dan skenario multi-gedung, penguatan keamanan RESTful API, serta pengembangan fitur *pre-cooling* juga dapat dilakukan pada pengembangan berikutnya.

REFERENSI

[1] M. L. da Silva Costa, M. R. Freire, K. F. da Silva, and F. G. M. Freires, "Analysis of Energy Consumption Related to the Use of Air Conditioning in University Buildings in a Tropical Climate," *Revista de Gestão Social e Ambiental*, vol. 16, no. 2, 2022, doi: 10.24857/rgsa.v16n2-019.

[2] Z. Y. Yap, M. H. Md Saad, S. Sahrani, K. Habib, and A. Hussain, "Internet of Things (IoT) Based Air Conditioner Monitoring System for Intelligent Facility Maintenance," *Jurnal Kejuruteraan*, vol. 35, no. 6, pp. 1487–1500, 2023.

[3] N. Sugiartha, I. D. M. G. S. Okgiarta, I. M. Sugina, and I. D. G. A. T. Putra, "Monitoring Suhu dan Konsumsi Energi AC Split Berbasis Blynk IoT," *J. Energy, Mater., & Manuf. Technol. (JEMMTEC)*, vol. 4, no. 1, pp. 10-14, Jan. 2025.

[4] I. M. S. Yasa, P. E. Aridona, K. Parti, K. A. Yasa, and I. P. Sutawinaya, "Sistem Kontrol dan Monitoring Air Conditioner Berbasis IoT di Gedung Utama Balai Pengelolaan Informasi Sumber Daya Kelautan dan Perikanan," *VASTUWIDYA*, vol. 8, no. 2, pp. 90-94, Aug. 2025.

[5] E. Mabotha, N. E. Mabunda, and A. Ali, "Dynamic RESTful API Framework and Deployment using Docker: Enhancing IoT Deployment Strategies," in *Proc. 2024 IEEE PES/IAS PowerAfrica Conference*, Johannesburg, South Africa, 2024.

[6] T. Ghozali, G. Ilena, M. Mulyadi, and L. Wijayanti, "Web-Based Air Conditioner Monitoring and Control," *Saudi J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 8, pp. 461-471, Sep. 2022, doi: 10.36348/sjet.2022.v07i08.006.

[7] S. Sharma and P. Randhawa, "IoT-Powered AC Temperature Management for Eco-Smart Infrastructures," in *Proc. 2nd Int. Conf. Intell. Data Commun. Technol. Internet of Things (IDCIoT)*, 2024, doi: 10.1109/IDCIoT59759.2024.10467797.

[8] A. A. Pratama, R. P. Pradana, A. A. Kurniasari, A. F. Rosyady, and D. P. S. Setyohadi, "Smart Campus: Design and Implementation of Lights and Air Conditioners Monitoring and Control System," *bit-Tech*, vol. 8, no. 3, 2026, doi: 10.32877/bt.v8i3.3406.

[9] T.-T. Huynh, T.-B. Nguyen, and H. Ho-Dac, "A Practical Approach for Air-Conditioner Management System toward Power Saving for Universities," in *Proc. 2024 Int. Conf. Adv. Technol. Commun. (ATC)*, 2024.

[10] Waluyo, A. Widura, F. Hadiatna, and R. S. Fikri, "IoT-Based Air Conditioning Control System for Energy Saving," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 13, no. 1, pp. 8-16, Jan. 2023, doi: 10.18517/ijaseit.13.1.17152.

[11] J. S. Yalli, M. H. Hasan, and A. A. Badawi, "Internet of Things (IoT): Origins, Embedded Technologies, Smart Applications, and Its Growth in the Last Decade," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 91357-91382, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3418995.

[12] E. Mabotha, N. E. Mabunda, A. Ali, and B. Khan, "Exploring Dynamic RESTful API Implementation in IoT

Environments Using Docker," *Sci. Rep.*, vol. 15, art. no. 34267, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-16460-0.

[13] W. Wicoksono, H. A. Mustaqhim, P. P. Anwas, and L. N. L. Badratul, "Performance Comparison of NGINX, Apache, and Lighttpd Using WRK on a Debian," *bit-Tech*, vol. 8, no. 1, pp. 670-680, Aug. 2025, doi: 10.32877/bt.v8i1.2661.

[14] PHP.net, "PHP: PDO - Manual," 2024. [Online]. Available: https://www.php.net/manual/en/book.pdo.php

[15] S. Akinola, "Trends in Open Source RDBMS: Performance, Scalability and Security Insights," *J. Res. Sci. Eng.*, vol. 6, no. 7, pp. 22–28, 2024, doi: 10.53469/jrse.2024.06(07).05.

[16] K. Alhajri, W. Alsinan, S. Almuhaishi, F. Alhmood, N. AlJumaia, and A. A. A. Ali, "Analysis and Comparison of Sorting Algorithms (Insertion, Merge, and Heap) Using Java," *IJCSNS Int. J. Comput. Sci. Netw. Secur.*, vol. 22, no. 12, pp. 197-204, Dec. 2022, doi: 10.22937/IJCSNS.2022.22.12.25.

[17] J. Mayank and A. Mondal, "A Unified Job Scheduler for Optimization of Different System Performance Metrics," *Concurrency Computat. Pract. Exper.*, vol. 37, art. no. e70111, 2025, doi: 10.1002/cpe.70111.

[18] Bootstrap, "Bootstrap Official Documentation, v5.3", 2024. [Online]. Available: https://getbootstrap.com/docs/5.3/

[19] Chart.js, "Chart.js Documentation, v4.x", 2024. [Online]. Available: https://www.chartjs.org/docs/latest/

[20] B. Pollard and J. Wagner, "Time to First Byte (TTFB)," *web.dev*, Google, 2024.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 130-133 p-ISSN: 2443-0986

ANALISA PENGARUH SUDUT KEMIRINGAN *SOLAR TRACKER SINGLE AXIS* PADA PLTS BERBASIS *IoT* DAN *REAL TIME CLOCK* TERHADAP DAYA KELUARAN

Fitriani Said[1], Abil Huda[2], Rezky Septiawan[3]

[1,2,3]*Universitas Borneo Tarakan, Kota Tarakan, Provinsi Kalimantan Utara, Indonesia*
[1]fitrianiubt22@gmail.com; fitriani@gmail.com
[2]abil@borneo.ac.id
[3]rezkyseptiawan45@gmail.com

Abstract*— Solar Power Plants (PLTS) are a renewable energy technology that converts solar radiation into electrical energy. The performance of photovoltaic (PV) modules is strongly influenced by the tilt angle of the panel relative to the sun's position. This study aims to analyze the effect of tilt angle variation on output power and to compare the performance of static PV modules with a single-axis solar tracker system integrated with the Internet of Things (IoT) and a Real Time Clock (RTC). The research was conducted by measuring light intensity, voltage, current, and output power from both systems. The static module was fixed at 0°, while the tracker module automatically adjusted its tilt angle to follow the sun's movement. Data were collected from 07:00 to 18:00 Central Indonesia Time (WITA) and analyzed to determine the optimal tilt angle. The results show that tilt angle significantly affects the output power, with the optimal range between 82.5° and 112.5°, peaking at 105°. The solar tracker system achieved higher efficiency compared to the static system, with improvements of 5.8% on the first day and 7.98% on the second day. These findings demonstrate that employing a solar tracker can enhance energy capture and optimize solar power utilization.

Keywords— Solar Power Plant, photovoltaic module, tilt angle, solar tracker, Internet of Things, Real Time Clock.

I**ntisari— Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu teknologi energi terbarukan yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Kinerja modul surya sangat dipengaruhi oleh sudut kemiringan panel terhadap arah datangnya sinar matahari. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi sudut kemiringan terhadap daya keluaran, serta membandingkan kinerja sistem statis dengan sistem solar tracker berbasis Internet of Things (IoT) dan Real Time Clock (RTC). Metode penelitian meliputi pengukuran intensitas cahaya, tegangan, arus, dan daya keluaran pada panel statis (sudut tetap) serta panel tracker (sudut mengikuti posisi matahari). Pengambilan data dilakukan dari pukul 07.00 hingga 18.00 WITA, kemudian hasil dibandingkan untuk menentukan sudut optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan berpengaruh signifikan terhadap daya keluaran, dengan sudut optimal pada rentang 82,5°–112,5° dan puncak di 105°. Sistem solar tracker terbukti lebih efisien dibandingkan panel statis, dengan peningkatan efisiensi 5,8% pada hari pertama dan 7,98% pada hari kedua. Dengan demikian, penggunaan solar tracker mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya secara lebih optimal.**

Kata Kunci— **Pembangkit Listrik Tenaga Surya, panel surya, sudut kemiringan, solar tracker, IoT, Real Time Clock.**

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat, sedangkan cadangan energi fosil semakin berkurang dan berdampak negatif bagi lingkungan. Oleh karena itu, energi terbarukan menjadi solusi yang perlu dikembangkan. Salah satu sumber energi terbarukan yang potensial adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), karena memanfaatkan sinar matahari yang melimpah di wilayah tropis seperti Indonesia, khususnya di Kota Tarakan yang mendapat paparan matahari hampir sepanjang tahun..

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh sudut kemiringannya. Panel dengan posisi tetap (statis) hanya menghasilkan daya maksimal pada waktu tertentu, biasanya siang hari, sedangkan pada pagi dan sore daya yang dihasilkan menurun. Untuk mengatasi hal ini digunakan solar tracker, yaitu sistem yang dapat menggerakkan panel agar mengikuti pergerakan matahari. Dengan begitu, panel dapat menerima sinar matahari secara lebih optimal sehingga daya yang dihasilkan lebih tinggi dan stabil sepanjang hari.

Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa sudut kemiringan berpengaruh besar terhadap daya keluaran panel surya, namun sebagian besar masih menggunakan sudut tetap atau penyesuaian manual. Penelitian ini berfokus pada analisis sudut kemiringan panel surya dengan membandingkan sistem statis dan sistem solar tracker berbasis Internet of Things (IoT) dan Real Time Clock (RTC). Integrasi IoT dan RTC memungkinkan pengaturan sudut secara otomatis dan pemantauan data secara real-time. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi PLTS serta menjadi referensi dalam pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

II. LANDASAN TEORI

A. Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) merupakan sistem yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui modul fotovoltaik (PV). Proses ini terjadi karena efek fotovoltaik pada material semikonduktor seperti silikon, di mana foton cahaya yang mengenai sel surya melepaskan elektron sehingga menghasilkan arus listrik. Sistem PLTS terbagi menjadi dua jenis, yaitu on-grid, yang terhubung langsung dengan

jaringan listrik, dan off-grid, yang bekerja mandiri untuk daerah terpencil.

B. Modul Surya

Modul surya tersusun atas sel-sel fotovoltaik yang mengubah radiasi matahari menjadi listrik arus searah (DC). Tegangan dan arus modul sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya dan suhu. Salah satu jenis yang umum digunakan adalah modul monocrystalline, yang memiliki efisiensi tinggi namun berharga lebih mahal. Kinerja modul surya dapat dihitung dengan beberapa persamaan penting, yaitu:

$$\mathrm{FF} = \frac{Vmp \,.\, Imp}{Voc \,.\, Isc} \quad (1)$$

$$P_{in} = \mathrm{G} \,.\, \mathrm{A} \quad (2)$$

$$\%\ gain = \frac{p_{tracker} - p_{statis}}{p_{statis}} \times 100\% \quad (3)$$

C. Prinsip Kerja Modul Surya dan Solar Tracker

Panel surya bekerja berdasarkan prinsip semikonduktor p–n junction yang menghasilkan arus ketika disinari cahaya matahari. Untuk meningkatkan penyerapan energi, digunakan solar tracker. Jenis single axis tracker menggerakkan panel dari timur ke barat mengikuti pergerakan harian matahari, sedangkan dual axis tracker bergerak pada dua sumbu. Penggunaan tracker terbukti meningkatkan daya keluaran dibandingkan panel statis dengan sudut tetap.

D. Komponen Pendukung

Dalam penelitian ini digunakan beberapa komponen utama, antara lain: Solar Charge Controller (SCC) untuk melindungi baterai dari overcharge, baterai untuk penyimpanan energi, mikrokontroler ESP32 untuk pemrosesan data dan koneksi IoT, Real Time Clock (RTC DS3231SN) untuk pengaturan waktu yang presisi, serta Blynk sebagai platform pemantauan data secara real-time melalui smartphone.

III. METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan **kuantitatif** karena fokus pada pengumpulan data yang objektif dan terukur untuk mengetahui intensitas cahaya matahari serta perbandingan daya keluaran modul surya statis dengan modul surya sistem solar tracker.

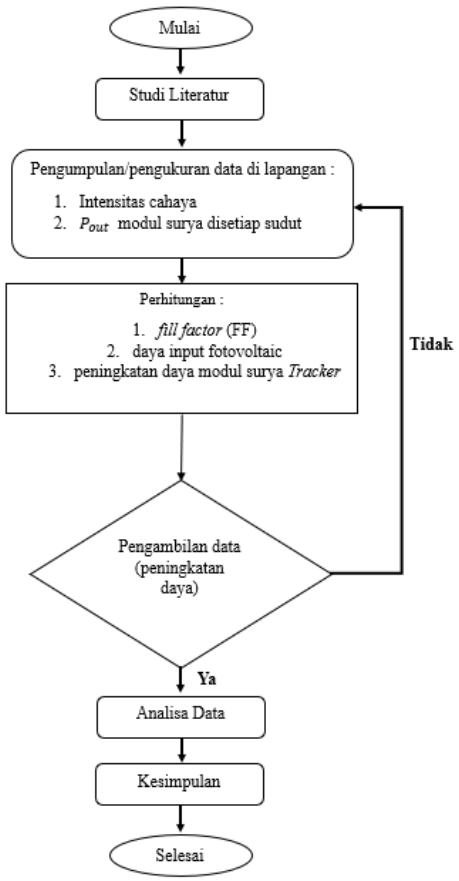
B. Lokasi dan Waktu

Penelitian dilaksanakan Universitas Borneo Tarakan di Fakultas Teknik selama kurang lebih enam bulan, termasuk tahap persiapan, perancangan sistem, serta pengolahan data. Pengambilan data lapangan dilakukan selama 14 hari berturut-turut, mulai pukul 07.00 hingga 18.00 WITA setiap harinya, untuk mendapatkan variasi kondisi intensitas matahari dari pagi hingga sore.

C. Alat Penelitian.

1. Multimeter Digital
2. Solar power mete
3. *Handphone*

D. Alur Metode Penelitian



Gambar 1. Flowchart Penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

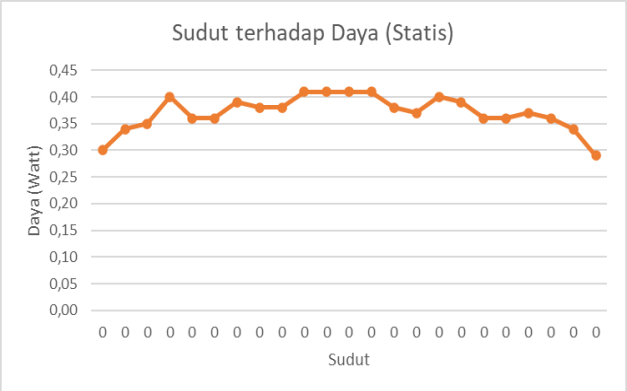
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data untuk mengetahui kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis Internet of Things (IoT) dan Real Time Clock (RTC). Fokus penelitian adalah menganalisis pengaruh sudut kemiringan pada sistem solar tracker single axis terhadap daya keluaran. Data diambil dari hasil pengukuran dua jenis modul surya, yaitu modul statis dan modul dengan solar tracker.

Tabel I
Data pengukuran Statis Tanggal 11 Juni

Waktu	**Sudut *Traker* (°)**	**Daya Statis (W)**	**Daya *Traker* (W)**
7:00	30	0,21	0,30
7:30	30	0,24	0,31
8:00	30	0,30	0,33
8:30	37,5	0,33	0,36
9:00	45	0,37	0,37
9:30	52,5	0,38	0,37
10:00	60	0,37	0,37
10:30	67,5	0,39	0,39
11:00	75	0,42	0,43
11:30	82,5	0,42	0,45
12:00	90	0,42	0,41

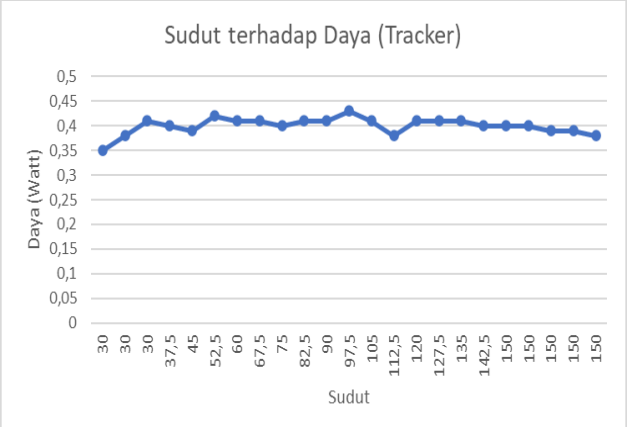
Tabel I
Data pengukuran Statis Tanggal 11 Juni

Waktu	Sudut *Traker* (°)	Daya Statis (W)	Daya *Traker* (W)
12:30	97,5	0,41	0,42
13:00	105	0,41	0,41
13:30	112,5	0,42	0,42
14:00	120	0,38	0,36
14:30	127,5	0,42	0,43
15:00	135	0,41	0,41
15:30	142,5	0,41	0,46
16:00	150	0,37	0,38
16:30	150	0,38	0,42
17:00	150	0,36	0,38
17:30	150	0,33	0,38
18:00	150	0.31	0,36



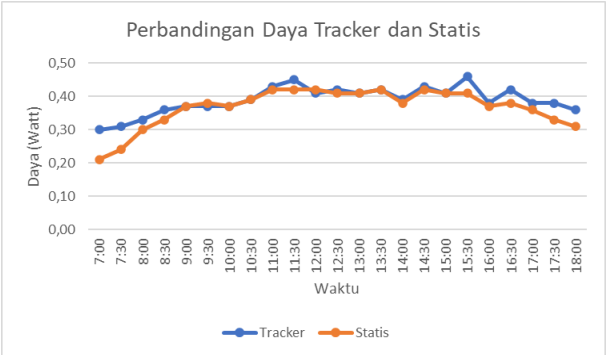
Gambar 2. Grafik daya terhadap sudut (Statis)

Grafik di atas menunjukkan bahwa sudut kemiringan panel statis tetap pada 0° sepanjang hari. Daya keluaran panel berfluktuasi antara 0,29 W hingga 0,44 W, dengan nilai terendah pada pukul 18.00 dan tertinggi pada pukul 14.30, sesuai dengan intensitas cahaya yang diterima. Karena sudut panel tidak mengikuti pergerakan matahari, penerimaan energi hanya optimal dalam waktu terbatas. Hal ini menyebabkan efisiensi penangkapan energi menurun, terutama pada pagi dan sore hari.



Gambar 3. Grafik daya terhadap sudut (Tracker)

Grafik di atas menunjukkan bahwa sistem tracker mengatur sudut panel antara 30° hingga 150° mengikuti pergerakan matahari. Daya yang dihasilkan stabil pada kisaran 0,35–0,44 W, meskipun sudut berubah drastis sepanjang hari. Berdasarkan Tabel I, daya mencapai 0,41 W pada sudut 30° (pagi) dan tetap tinggi di kisaran 0,38–0,40 W pada sudut 150° (sore). Hal ini menunjukkan bahwa penyesuaian sudut panel terhadap matahari mampu mempertahankan efisiensi penangkapan energi.



Gambar 4 Grafik Perbandingan daya Tracker dan Statis

Grafik di atas menunjukkan bahwa modul surya dengan sistem tracker menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan modul statis hampir sepanjang waktu pengamatan (07.00–18.00 WITA). Modul statis mencapai puncak daya sekitar pukul 12.00–13.00, lalu menurun. Sebaliknya, modul tracker menghasilkan daya lebih stabil karena mengikuti posisi matahari. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi sistem tracker 8,5% lebih tinggi dibandingkan sistem statis.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai "Analisa Pengaruh Sudut Kemiringan *Solar Tracker Single Axis* pada PLTS Berbasis IoT dan *Real Time Clock* terhadap Daya Keluaran", maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Pengaruh Sudut Kemiringan terhadap Daya Keluaran
   Sudut kemiringan panel surya berpengaruh signifikan terhadap daya keluaran. Pada sistem statis (0°), daya cenderung fluktuatif dan hanya optimal pada saat tertentu, terutama ketika posisi matahari tegak lurus. Sebaliknya, sistem tracker (30°–150°) menghasilkan daya lebih tinggi dan stabil sepanjang hari karena panel selalu menghadap matahari.
2. Perbandingan Daya Keluaran Sistem Statis dan Tracker
   Hasil pengukuran menunjukkan bahwa modul dengan solar tracker menghasilkan daya lebih besar dan efisien dibandingkan modul statis. Efisiensi sistem tracker tercatat ±8% lebih tinggi, dengan keunggulan mampu mengikuti pergerakan matahari dari timur ke barat. Dengan dukungan IoT dan Real Time Clock, sistem dapat menyesuaikan sudut secara otomatis sehingga lebih efektif dalam memanfaatkan energi surya.

REFERENSI

[1] Suhendar. (2022). Dasar-Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (D. Tesniyadi (ed.)).

[2] Abdul Kodir Albahar, & Muhammad Faizal Haqi. (2020). Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya (PV) Terhadap Keluaran Daya.

[3] Bagas Wicaksono. (2023). Analisis Daya Output Solar Tracker Panel Surya Dengan Penambahan Reflektor.

[4] Dian Furqani Alifyanti. (2016). Pengaturan tegangan pembangkit Listrik tenaga surya(Plts) 1000 Watt.

[5] Eko. (2022). Rancang Bangun Solar Tracker Berbasis Arduino Uno Dengan Menggunakan Metode Real Time Clock.

