E-ISSN: 3031-8521
P-ISSN: 3032-1867
Halaman 3376-3392
Volume 3 Nomor 4 Tahun 2026

ANALISIS POTENSI PENGHEMATAN ENERGI LISTRIK MELALUI PENERAPAN AUDIT ENERGI PADA BANGUNAN GEDUNG: SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

Mujibul Haq[1], Aula Mauliddin[2]

Universitas Malikussaleh
E-mail: mujibulhaq30@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menyintesis bukti ilmiah mengenai kontribusi audit energi bangunan terhadap penghematan listrik dengan menekankan karakteristik beban dominan, strategi retrofit, kelayakan ekonomi, dan evaluasi kinerja. Penelitian dilakukan melalui tinjauan literatur terstruktur terhadap publikasi tahun 2022–2026 dengan penelusuran terarah pada 2 November 2026. Sebanyak 13 penelitian empiris dan analitis pada tingkat bangunan dikaji menggunakan matriks bukti naratif-komparatif yang mencakup karakteristik gedung, teknik audit, konsumsi listrik, langkah konservasi, serta capaian kinerja. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengkondisian udara menyumbang 62% konsumsi listrik pada hunian universitas di Mesir dan 89,21% pada gedung perkantoran publik di Indonesia. Sejumlah penelitian di Indonesia memperkirakan potensi penghematan listrik sebesar 15,47–37,20%, sedangkan evaluasi terhadap 530 proyek retrofit gedung publik di Tiongkok melaporkan penurunan rata-rata intensitas konsumsi energi sebesar 19,1%. Temuan tersebut menggarisbawahi pentingnya pengendalian operasi, efisiensi sistem pendingin, manajemen pencahayaan, serta perencanaan retrofit yang terpadu. Dengan demikian, audit energi bangunan menyediakan dasar berbasis bukti untuk menyusun prioritas konservasi melalui penetapan kondisi awal, analisis beban akhir, evaluasi teknis-ekonomi, dan pengukuran serta verifikasi hasil secara berkelanjutan.

Kata kunci: *audit energi; konsumsi listrik; intensitas konsumsi energi; efisiensi bangunan; retrofit energi.*

Abstract

This study synthesizes evidence on the contribution of building energy audits to electricity conservation, with emphasis on dominant end uses, retrofit strategies, economic feasibility, and performance evaluation. A structured review of scholarly studies published in 2022–2026 was conducted through a targeted search on 2 November 2026. Thirteen building-level empirical and analytical studies were examined using a narrative-comparative evidence matrix covering building characteristics, audit

techniques, electricity loads, conservation measures, and reported performance. Air-conditioning represented 62% of electricity use in a university residence in Egypt and 89.21% in an Indonesian public office. Selected Indonesian studies reported projected electricity savings of 15.47–37.20%, while an evaluation of 530 public-building retrofit projects in China reported a mean post-retrofit EUI reduction of 19.1%. Findings indicate the importance of operational controls, efficient HVAC, lighting management, and integrated retrofit planning. Building energy audits provide an evidence-based foundation for prioritizing conservation measures through baseline assessment, end-use analysis, techno-economic evaluation, and measurement and verification. The proposed framework links technical savings opportunities with investment decisions and continuous improvement of building energy performance.

Keywords: *energy audit; electricity consumption; energy-use intensity; building efficiency; energy retrofit.*

LATAR BELAKANG

Permintaan energi di sektor bangunan berkaitan erat dengan pertumbuhan luas lantai, intensitas aktivitas, kebutuhan kenyamanan termal, serta peningkatan kepemilikan peralatan listrik. International Energy Agency (IEA, 2025) memperkirakan bangunan menyumbang sekitar 30% kebutuhan energi global, sekitar 30% permintaan energi pada sektor bangunan berasal dari bangunan komersial dan publik. Angka global tersebut memberikan konteks penting, tetapi tidak dengan sendirinya menjelaskan efisiensi suatu gedung. Identifikasi peluang penghematan pada tingkat bangunan tetap memerlukan audit yang mempertemukan catatan tagihan listrik, pengukuran aktual, karakteristik teknis, dan pola pemakaian ruang.

Dalam konteks operasional gedung, konsumsi listrik tidak hanya dipengaruhi daya terpasang. Jam operasi, tingkat okupansi, pengaturan temperatur, kebiasaan mematikan peralatan, kualitas pemeliharaan, dan kondisi selubung bangunan dapat mengubah kebutuhan listrik meskipun fungsi bangunan relatif serupa. Pengelola sering kali mendasarkan prioritas investasi pada besarnya tagihan bulanan, padahal tagihan tidak menjelaskan komponen beban yang menyumbang pemborosan. Audit energi diperlukan untuk menguraikan penggunaan akhir energi, menyusun kondisi acuan (baseline), mengenali penyimpangan, serta memperkirakan nilai ekonomi dari tindakan konservasi.

ISO 50002-1:2025 menguraikan prinsip pelaksanaan audit energi yang terstruktur dan dapat ditelusuri, sedangkan ISO 50002-2:2025 secara khusus memberikan panduan audit pada bangunan dan telah diadopsi sebagai SNI ISO 50002-2:2025 (Badan Standardisasi Nasional, 2025) (ISO, 2025a, 2025b). Selain itu, ISO 50001:2018 menempatkan pemantauan dan peningkatan kinerja energi sebagai proses manajemen berkelanjutan. Kesesuaian pendekatan ini penting agar audit tidak berhenti pada daftar rekomendasi teknis, melainkan menghasilkan dasar pengambilan keputusan, pelaksanaan intervensi, dan evaluasi pascapelaksanaan.

Temuan empiris memperlihatkan potensi penghematan listrik yang signifikan melalui audit dan tindak lanjut konservasi pada beragam fungsi bangunan. Boharb et al. (2022) mengidentifikasi potensi reduksi konsumsi 33% pada kampus, sedangkan Bosu et al. (2023) menemukan bahwa sistem pengkondisian udara menyerap sekitar 62% konsumsi listrik bangunan hunian universitas. Dalam konteks perkantoran Indonesia, Hamdani et al. (2023) melaporkan potensi efisiensi sebesar 30,45%. Hasil tersebut memperlihatkan peran audit dalam menghubungkan karakteristik beban listrik dengan pilihan intervensi yang relevan.

