

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori, konsep, regulasi, standar, dan hasil penelitian terdahulu yang menjadi dasar dalam pelaksanaan penelitian mengenai audit energi pada Gedung Administrasi di PT MRT Jakarta (Persero). Landasan teori digunakan untuk memberikan pemahaman mengenai karakteristik sistem transportasi massal dan fasilitas MRT, penggunaan energi listrik pada bangunan, audit energi, Intensitas Konsumsi Energi (IKE), parameter kelistrikan, karakteristik beban listrik, Peluang Penghematan Energi (PHE), serta analisis teknis dan ekonomis terhadap alternatif peningkatan efisiensi energi.

Selain landasan teori, penelitian ini juga menggunakan regulasi dan standar nasional maupun internasional sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja energi. Kajian terhadap penelitian terdahulu dilakukan untuk mengetahui metode, indikator, hasil, dan keterbatasan penelitian yang telah dilakukan serta mengidentifikasi posisi dan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian pada Gedung Administrasi MRT Jakarta.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk mengetahui metode dan pendekatan yang telah diterapkan dalam audit energi serta mengidentifikasi perbedaan dan kontribusi penelitian ini. Kajian penelitian terdahulu dilakukan berdasarkan tema agar dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan penelitian audit energi pada berbagai jenis fasilitas.

(Alex Sandria, 2023) melakukan penelitian berjudul *Identification of Energy Saving Potential Through Energy Audit at PT. ABC*. Audit dilakukan pada sektor industri dengan melakukan observasi lapangan, pengukuran sistem kelistrikan, serta pengukuran mesin produksi dan peralatan pendukung. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa audit energi dapat digunakan untuk membentuk profil penggunaan listrik dan mengidentifikasi peluang penghematan pada suatu fasilitas industri.

(Levina Sari Ariyanti, 2024) melakukan audit energi dan analisis kebutuhan pencahayaan pada Pasar Modern BSD City Tangerang Selatan. Penelitian

menggunakan IKE untuk mengevaluasi konsumsi energi sekaligus melakukan pengukuran pencahayaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai IKE memenuhi benchmark yang digunakan dalam penelitian, tetapi seluruh ruangan yang diperiksa belum memenuhi standar pencahayaan yang digunakan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi berdasarkan IKE perlu dilengkapi dengan evaluasi teknis terhadap sistem yang menggunakan energi

(Muhamad FE Nugroho, 2024) melakukan audit energi pada Gedung Universitas Pertamina dengan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Metode AHP digunakan untuk membantu menentukan prioritas tindakan efisiensi secara objektif dan terstruktur. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa audit energi dapat dipadukan dengan metode pengambilan keputusan untuk memilih alternatif peningkatan kinerja yang paling diprioritaskan.

(Eba Adino, 2024) melakukan audit energi pada industri *brewery* dan mengintegrasikan hasil audit dengan estimasi jejak karbon. Penelitian tersebut menemukan sejumlah kehilangan energi dan menunjukkan bahwa penerapan tindakan penghematan yang direkomendasikan berpotensi mengurangi konsumsi energi sekaligus emisi gas rumah kaca. Penelitian tersebut menunjukkan keterkaitan antara peningkatan efisiensi energi dan aspek keberlanjutan lingkungan.

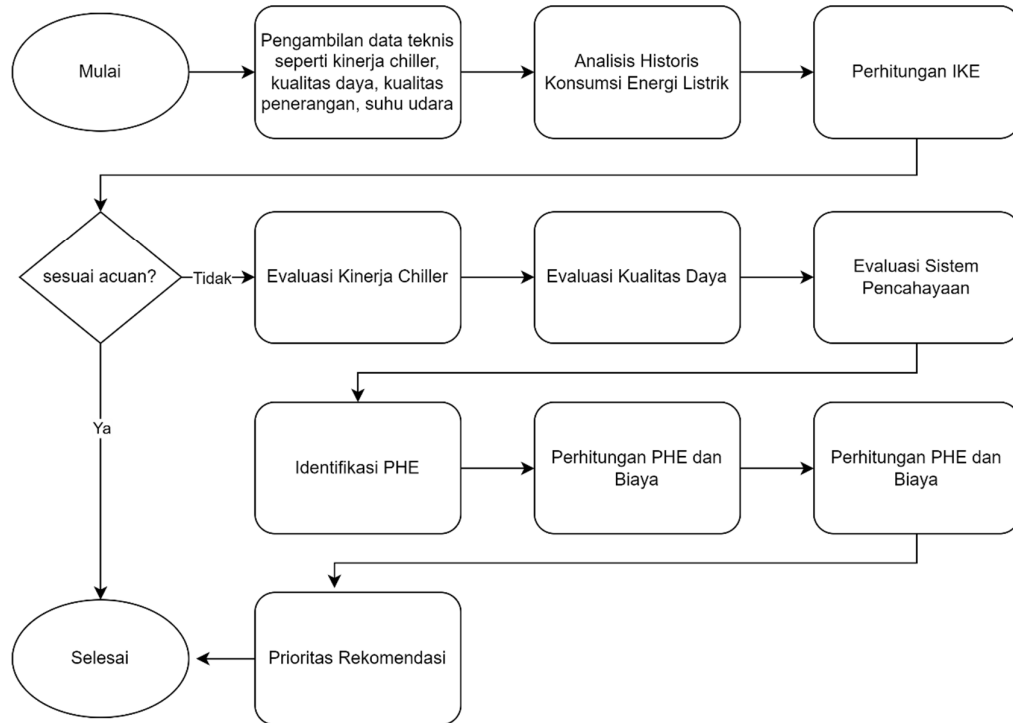
Dalam konteks transportasi publik berbasis rel, (Zhao Yu, 2020) mengembangkan model untuk memperkirakan konsumsi listrik stasiun metro. Penelitian tersebut mempertimbangkan karakteristik stasiun dan berbagai faktor yang memengaruhi konsumsi listrik. Kajian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik sistem dan operasi suatu stasiun merupakan faktor yang perlu dipertimbangkan dalam mengevaluasi konsumsi energi fasilitas metro.

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut dapat diketahui bahwa audit energi telah banyak diterapkan pada sektor industri, bangunan publik, pendidikan, maupun fasilitas transportasi. Metode yang digunakan mencakup perhitungan IKE, evaluasi profil energi, pengukuran sistem kelistrikan, evaluasi pencahayaan, identifikasi PHE, dan analisis prioritas rekomendasi.

Namun, penelitian pada fasilitas transportasi rel yang ditemukan lebih banyak membahas konsumsi energi stasiun, pemodelan konsumsi listrik, atau efisiensi pada sistem tertentu seperti pencahayaan. Penelitian yang secara khusus melakukan

evaluasi audit energi terintegrasi pada bangunan administrasi pendukung operasi MRT di Indonesia, dengan menggabungkan analisis IKE, kualitas daya, tata udara, kinerja chiller, pencahayaan, identifikasi PHE, serta analisis potensi penghematan energi dan biaya masih relatif terbatas.

Dengan demikian, posisi penelitian ini adalah melakukan *re-assessment* audit energi pada Gedung Administrasi PT MRT Jakarta (Persero) melalui tahapan:



Gambar 2.1. Diagram Alir Re-Assesment Audit Energi

Kebaruan penelitian tidak terletak semata-mata pada penggunaan IKE atau metode audit energi, karena pendekatan tersebut telah banyak digunakan, tetapi pada *re-assessment* secara terintegrasi terhadap data teknis Gedung Administrasi MRT Jakarta yang menggabungkan indikator konsumsi energi, kualitas daya, tata udara, chiller, pencahayaan, dan analisis PHE dalam satu studi kasus yang mempertimbangkan karakteristik operasional serta kebutuhan keandalan fasilitas transportasi publik sehingga penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar untuk menganalisis kinerja energi pada Gedung Administrasi PT MRT Jakarta

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori, konsep, regulasi, standar, dan hasil penelitian terdahulu yang menjadi dasar dalam pelaksanaan penelitian mengenai audit energi pada Gedung Administrasi di PT MRT Jakarta (Persero). Landasan teori digunakan untuk memberikan pemahaman mengenai karakteristik sistem transportasi massal dan fasilitas MRT, penggunaan energi listrik pada bangunan, audit energi, Intensitas Konsumsi Energi (IKE), parameter kelistrikan, karakteristik beban listrik, Peluang Penghematan Energi (PHE), serta analisis teknis dan ekonomis terhadap alternatif peningkatan efisiensi energi.

