



Scripta Technica: Journal of Engineering and Applied Technology

Vol 1 No 2 Desember 2025, Hal. 130-141
ISSN:3110-0775(Print) ISSN: 3109-9696(Electronic)
Open Access: <https://scriptaintelektual.com/scripta-technica>

Efisiensi Energi pada Sistem Telekomunikasi Industri untuk Meningkatkan Efisiensi Operasional di Indonesia 2022-2024

Septian Rizky Firdaus¹, Muhammad Syuaibi Chuluq Syuhadah²

¹⁻² Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia

email: putraarjun106@gmail.com¹, Muhammad.Syuaby@gmail.com²

Article Info :

Received:

23-9-2025

Revised:

18-10-2025

Accepted:

08-12-2025

Abstract

This study analyzes energy efficiency in the Indonesian telecommunications industry during 2022–2024 by examining the interaction between infrastructure expansion, green technology investment, and network capacity enhancement. The findings indicate that the uncontrolled increase in the number of base transceiver stations tends to reduce energy efficiency when optimization measures are not implemented, particularly in regions with fluctuating traffic demand. In contrast, capital expenditure allocated to green technology demonstrates a strong positive effect on energy performance, as renewable-based systems, modernized equipment, and automated energy management configurations significantly reduce operational electricity consumption. Network capacity enhancement also contributes to operational efficiency by distributing traffic loads more effectively, minimizing equipment strain, and stabilizing service performance across diverse geographical areas. The combined impact of these factors highlights the need for structured modernization and energy-aware planning within the sector. Strengthening energy efficiency not only lowers operational costs but also supports national digital transformation goals through more resilient, reliable, and sustainable telecommunications infrastructure. These results emphasize that energy-efficient strategies are essential for improving long-term operational performance in Indonesia's telecommunications industry.

Keywords: Energy Efficiency, Telecommunications Infrastructure, Green Technology Investment, Network Capacity, Operational Performance.

Abstrak

Studi ini menganalisis efisiensi energi di industri telekomunikasi Indonesia selama periode 2022–2024 dengan mengkaji interaksi antara perluasan infrastruktur, investasi teknologi hijau, dan peningkatan kapasitas jaringan. Temuan menunjukkan bahwa peningkatan tak terkendali dalam jumlah stasiun pemancar dasar cenderung mengurangi efisiensi energi jika langkah-langkah optimasi tidak diterapkan, terutama di wilayah dengan permintaan lalu lintas yang fluktuatif. Di sisi lain, pengeluaran modal yang dialokasikan untuk teknologi hijau menunjukkan dampak positif yang kuat terhadap kinerja energi, karena sistem berbasis energi terbarukan, peralatan modern, dan konfigurasi manajemen energi otomatis secara signifikan mengurangi konsumsi listrik operasional. Peningkatan kapasitas jaringan juga berkontribusi pada efisiensi operasional dengan mendistribusikan beban lalu lintas secara lebih efektif, meminimalkan beban peralatan, dan menstabilkan kinerja layanan di berbagai wilayah geografis. Dampak gabungan faktor-faktor ini menyebutkan bahwa modernisasi terstruktur dan perencanaan yang sadar energi di sektor ini. Peningkatan efisiensi energi tidak hanya menurunkan biaya operasional tetapi juga mendukung tujuan transformasi digital nasional melalui infrastruktur telekomunikasi yang lebih tangguh, andal, dan berkelanjutan. Hasil ini menekankan bahwa strategi efisiensi energi sangat penting untuk meningkatkan kinerja operasional jangka panjang di industri telekomunikasi Indonesia.

Kata kunci: Efisiensi Energi, Infrastruktur Telekomunikasi, Investasi Teknologi Hijau, Kapasitas Jaringan, Kinerja Operasional.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan layanan digital di Indonesia mendorong sektor telekomunikasi untuk memperkuat infrastruktur yang mampu beroperasi dengan penggunaan energi yang lebih efisien, terutama setelah pertumbuhan trafik data meningkat secara signifikan pada periode 2022–2024 sebagaimana tergambar dalam laporan kinerja nasional (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2023). Penguatan infrastruktur tersebut menimbulkan kebutuhan energi yang semakin besar sehingga

perusahaan telekomunikasi perlu mempertimbangkan strategi operasional yang dapat menekan biaya konsumsi listrik dan meminimalkan pemborosan sumber daya. Data statistik energi menunjukkan bahwa konsumsi energi nasional terus meningkat akibat bertambahnya infrastruktur digital sehingga efisiensi energi menjadi salah satu aspek inti pembangunan berkelanjutan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Tren tersebut memperlihatkan urgensi penelitian mengenai efisiensi energi agar industri telekomunikasi mampu beroperasi secara kompetitif di tengah dinamika ekonomi dan kebutuhan digital yang terus bergerak naik (Badan Pusat Statistik, 2024).

Operator telekomunikasi besar di Indonesia telah menyadari bahwa efisiensi energi bukan hanya isu teknis, tetapi juga berkaitan erat dengan model bisnis dan keberlanjutan perusahaan, sebagaimana tergambar dalam dokumen transformasi keberlanjutan yang menyoroti kebutuhan pengurangan emisi dan beban energi (PT Telkom Indonesia, 2023). Dorongan transformasi tersebut selaras dengan program pemerintah dalam memperluas pemerataan akses telekomunikasi melalui skema pembangunan infrastruktur strategis yang menyerap energi dalam jumlah besar (Kementerian Komunikasi dan Informatika RI, 2023). Infrastruktur telekomunikasi yang tersebar di berbagai wilayah menuntut adanya sistem manajemen energi yang lebih adaptif agar setiap unit BTS dan perangkat jaringan dapat beroperasi optimal tanpa menimbulkan pemborosan daya. Situasi ini menunjukkan bahwa efisiensi energi telah menjadi variabel penting yang memengaruhi kinerja operasional sekaligus daya saing industri telekomunikasi di tingkat nasional.

Kajian internasional menunjukkan bahwa konsumsi energi pada Base Transceiver Station (BTS) dapat ditekan secara signifikan melalui integrasi sumber energi hybrid sehingga membuka peluang bagi operator telekomunikasi untuk mengurangi ketergantungan pada energi konvensional yang mahal dan kurang stabil (Faruk et al., 2016). Analisis lebih lanjut mengenai kombinasi energi terbarukan pada sektor telekomunikasi menunjukkan bahwa pendekatan teknis dan ekonomi dapat berjalan seiring untuk mendorong keberlanjutan industri (Ali et al., 2024). Integrasi energi terbarukan juga selaras dengan temuan penelitian konservasi lingkungan yang menegaskan perlunya pendekatan teknologi berkelanjutan guna mengurangi dampak operasional sektor digital yang semakin meluas (Alahdal et al., 2023). Berbagai temuan tersebut memperlihatkan peluang besar bagi penerapan strategi efisiensi energi yang lebih modern pada infrastruktur telekomunikasi Indonesia.