Fang et al. (2024) menguraikan perkembangan pendekatan manajemen energi bangunan, sedangkan Duan et al. (2024) menyoroti adaptasi tindakan konservasi terhadap perubahan kondisi iklim. Berangkat dari perkembangan tersebut, kajian ini memadukan dimensi diagnosis penggunaan listrik, efektivitas tindakan teknis, kelayakan ekonomi, dan evaluasi kinerja pascaintervensi. Integrasi keempat dimensi menghasilkan landasan analitis untuk menentukan prioritas konservasi pada tingkat pengelolaan gedung.

Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi pendekatan audit energi listrik, memetakan sistem dengan peluang penghematan terbesar, membandingkan hasil intervensi berdasarkan karakteristik studi, serta menyusun kerangka prioritas konservasi yang mempertimbangkan aspek teknis dan ekonomi. Kontribusi kajian terletak pada integrasi bukti lintas bangunan menjadi model pengambilan keputusan audit yang operasional.

METODE

Desain Kajian dan Pertanyaan Penelitian

Penelitian menggunakan tinjauan literatur terstruktur dengan pendekatan sintesis naratif-komparatif. Penelusuran terarah terhadap publikasi 2022–2026 dilaksanakan pada 2 November 2026. Prosedur penelitian meliputi identifikasi sumber, penerapan kriteria seleksi, ekstraksi karakteristik studi, klasifikasi hasil penghematan, dan sintesis tematik. Alur kerja tersebut disajikan pada Gambar 1 sebagai kerangka sistematis pengolahan bukti ilmiah.

Analisis difokuskan pada empat dimensi: pendekatan pengukuran dan identifikasi beban listrik, jenis tindakan konservasi, capaian penghematan yang dilaporkan, serta faktor teknis dan ekonomi yang menentukan penerapannya. Unit analisis adalah studi pada bangunan gedung, dengan perhatian khusus pada hubungan antara profil konsumsi, pilihan teknologi, dan kinerja energi.

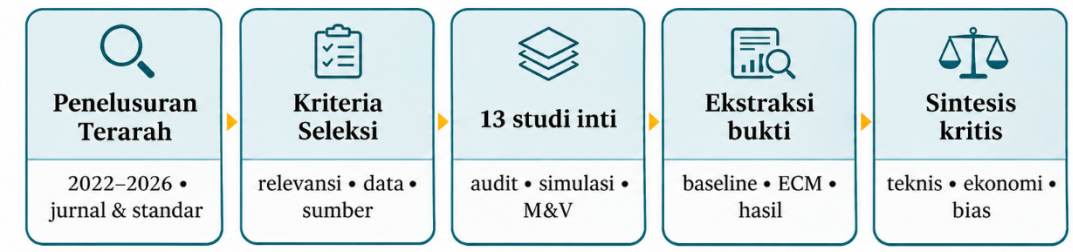
Sumber, Strategi Pencarian, dan Kriteria Seleksi

Sumber literatur diperoleh melalui penelusuran akademik terbuka dan laman penerbit pada 2 November 2026, meliputi AIMS Energy, Applied Energy, Energy and Buildings, Energy Reports, Cleaner Energy Systems, Sustainability, Buildings, jurnal teknik Indonesia, serta dokumen ISO dan IEA. Kata kunci meliputi “building energy audit”, “electricity saving”, “energy conservation measures”, “HVAC lighting retrofit”,

"energy-use intensity", "audit energi listrik gedung", "audit energi bangunan kampus", dan "measurement and verification".

Kriteria inklusi mencakup penelitian terbit 2022–2026 mengenai audit atau evaluasi energi bangunan, berisi identifikasi sistem listrik atau intervensi efisiensi yang cukup jelas, dan menyediakan informasi metode atau keluaran yang dapat diverifikasi melalui abstrak atau naskah penerbit. Penelitian yang hanya membahas pembangkitan listrik tanpa relasi dengan penggunaan akhir bangunan, artikel opini tanpa metode, maupun rujukan tanpa informasi minimum dieksklusi dari tabel bukti. Studi mengenai selubung bangunan atau pemanas berbahan bakar gas tetap dicatat sebagai pembanding konseptual, tetapi tidak digabung ke grafik penghematan listrik.

Sebanyak 13 studi menjadi korpus analisis utama, yaitu Boharb et al. (2022), Bosu et al. (2023), Asif et al. (2023), Hamdani et al. (2023), Taileb dan Sherzad (2023), Eiraudo et al. (2023), Lawal et al. (2024), Sharma et al. (2024), Agharid et al. (2024), Excell et al. (2024), Nugraha et al. (2025), Wang et al. (2026), serta Hanif et al. (2026). Standar teknis dan artikel tinjauan digunakan untuk memperkuat interpretasi metode audit dan strategi pengelolaan energi.



Gambar 1. Protokol kajian terarah dan sintesis bukti yang dapat ditelusuri

Prosedur Ekstraksi, Klasifikasi, dan Evaluasi Mutu

Data yang diekstraksi meliputi identitas penelitian, lokasi dan fungsi bangunan, objek audit, sumber baseline, metode penghitungan, bentuk intervensi, besaran manfaat, dan status penghematan. Bukti diklasifikasikan menjadi:

(A) Terukur, jika konsumsi energi ditinjau setelah tindakan dilaksanakan.

(B) Estimasi audit, jika besaran dihitung dari inventarisasi dan pengukuran sebelum tindakan.

(C) Simulasi, jika manfaat berasal dari skenario pemodelan.

(D) Diagnostik, jika studi memetakan ketidakefisienan tetapi tidak melaporkan penghematan energi yang dapat dibandingkan.

Nilai kategori A tetap harus ditinjau dari sisi normalisasi kondisi operasi, cuaca, okupansi, dan penggunaan energi terbarukan. Analisis dilakukan melalui pengelompokan hasil ke dalam empat bentuk bukti, yaitu penghematan terukur pascaintervensi, estimasi hasil audit, proyeksi berbasis simulasi, dan pemetaan diagnostik. Klasifikasi ini memudahkan pembacaan kontribusi setiap pendekatan terhadap pengambilan keputusan, mulai dari identifikasi peluang hingga evaluasi manfaat konservasi.