Selain landasan teori, penelitian ini juga menggunakan regulasi dan standar nasional maupun internasional sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja energi. Kajian terhadap penelitian terdahulu dilakukan untuk mengetahui metode, indikator, hasil, dan keterbatasan penelitian yang telah dilakukan serta mengidentifikasi posisi dan kesenjangan penelitian (*research gap*) yang menjadi dasar pelaksanaan penelitian pada Gedung Administrasi MRT Jakarta.

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk mengetahui metode dan pendekatan yang telah diterapkan dalam audit energi serta mengidentifikasi perbedaan dan kontribusi penelitian ini. Kajian penelitian terdahulu dilakukan berdasarkan tema agar dapat memberikan gambaran mengenai perkembangan penelitian audit energi pada berbagai jenis fasilitas.

(Alex Sandria, 2023) melakukan penelitian berjudul *Identification of Energy Saving Potential Through Energy Audit at PT. ABC*. Audit dilakukan pada sektor industri dengan melakukan observasi lapangan, pengukuran sistem kelistrikan, serta pengukuran mesin produksi dan peralatan pendukung. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa audit energi dapat digunakan untuk membentuk profil penggunaan listrik dan mengidentifikasi peluang penghematan pada suatu fasilitas industri.

(Levina Sari Ariyanti, 2024) melakukan audit energi dan analisis kebutuhan pencahayaan pada Pasar Modern BSD City Tangerang Selatan. Penelitian

menggunakan IKE untuk mengevaluasi konsumsi energi sekaligus melakukan pengukuran pencahayaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai IKE memenuhi benchmark yang digunakan dalam penelitian, tetapi seluruh ruangan yang diperiksa belum memenuhi standar pencahayaan yang digunakan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi berdasarkan IKE perlu dilengkapi dengan evaluasi teknis terhadap sistem yang menggunakan energi

(Muhamad FE Nugroho, 2024) melakukan audit energi pada Gedung Universitas Pertamina dengan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Metode AHP digunakan untuk membantu menentukan prioritas tindakan efisiensi secara objektif dan terstruktur. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa audit energi dapat dipadukan dengan metode pengambilan keputusan untuk memilih alternatif peningkatan kinerja yang paling diprioritaskan.

(Eba Adino, 2024) melakukan audit energi pada industri *brewery* dan mengintegrasikan hasil audit dengan estimasi jejak karbon. Penelitian tersebut menemukan sejumlah kehilangan energi dan menunjukkan bahwa penerapan tindakan penghematan yang direkomendasikan berpotensi mengurangi konsumsi energi sekaligus emisi gas rumah kaca. Penelitian tersebut menunjukkan keterkaitan antara peningkatan efisiensi energi dan aspek keberlanjutan lingkungan.

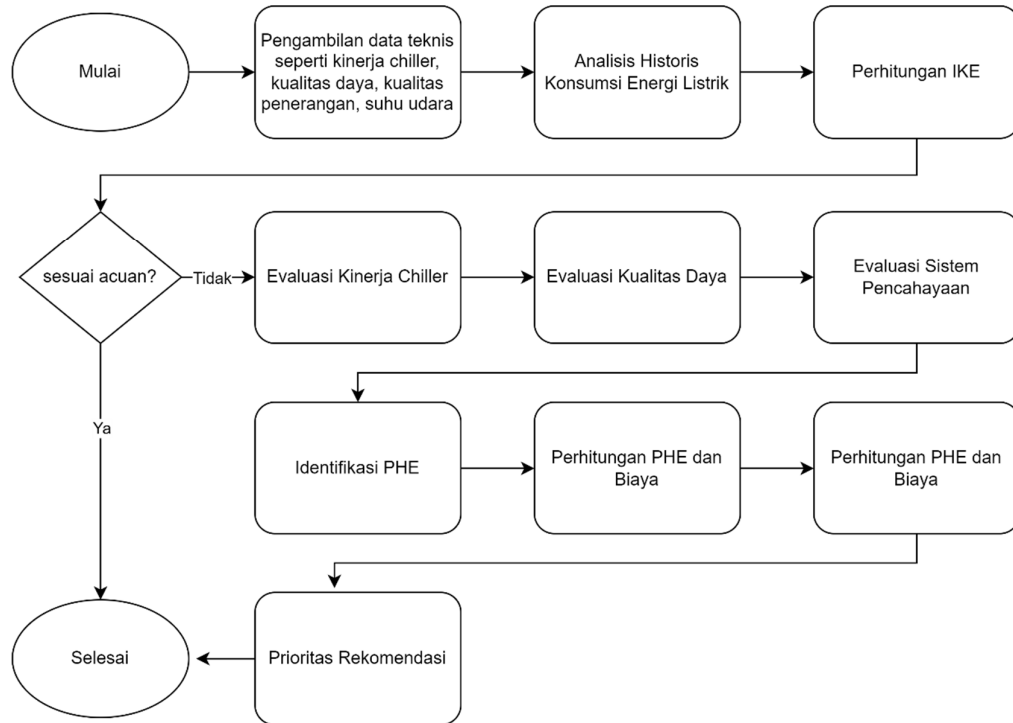
Dalam konteks transportasi publik berbasis rel, (Zhao Yu, 2020) mengembangkan model untuk memperkirakan konsumsi listrik stasiun metro. Penelitian tersebut mempertimbangkan karakteristik stasiun dan berbagai faktor yang memengaruhi konsumsi listrik. Kajian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik sistem dan operasi suatu stasiun merupakan faktor yang perlu dipertimbangkan dalam mengevaluasi konsumsi energi fasilitas metro.

Berdasarkan penelitian terdahulu tersebut dapat diketahui bahwa audit energi telah banyak diterapkan pada sektor industri, bangunan publik, pendidikan, maupun fasilitas transportasi. Metode yang digunakan mencakup perhitungan IKE, evaluasi profil energi, pengukuran sistem kelistrikan, evaluasi pencahayaan, identifikasi PHE, dan analisis prioritas rekomendasi.

Namun, penelitian pada fasilitas transportasi rel yang ditemukan lebih banyak membahas konsumsi energi stasiun, pemodelan konsumsi listrik, atau efisiensi pada sistem tertentu seperti pencahayaan. Penelitian yang secara khusus melakukan

evaluasi audit energi terintegrasi pada bangunan administrasi pendukung operasi MRT di Indonesia, dengan menggabungkan analisis IKE, kualitas daya, tata udara, kinerja chiller, pencahayaan, identifikasi PHE, serta analisis potensi penghematan energi dan biaya masih relatif terbatas.

Dengan demikian, posisi penelitian ini adalah melakukan *re-assessment* audit energi pada Gedung Administrasi PT MRT Jakarta (Persero) melalui tahapan:



Gambar 2.1. Diagram Alir Re-Assesment Audit Energi

Kebaruan penelitian tidak terletak semata-mata pada penggunaan IKE atau metode audit energi, karena pendekatan tersebut telah banyak digunakan, tetapi pada *re-assessment* secara terintegrasi terhadap data teknis Gedung Administrasi MRT Jakarta yang menggabungkan indikator konsumsi energi, kualitas daya, tata udara, chiller, pencahayaan, dan analisis PHE dalam satu studi kasus yang mempertimbangkan karakteristik operasional serta kebutuhan keandalan fasilitas transportasi publik sehingga penelitian ini berbeda dengan penelitian sebelumnya.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar untuk menganalisis kinerja energi pada Gedung Administrasi PT MRT Jakarta

(Perseroda). Pembahasan mencakup konsep efisiensi energi, audit energi, Intensitas Konsumsi Energi (IKE), kualitas daya listrik, sistem tata udara atau chiller, pencahayaan, temperatur dan Peluang Penghematan Energi (PHE).