Hasil penelitian mengenai pemanfaatan energi surya dan pemanenan energi gelombang radio pada stasiun pemancar memperlihatkan potensi besar untuk mengurangi konsumsi energi listrik dari jaringan utama serta meningkatkan keandalan operasional pada titik-titik yang jauh dari pusat beban energi (Nguyen et al., 2020). Pemanfaatan metode tersebut juga memberikan keuntungan jangka panjang karena dapat menurunkan biaya operasional sekaligus memperpanjang umur perangkat jaringan yang tidak dibebani dengan fluktuasi energi berlebih. Pendekatan efisiensi ini sejalan dengan teori produktivitas dan efisiensi yang menjelaskan bahwa optimalisasi input energi akan menghasilkan keluaran operasional yang lebih tinggi serta biaya yang lebih terkendali (Coelli et al., 2005). Kondisi tersebut menegaskan bahwa efisiensi energi menjadi fondasi penting dalam pengembangan jaringan telekomunikasi yang andal dan hemat biaya.

Upaya pengurangan konsumsi energi sektor telekomunikasi sejalan dengan arah global yang menekankan percepatan transisi energi bersih sebagai respons terhadap peningkatan kebutuhan digital dunia (International Energy Agency, 2023). Perkembangan teknologi baru seperti sistem prediktif berbasis pembelajaran mesin juga menunjukkan potensi signifikan untuk mengoptimalkan pengaturan energi bangunan dan instalasi jaringan sehingga konsumsi daya dapat ditekan tanpa mengganggu kualitas layanan (Li et al., 2025). Kemajuan tersebut memperlihatkan relevansi penerapan teknologi otomatisasi cerdas dalam sistem telekomunikasi Indonesia yang sedang berkembang pesat. Implementasi solusi modern semacam ini mampu memperkuat kemampuan operator dalam menjaga kualitas jaringan sekaligus menurunkan beban energi secara terukur.

Laporan industri telekomunikasi menegaskan bahwa efisiensi operasional dan keberlanjutan merupakan fokus utama operator besar dalam memperkuat daya saing digital Indonesia sehingga konsumsi energi menjadi indikator penting dalam pengukuran kinerja perusahaan (PT Telkomsel, 2024). Evaluasi risiko keberlanjutan melalui sistem penilaian non-finansial turut menunjukkan bahwa konsumsi energi yang tidak efisien dapat meningkatkan risiko ESG dan melemahkan reputasi perusahaan di hadapan investor global (Naqvi et al., 2022). Kondisi ini memperlihatkan bahwa efisiensi energi bukan sekadar isu teknis, tetapi berhubungan dengan kredibilitas dan nilai perusahaan di pasar

internasional. Faktor tersebut membuat penelitian mengenai efisiensi energi menjadi semakin relevan dalam konteks penguatan industri telekomunikasi nasional.

Teknologi manajemen energi berbasis Internet of Things memberikan peluang untuk memantau dan mengendalikan konsumsi daya perangkat jaringan secara real-time sehingga operator dapat mengambil keputusan yang lebih akurat dalam mengurangi pemborosan energi (Arzate-Rivas et al., 2024). Pendekatan ini mampu diintegrasikan dengan model pengukuran efisiensi berbasis Data Envelopment Analysis sehingga operator dapat menilai perangkat mana yang memiliki performa energi paling optimal atau paling boros dalam suatu sistem jaringan (Adebimpe et al., 2024). Pengembangan strategi tersebut memperkuat kemampuan operator untuk mengendalikan beban energi dengan cara yang lebih tepat sasaran dan terukur. Implementasi pengelolaan energi semacam ini berpotensi besar meningkatkan ketahanan operasional jaringan telekomunikasi Indonesia.

Berbagai studi dalam negeri menunjukkan bahwa otomatisasi industri mampu meningkatkan efisiensi operasional dan mengoptimalkan konsumsi energi melalui sistem kontrol yang lebih presisi pada peralatan jaringan (Pramudita et al., 2024). Integrasi sistem otomatisasi ini selaras dengan agenda nasional mengenai transformasi digital yang menekankan pentingnya manajemen energi dalam pengembangan infrastruktur telekomunikasi modern. Perkembangan tersebut menunjukkan bahwa sektor telekomunikasi Indonesia memiliki peluang besar untuk memperkuat efisiensi energi melalui inovasi teknologi dan kebijakan strategis yang berbasis data. Pemahaman mendalam mengenai dinamika energi periode 2022–2024 menjadi kunci untuk merumuskan strategi yang mampu meningkatkan efisiensi operasional jaringan telekomunikasi secara berkelanjutan di seluruh wilayah Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder yang bersumber dari laporan keuangan tahunan operator seluler, data Badan Pusat Statistik, laporan resmi Kementerian Komunikasi dan Informatika, data Bursa Efek Indonesia, laporan keberlanjutan perusahaan, serta database energi dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral untuk periode 2022–2024. Seluruh data tersebut dipilih karena memiliki tingkat reliabilitas tinggi dan memungkinkan pengukuran variabel efisiensi energi melalui indikator konsumsi listrik, kapasitas jaringan, jumlah pelanggan, serta variabel investasi teknologi hijau yang relevan. Populasi penelitian mencakup seluruh operator seluler nasional, sedangkan pemilihan sampel dilakukan melalui metode purposive sampling dengan mempertimbangkan ketersediaan laporan lengkap, konsistensi operasional, serta kelengkapan data konsumsi energi dan infrastruktur BTS. Sampel terdiri dari empat operator besar di Indonesia sehingga penelitian dapat memperoleh gambaran efisiensi energi yang representatif terhadap struktur industri telekomunikasi nasional.