Tabel 1. Skema klasifikasi bukti dan konsekuensi interpretasinya

Kategori	Basis perhitungan	Bentuk kesimpulan yang dapat ditarik
A. Terukur	Tagihan/meter sebelum–sesudah, idealnya dinormalisasi	Penurunan operasi aktual, perlu cek pengaruh cuaca/okupansi
B. Estimasi audit	Audit lapangan, daya, durasi, dan tindakan yang diusulkan	Potensi bersyarat, belum merupakan dampak implementasi
C. Simulasi	Model bangunan dengan beberapa skenario desain/operasi	Sensitivitas model, bergantung asumsi dan kalibrasi
D. Diagnostik	Pemetaan beban, klasifikasi atau model prediksi	Identifikasi peluang, tidak otomatis berarti energi hemat

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Bukti Penelitian

Literatur yang dianalisis mencakup studi kasus bangunan tunggal, portofolio 530 proyek gedung publik, audit berbasis pembelajaran mesin pada 1.323 sekolah, serta kajian pemodelan skenario retrofit. Keragaman objek dan metode memperluas pemahaman mengenai mekanisme konservasi listrik pada bangunan pendidikan, perkantoran, hunian, dan fasilitas layanan. Sintesis memperlihatkan hubungan antara profil beban awal, teknologi yang dipilih, dan hasil kinerja energi.

Metode audit dalam literatur meliputi pengukuran lapangan, analisis tagihan, inventarisasi peralatan, pencatatan temperatur dan jadwal operasi, pemodelan eQUEST, serta analisis data interval berbasis pembelajaran mesin. Excell et al. (2024) mengembangkan pendekatan audit tanpa kunjungan langsung melalui data listrik per jam dan simulasi pada 1.323 sekolah. Perkembangan ini memperlihatkan peluang perluasan audit dari diagnosis gedung individual menuju pemantauan portofolio bangunan secara lebih efisien.

Tabel 2. Matriks bukti utama audit dan peluang konservasi energi bangunan (2022–2026)

Studi	Konteks/metode	Temuan utama	Kategori
Boharb et al. (2022)	Kampus Maroko, audit dan usulan retrofit	Potensi 161 MWh/tahun atau 33%, estimasi balik modal 2,8 tahun	B
Bosu et al. (2023)	Hunian universitas Mesir, audit level 1–2	AC 62% beban, usulan AC inverter 22,96% penghematan listrik	B
Asif et al. (2023)	Kantor Arab Saudi, audit dan M&V	EUI 458,9 turun menjadi 361,4 kWh/m²/tahun setelah retrofit	A
Hamdani et al. (2023)	Perkantoran Indonesia, diagnosis sistem	Potensi 2.358 kWh (30,45%) pada periode yang dikaji	B
Taileb & Sherzad (2023)	Hunian Toronto, audit + eQUEST	Simulasi kaca low-E menurunkan penggunaan gas, bukan listrik	C

Eiraudo et al. (2023)	Gedung nyata, model neural energy signature	Pendekatan diagnostik pola pemakaian terhadap cuaca	D
Lawal et al. (2024)	Rumah Nigeria, audit dan skenario retrofit	Potensi 7.587 kWh vs baseline 15.715 kWh, mencakup PV	B
Sharma et al. (2024)	Gedung institusi India, penilaian retrofit	Potensi hingga 4.728.178 kWh/tahun, PBP rerata 7,67 tahun	B
Agharid et al. (2024)	Hotel Taiwan, pemodelan energi	Skenario jadwal pencahayaan berpotensi hemat 8,22%	C
Excell et al. (2024)	1.323 sekolah, audit model + ML	Klasifikasi inefisiensi dari data listrik per jam	D
Nugraha et al. (2025)	Gedung kuliah Bali, walk-through audit	Potensi efisiensi AC 15,47% melalui setpoint dan waktu operasi	B
Wang et al. (2026)	530 proyek gedung publik Tiongkok, data terukur	Rerata penurunan EUI pascaretrofit 19,1%	A
Hanif et al. (2026)	Kantor kesehatan Sumbar, eQUEST	Skenario retrofit AC inverter: 37,20% konsumsi listrik	C

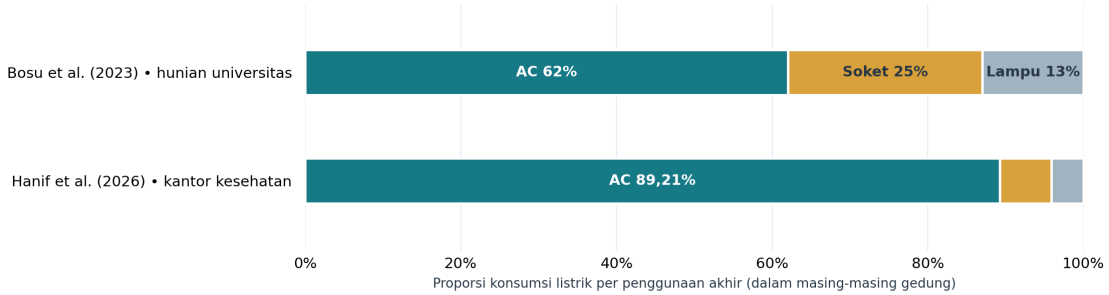
Matriks bukti pada Tabel 2 mengungkap variasi strategi konservasi berdasarkan karakteristik bangunan dan lingkup investasi. Boharb et al. (2022) mengestimasi penghematan 161 MWh/tahun atau 33% melalui paket retrofit kampus dengan investasi sekitar US$55.800 dan periode pengembalian modal hingga 2,8 tahun. Bosu et al. (2023) mengidentifikasi peluang penghematan 61.194 kWh/tahun atau 22,96% melalui penggunaan AC inverter dengan periode pengembalian 8,6 tahun. Kedua temuan memperlihatkan bahwa efektivitas strategi konservasi ditentukan oleh keterpaduan potensi penghematan, kebutuhan investasi, tarif energi, dan karakteristik operasi bangunan.

Asif et al. (2023) mencatat perubahan EUI dari 458,9 menjadi 361,4 kWh/m²/tahun setelah program retrofit yang mencakup PLTS atap, selisih kedua indikator tersebut setara dengan 21,25% terhadap nilai awal. Sementara itu, Wang et al. (2026) menunjukkan rerata penurunan EUI 19,1% pada 530 proyek gedung publik, dengan 99,2% proyek mencatat penghematan positif. Kedua penelitian menegaskan kontribusi pelaksanaan retrofit dan pemantauan kinerja dalam menghasilkan perbaikan energi yang terukur.

Pola Beban: HVAC sebagai Fokus Prioritas

HVAC merupakan kelompok beban penting karena jumlah energi dipengaruhi beban panas, jam operasi, efisiensi parsial, kondisi perawatan, dan kebijakan setpoint. Bosu et al. (2023) mencatat komposisi listrik AC 62%, beban soket 25%, dan lampu 13% pada hunian universitas Mesir, Hanif et al. (2026) mencatat AC 89,21%, peralatan lainnya 6,65%, dan pencahayaan 4,14% pada kantor kesehatan di Sumatera Barat. Gambar 2 menegaskan bahwa proporsi HVAC sangat kontekstual: pada gedung yang didominasi AC, evaluasi pencahayaan saja tidak akan menyasar komponen kWh terbesar.

