

Artikel Penelitian

Analisis Investment Grade Energy Audit untuk Peningkatan Efisiensi Energi pada Gedung Perkantoran di Jakarta Timur

Ginanjar Indramaulana

Widyaiswara Ahli Madya, PPSDM KEBTKE, Kementerian ESDM, Jakarta, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 14 Maret 2026
Revisi Akhir: 16 April 2026
Diterbitkan Online: 30 April 2026

KATA KUNCI

Audit Energi
IKE
Efisiensi Energi
Kelayakan Finansial
OTTV

KORESPONDENSI (*)

Phone: +62 856-864-1730
E-mail: ginanjar.maulana@esdm.go.id,
ginanjar@gmail.com

A B S T R A K

Sektor bangunan gedung merupakan salah satu kontributor utama konsumsi energi dan emisi gas rumah kaca di Indonesia. Meskipun beberapa gedung telah menerapkan langkah efisiensi energi, implementasinya sering kali belum berbasis analisis investasi yang komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis profil konsumsi energi, mengidentifikasi potensi penghematan, serta mengevaluasi kelayakan finansial melalui pendekatan Investment Grade Energy Audit (IGEA) pada sebuah gedung perkantoran di Jakarta Timur. Metode yang digunakan meliputi analisis data historis konsumsi listrik tahun 2021–2023, pengukuran kualitas daya menggunakan Power Quality Analyzer, perhitungan Intensitas Konsumsi Energi (IKE), simulasi kinerja termal selubung bangunan melalui parameter Overall Thermal Transfer Value (OTTV), serta analisis kelayakan finansial menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. Hasil penelitian menunjukkan tren peningkatan IKE dari 107,62 menjadi 130,85 kWh/m²/tahun, dengan sistem tata udara menyumbang 78% dari total konsumsi energi. Simulasi menunjukkan bahwa pemasangan glass coat menurunkan nilai OTTV dari 44,72 menjadi 37,57 W/m². Secara finansial, proyek ini menghasilkan IRR sebesar 16,8%, nilai NPV sebesar Rp2.315.487.620, dan periode pengembalian investasi selama 6,14 tahun, sehingga dinilai layak untuk diimplementasikan. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan IGEA efektif dalam mendukung keputusan investasi efisiensi energi berbasis analisis teknis dan ekonomis.

PENDAHULUAN

Sektor bangunan gedung merupakan salah satu pengguna energi terbesar baik secara global maupun nasional. Secara global, sektor ini menyerap sekitar 40% dari total konsumsi energi dan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Di Indonesia, sektor bangunan bahkan menyumbang lebih dari 50% total pengeluaran energi dan lebih dari 70% konsumsi listrik, terutama pada bangunan komersial dan perkantoran. Tingginya konsumsi energi tersebut menjadikan sektor bangunan sebagai area strategis dalam upaya konservasi energi dan pencapaian target penurunan emisi nasional. Seiring meningkatnya aktivitas ekonomi dan pembangunan gedung bertingkat di kawasan perkotaan, kebutuhan energi untuk sistem tata udara, pencahayaan, dan peralatan penunjang lainnya juga mengalami peningkatan yang signifikan [1].

Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi menegaskan pentingnya upaya sistematis dan terencana dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi. Salah satu instrumen yang didorong adalah pelaksanaan audit energi sebagai proses evaluasi penggunaan energi dan identifikasi peluang penghematan yang layak secara teknis dan ekonomis. Dalam praktiknya, audit energi tidak hanya bertujuan mengidentifikasi pemborosan energi, tetapi juga menjadi dasar dalam menentukan peluang penghematan serta rekomendasi peningkatan efisiensi energi pada bangunan gedung [2]. Namun demikian, banyak bangunan gedung yang masih menerapkan langkah efisiensi secara parsial dan belum berbasis analisis investasi yang komprehensif, sehingga potensi penghematan energi belum dimanfaatkan secara optimal.

Pendekatan *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) hadir sebagai bentuk audit energi rinci yang tidak hanya menganalisis aspek teknis, tetapi juga mengevaluasi kelayakan finansial dari setiap rekomendasi penghematan. Berbeda dengan audit energi awal atau *walk-through audit*, IGEA menekankan pada perhitungan potensi penghematan energi yang terukur, estimasi biaya investasi, serta analisis indikator finansial seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. Dengan pendekatan ini, pengelola bangunan dapat memperoleh gambaran yang lebih akurat mengenai manfaat ekonomi dari implementasi konservasi energi [3].

Gedung perkantoran sebagai objek penelitian menunjukkan tren peningkatan konsumsi energi dalam tiga tahun terakhir meskipun nilai Intensitas Konsumsi Energi (IKE) masih berada di bawah standar pembandingan untuk gedung komersial. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun kinerja energi tergolong cukup baik, terdapat kecenderungan peningkatan beban yang berpotensi menurunkan efisiensi dalam jangka panjang. Sistem tata udara diketahui sebagai penyumbang konsumsi energi terbesar, sehingga strategi efisiensi yang terintegrasi antara sistem aktif dan desain pasif bangunan menjadi sangat relevan untuk dikaji.

Namun demikian, terdapat kesenjangan yang cukup signifikan dalam praktik audit energi pada bangunan gedung, khususnya antara pendekatan audit energi konvensional (*walk-through audit*) dan pendekatan yang lebih komprehensif seperti *Investment Grade Energy Audit* (IGEA). Sebagian besar audit energi yang dilakukan pada gedung perkantoran di Indonesia masih bersifat *walk-through*, yaitu terbatas pada observasi visual, identifikasi umum peralatan, serta estimasi potensi penghematan tanpa didukung oleh pengukuran teknis yang mendalam maupun analisis finansial yang terukur. Pendekatan ini cenderung menghasilkan rekomendasi yang bersifat indikatif dan tidak dapat langsung dijadikan dasar pengambilan keputusan investasi karena tidak dilengkapi dengan proyeksi biaya, penghematan riil, serta indikator kelayakan ekonomi.