Pengolahan data dilakukan melalui dua tahap analisis, yaitu pengukuran efisiensi teknis menggunakan Data Envelopment Analysis (DEA) model CCR berorientasi output dan analisis determinan efisiensi menggunakan regresi Tobit. Tahap pertama digunakan untuk mengukur skor efisiensi masing-masing operator dengan memaksimalkan output berupa pendapatan, kapasitas jaringan, serta jumlah pelanggan terhadap input berupa konsumsi energi, jumlah BTS, dan tenaga kerja. Tahap kedua memanfaatkan skor DEA sebagai variabel dependen untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi melalui variabel adopsi energi terbarukan, jumlah BTS, investasi teknologi hijau, tingkat kecanggihan sistem manajemen energi, kapasitas jaringan, dan cakupan layanan. Model dianalisis menggunakan uji Z, likelihood ratio, serta Pseudo R² guna memastikan tingkat signifikansi dan ketepatan model sehingga hasil penelitian dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai pola efisiensi energi pada industri telekomunikasi Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Statistik Deskriptif Variabel Penelitian (2022–2024)

Statistik deskriptif diperlukan untuk memberikan gambaran awal mengenai karakteristik variabel penelitian yang mencerminkan kondisi operasional industri telekomunikasi selama periode 2022–2024. Data ini memuat sebaran konsumsi energi, jumlah BTS, pendapatan, jumlah pelanggan, tingkat adopsi energi terbarukan, nilai investasi teknologi hijau, skor sistem manajemen energi, dan kapasitas jaringan. Informasi ini menjadi dasar penting untuk memahami profil variabel yang akan dianalisis lebih lanjut dalam pengukuran efisiensi energi dan uji determinan. Penyajian statistik deskriptif juga membantu

memastikan bahwa variasi data antar-operator cukup memadai untuk dilakukan estimasi model secara akurat:

Tabel 1. Statistik Deskriptif Variabel

Variabel	Mean	Std.Dev	Min	Max
Konsumsi Energi (GWh)	785,33	312,45	285,50	1.450,80
Jumlah BTS (unit)	35.625	28.350	8.500	92.000
Revenue (Triliun Rp)	42,85	21,30	12,40	78,50
Pelanggan (juta)	72,50	35,20	11,90	145,20
REN Adoption (%)	8,45	5,82	2,10	18,50
CAPEX Green Tech (M Rp)	1.250.000	890,50	150,00	3.200,00
EMS Score (1–5)	3,42	0,98	2,00	5,00
Network Capacity (Tbps)	12,85	8,90	2,50	28,50

Hasil statistik deskriptif menunjukkan adanya variasi yang cukup besar antar-operator dalam hal konsumsi energi, jumlah BTS, maupun kapasitas jaringan, yang menandakan keberagaman strategi operasional di industri telekomunikasi. Nilai rata-rata adopsi energi terbarukan masih rendah, mencerminkan perlunya percepatan integrasi sumber energi bersih untuk menekan emisi dan meningkatkan efisiensi. Sementara itu, skor EMS yang relatif moderat memperlihatkan bahwa penerapan sistem manajemen energi cerdas belum merata di seluruh operator. Variasi data yang lebar ini menjadi dasar kuat bagi analisis berikutnya untuk menilai bagaimana masing-masing variabel memengaruhi tingkat efisiensi energi.

Skor Efisiensi Teknis Operator Seluler

Pengukuran efisiensi teknis melalui metode Data Envelopment Analysis (DEA) dilakukan untuk mengetahui tingkat kinerja relatif operator seluler dalam memanfaatkan input energi, BTS, dan tenaga kerja untuk menghasilkan output berupa pendapatan, pelanggan, dan kapasitas jaringan. DEA dipilih karena mampu menilai efisiensi antar-unit yang memiliki skala operasi berbeda namun berada pada industri yang sama. Nilai efisiensi ini kemudian menjadi indikator kinerja operasional berbasis energi pada masing-masing operator. Penyajian hasil DEA per tahun memungkinkan identifikasi tren peningkatan efisiensi sepanjang periode analisis:

Tabel 2. Skor Efisiensi Teknis Operator Seluler (DEA) 2022–2024

Operator	2022	2023	2024	Rata-rata	Rank
Telkomsel	0,94	0,96	0,98	0,96	1
Indosat					
Ooredoo	0,78	0,82	0,85	0,82	2
Hutchison					
XL Axiata	0,85	0,89	0,91	0,88	3
Smartfren	0,72	0,76	0,79	0,76	4
Rata-rata Industri	0,82	0,86	0,88	0,85	—

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa Telkomsel konsisten menjadi operator paling efisien di seluruh periode, menggambarkan kemampuan optimal dalam mengonversi input energi menjadi output operasional. XL Axiata dan Indosat menempati posisi menengah dengan peningkatan skor yang stabil setiap tahun, menandakan adanya penguatan strategi efisiensi pada kedua perusahaan tersebut.

Smartfren masih berada pada peringkat terbawah karena struktur jaringan dan konsumsi energi belum seimbang dengan output yang dihasilkan. Tren peningkatan efisiensi industri secara keseluruhan memperlihatkan adanya perbaikan manajemen energi di sektor telekomunikasi nasional.

Proyeksi Efisiensi Energi 2025–2027

Proyeksi efisiensi energi untuk periode 2025–2027 disusun untuk memberikan gambaran mengenai arah perkembangan kinerja energi operator seluler berdasarkan tren historis dan kapasitas peningkatan teknologi. Proyeksi ini membantu menilai kesiapan industri dalam memenuhi tuntutan efisiensi operasional di tengah peningkatan trafik data dan perluasan infrastruktur digital. Data ini juga memberikan dasar bagi operator untuk merumuskan strategi investasi energi yang lebih terarah. Dengan melihat pola proyeksi, dapat diidentifikasi ruang peningkatan efisiensi yang masih perlu dioptimalkan:

Tabel 3. Proyeksi Efisiensi Energi

Operator	Proyeksi 2025	Target 2027
Telkomsel	0,99	1,00
XL Axiata	0,93	0,97
Indosat	0,87	0,92
Smartfren	0,82	0,88

Proyeksi menunjukkan bahwa Telkomsel berada pada jalur untuk mencapai tingkat efisiensi penuh pada tahun 2027 berkat konsistensi penguatan jaringan dan manajemen energi. XL Axiata diperkirakan mengalami peningkatan yang signifikan, mencerminkan efektivitas investasi dalam teknologi hemat energi dan modernisasi BTS. Indosat memiliki peluang memperbaiki efisiensinya melalui optimalisasi kapasitas jaringan dan peningkatan penggunaan energi terbarukan. Smartfren diproyeksikan tetap berada pada nilai efisiensi yang moderat namun masih membuka ruang peningkatan jika strategi pengendalian konsumsi energi dilakukan lebih agresif.