E-ISSN: 3031-8521
P-ISSN: 3032-1867
Halaman 3376-3392
Volume 3 Nomor 4 Tahun 2026



Hanif: peralatan lain 6,65%; pencahayaan 4,14%. Angka berasal dari masing-masing studi.
Porsi beban tidak sama dengan persentase penghematan; profil operasi kedua lokasi berbeda.

Gambar 2. Perbandingan komposisi beban listrik akhir pada dua gedung audit (Bosu et al., 2023, Hanif et al., 2026)

Dua studi Indonesia memberi pembanding yang lebih dekat dengan iklim tropis: Nugraha et al. (2025) mengestimasi penghematan 15,47% melalui pengaturan temperatur dan waktu operasi AC, sedangkan Hanif et al. (2026) memodelkan skenario inverter sebesar 37,20%. Namun, 37,20% adalah hasil skenario eQUEST, bukan hasil M&V setelah instalasi fisik. Auditor harus menguji apakah biaya penggantian unit benar-benar mengungguli optimalisasi jadwal, setpoint, dan pemeliharaan pada baseline gedung sendiri.

Optimalisasi HVAC perlu dirancang bersama pemenuhan kenyamanan termal dan kualitas layanan ruang. Pengaturan temperatur, kelembapan, jadwal operasi, serta pemeliharaan peralatan merupakan parameter yang saling terkait. Dengan mengintegrasikan indikator konsumsi listrik, kenyamanan pengguna, dan kondisi operasional, audit dapat menghasilkan strategi efisiensi yang berkelanjutan tanpa mengurangi fungsi utama bangunan.

Pencahayaan dan Kendali Jadwal Operasi

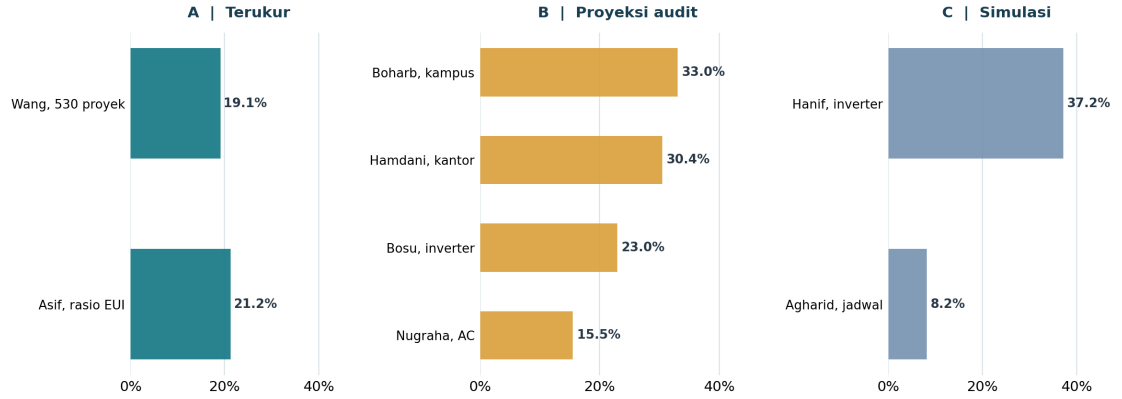
Pencahayaan menawarkan jalur konservasi yang relatif mudah ditindaklanjuti karena data daya lampu, jumlah unit, umur pakai, dan durasi nyala dapat dihitung secara langsung. Bosu et al. (2023) mengidentifikasi peluang penghematan sekitar 4.432,6 kWh per tahun dari kombinasi penggantian lampu, pemakaian sensor, dan pengurangan titik lampu yang berlebih. Pada konteks hotel, Agharid et al. (2024) melaporkan skenario optimalisasi jadwal pencahayaan berpotensi menurunkan konsumsi energi sebesar 8,22% melalui pemodelan. Hasil simulasi tersebut memerlukan pemeriksaan lokasi dan okupansi jika akan diaplikasikan.

Analisis pencahayaan mencakup daya terpasang, tingkat iluminansi, pemerataan cahaya, fungsi ruang, serta kontribusi cahaya alami. Kombinasi penggantian lampu efisien, sensor gerak, dan pengelompokan zona pencahayaan memungkinkan pengendalian konsumsi sesuai pola okupansi. Pendekatan tersebut menempatkan kualitas pencahayaan dan efisiensi listrik sebagai sasaran yang saling melengkapi.

Perangkat operasional seperti jadwal terpusat, sub-meter, serta mekanisme pemadaman setelah aktivitas selesai mendukung investasi berbiaya rendah. Namun, temuan hemat energi dari manajemen waktu dapat mengalami penurunan apabila jadwal kegiatan atau perilaku pengguna berubah. Penghematan yang terukur setelah intervensi perlu ditinjau berkala dan, bila mungkin, diberi pembanding berdasarkan jam operasi per ruang.

Variasi Capaian Penghematan Berdasarkan Karakteristik Intervensi

Gambar 3 menyajikan profil penghematan dari studi terpilih menurut pendekatan evaluasinya. Boharb et al. (2022), Hamdani et al. (2023), Bosu et al. (2023), dan Nugraha et al. (2025) melaporkan estimasi masing-masing 33%, 30,45%, 22,96%, dan 15,47%. Evaluasi pascaintervensi Asif et al. (2023) memperlihatkan perubahan EUI terhitung sebesar 21,25%, sedangkan Wang et al. (2026) melaporkan rerata 19,1%. Pemodelan Hanif et al. (2026) dan Agharid et al. (2024) menghasilkan skenario 37,20% dan 8,22%. Pengelompokan ini menampilkan spektrum peluang konservasi berdasarkan karakteristik tindakan dan pendekatan evaluasi.



Grafik deskriptif, bukan meta-analisis. Penyebut, tipe bangunan, dan status implementasi berbeda; Asif dihitung dari rasio EUI yang dilaporkan.

Gambar 3. Profil penghematan listrik pada studi terpilih berdasarkan pendekatan evaluasi

Variasi besaran penghematan mencerminkan perbedaan sasaran tindakan, intensitas penggunaan energi, dan ruang lingkup intervensi. Optimalisasi AC sebesar 15,47% pada Nugraha et al. (2025) dan skenario pencahayaan 8,22% pada Agharid et al. (2024) menunjukkan bahwa setiap subsistem menawarkan kontribusi konservasi yang spesifik. Oleh sebab itu, pemilihan strategi pada suatu gedung dapat dimulai dari kontribusi penggunaan akhir dan potensi pengurangan kWh pada sistem yang menjadi prioritas.