[6] Hariningrum, R., & Artikel, S. (2021). Marine Science And Technology Journal Analisa Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya100 Wp Terhadap Daya Listrik Info Articles Abstrak. Https://Doi.Org/10.31331/Maristec.V1i2

[7] Luthfian Ramdhan. (2022). Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap Ongrid Residensial Berkapasitas 46,6 Kwp Serpong, Tangerang.

[8] M Kiki Khusyairi. (2022). Analisis Pengaruh Variasi Sudut Kemiringan Terhadap Daya Yang Dihasilkan Oleh Panel Surya Di Desa Bungku Kecamatan Bajubang.

[9] Samsurizal, Andi Makkulau, & Christiono. (2018). Analisis Pengaruh Sudut Kemiringan Terhadap Arus Keluaran Pada Photovoltaic Dengan Menggunakan Regretion Quadratic Method. Jurnal Energi & Kelistrikan, 10(2).

[10] Sianipar, R. (2014). Dasar Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya. 11, 61–78.

[11] Wijayanti Sekarningrum. (2023). Analysis Of The Effect Of Tilt Angle On The Optimization Of Power Output Of 50 Wp Monocrystalline Solar Panel (Photovoltaic) Final Project.

[12] Yesta George Emes, Jemmy Charles Kewas, & Moh Fikri Pomalingo. (2022). Analisa Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Surya Kapasitas 10 Watt Peak (Wp) Tipe Monocrystalline Terhadap Daya Output.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 134-139 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

RANCANG BANGUN *SISTEM SOLAR TRACKER SINGLE AXIS* PADA PLTS BERBASIS IOT DENGAN METODE *REAL TIME CLOCK* UNTUK *REMOTE AREA*

Fitriani Said[1], Abil Huda[2], Ade Ikwan Abdillah[3], Muhammad Zainul F[4]

[1,2,3]*Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]fitriani@borneo.ac.id;fitrianiubt22@gmail.com
[2]abilhuda@gmail.com

Abstract*—The performance of photovoltaic systems is strongly affected by the fixed position of solar panels, causing variations in solar radiation reception due to changes in the sun's position throughout the day. This study aims to design and implement a single-axis solar tracker system based on ESP32 and Real Time Clock (RTC) to improve the output power of photovoltaic modules. The proposed system uses an RTC DS3231SN as a time reference for controlling the panel orientation, an ESP32 microcontroller as the main control unit, a servo motor as an actuator, and an INA219 sensor for monitoring electrical parameters integrated with the Blynk Internet of Things platform. The performance evaluation was conducted by comparing a solar tracker module with a fixed-angle solar panel system based on voltage, current, and power measurements. Experimental testing was carried out for 14 days to analyze the energy improvement produced by the tracking system. The results show that the implementation of the single-axis solar tracker increased the output energy compared to the static system, with an improvement range of 5.1% to 10.8% and an average increase of 7.0%. These results indicate that the proposed RTC-based solar tracker system can improve photovoltaic performance while providing real-time monitoring capability through IoT implementation.

***Keywords*—Solar Tracker; ESP32; Real Time Clock; Internet of Things; Photovoltaic System**

I*ntisari*—Kinerja sistem pembangkit listrik tenaga surya dipengaruhi oleh posisi tetap panel surya yang menyebabkan penerimaan radiasi matahari tidak selalu optimal akibat perubahan posisi matahari sepanjang hari. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dan Real Time Clock (RTC) untuk meningkatkan output daya modul surya. Sistem yang dikembangkan menggunakan RTC DS3231SN sebagai pengatur posisi panel berdasarkan waktu, ESP32 sebagai pengendali utama, motor servo sebagai penggerak mekanik, serta sensor INA219 untuk memantau parameter listrik yang terintegrasi dengan platform Internet of Things (IoT) Blynk. Pengujian dilakukan dengan membandingkan kinerja modul surya menggunakan solar tracker dengan modul surya statis berdasarkan parameter tegangan, arus, dan daya keluaran. Pengambilan data dilakukan selama 14 hari untuk mengetahui peningkatan energi yang dihasilkan oleh sistem tracking. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem solar tracker single axis mampu meningkatkan output energi dibandingkan sistem statis dengan peningkatan sebesar 5,1% hingga 10,8% dan rata-rata peningkatan sebesar 7,0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem solar tracker berbasis RTC dan IoT mampu meningkatkan performa modul surya serta menyediakan kemampuan monitoring parameter listrik secara real time.

***Kata Kunci*—Solar Tracker; ESP32; Real Time Clock; Internet of Things; Panel Surya**

I. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan utama dalam mendukung aktivitas masyarakat dan perkembangan sektor industri. Peningkatan kebutuhan energi serta keterbatasan sumber energi fosil mendorong pengembangan sumber energi terbarukan, salah satunya energi surya. Indonesia memiliki potensi energi surya yang besar karena memperoleh intensitas radiasi matahari sepanjang tahun, sehingga pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menjadi salah satu teknologi yang banyak dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi berkelanjutan [1].

Sistem PLTS memanfaatkan modul fotovoltaik untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik. Namun, performa modul fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh sudut datang cahaya matahari terhadap permukaan panel. Pada sistem pemasangan konvensional, panel surya umumnya dipasang pada sudut kemiringan tetap sehingga posisi panel tidak selalu berada pada kondisi optimal ketika matahari mengalami perubahan posisi sepanjang hari. Kondisi tersebut menyebabkan penurunan penerimaan radiasi matahari dan berpengaruh terhadap daya keluaran yang dihasilkan.

Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan penerimaan energi matahari adalah penerapan sistem solar tracker. Sistem ini memungkinkan panel surya bergerak mengikuti perubahan posisi matahari sehingga sudut penerimaan cahaya dapat dipertahankan lebih optimal. Beberapa penelitian telah mengembangkan sistem solar tracker berbasis mikrokontroler dan Internet of Things (IoT). Alfita dkk. merancang solar tracker four axis berbasis IoT untuk meningkatkan kemampuan pelacakan posisi matahari [2]. Syahab dkk. juga mengembangkan sistem solar tracker otomatis berbasis IoT untuk mendukung proses pengisian energi panel surya [3].

Selain itu, penelitian mengenai peningkatan performa panel menggunakan sistem tracking telah menunjukkan adanya peningkatan efisiensi dibandingkan sistem statis. Fauzi dkk. mengembangkan sistem solar tracking menggunakan Arduino Uno dan menunjukkan adanya peningkatan efisiensi panel surya setelah menggunakan mekanisme pelacakan [4]. Namun, beberapa penelitian sebelumnya masih banyak menggunakan pendekatan berbasis sensor intensitas cahaya atau konfigurasi tracking

yang lebih kompleks, sehingga diperlukan alternatif sistem yang lebih sederhana dengan mekanisme pengendalian yang stabil dan mudah diterapkan.

Penelitian ini mengembangkan sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dengan metode pengaturan posisi menggunakan Real Time Clock (RTC) DS3231SN. Berbeda dengan sistem berbasis sensor cahaya, metode yang digunakan menentukan perubahan sudut panel berdasarkan waktu pergerakan matahari yang telah diprogram. Sistem juga dilengkapi sensor INA219 dan platform Blynk sebagai media monitoring parameter listrik secara real time. Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan sistem tracking yang sederhana, efisien, dan mampu meningkatkan performa modul surya dibandingkan sistem statis.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dan RTC serta menganalisis peningkatan output daya modul surya melalui perbandingan antara sistem tracker dan sistem panel surya statis.

II. LANDASAN TEORI

A. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan modul fotovoltaik untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek fotovoltaik. Besarnya daya listrik yang dihasilkan modul surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti intensitas radiasi matahari, temperatur modul, karakteristik panel, serta sudut datang cahaya terhadap permukaan panel. Pada sistem PLTS konvensional, modul surya umumnya dipasang pada posisi tetap dengan sudut kemiringan tertentu. Konfigurasi tersebut menyebabkan penerimaan radiasi matahari tidak selalu optimal karena posisi matahari mengalami perubahan sepanjang hari [1].

B. Solar Tracker Single Axis

Solar tracker merupakan sistem mekanik dan kontrol yang digunakan untuk mengubah orientasi modul surya agar mengikuti posisi matahari. Berdasarkan jumlah arah pergerakannya, solar tracker dapat dibedakan menjadi single axis dan dual axis. Solar tracker single axis memungkinkan panel bergerak pada satu sumbu rotasi untuk menyesuaikan perubahan posisi matahari dari arah timur ke barat. Sistem ini memiliki konstruksi yang lebih sederhana dibandingkan dual axis sehingga lebih mudah diterapkan pada sistem PLTS skala kecil. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penerapan solar tracker mampu meningkatkan penerimaan energi dibandingkan sistem panel tetap karena posisi panel dapat dipertahankan lebih optimal terhadap arah datang cahaya matahari [2,3,4].

C. ESP32 dan Real Time Clock (RTC) sebagai Sistem Kendali

ESP32 merupakan mikrokontroler yang banyak digunakan dalam aplikasi Internet of Things karena memiliki kemampuan pemrosesan data dan fitur komunikasi nirkabel melalui koneksi Wi-Fi. Pada penelitian ini, ESP32 digunakan sebagai pusat pengolahan data dan pengendalian pergerakan motor servo berdasarkan informasi waktu.

Real Time Clock (RTC) DS3231SN digunakan sebagai referensi waktu untuk menentukan posisi sudut panel surya. Berbeda dengan metode berbasis sensor cahaya yang membaca kondisi lingkungan secara langsung, metode berbasis RTC mengatur pergerakan panel berdasarkan jadwal waktu matahari yang telah diprogram sebelumnya. Kombinasi ESP32 dan RTC memungkinkan sistem tracking memiliki kontrol posisi yang stabil serta mendukung integrasi monitoring berbasis IoT.

D. Internet of Things (IoT) pada Sistem Monitoring Energi

Internet of Things (IoT) merupakan konsep integrasi perangkat elektronik dengan jaringan komunikasi untuk melakukan pengumpulan, pengiriman, dan pemantauan data secara real time. Dalam sistem solar tracker ini, IoT digunakan untuk memonitor parameter kelistrikan panel surya melalui platform Blynk. Data yang diperoleh dari sensor INA219 berupa nilai tegangan dan arus dapat ditampilkan secara langsung sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan performa sistem tanpa melakukan pengukuran manual [3,10].

E. Parameter Performa Modul Surya

Kinerja modul surya dalam penelitian ini dievaluasi berdasarkan parameter tegangan, arus, dan daya keluaran. Daya listrik yang dihasilkan panel surya dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$P = V \times I \tag{1}$$

Keterangan:
P = Daya keluraran (W);
V = Tegangan (V);
I = Arus (A);

Perbandingan performa antara sistem tracker dan sistem statis dilakukan dengan menghitung peningkatan daya menggunakan persamaan:

$$Gain(\%) = \frac{P_{tracker} \times P_{statis}}{P_{statis}} \times 100\% \tag{2}$$

Parameter tersebut digunakan untuk mengetahui efektivitas penerapan solar tracker terhadap peningkatan output daya modul surya.

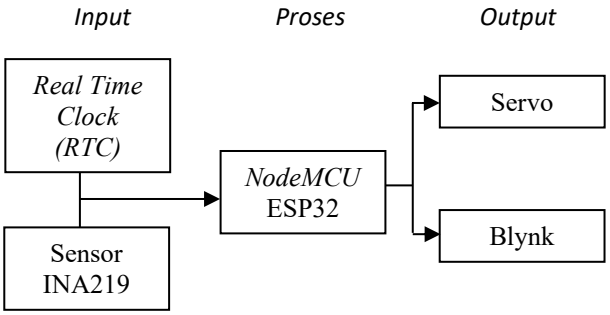
III. METODE PENELITIAN

A. Perancangan Sistem Solar Tracker

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan merancang dan menguji sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dan Real Time Clock (RTC). Sistem yang dirancang bertujuan untuk mengatur perubahan posisi panel surya berdasarkan referensi waktu matahari serta membandingkan performanya terhadap sistem panel surya statis.

Perancangan sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu sistem input, sistem proses, dan sistem output. Bagian input terdiri dari RTC DS3231SN sebagai sumber informasi waktu serta sensor INA219 sebagai pembaca parameter listrik panel surya. Data input diproses oleh ESP32 sebagai unit kontrol utama untuk menghasilkan perintah pergerakan motor servo. Bagian output berupa perubahan posisi panel surya melalui mekanisme single

axis tracker dan sistem monitoring parameter listrik menggunakan platform Blynk.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

B. Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian terdiri dari modul fotovoltaik, sistem kontrol, aktuator mekanik, sensor pengukuran, dan perangkat monitoring.

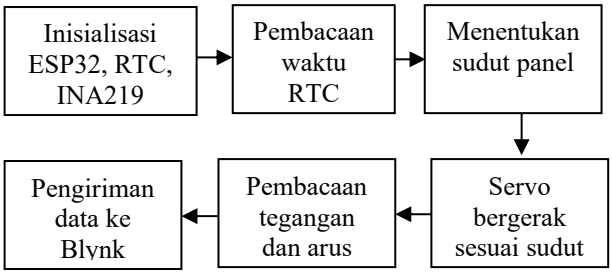
Tabel I
Spesifikasi komponen system

Komponen	Fungsi
Modul surya 50 WP	Menghasilkan energi listrik dari radiasi matahari
ESP32	Pengendali utama sistem
RTC DS3231SN	Memberikan referensi waktu pergerakan panel
Motor Servo RDS5160	Menggerakkan posisi panel surya
Sensor INA219	Mengukur tegangan dan arus keluaran
SCC PWM	Mengatur pengisian baterai
Baterai	Penyimpanan energi listrik
Blynk	Monitoring parameter sistem melalui IoT

Pada sistem mekanik, modul surya dipasang pada rangka yang memungkinkan pergerakan satu arah rotasi. Motor servo digunakan sebagai aktuator untuk mengubah sudut panel berdasarkan instruksi yang diberikan oleh ESP32.

C. Perancangan Sistem Kendali dan Monitoring IoT

Sistem kendali menggunakan metode pengaturan posisi berbasis waktu dengan RTC DS3231SN. RTC memberikan informasi waktu kepada ESP32 yang kemudian menentukan sudut pergerakan panel sesuai dengan program yang telah dibuat. Berbeda dengan sistem tracking berbasis sensor cahaya yang menentukan posisi berdasarkan intensitas radiasi secara langsung, metode RTC menentukan posisi panel berdasarkan perubahan waktu matahari. Pendekatan ini digunakan untuk menghasilkan sistem kontrol yang sederhana dan stabil.



Gambar 2. Diagram balok kerja system

Sensor INA219 digunakan untuk membaca nilai tegangan dan arus keluaran modul surya. Data tersebut dikirim melalui ESP32 dan ditampilkan pada aplikasi Blynk sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara real time.

D. Metode Pengujian dan Analisis Data

Pengujian dilakukan dengan membandingkan performa dua konfigurasi sistem, yaitu:

1. Modul surya menggunakan solar tracker single axis.
2. Modul surya statis dengan sudut kemiringan tetap 10°.

Pengambilan data dilakukan selama 14 hari dengan parameter pengukuran:

1. tegangan keluaran (V),
2. arus keluaran (A),
3. daya keluaran (W),
4. sudut posisi panel.

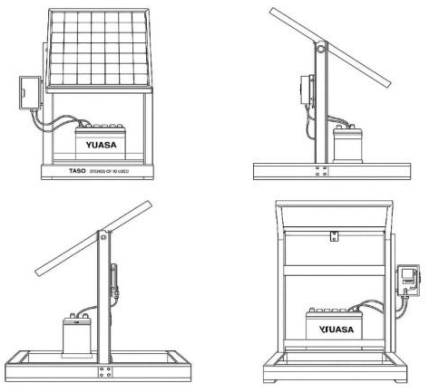
Nilai daya keluaran dihitung menggunakan persamaan (1) dengan perbandingan peningkatan performa sistem tracker terhadap sistem statis dihitung menggunakan persamaan (2). Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penerapan sistem solar tracker terhadap peningkatan output daya modul surya.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Implementasi Sistem Solar Tracker

Penelitian ini menghasilkan sebuah prototype solar tracker single axis berbasis ESP32 dan Real Time Clock (RTC) DS3231SN yang berfungsi untuk mengatur perubahan posisi modul surya berdasarkan waktu yang telah diprogram. Sistem terdiri dari bagian mekanik berupa rangka penyangga dan mekanisme rotasi satu sumbu, serta bagian elektronik yang terdiri dari ESP32, RTC DS3231SN, motor servo RDS5160, sensor INA219, solar charge controller, baterai, dan modul komunikasi IoT.

Prototype dirancang agar modul surya dapat mengalami perubahan sudut orientasi mengikuti perubahan posisi matahari dari arah timur menuju barat. Pergerakan panel dikendalikan oleh ESP32 berdasarkan data waktu yang diperoleh dari RTC. Berbeda dengan sistem tracker berbasis sensor cahaya yang menentukan posisi berdasarkan perubahan intensitas radiasi secara langsung, sistem yang dikembangkan menggunakan pendekatan berbasis waktu sehingga perubahan sudut panel dilakukan berdasarkan jadwal pergerakan matahari yang telah ditentukan.



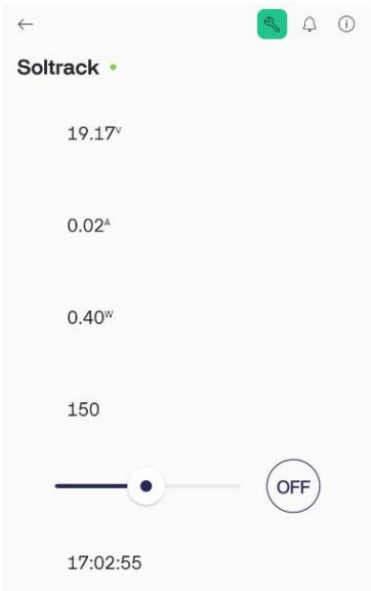
Gambar 3. Design prototype sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dan RTC

Berdasarkan hasil implementasi, seluruh komponen dapat terintegrasi dengan baik. ESP32 mampu menjalankan proses pengolahan data waktu dari RTC serta memberikan sinyal kendali kepada motor servo untuk mengubah posisi panel. Sistem monitoring juga berhasil diintegrasikan menggunakan sensor INA219 dan platform Blynk sehingga parameter listrik panel dapat dipantau secara real time.

B. Pengujian Sistem Kendali dan Monitoring IoT

Sebelum dilakukan pengujian performa energi, sistem terlebih dahulu diuji untuk memastikan fungsi setiap bagian berjalan sesuai rancangan. Pengujian meliputi respon RTC dalam memberikan informasi waktu, respon motor servo terhadap perintah ESP32, pembacaan sensor INA219, serta pengiriman data menuju aplikasi Blynk.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa RTC DS3231SN mampu memberikan referensi waktu yang digunakan sebagai dasar perubahan posisi panel. Motor servo dapat bergerak mengikuti sudut yang telah diprogram pada mikrokontroler. Sensor INA219 juga mampu membaca parameter tegangan dan arus keluaran panel surya yang kemudian dikirimkan melalui ESP32 menuju aplikasi monitoring.



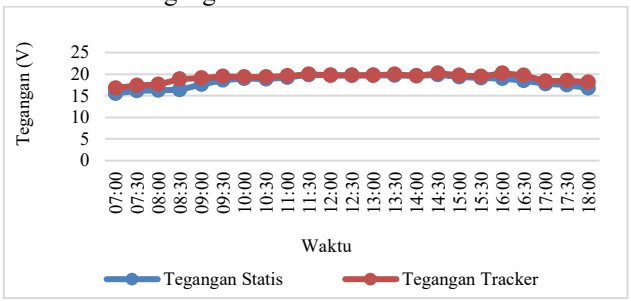
Gambar 4. Tampilan Monitoring Parameter Listrik pada Platform Blynk

Kemampuan monitoring berbasis IoT memberikan kemudahan dalam proses pengamatan performa sistem karena data kelistrikan dapat dipantau tanpa melakukan pengukuran secara langsung pada perangkat.

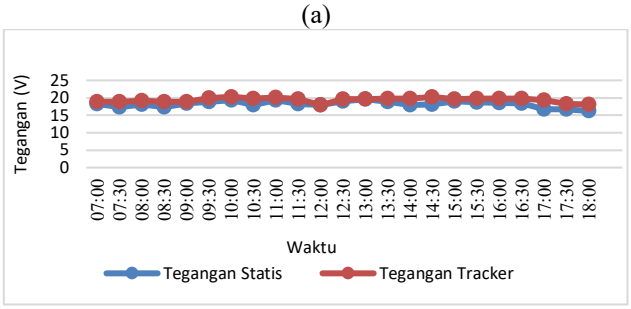
C. Pengujian Perbandingan Panel Tracker dan Panel Statis

Pengujian utama dilakukan dengan membandingkan dua konfigurasi modul surya, yaitu modul surya menggunakan solar tracker single axis dan modul surya statis dengan sudut kemiringan tetap sebesar 10°. Pengujian dilakukan selama 14 hari dengan pengambilan data berdasarkan parameter tegangan, arus, daya keluaran, dan sudut posisi panel. Data hasil pengukuran digunakan untuk mengetahui pengaruh sistem tracking terhadap peningkatan performa modul surya.

1. Analisis Tegangan



(a)

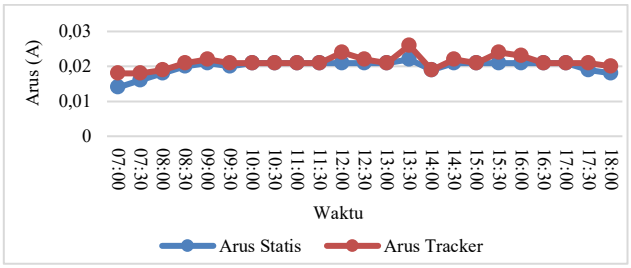


(b)

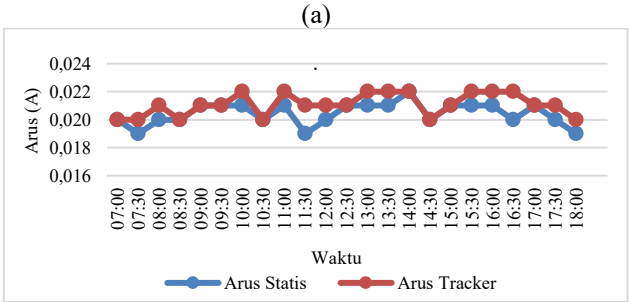
Gambar 5. (a) Grafik perbandingan tegangan 11/06/26, (b) Grafik perbandingan tegangan 12/06/26

Berdasarkan hasil pengukuran, sistem solar tracker menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan sistem statis pada sebagian besar waktu pengujian. Perbedaan tegangan paling terlihat pada pagi dan sore hari ketika posisi matahari belum tegak terhadap permukaan panel statis. Peningkatan tegangan terjadi karena sistem tracker mampu mengubah orientasi panel sehingga sudut datang radiasi matahari terhadap permukaan modul menjadi lebih optimal.