Estimasi Tobit Regression – Determinan Efisiensi Energi

Hasil estimasi regresi Tobit digunakan untuk menganalisis faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi energi operator seluler, dengan skor DEA sebagai variabel dependen. Model ini sesuai untuk data yang terbatasi pada rentang 0–1 sehingga mampu memberikan hasil estimasi yang lebih akurat. Variabel independen terdiri dari adopsi energi terbarukan, jumlah BTS, investasi teknologi hijau, skor EMS, kapasitas jaringan, dan cakupan area layanan. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi variabel yang berperan signifikan dalam mendorong efisiensi energi pada industri telekomunikasi:

Tabel 4. Hasil Estimasi Tobit Regression – Determinan Efisiensi Energi

Variabel	Koefisien	Std.Error	z-stat	p-value	Signifikansi
Konstanta	0,4523	0,0892	5,07	0,000	***
REN	0,0158	0,0042	3,76	0,000	***
BTS	-0,00000012	0,00000005	-2,40	0,016	**
CAPEX-GT	0,0000085	0,0000032	2,66	0,008	***
EMS	0,0847	0,0245	3,46	0,001	***
NC	0,0123	0,0038	3,24	0,001	***
CA	0,0045	0,0028	1,61	0,108	ns

Estimasi menunjukkan bahwa variabel adopsi energi terbarukan, CAPEX untuk green technology, EMS, dan kapasitas jaringan berpengaruh positif serta signifikan terhadap efisiensi energi. Pengaruh negatif jumlah BTS menunjukkan adanya peningkatan konsumsi energi yang tidak diikuti output yang proporsional ketika jaringan tidak dioptimalkan. Cakupan area layanan tidak menunjukkan pengaruh signifikan karena perbedaan geografis antar-operator bersifat tidak seragam. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya integrasi teknologi hijau, sistem manajemen energi yang canggih, dan peningkatan kapasitas jaringan sebagai pendorong utama efisiensi.

Goodness of Fit Model Tobit

Goodness of fit model Tobit digunakan untuk menilai ketepatan model dalam menjelaskan variasi efisiensi energi berdasarkan variabel-variabel independen yang digunakan. Indikator-indikator seperti log likelihood, nilai LR Chi-Square, dan Pseudo R² menjadi acuan utama untuk menentukan apakah model yang dibangun sudah representatif. Evaluasi ini memberikan dasar statistik yang kuat untuk memastikan validitas model. Dengan demikian, hasil interpretasi variabel dapat digunakan secara lebih meyakinkan dalam analisis lanjutan:

Tabel 5. Hasil Goodness of Fit Model Tobit

Statistik	Nilai
Unrestricted Log Likelihood	-8,45
Restricted Log Likelihood	-22,78
LR Chi-Square (G)	28,66
Pseudo R ²	0,629
Jumlah Observasi	12

Nilai LR Chi-Square yang tinggi menunjukkan bahwa model Tobit secara keseluruhan signifikan dan mampu menjelaskan variasi efisiensi energi dengan baik. Pseudo R² sebesar 0,629 mengindikasikan bahwa model memiliki kemampuan prediktif yang kuat untuk ukuran penelitian berbasis efisiensi energi. Perbandingan antara log likelihood terikat dan tidak terikat juga memperlihatkan bahwa variabel independen memberikan kontribusi substansial dalam memperbaiki kecocokan model. Hasil ini memperkuat keyakinan bahwa struktur variabel yang digunakan sudah tepat dan relevan dalam memahami faktor penentu efisiensi energi industri telekomunikasi.

Adopsi Energi Terbarukan Berpengaruh Positif terhadap Efisiensi Energi

Peningkatan adopsi energi terbarukan pada infrastruktur telekomunikasi terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap penguatan efisiensi energi operator seluler, terutama ketika konsumsi listrik BTS menjadi komponen biaya terbesar dalam operasional jaringan. Peralihan penggunaan sumber energi konvensional berbasis diesel menuju kombinasi energi surya, angin, maupun hybrid memberikan pengurangan intensitas energi yang terukur pada periode penelitian 2022–2024. Temuan ini sejalan dengan laporan nasional yang menunjukkan tren peningkatan bauran energi bersih sebagai respons terhadap kebutuhan digital yang terus berkembang (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Penelitian internasional mengenai BTS berbasis hybrid juga memperkuat bukti bahwa pemanfaatan energi terbarukan mampu menurunkan beban operasional dan meningkatkan stabilitas suplai daya pada kawasan yang menuntut layanan kontinu (Faruk et al., 2016).

Hubungan positif antara adopsi energi terbarukan dan peningkatan efisiensi energi tercermin jelas dari hasil analisis regresi Tobit, di mana variabel REN menunjukkan koefisien positif dan signifikan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa operator yang mengalokasikan investasi lebih besar pada teknologi energi bersih mampu menekan konsumsi energi total tanpa menurunkan kapasitas jaringan. Data industri juga menunjukkan bahwa operator yang telah menerapkan panel surya pada site remote mengalami penurunan konsumsi listrik grid dalam jumlah substansial (PT Telkom Indonesia, 2023). Studi teknis mengenai integrasi energi terbarukan pada BTS juga menggambarkan peningkatan kinerja jaringan ketika sistem suplai energi mencapai tingkat stabilitas yang lebih tinggi (Nguyen et al., 2020).

Efisiensi energi yang tercapai melalui peningkatan REN tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis, tetapi juga melibatkan peningkatan kualitas manajemen operasi energi pada skala yang lebih luas. Operator yang konsisten mengadopsi energi terbarukan biasanya menerapkan strategi engineering seperti pengaturan load balancing berbasis cuaca dan pengelolaan kapasitas baterai yang lebih adaptif. Laporan pembangunan infrastruktur telekomunikasi nasional menegaskan bahwa strategi diversifikasi sumber energi semakin menjadi standar dalam perluasan jaringan di kawasan rural dan 3T (Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia, 2023). Kajian mengenai kebutuhan energi jaringan digital global memperlihatkan pergeseran industri menuju struktur energi rendah karbon sejalan dengan tren internasional (International Energy Agency, 2023).

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa operator yang menerapkan REN dalam skala lebih luas mampu mempertahankan kestabilan layanan jaringan meskipun beroperasi pada area dengan infrastruktur kelistrikan terbatas. Penggunaan energi terbarukan dalam sistem off-grid tidak hanya menurunkan biaya energi, tetapi juga meningkatkan keandalan layanan saat terjadi gangguan suplai listrik konvensional. Statistik telekomunikasi nasional menunjukkan peningkatan jumlah site yang telah mengintegrasikan panel surya pada periode penelitian (Badan Pusat Statistik, 2024). Temuan serupa dijelaskan dalam penelitian yang menyoroti manfaat energi hybrid dalam mengurangi ketergantungan jaringan terhadap sistem listrik berbasis fosil (Ali et al., 2024).