Berbeda secara mendasar dengan pendekatan tersebut, penelitian ini menggunakan kerangka *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) yang menekankan integrasi antara analisis teknis rinci dan evaluasi finansial berbasis investasi. Perbedaan mencolok terletak pada beberapa aspek utama, yaitu: (1) penggunaan data historis konsumsi energi multi-tahun untuk membangun baseline yang lebih akurat, (2) pengukuran langsung kualitas daya listrik menggunakan *Power Quality Analyzer* untuk mengidentifikasi potensi losses akibat harmonisa, (3) simulasi kinerja termal selubung bangunan berbasis parameter Overall Thermal Transfer Value (OTTV) untuk mengevaluasi intervensi pasif secara kuantitatif, serta (4) analisis kelayakan finansial menggunakan indikator Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period yang memungkinkan setiap rekomendasi diuji dari sisi investasi.

Dengan demikian, novelty penelitian ini tidak hanya terletak pada identifikasi potensi penghematan energi, tetapi pada penyusunan kerangka pengambilan keputusan yang berbasis data teknis terukur dan analisis ekonomi yang komprehensif. Pendekatan ini memberikan kontribusi yang lebih aplikatif dibandingkan audit *walk-through* konvensional, karena mampu menjembatani kesenjangan antara rekomendasi teknis dan implementasi nyata di tingkat manajerial.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja energi bangunan secara komprehensif melalui pendekatan *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) serta mengevaluasi kelayakan finansialnya sebagai dasar pengambilan keputusan investasi efisiensi energi.

TINJAUAN PUSTAKA

Konservasi Energi pada Bangunan Gedung

Konservasi energi pada bangunan gedung merupakan upaya sistematis untuk mengurangi konsumsi energi tanpa menurunkan tingkat kenyamanan dan produktivitas pengguna. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, konservasi energi dipahami sebagai langkah terencana untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi serta meminimalkan pemborosan dalam proses penggunaan energi pada bangunan [4]. Sektor bangunan, khususnya gedung komersial dan perkantoran, memiliki karakteristik konsumsi energi yang relatif tinggi karena bergantung pada berbagai sistem operasional seperti tata udara, pencahayaan, peralatan elektronik, serta sistem transportasi vertikal yang digunakan secara terus-menerus. Penelitian mengenai efisiensi energi bangunan menunjukkan bahwa penggunaan sistem pendingin ruangan dan perangkat listrik merupakan komponen utama yang berkontribusi terhadap tingginya konsumsi energi pada bangunan, sehingga penerapan strategi konservasi energi pada sektor ini memiliki potensi penghematan energi yang signifikan tanpa mengurangi fungsi maupun kenyamanan pengguna bangunan [5].

Strategi konservasi energi pada bangunan umumnya dibagi menjadi dua pendekatan utama, yaitu strategi aktif dan strategi pasif. Strategi aktif meliputi peningkatan efisiensi peralatan mekanikal dan elektrikal seperti HVAC, sistem pencahayaan, dan sistem kontrol otomatis. Sementara itu, strategi pasif berfokus pada optimalisasi desain arsitektural seperti orientasi bangunan, pemilihan material selubung bangunan, serta penggunaan elemen peneduh untuk mengurangi beban panas. Integrasi kedua pendekatan tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi energi bangunan secara lebih optimal dibandingkan penerapan strategi tunggal [6], [7].

Konsep dan Tahapan Energy Audit

Energy audit merupakan proses evaluasi sistematis terhadap penggunaan energi dalam suatu fasilitas untuk mengidentifikasi peluang penghematan energi serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Melalui audit energi, pola konsumsi energi pada suatu bangunan atau fasilitas dapat dianalisis sehingga dapat diketahui titik-titik pemborosan energi serta potensi perbaikan yang dapat dilakukan baik secara teknis maupun ekonomis [8]. Secara umum, pelaksanaan audit energi dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi *walk-through audit* sebagai pengamatan awal terhadap kondisi penggunaan energi, preliminary audit untuk memperoleh gambaran konsumsi energi secara lebih rinci, serta audit rinci atau *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) yang bertujuan menghasilkan analisis teknis dan rekomendasi efisiensi energi secara komprehensif [9].

Walk-through audit merupakan tahap awal audit energi yang bersifat observasional untuk memberikan gambaran umum mengenai penggunaan energi dan potensi penghematannya melalui pengamatan langsung terhadap sistem utama pengguna energi. Tahap berikutnya adalah audit energi awal yang melibatkan analisis data konsumsi energi historis dan identifikasi sistem dominan pengguna energi. Sementara itu, audit energi rinci atau *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) merupakan tahap paling komprehensif yang mencakup pengukuran teknis secara detail serta analisis teknis dan finansial terhadap rekomendasi penghematan energi sehingga dapat menjadi dasar pengambilan keputusan manajerial dalam implementasi efisiensi energi [2], [10].

Intensitas Konsumsi Energi (IKE)

Intensitas Konsumsi Energi (IKE) adalah indikator kinerja energi bangunan yang dinyatakan dalam satuan kWh per meter persegi per tahun. IKE digunakan untuk menilai tingkat efisiensi penggunaan energi relatif terhadap luas area terkondisikan. Nilai IKE memungkinkan perbandingan kinerja antarbangunan dengan fungsi sejenis serta menjadi dasar benchmarking terhadap standar nasional maupun internasional [11].

Interpretasi nilai IKE perlu mempertimbangkan fungsi bangunan, jam operasional, tingkat hunian, serta kondisi iklim yang mempengaruhi konsumsi energi bangunan. Nilai IKE umumnya digunakan sebagai indikator efisiensi energi melalui perbandingan konsumsi energi terhadap luas bangunan dan benchmark standar yang berlaku [12], [13].

Sistem Tata Udara dan Efisiensi Energi

Sistem tata udara atau HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) merupakan komponen dengan konsumsi energi terbesar pada bangunan perkantoran, terutama di wilayah beriklim tropis. Efisiensi sistem HVAC dipengaruhi oleh desain sistem, kapasitas peralatan, kondisi beban parsial, serta strategi pengoperasian. Salah satu parameter utama untuk menilai kinerja sistem pendingin adalah Coefficient of Performance (COP), yaitu rasio antara kapasitas pendinginan yang dihasilkan dengan daya listrik yang dikonsumsi [14].

Semakin tinggi nilai COP, semakin efisien sistem dalam menghasilkan pendinginan. Namun demikian, efisiensi aktual sering kali dipengaruhi oleh faktor beban parsial (*part-load performance*) dan kondisi pemeliharaan peralatan. Penggantian peralatan dengan teknologi COP tinggi dapat memberikan penghematan energi yang signifikan, tetapi memerlukan investasi besar sehingga perlu dianalisis kelayakan ekonominya. Selain itu, strategi pengaturan suhu, jadwal operasi, dan sistem kontrol otomatis juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi tanpa harus melakukan penggantian peralatan secara menyeluruh [15].