2. Analisis arus



(a)



(b)

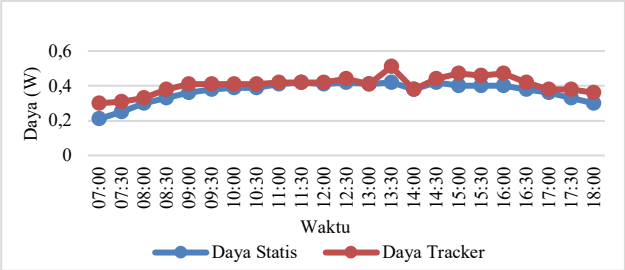
Gambar 6. (a) Grafik perbandingan arus 11/06/26, (b) Grafik perbandingan arus 12/06/26

Parameter arus menunjukkan kecenderungan yang sama dengan tegangan. Sistem tracker menghasilkan nilai arus yang lebih tinggi karena panel mampu menerima radiasi matahari dengan orientasi yang lebih sesuai.

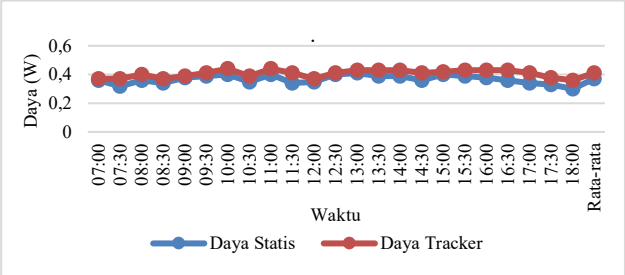
Perubahan arus sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterima permukaan panel. Ketika posisi panel tidak sesuai dengan arah matahari, energi yang diterima modul akan berkurang sehingga arus keluaran mengalami penurunan.

D. Analisis Daya Keluaran Sistem

Daya keluaran menjadi parameter utama untuk mengevaluasi keberhasilan sistem solar tracker. Nilai daya dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan (1).



(a)



(b)

Gambar 7. (a) Grafik perbandingan daya 11/06/26, (b) Grafik perbandingan daya 12/06/26

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa panel menggunakan sistem tracker menghasilkan daya yang lebih tinggi dibandingkan panel statis. Perbedaan performa paling terlihat pada kondisi pagi dan sore hari karena panel statis mengalami penurunan penerimaan cahaya akibat perubahan sudut matahari.

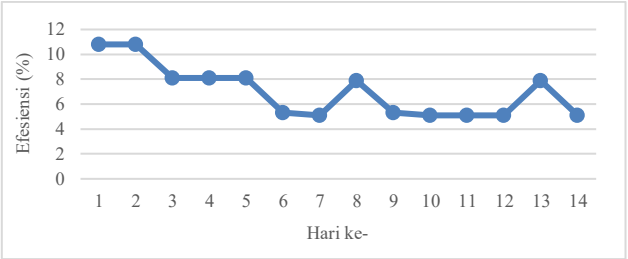
E. Analisis Peningkatan Daya Sistem Tracker

Untuk mengetahui efektivitas sistem yang dikembangkan, dilakukan perhitungan peningkatan daya menggunakan persamaan (2).

Hasil pengujian selama 14 hari menunjukkan bahwa sistem solar tracker mampu menghasilkan daya lebih tinggi dibandingkan sistem panel statis.

Tabel II
Parameter Utama Rancangan Interkoneksi

Hari Pengujian	Gain Peningkatan Daya (%)
1	10,8
2	10,8
3	8,1
4	8,1
5	8,1
6	5,3
7	5,1
8	7,9
9	5,3
10	5,1
11	5,1
12	5,1
13	7,9
14	5,1



Gambar 8. Grafik peningkatan daya sistem tracker

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, sistem tracker memberikan peningkatan daya dengan rentang 5,1% hingga 10,8%, dengan rata-rata peningkatan sebesar 7,0%. Variasi nilai peningkatan dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan selama pengujian, seperti intensitas radiasi matahari, kondisi awan, serta temperatur permukaan panel.

F. Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan solar tracker single axis berbasis RTC mampu meningkatkan performa modul surya dibandingkan sistem statis. Peningkatan rata-rata sebesar 7,0% menunjukkan bahwa metode pengaturan posisi berbasis waktu dapat menjadi alternatif dalam meningkatkan penerimaan energi matahari. Hasil ini sejalan dengan penelitian Fauzi dkk. yang menunjukkan bahwa sistem tracking mampu meningkatkan efisiensi panel surya dibandingkan sistem tetap [4]. Selain itu, penelitian Alfita dkk. menunjukkan bahwa implementasi solar tracker berbasis IoT dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam melakukan pengaturan posisi panel [2]. Berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan sensor intensitas cahaya sebagai metode pelacakan, penelitian ini menggunakan RTC sebagai referensi waktu sehingga sistem memiliki rancangan yang lebih sederhana dengan tetap mampu meningkatkan output daya panel surya.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem solar tracker single axis berbasis ESP32 dan Real Time Clock (RTC) DS3231SN berhasil dirancang dan diimplementasikan untuk mengatur perubahan posisi modul surya berdasarkan referensi waktu. Integrasi antara ESP32, RTC, motor servo, sensor INA219, dan platform Blynk mampu bekerja sesuai rancangan, sehingga sistem dapat melakukan pengendalian posisi panel serta monitoring parameter listrik secara real time.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan sistem solar tracker mampu meningkatkan performa modul surya dibandingkan dengan sistem panel statis pada sudut kemiringan tetap 10°. Berdasarkan pengujian selama 14 hari, peningkatan daya yang diperoleh berada pada rentang 5,1% hingga 10,8% dengan rata-rata peningkatan sebesar 7,0%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa mekanisme tracking satu sumbu mampu mempertahankan posisi panel lebih optimal terhadap perubahan posisi

matahari sehingga menghasilkan output daya yang lebih tinggi.

Sistem solar tracker berbasis RTC yang dikembangkan dapat menjadi alternatif metode pengendalian posisi panel surya dengan rancangan yang sederhana dan terintegrasi IoT. Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan meningkatkan akurasi pergerakan panel, menambahkan parameter lingkungan seperti intensitas cahaya dan temperatur, serta melakukan pengujian pada kondisi geografis dan kapasitas panel yang berbeda

REFERENSI

[1] S. Rahmawati, A. Supriyadi, and B. Y. Hadi, "Optimasi jaringan distribusi untuk menjamin stabilitas sistem tenaga listrik," *Jurnal Elektro*, vol. 12, no. 3, pp. 45–52, Mar. 2019.

[2] Afif, F., & Martin, A. (2022). Tinjauan Potensi dan Kebijakan Energi Surya di Indonesia. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, dan Material*, 6(1), 43–52.

[3] Alfita, R., Ibadillah, A. F., Rahmawati, D., Kusuma, M. K. H., Kurniawan, A., Nahari, R. V., & Pramudia, M. (2020). Perancangan Solar Tracker Four Axis Berbasis Internet of Things (IoT). *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 8(2), 404. https://doi.org/10.26760/elkomika.v8i2.404

[4] Syahab, A. S., Romadhon, H. C., & Hakim, M. L. (2019). Rancang Bangun Solar Tracker Otomatis Pada Pengisian Energi Panel Surya Berbasis Internet of Things. *Jurnal Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, 6(2), 21–29. https://doi.org/10.36754/jmkg.v6i2.120

[5] Fauzi, K. W., Arfianto, T., & Taryana, N. (2018). Perancangan dan Realisasi Solar Tracking System untuk Peningkatan Efisiensi Panel Surya Menggunakan Arduino Uno. *TELKA - Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, 4(1), 63–74. https://doi.org/10.15575/telka.v4n1.63-74

[6] Samsurizal, Awaluddin, M., Azzahra, S., Pasra, N., & Makkulau, A. (2024). Article Text-1685-1-10-20240903., 18(03).

[7] Nurdiansyah, M., Sinurat, E. C., Bakri, M., Ahmad, I., & Prasetyo, A. B. (2020). Sistem Kendali Rotasi Matahari Pada Panel Surya Berbasis Arduino Uno. *JTIKOM*, 1(2).

[8] Sitorus, B., Tumaliang, H., & Patras, L. S. (2020). Perancangan Panel Surya Pelacak Arah Matahari Berbasis Arduino Uno. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, 5(3), 1–12.

[9] Simatupang, S., Susilo, B., Hermanto, B., & Korespondensi, P. (2013). Rancang Bangun dan Uji Coba Solar Tracker pada Panel Surya Berbasis Mikrokontroler ATMega16. *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 1(1), 55–59.

[10] Hilal, A., & Manan, S. (2015). Pemanfaatan Motor Servo Sebagai Penggerak CCTV untuk Melihat Alat-Alat Monitor dan Kondisi Pasien di Ruang ICU. *Gema Teknologi*, 17(2), 95–99. https://doi.org/10.14710/gt.v17i2.8924

[11] Wikantama, P. T., & Puspitasari, R. (2023). Perancangan Perangkat Pengukur Ketinggian Banjir dengan ESP32 dan Telegram Berbasis IoT. *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, 13(02), 107–114. https://doi.org/10.47709/elektriese.v13i02.3108

[12] Yasmini, L. P. B., Valentina, D. N., & Risha, N. (2025). Effectiveness of Monocrystalline Solar Panel Tilt Angle to Output Power and Efficiency: Case Study for Singaraja-Bali. *JST (Jurnal Sains dan Teknologi)*, 14(1), 168–177. https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v14i1.94203

[13] Aprilianti, K. P., Baghta, N. A., Aryani, D. R., Jufri, F. H., & Utomo, A. R. (2020). Potential Assessment of Solar Power Plant: A Case Study of a Small Island in Eastern Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 599(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/599/1/012026

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 140-145 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

ANALISIS KONTINGENSI N-1 PADA SISTEM DISTRIBUSI 20 kV PT PLN (PERSERO) SEBATIK

Patria Julianto[1], Niko Juliansyah[2]

[1,2]*Tenknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]patria@borneo.ac.id
[2]njuliansyah94@gmail.com

Abstract—This paper evaluates N-1 security of the 20 kV distribution system of PT PLN (Persero) Sebatik under generator and feeder-line outages. The network was modeled in ETAP PowerStation 19.0.1 and solved using Newton–Raphson load flow at peak-load conditions. Five source-side contingencies (Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, and the GH Nunukan interconnection) and five feeder contingencies were simulated. The base case supplied approximately 4.061 MW and 2.620 MVAr of load with reported losses of 0.050 MW and 0.170 MVAr. Generator outages caused significant redistribution: the loss of Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, and Mitsubishi 3 produced generator loadings of 154%, 164%, and 377%, respectively, whereas the MAN 8 outage did not produce a reported generator overload. The most critical voltage condition occurred when GH Nunukan was disconnected, with a minimum bus voltage of 17.86 kV (0.8934 p.u.). Feeder outages did not materially depress the energized-bus voltage profile but disconnected radial loads; the largest lost load occurred on feeder 1 (cable 28), reaching 575.2 kW. The results indicate that Sebatik N-1 vulnerability is dominated by limited generation reserve and radial feeder topology, so reinforcement should prioritize source reserve, critical feeder transfer capability, and alternative supply paths.

Keywords: Contingency Analysis, Distribution System, N-1 Security, ETAP, Undervoltage, Overload.

Intisari—Penelitian ini mengevaluasi keamanan N-1 pada sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik akibat lepasnya pembangkit dan saluran penyulang. Sistem dimodelkan pada ETAP PowerStation 19.0.1 dan dihitung menggunakan aliran daya Newton–Raphson pada kondisi beban puncak. Lima kontingensi sisi sumber (Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, dan interkoneksi GH Nunukan) serta lima kontingensi penyulang disimulasikan. Pada kondisi normal, beban sistem sebesar sekitar 4,061 MW dan 2,620 MVAr dengan rugi-rugi yang dilaporkan sebesar 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, dan Mitsubishi 3 menimbulkan pembebanan generator masing-masing 154%, 164%, dan 377%, sedangkan pelepasan MAN 8 tidak menimbulkan overload generator yang dilaporkan. Kondisi tegangan paling kritis terjadi ketika GH Nunukan dilepas dengan tegangan minimum 17,86 kV (0,8934 p.u.). Kontingensi penyulang tidak menurunkan secara signifikan tegangan pada bagian sistem yang tetap bertegangan, tetapi memutus beban pada konfigurasi radial. Kehilangan beban terbesar terjadi pada feeder 1 (kabel 28) sebesar 575,2 kW. Hasil ini menunjukkan bahwa kerentanan N-1 sistem Sebatik terutama ditentukan oleh keterbatasan cadangan pembangkitan dan topologi penyulang radial, sehingga penguatan cadangan sumber, kemampuan transfer penyulang kritis, dan jalur suplai alternatif perlu diprioritaskan.

Kata Kunci: Analisis Kontingensi, Sistem Distribusi, Keamanan N-1, ETAP, Undervoltage, Overload.

I. PENDAHULUAN

Keandalan dan keamanan operasi merupakan aspek penting pada sistem tenaga listrik karena pelepasan satu elemen dapat mengubah aliran daya, profil tegangan, serta tingkat pembebanan peralatan. Pada jaringan distribusi, dampaknya dapat lebih langsung terhadap kontinuitas pelayanan, terutama pada penyulang radial dengan jalur suplai alternatif yang terbatas. Studi pada jaringan distribusi 20 kV ULP Cibitung menunjukkan bahwa kontingensi dapat dievaluasi melalui perubahan aliran daya, tegangan, dan performance index [1]. Kajian pada sistem Kalimantan 500 kV serta interkoneksi Sulawesi Utara–Gorontalo juga menunjukkan bahwa pelepasan elemen tunggal dapat menimbulkan overload dan undervoltage yang perlu diidentifikasi sebelum gangguan aktual terjadi [2], [3]. Pendekatan AC power flow dan performance index masih digunakan pada penelitian kontingensi terkini untuk mengurutkan tingkat keparahan gangguan [4].

Secara klasik, contingency analysis merupakan bagian inti dari static security assessment. Prosesnya mencakup pembentukan daftar kontingensi, simulasi kondisi pascagangguan, identifikasi pelanggaran batas operasi, serta pemeringkatan kejadian berdasarkan tingkat keparahan [5], [6]. Perkembangan kajian keamanan sistem menunjukkan dua arah utama, yaitu pendekatan deterministik dan berbasis risiko; untuk studi perencanaan dan operasi yang berfokus pada N-1, pendekatan deterministik tetap relevan karena mampu menunjukkan secara langsung konsekuensi hilangnya satu komponen [7]–[9]. Untuk sistem berskala besar, screening dapat dipercepat dengan line outage distribution factor dan pendekatan graf, sedangkan penyelesaian AC tetap dibutuhkan ketika perubahan tegangan dan daya reaktif menjadi perhatian [10]–[12].

Perhitungan aliran daya merupakan fondasi analisis kontingensi. Metode Newton–Raphson memiliki sifat konvergensi yang kuat dan telah lama digunakan pada studi aliran daya AC [13], sedangkan metode fast-decoupled dikembangkan untuk mempercepat kalkulasi berulang termasuk studi kontingensi [14]. Perangkat lunak analisis sistem tenaga modern mengimplementasikan formulasi aliran daya AC yang serupa untuk studi operasi tunak [15]. Pada jaringan distribusi radial atau weakly meshed, karakteristik rasio R/X dan struktur topologi juga mendorong pengembangan metode khusus seperti

compensation-based power flow, metode Haque, direct approach, dan three-phase power flow [16]–[19].

Karakteristik sistem distribusi, pemodelan saluran, regulasi tegangan, serta aspek keandalan dibahas secara komprehensif dalam literatur distribusi dan keandalan sistem tenaga [20]–[23]. Dari sisi operasi, cadangan pembangkitan, kendala aliran daya, dan respons sistem terhadap pelepasan unit juga menjadi bagian penting dari keamanan operasi [24], [25]. Pada konteks Indonesia, studi rugi-rugi jaringan distribusi menunjukkan bahwa impedansi penghantar dan kondisi pembebanan berpengaruh langsung terhadap rugi daya dan jatuh tegangan [26]-[31]. Untuk sistem yang diteliti, tegangan nominal 20 kV sesuai dengan tingkat tegangan standar distribusi menengah PLN [32].

Sistem kelistrikan Sebatik memiliki kombinasi pembangkit lokal, interkoneksi dengan sistem Nunukan, serta penyulang 20 kV yang melayani beban tersebar. Kondisi ini menjadikan pelepasan unit pembangkit atau penyulang sebagai skenario penting untuk diuji. Penelitian ini bertujuan: (1) mengevaluasi kondisi dasar sistem pada beban puncak; (2) menganalisis dampak kontingensi N-1 pembangkit dan saluran terhadap tegangan, pembebanan sumber, dan kehilangan beban; serta (3) memvalidasi sebagian hasil simulasi melalui perhitungan manual. Hasil setiap skenario dirangkum menggunakan indikator kritis yang seragam sehingga tingkat kerentanan sistem dapat dibandingkan secara langsung.

II. METODE PENELITIAN

A. Data Sistem dan Pemodelan

Data penelitian terdiri atas data pembangkit, saluran, beban, serta single-line diagram sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik. Model dibangun pada ETAP PowerStation 19.0.1. Analisis dilakukan pada kondisi steady-state beban puncak malam karena kondisi tersebut memberikan tekanan operasi terbesar pada sumber dan penyulang. Sumber yang dimodelkan mencakup Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, serta suplai dari GH Nunukan. Lima penyulang utama dianalisis sebagai feeder 1 sampai feeder 5.

B. Formulasi Aliran Daya dan Indikator

Untuk setiap kondisi operasi, keseimbangan daya kompleks pada bus i dinyatakan sebagai:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Bi} - S_{Li} \quad (1)$$

dengan S_i adalah injeksi daya kompleks bersih pada bus i, S_{Gi} daya dari sumber, S_{Bi} daya beban, dan S_{Li} bagian rugi-rugi yang dialokasikan pada elemen terkait.
Dalam bentuk komponen aktif dan reaktif:

$$P_i + jQ_i = (P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Bi} + jQ_{Bi}) - (P_{Li} + jQ_{Li}) \quad (2)$$

Aliran daya Newton–Raphson diselesaikan secara iteratif melalui hubungan mismatch daya dan koreksi variabel keadaan:

$$\begin{bmatrix}\Delta P \\ \Delta Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta\delta \\ \Delta V\end{bmatrix} \quad (3)$$

Rugi daya aktif dan reaktif pada saluran tiga fasa dihitung menggunakan hubungan dasar berikut, dengan R dan X menyatakan parameter penghantar per satuan panjang, I arus saluran, dan ℓ panjang saluran dalam satuan yang konsisten:

$$P_{\text{loss}} = 3I^2R\ell \quad (4)$$

$$Q_{\text{loss}} = 3I^2X\ell \quad (5)$$

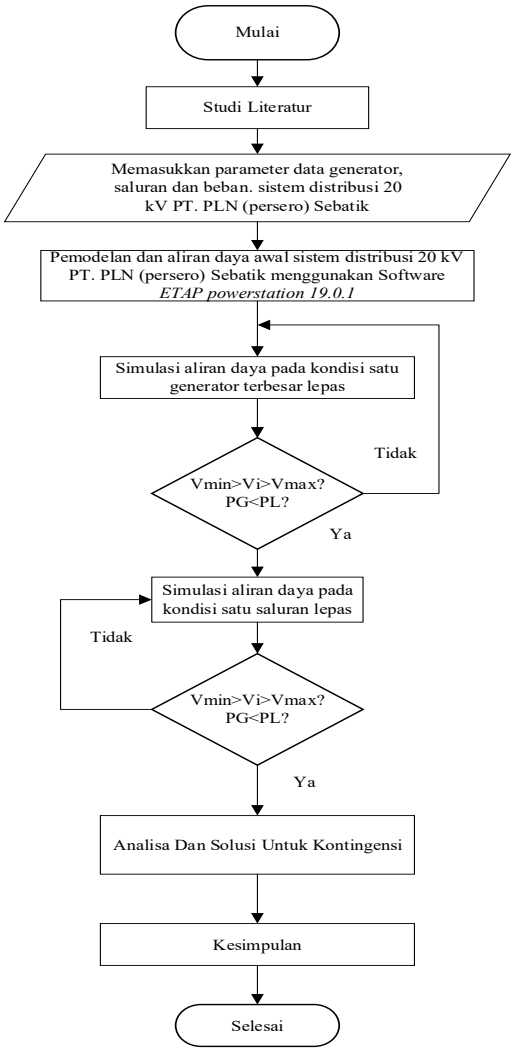
Jatuh tegangan dan persentasenya ditentukan dari tegangan sisi kirim V_s dan sisi terima V_r:

$$\Delta V = |V_s - V_r| \quad (6)$$

$$\Delta V_{\%} = \frac{|V_s - V_r|}{|V_s|} \times 100\% \quad (7)$$

Indikator yang dibandingkan untuk setiap skenario adalah tegangan minimum bus, pembebanan generator, rugi-rugi daya, dan beban yang terputus. Untuk screening penelitian ini digunakan batas evaluasi tegangan minimum 0,90 p.u.; nilai di bawah batas tersebut ditandai sebagai undervoltage untuk kebutuhan pembahasan hasil.

C. Skenario Kontingensi N-1



Gambar 1. Diagram alir penelitian dan evaluasi kontingensi N-1.