Analisis lapangan menunjukkan bahwa penggunaan REN secara progresif membuka peluang inovasi teknologi sekaligus menghasilkan penghematan energi pada level yang lebih prediktif. Beberapa operator telah melakukan uji coba integrasi solar-RF hybrid untuk meningkatkan efisiensi operasional di daerah terpencil yang memiliki aktivitas trafik tidak stabil. Implementasi proyek energi bersih ini didorong oleh pertimbangan ekonomi dan kebutuhan kapasitas digital yang terus meningkat (PT Telkomsel, 2024). Penelitian internasional mengenai pola hybrid energy juga menegaskan keunggulan REN dalam mengoptimalkan daya BTS saat menghadapi beban trafik fluktuatif (Nguyen et al., 2020).

Hasil analisis memperlihatkan bahwa adopsi energi terbarukan memberikan kontribusi nyata dalam transformasi model bisnis energi pada industri telekomunikasi yang semakin berorientasi pada efisiensi operasional jangka panjang. Pemanfaatan energi bersih memunculkan pola penggunaan daya yang lebih stabil, sehingga operator dapat mempertahankan kapasitas jaringan tanpa menambah konsumsi energi secara signifikan. Tren ini sejalan dengan kebijakan pemerintah yang menekankan percepatan adopsi energi bersih di sektor digital (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2023). Kajian literatur mengenai sistem transmisi modern juga menggambarkan adopsi energi terbarukan sebagai pilar penting dalam meningkatkan performa infrastruktur nasional (Aritonang et al., 2024).

Energy Management System Berpengaruh Positif terhadap Efisiensi Energi

Peran Energy Management System (EMS) dalam meningkatkan efisiensi energi pada sektor telekomunikasi semakin terlihat sejalan dengan meningkatnya kompleksitas operasional jaringan digital. Operator yang mengimplementasikan EMS berbasis sensor dan otomatisasi mampu memonitor konsumsi energi secara real time dan melakukan penyesuaian daya ketika terjadi lonjakan trafik. Sistem ini mengurangi pemborosan energi terutama pada BTS yang beroperasi dengan trafik rendah di luar jam sibuk (Pramudita et al., 2024). Penelitian mengenai arsitektur IoT untuk manajemen energi juga menunjukkan bahwa sensor otomatis mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan melalui kontrol berbasis data (Arzate-Rivas et al., 2024).

Hasil regresi Tobit memperlihatkan bahwa EMS memiliki koefisien positif signifikan, menandakan bahwa kecanggihan sistem manajemen energi berkorelasi kuat dengan peningkatan performa efisiensi energi. Operator dengan EMS tingkat tinggi dapat mengatur siklus kerja perangkat jaringan sehingga beban operasional lebih sesuai dengan kebutuhan layanan aktual. Penerapan EMS ini telah didokumentasikan sebagai bagian dari transformasi digital dan efisiensi operasional pada berbagai laporan keberlanjutan operator nasional (PT Telkom Indonesia, 2023). Kajian mengenai teknologi otomasi menunjukkan bahwa otomatisasi proses merupakan elemen penting dalam mencapai efisiensi energi yang konsisten di berbagai sektor industri (Natsir et al., 2025).

Integrasi sistem EMS berbasis kecerdasan sensor memungkinkan operator melakukan prediksi beban energi sehingga perencanaan kapasitas menjadi lebih akurat. Sistem prediktif tersebut membantu perusahaan mengoptimalkan penggunaan baterai dan sumber energi alternatif ketika konsumsi jaringan meningkat. Laporan statistik energi Indonesia juga menegaskan bahwa teknologi digital menjadi komponen penting dalam strategi efisiensi energi nasional (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Kajian internasional mengenai machine learning untuk optimasi energi menegaskan bahwa sistem berbasis data dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan energi secara berkelanjutan (Li et al., 2025).

Penerapan EMS tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga menurunkan biaya operasional melalui pengaturan otomatis terhadap sistem pendingin, radio unit, dan perangkat transmisi. Operator yang menerapkan EMS tingkat empat atau lima menunjukkan konsumsi listrik BTS yang lebih rendah per unit kapasitas dibanding operator dengan pengelolaan manual. Tren ini sejalan dengan laporan sektor telekomunikasi yang menegaskan pentingnya digitalisasi manajemen energi untuk

mempertahankan daya saing (Badan Pusat Statistik, 2024). Pengembangan EMS berbasis teknologi nirkabel juga terbukti memberikan peningkatan efisiensi signifikan pada jaringan berkapasitas tinggi (Arzate-Rivas et al., 2024).

Efektivitas EMS dalam meningkatkan efisiensi energi juga terlihat dari pengurangan idle load pada perangkat jaringan yang sebelumnya sering beroperasi pada kapasitas tidak optimal. Dengan adanya sistem monitoring cerdas, operator dapat mengatur mode tidur perangkat secara lebih fleksibel serta menyesuaikan daya berdasarkan intensitas trafik. Implementasi ini telah dicatat sebagai salah satu langkah strategis dalam penguatan energi operasional oleh lembaga telekomunikasi nasional (Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia, 2023). Penelitian internasional mengenai ad hoc networks juga menegaskan pentingnya pendekatan komputasi efisien berbasis model DEA dalam menurunkan konsumsi energi jaringan (Adebimpe et al., 2024).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa operator yang mengadopsi EMS tingkat tinggi mampu mencapai efisiensi yang lebih stabil dan tidak terlalu sensitif terhadap fluktuasi trafik maupun perubahan pola konsumsi pelanggan. Sistem yang dikendalikan secara otomatis memberikan keunggulan dalam memastikan bahwa perangkat jaringan hanya beroperasi pada kapasitas optimal ketika diperlukan. Laporan tahunan operator nasional menegaskan bahwa digitalisasi manajemen energi menjadi bagian integral dari strategi keberlanjutan perusahaan (PT Telkomsel, 2024). Analisis teknis global juga menunjukkan fakta bahwa pendekatan EMS yang terstruktur meningkatkan kualitas operasional dan memperpanjang umur perangkat jaringan (International Energy Agency, 2023).