Teori-teori tersebut digunakan untuk mengevaluasi kondisi aktual penggunaan energi, membandingkannya dengan standar atau *benchmark* yang relevan, serta mengidentifikasi potensi peningkatan efisiensi. Hasil evaluasi selanjutnya menjadi dasar dalam menentukan rekomendasi teknis dan ekonomis untuk meningkatkan kinerja energi bangunan.

2.2.1 Sistem Transportasi Massal Perkotaan

Transportasi merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk memindahkan manusia atau barang dari suatu tempat ke tempat lainnya dengan menggunakan sarana dan prasarana tertentu. Dalam kawasan perkotaan yang memiliki tingkat aktivitas dan kepadatan penduduk tinggi, kebutuhan perjalanan dari satu tempat ke tempat yang lain dalam jumlah besar memerlukan sistem transportasi yang memiliki kapasitas, teratur, dan tingkat pelayanan yang memadai.

Transportasi massal merupakan bagian dari transportasi publik yang dirancang untuk mengangkut penumpang dalam jumlah besar melalui pelayanan yang terorganisasi, rute atau jalur yang telah ditetapkan, serta kapasitas tinggi dibandingkan transportasi pribadi. Sistem transportasi publik perkotaan dapat diklasifikasikan berdasarkan jenis moda, teknologi, jalur operasi, kapasitas, dan karakteristik pelayanannya (Vuchic, 2007). Dalam buku tersebut dijelaskan bahwa “sistem transportasi publik perkotaan mencakup berbagai moda mulai dari transportasi berbasis jalan hingga sistem berbasis rel dengan tingkat kapasitas dan kinerja yang berbeda”.

Transportasi massal pada dasarnya ditujukan untuk meningkatkan efisiensi pergerakan masyarakat dengan mengangkut banyak penumpang dalam satu sarana. Oleh karena itu, transportasi massal memiliki peran penting terutama pada kota-kota besar yang mempunyai permintaan perjalanan tinggi dan keterbatasan ruang jalan.

a. Peran Transportasi Massal dalam Mobilitas Perkotaan

Transportasi massal mempunyai peran strategis dalam mendukung mobilitas perkotaan karena dapat mengangkut penumpang dalam jumlah besar dengan penggunaan ruang yang lebih efisien dibandingkan penggunaan kendaraan pribadi secara individual. Sistem transportasi publik yang memiliki kapasitas tinggi dapat meningkatkan akses masyarakat terhadap pusat kegiatan ekonomi, pendidikan, perdagangan, pelayanan publik, dan kawasan permukiman (Vuchic, 2007).

Keberadaan transportasi massal juga berkaitan dengan pola perkembangan suatu kota. Infrastruktur transportasi dapat memengaruhi aksesibilitas suatu wilayah, pola perjalanan masyarakat, serta perkembangan kawasan yang berada di sekitar koridor transportasi. Oleh sebab itu, pengembangan sistem transportasi massal tidak hanya berkaitan dengan penyediaan sarana perjalanan, tetapi juga dengan upaya mewujudkan sistem mobilitas perkotaan yang efektif, terintegrasi, dan berkelanjutan (Vuchic, 2007).

Dari sisi lingkungan, transportasi massal berpotensi mengurangi konsumsi energi dan emisi per penumpang apabila mampu mengalihkan sebagian perjalanan dari kendaraan pribadi ke moda angkutan berkapasitas besar. Pengembangan transportasi publik berbasis listrik seperti MRT dan LRT juga dapat mendukung agenda mobilitas rendah karbon, terutama apabila dibarengi dengan peningkatan efisiensi energi pada pengoperasian sarana maupun fasilitas pendukungnya.

b. Jenis-Jenis Transportasi Massal

Sistem transportasi massal perkotaan dapat dibedakan menjadi moda berbasis jalan dan moda berbasis rel. Transportasi berbasis jalan antara lain bus kota dan *Bus Rapid Transit* (BRT), sedangkan transportasi berbasis rel meliputi trem, *Light Rail Transit* (LRT), kereta komuter, dan *Mass Rapid Transit* (MRT). (Vuchic, 2007) mengklasifikasikan moda transportasi perkotaan berdasarkan karakteristik jalur, teknologi, kapasitas, kecepatan, tingkat pemisahan terhadap lalu lintas lain, dan kualitas pelayanan.

Bus dan BRT relatif fleksibel karena sebagian besar menggunakan jaringan jalan, sedangkan moda berbasis rel membutuhkan infrastruktur khusus namun dapat menyediakan kapasitas, keteraturan, dan keandalan perjalanan yang lebih tinggi.

Sistem *rapid transit* termasuk dalam kelompok moda transportasi dengan kinerja tinggi karena mempunyai jalur eksklusif dan tingkat interferensi yang rendah terhadap moda lainnya (Vuchic, 2007).

c. Konsep *Mass Rapid Transit* (MRT)

Mass Rapid Transit merupakan sistem transportasi publik berkapasitas tinggi berbasis rel yang pada umumnya beroperasi pada jalur khusus dan terpisah dari lalu lintas jalan. Pemisahan jalur memungkinkan MRT memiliki tingkat keselamatan, kecepatan, kapasitas, dan keandalan yang relatif tinggi dibandingkan moda yang beroperasi bersama dengan lalu lintas jalan (Vuchic, 2007)

Suatu sistem MRT tidak hanya terdiri atas rangkaian kereta, tetapi merupakan sistem terintegrasi yang terdiri atas sarana, jalur rel, stasiun, depo, sistem pasokan tenaga, persinyalan, telekomunikasi, sistem tiket, sistem keselamatan, sistem kendali operasi, serta berbagai fasilitas pendukung lainnya. Oleh karena itu, kebutuhan energi pada suatu sistem MRT tidak hanya berasal dari energi traksi untuk pergerakan kereta, tetapi juga dari berbagai kebutuhan energi nontraksi yang terdapat pada stasiun, depo, gedung, dan fasilitas teknis lainnya.

d. Karakteristik Operasional MRT

MRT memiliki karakteristik berupa kapasitas angkut tinggi, frekuensi perjalanan relatif tinggi, penggunaan jalur eksklusif, waktu perjalanan yang terjadwal, dan kebutuhan terhadap keandalan sistem yang tinggi. Karakteristik sistem transportasi berbasis rel juga mencakup kebutuhan terhadap stasiun, fasilitas penyimpanan atau depo, fasilitas pemeliharaan, serta sistem kontrol yang mendukung kegiatan operasional (Vuchic, 2007)

Keandalan merupakan aspek penting dalam pengoperasian MRT karena berbagai peralatan harus mendukung keselamatan dan kontinuitas pelayanan. Sebagian fasilitas beroperasi mengikuti jadwal pelayanan kereta, sedangkan sejumlah sistem kritis seperti telekomunikasi, keamanan, server, sistem keselamatan, dan peralatan tertentu dapat tetap beroperasi di luar jam pelayanan penumpang.

Karakteristik tersebut menyebabkan pola konsumsi energi MRT berbeda dengan bangunan komersial biasa. Konsumsi energi dapat terdiri dari beban yang

berubah sesuai aktivitas operasional dan beban yang tetap beroperasi secara kontinu. Kondisi tersebut menjadi salah satu alasan perlunya evaluasi profil konsumsi energi secara spesifik pada fasilitas MRT.