Kontingensi sumber dilakukan dengan melepas secara bergantian Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, MAN 8, dan GH Nunukan. Kontingensi saluran dilakukan dengan melepas satu elemen utama pada masing-masing feeder, yaitu cable 28 (feeder 1), cable 169 (feeder 2), cable 107 (feeder 3), cable 143 (feeder 4), dan cable 187 (feeder 5). Setiap skenario diselesaikan kembali menggunakan load flow sehingga perubahan kondisi pascagangguan dapat dibandingkan terhadap base case.

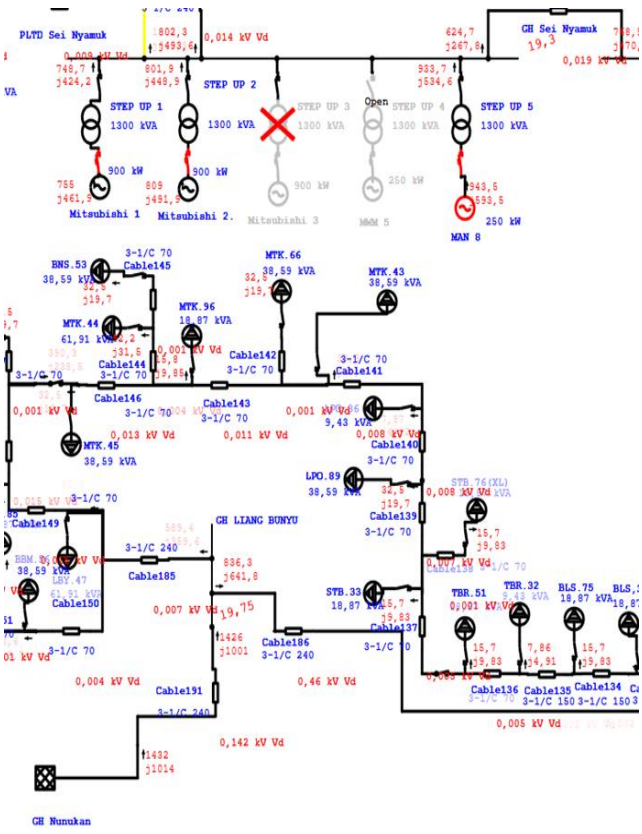
D. Validasi Perhitngan

Validasi dilakukan pada saluran terpilih dengan membandingkan hasil ETAP terhadap perhitungan manual rugi-rugi dan jatuh tegangan. Perbandingan menggunakan data arus, parameter saluran, serta tegangan sisi kirim dan terima yang sama. Karena keluaran laporan ETAP yang tersedia menampilkan tegangan bus dengan pembulatan satu desimal, perbedaan sangat kecil pada jatuh tegangan dapat muncul ketika perhitungan manual menggunakan angka yang telah dibulatkan.

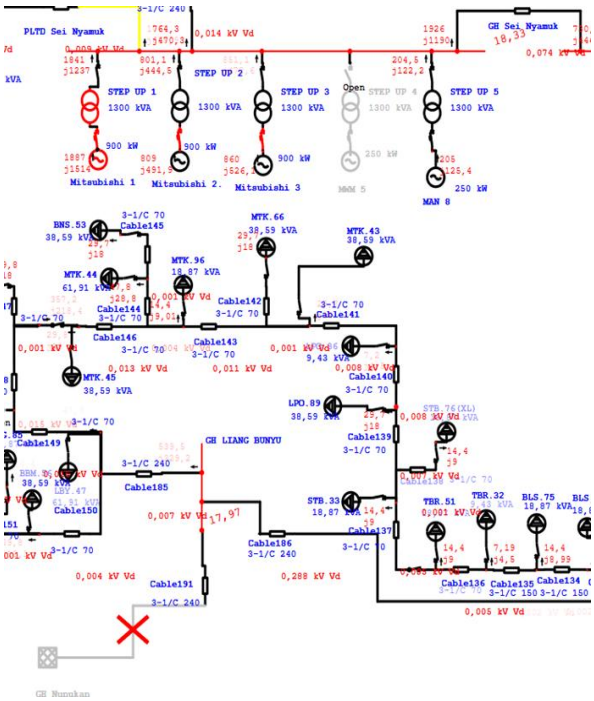
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Operasi Normal

Pada kondisi beban puncak, hasil simulasi base case menunjukkan total beban sebesar 4,061 MW dan 2,620 MVAr. Daya dari swing source dilaporkan sebesar 1,432 MW dan 1,014 MVAr, sedangkan sumber non-swing sebesar 2,639 MW dan 1,605 MVAr. Rugi-rugi total yang tercatat pada model adalah 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Nilai tersebut digunakan sebagai acuan untuk menilai perubahan setelah kontingensi.



(a)



(b)

Gambar 2. Kondisi kontingensi sumber kritis: (a) Mitsubishi 3 dilepas; (b) GH Nunukan dilepas.

Tabel I
Ringkasan kondisi dasar sistem pada beban puncak

Besaran	P (MW)	Q (MVAr)	Keterangan
Swing source	1,432	1,014	Base case
Sumber non-swing	2,639	1,605	Base case
Total beban	4,061	2,620	Beban puncak
Rugi-rugi sistem	0,050	0,170	Hasil ETAP

B. Kontingensi Pembangkit dan Interkoneksi

Pelepasan unit pembangkit menyebabkan redistribusi daya yang besar pada unit yang tersisa. Tiga skenario pertama menimbulkan overload pada generator lain, yaitu 154% ketika Mitsubishi 1 dilepas, 164% ketika Mitsubishi 2 dilepas, dan 377% ketika Mitsubishi 3 dilepas. Kondisi ini memperlihatkan bahwa cadangan kapasitas sumber lokal belum cukup untuk memenuhi kriteria N-1 tanpa pelanggaran pembebanan pada sebagian skenario. Sebaliknya, pelepasan MAN 8 tidak menghasilkan overload generator yang dilaporkan.

Tabel II
Ringkasan hasil kontingensi sumber

Elemen dilepas	Vmin (kV)	Vmin (p.u.)	Overload kritis
Mitsubishi 1	18,75	0,9374	Mitsubishi 2 = 154%
Mitsubishi 2	18,67	0,9339	Mitsubishi 3 = 164%
Mitsubishi 3	19,07	0,9537	MAN 8 = 377%
MAN 8	19,09	0,9545	Tidak dilaporkan
GH Nunukan	17,86	0,8934	Tidak dilaporkan

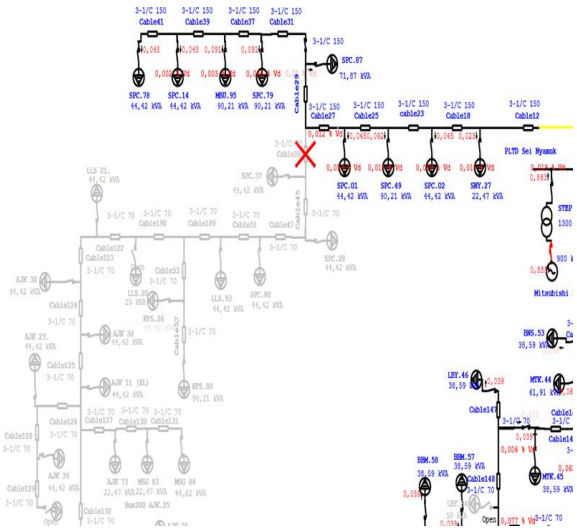
Dari sisi tegangan, pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, Mitsubishi 3, dan MAN 8 masih menghasilkan tegangan minimum di atas 0,90 p.u. untuk kriteria screening penelitian ini. Skenario yang paling kritis adalah pelepasan GH Nunukan karena tegangan minimum turun menjadi 17,86 kV atau 0,8934 p.u. Dengan demikian, skenario GH Nunukan merupakan kondisi sumber paling kritis dan menunjukkan indikasi undervoltage terhadap batas evaluasi 0,90 p.u.

C. Kontingensi Saluran Penyulang

Berbeda dengan kontingensi pembangkit, pelepasan saluran pada tiap feeder terutama berdampak pada hilangnya beban di bagian radial yang terisolasi. Pada bagian sistem yang tetap bertegangan, perubahan tegangan tidak dilaporkan signifikan. Dampak terbesar terjadi pada cable 28 feeder 1 dengan kehilangan beban 575,2 kW dan kehilangan daya generator 592,8 kW. Feeder 5 memberikan kehilangan beban paling kecil, yaitu 112,9 kW.

Tabel III
Dampak kontingensi saluran pada masing-masing feeder

Feeder	Saluran	ΔP gen. (kW)	Beban lepas (kW)	Bus lepas
1	Cable 28	592,8	575,2	16
2	Cable 169	306,8	297,8	8
3	Cable 107	351,0	337,0	10
4	Cable 143	263,4	260,2	12
5	Cable 187	117,3	112,9	4



Gambar 3. Contoh pelepasan cable 28 pada feeder 1 dan bagian jaringan yang terisolasi.

Jika tingkat keparahan dinyatakan berdasarkan beban terputus, urutan kritisnya adalah feeder 1, feeder 3, feeder 2, feeder 4, dan feeder 5. Pola ini menunjukkan bahwa topologi radial menyebabkan dampak kontingensi saluran lebih dominan sebagai loss of load daripada pelanggaran tegangan pada bagian sistem yang masih tersuplai. Oleh karena itu, intertie antar-feeder, sectionalizing yang tepat, atau jalur suplai alternatif dapat menjadi arah mitigasi teknis untuk mengurangi beban terputus.

D. Validasi Simulasi dan Perhitungan Manual

Validasi pada cable 12 memperlihatkan bahwa rugi-rugi manual mendekati hasil simulasi. Hasil ETAP menunjukkan rugi aktif sekitar 0,4 kW dan rugi reaktif 0,5 kVAr, sedangkan perhitungan manual menghasilkan 0,481652 kW dan 0,506282 kVAr. Selisih kecil pada Q menunjukkan konsistensi yang baik; selisih P terutama dipengaruhi pembulatan parameter penghantar, arus, dan panjang saluran yang ditampilkan pada laporan.

Tabel IV
Validasi rugi-rugi pada cable 12

Besaran	ETAP	Manual	Selisih absolut
P_loss (kW)	0,400000	0,481652	0,081652
Q_loss (kVAr)	0,500000	0,506282	0,006282

Untuk jatuh tegangan, tabel simulasi melaporkan sekitar 0,05% pada cable 12, sedangkan perhitungan manual menggunakan tegangan bus yang telah dibulatkan menjadi 99,7% pada kedua sisi sehingga menghasilkan 0,0%. Karena kedua angka masukan sudah dibulatkan satu desimal, hasil manual tersebut tidak cukup presisi untuk memverifikasi selisih 0,05%. Dengan demikian, validasi jatuh tegangan memerlukan data tegangan bus dengan presisi lebih tinggi (minimal tiga atau empat desimal) agar perbedaan yang kecil dapat dievaluasi secara memadai.

E. Implikasi Operasi

Dua jenis kerentanan terlihat jelas. Pertama, kontingensi pembangkit menyebabkan masalah kecukupan kapasitas dan redistribusi pembebanan; overload 154–377% menunjukkan bahwa pelepasan unit tertentu tidak dapat ditanggung sepenuhnya oleh unit tersisa. Kedua, kontingensi penyulang menimbulkan kehilangan beban akibat struktur radial. Dari sisi prioritas teknis, tindakan yang dapat dipertimbangkan meliputi penambahan reserve margin atau sumber cepat, penguatan interkoneksi GH Nunukan, evaluasi transfer antar-feeder, dan penyediaan titik manuver jaringan pada area dengan beban terputus terbesar. Rekomendasi tersebut merupakan implikasi dari hasil steady-state; studi koordinasi proteksi, hubung singkat, dan stabilitas dinamik masih diperlukan sebelum perubahan konfigurasi diterapkan di lapangan.

IV. KESIMPULAN

Pemodelan sistem distribusi 20 kV PT PLN (Persero) Sebatik pada ETAP PowerStation 19.0.1 menunjukkan bahwa pada base case beban puncak sistem melayani sekitar 4,061 MW dan 2,620 MVAr dengan rugi-rugi yang dilaporkan sebesar 0,050 MW dan 0,170 MVAr. Pada kontingensi sumber, pelepasan Mitsubishi 1, Mitsubishi 2, dan Mitsubishi 3 menimbulkan overload pada generator lain masing-masing sebesar 154%, 164%, dan 377%, sedangkan pelepasan MAN 8 tidak menimbulkan overload generator yang dilaporkan. Pelepasan GH Nunukan menghasilkan kondisi tegangan paling kritis dengan nilai minimum 17,86 kV atau 0,8934 p.u., sehingga berada di

bawah batas screening 0,90 p.u. yang digunakan pada penelitian ini.

Pada kontingensi saluran, dampak utama berupa terputusnya beban pada feeder radial. Kehilangan beban terbesar terjadi pada feeder 1 saat cable 28 dilepas sebesar 575,2 kW, diikuti feeder 3 sebesar 337,0 kW, feeder 2 sebesar 297,8 kW, feeder 4 sebesar 260,2 kW, dan feeder 5 sebesar 112,9 kW. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penguatan keandalan Sebatik perlu diarahkan pada dua aspek sekaligus, yaitu kecukupan cadangan sumber untuk memenuhi kriteria N-1 dan peningkatan fleksibilitas topologi penyulang agar kehilangan satu saluran tidak langsung memutus kelompok beban yang besar.

Validasi manual rugi-rugi cable 12 menunjukkan hasil yang mendekati simulasi ETAP. Pada validasi jatuh tegangan, penggunaan nilai tegangan bus yang dibulatkan satu desimal tidak cukup sensitif untuk memverifikasi selisih sekitar 0,05%, sehingga evaluasi presisi membutuhkan keluaran tegangan bus dengan jumlah desimal yang lebih tinggi.

REFERENSI

[1] N. R. A.S. and I. Ilyas, "Analisa Kontingensi Kinerja Sistem Kelistrikan Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN ULP Cibitung," Sinusoida, vol. 25, no. 1, pp. 17–26, 2023, doi: 10.37277/s.v25i1.1666.

[2] S. Ma'ruf, "Analisis Kontingensi pada Perencanaan Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV Tahun 2050," Undergraduate thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

[3] Ekoriskiyanto, Y. Mohammad, and E. H. Harun, "Analisis Kontingensi pada Sistem Tenaga Listrik Sulawesi Utara–Gorontalo," Foristek, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.54757/fs.v9i1.69.

[4] K. A. R. Medapati, S. Mandal, R. Paul, A. Samanta, D. Bose, and A. Chakrabarti, "Assessment of Power System Security using Contingency Ranking Analysis," in Proc. 5th Int. Conf. Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India, 2023, pp. 439–444, doi: 10.1109/ICEPE57949.2023.10201584.

[5] G. C. Ejebe and B. F. Wollenberg, "Automatic contingency selection," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-98, no. 1, pp. 97–109, 1979, doi: 10.1109/TPAS.1979.319518.

[6] B. Stott, O. Alsac, and A. J. Monticelli, "Security analysis and optimization," Proc. IEEE, vol. 75, no. 12, pp. 1623–1644, 1987, doi: 10.1109/PROC.1987.13931.

[7] M. Gholami, M. J. Sanjari, M. Safari, M. Akbari, and M. R. Kamali, "Static security assessment of power systems: A review," Int. Trans. Electr. Energy Syst., vol. 30, no. 9, e12432, 2020, doi: 10.1002/2050-7038.12432.

[8] K. Teeparthi and D. M. Vinod Kumar, "Power System Security Assessment and Enhancement: A Bibliographical Survey," J. Inst. Eng. India Ser. B, vol. 101, no. 2, pp. 163–176, 2020, doi: 10.1007/s40031-020-00440-1.

[9] M. Z. A. Bhuiyan, G. J. Anders, J. Philhower, and S. Du, "Review of static risk-based security assessment in power system," IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, vol. 4, no. 3, pp. 233–239, 2019, doi: 10.1049/iet-cps.2018.5080.

[10] M. R. Narimani, H. Huang, A. Umunnakwe, Z. Mao, A. Sahu, S. Zonouz, and K. Davis, "Generalized Contingency Analysis Based on Graph Theory and Line Outage Distribution Factor," IEEE Syst. J., vol. 16, no. 1, pp. 626–636, 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3089548.

[11] J. Guo, Y. Fu, Z. Li, and M. Shahidehpour, "Direct Calculation of Line Outage Distribution Factors," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1633–1634, 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2023273.

[12] Y.-C. Chang, W.-T. Yang, and C.-C. Liu, "Improvements on the line outage distribution factor for power system security analysis," Electr. Power Syst. Res., vol. 26, no. 3, pp. 231–236, 1993, doi: 10.1016/0378-7796(93)90018-A.

[13] W. F. Tinney and C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-86, no. 11, pp. 1449–1460, 1967, doi: 10.1109/TPAS.1967.291823.

[14] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow," IEEE Trans. Power Appar. Syst., vol. PAS-93, no. 3, pp. 859–869, 1974, doi: 10.1109/TPAS.1974.293985.

[15] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education," IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2051168.

[16] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 2, pp. 753–762, 1988, doi: 10.1109/59.192932.

[17] M. H. Haque, "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., vol. 143, no. 1, pp. 33–38, 1996, doi: 10.1049/ip-gtd:19960045.

[18] J.-H. Teng, "A direct approach for distribution system load flow solutions," IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no. 3, pp. 882–887, 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.813818.

[19] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 10, no. 2, pp. 671–679, 1995, doi: 10.1109/59.387902.

[20] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.

[21] T. A. Short, Electric Power Distribution Handbook, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2014.

[22] R. Billinton and R. N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 1996.

[23] R. Billinton and R. N. Allan, "Basic power system reliability concepts," Reliab. Eng. Syst. Saf., vol. 27, no. 3, pp. 365–384, 1990, doi: 10.1016/0951-8320(90)90007-A.

[24] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, and G. B. Sheblé, Power Generation, Operation, and Control, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[25] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[26] N. J. Hontong, M. Tuegeh, and L. S. Patras, "Analisa Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi di PT. PLN Palu," J. Tek. Elektro dan Komputer, vol. 4, no. 1, 2015, doi: 10.35793/jtek.v4i1.6739.

[27] D. Nirwana, A. F. Kuraisy, and A. Syarifuddin, "Analisis Rugi-Rugi Daya pada Jaringan Distribusi Penyulang Jentak di ULP Jeneponto PT PLN (Persero) Sulselrabar," LOGITECH, vol. 5, no. 2, 2022.

[28] P. Julianto dan Fitriani, "Modified Genetic Algorithm for Capacitive Compensation in Radial Distribution Systems," dalam Proc. 11th Int. Conf. on Electrical Engineering, Computer Science and Informatics (EECSI), 2024, pp. 659–665.

[29] P. Julianto, "Rekonfigurasi Jaringan pada Sistem Distribusi Radial untuk Mereduksi Rugi-rugi Daya Menggunakan Algoritma Genetika Adaptif," Jurnal Elektrika Borneo, vol. 9, no. 1, pp. 15–19, 2023.

[30] P. Julianto, "Kompensasi Kapasitif dengan Injeksi Daya Reaktif untuk Mereduksi Rugi-Rugi Daya Aktif pada

Sistem Distribusi Skala Besar," Jurnal Elektrika Borneo, vol. 9, no. 2, pp. 36–43, 2023.
[31] P. Julianto dan R. C. J. Manapa, "Rekonfigurasi Jaringan untuk Mereduksi Jatuh Tegangan dan Rugi-rugi Daya pada Sistem Distribusi 20 kV PT PLN Tarakan," *Buletin Profesi Insinyur*, vol. 7, no. 2, pp. 94–100, 2024.
[32] PT PLN (Persero), SPLN 1:1995, Tegangan-Tegangan Standar. Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero), 1995.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 146-150 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

DESAIN DAN SIMULASI *BIDIRECTIONAL DC-DC CONVERTER* PADA BATERAI SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI DENGAN METODE KONTROL *PWM*

Abil Huda[1], Ismit Mado[2], Anra[3]

[1,2,3]*Universitas Borneo Tarakan, Kota Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]abil@borneo.ac.id
[2]ismitmado@borneo.ac.id
[3]*anrahasanuddin@gmail.com*

Abstract*—The utilization of renewable energy, such as Solar Power Plants (PLTS), faces intermittency challenges that require stable and efficient battery energy storage systems. This study focuses on the design and simulation of a bidirectional DC-DC converter as a key interface unit between the battery and the power distribution system. The novelty of this research lies in the optimization of Pulse Width Modulation (PWM) control schemes combined with current management algorithms to ensure efficient battery charging and discharging processes with low current ripple. The methodology involves power electronic circuit modeling, calculation of filter components based on switching frequency, and dynamic testing through MATLAB/Simulink simulations with varying duty cycles. During a 10-second charging period, the SoC increased from 50% to 50.07% with a charging current of 2.041 A and a battery voltage of 25.98 V, moving toward the full-charge voltage of 27.93 V. The negative current value indicates the direction of flow from the 48 V DC voltage source to the 24 V battery. During a 10-second discharge, the SoC dropped from 50% to 49.76%, with a discharge current of 9.189 A and a battery voltage of 25.32 V, moving toward the 18 V cut-off voltage. The positive current value indicates the direction of flow from the 24 V battery to the 48 V DC voltage source.

Keywords*—Battery, Bidirectional Converter, Energy Storage, PWM, Simulation

I*ntisari*—Pemanfaatan energi terbarukan, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), menghadapi tantangan intermitensi yang memerlukan sistem penyimpanan energi baterai yang stabil dan efisien. Penelitian ini berfokus pada perancangan dan simulasi konverter DC-DC dua arah sebagai unit antarmuka utama antara baterai dan sistem distribusi daya. Kebaruan penelitian ini terletak pada optimalisasi skema kendali *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikombinasikan dengan algoritma manajemen arus untuk memastikan proses pengisian dan pengosongan baterai yang efisien dengan riak arus yang rendah. Metodologi penelitian mencakup pemodelan rangkaian elektronika daya, perhitungan komponen filter berdasarkan frekuensi pensakelaran, serta pengujian dinamis melalui simulasi MATLAB/Simulink dengan variasi *duty cycle*. Selama periode pengisian 10 detik, SoC meningkat dari 50% menjadi 50,07% dengan arus pengisian 2,041 A dan tegangan baterai 25,98 V, bergerak menuju tegangan penuh 27,93 V. Nilai arus negatif menunjukkan arah aliran dari sumber tegangan DC 48 V menuju baterai 24 V. Selama pengosongan 10 detik, SoC turun dari 50% menjadi 49,76%, dengan arus pengosongan 9,189 A dan tegangan baterai 25,32 V, bergerak menuju tegangan batas (*cut-off*) 18 V. Nilai arus positif menunjukkan arah aliran dari baterai 24 V menuju sumber tegangan DC 48 V.