Taileb dan Sherzad (2023) memperluas perspektif konservasi melalui pengaruh selubung bangunan terhadap konsumsi gas, sedangkan Lawal et al. (2024) menggabungkan efisiensi dan teknologi surya dalam skenario pengelolaan energi rumah. Kedua pendekatan menunjukkan bahwa peningkatan kinerja bangunan dapat

dicapai melalui pengurangan kebutuhan energi sekaligus penguatan pasokan energi terbarukan. Dalam analisis listrik gedung, kedua kontribusi tersebut disajikan secara terpisah agar manfaat teknis setiap strategi tetap terlihat.

Intensitas Konsumsi Energi dan Kualitas Baseline

Intensitas konsumsi energi (IKE) atau energy-use intensity (EUI) lazim dinyatakan dalam kWh/m²/tahun. Dengan notasi E sebagai listrik tahunan dan A sebagai luas lantai yang konsisten dengan batas audit, IKE = E/A. Indikator memudahkan perbandingan bangunan sejenis tetapi tidak langsung mengoreksi variasi fungsi ruang, jam operasional, tingkat hunian, maupun kondisi iklim. Karena itu, IKE sebaiknya dipakai bersama indikator spesifik lain, seperti kWh per jam operasi atau kWh per pengguna pada jenis layanan tertentu.

Validasi baseline merupakan komponen penting untuk meningkatkan ketepatan proyeksi konservasi. Hanif et al. (2026) melaporkan konsumsi hasil perhitungan manual sebesar 78.337,13 kWh/tahun atau 57,60 kWh/m²/tahun dengan deviasi 5,00% terhadap tagihan. Pemodelan eQUEST menghasilkan 88.640 kWh/tahun dengan deviasi 7,76% terhadap tagihan. Perbandingan tersebut memperlihatkan nilai analitis penggunaan data tagihan, inventarisasi beban, dan pemodelan sebagai dasar triangulasi dalam penyusunan skenario penghematan.

Evaluasi kinerja energi menjadi lebih informatif ketika baseline, jam operasi, okupansi, dan kondisi iklim dinyatakan secara konsisten. Data interval serta pencatatan perubahan penggunaan ruang membantu menjelaskan perubahan konsumsi setelah retrofit. Dengan demikian, pengukuran sebelum dan sesudah intervensi berfungsi sebagai dasar kuantitatif untuk menilai keberhasilan tindakan konservasi.

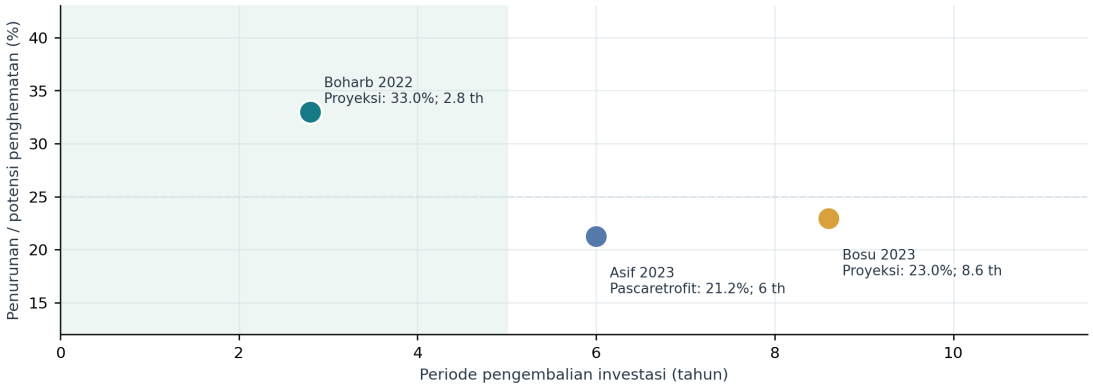
Tabel 3. Uji keterbandingan bukti sebelum memilih angka penghematan sebagai acuan

Potensi kekeliruan	Contoh bukti	Konsekuensi bagi pengambilan keputusan
Baseline tidak setara	Asif: klaim 27% vs hitung rasio EUI 21,25%	Laporkan nilai asal dan hitung ulang, klarifikasi indikator sebelum mengutip
Batas tindakan berbeda	Bosu: AC inverter, Boharb: paket retrofit	Jangan memberi peringkat antarintervensi dari persentase mentah
Simulasi dianggap realisasi	Hanif: skenario inverter eQUEST 37,20%	Labeli sebagai potensi, butuh M&V sesudah penggantian
PV dianggap hemat beban	Asif: paket retrofit + PLTS	Pisahkan pengurangan beban dari penurunan pembelian jaringan
Lokasi berbeda dianggap setara	AC 62% (Bosu) vs 89,21% (Hanif)	Mulai dari inventaris beban dan jam operasi gedung sendiri

Kelayakan Ekonomi dan Strategi Penentuan Prioritas

Besaran penghematan energi bukan satu-satunya dasar keputusan investasi. Nilai ekonomi dipengaruhi CAPEX, OPEX tambahan, umur alat, tarif, risiko operasional, serta kemungkinan perubahan kenyamanan. Payback sederhana = investasi / manfaat kas bersih tahunan, penyaringan ini perlu dilengkapi NPV atau life-cycle cost untuk proyek berumur panjang, karena payback mengabaikan nilai waktu uang dan manfaat setelah modal kembali.

Perbandingan teknis-ekonomi pada Gambar 4 memperlihatkan variasi karakter investasi: Boharb et al. (2022) melaporkan potensi penghematan 33% dengan pengembalian modal hingga 2,8 tahun, Bosu et al. (2023) memperkirakan 22,96% dengan pengembalian 8,6 tahun, dan Asif et al. (2023) menunjukkan perubahan EUI terhitung 21,25% dengan compound payback enam tahun. Variasi ini menunjukkan pentingnya mempertimbangkan besaran penghematan bersama kebutuhan investasi, tarif listrik, dan umur manfaat peralatan.



Indikator ekonomi lintas studi tidak sepenuhnya setara: simple, compound, dan komposisi tindakan berbeda. Bukan ranking investasi.

Gambar 4. Perbandingan capaian penghematan dan periode pengembalian investasi pada tiga studi

Hasil sintesis menghasilkan matriks prioritas dua dimensi yang memadukan kemudahan implementasi dan besaran dampak penghematan. Optimalisasi operasional berbiaya rendah ditempatkan sebagai langkah awal karena dapat diterapkan melalui penyesuaian jadwal, setpoint, dan pemeliharaan. Investasi teknologi berbiaya menengah hingga tinggi dievaluasi berdasarkan potensi kWh, umur manfaat, dan sensitivitas ekonomi. Pendekatan bertahap ini menghubungkan diagnosis audit dengan keputusan investasi yang terukur.