2.2.2 MRT Jakarta

a. Gambaran Umum MRT Jakarta

PT MRT Jakarta (Perseroda) merupakan badan usaha milik Pemerintah Provinsi DKI Jakarta yang memiliki kegiatan antara lain pembangunan, pengoperasian dan pemeliharaan prasarana dan sarana MRT, serta pengembangan dan pengelolaan properti maupun bisnis di kawasan stasiun dan depo. MRT Jakarta Fase 1 menghubungkan kawasan Lebak Bulus dengan Bundaran HI melalui jalur sepanjang kurang lebih 16 kilometer dan mulai beroperasi secara komersial pada tahun 2019 (PT MRT Jakarta, 2025). Fase 1 terdiri atas 13 stasiun, yaitu tujuh stasiun layang dan enam stasiun bawah tanah serta satu depo yang berada di kawasan Lebak Bulus. Jalur layang membentang sekitar 10 kilometer, sedangkan bagian bawah tanah memiliki panjang sekitar enam kilometer (PT MRT Jakarta, 2025)

Keberadaan MRT Jakarta membentuk suatu ekosistem transportasi yang tidak hanya terdiri dari kereta sebagai sarana angkutan, tetapi juga berbagai fasilitas teknik dan operasional. Oleh karena itu, kebutuhan energi sistem MRT juga mencakup penggunaan listrik pada stasiun, depo, gedung operasional, serta fasilitas pendukung lainnya.

b. Sistem dan Fasilitas MRT Jakarta

Sistem MRT Jakarta terdiri atas sarana berupa rangkaian kereta dan berbagai prasarana yang mendukung pengoperasiannya. Infrastruktur tersebut antara lain jalur rel, stasiun, depo, sistem tenaga listrik, persinyalan, sistem telekomunikasi, *platform screen door*, sistem kendali operasi, dan fasilitas pelayanan penumpang (PT MRT Jakarta, 2025). Pengoperasian sistem tersebut membutuhkan tingkat keandalan yang tinggi karena sejumlah fasilitas mempunyai keterkaitan langsung dengan keselamatan dan kontinuitas pelayanan. Oleh karena itu, sistem kelistrikan dan peralatan mekanikal-elektrikal merupakan bagian penting dari infrastruktur MRT Jakarta.

Penggunaan energi pada MRT Jakarta dapat dibedakan secara umum menjadi energi untuk traksi kereta dan energi untuk kebutuhan fasilitas nontraksi. Laporan Keberlanjutan MRT Jakarta menunjukkan bahwa konsumsi listrik dicatat untuk energi traksi kereta, Depo Lebak Bulus, stasiun, dan kantor pusat. Pada tahun 2024, total penggunaan listrik yang dilaporkan mencapai 55,18 juta kWh (PT MRT Jakarta, 2025)

c. Stasiun, Depo, dan Fasilitas Pendukung

MRT Jakarta Fase 1 mempunyai tujuh stasiun layang, yaitu Lebak Bulus, Fatmawati, Cipete Raya, Haji Nawir, Blok A, Blok M, dan ASEAN serta enam stasiun bawah tanah yaitu Senayan, Istora, Bendungan Hilir, Setiabudi, Dukuh Atas, dan Bundaran HI. Depo MRT berada di kawasan Lebak Bulus (PT MRT Jakarta, 2025)

Stasiun berfungsi sebagai fasilitas pelayanan penumpang, sedangkan depo digunakan untuk mendukung penyimpanan, pemeriksaan, dan pemeliharaan sarana. Di samping kedua fasilitas tersebut terdapat bangunan dan fasilitas pendukung yang berfungsi menunjang operasional dan pemeliharaan prasarana.

Karakteristik penggunaan energi setiap fasilitas dapat berbeda sesuai dengan fungsi, luas, jam operasi, jumlah pengguna, serta jenis peralatan yang digunakan. Oleh sebab itu, evaluasi kinerja energi perlu mempertimbangkan karakteristik masing-masing fasilitas.

d. Gedung Administrasi

Gedung Administrasi merupakan objek utama dalam penelitian ini sehingga pembahasan mengenai karakteristik gedung diperlukan untuk menentukan batas sistem (*energy audit boundary*). Gedung ini berada di kawasan Depo Lebak Bulus dan digunakan untuk kegiatan administrasi serta mendukung fungsi operasi dan pemeliharaan. Karakteristik yang relevan dalam audit energi meliputi luas bangunan, fungsi ruang, jam operasional, konfigurasi sistem kelistrikan, dan jenis peralatan pengguna energi.

Berdasarkan data yang digunakan dalam penelitian, Gedung Administrasi memiliki luas bangunan sebesar 4.500 m² dan menggunakan sistem pendinginan utama berupa *air cooled chiller*. Peralatan utama lainnya meliputi *Air Handling*

Unit (AHU), *lift*, pompa, unit *Air Conditioner* (AC), sistem pencahayaan dengan menggunakan lampu *Light Emitting Diode* (LED), serta peralatan mekanikal dan elektrikal pada perkantoran.

Data spesifik Gedung Administrasi diperoleh dari dokumentasi internal perusahaan berupa data konsumsi listrik, data aset dan spesifikasi peralatan, hasil pengukuran kualitas daya, sistem tata udara, sistem pencahayaan, serta kinerja chiller. Data tersebut menjadi dasar *re-assessment* dan perhitungan ulang dalam penelitian.

e. Sistem Kelistrikan pada Fasilitas MRT

Sistem kelistrikan gedung pada prinsipnya berfungsi mendistribusikan tenaga listrik dari sumber menuju berbagai kelompok beban secara aman dan andal. Distribusi dapat dilakukan melalui transformator, panel utama, panel distribusi, dan *feeder* yang memasok berbagai peralatan.

Dalam audit energi, pemahaman terhadap konfigurasi sistem kelistrikan diperlukan untuk menentukan lokasi pengukuran dan mengetahui distribusi konsumsi energi. Diagram garis tunggal (*single line diagram*) dapat digunakan untuk menelusuri hubungan antara sumber tenaga, panel, dan kelompok beban.

Selain aspek konsumsi energi, kondisi tegangan, arus, faktor daya, dan keseimbangan beban antarfasa juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi kualitas dan efisiensi sistem kelistrikan (Sadiku, 2009).

f. Jenis Beban Energi pada Fasilitas MRT

Beban listrik pada fasilitas MRT dapat terdiri dari sistem tata udara dan ventilasi, pencahayaan, pompa, elevator, eskalator, komputer, server, telekomunikasi, CCTV, sistem informasi, perangkat keselamatan, dan peralatan pendukung lainnya.

MRT Jakarta sendiri melaporkan penggunaan energi listrik pada energi traksi, stasiun, Depo Lebak Bulus, dan kantor pusat, yang menunjukkan bahwa konsumsi listrik tidak hanya berasal dari pergerakan kereta tetapi juga fasilitas pendukung (PT MRT Jakarta, 2025)

Karena setiap kelompok beban memiliki karakteristik daya dan waktu operasi yang berbeda, audit energi perlu melakukan pemetaan konsumsi berdasarkan

kelompok beban untuk mengetahui peralatan yang memberikan kontribusi paling signifikan.

2.2.3 Energi dan Konsumsi Energi

a. Pengertian Energi

Energi secara umum merupakan kemampuan suatu sistem untuk melakukan kerja atau menghasilkan perubahan. Energi dapat berada dalam berbagai bentuk seperti energi mekanik, kimia, termal, dan listrik serta dapat mengalami konversi dari satu bentuk ke bentuk lainnya.

Pada bangunan dan fasilitas teknik, energi listrik menjadi salah satu bentuk energi utama karena dapat dikonversikan menjadi energi cahaya, panas, pendinginan, maupun energi mekanik melalui berbagai peralatan listrik.

b. Energi Listrik

Energi listrik merupakan energi yang digunakan atau dihasilkan akibat adanya aliran muatan listrik. Besarnya energi listrik yang dikonsumsi suatu beban dipengaruhi oleh daya dan lama penggunaan peralatan (Sadiku, 2009)

Secara sederhana, hubungan energi, daya, dan waktu dapat dinyatakan sebagai:

$$E = P \times t \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

E = energi listrik (Wh atau kWh)

P = daya aktif (W atau kW)

t = waktu penggunaan (jam).

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa upaya penghematan energi dapat dilakukan dengan mengurangi kebutuhan daya, mengurangi jam operasi yang tidak diperlukan, atau meningkatkan efisiensi peralatan tanpa mengurangi fungsi utama sistem.

c. Konsumsi Energi Listrik

Konsumsi energi listrik merupakan jumlah energi listrik yang digunakan oleh peralatan, sistem, atau fasilitas dalam periode tertentu. Konsumsi umumnya dinyatakan dalam *kilowatt-hour* (kWh).