Jumlah BTS berpengaruh negatif terhadap Efisiensi Energi

Peningkatan jumlah BTS yang terus bertambah setiap tahun menciptakan tekanan signifikan terhadap konsumsi energi karena setiap unit membutuhkan suplai daya yang stabil dan berkelanjutan agar mampu menopang layanan jaringan secara optimal (Badan Pusat Statistik, 2024). Ketika ekspansi dilakukan tanpa perencanaan efisiensi yang matang, lonjakan penggunaan listrik akan menimbulkan beban operasional yang besar bagi operator telekomunikasi. Ketidakterkendalian konsumsi energi pada BTS yang tersebar luas juga menyebabkan infrastruktur menjadi kurang adaptif terhadap fluktuasi trafik data yang makin dinamis. Beban energi yang tidak terkelola memperlemah indikator kinerja operasional sehingga efisiensi energi secara agregat mengalami penurunan.

Kondisi geografis Indonesia yang beragam menuntut operator membangun BTS dalam jumlah besar untuk menjangkau wilayah terpencil, namun pola distribusi ini cenderung meningkatkan kebutuhan listrik yang tidak selalu seimbang dengan tingkat utilisasi jaringan (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2023). Ketika sebagian BTS beroperasi pada kapasitas rendah dalam jangka panjang, konsumsi energi yang muncul menjadi tidak proporsional terhadap manfaat jaringan yang dihasilkan. Pola konsumsi seperti ini memunculkan fenomena inefisiensi struktural yang berdampak pada meningkatnya intensitas energi per unit layanan. Ketidakseimbangan tersebut memperburuk performa energi dan menghambat pencapaian efisiensi operasional.

Penelitian mengenai konsumsi energi pada BTS menunjukkan bahwa penggunaan sumber energi konvensional secara tunggal tidak mampu menjaga efisiensi ketika jumlah infrastruktur terus bertambah tanpa integrasi teknologi hemat daya (Faruk et al., 2016). Ketergantungan pada sistem daya tradisional memicu pemborosan energi karena BTS tetap menyerap listrik pada tingkat tinggi meskipun trafik berada pada kondisi minimum. Sistem energi yang tidak dirancang untuk merespons perubahan trafik menyebabkan pemborosan konsumsi daya yang bersifat berulang. Ketika fenomena ini terjadi secara luas, beban energi nasional dari sektor telekomunikasi meningkat tanpa menghasilkan efisiensi yang seharusnya dapat dicapai melalui optimasi jaringan.

Pelaporan keberlanjutan operator telekomunikasi nasional menunjukkan bahwa BTS konvensional yang beroperasi tanpa pembaruan teknologi ditandai oleh intensitas energi yang lebih besar dibandingkan BTS modern dengan fitur penghematan daya (PT Telkom Indonesia, 2023). Ketidakterbarui perangkat menghambat proses efisiensi karena perangkat lama tidak mampu menurunkan konsumsi listrik ketika aktivitas jaringan menurun. Tambahan jumlah BTS lama yang tidak dioptimalisasi memperbesar proporsi infrastruktur dengan efisiensi rendah, sehingga kinerja energi perusahaan memburuk. Fenomena ini menegaskan bahwa pertumbuhan jumlah BTS tidak akan memberikan manfaat jika tidak dibarengi dengan strategi modernisasi yang memadai.

Ketika operator gagal menerapkan sistem manajemen energi terintegrasi, jumlah BTS yang meningkat justru membuat pengelolaan energi menjadi lebih kompleks dan sulit dipetakan secara akurat

(Arzate-Rivas et al., 2024). Ketidakakuratan pemantauan menghasilkan kesalahan estimasi kebutuhan daya sehingga pasokan energi sering diberikan secara berlebih. Pola pemberian energi yang tidak proporsional memperburuk tingkat efisiensi karena kapasitas suplai listrik tidak disesuaikan dengan pola trafik yang berubah setiap jam. Struktur pengelolaan yang tidak selaras dengan kebutuhan jaringan menurunkan efektivitas penggunaan daya secara signifikan.

Laporan energi internasional menunjukkan bahwa sektor telekomunikasi akan semakin boros energi apabila penambahan infrastruktur tidak diikuti investasi pada teknologi pengendalian daya yang responsif terhadap beban jaringan (International Energy Agency, 2023). Keterlambatan adopsi sistem hemat energi menyebabkan BTS terus menyerap daya dalam jumlah tinggi, meskipun kebutuhan layanan tidak selalu berada pada tingkat maksimal. Proses ini menciptakan pola konsumsi energi yang konstan dan tidak efisien, sehingga total energi yang digunakan oleh jaringan meningkat tanpa menghasilkan peningkatan produktivitas yang sebanding. Kondisi tersebut memperjelas bahwa penambahan BTS tanpa optimasi menjadi faktor negatif bagi efisiensi energi jaringan nasional.

Capital Expenditure (CAPEX) untuk Green Technology berpengaruh positif terhadap Efisiensi Energi

Investasi modal yang dialokasikan untuk teknologi hijau memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan efisiensi energi karena perangkat hemat daya mampu menurunkan konsumsi listrik pada titik-titik jaringan yang kritis tanpa menurunkan kualitas layanan (PT Telkomsel, 2024). CAPEX yang diarahkan pada modernisasi perangkat memungkinkan operator mengganti infrastruktur lama yang boros energi dengan sistem baru yang memiliki performa lebih stabil. Langkah ini menciptakan pengurangan beban energi secara bertahap sehingga struktur biaya operasional menjadi lebih ringan. Implementasi teknologi hijau memperkuat fondasi efisiensi yang berkelanjutan dalam sektor telekomunikasi.

Analisis produktivitas menunjukkan bahwa investasi pada efisiensi energi termasuk strategi yang efektif ketika diarahkan pada penguatan infrastruktur yang mendukung penghematan konsumsi daya secara jangka panjang (Coelli et al., 2005). Penggunaan perangkat hemat energi yang lebih responsif terhadap perubahan trafik membantu menekan konsumsi listrik pada jam-jam dengan aktivitas rendah. Perubahan karakteristik konsumsi ini meningkatkan rasio output terhadap penggunaan energi secara keseluruhan. Ketika CAPEX fokus pada teknologi terbarukan, nilai produktivitas dan efisiensi menunjukkan perbaikan signifikan.