Kata Kunci*—Baterai; Bidirectional Converter; PWM; Penyimpan Energi; Simulasi

I. PENDAHULUAN

Dokumen ini adalah template jurnal online Elektrika Borneo yang dapat diunduh dari situs web Elektrika Borneo. Untuk pertanyaan template ini, silakan hubungi panitia publikasi jurnal seperti yang ditunjukkan pada situs web. Informasi tentang makalah akhir penyerahan tersedia dalam situs web Elektrika Borneo.

Pemanfaatan energi terbarukan seperti panel surya dan turbin angin mengalami peningkatan pesat guna mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Namun, sifat intermiten dari sumber energi ini menuntut adanya sistem penyimpanan energi (BESS) yang handal untuk menjaga stabilitas pasokan daya [1]. Baterai merupakan teknologi penyimpanan yang paling umum digunakan karena densitas energinya yang tinggi, tetapi memerlukan perangkat antarmuka daya yang mampu mengatur aliran energi secara dua arah antara baterai dan bus DC [2]. *Bidirectional DC-DC Converter* menjadi komponen vital yang memungkinkan proses pengisian (*charging*) dan pengosongan (*discharging*) daya dilakukan secara efisien dalam satu topologi sirkuit [3].

Tantangan teknis utama dalam pengoperasian *bidirectional converter* adalah bagaimana mempertahankan efisiensi tinggi saat terjadi transisi antar mode kerja. Mode kerja buck dan boost. Fluktuasi pada tegangan bus DC dan karakteristik dinamis baterai seringkali menyebabkan munculnya riak arus (*current ripple*) yang tinggi [4]. Jika tidak dikendalikan dengan metode pensaklaran yang tepat, hal ini dapat mempercepat degradasi sel baterai dan mengurangi efisiensi sistem secara keseluruhan [5]. Oleh karena itu, diperlukan desain kontrol *Pulse Width Modulation* (PWM) yang mampu merespons perubahan beban dengan cepat tanpa menimbulkan lonjakan arus yang berbahaya bagi baterai.

Penelitian ini mengusulkan solusi melalui desain dan simulasi konverter menggunakan metode PWM untuk mengatur siklus kerja sakelar semikonduktor. Pendekatan dilakukan dengan memodelkan sistem secara matematis untuk menentukan nilai induktor dan kapasitor filter yang optimal guna mereduksi riak arus [6]. Simulasi dilakukan

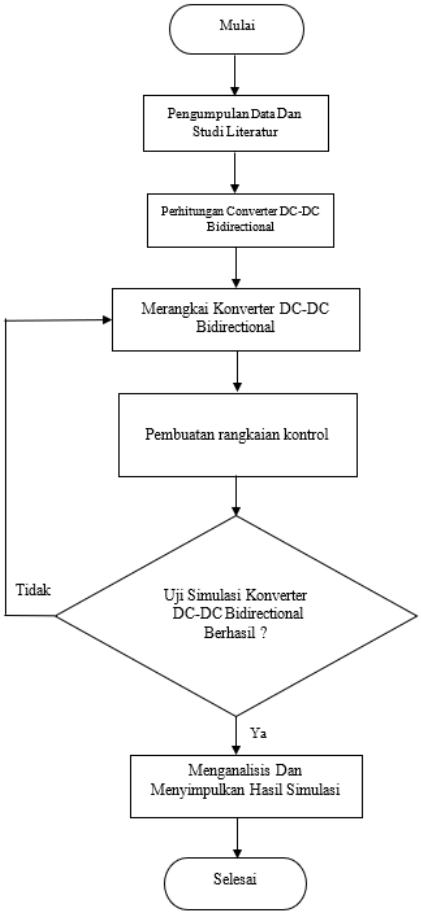
menggunakan perangkat lunak berbasis elektronika daya (seperti MATLAB/Simulink) untuk memvalidasi kinerja sistem dalam menjaga kestabilan tegangan pada mode *buck* (pengisian) dan mode *boost* (pengosongan) secara bergantian [7].

Penelitian terdahulu banyak berfokus pada topologi konverter terisolasi yang kompleks dan mahal. Kebaruan penelitian ini terletak pada **optimasi strategi PWM pada topologi non-isolated yang disederhanakan**, namun tetap memiliki efisiensi konversi yang kompetitif untuk aplikasi penyimpanan energi skala kecil hingga menengah [8]. Selain itu, penelitian ini menekankan pada penggunaan frekuensi pensaklaran tinggi yang diselaraskan dengan kontrol arus linier untuk mencapai respon transien yang lebih mulus dibandingkan metode PWM konvensional pada umumnya [9].

II. METODE PENELITIAN

Metode penelitian terdiri dari tahapan-tahapan penelitian dan diagram blok sistem

A. Tahapan Penelitian

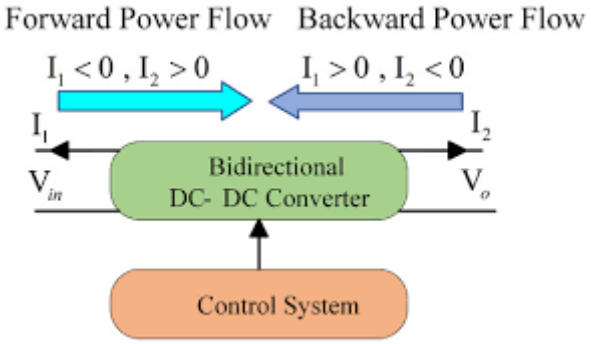


Gambar 1. Flowchart Penelitian

Tahapan penelitian terdiri dari:

1. **Tahap Awal**
   Proses dimulai dengan melakukan **Pengumpulan Data dan Studi Literatur** untuk mencari referensi teori serta data teknis yang mendukung penelitian.
2. **Tahap Desain**
   Setelah data terkumpul, dilakukan **Perhitungan Konverter DC-DC Bidirectional** untuk menentukan nilai komponen (seperti induktor, kapasitor, dan parameter *switching*) agar sesuai dengan target spesifikasi.
3. **Tahap Merangkai**
   Langkah selanjutnya adalah **Merangkai Konverter DC-DC Bidirectional** berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya, kemudian dilanjutkan dengan **Pembuatan rangkaian kontrol** untuk mengatur aliran daya dua arah tersebut.
4. **Tahap Pengujian (Validasi)**
   Setelah alat atau model siap, dilakukan **Uji Simulasi Konverter DC-DC Bidirectional**. Pada tahap ini terdapat percabangan keputusan:
   a. **Jika Tidak Berhasil:** Proses akan kembali ke tahap **Merangkai Konverter** untuk dilakukan pengecekan ulang dan perbaikan rangkaian.
   b. **Jika Berhasil:** Proses dapat berlanjut ke tahap berikutnya.
5. **Tahap Akhir:**
   Langkah terakhir **Menganalisis dan Menyimpulkan Hasil Simulasi** untuk memastikan sistem bekerja secara optimal, hingga akhirnya proses dinyatakan **Selesai**.

B. Diagram Blok Sistem



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Diagram Blok sistem terdiri dari:

1. **High Voltage Side (Sisi Tegangan Tinggi):** Biasanya terhubung ke bus DC utama atau beban.
2. **Low Voltage Side (Sisi Tegangan Rendah):** Biasanya terhubung ke media penyimpan energi seperti baterai atau *supercapacitor*.
3. **Power Circuit (Rangkaian Daya):** Inti dari konverter yang berisi komponen *switching* seperti MOSFET atau IGBT, induktor untuk menyimpan energi, dan kapasitor filter untuk menghaluskan tegangan.
4. **Control Unit (Unit Kendali):** Menggunakan PWM generator.

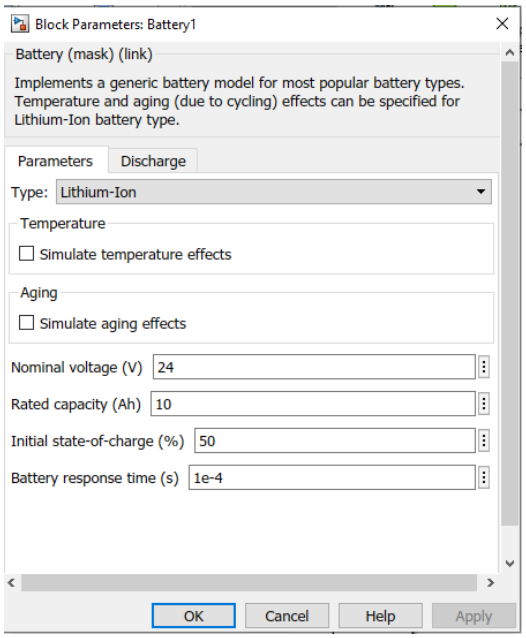
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Spesifikasi Baterai

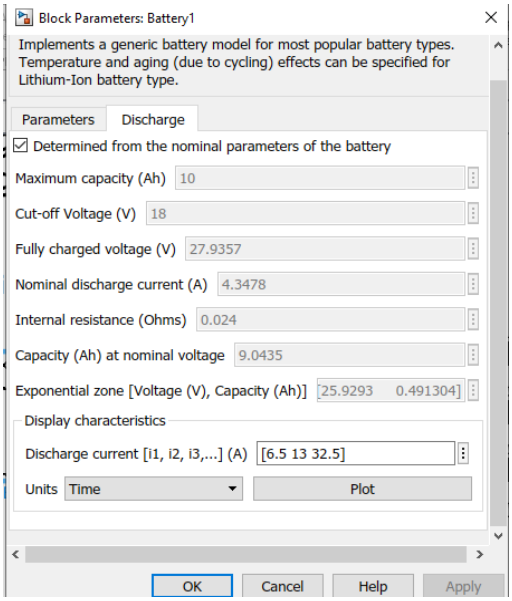
Baterai merupakan suatu perangkat yang mengandung sel listrik sehingga dapat digunakan untuk menyimpan energi dimana energi tersebut dapat di konversikan

menjadi daya. Baterai bekerja pada dua kondisi yaitu pengosongan (*discharge)* dan pengisian (*charge*) Secara prinsip, aliran listrik akan mengalir dari kutub positif menuju kutub negatif. Sumber elektron yang ada pada kutub bertanda negatif akan menjadi sumber listrik bagi peralatan listrik jika disambungkan dengan baterai.

Berikut ini merupakan gambar dan data baterai yang digunakan dalam simulasi sebagai berikut :



Gambar 3. Spesifikasi baterai



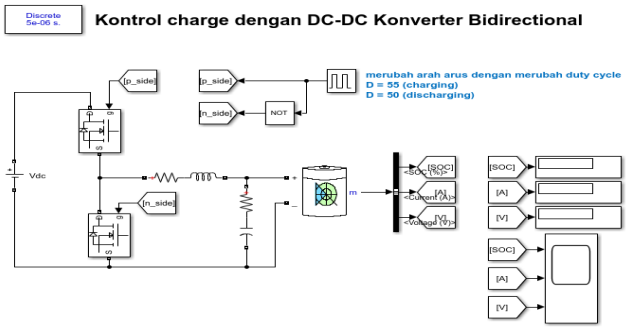
Gambar 4. Spesifikasi discharge baterai

Penelitian ini menggunakan model baterai generik dengan kapasitas maksimum 10 Ah dan tegangan potong (cut-off voltage) sebesar 18 V, di mana kondisi baterai penuh tercapai pada tegangan 27,9357 V. Simulasi ini juga mempertimbangkan karakteristik internal baterai seperti resistansi sebesar 0,024 Ohm serta arus pengosongan nominal 4,3478 A, yang semuanya dikonfigurasi untuk memastikan respon sistem bidirectional converter bekerja sesuai dengan spesifikasi teknis baterai yang dimodelkan.

B. Desain Rangkaian Bidirectional Converter

Pada pengujian Pengisian Dan Pengosongan baterai dengan simulasi rangkaian yang terdiri dari dua mode rangkaian yaitu mode boost dan mode buck. Pada mode boost terdiri dari komponen utama, kapasitor, induktor, dioda dan MOSFET. Mode buck terdiri dari komponen utama kapasitor, induktor, dioda dan MOSFET.

Bidirectional converter dengan menyimpan energi disimulasikan menggunakan matlab untuk mengamati keluaran dari berbagai mode. Simulasi rangkaian dapat dilihat pada gambar 5. pengujian mode pada bidirectional tergantung pada tegangan bus DC mode disesuaikan. Pada simulasi kita menggunakan atau merubah nilai *duty cycle*.



Gambar 5. Rangkaian Bidirectional Converter

Untuk mendapatkan nilai pada induktor dan kapasitor pada rangkaian bidirectional, digunakan rumus buck converter. Tegangan input dipilih 48V dan tegangan output dipilih 24V merupakan tegangan baterai. Frekuensi switching dipilih 100.000 Hz agar nilai induktor dan kapasitor kecil. berikut data parameter yang dibutuhkan untuk menghitung induktor dan kapasitor.

Tabel I
Parameter Konverter DC-DC Bidirectional

Parameter	Nilai
Vi	48 V
Vo	24 V
f	100.000 Hz
DeltaIL	0,05
DeltaVo	0,01

Setelah menentukan nilai parameter tegangan input, output dan frekuensi switching, selanjutnya adalah menghitung nilai induktor dan kapasitor

a. Nilai Induktor

$$L = \frac{(1-D)Vo}{\Delta IL\, f}$$

$$L = \frac{(1-0{,}5)24}{0{,}05 \text{ x } 100.000}$$

$$L = \frac{12}{5000}$$

L= 0.0024 H

b. Nilai Kapasitor

$$C = \frac{(1-D)}{8\,L\,(\Delta Vo/Vo)f2}$$

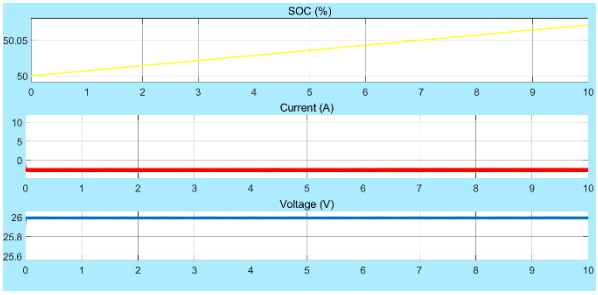
$$C = \frac{(1-0{,}5)}{8\ 0{,}0024\left(\frac{0{,}01}{24}\right)100.000x100.000}$$

$$C = \frac{0{,}5}{0{,}0192 \text{ x } 0{,}0004 \text{ x } 10.000.000.000}$$

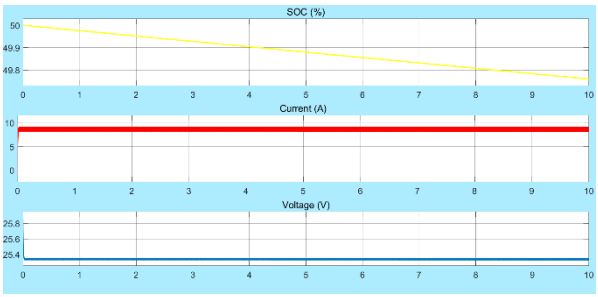
$$C = \frac{0{,}5}{78.720}$$

$$C = 0{,}006351 \text{ F}$$

C. Hasil Uji simulasi



Gambar 6. Hasil simulasi *duty cycle* 55% (*charging*)



Gambar 7. Hasil simulasi *duty cycle* 50% (*discharging*)

Simulasi sistem di lakukan selama 10 detik dengan metode kontrol PWM berupa *duty cycle* 55% untuk kondisi *charging* & 50% untuk kondisi *discharging* pada baterai 24V 10Ah.

Hasilnya dapat dilihat pada gambar 6 dan 7 dengan masing-masing 3 parameter yaitu SOC (*State of Charge*), *Current* atau arus dan Voltage atau tegangan.

Masing-masing diberi warna kuning, merah dan biru secara berurutan.

D. Pembahasan

Saat *charging* selama 10 detik, terjadi peningkatan SoC dari 50 % ke 50,07 % dengan arus pengisian 2,041 A dan tegangan baterai 25,98 V menuju kondisi Full charge voltage 27,93V. Nilai negatif pada arus menunjukkan arah aliran dari sumber tegangan DC 48 V ke baterai 24 V. Hal ini ditunjukkan pada gambar 6.

Saat *discharging* selama 10 detik, terjadi penurunan SoC dari 50 % ke 49,76 % dengan arus pengosongan 9,189 A dan tegangan baterai 25,32 V menuju kondisi Cut Off Voltage 18 V. Arus yang bernilai positif menunjukkan arah aliran dari baterai 24 V ke sumber tegangan DC 48 V. Hal ini ditunjukkan pada gambar 7.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi rangkaian *bidirectional converter* menggunakan MATLAB/Simulink dengan metode kendali PWM selama 10 detik pada baterai 24V 10Ah, dapat disimpulkan bahwa:

1. **Efektivitas Kendali PWM:**
   Metode kontrol PWM melalui pengaturan *duty cycle* terbukti efektif dalam mengatur arah aliran daya (*bidirectional*) secara stabil. Pengaturan *duty cycle* sebesar 55% berhasil menjalankan **mode *charging***, sementara *duty cycle* 50% berhasil menjalankan **mode *discharging***.
2. **Kinerja Mode *Charging*:**
   Pada kondisi *charging*, sistem mampu menurunkan tegangan sumber (48 V) untuk mengisi baterai, yang ditandai dengan kenaikan SOC sebesar **0,07%** (dari 50% ke 50,07%) dengan arus pengisian sebesar **2,041 A**. Arah arus negatif mengonfirmasi bahwa daya mengalir dari sumber DC menuju baterai (Buck Mode).
3. **Kinerja Mode *Discharging*:**
   Pada kondisi *discharging*, baterai menyuplai daya kembali ke sistem yang ditandai dengan penurunan SOC sebesar **0,24%** (dari 50% ke 49,76%) dengan arus pengosongan yang cukup besar yaitu **9,189 A**. Hal ini menunjukkan beban pada mode *discharging* jauh lebih besar dibandingkan laju pengisiannya.
4. **Stabilitas Tegangan:**
   Sistem menunjukkan performa yang baik dalam menjaga level tegangan operasional baterai pada rentang aman, yakni di kisaran **25,32V hingga 25,98V**, yang bergerak secara konsisten menuju ambang batas *Full Charge* (27,93V) atau *Cut Off* (18V).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada dewan redaksi jurnal yang telah meluangkan waktu untuk mempublis artikel ini dan kepada LPPM Universitas Borneo Tarakan yang telah memberi dukungan pada penelitian ini.

REFERENSI

[1] M. R. D. Saputra, A. S. Rohman, and S. Rijanto, "Design and Simulation of Bidirectional DC-DC Converter for Battery Storage in Photovoltaic System," in *2021 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, 2021, pp. 1-6.

[2] K. I. Hwu and W. Z. Jiang, "Analysis and Design of Bidirectional Converter with Battery Energy Storage System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 145212-145225, 2020.

[3] S. S. Lee and Y. E. Kim, "Small-Signal Modeling and Control Design of a Bidirectional DC-DC Converter for Battery Energy Storage Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 35, no. 7, pp. 7650-7662, July 2020.

[4] G. S. Rao and R. S. Rao, "Design and Simulation of Bidirectional DC-DC Buck-Boost Converter for Renewable Energy Systems with Battery Storage," in *Proc. IEEE International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 2020, pp. 1-5.

[5] N. D. Al-Qahtani and M. R. J. Othman, "Modeling and Simulation of a Bidirectional DC-DC Converter for Hybrid Electric Vehicle Applications using

MATLAB/Simulink," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 13, no. 11, pp. 3200-3208, 2020.

[6] J. A. Al-Najar and M. G. El-Sattar, "Advanced Control Strategy for Bidirectional DC-DC Converter in Battery Management Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 58, no. 3, pp. 3412-3422, May-June 2022.

[7] R. Priyadarshani and B. L. Narasimharaju, "An Improved Interleaved Bidirectional DC-DC Converter for Battery Storage Applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 9, no. 4, pp. 4125-4135, Aug. 2021.

[8] F. Gunawan and E. Sunarno, "Implementasi Kontrol Arus pada Bidirectional DC-DC Converter untuk Pengisian Baterai Berbasis Arduino," *J. Tek. Elektro ITB*, vol. 12, no. 2, pp. 88-95, 2022.

[9] H. R. Jariyan and V. N. Pande, "Comparative Analysis of Bidirectional DC-DC Converter Topologies for Electric Vehicle Battery *Charging*," in *2023 IEEE 7th International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)*, 2023, pp. 112-117.

[10] S. Sadi and R. Prasetijo, "Simulasi Manajemen Energi Baterai Menggunakan Bidirectional DC-DC Converter pada Sistem Hybrid PV-Angin," *J. Teknol. Elektro*, vol. 14, no. 1, pp. 25-32, Jan. 2023.