Dalam audit energi, data konsumsi listrik dapat diperoleh dari rekening listrik, *energy meter*, *Building Management System* (BMS), *data logger*, atau hasil pengukuran langsung. Data historis sebaiknya dikumpulkan dalam periode yang memadai agar pola dan kecenderungan penggunaan energi dapat dianalisis (Thumann, 2009).

d. Faktor yang Memengaruhi Konsumsi Energi

Konsumsi energi bangunan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti luas bangunan, fungsi ruang, jumlah pengguna, jam operasi, iklim, karakteristik selubung bangunan, jenis dan jumlah peralatan, efisiensi peralatan, pengaturan operasi, serta kondisi pemeliharaan (Thumann, 2009). Pada bangunan operasional seperti fasilitas MRT, kebutuhan terhadap peralatan yang harus terus tersedia juga dapat menyebabkan konsumsi energi di luar jam kerja normal. Oleh karena itu, analisis konsumsi tidak dapat hanya dilakukan dengan membandingkan total kWh tanpa mempertimbangkan faktor operasional.

e. Profil Konsumsi Energi

Profil konsumsi energi merupakan gambaran perubahan penggunaan energi terhadap waktu. Profil tersebut dapat disajikan berdasarkan periode tahunan, bulanan, harian, ataupun jam.

Analisis profil energi diperlukan untuk mengidentifikasi waktu terjadinya peningkatan beban, konsumsi minimum, konsumsi maksimum, maupun pola yang tidak sesuai dengan aktivitas fasilitas. Menurut (Thumann, 2009), analisis data utilitas dan pola konsumsi merupakan salah satu bagian penting dalam proses audit energi. Sebagai contoh, apabila gedung tidak beroperasi penuh pada malam hari tetapi konsumsi listrik tetap tinggi, kondisi tersebut dapat mengindikasikan adanya peralatan yang tetap bekerja di luar kebutuhan atau adanya *base load* yang perlu dianalisis lebih lanjut.

f. Beban Dasar dan Beban Puncak

Beban dasar (*base load*) merupakan kebutuhan daya minimum yang relatif selalu terdapat pada suatu fasilitas, termasuk ketika aktivitas utama telah berkurang. Beban tersebut dapat berasal dari server, sistem komunikasi, CCTV, perangkat keamanan, pompa tertentu, dan peralatan lain yang harus beroperasi secara kontinu. Sebaliknya, beban puncak (*peak load*) merupakan tingkat kebutuhan daya tertinggi selama periode tertentu. Beban puncak biasanya terjadi ketika sejumlah besar peralatan beroperasi secara bersamaan.

Identifikasi *base load* dan *peak load* membantu auditor mengetahui pola penggunaan energi serta menentukan peluang pengaturan waktu operasi atau pengurangan beban yang tidak diperlukan.

2.2.4 Efisiensi dan Konservasi Energi

a. Pengertian Efisiensi Energi

Efisiensi energi merupakan upaya menggunakan energi secara optimal untuk memperoleh tingkat layanan atau keluaran tertentu. Peningkatan efisiensi dapat dicapai apabila tingkat pelayanan yang sama dapat diperoleh dengan konsumsi energi lebih rendah atau jika dengan jumlah energi yang sama dapat dihasilkan keluaran yang lebih besar.

Konsep efisiensi energi tidak identik dengan sekadar mengurangi penggunaan energi. Pengurangan energi yang menyebabkan penurunan keselamatan, kenyamanan, produktivitas, atau kualitas pelayanan tidak dapat serta-merta dikategorikan sebagai peningkatan efisiensi.

International Organization for Standardization (ISO) 50001 tahun 2018 atau yang bisa disebut ISO50001:2018, menempatkan peningkatan efisiensi, penggunaan, dan konsumsi energi sebagai bagian dari peningkatan kinerja energi organisasi melalui pendekatan sistematis ((ISO), 2018).

b. Pengertian Konservasi Energi

Menurut Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023, konservasi energi merupakan upaya sistematis, terencana, dan terpadu untuk melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya (Indonesia,

PP No 33 Tahun 2023 Tentang Konservasi Energi, 2023). Konservasi energi memiliki cakupan lebih luas daripada efisiensi energi karena mencakup kebijakan, manajemen, teknologi, perilaku, monitoring, serta tindakan perbaikan yang dilakukan secara berkesinambungan.

c. Tujuan Efisiensi dan Konservasi Energi

Efisiensi dan konservasi energi bertujuan mengurangi penggunaan energi yang tidak memberikan nilai tambah, menurunkan biaya operasional, mengoptimalkan kinerja peralatan, serta mendukung pemanfaatan sumber daya energi secara berkelanjutan (Indonesia, PP No 33 Tahun 2023 Tentang Konservasi Energi, 2023). Dalam fasilitas transportasi publik, program efisiensi energi harus tetap mempertimbangkan aspek keselamatan, keandalan, keamanan, kenyamanan, dan kontinuitas pelayanan. Oleh sebab itu, penghematan energi tidak dapat dilakukan dengan menonaktifkan peralatan kritis yang dibutuhkan untuk keselamatan maupun operasi.

d. Prinsip Penggunaan Energi Secara Efisien

Prinsip penggunaan energi yang efisien dapat dilakukan melalui penggunaan peralatan yang tepat, kapasitas yang sesuai kebutuhan, pengoperasian berdasarkan kondisi aktual, pengaturan jam operasi, pemeliharaan yang baik, serta pemanfaatan teknologi kontrol.

(Thumann, 2009) menjelaskan bahwa audit energi dapat mengidentifikasi tindakan penghematan mulai dari perubahan operasi, pemeliharaan hingga investasi pada peralatan dengan efisiensi yang lebih tinggi.

e. Hubungan Efisiensi Energi dengan Keberlanjutan

Peningkatan efisiensi energi dapat mendukung keberlanjutan melalui penurunan konsumsi sumber daya, biaya energi, serta emisi yang terkait dengan penggunaan energi.

((ISO), 2018) juga menghubungkan pengelolaan energi dengan pengurangan biaya dan dampak lingkungan melalui peningkatan kinerja energi secara berkelanjutan. Dengan demikian, efisiensi energi memberikan manfaat secara ekonomi, operasional, dan lingkungan.

2.2.5 Audit Energi

a. Pengertian Audit Energi

Audit Energi adalah proses evaluasi Pemanfaatan Energi dan identifikasi peluang Penghematan Energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada Pengguna Sumber Energi dan Pengguna Energi dalam rangka Konservasi Energi (Indonesia, Peraturan Menteri ESDM No 8 Tahun 2025 Tentang Manajemen Energi, 2025)

Pada bangunan gedung, prosedur audit energi di Indonesia salah satunya mengacu pada SNI 6196:2011 tentang Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung yang masih tercatat berstatus berlaku pada BSN (Nasional B. S., SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung, 2011).

Pada tahun 2025, BSN juga menetapkan SNI ISO 50002-1:2025 mengenai persyaratan umum audit energi dan SNI ISO 50002-2:2025 mengenai pedoman audit energi pada bangunan (Nasional B. S., SNI ISO 50002-1:2025 Audit Energi – Bagian 1: Persyaratan Umum dengan Pedoman Penggunaan, 2025).

Menurut (Thumann, 2009) audit energi mencakup pengumpulan dan analisis data energi, pemeriksaan sistem mekanikal dan elektrik, penggunaan instrumen pengukuran, serta analisis keekonomian terhadap peluang penghematan.

b. Tujuan Audit Energi

Audit energi bertujuan mengetahui pola penggunaan energi, menentukan tingkat kinerja energi, mengidentifikasi peralatan yang memberikan kontribusi signifikan terhadap konsumsi, serta menghasilkan rekomendasi peningkatan efisiensi (Thumann, 2009). Dalam penelitian ini, audit energi digunakan untuk mengetahui kondisi penggunaan energi Gedung Administrasi, menghitung IKE, mengidentifikasi distribusi beban, serta menentukan Peluang Penghematan Energi.

c. Manfaat Audit Energi

Audit energi memberikan informasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan energi. Melalui audit, organisasi dapat mengetahui bagian sistem yang menggunakan energi paling besar, mengidentifikasi kondisi tidak efisien, dan memperkirakan manfaat dari tindakan perbaikan

(Thumann, 2009). Hasil audit juga dapat digunakan untuk menyusun *baseline*, menentukan indikator kinerja, mengembangkan sistem monitoring, merencanakan investasi, serta mengevaluasi efektivitas tindakan penghematan.

d. Jenis-Jenis Audit Energi

Audit energi dapat dilakukan dalam beberapa tingkat kedalaman sesuai tujuan dan informasi yang tersedia. Dalam konteks bangunan, audit dapat dibedakan menjadi audit energi awal dan audit energi rinci.