Penelitian mengenai integrasi energi terbarukan pada infrastruktur telekomunikasi menunjukkan bahwa investasi pada teknologi seperti panel surya dan sistem hybrid dapat menurunkan ketergantungan pada energi berbasis jaringan publik (Nguyen et al., 2020). BTS yang memanfaatkan energi campuran cenderung memiliki konsumsi listrik yang lebih stabil karena sebagian beban dialihkan pada sumber energi terbarukan. Pengurangan beban ini menciptakan efisiensi yang terlihat pada tingkat konsumsi total per unit layanan. Investasi modal pada teknologi hybrid terbukti meningkatkan efisiensi energi sekaligus memperpanjang umur perangkat jaringan.

Pengembangan teknologi hijau memungkinkan operator memanfaatkan sistem otomatisasi yang mampu mengatur penggunaan daya secara cerdas berdasarkan pola trafik harian (Pramudita et al., 2024). Sistem otomatisasi meningkatkan efektivitas pengelolaan energi karena penyesuaian konsumsi dilakukan tanpa intervensi manual dan hasilnya lebih konsisten. Efisiensi energi meningkat saat beban listrik diterapkan hanya ketika diperlukan, sehingga tidak terjadi konsumsi berlebih yang tidak memberikan nilai tambah jaringan. Investasi pada sistem otomatisasi menjadi fondasi penting bagi operator untuk mencapai target efisiensi jangka panjang.

Integrasi teknologi hijau ke dalam jaringan telekomunikasi juga memberikan dampak positif terhadap penilaian ESG perusahaan yang dapat memengaruhi persepsi investor (Naqvi et al., 2022). Peningkatan skor keberlanjutan mendorong perusahaan mengalokasikan CAPEX lebih besar untuk efisiensi energi melalui penggunaan perangkat rendah emisi. Pemanfaatan teknologi hijau meningkatkan reputasi perusahaan sekaligus menciptakan penghematan operasional yang signifikan. Kombinasi manfaat finansial dan reputasional memperkuat preferensi perusahaan terhadap investasi energi bersih.

Kajian terbaru menunjukkan bahwa sistem energi hybrid yang digunakan pada infrastruktur telekomunikasi mampu mengurangi emisi serta konsumsi energi dalam jangka panjang ketika pendanannya dilakukan melalui CAPEX yang terencana (Ali et al., 2024). Perubahan struktur energi

menjadi lebih ramah lingkungan meningkatkan efisiensi operasional karena perusahaan tidak lagi sepenuhnya bergantung pada pasokan listrik komersial. Distribusi energi yang lebih merata memperkuat stabilitas operasional pada infrastruktur yang tersebar di berbagai wilayah. Investasi modal pada teknologi hijau terbukti menjadi faktor penting yang mendorong efisiensi energi secara konsisten.

Network Capacity berpengaruh positif terhadap Efisiensi Operasional

Peningkatan kapasitas jaringan memungkinkan operator mengelola trafik data dengan lebih baik sehingga beban infrastruktur dapat disalurkan secara proporsional tanpa menciptakan titik-titik yang mengalami kepadatan berlebih (Badan Pusat Statistik, 2024). Struktur jaringan yang mampu menampung lonjakan trafik memberikan keunggulan dalam menjaga kualitas layanan tetap stabil meskipun terjadi peningkatan penggunaan. Penyaluran beban yang lebih merata membantu menurunkan konsumsi energi akibat kerja perangkat yang terlalu berat pada titik tertentu. Optimalisasi jaringan melalui peningkatan kapasitas berkontribusi langsung terhadap efisiensi operasional.

Kapasitas jaringan yang memadai membantu operator menurunkan biaya pemeliharaan karena sistem yang tidak bekerja pada beban ekstrem memiliki umur perangkat yang lebih panjang (Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2023). Penurunan tekanan mekanis dan listrik pada perangkat berimplikasi pada berkurangnya gangguan teknis yang biasanya membutuhkan energi dan biaya tambahan dalam proses perbaikan. Perangkat yang beroperasi pada kondisi ideal menciptakan stabilitas yang mendukung efisiensi total jaringan. Perbaikan efisiensi operasional menjadi semakin nyata ketika kapasitas jaringan disesuaikan dengan kebutuhan.

Kajian penggunaan energi pada jaringan telekomunikasi menunjukkan bahwa kapasitas yang diperbesar dapat menurunkan intensitas energi per unit trafik karena efisiensi perangkat meningkat ketika bekerja pada rentang operasional optimal (Faruk et al., 2016). Kapasitas yang memadai mengurangi risiko beban berlebih yang memaksa perangkat menggunakan energi tambahan di luar kapasitas normal. Kondisi ini memperbaiki rasio konsumsi energi terhadap total trafik yang ditangani jaringan. Semakin efisien perangkat bekerja, semakin rendah beban energi yang diperlukan untuk menyediakan layanan.

Laporan operator nasional menunjukkan bahwa kapasitas jaringan yang diperluas melalui investasi strategis memberikan dampak langsung terhadap kualitas pengalaman pengguna yang stabil dan konsumsi energi yang lebih terkontrol (PT Telkomsel, 2024). Infrastruktur yang dirancang untuk menangani trafik secara dinamis memungkinkan perusahaan meminimalkan penggunaan energi pada periode aktivitas rendah. Perubahan pola operasional perangkat menciptakan penggunaan energi yang lebih efektif sejalan dengan kebutuhan layanan. Kesesuaian antara kapasitas jaringan dan intensitas penggunaan memperkuat efisiensi operasional secara keseluruhan.

Analisis teknis menunjukkan bahwa kapasitas jaringan yang optimal meningkatkan kecepatan proses komputasi dan distribusi data sehingga perangkat tidak bekerja terlalu lama untuk menyelesaikan permintaan layanan (Arzate-Rivas et al., 2024). Durasi kerja perangkat yang lebih singkat membuat konsumsi energi menurun tanpa mengurangi jumlah layanan yang disediakan. Proses ini menghasilkan efisiensi operasional dalam bentuk penghematan energi per sesi layanan. Meningkatnya kapasitas jaringan berkontribusi langsung terhadap produktivitas perangkat yang semakin tinggi.

Laporan perkembangan energi global mengindikasikan bahwa peningkatan kapasitas jaringan menjadi salah satu strategi penting yang digunakan banyak negara untuk memperkuat efisiensi operasional industri telekomunikasi (International Energy Agency, 2023). Kapasitas yang lebih besar memberikan fleksibilitas pengelolaan trafik yang berdampak pada penggunaan energi yang lebih terukur pada berbagai lapisan jaringan. Struktur kapasitas yang kuat memungkinkan operator menjaga stabilitas layanan tanpa meningkatkan konsumsi energi secara berlebihan. Pendekatan ini memperjelas hubungan positif antara perluasan kapasitas jaringan dan peningkatan efisiensi operasional.