[11] A. Huda and Z. Zulfadli "Analisa Pengaruh Frekuensi dan Duty Cycle Terhadap Ripple Tegangan Pada Buck-Boost Converter" *Elektrika Borneo*, vol 11, no. 1, pp. 16-19. 2025.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 151-157 p-ISSN: 2443-0986

EVALUASI INSTALASI LISTRIK GEDUNG FAKULTAS KEDOKTERAN UNIVERSITAS BORNEO TARAKAN

Sugeng Riyanto[1], Aqsalil Fajri[2]

[1,2,3]*Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]sugeng072.sr@gmail.com

[2]aqsalfajri9@gmail.com2

Abstract*—Electricity is one of the necessities that cannot be separated from everyday life. Electricity plays an important role in the development of infrastructure for lecture and practical buildings at the Faculty of Medicine, University of Borneo Tarakan. Based on the evaluation, there are several points, including the imbalance of loads on floors 1, 2, and 3. On floor 1, phase R has a power of 72.90 kW, floor 2 with phase S has a power of 7.91 kW, and floor 3 with phase T has a power of 257.53 kW. With this unbalanced load, the current on floor 1 phase R is 138.45 A using a 160 A MCB, floor 2 phase S is 15.03 A using a 16 A MCB, and floor 3 phase T is 489.09 A using a 630 A MCB. Likewise, the cable conductor sizes used will adjust to the load on each floor, where the cable conductor used on floor 1 phase R has a conductor diameter of 4 mm², and floor 2 phase S has a conductor diameter. which uses 2.5 mm2 and the 3-phase floor T conductor has a diameter of 6 mm2

***Keywords*—Evaluation of electrical installation**

I**ntisari— Listrik merupakan salah satu kebutuhan yang tak dapat dipisahkan dari kehidupan sehari-hari. Dimana listrik berperan penting didalam pembangunan infrastrusktur gedung perkuliahan maupun praktikum yang terdapat pada Fakultas Kedokteran Universitas Borneo Tarakan. Hasil evaluasi terdapat beberapa poin antara lain ketidak seimbangan beban pada lantai 1, 2 dan 3. Dimana lantai 1 fasa R dayanya sebesar 72,90 kW, lantai 2 dengan fasa S dayanya sebesar 7,91 kW dan lantai 3 fasa T dayanya sebesar 257,53 kW, dengan beban yang tidak seimbang maka arus yang dihasilkan pada lantai 1 fasa R sebesar 138,45 A dengan menggunakan MCBnyz 160 A, lantai 2 fasa S sebesar 15,03 A dengan menggunakan MCBnya 16 A dan Lantai 3 fasa T sebesar 489,09 A dengan menggunakan MCB 630 A. Demikian juga penghantar penampang kabel yang digunakan akan menyesuaikan beban setiap lantai dimana penghantar penampang kabel yang digunakan pada lantai 1 fasa R berdiameter penghantar kabel 4 mm2, lantai 2 fasa S penghantar berdiameter yang digunakan 2,5 mm2 dan lantai 3 fasa T penghantar berdiameter 6 mm2**

***Kata Kunci*—Evaluasi Instalasi Listrik.**

I. PENDAHULUAN

Ketersediaan energi listrik saat ini telah menjadi fondasi utama dalam menunjang berbagai lini kehidupan manusia, mulai dari sektor rumah tangga hingga operasional institusi pendidikan. Seiring dengan kemajuan teknologi yang pesat dan pertumbuhan jumlah populasi, permintaan akan daya listrik terus mengalami peningkatan secara eksponensial. Di lingkungan universitas, sistem kelistrikan bukan sekadar fasilitas penunjang, melainkan elemen vital yang memastikan seluruh proses belajar mengajar, administrasi, dan aktivitas riset berjalan tanpa hambatan teknis.

Gedung Fakultas Kedokteran Universitas Borneo Tarakan merupakan salah satu sarana pendidikan yang memiliki profil beban listrik yang sangat kompleks. Fasilitas ini tidak hanya menampung aktivitas perkuliahan rutin, tetapi juga menaungi berbagai peralatan laboratorium medis yang memerlukan stabilitas daya tinggi. Seiring berjalannya waktu, penambahan perangkat elektronik dan potensi degradasi komponen instalasi dapat memicu risiko teknis seperti ketidakseimbangan beban , penurunan tegangan, hingga ancaman serius berupa kebakaran akibat arus pendek listrik (P Van. Harten, Ir. E Setiawan (1985).

Dalam skala nasional, standarisasi sistem kelistrikan diatur secara ketat melalui Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020. Regulasi ini dirancang untuk menjamin keselamatan manusia, keamanan harta benda, dan efisiensi penyaluran daya. Ketidaksesuaian antara kondisi aktual instalasi di lapangan dengan parameter PUIL2020 dapat mengakibatkan kerugian finansial akibat inefisiensi energi serta membahayakan keselamatan seluruh aktivitas akademika di lingkungan Fakultas Kedokteran (Septiani dkk.,2023).

Evaluasi perancangan instalasi listrik pada gedung Fakultas Kedokteran Universitas Borneo Tarakan tersebut memerlukan sistem perancangan instalasi listrik yang baik sesuai dengan standar Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL 2020).

II. LANDASAN TEORI

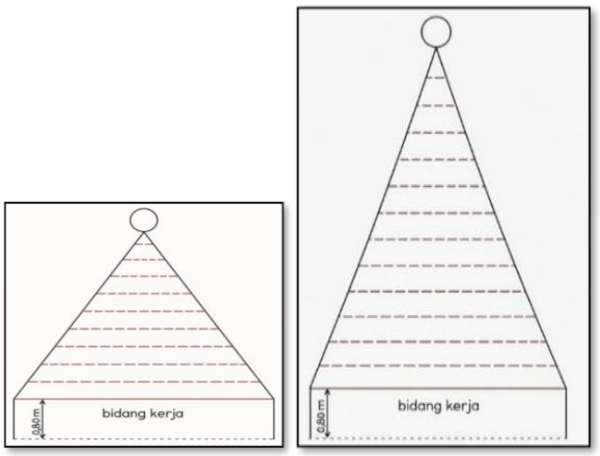
A. Dasar Teori Instalasi Listrik

Instalasi listrik merupakan proses pemasangan dan pengaturan sistem di dalam suatu bangunan. Ini melibatkan penempatan kabel, perangkat listrik, perlengkapan dan perlindungan yang diperluakan untuk menghubungkan sumber daya listrik dan penerangan. Dimana perancangan instalasi listrik ini harus sesuai dengan pedoman yang berlaku yaitu PUIL 2020 dan bahan instalsi listrik harus sesuai dengan Stendar Nasional Indonesia (SNI).

B. Intensitas Penerangan

Intensitas penerangan itu harus disesuaikan dengan pekerjaan yang akan diterangi, pada penerangan ruang kelas atau ruang belajar yang membutuhkan cahaya yang terang agar lebih efisien. Umumnya tinggi bidang

pekerjaan yang diambil yaitu kurang lebih 0,8 meter. Flux cahaya yang dipancarkan pada lampu-lampu penerangan tidak semua mencapai bidang kerja, hal ini karena flux cahaya yang dipantulkan ke dinding dan langit-langit pada ruangan.



Gambar 1. Pembagian flux cahaya

Dalam menentukan jumlah titik lampu maka terlebih dahulu harus ditentukan adalah data-data ruangan yaitu :

a. Tinggi langit-langit ruangan (t)
b. Tinggi lampu pada bidang kerja (h)
c. Tinggi bidang kerja kurang lebih 0,8 meter atau 80 cm

$$h = t - 0{,}8 \text{ meter} \quad (1)$$

C. Indeks Ruang *(k)*

indeks ruang (k) yang menyatakan perbandingan pada suatu ukuran suatu ruangan dalam bentuk persegi ataupun persegi panjang menggunakan persamaan dibawah ini :

$$k = \frac{p \cdot l}{h(p+l)} \quad (2)$$

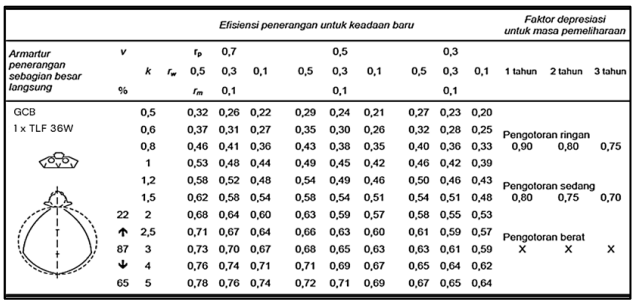
dengan :
k = Indeks ruang
p = Panjang ruang
l = Lebar ruang
h = Tinggi ruangan

setelah nilai indeks telah diketahui maka bisa dihitung nilai efisiensi penerangan dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\eta = \eta_1 + \frac{k-k_1}{k_2-k_1}(\eta_2 - \eta_1) \quad (3)$$

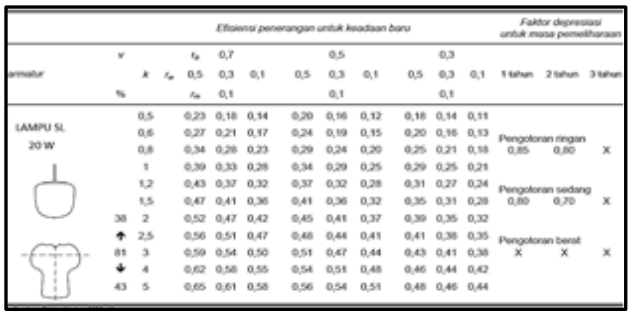
dengan :
k = Indeks bentuk
k_1, k_2 = Indeks ruang
η_1, η_2 = Efisiensi indeks ruang
η = Efisiensi penerangan

Dalam perhitungan sistem pencahayaan, variabel r_w dan r_p berturut-turut merepresentasikan proporsi fluks cahaya yang dipantulkan oleh permukaan dinding serta langit-langit sebelum akhirnya mencapai bidang kerja. Sementara itu, nilai r_m dipengaruhi oleh tingkat reflektansi area lantai dan dinding yang membatasi antara lantai dengan bidang kerja. Pada perancangan umum, besaran nilai r_m ini diestimasikan sebesar 0,1



Armartur penerangan sebagian besar langsung	v	k	r_w	Efisiensi penerangan untuk keadaan baru: r_p 0,7			0,5			0,3			Faktor depresiasi untuk masa pemeliharaan		
	%			r_m 0,1			0,1			0,1			1 tahun	2 tahun	3 tahun
GCB 1 x TLF 36W		0,5		0,32	0,26	0,22	0,29	0,24	0,21	0,27	0,23	0,20			
		0,6		0,37	0,31	0,27	0,35	0,30	0,26	0,32	0,28	0,25	Pengotoran ringan		
		0,8		0,46	0,41	0,36	0,43	0,38	0,35	0,40	0,36	0,33	0,90	0,80	0,75
		1		0,53	0,48	0,44	0,49	0,45	0,42	0,46	0,42	0,39			
		1,2		0,58	0,52	0,48	0,54	0,49	0,46	0,50	0,46	0,43	Pengotoran sedang		
		1,5		0,62	0,58	0,54	0,58	0,54	0,51	0,54	0,51	0,48	0,80	0,75	0,70
	22	2		0,68	0,64	0,60	0,63	0,59	0,57	0,58	0,55	0,53			
	↑	2,5		0,71	0,67	0,64	0,66	0,63	0,60	0,61	0,59	0,57	Pengotoran berat		
	87	3		0,73	0,70	0,67	0,68	0,65	0,63	0,63	0,61	0,59	X	X	X
	↓	4		0,76	0,74	0,71	0,71	0,69	0,67	0,65	0,64	0,62			
	65	5		0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,69	0,67	0,65	0,64			

Gambar 2. Efisiensi Penerangan Lampu TL 36 Watt Dalam Keadaan Baru



armatur	v	k	r_w	Efisiensi penerangan untuk keadaan baru: r_p 0,7			0,5			0,3			Faktor depresiasi untuk masa pemeliharaan		
	%			r_m 0,1			0,1			0,1			1 tahun	2 tahun	3 tahun
LAMPU SL 20 W		0,5		0,23	0,18	0,14	0,20	0,16	0,12	0,18	0,14	0,11			
		0,6		0,27	0,21	0,17	0,24	0,19	0,15	0,20	0,16	0,13	Pengotoran ringan		
		0,8		0,34	0,28	0,23	0,29	0,24	0,20	0,25	0,21	0,18	0,85	0,80	X
		1		0,39	0,33	0,28	0,34	0,29	0,25	0,29	0,25	0,21			
		1,2		0,43	0,37	0,32	0,37	0,32	0,28	0,31	0,27	0,24	Pengotoran sedang		
		1,5		0,47	0,41	0,36	0,41	0,36	0,32	0,35	0,31	0,28	0,80	0,70	X
	38	2		0,52	0,47	0,42	0,45	0,41	0,37	0,39	0,35	0,32			
	↑	2,5		0,56	0,51	0,47	0,48	0,44	0,41	0,41	0,38	0,35	Pengotoran berat		
	81	3		0,59	0,54	0,50	0,51	0,47	0,44	0,43	0,41	0,38	X	X	X
	↓	4		0,62	0,58	0,55	0,54	0,51	0,48	0,46	0,44	0,42			
	43	5		0,65	0,61	0,58	0,56	0,54	0,51	0,48	0,46	0,44			

Gambar 3. Efisiensi Penerangan Lampu SL 20 Watt Dalam Keadaan Baru

D. Faktor Penyusutan

Efisiensi berlaku untuk instalasi penerangan baru, jika faktor penyusutannya 0,8 pada suatu instalasi yang dalam keadaan baru memberi 250 lux, tetapi hanya 200 lux dalam keadaan sudah terpakai [2]. Adapun persamaan faktor penyusutan adalah sebagai berikut :

$$d = \frac{\text{E dalam keadaan dipakai}}{\text{E dalam keadaan baru}} \quad (4)$$

dengan :
d = Penyusutan
E = Intensitas penerangan

E. Penerangan Dalam Ruangan

Pada perancangan suatu ruangan titik lampu yang akan dipasangkan harus dihitung agar pencahayaan dalam ruangan dapat menghasilkan cahaya yang baik atau maksimal.

Maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$n = \frac{E \cdot A}{\phi \cdot \eta \cdot d} \quad (5)$$

dengan :
n = Jumlah titik lampu
E = Intensitas penerangan
A = Luas ruangan (panjang x lebar = m^2)
ϕ = Fluks cahaya lampu (lumen)
η = Efisiensi penerangan
d = faktor penyusutan

F. Kapasitas Manual Circuit Breaker (MCB)

Kapasitas Manual Circuit Breaker (MCB) pada instalasi sanganlah penting agar perancangan instalasi listrik yang dilakukan dapat berjalan dengan aman dalam proses penyaluran beban dan mudah dalam prosen pemeliharaan. Untuk komponen Manual Circuit Breaker

(MCB) yang digunakan itu sebaiknya melebihi kapasitas daya. Apabila ada penambahan beban yang dilakukan makan tidak terjadi trip.

Adapun persamaan yang digunakan dalam menetukan MCB adalah sebagai berikut :

$$1 \text{ fasa} = I_n = \frac{P}{v \cdot \cos \varphi} \quad (6)$$

$$3 \text{ fasa} = I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot v \cdot \cos \varphi} \quad (7)$$

dengan :
P = Daya (watt)
V = Tegangan (volt)
I_n = Arus nominal (ampere)
Cos φ = Faktor daya

G. Kemampuan Hantar Arus (KHA)

Dalam menentukan kemampuan hantar arus (KHA) digunakan persamaan dibawah ini : [9]

$$KHA = 125\% \times I_n \quad (8)$$

dengan :
I_n = Arus nominal (ampere)

H. Luas Penampang Kabel

Luas penampang kabel harus sesuai dengan standar PUIL 2020 yang dimana agar menjaga keamanan instalasi listrik.

Adapun persamaan untuk mencari luas penampang kabel adalah sebagai berikut :

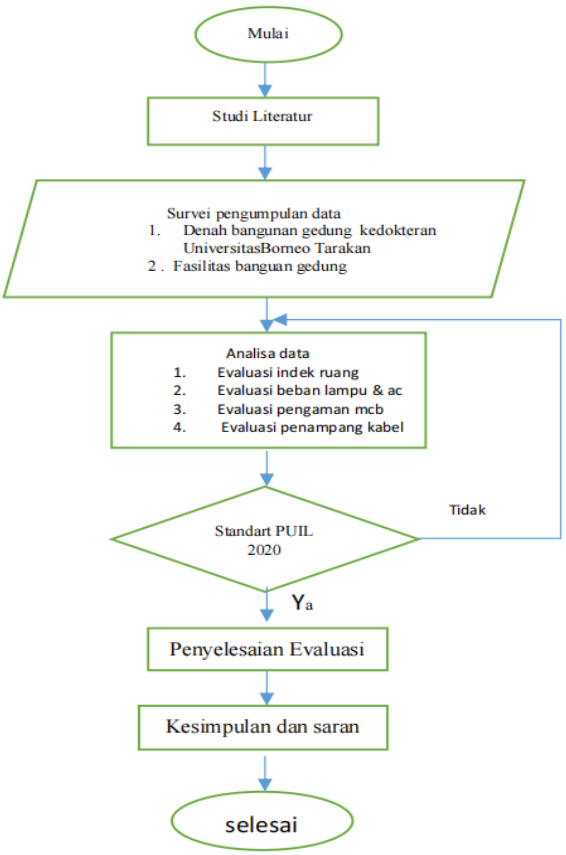
$$A = \frac{2 \cdot l \cdot I \cos \varphi}{\gamma \cdot u} \quad (9)$$

dengan :
A = Luas penampang penghantar (m^2)
γ = Daya hantar jenis dari beban penghantar (tembaga 50 x 10^6 S/m)
l = Panjang penghantar (m)
I = Arus beban
u = Rugi-rugi tegangan dalam penghantar (V)
Cos φ = Faktor daya

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan melakukan observasi dan pengukuran langsung di lapangan secara empiris. Pengumpulan data primer dilakukan melalui inventarisasi menyeluruh terhadap objek penelitian, yang meliputi dimensi fisik ruangan (panjang, lebar, dan tinggi), titik koordinat serta tinggi pemasangan lampu, karakteristik permukaan bidang kerja, serta spesifikasi teknis jenis dan jumlah lampu yang terpasang. Data hasil pengukuran lapangan tersebut kemudian diolah dan dihitung secara matematis untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan visual, yang mencakup nilai intensitas penerangan (lux) aktual, indeks ruang (room index), serta verifikasi jumlah kebutuhan lampu ideal menggunakan metode lumen berdasarkan standar iluminasi yang berlaku.

Selain aspek pencahayaan, penelitian ini juga melakukan analisis instalasi kelistrikan secara mendalam dengan menghitung total arus beban maksimum yang ditarik oleh sistem penerangan. Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan kapasitas pengaman atau Miniature Circuit Breaker (MCB) yang paling tepat serta pemilihan jenis dan ukuran kabel yang sesuai berdasarkan kemampuan hantar arus (KHA) dan luas penampang penghantar guna meminimalisir potensi susut tegangan (voltage drop) dan risiko gangguan termal. Seluruh parameter hasil perhitungan dan pengukuran tersebut selanjutnya dianalisis secara komparatif untuk menilai apakah kondisi sistem penerangan dan instalasi kelistrikan eksisting telah memenuhi standar keselamatan serta standar nasional yang dipersyaratkan.



Gambar 4. Flowchart penelitian

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan Lantai 1

1.R. BEM , R. HMJ, R. Tata Usaha, R. Pengelola dan Peralatan

$$k = \frac{p \cdot l}{h(p+l)}$$

$$= \frac{8 \cdot 4}{3(8+4)}$$

= 0,8 (indeks ruang)

maka :

k = 0,8

k_1 = 0,6

k_2 = 1

η_1 = 0,30

η_2 = 0,45

Efisensi penerangan nilai indeks ruang (k) Adalah :

$$\eta = \eta_1 + \frac{k - k_1}{k_2 - k_1}(\eta_2 - \eta_1)$$

$$\eta = 0{,}45 + \frac{0{,}8 - 0{,}6}{1 - 0{,}6}(0{,}45 - 0{,}30)$$

$$\eta = 0{,}45 + 0{,}2\ (0{,}15)$$

$\eta = 0{,}525$ (Efisiensi penerangan)

$$d = \frac{E\ dalam\ keadaan\ dipakai}{E\ dalam\ keadaan\ baru} = \frac{200\ lux}{250\ lux}$$

$$= 0{,}8\ (\text{faktor depresiasi})$$

Menggunakan armature dan lampu TL 1 x 36 Watt

(1 x 3250 lumen).

$$n = \frac{E \cdot A}{\phi \cdot \eta \cdot d}$$

$$n = \frac{250\ .32}{3250\ .0{,}525\ .0{,}8}$$

$$n = \frac{8.000}{1365}$$

$n = 5{,}86 = 6$ lampu $= 6$ armartur

B. Perhitungan I_n , KHA dan Luas penampang kabel Lantai 1,2 dan 3

Perhitungan I_n dan KHA pada Penerangan Fasa R (lantai 1)

Toilet Pria & Wanita $I_n = \frac{P}{V} = \frac{20}{220} = 0{,}09$ A
KHA = I_n . 125% = 0,09 . 1,25 = 0,11 A
PHB ke Beban (ℓ)= 10 m

Gudang ATK $I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 12 m

Pantry $I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 14 m

Ruang CS $I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 14 m

R. ADM Umum
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{432}{220\ .\ 0{,}8} = 2{,}45$
KHA = I_n . 125% = 2,45 . 1,25 = 3,06 A
PHB ke Beban (ℓ) = 18 m

R.ADM Keuangan
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{432}{220\ .\ 0{,}8} = 2{,}45$, A
KHA = I_n . 125% = 2,45 . 1,25 = 3,06 A
PHB ke Beban (ℓ) = 22 m

R. Bendahara
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 22 m

R. Tata Usaha
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 20 m

Teras 1
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{200}{220} = 0{,}90$
KHA = I_n . 125% = 0,90. 1,25 = 1,12
PHB ke Beban (ℓ) = 20 m

Teras 2
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{320}{220} = 1{,}45$ A
KHA = I_n . 125% = 1,45 . 1,25 = 1,81 A
PHB ke Beban (ℓ) = 18 m

Lab Histologi
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{1224}{220\ .\ 0{,}8} = 6{,}95$ A
KHA = I_n . 125% = 6,95 . 1,25 = 8,68 A
PHB ke Beban (ℓ) = 24 m

R. Pengawetan
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{144}{220\ .\ 0{,}8} = 0{,}81$
KHA = I_n . 125% = 0,81 . 1,25 = 1,01 A
PHB ke Beban (ℓ) = 24 m

Lab Farmakologi
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{1080}{220\ .\ 0{,}8} = 6{,}13$
KHA = I_n . 125% = 6,13 . 1,25 = 7,66 A
PHB ke Beban (ℓ) = 27 m

R.HMJ
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 30 m

R. BEM
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 28 m

R. Pengelola & Peralatan
$I_n = \frac{P}{V\ .\ cos\varphi} = \frac{216}{220\ .\ 0{,}8} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A
PHB ke Beban (ℓ) = 27 m