Tabel 4. Matriks praktis rekomendasi penghematan listrik pascaaudit

Sistem	Indikasi inefisiensi	Tindakan prioritas	Bukti yang perlu diverifikasi
AC/HVAC	Jam menyala panjang, setpoint rendah, performa turun	Atur jadwal dan setpoint, rawat, evaluasi inverter	Meter sub-beban, temperatur, jam operasi
Pencahayaan	Lampu aktif di ruang kosong, lux tidak merata	LED sesuai fungsi, sensor, zoning	Daya lampu, lux, okupansi, durasi
Beban soket	Standby tinggi, perangkat tidak terjadwal	Kebijakan shutdown, timer aman	Logger daya, inventaris perangkat
Manajemen	Tagihan tanpa klasifikasi fungsi	Sub-meter, audit berkala, KPI IKE	Baseline bulanan, data interval, cuaca

Investasi besar	Chiller tua, kontrol tidak efisien	Analisis alternatif, LCC/NPV, M&V	CAPEX, OPEX, degradasi, umur aset

Kerangka Implementasi Audit yang Dapat Direplikasi

Sintesis menghasilkan lima tahapan tindakan yang dapat digunakan sebagai kerangka adaptif. Pertama, menetapkan batas sistem, luas bangunan, jenis layanan, serta kebutuhan kenyamanan dan keselamatan. Kedua, menghimpun data tagihan minimal satu siklus operasi representatif, inventarisasi daya, pengukuran lapangan, dan jadwal okupansi untuk membentuk baseline. Ketiga, membuat pemetaan end-use sehingga sistem HVAC, pencahayaan, atau beban soket dapat diprioritaskan menurut kontribusi kWh dan kecukupan data. Keempat, menyusun tindakan konservasi disertai estimasi energi dan analisis investasi, termasuk pemeriksaan interaksi antartindakan. Kelima, menerapkan pengukuran dan verifikasi setelah intervensi serta merevisi pengaturan bila manfaat tidak stabil.

Kerangka ini sejalan dengan orientasi audit ISO 50002-1:2025 dan siklus perbaikan berkelanjutan ISO 50001:2018. Prinsip pentingnya adalah menjadikan audit sebagai proses pengambilan keputusan yang berulang, bukan laporan sesaat. Ketersediaan data per sistem menentukan apakah auditor dapat menetapkan target kWh yang andal atau hanya menghasilkan rekomendasi kualitatif. Ketika sub-meter belum tersedia, inventarisasi beban dan pengukuran spot dapat menjadi tahap awal, tetapi ketidakpastian estimasinya tetap perlu dinyatakan.

Pelibatan manajemen gedung dan pengguna ruang juga menentukan kesinambungan manfaat. Penjadwalan perangkat yang bertentangan dengan kebutuhan operasional cenderung tidak dipatuhi, sehingga target teknis memerlukan kebijakan operasional yang realistis. Penanggung jawab setiap tindakan, biaya, tenggat, baseline, dan indikator verifikasi sebaiknya dicatat sebagai satu paket keputusan. Dengan cara ini, audit dapat mendukung program konservasi yang terdokumentasi dan dapat dievaluasi pada audit berikutnya.

Implikasi bagi Gedung di Indonesia dan Agenda Penelitian

Hasil penelitian Indonesia menunjukkan bahwa audit dapat dijalankan pada gedung perkantoran dan kampus dengan perangkat yang relatif terjangkau. Hamdani et al. (2023) mendeskripsikan diagnosis kelistrikan, AC, pencahayaan, dan manajemen energi pada satu kantor, Nugraha et al. (2025) mengombinasikan inspeksi walk-through dengan pengukuran pencahayaan dan sistem pendinginan, sedangkan Hanif et al. (2026) memasukkan simulasi eQUEST setelah validasi terhadap tagihan PLN. Ragam metode ini memungkinkan pemilihan audit sesuai kesiapan data, anggaran, serta tingkat kompleksitas fasilitas.

Pengembangan penelitian selanjutnya diarahkan pada evaluasi penghematan sebelum dan sesudah retrofit dengan normalisasi iklim dan okupansi, penerapan sub-meter pada sistem dominan, serta analisis kelayakan investasi sepanjang umur aset. Agenda tersebut memperluas penerapan kerangka audit pada gedung tropis dan memperkuat pengukuran kinerja konservasi lintas fungsi bangunan.

Secara keseluruhan, sintesis mengidentifikasi tiga pengungkit utama keberhasilan konservasi, yaitu ketepatan diagnosis penggunaan akhir, kesesuaian tindakan dengan profil operasional, dan kesinambungan pemantauan hasil. Ketiga aspek tersebut membentuk dasar pengembangan program audit energi yang adaptif terhadap karakteristik bangunan dan dapat diintegrasikan ke dalam pengelolaan fasilitas.

Keandalan Indikator Teknis dan Interpretasi Persentase Penghematan

Ketepatan indikator teknis memperkuat interpretasi hasil audit. Konsumsi listrik dinyatakan dalam kWh, kebutuhan daya puncak dalam kW, dan intensitas konsumsi energi dalam kWh/m²/tahun. Pemisahan ketiga indikator tersebut memungkinkan evaluasi yang lebih presisi terhadap pengurangan energi, pengelolaan beban puncak, dan produktivitas penggunaan ruang.

Evaluasi penghematan terukur menggunakan baseline yang mempertimbangkan variasi cuaca, jam operasi, okupansi, dan perubahan layanan. Integrasi variabel penyesuaian tersebut menghasilkan pembacaan dampak retrofit yang lebih representatif terhadap kondisi operasi aktual dan mendukung perbandingan kinerja antartahun.