- **Audit Energi Awal**

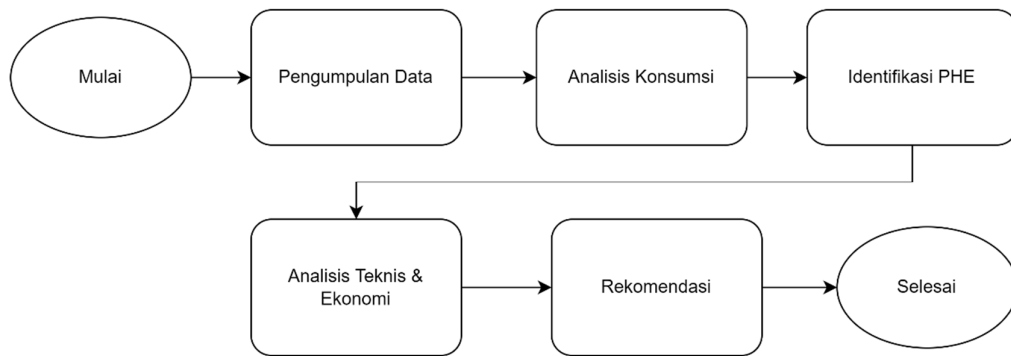
Audit energi awal bertujuan memperoleh gambaran umum mengenai konsumsi energi dan mengidentifikasi area yang memerlukan analisis lebih lanjut. Tahap ini umumnya mencakup pemeriksaan rekening energi, luas bangunan, jam operasi, inventarisasi peralatan utama, observasi lapangan, serta perhitungan indikator awal seperti IKE (Nasional B. S., SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung, 2011). Audit awal dapat digunakan sebagai proses *screening* untuk menentukan apakah suatu fasilitas memerlukan audit yang lebih rinci.

- **Audit Energi Rinci**

Audit energi rinci dilakukan untuk memperoleh informasi yang lebih mendalam mengenai kondisi operasional dan potensi penghematan. Audit rinci dapat melibatkan pengukuran parameter kelistrikan, pengukuran pencahayaan dan temperatur, pencatatan profil beban, evaluasi efisiensi peralatan, serta perhitungan teknis dan ekonomi terhadap tindakan konservasi energi (Thumann, 2009).

e. Tahapan Pelaksanaan Audit Energi

Secara umum, audit energi meliputi perencanaan audit, pengumpulan data awal, survei lapangan, pengukuran, analisis konsumsi energi, identifikasi pengguna energi signifikan, identifikasi PHE, analisis teknis dan ekonomis, serta penyusunan rekomendasi (Nasional B. S., SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung, 2011). Tahapan tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.2 Tahapan Pelaksanaan Audit Energi

SNI ISO 50002-1:2025 memberikan persyaratan umum audit energi, sedangkan SNI ISO 50002-2:2025 memberikan pedoman yang lebih khusus untuk pelaksanaan audit energi pada bangunan (Nasional B. S., SNI ISO 50002-1:2025 Audit Energi – Bagian 1: Persyaratan Umum dengan Pedoman Penggunaan, 2025)

f. Data yang Diperlukan dalam Audit Energi

Data yang dapat digunakan dalam audit energi meliputi data konsumsi dan biaya listrik, luas bangunan, fungsi ruangan, jam operasi, jumlah pengguna, diagram kelistrikan, kapasitas transformator, daftar peralatan, daya nominal, spesifikasi peralatan, catatan pemeliharaan, dan hasil pengukuran lapangan (Thumann, 2009). Data historis dan data hasil pengukuran sebaiknya saling divalidasi untuk memastikan bahwa analisis mencerminkan kondisi aktual fasilitas.

g. Instrumen dan Metode Pengukuran Energi

Audit energi dapat menggunakan berbagai instrumen seperti *power analyzer*, *clamp meter*, multimeter, lux meter, alat pengukur temperatur dan kelembapan, serta *data logger*. Pemilihan alat disesuaikan dengan parameter yang akan dievaluasi.

Power analyzer dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, dan energi. Data tersebut dapat digunakan untuk menganalisis kondisi sistem kelistrikan secara lebih rinci. Pengukuran harus mempertimbangkan akurasi alat, lokasi pengukuran, durasi pencatatan, variasi operasi, serta keselamatan kerja.

2.2.6 Intensitas Konsumsi Energi (IKE)

a. Pengertian Intensitas Konsumsi Energi

Intensitas Konsumsi Energi merupakan indikator yang menggambarkan jumlah energi yang dikonsumsi oleh suatu bangunan terhadap luas bangunan dalam periode tertentu. IKE banyak digunakan dalam audit energi bangunan karena memungkinkan konsumsi energi dinormalisasi terhadap ukuran bangunan (Nasional B. S., SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung, 2011).

Secara umum IKE dihitung dengan persamaan:

$$\text{Konsumsi Energi} = \frac{\text{daya (watt)} \times \text{waktu (h)}}{1000} \dots\dots\dots(2.2)$$

dengan

Konsumsi Energi = jumlah pemakaian energi (kWh)

Daya = Jumlah daya yang dipakai sebuah alat (watt)

Jam = waktu yang digunakan pada saat pemakaian energi (h)

Dengan menggunakan persamaan di atas dapat diketahui besar konsumsi energi total pada sebuah alat yang digunakan sehari-hari. Setelah mendapatkan nilai konsumsi energi total pada semua alat, tinggal menjumlahkan semua nilai konsumsi energi total. Untuk nilai IKE nya sendiri menggunakan persamaan di bawah ini.

$$IKE = \frac{(E) \text{ Total Konsumsi Energi}}{(A) \text{ Total Luas Bangunan}} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan:

IKE = Intensitas Konsumsi Energi (kWh/m² per bulan/tahun)

E = konsumsi energi listrik selama periode tertentu (kWh)

A = luas bangunan yang diperhitungkan (m²).

IKE pada umumnya dinyatakan dalam:

kWh/m²/Bulan , atau

kWh/m²/tahun

Penggunaan satuan bulanan dan tahunan harus konsisten pada seluruh analisis.

b. Fungsi IKE sebagai Indikator Efisiensi Energi

IKE berfungsi sebagai indikator awal untuk mengetahui tingkat penggunaan energi suatu bangunan dan membandingkannya dengan periode sebelumnya, bangunan sejenis, atau *benchmark* tertentu.

(Levina Sari Ariyanti, 2024) menggunakan IKE sebagai salah satu parameter audit energi pada bangunan publik untuk mengetahui tingkat konsumsi energi bangunan. Penelitian tersebut memperlihatkan bahwa IKE dapat memberikan informasi mengenai kinerja konsumsi secara agregat, tetapi tetap perlu dikombinasikan dengan evaluasi teknis seperti kondisi pencahayaan.

Dalam konteks sistem manajemen energi, indikator yang menormalisasi penggunaan energi terhadap parameter tertentu juga sejalan dengan konsep *Energy Performance Indicator* atau EnPI ((ISO), 2018)

Berikut tabel IKE Gedung perkantoran ber AC menurut (Indonesia, Permen No 13 tahun 2012 tentang Penghematan Pemakaian Tenaga Listrik, 2012) adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 Tabel IKE Gedung ber-AC

No	Dengan AC (Bulanan)	Dengan AC (Tahunan)	Kriteria
1	<=8.5	<=102	Sangat Efisien
2	8.5-14	102-168	Efisien
3	14-18.5	168-222	Cukup Efisien
4	>18.5	>=222	Boros

c. Persamaan IKE

Intensitas Konsumsi Energi (IKE) merupakan perbandingan antara jumlah energi listrik yang dikonsumsi dalam suatu periode dengan luas bangunan yang dianalisis.