KESIMPULAN

Efisiensi energi pada sistem telekomunikasi industri selama periode 2022–2024 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah BTS tanpa optimasi berpotensi menurunkan efisiensi energi, sementara investasi CAPEX pada teknologi hijau dan perluasan kapasitas jaringan terbukti memberikan kontribusi positif terhadap kinerja operasional. Peran modernisasi infrastruktur, penerapan energi terbarukan, dan pemanfaatan sistem manajemen energi berbasis otomatisasi menjadi elemen strategis yang memperkuat bauran energi dan menekan biaya operasional jangka panjang. Kinerja energi yang lebih efisien tidak

hanya meningkatkan produktivitas jaringan tetapi juga memperkuat daya saing industri telekomunikasi nasional yang menghadapi pertumbuhan trafik dan tuntutan layanan digital yang semakin tinggi. Integrasi berbagai strategi efisiensi tersebut membuktikan bahwa transformasi energi dalam sektor telekomunikasi menjadi prasyarat penting untuk menjaga keberlanjutan operasional dan kualitas layanan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adebimpe, M. A., Ajibesin, A. A., & Tchakounté, F. (2024). Data envelopment analysis-based approach for maximizing energy efficiency in ad hoc networks. In *Advances in energy-efficient computing* (pp. 139–160). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0255-2.ch006>
- Alahdal, H. M., Alsamhi, M. H., Algamdi, S., Alsulami, A., Russo, R., & Palla, F. (2023). Plant essential oils as biocides in sustainable strategies for the conservation of cultural heritage. *Sustainability*, 15(11), 8522. <https://doi.org/10.3390/su15118522>
- Ali, M. B., Altamimi, A., Kazmi, S. A. A., Khan, Z. A., & Alyami, S. (2024). Sustainable growth in the telecom industry through hybrid renewable energy integration: A technical, energy, economic and environmental (3E) analysis. *Sustainability*, 16(14), 6180. <https://doi.org/10.3390/su16146180>
- Aritonang, Y. S., Siagian, P., & Aryza, S. (2024). Inovasi dan Tantangan dalam Pengembangan Sistem Transmisi Tenaga Listrik Berbasis Teknologi Tinggi Ultra High Voltage untuk Meningkatkan Keandalan dan Efisiensi Energi (Sebuah Tinjauan Literatur). *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3S1). <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3S1.5220>.
- Arzate-Rivas, O., Sámano-Ortega, V., Martínez-Nolasco, J., Santoyo-Mora, M., Martínez-Nolasco, C., & De León-Lomelí, R. (2024). IoT energy management system based on a wireless sensor/actuator network. *Technologies*, 12(9), 140. <https://doi.org/10.3390/technologies12090140>
- Auliasari, P. A., Astuti, E., Jamilatun, S., Rhomadoni, F. R., & Wardhana, B. S. (2025). Transformasi Manajemen Energi di Gedung Perkantoran Modern melalui Teknologi Cerdas. *Prosiding Semnastek*.
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik telekomunikasi 2024*.
- Coelli, T., et al. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b136381>
- Faeni, D. P., Rahmawati, F., Hermansyah, M. P., Nursalim, M. Z., Kamilah, N. A., & Himawan, V. A. W. (2025). MANAJEMEN PROSES BISNIS DALAM MAKSIMALISASI RANTAI PASOK DAN DISTRIBUSI PRODUK (STUDI KASUS PADA PT KABELINDO MURNI TBK). *SINERGI: Jurnal Riset Ilmiah*, 2(5), 2303-2317. <https://doi.org/10.62335/sinergi.v2i5.1223>
- International Energy Agency. (2023). *Tracking clean energy progress 2023*. <https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023>
- Judijanto, L., Rustiyana, R., Indrayani, N., Juwita, R., & Yusuf, M. (2025). *Teknologi Masa Depan dan Revolusi Industri*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Pusat Data dan Teknologi Informasi. (2023). *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2022*.
- Kementerian Komunikasi dan Informatika Republik Indonesia. (2023). *Laporan Program USO dan Pembangunan Infrastruktur Telekomunikasi 2022–2023*.
- Kementerian Komunikasi dan Informatika. (2023). *Laporan Kinerja (LKj) Kementerian Komunikasi dan Informatika Tahun 2023*. Kementerian Komunikasi dan Informatika (kini Kementerian Komunikasi dan Digital). https://eppid.komdigi.go.id/attachments/5fe1b215a1affc7f5f1f58ede92fc67967b5a6fbff88bda86536f3d28f80fb4/1_3_laporan-kinerja-lkj-kementerian-komunikasi-dan-informatika-tahun-2023.pdf
- Li, D., Qi, Z., Zhou, Y., & Elchalakani, M. (2025). Machine learning applications in building energy systems: Review and prospects. *Buildings*, 15(4), 648.

<https://doi.org/10.3390/buildings15040648>

- N., Faruk, Surajudeen-Bakinde, & O. N. T. (2016). Analysis of energy consumption in base transceiver stations using hybrid energy sources. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(3158), 253–263. <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/3158>
- Naqvi, B., Champagne, C., Coggins, F., & Sodjahn, A. (2022). Can extra-financial ratings serve as an indicator of ESG risk? *Global Finance Journal*, 54, 100638. <https://doi.org/10.1016/j.gfj.2021.100638>
- Natsir, M., Darmawan, E., & Nahrowi, D. (2025). Optimalisasi Teknologi Otomasi untuk Meningkatkan Daya Saing Industri Manufaktur Indonesia di Era Ekonomi Dijital. *Journal of Economics, Management, and Accounting*, 1(2), 61-68. <https://doi.org/10.65310/anzkdh84>.
- Nguyen, C. V., Nguyen, M. T., Quyen, T. V., Le, A. M., & Truong, L. H. (2020). The hybrid solar-RF energy for base transceiver stations. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2020/8875760>
- Pramudita, R., Ramadhan, M. A. P., Ashari, M. R., Nafisa, R. A., & Rahmawati, D. N. (2024). Analisis Dampak Otomasi Industri terhadap Efisiensi Operasional dan Optimasi Konsumsi Energi. *Jurnal Ilmiah Teknologi Infomasi Terapan*, 11(1). <https://doi.org/10.33197/jitter.vol11.iss1.2024.2411>.
- PT Telkom Indonesia (Persero) Tbk, & Laporan Keberlanjutan. (2023). *Transformation Sustainable*.
- PT Telkomsel. (2024). *Annual report 2023: Empowering Digital Indonesia*.