Selubung Bangunan dan OTTV

Selubung bangunan (*building envelope*) berfungsi sebagai pembatas antara lingkungan luar dan ruang dalam. Kinerja termal selubung sangat menentukan besarnya beban pendinginan yang harus ditanggung sistem tata udara. Salah satu indikator yang digunakan untuk menilai kinerja termal selubung bangunan adalah Overall Thermal Transfer Value (OTTV), yang menyatakan besarnya panas total yang masuk melalui dinding dan jendela per satuan luas fasad [16].

Dalam praktik evaluasi kinerja termal selubung bangunan, OTTV dihitung berdasarkan kontribusi perpindahan panas melalui dinding opak, radiasi matahari melalui kaca, dan konduksi panas pada elemen fenestration. Rumus formal OTTV dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$OTTV = \alpha[U_w \times (1 - WWR)] \times TD_{eq} + (U_F \times WWR \times \Delta T) + (SC \times WWR \times SF)$$

Keterangan:

$OTTV$ = Overall Thermal Transfer Value (W/m^2)

α = absorptansi radiasi matahari permukaan dinding

U_w = transmitansi termal dinding tidak tembus cahaya (*wall thermal transmittance*) (W/m^2K)

WWR = window to wall ratio, yaitu perbandingan luas jendela terhadap luas total dinding fasad

TD_{eq} = beda temperatur ekuivalen untuk dinding opak ($^{\circ}C$)

SC = shading coefficient kaca

SF = solar factor atau faktor radiasi matahari (W/m^2)

U_F = transmitansi termal fenestration/kaca (W/m^2K)

ΔT = beda temperatur antara udara luar dan udara dalam rencana ($^{\circ}C$)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa nilai OTTV ditentukan oleh tiga komponen utama, yaitu perpindahan panas melalui dinding opak, radiasi matahari yang masuk melalui kaca, dan konduksi panas melalui fenestration. Dengan demikian, penurunan nilai OTTV dapat dilakukan melalui pemilihan material dinding yang lebih baik, pengurangan luas bukaan yang berlebihan, penggunaan kaca dengan nilai *shading coefficient* rendah, serta penerapan elemen peneduh pada fasad bangunan. Semakin rendah nilai OTTV, semakin kecil beban panas eksternal yang masuk ke dalam bangunan, sehingga kebutuhan energi untuk sistem pendinginan dapat ditekan.

Nilai OTTV dipengaruhi oleh berbagai komponen selubung bangunan seperti sifat termal material, karakteristik kaca, serta penggunaan elemen peneduh yang berfungsi mengurangi panas matahari yang masuk ke dalam bangunan sehingga meningkatkan efisiensi energi [17]. Standar nasional menetapkan batas nilai OTTV tertentu untuk memastikan efisiensi energi bangunan. Semakin rendah nilai OTTV, semakin kecil beban panas yang masuk ke dalam gedung, sehingga konsumsi energi untuk pendinginan dapat ditekan. Strategi seperti pemasangan shading device dan pelapis kaca (*glass coat*) merupakan bentuk intervensi pasif yang umum digunakan untuk menurunkan nilai OTTV.

Analisis Kelayakan Finansial Proyek Efisiensi Energi

Implementasi proyek efisiensi energi perlu disertai dengan evaluasi finansial untuk memastikan bahwa investasi yang dilakukan mampu memberikan manfaat ekonomi yang memadai. Penilaian kelayakan finansial umumnya dilakukan melalui pendekatan capital budgeting, yang meliputi beberapa indikator utama seperti Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. NPV digunakan untuk menghitung selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar selama umur proyek sehingga dapat menunjukkan nilai tambah investasi. IRR menggambarkan tingkat pengembalian internal dari suatu proyek yang digunakan untuk menilai tingkat profitabilitas investasi. Sementara itu, Payback Period digunakan untuk mengukur jangka waktu yang diperlukan untuk mengembalikan modal awal yang telah diinvestasikan. Melalui ketiga indikator tersebut, pengambil keputusan dapat menilai apakah suatu proyek investasi layak untuk dilaksanakan dari sisi ekonomi dan finansial [18].

Dalam proyek efisiensi energi, arus kas masuk biasanya berasal dari penghematan biaya energi tahunan. Oleh karena itu, ketepatan estimasi penghematan menjadi faktor krusial dalam analisis kelayakan. Analisis sensitivitas sering digunakan untuk menguji ketahanan proyek terhadap perubahan variabel seperti biaya investasi, inflasi energi, atau umur peralatan. Pendekatan finansial yang komprehensif membantu manajemen dalam memprioritaskan alternatif yang tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga layak secara ekonomis [19].

Penelitian Terdahulu dan Research Gap

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem tata udara atau Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) merupakan komponen yang menyerap porsi terbesar konsumsi energi pada bangunan perkantoran sehingga menjadi fokus utama dalam upaya konservasi energi bangunan. Studi audit energi pada gedung perkantoran menunjukkan bahwa sistem pendingin udara menggunakan proporsi energi paling besar dibandingkan sistem utilitas lainnya sehingga optimalisasi kinerja peralatan pendingin menjadi langkah strategis dalam menurunkan konsumsi energi bangunan. Upaya peningkatan efisiensi dapat dilakukan melalui pengendalian beban pendinginan bangunan, optimasi selubung bangunan yang mempengaruhi nilai Overall Thermal Transfer Value (OTTV), serta retrofit sistem HVAC seperti penggantian chiller

dengan teknologi yang memiliki nilai Coefficient of Performance (COP) lebih tinggi.

Implementasi retrofit tersebut terbukti mampu menghasilkan potensi penghematan energi yang signifikan meskipun membutuhkan investasi awal yang relatif besar untuk pembaruan peralatan dan sistem operasional bangunan [15].

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu cenderung berfokus pada analisis teknis semata tanpa mengintegrasikan evaluasi kelayakan finansial secara mendalam. Di sisi lain, studi yang menekankan aspek finansial sering kali tidak didukung oleh pengukuran teknis yang detail seperti analisis kualitas daya dan simulasi termal bangunan. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan akan penelitian yang mengintegrasikan audit teknis rinci dengan analisis investasi berbasis IGEA. Penelitian ini berupaya mengisi kesenjangan tersebut dengan menggabungkan analisis profil energi, simulasi OTTV, serta evaluasi finansial dalam satu kerangka pengambilan keputusan yang komprehensif [20].

METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deskriptif dengan metode *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) untuk mengevaluasi kinerja energi bangunan serta kelayakan finansial alternatif konservasi energi. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan analisis teknis yang rinci dengan evaluasi ekonomi berbasis investasi, sehingga hasil penelitian tidak hanya menggambarkan kondisi eksisting, tetapi juga memberikan dasar pengambilan keputusan implementasi proyek efisiensi energi. Penelitian dilakukan melalui tahapan identifikasi baseline energi, pengukuran lapangan, simulasi teknis, serta analisis finansial.

Objek penelitian adalah sebuah gedung perkantoran bertingkat yang berlokasi di Jakarta Timur dengan luas area terkondisikan sekitar 15.199 m². Gedung ini disuplai oleh daya listrik PLN sebesar 4.330 kVA dan beroperasi pada jam kerja reguler dengan tambahan aktivitas lembur pada akhir pekan. Fokus audit diarahkan pada sistem kelistrikan, sistem tata udara (HVAC), sistem pencahayaan, serta kinerja selubung bangunan, mengingat keempat komponen tersebut merupakan kontributor utama konsumsi energi pada bangunan perkantoran di wilayah tropis.

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa metode, yaitu analisis data historis konsumsi listrik selama tiga tahun terakhir, pengukuran kualitas daya dan profil beban menggunakan *Power Quality Analyzer* (PQA), serta observasi operasional sistem HVAC dan pencahayaan. Selain itu, dilakukan simulasi kinerja termal selubung bangunan untuk menghitung nilai *Overall Thermal Transfer Value* (OTTV) pada berbagai skenario intervensi, termasuk pemasangan perangkat peneduh dan pelapis kaca. Perhitungan OTTV dilakukan menggunakan pendekatan perhitungan manual berbasis standar nasional SNI 6389:2020 tentang konservasi energi selubung bangunan gedung, yang kemudian divalidasi melalui pemodelan berbantuan perangkat lunak *Autodesk Ecotect Analysis* untuk mensimulasikan distribusi radiasi matahari dan beban termal pada fasad bangunan. Pendekatan kombinasi ini digunakan untuk meningkatkan akurasi hasil perhitungan serta memastikan konsistensi antara metode analitik dan simulasi numerik. Data biaya investasi, biaya operasional, serta estimasi penghematan energi tahunan dikumpulkan untuk mendukung analisis finansial.

Analisis data dilakukan dalam beberapa tahap. Pertama, dihitung nilai Intensitas Konsumsi Energi (IKE) sebagai indikator kinerja energi bangunan dan dianalisis tren perubahannya. Kedua, dilakukan analisis distribusi konsumsi energi untuk mengidentifikasi sistem dominan pengguna energi. Ketiga, dilakukan simulasi teknis untuk mengevaluasi dampak alternatif konservasi energi terhadap penurunan beban termal dan nilai OTTV. Keempat, dilakukan analisis kelayakan finansial menggunakan metode Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period. Untuk menguji ketahanan hasil terhadap perubahan asumsi, dilakukan analisis sensitivitas terhadap variabel biaya investasi dan besaran penghematan energi. Pendekatan metodologis ini memastikan bahwa rekomendasi yang dihasilkan memiliki dasar teknis dan ekonomis yang kuat.

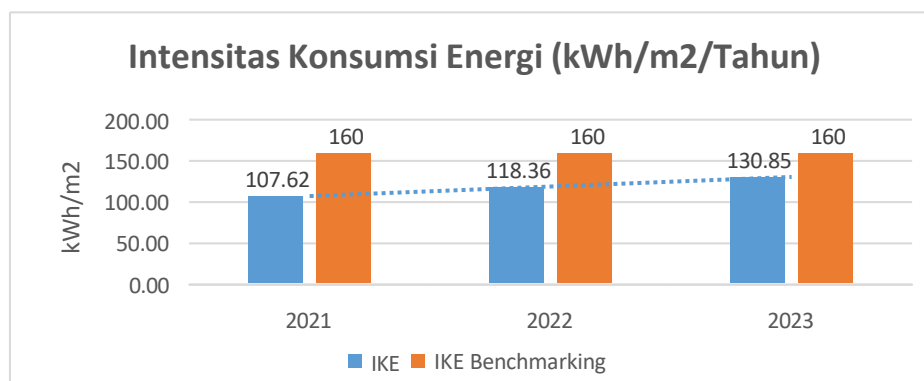
HASIL DAN PEMBAHASAN

Profil Konsumsi Energi dan Tren IKE

Tabel 1. Data Konsumsi Listrik 2021 – 2023

	2021		2022		2023	
	kWh	Biaya	kWh	Biaya	kWh	Biaya
Jan	232.020	Rp253.092.843	268.260	Rp291.996.740	297.360	Rp326.519.287
Feb	216.900	Rp236.530.721	229.680	Rp249.674.769	268.260	Rp295.104.080
Mar	277.080	Rp301.505.200	290.340	Rp315.177.496	205.200	Rp226.742.600
Apr	269.040	Rp292.431.767	239.340	Rp261.016.560	249.120	Rp273.476.993
Mei	270.300	Rp293.923.291	249.180	Rp271.301.855	329.820	Rp360.420.367
Jun	277.200	Rp300.106.897	270.960	Rp294.917.639	297.060	Rp325.152.058
Jul	177.780	Rp194.395.190	284.940	Rp311.169.028	305.820	Rp334.722.665
Agus	213.840	Rp233.547.674	305.220	Rp333.044.701	334.660	Rp365.651.056
Sep	278.220	Rp302.095.595	312.480	Rp342.522.088	323.460	Rp354.516.421
Okt	268.740	Rp292.183.180	300.000	Rp329.813.068	391.200	Rp429.061.507
Nov	270.360	Rp294.327.245	298.260	Rp326.053.186	365.760	Rp399.199.970
Des	274.320	Rp298.801.814	279.120	Rp307.067.339	311.400	Rp341.154.859
Total	3.025.800	Rp3.292.941.418	3.327.780	Rp3.633.754.469	3.679.120	Rp4.031.721.861