Untuk periode tahunan, IKE dihitung menggunakan persamaan:

$$IKE_{Tahunan} = \frac{E_{Tahun}}{A} \dots \dots \dots (2.4)$$

dengan:

$IKE_{Tahunan}$ = Intensitas Konsumsi Energi tahunan (kWh/m²/tahun)

E_{tahun} = total konsumsi energi listrik selama satu tahun (kWh/tahun)

A = luas area bangunan yang dianalisis (m²)

Sedangkan untuk periode bulanan, digunakan persamaan, Apabila analisis dilakukan untuk periode satu tahun berdasarkan data konsumsi bulanan, maka:

$$IKE_{Bulanan} = \frac{E_{Bulan}}{A} \dots \dots \dots (2.5)$$

dengan:

IKE_{Bulan} = Intensitas Konsumsi Energi Bulanan (kWh/m²/Bulan)

E_{Bulan} = total konsumsi energi listrik selama satu tahun (kWh/bulan)

A = luas area bangunan yang dianalisis (m²)

Apabila analisis dilakukan untuk periode satu tahun berdasarkan data konsumsi bulanan, maka:

$$E_{tahun} = \sum_{i=1}^{12} E_i \dots \dots \dots (2.6)$$

sehingga

$$IKE_{Tahun} = \frac{\sum_{i=1}^{12} E_i}{A} \dots \dots \dots (2.7)$$

Periode perhitungan IKE harus dinyatakan secara jelas karena nilai IKE bulanan dan IKE tahunan memiliki satuan serta dasar pembandingan yang berbeda. Konsistensi periode perhitungan diperlukan agar hasil audit dapat dibandingkan dengan periode sebelumnya, gedung sejenis, maupun nilai acuan efisiensi energi yang digunakan dalam penelitian.

d. Faktor yang Memengaruhi IKE

Nilai IKE dipengaruhi oleh luas bangunan, jam operasi, jumlah pengguna, fungsi bangunan, kondisi iklim, jenis dan efisiensi peralatan, serta pola penggunaan

energi. Oleh sebab itu, perbandingan IKE harus dilakukan terhadap objek yang memiliki karakteristik sebanding. Gedung dengan jam operasi 24 jam, misalnya, tidak dapat dibandingkan secara langsung dengan gedung yang hanya beroperasi delapan jam per hari tanpa melakukan penyesuaian terhadap faktor operasional.

e. Interpretasi Nilai IKE

Secara umum, semakin kecil nilai IKE pada fasilitas dengan tingkat layanan dan kondisi operasi yang sebanding, semakin rendah konsumsi energi per satuan luas. Namun nilai IKE tidak dapat berdiri sendiri sebagai dasar kesimpulan. Bangunan dengan IKE tinggi belum tentu mengalami pemborosan apabila memiliki jam operasi atau kebutuhan teknis yang jauh lebih besar daripada *benchmark*/acuan standar.

Sebaliknya, IKE yang rendah juga tidak selalu menunjukkan seluruh sistem telah bekerja optimal. (Levina Sari Ariyanti, 2024) misalnya, menemukan bahwa bangunan yang dinilai memenuhi *benchmark* konsumsi energi tetap mempunyai kondisi pencahayaan yang belum sesuai dengan standar yang digunakan dalam penelitian.

f. Standar atau Batas Efisiensi IKE

Dalam sejumlah penelitian di Indonesia, klasifikasi IKE pernah menggunakan Permen ESDM Nomor 13 Tahun 2012 tentang Penghematan Pemakaian Tenaga Listrik. Namun, peraturan tersebut telah dicabut melalui Permen ESDM Nomor 9 Tahun 2018 (Indonesia, Permen ESDM No 9 Tahun 2018 Tentang Pencabutan Permen ESDM terkait Kegiatan di bidang energi baru, terbarukan, dan konservasi energi, 2018). Oleh karena itu, nilai IKE dari Permen ESDM Nomor 13 Tahun 2012 tidak tepat apabila disebut sebagai ketentuan yang masih berlaku saat ini.

Apabila nilai tersebut digunakan dalam penelitian ini, penggunaannya perlu dinyatakan secara eksplisit sebagai *benchmark* historis atau pembanding terhadap penelitian terdahulu, bukan sebagai ketentuan regulasi yang berlaku.

Untuk memperkuat evaluasi, hasil IKE penelitian dapat dibandingkan dengan standar atau pedoman bangunan yang relevan, *benchmark* bangunan dengan fungsi sejenis, data historis Gedung Administrasi, serta indikator kinerja energi yang

dibentuk berdasarkan kondisi operasional gedung. Dalam penelitian ini, nilai 222 kWh/m²/tahun digunakan sebagai benchmark historis/pembandingan yang terdapat pada dataset internal, dan bukan sebagai ketentuan regulasi yang berlaku saat ini.

g. Kelebihan dan Keterbatasan Penggunaan IKE

Kelebihan IKE adalah mudah dihitung, membutuhkan data relatif sederhana, serta memudahkan perbandingan konsumsi energi setelah dinormalisasi terhadap luas. Namun IKE juga memiliki keterbatasan karena tidak menunjukkan peralatan mana yang menyebabkan konsumsi energi tinggi dan tidak selalu memperhitungkan variasi jam operasi, jumlah pengguna, iklim, ataupun karakteristik aktivitas. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan IKE sebagai salah satu indikator awal yang dilanjutkan dengan analisis profil beban, jenis peralatan, kondisi operasi, dan PHE.

2.2.7 Parameter Kelistrikan

a. Tegangan

Tegangan listrik merupakan beda potensial listrik antara dua titik. Secara fundamental, tegangan menyatakan energi atau kerja per satuan muatan listrik dan dinyatakan dalam volt (V). Tegangan antara titik a dan b juga dapat dinyatakan sebagai selisih potensial kedua titik tersebut (Sadiku, 2009)

$$V = \frac{dw}{dq} \dots \dots \dots (2.8)$$

$$V_{ab} = V_a - V_b \dots \dots \dots (2.9)$$

v = tegangan sesaat (V)

w = energi atau kerja listrik (J)

q = muatan listrik (C)

V_{ab} = beda potensial antara titik a dan b (V)

b. Arus

Arus listrik merupakan laju aliran muatan listrik melalui suatu penghantar dan dinyatakan dalam ampere (A). Secara matematis, arus sesaat merupakan perubahan muatan terhadap waktu. Pada sistem tiga fasa, pengukuran arus pada masing-

masing fasa dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat pembebanan dan ketidakseimbangan antar fasa. Pada sistem tiga fasa, pengukuran arus pada setiap fasa dapat digunakan untuk mengidentifikasi keseimbangan pembebanan. (Sadiku, 2009).

$$i = \frac{dq}{dt} \dots\dots\dots(2.10)$$

i = arus listrik sesaat (A)

q = muatan listrik (C)

t = waktu (s)

c. Daya Aktif

Daya aktif (P) adalah komponen daya listrik yang secara rata-rata benar-benar dikonversi menjadi kerja, panas, cahaya, atau bentuk energi lain pada beban. Pada sistem AC sinusoidal, daya aktif dipengaruhi oleh nilai RMS tegangan dan arus serta beda sudut fasa antara keduanya. Daya aktif dinyatakan dalam watt (W) atau kilowatt (kW) (Sadiku, 2009)

Untuk sistem satu fasa sinusoidal:

$$P_{1\phi} = V I \cos \phi \dots\dots\dots(2.11)$$

Untuk sistem tiga fasa sinusoidal seimbang:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \phi \dots\dots\dots(2.12)$$

P = daya aktif (W atau kW)

V = tegangan RMS satu fasa (V)

I = arus RMS satu fasa (A)

V_L = tegangan antar saluran/line-to-line RMS (V)

I_L = arus saluran RMS (A)

ϕ = sudut fasa antara tegangan dan arus

Pada beban DC atau beban AC resistif ideal dengan faktor daya sama dengan 1 ($\cos \phi = 1$), Sehingga persamaan menyederhana menjadi $P = V.I$.

d. Daya Reaktif

Daya reaktif (Q) adalah komponen daya yang bersilasi antara sumber dan elemen reaktif pada beban, seperti induktor dan kapasitor. Daya reaktif tidak menghasilkan kerja bersih dalam satu siklus, tetapi diperlukan untuk pembentukan medan magnet atau medan listrik. Daya reaktif dinyatakan dalam volt-ampere reactive (var) atau kilovolt-ampere reactive (kvar) (Sadiku, 2009)