Koridor 1
$I_n = \frac{P}{V} = \frac{360}{220} = 1{,}63$ A
KHA = I_n . 125% = 1,63 . 1,25 = 2,03 A
PHB ke Beban (ℓ) = 46 m

Koridor 2
$I_n = \frac{P}{V} = \frac{216}{220} = 1{,}22$ A
KHA = I_n . 125% = 1,22 . 1,25 = 1,52 A

PHB ke Beban (ℓ) = 38 m

Koridor 3

$I_n = \frac{P}{V} = \frac{360}{220} = 1{,}63$ A

KHA = I_n . 125% = 1,63 . 1,25 = 2,03 A

PHB ke Beban (ℓ) = 40 m

Koridor 4

$I_n = \frac{P}{V} = \frac{144}{220} = 0{,}65$ A

KHA = I_n . 125% = 0,65 . 1,25 = 0,81 A

PHB ke Beban (ℓ) = 35 m

Tangga

$I_n = \frac{P}{V} = \frac{240}{220} = 1{,}09$ A

KHA = I_n . 125% = 1,09 . 1,25 = 1,36 A

PHB ke Beban (ℓ) = 560 m

Koridor WC

$I_n = \frac{P}{V} = \frac{240}{220} = 1{,}09$ A

KHA = I_n . 125% = 1,09 . 1,25 = 1,36 A

PHB ke Beban (ℓ) = 9 m

C. Menghitung Luas Penampang Kabel

1. Menghitung Luas Penampang Kabel Penerangan Lantai 1 Fasa R

$A = \frac{2 \cdot \cos\varphi}{\gamma \cdot u}$ jumlah $(i \, . \, l)$

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$ (0,09 A . 10 m) + (1,22 A . 12 m) + (1,22 A . 14 m) + (1,22 A . 14 m) + (1,22 A . 25 m) + (2,45 A . 18 m) + (2,45 A . 22m) + (1,22 A . 22m) + (1,22 A . 20m) + (0,90A . 20m) + (1,45 A. 18m) + (6,95A. 24m) + (0,81A. 24m) + (6,13A. 27m) + (1,22A. 30m) + (1,22A. 28m) + (1,22A. 27m) + (1,63A. 46m) + (1,22A. 38m) + (1,63A. 40m) + (0,65A. 35m) + (1,09A. 560m) + (1,09A. 9m)

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8 \, . \, 1558{,}49}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$

$= 4{,}5 \, . \, 10^{-6}$ m^2

$= 4 \, mm^2$

2. Menghitung Luas Penampang Kabel Penerangan Lantai 2 Fasa S

$A = \frac{2 \, . \, \cos\varphi}{\gamma \, . \, u}$ jumlah $(i \, . \, \ell)$

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$ (0,81 A . 26 m) + (0,81 A . 26 m) + (0,81 A . 31 m) + (0,81 A . 26 m) + (0,81 A . 9 m) + (0,81 A . 22 m) + (0,81 A . 31m) + (0,98 A . 9m) + (0,98 A . 9 m) + (1,63A . 5 m) + (1,63 A. 9m) + (12,68A. 18m) + (2,45A. 31m) + (6,13A. 26m) + (0,09A. 35m) + (0,09A. 35m) + (0,09A. 13m) + (6,95A. 13m) + (0,81A. 4m) + (0,81A. 18m) + (0,18A. 26m)

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8 \, . \, 600{,}86}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$

$= 1{,}7 \, . \, 10^{-6}$ m

$= 2{,}5 \, mm^2$

3. Menghitung Luas Penampang Kabel Penerangan Lantai 3 Fasa T

$A = \frac{2 \, . \, \cos\varphi}{\gamma \, . \, u}$ jumlah $(i \, . \, \ell)$

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$ (4,90 A . 14 m) + (4,5 A . 14 m) + (2,45 A . 16 m) + (2,86 A . 15 m) + (1,63 A . 15 m) + (1,63 A . 8 m) + (1,63 A . 10 m) + (1,63 A . 9 m) + (3,68 A . 22 m) + (5,31A . 22 m) + (3,6 A. 72 m) + (0,65A. 22 m) + (0,65A. 18 m) + (0,09A. 12 m) + (0,09A. 12 m) + (0,18A. 7 m)

$= \frac{2 \, . \, 0{,}8 \, . \, 773{,}45}{50 \, . 10^6 \, . \, 5\% \, . \, 220}$

$= 2{,}2 \, . \, 10^{-6}$ m

$= 6 \, mm^2$

Tabel I
Hasil Perhitungan In, KHA dan Luas Penampang Kabel Lantai 1

Lantai 1	Ruangan	Daya Lampu (Watt)	In (A)	KHA (A)	Luas penampang Kabel mm^2
Fasa R	R. BEM	216	1,22	1,52	4 mm^2
	R. HMJ	216	1,22	1,52	
	Toilet Pria	20	0,09	0,11	
	Toilet Wanita	20	0,09	0,11	
	Pantry	216	1,22	1,52	
	Gudang ATK	216	1,22	1,52	
	R. CS	216	1,22	1,52	
	R.. Umum	432	2,45	3,06	
	R.Pengelola dan Peralatan	216	1,22	1,52	
	LAB.Farmatologi	1080	6,13	7.66	
	Koridor WC	240	1,09	1,36	
	R. Pengawetan	144	0,81	1,01	
	LAB Histologi	1224	6,95	8,68	
	R. Keuangan	432	2,45	3,06	
	R.Bendahara	216	1,22	1,52	
	R Tata Usaha	216	1,22	1,52	
	Koridor1	20	1,63	2,03	
	Koridor 2	20	1,22	1,52	
	Koridor 3	216	1,63	2,03	
	Koridor 4	216	1,29	1,61	
	Teras 1	216	3,68	4,6	
	Teras 2	432	2,45	3,06	
	Tangga	216	3,40	4,25	

Tabel II
Hasil Perhitungan In, KHA dan Luas Penampang Kabel Lantai 2

Lantai 2	Ruangan	Daya Lampu (Watt)	In (A)	KHA (A)	Luas penampang Kabel mm^2
Fasa S	R. KAJUR	144	0,81	1,01	2,5 mm^2
	R. WAKAJUR	144	0,81	1,01	
	PANTRY	144	0,81	1,01	
	R. OSCE	144	0,81	1,01	
	R. DOSEN	144	0,81	1,01	
	Mushollah Pria	216	0,98	1,22	
	Mushollah Wanita	216	0,98	1,22	
	R. Rapat Dekan	288	1,63	2,03	
	R. Dekan	288	1,63	2,03	
	R Praktikum	2.232	3,68	4,6	
	Ruang Kelas	432	2,45	3,06	
	Perpustakaan	1.080	6,13	7,66	
	Toilet Pria	20	0,09	0,11	
	Toilet Wanita	20	0,09	0,11	
	Toilet Dekan	20	0,09	0,11	
	Koridor 1	1.224	6,95	8,62	
	Koridor 2	144	0,81	1,01	
	Koridor 3	144	0,81	1,01	
	Koridor WC	40	0,18	0,22	

Tabel III
Hasil Perhitungan In , KHA dan Luas Penampang Kabel Lantai 3

Lantai 3	Ruangan	Daya Lampu (Watt)	In (A)	KHA (A)	Luas penampang Kabel mm^2
Fasa T	R. Kelas 1	144	0,81	1,01	6 mm^2
	R. Kelas 2	144	0,81	1,01	
	R. Kelas 3	144	0,81	1,01	
	R. Kelas 4	144	0,81	1,01	
	Loker	144	0,81	1,01	
	Pengelolah LAB	144	0,81	1,01	
	R. Peralatan	144	0,81	1,01	
	Laboratorium 1	144	0,81	1,01	
	Laboratorium 2	144	0,81	1,01	
	Koridor WC	216	0,98	1,22	
	Koridor 1	216	0,98	1,22	
	Koridor 2	288	1,63	2,03	
	Koridor 3	288	1,63	2,03	
	Toilet Pria	2.232	3,68	**4,6**	
	Toilet Wanita	432	2,45	3,06	

Tabel IV
Hasil perhitungan grup pada panel pembagi

Panel Pembagi (SDP)	Total Daya Grup lampu (W)	Total Daya Grup STC (VA)	I_n (A)	KHA (A)	MCB (A)
Lantai 1	7.176 -	- 65.725	13,62 124,82	17,02 156,02	16 160
Lantai 2	6.184 -	- 1.735	11,74 3,29	14,67 4,11	20 6
Lantai 3	6.386 -	- 251.145	12,12 476,96	15,15 596,2	16 630

V. KESIMPULAN

Pada hasil evaluasi perancangan instalasi listrik dapat disimpulkan bahwa :

1. Dari hasil perhitungan perancangan imstalasi listrik pada setiap ruangan itu menggunakan jenis lampu TL = 36 watt untuk ruangan koridor menggunakan jenis lampu SL = 20 watt. Pada evaluasi beban pada fasa R dimana lantai 1 dayanya sebesar 72,90 kW, Fasa S dayanya sebesar 7,91 kW fasa dan fasa T sebesar 257,53 kW.
2. Penampang yang digunakan pada lantai 1 sebesar 4 *mm^2*, lantai 2 sebesar 2,5 *mm^2*, lantai 3 6 *mm^2*
3. Kapasitas MCB yang digunakan pada lantai fasa R sebesar 160 A, fasa S sebesar 16 A dan Fasa T 630 A

SARAN

1. Terdapat ketidakseimbangan beban antar fasa pada sistem distribusi listrik yang dipengaruhi oleh adanya beban terpusat seperti laboratorium yang terhubung dominan pada salah satu fasa,
2. Evaluasi secara berkala terhadap instalasi listrik, terutama pada panel dengan beban besar seperti pada Lantai 3 yang memiliki arus mencapai 489,09 A, guna mengantisipasi potensi overload dan menjaga keandalan sistem.
3. Pemilihan kapasitas MCB dan luas penampang kabel yang sesuai standar sebaiknya tetap dalam evaluasi apabila terjadi penambahan beban di masa mendatang,

REFERENSI

[1] Ardian.N, H. (2021). Evaluasi Instalasi Listrik Pada Gedung Pengnapan Yogyakarta. *Telekomunikasi dan Otomasi SNETO*.

[2] Setiawan. E dan Harten. P. Van (1985). *Instalasi Listrik Arus Kuat 1*. Bandung: Binacipta.

[3] Fauzan.Z.M, R. (2021). Evaluasi dan Perancangan Ulang Instalasi Listrik Gedung Manajemen dan Ruang Kelas di SMAN Garut. *Avaible online at JKTE*.

[4] Hadiyanto.D. (2022). Modul Pelatihan Teknis Instalasi Pemanfaatan Listrik Tegangan Rendah Bagi Pelaksana

Madya. Ciracas, Jakarta Timur: Kementerian ESDM PPSDM KEBTKE.

[5] Hendratno.B, C. (2019). Perancangan dan PemasanganInstalasi Listrik Bangunan Rumah Tinggal Bertingkat Di Graha Family Blok I Nomor 33 Surabaya.

[6] Ir. Sayogo. B, dkk (2014). *PUIL 2011*. Jakarta: Direktur Teknik dan Lingkungan Ketenagalistrikan.

[7] Jamilah.N.H, T. A. (2021). Perancangan Ulang Intalasi Listrik Penerangan Laboratorium Mesin SMK 2 Perkasa. *Industrial Research Workshop and National Seminar Bandung*.

[8] Revaldi.R, H. (2021). Perancangan Instalasi Listrik Pada Gedung Lapan Bogor. *Telekominikasi dan Otomasi SNETO*.

[9] Riyanto. S dan Londong. P (2019). Perancangan Instalasi Listrik Dengan menggunakan sistem *HYBRID* dan JALA-JALA PLN pada bangunan PT. Pertamina EP Asset 5 Tarakan *Field*. *Jurnal, Inovtek Polbeng, Vol. 9*.

[10] Syofian.a, N. (2017). Evaluasi Sistem Kelistrikan Pada Gedung Bertingkat Plaza Andalas Padang. *Jurnal Teknik Elektro ITP*.

[11] Imam, P, A (2021). Perancangan Istalasi Listrik Hybrid Menggunakan Sumber Jaringan Listrik PLN dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Bangunan Gedung Sekolah SMPN 7 Kota Tarakan.

Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 158-163 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

IMPLEMENTASI KONTROLER PID BERBASIS *INTERNALLY TRIGGERED* TRIAC UNTUK PEREDAMAN ARUS *STARTING* PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Abdul Muis Prasetia[1], Linda Sartika[2], Ahmad Setiawan[3]

[1,2,4]*Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]prasetia.electric@gmail.com

Abstract*—The modern industrial world demands efficient production equipment, in which three-phase induction motors serve as the most widely used primary drivers. The primary challenge in operating induction motors is the generation of an exceptionally high starting current surge, reaching 5 to 7 times the nominal current, which triggers a voltage drop across the distribution network. This research aims to design and implement a three-phase induction motor starting current control system using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller based on an Internally Triggered TRIAC. The system integrates an AC dimmer module containing a Zero Crossing Detector (ZCD) and an Internally Triggered TRIAC (BTA16), a PZEM-004T digital current sensor for feedback, and an Arduino Uno microcontroller as the PID control algorithm processor. The test results indicate that the current sensor exhibits a very strong linearity with a coefficient of determination R^2 = 0,9999 and an average error rate of 1.75%. Overall system testing proves that the PID controller is capable of suppressing the 0.40 A starting current surge inherent in the Direct On Line (DOL) method. Optimal PID parameter tuning at Kp = 3, Ki = 0,1, and Kd = 0,02 yields a stable transient response with a delay time of 16.5 s, rise time of 31.5 s, peak time of 34.1 s, and settling time of 34.08 s, successfully achieving the nominal current setpoint of 0.30 A precisely without any current surge (0% maximum overshoot and 0% steady state error).

Keywords*—Three-Phase Induction Motor, Starting Current, PID Controller, Internally Triggered TRIAC, Zero Crossing Detector.

Intisari—Dunia industri modern menuntut ketersediaan peralatan produksi yang efisien, di mana motor induksi tiga fasa menjadi penggerak utama yang paling banyak digunakan. Kendala utama dalam pengoperasian motor induksi adalah timbulnya lonjakan arus asut (*starting current*) yang sangat tinggi, mencapai 5 hingga 7 kali lipat dari arus nominal, sehingga memicu jatuh tegangan (*voltage drop*) pada jaringan distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berbasis *Internally Triggered TRIAC*. Sistem ini mengintegrasikan modul *dimmer* AC yang memuat rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD) dan *Internally Triggered TRIAC* (BTA16), sensor arus digital PZEM-004T sebagai umpan balik (*feedback*), serta mikrokontroler Arduino Uno sebagai pemroses algoritma kendali PID. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor arus memiliki tingkat linieritas yang sangat tinggi dengan koefisien determinasi R^2 = 0,9999 dan tingkat *error* rata-rata sebesar 1,75%. Pengujian sistem secara keseluruhan membuktikan bahwa kontroler PID mampu meredam lonjakan arus *starting* sebesar 0,40 A pada metode *Direct On Line* (DOL). Penalaan parameter PID optimal pada nilai Kp = 3, Ki = 0,1, dan Kd = 0,02 mampu menghasilkan respon transien yang stabil dengan *delay time* 16,5 s, *rise time* 31,5 s, *peak time* 34,1 s, serta *settling time* 34,08 s, dan berhasil mencapai *setpoint* arus nominal sebesar 0,30 A secara presisi tanpa menimbulkan lonjakan arus (*maximum overshoot* 0% dan *steady state error* 0%).

***Kata Kunci*—Motor Induksi Tiga Fasa, Arus *Starting*, Kontroler PID, *Internally Triggered TRIAC*, *Zero Crossing Detector*.**

I. PENDAHULUAN

Kemajuan pesat di sektor perindustrian, baik pada skala besar maupun kecil, menuntut ketersediaan peralatan produksi yang andal dan tepat guna untuk meningkatkan efisiensi waktu serta menekan biaya operasional. Sebagian besar peralatan penggerak di lingkungan industri mengandalkan motor listrik arus bolak-balik (*Alternating Current* / AC), khususnya motor induksi. Motor induksi beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus pada rotor tidak disuplai dari sumber tegangan eksternal tertentu, melainkan terinduksi akibat adanya perbedaan kecepatan relatif (*slip*) antara putaran rotor dan medan magnet putar (*rotating magnetic field*) yang dibangkitkan oleh belitan stator [1], [2]. Dibandingkan dengan motor arus searah (*Direct Current* / DC), motor induksi memiliki konstruksi mekanis yang jauh lebih sederhana dan kokoh karena tidak adanya kontak fisik langsung antara stator dan rotor, sehingga mengeliminasi penggunaan komutator maupun sikat arang (*brush*) [3]. Keunggulan konstruksi ini menjadikan motor induksi lebih ekonomis, mudah dalam perawatan, serta dapat dihubungkan langsung pada sumber daya AC [3], [4]. Berkat karakteristik tersebut, penggunaan motor DC di industri mulai tergeser, dan diperkirakan sekitar 70% aplikasi penggerak industri seperti pompa, kompresor, *belt conveyor*, *grinder*, hingga sistem jaringan listrik—menggunakan motor induksi tiga fasa yang memiliki rentang kapasitas daya mulai dari 1/3 HP hingga ratusan HP [5], [6].

Meskipun memiliki keandalan operasional yang tinggi pada kondisi tunak (*steady-state*), motor induksi tiga fasa menghadapi kendala krusial pada saat proses pengasutan (*starting*), yakni fase akselerasi awal motor dari kecepatan nol menuju kecepatan putar nominalnya. Ketika tegangan penuh disuplai langsung ke belitan stator menggunakan metode konvensional *Direct On Line* (DOL), belitan

primer akan menarik lonjakan arus asut (*starting/inrush current*) yang sangat tinggi hingga mencapai 5 sampai 7 kali lipat dari arus nominalnya, sedangkan torsi awal yang dibangkitkan hanya berkisar antara 1,5 hingga 2,5 kali torsi beban penuh [7]–[9]. Meskipun berlangsung dalam durasi yang singkat, lonjakan arus transien yang ekstrem ini mengakibatkan jatuh tegangan (*voltage drop*) sesaat pada saluran daya dan berpotensi merusak atau mengganggu kinerja peralatan elektronik lain yang terhubung pada jaringan distribusi yang sama [7], [8], [10]. Oleh sebab itu, pada motor induksi berdaya besar (di atas 30 HP hingga 50 HP), pengasutan secara langsung sangat tidak direkomendasikan, sehingga diperlukan metode pengasutan alternatif seperti hubungan Star-Delta, *Variable Speed Drive* (VSD), maupun teknik *soft starting* guna membatasi lonjakan arus mula motor [5], [7], [8].

Berbagai pendekatan teknik pengasutan telah dikembangkan oleh para peneliti terdahulu untuk mereduksi arus *starting* dan mengoptimalkan kinerja transien motor induksi. Sultan dkk. [5] mengembangkan sistem pengasutan motor induksi tiga fasa berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) guna menekan arus mula serta menghindari jatuh tegangan sistem saat motor diasut. Di sisi lain, pemanfaatan komponen semikonduktor daya pada rangkaian *soft starting* juga banyak diterapkan untuk memodulasi tegangan masukan motor secara bertahap [7], [11]–[13]. Riyadi dkk. [7] merancang sistem soft *starting* pada motor induksi tiga fasa menggunakan enam buah komponen *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) yang disusun dalam konfigurasi konverter AC-AC anti-paralel. Melalui pengaturan waktu penyulutan pulsa gerbang (*gate trigger*) pada setiap setengah siklus tegangan sumber, tegangan masukan ke motor dapat dinaikkan secara halus dari nol hingga tegangan penuh selama periode pengasutan [7]. Pendekatan serupa dikaji oleh Bachtiar dkk. [13] yang merancang rangkaian *soft starting* motor induksi satu fasa menggunakan komponen TRIAC (*Triode for Alternating Current*) dan mikrokontroler Arduino. Dalam penelitian tersebut, Arduino difungsikan untuk mendeteksi persilangan titik nol (*Zero Crossing Detector* / ZCD) sebagai pemicu awal sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) guna mengontrol sudut penyulutan gerbang (gate) TRIAC, yang terbukti mampu menghemat arus pengasutan hingga 71,5% dengan batas arus tertinggi terjaga pada arus nominalnya [13].

Seiring perkembangan teknologi elektronika daya, pengaturan sudut fasa tegangan AC kini dapat dilakukan secara lebih terpadu menggunakan *Internally Triggered* TRIAC (ITT). Komponen ini mengintegrasikan *Diode Alternating Curren*t (DIAC) dan TRIAC dalam satu kesatuan saklar semikonduktor dua arah (*bidirectional thyristor*), di mana TRIAC akan memicu tegangan maju setelah sinyal melewati batas tegangan breakover pada DIAC untuk merespons sudut fasa sinusoidal antara terminal MT1 dan MT2 [14], [15]. Herlan dan Prabowo [15] menyatakan bahwa *Internally Triggered* TRIAC sangat efektif diaplikasikan sebagai saklar AC dan pengendali fasa pada kontrol motor AC, modulasi temperatur, maupun pengaturan iluminasi pencahayaan. Keandalan komponen ini juga telah dibuktikan oleh Sartika dkk. [16] dalam sistem pengaturan beban otomatis generator sinkron tiga fasa, di mana *Internally Triggered* TRIAC mampu menurunkan tegangan beban secara otomatis ketika arus melampaui *setpoint* (0,50 A) guna mencegah terjadinya beban lebih (*overload*).

Guna memastikan penyulutan *Internally Triggered* TRIAC mampu meredam arus transien pengasutan secara presisi dan stabil pada nilai referensi, diperlukan algoritma pengendali umpan balik (*closed-loop*) yang tangguh. Kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan sistem kendali berumpan balik yang paling luas digunakan di industri karena mengombinasikan tiga parameter kendali proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd)—secara paralel sehingga mampu saling menutupi kelemahan masing-masing aksi kendali [17]–[20]. Dalam sistem loop tertutup, aksi proporsional dan integral berperan mempercepat waktu naik (*rise time*) serta mengeliminasi kesalahan keadaan tunak (*steady state error*), sedangkan aksi derivatif memberikan koreksi prediktif terhadap laju perubahan *error* untuk menambah redaman sistem dan mengurangi overshoot [17]. Meskipun penerapan kontroler PID untuk regulasi kecepatan motor induksi [18] serta penggunaan TRIAC konvensional pada motor satu fasa [13] telah dikaji sebelumnya, integrasi kontroler PID dengan modul dimmer berbasis *Internally Triggered* TRIAC untuk pengendalian arus *starting* pada motor induksi tiga fasa masih jarang dieksplorasi.