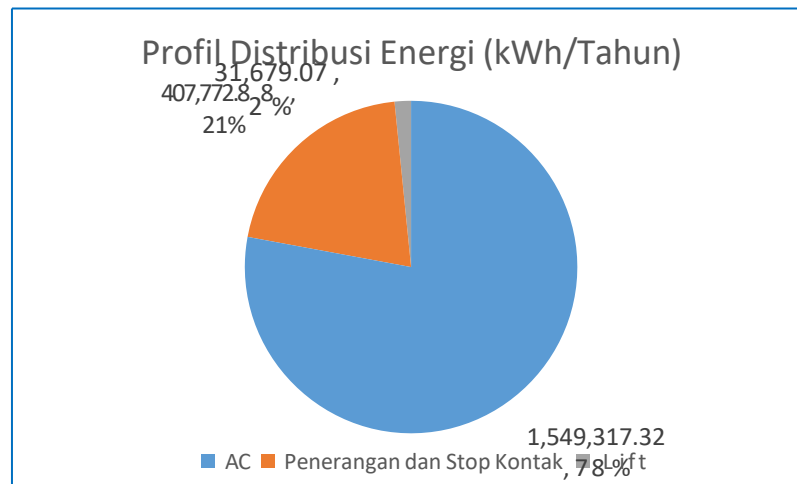
Hasil analisis data historis konsumsi listrik selama periode tiga tahun menunjukkan adanya tren peningkatan konsumsi energi tahunan. Total konsumsi listrik meningkat secara bertahap dari sekitar 3,025 KWh pada tahun pertama menjadi 3,679 KWh pada tahun ketiga. Kenaikan ini berdampak langsung terhadap peningkatan biaya energi tahunan, yang mencerminkan tekanan operasional pada pengelolaan gedung. Meskipun peningkatan tersebut masih berada dalam batas wajar untuk bangunan dengan tingkat aktivitas tinggi, tren kenaikan ini mengindikasikan perlunya intervensi efisiensi energi agar tidak berkembang menjadi inefisiensi struktural.



Gambar 1. Nilai IKE Tahun 2021 - 2023

Perhitungan Intensitas Konsumsi Energi (IKE) menunjukkan nilai sebesar 107,62 kWh/m²/tahun pada tahun pertama, meningkat menjadi 118,36 kWh/m²/tahun pada tahun kedua, dan mencapai 130,85 kWh/m²/tahun pada tahun ketiga. Nilai tersebut masih berada di bawah benchmark gedung perkantoran komersial besar sebesar 160 kWh/m²/tahun, sehingga secara kategorikal gedung masih tergolong hemat energi. Namun demikian, tren peningkatan IKE secara konsisten menandakan adanya penurunan kinerja relatif yang perlu diantisipasi melalui strategi konservasi energi yang terencana.

Distribusi Penggunaan Energi



Gambar 2. Profil Distribusi Energi

Analisis distribusi konsumsi energi menunjukkan bahwa sistem tata udara merupakan kontributor terbesar dengan proporsi sekitar 78% dari total konsumsi energi tahunan. Sistem pencahayaan dan stop kontak menyumbang sekitar 20%, sedangkan sistem transportasi vertikal (lift) hanya sekitar 2%. Komposisi ini sejalan dengan karakteristik bangunan perkantoran di wilayah tropis, di mana beban pendinginan mendominasi kebutuhan energi.

Dominasi konsumsi oleh sistem HVAC mengindikasikan bahwa upaya efisiensi paling signifikan dapat diperoleh melalui intervensi pada sistem pendinginan atau pengurangan beban termal bangunan. Dengan proporsi konsumsi yang sangat tinggi, bahkan peningkatan efisiensi kecil pada sistem tata udara dapat menghasilkan penghematan energi yang substansial dalam skala tahunan.

Analisis Kualitas Daya Listrik

Pengukuran kualitas daya menggunakan *Power Quality Analyzer* menunjukkan bahwa profil beban harian mengikuti pola operasional gedung, dengan puncak beban terjadi pada pagi hari saat sistem tata udara mulai beroperasi penuh. Beban tertinggi tercatat pada jam operasional awal, sedangkan beban terendah terjadi pada hari libur.

Analisis ketidakseimbangan tegangan menunjukkan nilai di bawah 3%, sehingga masih dalam batas standar yang diizinkan. Faktor daya rata-rata berada pada kisaran 0,97, yang menunjukkan kondisi sistem kelistrikan cukup baik dan tidak dikenakan penalti daya reaktif. Namun demikian, nilai Total Harmonic Distortion (THD) arus tercatat melebihi batas 20%, yang mengindikasikan adanya potensi gangguan akibat beban non-linier. Kondisi ini dapat berdampak pada efisiensi sistem dan umur peralatan dalam jangka panjang, sehingga memerlukan perhatian manajemen teknis.

Pengukuran kualitas daya menggunakan *Power Quality Analyzer* menunjukkan bahwa profil beban harian mengikuti pola operasional gedung, dengan puncak beban terjadi pada pagi hari saat sistem tata udara mulai beroperasi penuh. Beban tertinggi tercatat pada jam operasional awal, sedangkan beban terendah terjadi pada hari libur.

Analisis ketidakseimbangan tegangan menunjukkan nilai di bawah 3%, sehingga masih dalam batas standar yang diizinkan. Faktor daya rata-rata berada pada kisaran 0,97, yang menunjukkan kondisi sistem kelistrikan cukup baik dan tidak dikenakan penalti daya reaktif. Namun demikian, nilai Total Harmonic Distortion (THD) arus tercatat melebihi batas 20%, yang mengindikasikan dominasi beban non-linier seperti sistem HVAC berbasis inverter, perangkat elektronik, serta sistem pencahayaan modern.

Tingginya nilai harmonisa arus tersebut memiliki implikasi teknis yang signifikan terhadap efisiensi sistem kelistrikan. Harmonisa menyebabkan peningkatan rugi-rugi daya (*power losses*), terutama pada transformator dan konduktor distribusi. Secara khusus, harmonisa meningkatkan rugi tembaga (I^2R losses) akibat bertambahnya arus efektif (RMS current), serta rugi inti (*core losses*) akibat distorsi gelombang yang meningkatkan arus eddy dan histeresis pada inti transformator. Selain itu, harmonisa orde tinggi juga memicu fenomena *skin effect* pada konduktor, yang meningkatkan resistansi efektif dan memperbesar kehilangan energi dalam bentuk panas.