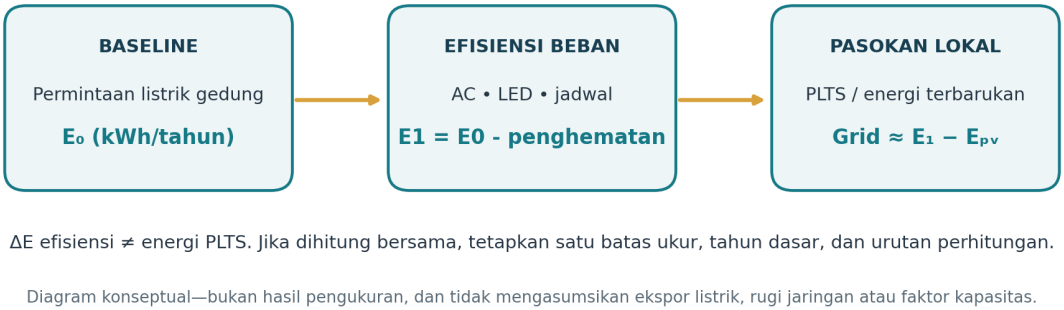
Tabel 5. Indikator utama yang disarankan dalam laporan audit listrik gedung

Indikator	Rumus/definisi	Manfaat analitis	Hal yang perlu diwaspadai
Energi (kWh)	Pembacaan meter atau integral daya aktif	Memetakan konsumsi aktual	Periode pencatatan harus setara
IKE/EUI	Energi tahunan / luas yang relevan	Membandingkan intensitas	Fungsi dan jam operasi berbeda
Beban puncak (kW)	Daya tertinggi pada interval ukur	Mengenali kapasitas dan beban sesaat	Tidak sama dengan penghematan kWh
Saving (%)	(Baseline tersesuaikan − aktual) / baseline × 100	Mengukur perubahan	Perlu normalisasi dan batas sistem
Payback (tahun)	Investasi / manfaat kas tahunan bersih	Penyaringan kelayakan	Tidak mengganti NPV dan LCC

Kombinasi Intervensi dan Penghindaran Perhitungan Ganda

Evaluasi paket konservasi dilakukan secara terpadu dengan memperhitungkan interaksi antarsistem. Penggantian LED menurunkan kebutuhan listrik pencahayaan sekaligus dapat memengaruhi beban pendinginan ruang. Oleh karena itu, simulasi gabungan HVAC dan pencahayaan memberikan estimasi penghematan total yang lebih representatif daripada penjumlahan manfaat masing-masing komponen secara terpisah. Integrasi PLTS dalam audit energi dianalisis melalui tiga komponen, yaitu kebutuhan listrik gedung sebelum retrofit, penurunan kebutuhan listrik akibat tindakan efisiensi, dan kontribusi produksi listrik di lokasi terhadap pengurangan pembelian listrik jaringan. Pemisahan tersebut memperjelas kontribusi konservasi pada sisi permintaan dan pemanfaatan energi terbarukan pada sisi pasokan.

E-ISSN: 3031-8521
P-ISSN: 3032-1867
Halaman 3376-3392
Volume 3 Nomor 4 Tahun 2026



Gambar 5. Kerangka akuntansi energi: efisiensi permintaan versus substitusi listrik jaringan oleh PLTS

Sintesis juga menunjukkan bahwa estimasi manfaat bergantung pada kombinasi tindakan. Sebelum investasi, auditor perlu membandingkan skenario intervensi tunggal, gabungan, dan tanpa tindakan, serta menguji sensitivitas tarif, harga perawatan, jam operasi, dan masa manfaat. Paket dengan biaya awal rendah tidak selalu paling hemat sepanjang siklus hidup, sebaliknya proyek yang menunjukkan penghematan terbesar belum tentu ekonomis jika biaya penggantian dan risiko layanan tinggi.

Pengukuran dan Verifikasi sebagai Tahap Akhir Audit

Pengukuran dan verifikasi (M&V) menjadi tahapan penguatan hasil audit melalui penetapan batas meter, periode baseline, variabel penyesuaian, dan periode evaluasi. Sub-meter mendukung penilaian kinerja sistem utama, sedangkan tagihan listrik dan data interval memungkinkan pengukuran dampak pada tingkat gedung. Integrasi kedua sumber data memperkuat keterlacakan capaian penghematan setelah implementasi.

Asif et al. (2023) menunjukkan bagaimana penurunan EUI setelah retrofit dapat didiskusikan dalam kerangka M&V. Nilai EUI sebelum–sesudah yang mereka laporkan berguna untuk membaca perubahan, tetapi analisis rinci masih perlu memeriksa porsi kontribusi setiap tindakan dan efek pembangkit terbarukan. Studi Wang et al. (2026) memperlihatkan kelebihan rekam operasi multi-proyek yang memungkinkan penilaian variasi manfaat antartipe bangunan. Bukti semacam ini relatif lebih dekat dengan hasil implementasi daripada simulasi, sekalipun analisis tetap bergantung pada kualitas pelaporan dan penyesuaian data.

Sintesis Lintas Konteks dan Kontribusi Ilmiah

Studi bangunan individual menghasilkan pemahaman rinci tentang profil beban dan pilihan intervensi, sementara penelitian portofolio menunjukkan konsistensi pola penghematan pada skala yang lebih luas. Perpaduan kedua jenis bukti memperkuat kontribusi sintesis dalam merumuskan strategi audit yang adaptif terhadap fungsi, iklim, dan karakteristik operasional bangunan.

Pemodelan energi memberikan dasar kuantitatif untuk membandingkan alternatif teknologi sebelum investasi. Pengukuran pascaintervensi melengkapi proses tersebut melalui evaluasi manfaat aktual. Integrasi diagnosis, simulasi, dan verifikasi membentuk rangkaian keputusan konservasi yang utuh dari identifikasi peluang hingga pengendalian kinerja.

Peta Tindak Lanjut dan Urgensi Kebijakan Konservasi

Hasil penelitian mengarahkan penyusunan portofolio konservasi secara bertahap. Tahap awal berfokus pada optimalisasi jadwal AC, setpoint, penghentian operasi peralatan di luar jam layanan, dan pemeliharaan. Tahap berikutnya meliputi evaluasi LED, sistem kendali, dan penggantian peralatan berdasarkan kelayakan ekonomi. Tahap pengembangan mencakup integrasi sistem pemantauan dan energi terbarukan dengan evaluasi kinerja berkala.



Gambar 6. Peta prioritas tindakan audit energi berdasarkan horizon implementasi dan kebutuhan verifikasi

Evaluasi ekonomi menggabungkan manfaat pengurangan konsumsi listrik dengan tarif yang relevan, perubahan biaya operasi, serta investasi awal. Perhitungan payback, nilai kini bersih, dan biaya sepanjang umur aset mendukung pemilihan paket tindakan yang memberikan manfaat teknis dan finansial secara berkelanjutan.

Arah pengembangan penelitian mencakup evaluasi M&V pada beberapa gedung beriklim tropis, penyusunan indikator penggunaan akhir yang seragam, integrasi pemantauan PLTS, dan analisis biaya siklus hidup. Pengembangan tersebut berpotensi menghasilkan model pengelolaan energi gedung yang semakin presisi, adaptif, dan mudah diimplementasikan oleh pengelola fasilitas.