Berdasarkan latar belakang dan kajian pustaka di atas, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler PID berbasis *Internally Triggered* TRIAC. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan modul dimmer (yang memuat rangkaian ZCD dan *Internally Triggered* TRIAC BTA16), sensor arus digital PZEM-004T sebagai umpan balik pengukuran arus, serta mikrokontroler Arduino Uno sebagai pemroses algoritma PID [21], [22]. Kontribusi dan tujuan utama dari makalah ini adalah mengendalikan sudut penyulutan tegangan melalui *Internally Triggered* TRIAC secara otomatis agar lonjakan arus *starting* motor induksi tiga fasa dapat dihilangkan dan dikendalikan menuju nilai *setpoint* arus nominalnya (0,3 A), sekaligus menganalisis karakteristik respon transien sistem (meliputi *delay time, rise time, peak time, maximum overshoot, settling time, dan steady state error*) pada berbagai variasi parameter Kp , Ki, dan Kd.

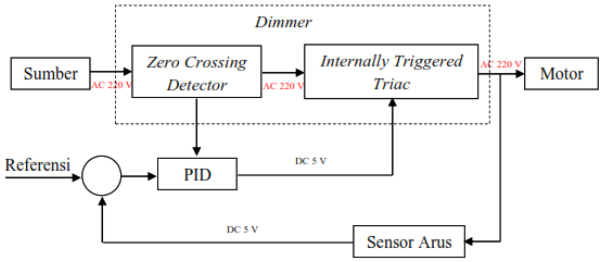
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan. Secara garis besar, tahapan pelaksanaan penelitian meliputi studi literatur, perancangan dan karakterisasi modul pengendali tegangan (*Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered* TRIAC), kalibrasi sensor arus, perancangan algoritma kontroler PID, implementasi perangkat keras terintegrasi, serta pengujian dan analisis respon transien arus pengasutan motor induksi tiga fasa.

A. Arsitektur Sistem dan Spesifikasi Perangkat Keras

Sistem kendali arus *starting* yang diusulkan dirancang menggunakan konfigurasi umpan balik (*closed-loop system*) sebagaimana diilustrasikan pada blok diagram sistem yang terlihat pada Gambar 1. Sumber tegangan jala-

jala AC 220 V disalurkan menuju modul dimmer yang di dalamnya terintegrasi rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD) dan *Internally Triggered* TRIAC sebelum terhubung ke terminal beban motor induksi tiga fasa. Objek yang dikendalikan dalam penelitian ini adalah motor induksi tiga fasa merek Gin Re Electric Motor Co., Ltd. (Tipe GR-5IK60A-SF) dengan spesifikasi daya keluaran 60 W, tegangan kerja AC 220 V, arus nominal 0,3 A, dan kecepatan putar 3200 RPM.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Komponen utama penyusun sistem kendali terdiri atas tiga subsistem perangkat keras, yaitu:

1. Unit Pengendali Daya (Modul Dimmer AC)

Menggunakan modul dimmer berdimensi fisik 63 mm x 30 mm x 30 mm yang beroperasi pada tegangan AC 110–220 V, frekuensi 50/60 Hz, tegangan logika 3,3–5 V, serta kapasitas arus keluaran 2–5 A. Modul ini memuat rangkaian ZCD untuk mendeteksi titik persilangan nol gelombang tegangan sinusoidal dan komponen *Internally Triggered* TRIAC tipe BTA16 sebagai saklar semikonduktor dua arah untuk memotong sudut fasa tegangan AC.

2. Unit Akuisisi Data Arus (Sensor PZEM-004T)

Pengukuran arus beban secara real-time dilakukan menggunakan modul sensor digital PZEM-004T berdimensi 3,1 cm x 7,4 cm yang dilengkapi trafo arus (*current transformer* / CT) berdiameter 3 mm dengan kapasitas pengukuran arus maksimal hingga 100 A pada rentang tegangan kerja 80–260 VAC.

3. Unit Pemroses Kendali (Mikrokontroler Arduino Uno)

Mikrokontroler Arduino Uno bertegangan kerja 5 V digunakan sebagai pusat pengolahan data sensor sekaligus eksekutor algoritma kontrol PID. Mikrokontroler ini memiliki 14 pin I/O digital (dengan 6 pin di antaranya mendukung keluaran analog/PWM, yakni pin 3, 5, 6, 9, 10, dan 11) serta 6 pin masukan analog.

Dalam implementasi sistem secara keseluruhan untuk motor induksi tiga fasa, perancangan perangkat keras menerapkan arsitektur terdistribusi pada masing-masing fasa (R, S, dan T). Sistem ini mengintegrasikan tiga unit sensor arus PZEM-004T, tiga unit modul dimmer AC, serta enam unit mikrokontroler Arduino Uno, di mana tiga mikrokontroler bertugas mengakuisisi dan mengonversi data arus dari sensor PZEM-004T pada tiap fasa, sedangkan tiga mikrokontroler lainnya memproses algoritma kendali PID dan membangkitkan sinyal pemicuan menuju masing-masing modul dimmer.

B. Kalibrasi Sensor dan Pemodelan Algoritma Kontrol PID

Untuk menjamin keakuratan sinyal umpan balik pada sistem kendali, modul sensor arus PZEM-004T dikalibrasi terlebih dahulu dengan membandingkan nilai arus pembacaan sensor terhadap alat ukur standar (multimeter) pada berbagai variasi beban. Hubungan linieritas antara nilai pembacaan alat ukur (x) dan nilai pembacaan sensor arus (y) dianalisis menggunakan regresi linier untuk memperoleh persamaan koreksi kalibrasi serta nilai koefisien determinasi (R^2), di mana rentang nilai R^2 sebesar 0,80–1,000 mengindikasikan korelasi linieritas yang sangat kuat.

Setelah data arus terkalibrasi, mikrokontroler membandingkan nilai arus aktual beban terhadap nilai arus referensi (*setpoint*) guna memperoleh sinyal kesalahan atau *error* e(t). Sinyal *error* tersebut kemudian diproses oleh kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) yang menggabungkan aksi kendali proporsional, integral, dan derivatif secara paralel [17], [18]. Dalam implementasi pemrograman secara diskrit pada mikrokontroler Arduino Uno, persamaan kendali PID ditransformasikan ke dalam algoritma komputasi numerik.

C. Prosedur Eksperimental dan Skenario Pengujian

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap melalui tiga skenario eksperimental untuk memvalidasi kinerja masing-masing subsistem maupun sistem terintegrasi.

1. Pengujian dan Kalibrasi Sensor Arus
   Modul PZEM-004T dihubungkan ke Arduino Uno melalui pin tegangan 5 V, GND, serta pin komunikasi *Software Serial* D11 (TX) dan D12 (RX). Pengujian dilakukan dengan mengukur arus pada beberapa tingkatan beban hingga ~1,45 A untuk mendapatkan kurva regresi kalibrasi, kemudian memvalidasi akurasi pembacaan sensor pada beban uji lampu pijar 15 W / 220 V.
2. Karakterisasi Modul Dimmer (ZCD dan *Internally Triggered* TRIAC)
   Pin VCC dan GND modul dimmer dihubungkan ke pin 5 V dan GND Arduino Uno, sedangkan pin deteksi ZCD dihubungkan ke pin interupsi digital D2 dan pin pemicu PWM dihubungkan ke pin digital D9. Osiloskop digunakan untuk mengamati bentuk sinyal pulsa *Zero Crossing Detector* serta profil terpotongnya gelombang tegangan sinusoidal pada keluaran *Internally Triggered* TRIAC. Selanjutnya, dilakukan variasi nilai *duty cycle* dari 10% hingga 100% (ekuivalen dengan nilai PWM 25,5 hingga 255) menggunakan beban lampu untuk memetakan karakteristik perubahan arus keluaran terhadap *duty cycle*.
3. Pengujian Pengasutan Motor Induksi Tiga Fasa (Metode DOL vs Kontrol PID)
   Pada tahap pertama, motor induksi tiga fasa dioperasikan secara langsung menggunakan metode *Direct On Line* (DOL) tanpa pengendali untuk merekam profil lonjakan arus *starting* sebagai data pembanding (*baseline*). Pada tahap kedua, motor induksi dioperasikan menggunakan sistem kendali PID berbasis *Internally Triggered* TRIAC dengan nilai *setpoint* arus nominal sebesar 0,3 A. Penalaan (tuning) parameter konstanta PID dilakukan secara eksperimental (*trial* and *error*), kinerja stabilitas sistem dievaluasi berdasarkan parameter respon transien yang mencakup waktu tunda (*delay*), waktu naik (*rise time*), waktu puncak (*peak time*), lonjakan

maksimum (*maximum overshoot*), waktu tunak (*settling time*), serta kesalahan keadaan tunak (*steady state error*)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian eksperimental dan evaluasi kinerja sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa dilakukan melalui empat tahapan utama, yang meliputi kalibrasi dan validasi akurasi sensor arus PZEM-004T, karakterisasi sinyal penyulutan modul *dimmer* (*Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered TRIAC*), pengujian karakteristik pengasutan motor dengan metode konvensional *Direct On Line* (DOL), serta evaluasi respon transien sistem pengasutan menggunakan kontroler PID pada berbagai variasi parameter penalaan.

A. Hasil Kalibrasi dan Validasi Sensor Arus

Tahap awal pengujian difokuskan pada kalibrasi sensor arus digital PZEM-004T terhadap alat ukur standar (multimeter) guna memastikan keakuratan pembacaan umpan balik arus pada sistem loop tertutup. Pengujian dilakukan pada tujuh variasi titik pembebanan arus, mulai dari 0,03 A hingga 1,42 A. Hasil perbandingan pengukuran antara alat ukur standar dan sensor arus disajikan pada Tabel I.

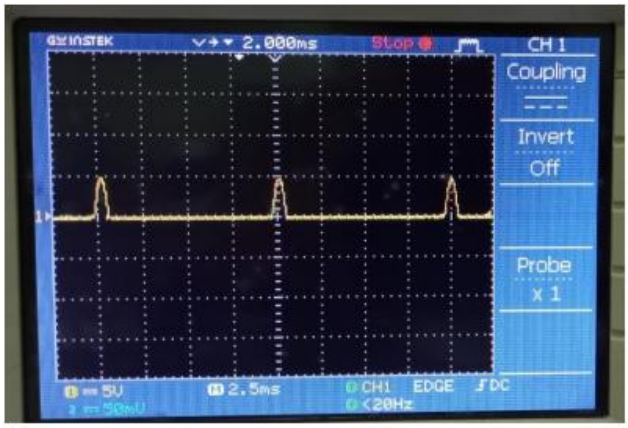
Tabel I
Hasil perbandingan pengukuran antara alat ukur standar dan sensor arus

Alat Ukur (A)	Sensor Arus (A)	Error (%)
0,03	0,03	0,00
0,24	0,25	4,00
0,48	0,49	2,04
0,72	0,73	1,36
0,96	0,97	1,03
1,19	1,21	1,65
1,42	1,45	2,06

Berdasarkan analisis regresi linier terhadap data pada Tabel I, diperoleh persamaan kalibrasi linier $y = 1{,}0167x + 0{,}0008$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9999 (mendekati 1). Nilai R^2 yang berada pada rentang $0{,}80 < R^2 < 1{,}000$ membuktikan bahwa sensor arus PZEM-004T memiliki tingkat korelasi dan linieritas yang sangat kuat terhadap alat ukur standar. Persamaan regresi tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam algoritma pemrograman mikrokontroler sebagai faktor koreksi pembacaan sensor. Selanjutnya, total nilai pembacaan sensor y = 5,13 A dan total nilai alat ukur x = 5,04 A, diperoleh nilai *error* rata-rata keseluruhan hanya sebesar 1,75 %. Validasi lebih lanjut menggunakan beban uji resistif berupa satu buah lampu pijar 15 W pada tegangan 220 V menunjukkan arus terukur pada sensor sebesar 0,08 A, yang sangat mendekati nilai perhitungan teoretis sebesar 0,06 A. Hal ini mengonfirmasi bahwa sensor layak digunakan sebagai elemen umpan balik arus.

B. Karakterisasi Modul Dimmer (ZCD dan *Internally Triggered TRIAC*)

Pengujian modul *dimmer* dilakukan dalam dua tahap untuk memverifikasi ketepatan pendeteksian titik nol gelombang AC dan kemampuan regulasi tegangan keluaran oleh *Internally Triggered TRIAC*. Pada tahap pertama, pengamatan menggunakan osiloskop pada keluaran rangkaian *Zero Crossing Detector* menunjukkan pembangkitan sinyal pulsa positif yang periodik dan konsisten setiap kali gelombang tegangan sinusoidal memotong titik nol (*zero-crossing*) yang terlihat pada Gambar 2. Sinyal ini berfungsi sebagai referensi sinkronisasi waktu bagi mikrokontroler untuk menentukan sudut tunda penyulutan (*firing angle*) TRIAC pada setiap setengah siklus gelombang.



Gambar 2. Hasil *Zero Crossing Detector*

Pengujian pemotongan gelombang tegangan AC menggunakan variasi *duty cycle* antara 10% hingga 100% menghasilkan karakteristik arus keluaran terhadap perubahan nilai PWM dan *duty cycle* sebagaimana dirangkum pada Tabel II

Tabel II Karakteristik arus keluaran terhadap perubahan nilai PWM dan *duty cycle*

Nilai Input PWM	*Duty Cycle* (%)	Arus Keluaran (A)
25,5	10	0,009
51,0	20	0,059
76,5	30	0,090
102,0	40	0,115
127,5	50	0,134
153,0	60	0,148
178,5	70	0,159
204,0	80	0,163
229,5	90	0,165
255,0	100	0,166

Peningkatan nilai *duty cycle* dari 10% hingga 100% menghasilkan kenaikan arus keluaran secara proporsional dari 0,009 A hingga maksimum 0,166 A. Pada *duty cycle* 70%, arus tercatat 0,159 A dan mulai saturasi menuju konduksi penuh. Hal ini membuktikan bahwa *Internally Triggered TRIAC* mampu memodulasi daya dan mengatur arus AC secara efektif

C. Analisis Pengasutan Motor Induksi dengan Metode Direct On Line (DOL)

Pengujian motor induksi tiga fasa menggunakan metode *Direct On Line* (DOL) tanpa pengendali PID menunjukkan adanya lonjakan arus *starting* transien yang mencapai puncak sebesar 0,40 A sebelum beroperasi stabil pada arus nominal 0,30 A. Lonjakan arus awal sebesar 33,3% di atas arus nominal pada motor berdaya 60 W ini mengonfirmasi fenomena arus *inrush* saat slip bernilai maksimum.

D. Evaluasi Kinerja Pengasutan Motor Menggunakan Kontroler PID

Untuk meredam lonjakan arus *starting*, sistem kendali loop tertutup berbasis PID dan *Internally Triggered TRIAC* diuji dengan menetapkan *setpoint* arus nominal 0,30 A. Evaluasi dilakukan melalui tiga skenario penalaan parameter PID :

1. Skenario 1 (K_p = *5,* K_i = *0,5,* K_d = *0,002*): Menghasilkan waktu naik yang cepat tetapi memicu lonjakan arus melewati *setpoint* (*maximum overshoot* 13,3% atau ~0,34 A) dan menyisakan kesalahan keadaan tunak 0,03 A .
2. Skenario 2 ($K_p = 4, K_i = 0,2, K_d = 0,002$): Menurunkan *maximum overshoot* menjadi 10% (~0,33 A) dengan respon transien yang lebih lambat, namun kondisi tunak belum konvergen sempurna pada *setpoint*.
3. Skenario 3 ($K_p = 3, K_i = 0,1, K_d = 0,02$): Menghasilkan kenaikan arus yang sangat terkendali tanpa menimbulkan lonjakan sedikit pun (*maximum overshoot* 0%) serta mencapai kestabilan sempurna pada *setpoint* 0,30 A tanpa kesalahan keadaan tunak .

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi perangkat keras, dan pengujian eksperimental yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa modul sensor arus digital PZEM-004T terbukti andal sebagai elemen umpan balik dengan tingkat linieritas dan akurasi tinggi terhadap alat ukur standar, yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi R^2 = 0,9999 dan persentase *error* rata-rata kalibrasi sebesar 1,75%. Integrasi rangkaian *Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered TRIAC* pada modul *dimmer* efektif memodulasi sudut penyulutan tegangan AC secara proporsional terhadap variasi sinyal PWM, sehingga mampu membatasi arus yang mengalir ke kumparan stator motor induksi. Penerapan algoritma kontroler PID berhasil mengeliminasi lonjakan arus *starting* (*inrush current*) ekstrem sebesar 0,40 A yang lazim terjadi pada metode pengasutan langsung (*Direct On Line* / DOL). Kinerja sistem paling optimal dicapai pada penalaan parameter Kp = 3, Ki = 0,1, dan Kd = 0,02, yang menghasilkan respon transien stabil dengan *delay time* 16,5 s, *rise time* 31,5 s, *peak time* 34,1 s, serta *settling time* 34,08 s, dan mampu mencapai *setpoint* arus nominal 0,30 A secara presisi tanpa menimbulkan lonjakan arus (*maximum overshoot* 0% dan *steady state error* 0%).

REFERENSI

[1] R. Silaen, "Pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk motor induksi tiga fasa," Skripsi, Fakultas Teknik, 2017.

[2] R. Arindya, *Penggunaan dan Pengaturan Motor Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2013.

[3] A. M. Prasetia and H. Santoso, "Implementation of scalar control method for 3 phase induction motor speed control," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 3, no. 1, pp. 63–69, 2018.

[4] Z. Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik Edisi Revisi*. Yogyakarta, Indonesia: Penerbit Andi, 2019.

[5] S. Sultan, A. B. Muljono, and I. M. A. Nrartha, "Visualisasi pengasutan motor induksi tiga fase berbasis programmable logic control," *DIELEKTRIKA*, vol. 4, no. 1, pp. 58–69, 2017.

[6] S. Riyanto and A. Sapriadi, "Analisis pengasutan motor induksi tiga fasa 15 HP menggunakan metode DOL (*Direct On Line*) pada PDAM Juwata Laut Tarakan," *Elektrika Borneo*, vol. 4, no. 2, pp. 11–16, 2018.

[7] D. Riyadi H., A. Warsito, and M. Facta, "Soft *starting* pada motor induksi 3 fasa," Tugas Akhir/Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia, 2011.

[8] M. I. P. Naibaho, I. K. Wijaya, and I. M. Mataram, "Studi analisis perbandingan metode *starting Direct On Line* (DOL) dan variabel speed drive (VSD) pada motor fan untuk cooling tower di PT. RAPP (Riau Andalan Pulp Paper)," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, 2021.

[9] K. Hasto, M. Haddin, and D. Nugroho, "Kendali arus *starting* motor induksi satu fasa menggunakan magnetic energy recovery switch (MERS)," *Media Elektrika*, vol. 8, no. 2, 2015.

[10] A. Saputra, S. Syukriyadin, and M. Syukri, "Perancangan rangkaian pengasutan soft *starting* pada motor induksi 3 fasa berbasis Arduino Nano," *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro (KITEKTRO)*, vol. 2, no. 4, 2017.

[11] M. Ali, *Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: UNY Press, 2018.

[12] F. Djuandi, *Pengenalan Arduino*. E-book: www.tobuku.com, 2011, p. 24.

[13] M. S. Bachtiar, S. B. Mulia, A. Suryadi, and F. S. Hadisusanto, "Perancangan soft *starting* motor induksi satu fasa menggunakan Triac," *Jurnal Rekayasa Teknologi dan Sains Terapan*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.

[14] *Jenis-Jenis Motor Listrik*, Elektronika Dasar, 2012. [Online]. Tersedia: https://elektronika-dasar.web.id/jenis-jenis-motor-listrik. [Diakses: 9 Jan 2022].

[15] H. Herlan and B. A. Prabowo, "Rangkaian dimmer pengatur iluminasi lampu pijar berbasis *Internally Triggered* TRIAC," *INKOM Journal*, vol. 3, no. 1–2, pp. 14–21, 2010.

[16] L. Sartika, A. M. Prasetia, and D. M. Efendi, "Sistem pengaturan beban generator sinkron 3 fasa otomatis berbasis *Internally Triggered* TRIAC," Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia, 2021.

[17] K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik*, Edisi ke-2, Jilid 1. Jakarta, Indonesia: Prentice Hall / Erlangga, 1970.

[18] F. M. Wildan, E. A. Hakim, and D. Suhardi, "Sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler PID berbasis Genetic Algorithm," *KINETIK*, vol. 1, no. 1, pp. 23–32, 2016.

[19] W. Waluyo, A. Fitriansyah, and S. Syahrial, "Analisis penalaan kontrol PID pada simulasi kendali kecepatan putaran motor DC berbeban menggunakan metode heuristik," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik,*

Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, vol. 1, no. 2, p. 79, 2013.

[20] L. Sartika, A. M. Prasetia, and A. Ma'ruf, "Penggunaan PID pada Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk kestabilan tegangan terminal generator sinkron 3 fasa," Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia, 2021.

[21] H. Guntoro and Y. Somantri, "Rancang bangun magnetic door lock menggunakan keypad dan solenoid berbasis mikrokontroler Arduino Uno," *Electrans*, vol. 12, no. 1, pp. 39–48, 2013.

[22] *Mengenal PZEM-004T Modul Elektronik untuk Alat Pengukuran Listrik*, NN-Digital, 10 Jul. 2019. [Online]. Tersedia:https://www.nndigital.com/blog/2019/07/10/mengenal-pzem-004t-modul-elektronik-untuk-alat-pengukuran-listrik/. [Diakses: 7 Nov 2021].