Pada transformator, akumulasi rugi-rugi tersebut menyebabkan kenaikan temperatur operasi (*overheating*) yang dapat mempercepat degradasi isolasi dan menurunkan umur teknis peralatan. Dalam jangka panjang, kondisi ini tidak hanya meningkatkan biaya pemeliharaan, tetapi juga berpotensi menurunkan efisiensi distribusi energi secara keseluruhan. Dengan demikian, meskipun parameter tegangan dan faktor daya masih berada dalam kondisi baik, tingginya THD arus menunjukkan adanya *hidden energy loss* yang tidak terdeteksi melalui indikator konvensional seperti IKE, namun berdampak nyata terhadap performa sistem kelistrikan gedung.

Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi seperti pemasangan *harmonic filter* (aktif maupun pasif), optimasi distribusi beban non-linier, serta evaluasi desain sistem kelistrikan untuk menekan tingkat distorsi harmonisa. Pendekatan ini penting untuk memastikan bahwa upaya efisiensi energi tidak hanya difokuskan pada sisi konsumsi, tetapi juga pada kualitas daya yang mempengaruhi efisiensi sistem secara keseluruhan.

Analisis Potensi Penghematan Energi

Tabel 2. Potensi Penghematan Energi di Gedung Office XXX

Uraian	Energi (kWh/tahun)	Biaya (Rp/tahun)	Investasi (Rp)	Penurunan Emisi (Ton CO ₂ e/tahun)	Payback (tahun)
Pilihan Selubung Bangunan: Sirip Bangunan					
Total Potensi Penghematan Energi	1.327.500	1.451.125.769	20.353.750.000	1.102	-
Konsumsi Energi Existing Gedung HO Tower (BT)	1.848.769	2.179.570.309	-	-	-
Persentase PPE	67%	67%	-	-	-
Konsumsi Energi Existing UT (2023)	3.679.120	4.031.721.861	-	-	-
Persentase PPE	36,1%	36,1%	-	-	-
Pilihan Selubung Bangunan: Pelapis Kaca (Glass Coat)					
Total Potensi Penghematan Energi	708.658	776.575.249	19.045.000.000	588	-
Konsumsi Energi Existing Gedung HO Tower (BT)	1.988.769	2.179.570.309	-	-	-
Persentase PPE	36%	36%	-	-	-
Konsumsi Energi Existing UT (2023)	3.679.120	4.031.721.861	-	-	-
Persentase PPE	19,3%	19,3%	-	-	-

Penggantian AC COP Tinggi

Simulasi penggantian sistem AC eksisting dengan unit ber-COP lebih tinggi menunjukkan potensi penghematan energi sebesar lebih dari 500.000 kWh per tahun. Secara teknis, opsi ini sangat efektif karena peningkatan efisiensi langsung berdampak pada penurunan konsumsi energi pada sistem HVAC yang merupakan beban dominan gedung.

Namun demikian, hasil analisis finansial menunjukkan bahwa periode pengembalian investasi (*payback period*) melebihi 30 tahun. Nilai ini disebabkan oleh tingginya biaya investasi awal untuk penggantian unit AC secara menyeluruh, yang tidak sebanding dengan nilai penghematan biaya energi tahunan yang dihasilkan. Selain itu, tarif listrik yang relatif stabil serta tidak adanya insentif khusus untuk retrofit peralatan berkontribusi terhadap rendahnya percepatan pengembalian investasi.

Jika dibandingkan dengan umur teknis peralatan AC yang umumnya berada pada kisaran 15–20 tahun, maka periode pengembalian yang melebihi 30 tahun menunjukkan bahwa investasi ini tidak akan mencapai titik impas selama masa operasional ekonomisnya. Dengan kata lain, peralatan berpotensi mengalami penurunan kinerja atau bahkan harus diganti kembali sebelum investasi awal berhasil dikembalikan. Kondisi ini secara prinsip menunjukkan bahwa opsi penggantian AC dengan COP tinggi tidak layak secara finansial dan harus ditolak sebagai prioritas investasi, meskipun memiliki keunggulan dari sisi teknis.

Temuan ini menegaskan adanya *trade-off* antara efektivitas teknis dan kelayakan ekonomi, di mana tidak semua intervensi dengan potensi penghematan energi tinggi secara otomatis layak untuk diimplementasikan. Oleh karena itu, dalam konteks manajemen energi berbasis investasi, keputusan implementasi harus mempertimbangkan kesesuaian antara periode pengembalian investasi dengan umur ekonomis peralatan serta risiko ketidakpastian biaya energi di masa depan.

Shading Device Penuh

Pemasangan shading device secara penuh pada fasad bangunan menunjukkan penurunan nilai OTTV secara signifikan hingga berada di bawah batas standar nasional. Intervensi ini efektif dalam mengurangi radiasi matahari langsung dan menurunkan beban pendinginan. Akan tetapi, luas area pemasangan yang besar menyebabkan kebutuhan investasi tinggi, sehingga diperlukan evaluasi finansial yang cermat sebelum implementasi.

Shading Device Teroptimasi

Pendekatan optimasi shading device melalui pengurangan elemen yang kurang efektif menghasilkan penurunan OTTV hingga sekitar 29,7 W/m², yang telah memenuhi standar nasional. Opsi ini menawarkan keseimbangan antara efektivitas teknis dan efisiensi biaya, meskipun tetap memerlukan investasi awal yang cukup besar.

Glass Coat

Pemasangan pelapis kaca (*glass coat*) menghasilkan penurunan nilai OTTV dari sekitar 44,72 W/m² menjadi 37,57 W/m². Meskipun belum mencapai batas ideal di bawah 35 W/m², intervensi ini mampu menurunkan beban termal secara moderat dengan biaya investasi yang relatif lebih rendah dibandingkan shading device penuh. Secara teknis, opsi ini memberikan pengurangan radiasi yang cukup signifikan dengan kompleksitas implementasi yang lebih sederhana.

Analisis Komparatif OTTV

Perbandingan antar skenario menunjukkan bahwa kombinasi shading device dan glass coat menghasilkan nilai OTTV terendah, yaitu sekitar 21,65 W/m². Namun demikian, kombinasi tersebut memerlukan investasi yang jauh lebih besar. Shading device teroptimasi memberikan hasil yang memenuhi standar nasional dengan nilai sekitar 29,69 W/m², sedangkan glass coat memberikan hasil moderat sebesar 37,57 W/m². Analisis ini menunjukkan adanya hubungan langsung antara tingkat penurunan OTTV dan besarnya investasi yang dibutuhkan.