SIMPULAN

Hasil sintesis terhadap 13 penelitian menunjukkan bahwa audit energi berperan strategis dalam mengidentifikasi peluang penghematan listrik dan menentukan prioritas tindakan konservasi pada bangunan gedung. Sistem HVAC menjadi sasaran utama pada bangunan dengan beban pendinginan tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh kontribusi AC sebesar 62% pada Bosu et al. (2023) dan 89,21% pada Hanif et al. (2026).

Optimalisasi jadwal operasi, peningkatan efisiensi peralatan, pengendalian pencahayaan, serta manajemen beban merupakan strategi yang saling melengkapi. Bukti implementasi dari Wang et al. (2026) memperlihatkan rerata penurunan EUI 19,1% pada 530 proyek gedung publik.

Kontribusi utama penelitian ini adalah kerangka pengambilan keputusan konservasi yang mengintegrasikan penetapan baseline dan intensitas konsumsi energi, pemetaan beban akhir, pemilihan paket intervensi, evaluasi kelayakan ekonomi, serta pengukuran dan verifikasi kinerja. Kerangka tersebut menempatkan audit energi sebagai instrumen perencanaan investasi sekaligus pengendalian operasional berkelanjutan. Penerapannya memberikan arah praktis bagi pengelola gedung untuk meningkatkan efisiensi listrik, mengoptimalkan biaya operasi, dan mendukung transisi menuju bangunan yang lebih hemat energi.

DAFTAR PUSTAKA

Agharid, A. P., Permana, I., Singh, N., Wang, F., & Gustiyana, S. (2024). Energy-efficient and cost-effective approaches through energy modeling for hotel building. Energy Engineering, 121(12), 3549–3571. https://doi.org/10.32604/ee.2024.056398

Asif, M., Ahmed, W., & Alazazmeh, A. (2023). Energy performance assessment of a post-retrofit office building using measurement and verification protocol: A case study from KSA. Energy Reports. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.12.061

Badan Standardisasi Nasional. (2025). SNI ISO 50002-2:2025: Audit energi—Bagian 2: Pedoman pelaksanaan audit energi pada bangunan menggunakan ISO 50002-1. https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/50002220252025-sniiso50002-2%3A2025ditetapkanolehbsntahun2025

Boharb, A., Allouhi, A., El-houari, H., El Markhi, H., Jamil, A., & Kousksou, T. (2022). Energy audit method applied to tertiary buildings: Case study of a university campus. AIMS Energy, 10(3), 506–532. https://doi.org/10.3934/energy.2022025

Bosu, I., Mahmoud, H., & Hassan, H. (2023). Energy audit, techno-economic, and environmental assessment of integrating solar technologies for energy management in a university residential building: A case study. Applied Energy. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121141

Duan, Z., de Wilde, P., & Attia, S. (2024). Prospect of energy conservation measures (ECMs) in buildings subject to climate change: A systematic review. Energy and Buildings, 322, 114739. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114739

Eiraudo, S., Schiera, D. S., Mascali, L., Barbierato, L., Giannantonio, R., Patti, E., Bottaccioli, L., & Lanzini, A. (2023). Neural network-based energy signatures for non-intrusive energy audit of buildings: Methodological approach and a real-world application. Sustainable Energy, Grids and Networks, 36, 101203. https://doi.org/10.1016/j.segan.2023.101203

Excell, L. E., Andrews, A., & Jain, R. K. (2024). E-Audit: A “no-touch” energy audit that integrates machine learning and simulation. Energy and Buildings, 317, 114360. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114360

Fang, M., Misnan, M. S., & Halim, N. H. F. A. (2024). A systematic literature review on energy efficiency analysis of building energy management. Buildings, 14(10), 3136. https://doi.org/10.3390/buildings14103136

Hamdani, C. N., Dewi, A. K., Wardhana, A. S., Utama, P. A., Yudanto, R. C., & Swandaru, C. F. P. (2023). Audit energi pada bangunan gedung – studi kasus pada gedung perkantoran. Jurnal Teknologi Terapan, 9(1). https://doi.org/10.31884/jtt.v9i1.391

Hanif, R., Arwizet K., Fernanda, Y., & Kurniawan, A. (2026). Analysis of building electrical energy consumption and energy saving potential using e-Quest simulation with the energy efficiency measures method. Jurnal Vokasi Mekanika, 8(3), 144–156. https://doi.org/10.24036/pk0n4n16

International Energy Agency. (2025). Energy efficiency 2025: Buildings. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/buildings

International Organization for Standardization. (2018). ISO 50001:2018 energy management systems — Requirements with guidance for use. https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html

International Organization for Standardization. (2025a). ISO 50002-1:2025 energy audits — Part 1: General requirements with guidance for use. https://www.iso.org/standard/83645.html

International Organization for Standardization. (2025b). ISO 50002-2:2025 energy audits — Part 2: Guidance for conducting an energy audit using ISO 50002-1 in buildings. https://www.iso.org/iso-50001-energy-management.html

Lawal, O. A., Jimoh, A. A., Abdullah, K. A., Bello, B. A., & Awoyemi, E. D. (2024). Economic and environmental impact of energy audit and efficiency: A report from a Nigeria household. Energy for Sustainable Development, 79, 101387. https://doi.org/10.1016/j.esd.2024.101387

Nugraha, I. K. K. B., Sukerayasa, I. W., Setiawan, I. N., Janardana, I. G. N., Budiastra, I. N., & Suartika, I. M. (2025). Audit energi pada gedung Lecture Building Universitas Udayana. Innovative: Journal of Social Science Research, 5(4), 10436–10445. https://doi.org/10.31004/innovative.v5i4.21045

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Sharma, R., Goel, S., Lenka, S. R., & Satpathy, P. R. (2024). Energy efficiency retrofitting measures of an institutional building: A case study in eastern India. Cleaner Energy Systems, 100111. https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100111

Taileb, A., & Sherzad, M. F. (2023). Energy audits and energy modeling as a tool towards reducing energy consumption in buildings: The cases of two multi-unit

residential buildings (MURBs) in Toronto. Sustainability, 15(18), 13983. https://doi.org/10.3390/su151813983

Wang, Y., Zhao, X., Sun, G., Li, Q., Qiao, L., & Liu, J. (2026). Effectiveness and adaptability of energy retrofit measures in Chinese public buildings: A large-scale empirical analysis. Buildings, 16(10), 1877. https://doi.org/10.3390/buildings16101877