Analisis Kelayakan Finansial

Evaluasi finansial menunjukkan bahwa opsi glass coat menghasilkan Internal Rate of Return (IRR) sebesar 16,8% dengan nilai Net Present Value (NPV) positif dan Payback Period sekitar 6,14 tahun. Dengan asumsi pendanaan menggunakan modal sendiri, proyek ini dinilai layak untuk diimplementasikan. Sebaliknya, opsi penggantian AC dengan COP tinggi menunjukkan periode pengembalian yang terlalu panjang sehingga kurang menarik secara investasi.

Analisis sensitivitas terhadap perubahan biaya investasi dan besaran penghematan menunjukkan bahwa proyek glass coat tetap layak dalam rentang variasi moderat, sehingga memiliki ketahanan finansial yang cukup baik.

Diskusi Sintesis Teknis dan Ekonomis

Hasil penelitian menunjukkan adanya trade-off yang jelas antara efektivitas teknis dan kelayakan finansial. Opsi dengan penurunan OTTV paling signifikan tidak selalu menjadi opsi yang paling layak secara ekonomi. Dalam konteks ini, pengambilan keputusan tidak semata didasarkan pada parameter teknis, tetapi juga pada indikator pengembalian investasi.

Pemilihan glass coat sebagai opsi implementasi didasarkan pada keseimbangan antara penurunan beban termal, kemudahan instalasi, dan kelayakan finansial. Meskipun tidak menghasilkan nilai OTTV terendah, opsi ini mampu memberikan penghematan energi yang terukur dengan periode pengembalian yang realistis. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada asumsi harga energi dan umur peralatan yang dapat berubah sesuai kondisi pasar, sehingga hasil analisis perlu diperbarui secara berkala.

Implikasi Penelitian

Implikasi Teknis

Temuan penelitian menegaskan bahwa sistem HVAC merupakan fokus utama dalam strategi efisiensi energi bangunan perkantoran di wilayah tropis. Optimasi selubung bangunan terbukti efektif dalam mengurangi beban pendinginan dan mendukung kinerja sistem tata udara. Integrasi pendekatan aktif dan pasif menjadi strategi yang paling rasional untuk meningkatkan efisiensi energi secara berkelanjutan.

Implikasi Manajerial

Pendekatan IGEA memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih objektif karena mengintegrasikan analisis teknis dan finansial. Strategi investasi bertahap dapat diterapkan dengan memprioritaskan intervensi berbiaya rendah namun berdampak signifikan. Selain itu, penerapan manajemen energi jangka panjang diperlukan untuk menjaga agar tren peningkatan IKE dapat dikendalikan.

Implikasi Kebijakan

Hasil penelitian mendukung pentingnya program audit energi yang difasilitasi pemerintah untuk mendorong retrofit bangunan eksisting. Insentif fiskal atau pembiayaan lunak dapat meningkatkan daya tarik proyek efisiensi energi dengan investasi awal tinggi. Selain itu, penguatan implementasi standar OTTV dalam pengawasan bangunan dapat mempercepat transformasi menuju bangunan hemat energi di kawasan perkotaan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pelaksanaan *Investment Grade Energy Audit* (IGEA) pada gedung perkantoran yang menjadi objek penelitian, dapat disimpulkan bahwa kinerja energi bangunan secara umum masih berada dalam kategori efisien berdasarkan nilai Intensitas Konsumsi Energi (IKE) yang berada di bawah standar pembandingan gedung komersial. Namun demikian, tren peningkatan konsumsi energi dan kenaikan nilai IKE selama tiga tahun terakhir menunjukkan adanya kecenderungan penurunan efisiensi relatif yang perlu segera diantisipasi. Sistem tata udara terbukti menjadi kontributor utama konsumsi energi dengan proporsi sekitar 78% dari total penggunaan listrik, sehingga menjadi fokus utama dalam strategi penghematan energi.

Analisis teknis menunjukkan bahwa intervensi pada selubung bangunan melalui pemasangan *glass coat* mampu menurunkan nilai OTTV secara signifikan dan mengurangi beban termal bangunan, meskipun belum sepenuhnya memenuhi batas ideal standar nasional. Dibandingkan dengan alternatif penggantian sistem AC ber-COP tinggi dan pemasangan shading device penuh, opsi *glass coat* memberikan keseimbangan terbaik antara efektivitas teknis dan kelayakan finansial. Hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa proyek ini memiliki IRR yang menarik, NPV positif, serta periode pengembalian investasi yang relatif singkat, sehingga layak untuk diimplementasikan dalam kondisi asumsi yang digunakan.

Sebagai saran, pengelola gedung disarankan untuk menerapkan strategi efisiensi energi secara bertahap dengan memprioritaskan intervensi yang memiliki rasio manfaat terhadap biaya paling optimal. Selain itu, diperlukan sistem manajemen energi berkelanjutan untuk memantau tren konsumsi dan menjaga stabilitas nilai IKE. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan dilakukan analisis yang lebih mendalam terkait integrasi sistem kontrol pintar, evaluasi kualitas daya lanjutan terhadap dampak harmonisa, serta pengembangan model simulasi yang mempertimbangkan skenario perubahan tarif energi dan kebijakan insentif pemerintah guna memperoleh gambaran investasi yang lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Firdausi, "Evaluasi Kinerja Energi untuk Penerangan di Bangunan Gedung PT TSH," *Sainstech J. Penelit. dan Pengkaj. Sains dan Teknol.*, vol. 34, no. 3, pp. 36–45, 2024.
- [2] C. N. Hamdani, A. K. Dewi, A. S. Wardhana, P. A. Utama, R. C. Yudanto, and C. F. P. Swandaru, "Audit Energi Pada Bangunan Gedung Studi Kasus Gedung Perkantoran," *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [3] E. R. Purba, S. Turinno, B. Kamil, Z. Zulramadhanie, and Y. Yasmin, "Pengukuran Dan Verifikasi Kinerja Energi Gedung Perkantoran Pemerintah (Studi Kasus Gedung Di DKI Jakarta)," *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 21, no. 1, pp. 1–10, 2022.
- [4] N. A. Kholifah *et al.*, "Analisis Konservasi Dan Efisiensi Energi Di Gedung Fakultas Teknik Universitas Mulawarman," *Semin. Karya Dan Pameran Arsit. Indones.*, vol. 6, no. 1, pp. 1267–1274, 2023.
- [5] R. B. Natapathy, I. N. S. Kumara, and I. A. D. Giriantari, "Analisis Efisiensi Energi dan Konservasi Energi Sistem Pendingin Ruangan Berdasarkan UI Greenmetric, Studi Kasus Fakultas Teknik Universitas Udayana," *J. Sos. Teknol.*, vol. 5, no. 10, pp. 4140–4149, 2025, doi: 10.59188/journalsostech.v5i10.32480.
- [6] A. Kurniawan and O. F. Jin, "Studi Literatur Sistematis Strategi Efisiensi Energi pada Bangunan dengan Pendekatan Pemodelan Energi dan Analisis Kinerja," *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 10, no. 1, pp. 81–88, 2025, doi: 10.31544/jtera.v10.i1.2025.81-88.
- [7] D. F. Astuti, "Penerapan teknologi hijau dalam arsitektur kampus: Studi kasus pembangunan gedung fakultas pada lingkungan tropis di malang," *Maliki Interdiscip. J.*, vol. 3, no. 10, pp. 1–6, 2025, [Online]. Available: <https://urj.uin-malang.ac.id/index.php/mij/article/download/19060/5676>

- [8] C. H. Prasetyo and A. Zayadi, "Audit Energi Untuk Meningkatkan Efisiensi Konsumsi Energi Pada Jakarta Di Gedung," *Bina Tek.*, vol. 15, no. 2, pp. 77–84, 2020, doi: 10.54378/bt.v15i2.964.
- [9] I. W. Suriana, I. W. Sukadana, A. P. Abiyasa, and I. W. S. Yasa, "Audit Energi untuk Mengoptimalkan Penghematan Konsumsi Listrik di Kantor PT. Tunas Jaya Sanur," *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 7, no. 4, pp. 2974–2985, 2025, doi: 10.38035/rrj.v7i4.1586.
- [10] A. Syahri, A. Asri, B. Badriana, M. Daud, and T. Taufiq, "Audit Energi dan Analisis Penghematannya pada Gedung Jurusan Teknik Elektro Universitas Malikussaleh," *J. Janitra Inform. dan Sist. Inf.*, vol. 4, no. 2, pp. 92–109, 2024, doi: 10.59395/janitra.v4i2.204.
- [11] Y. T. Christofer, T. Kwanda, and J. Rahardjo, "Pengaruh Karakteristik Konsumsi Energi Terhadap Pencapaian Efisiensi Energi-Studi Kasus Rumah Kos Non-Subsidi Di Surabaya," *Dimens. Utama Tek. Sipil*, vol. 11, no. 2, pp. 108–124, 2024, doi: 10.9744/duts.11.2.108-124.
- [12] D. Rahmawati, D. Prasetyo, H. Setiawan, R. Alfita, D. Minggu, and A. R. Saputra, "Audit Energi Listrik Dalam Upaya Penghematan Dan Efisiensi Energi Pada Gedung Fakultas Teknik Di Universitas Trunojoyo Madura," *Informatics, Electr. Electron. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 79–84, 2024, doi: 10.33474/infotron.v4i2.22920.
- [13] E. Suswitaningrum, N. Hudallah, R. D. M. Putri, and B. Sunarko, "Analisis Intensitas Konsumsi Energi Listrik dan Peluang Penghematan Energi Listrik pada Gedung C Kantor Sekretariat Daerah Kabupaten Semarang," *J. ELTIKOM J. Tek. Elektro, Teknol. Inf. dan Komput.*, vol. 6, no. 1, pp. 26–39, 2022, doi: 10.31961/eltikom.v6i1.545.
- [14] *et al.*, "Kajian termodinamik kinerja AC split: studi kasus pada bangunan pendidikan dengan menerapkan program komputer," *J. Appl. Mech. Eng. Green Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 36–42, 2022, doi: 10.31940/jametechn.v3i1.36-42.
- [15] A. D. Soewono, W. Widharto, and M. Darmawan, "Audit Energi Sistem Tata Udara pada Gedung Perkantoran Wisma Slipi Jakarta," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 1, pp. 75–84, 2022, doi: 10.32497/jrm.v17i1.3041.
- [16] I. N. Mas'um, R. R. Amalia, G. H. Musda, and A. Wahyuni, "Analisis OTTV (Overall Thermal Transfer Value) sebagai Pendekatan Arsitektur Hemat Energi pada Selubung Bangunan Museum Kota Makassar (Analysis of OTTV (Overall Thermal Transfer Value) as an Architectural Energy-efficient Approach on Building Envelope of)," *J. Ilmu Pengetah. dan Teknol.*, vol. 8, no. 2, pp. 7–11, 2024, doi: 10.31543/jii.v8i2.341.
- [17] A. M. Nasution, S. Y. Moerni, and Y. S. Rambe, "Efisiensi Energi Berkelanjutan: Strategi Desain dan Perhitungan Optimalisasi Efisiensi Energi pada Selubung Bangunan," *MARKA (Media Arsit. dan Kota) J. Ilm. Penelit.*, vol. 7, no. 2, pp. 167–182, 2024, doi: 10.33510/marka.2024.7.2.167-182.
- [18] R. K. Anam and H. Murnawan, "Analisis Kelayakan Rencana Investasi Mesin Slitter untuk Meningkatkan Produksi Flexible Packaging di PT Surya Multi Indopack," *J. Ilm. Wahana Pendidik.*, vol. 10, no. 13, pp. 693–708, 2024, doi: 10.5281/zenodo.12806609.
- [19] D. Pinayungan, S. Suwarno, and M. F. Zambak, "Analisis Peluang Penghematan Konsumsi Energi Listrik Di Gedung Fakultas Sains Dan Teknologi ULB," *Sigma Tek.*, vol. 8, no. 2, pp. 316–323, 2025, doi: 10.33373/sigmateknika.v8i2.7879.
- [20] Z. Zulramadhanie, J. Windarta, and C. Cahyadi, "Kajian Tekno-Ekonomi Potensi Penghematan Energi Pencahayaan pada Gedung Pemerintah Menggunakan Retscreen," *G-Tech J. Teknol. Terap.*, vol. 8, no. 3, pp. 1584–1594, 2024, doi: 10.33379/gtech.v8i3.4446.