Untuk sistem satu fasa sinusoidal:

$$Q_{1\phi} = V I \sin \phi \dots \dots \dots (2.13)$$

Untuk sistem tiga fasa sinusoidal seimbang:

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \sin \phi \dots \dots \dots (2.14)$$

Q = daya reaktif (var atau kvar)

ϕ = sudut fasa antara tegangan dan arus

e. Daya Semu

Daya semu (S) merupakan hasil kali nilai RMS tegangan dan arus serta merepresentasikan kapasitas total yang harus disediakan oleh sumber dan jaringan untuk melayani beban. Daya semu dinyatakan dalam volt-ampere (VA) atau kilovolt-ampere (kVA). Pada kondisi sinusoidal, daya semu berhubungan dengan daya aktif dan daya reaktif melalui segitiga daya (Sadiku, 2009)

Untuk sistem satu fasa sinusoidal:

$$S_{1\phi} = V I \dots \dots \dots (2.15)$$

Untuk sistem tiga fasa sinusoidal seimbang:

$$S_{3\phi} = \sqrt{3} V_L I_L \dots \dots \dots (2.16)$$

Hubungan antara daya semu, daya aktif, dan daya reaktif pada kondisi sinusoidal adalah:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots \dots \dots (2.17)$$

S = daya semu (VA atau kVA)

P = daya aktif (W atau kW)

Q = daya reaktif (var atau kvar)

f. Faktor Daya

Faktor daya (*power factor*/PF) menunjukkan tingkat pemanfaatan daya semu menjadi daya aktif. Secara umum, faktor daya didefinisikan sebagai rasio antara daya aktif dan daya semu. Nilainya berada antara 0 dan 1 untuk kondisi konsumsi daya aktif yang umum. Pada sistem sinusoidal ideal, faktor daya sama dengan cosinus sudut fasa antara tegangan dan arus (Sadiku, 2009)

$$PF = \frac{P}{S} \dots \dots \dots (2.18)$$

$$PF = \cos \varphi \dots \dots \dots (2.19)$$

PF = faktor daya (tanpa satuan)

P = daya aktif (W)

S = daya semu (VA)

φ = sudut fasa antara tegangan dan arus

Faktor daya yang rendah menyebabkan arus yang diperlukan untuk menyalurkan daya aktif tertentu menjadi lebih besar. Kondisi ini dapat meningkatkan rugi-rugi I^2R , jatuh tegangan, dan kebutuhan kapasitas penghantar maupun peralatan distribusi, sehingga faktor daya merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi sistem kelistrikan (Sadiku, 2009)

g. Energi Listrik

Energi listrik merupakan akumulasi daya aktif yang digunakan selama suatu interval waktu. Secara umum, energi dihitung dengan mengintegrasikan daya aktif terhadap waktu. Dalam audit energi bangunan, energi listrik umumnya dinyatakan dalam *kilowatt-hour* (kWh) dan digunakan sebagai dasar perhitungan konsumsi energi serta Intensitas Konsumsi Energi (IKE) (Sadiku, 2009) (Nasional B. S., SNI 6196:2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung, 2011)

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \dots \dots \dots (2.20)$$

Apabila daya aktif dianggap konstan selama interval pengukuran, persamaan tersebut menjadi:

$$E = P \cdot \Delta t \dots \dots \dots (2.21)$$

E = energi listrik (Wh, kWh, atau J)

$P(t)$ = daya aktif sebagai fungsi waktu (W atau kW)

P = daya aktif konstan (W atau kW)

Δt = selang waktu penggunaan (h atau s)

t_1, t_2 = waktu awal dan waktu akhir pengamatan

Jika P dinyatakan dalam kW dan Δt dalam jam, maka energi E diperoleh langsung dalam kWh.

h. Hubungan Daya dan Energi

Daya menunjukkan laju penggunaan energi pada suatu waktu, sedangkan energi merupakan total penggunaan daya selama periode tertentu. Peralatan dengan daya besar tidak selalu menghasilkan konsumsi energi paling besar apabila hanya digunakan sebentar. Sebaliknya, peralatan dengan daya relatif rendah tetapi beroperasi selama 24 jam dapat memberikan kontribusi besar terhadap konsumsi energi tahunan.

i. Sistem Listrik Satu Fasa dan Tiga Fasa

Sistem satu fasa umumnya digunakan untuk beban berkapasitas relatif kecil seperti pencahayaan dan peralatan elektronik, sedangkan sistem tiga fasa banyak digunakan untuk distribusi tenaga dan peralatan berdaya besar seperti motor, pompa, dan sistem tata udara (Sadiku, 2009). Pada gedung berskala besar, distribusi utama umumnya menggunakan sistem tiga fasa, kemudian didistribusikan kembali ke berbagai kelompok beban sesuai kebutuhan.

2.2.8 Beban dan Peralatan Listrik Gedung

a. Sistem Tata Udara/HVAC

Sistem tata udara atau *Heating, Ventilation and Air Conditioning* (HVAC) berfungsi untuk mempertahankan kondisi temperatur, kelembapan, ventilasi, dan kualitas udara ruangan sesuai kebutuhan.

Sistem HVAC dapat terdiri atas *chiller*, AHU, *split air conditioner*, pompa, *cooling tower*, serta sistem ventilasi sesuai konfigurasi gedung. Konsumsi energi tata udara dipengaruhi oleh kapasitas dan efisiensi peralatan, temperatur

lingkungan, beban panas internal, jumlah penghuni, set point temperatur, jam operasi, serta kondisi pemeliharaan (Thumann, 2009). Di Indonesia, aspek konservasi energi pada sistem tata udara bangunan gedung diatur dalam SNI 6390:2020 yang masih berstatus berlaku (Nasional B. S., SNI 6390:2020 Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung, 2020).

b. Sistem Pencahayaan

Sistem pencahayaan menggunakan energi listrik untuk menghasilkan tingkat penerangan yang dibutuhkan pada suatu ruang. Konsumsi energi sistem pencahayaan dipengaruhi oleh daya lampu atau luminer, jumlah lampu yang digunakan, serta lama waktu pengoperasiannya.

Secara umum, energi listrik merupakan hasil perkalian antara daya dan waktu penggunaan. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai $E = P \times t$ (Sadiku, 2009). Untuk sistem pencahayaan yang terdiri atas beberapa kelompok lampu atau luminer, konsumsi energi pencahayaan dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{lighting} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i n_i t_i}{1000} \dots \dots \dots (2.22)$$

dengan:

$E_{lighting}$ = konsumsi energi pencahayaan (kWh)

P_i = daya input lampu/luminer kelompok ke- i (W)

n_i = jumlah lampu/luminer kelompok ke- i

t_i = lama waktu operasi kelompok ke- i (jam)

m = jumlah kelompok lampu/luminer yang dianalisis

Faktor 1/1000 digunakan untuk mengubah satuan *watt-hour* (Wh) menjadi *kilowatt-hour* (kWh). Hubungan dasar energi sebagai hasil perkalian daya dan waktu merupakan prinsip dasar perhitungan energi listrik.

SNI 6197:2020 tentang Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan dapat digunakan sebagai salah satu referensi teknis dalam mengevaluasi sistem pencahayaan gedung (Nasional B. S., SNI 6197:2020 Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan, 2020).

c. Pompa

Pompa berfungsi memindahkan fluida dengan memberikan energi kepada fluida sehingga dapat mengalir pada tekanan dan debit tertentu. Pada gedung, pompa dapat digunakan dalam sistem air bersih, drainase, tata udara, dan proteksi kebakaran. Konsumsi listrik pompa dipengaruhi oleh kapasitas, efisiensi motor dan pompa, debit, tekanan, jam operasi, serta metode pengendalian.

Pada sistem dengan kebutuhan aliran yang berubah, penggunaan *Variable Speed Drive* dapat menjadi salah satu alternatif untuk menyesuaikan kecepatan motor dengan kebutuhan aktual sehingga berpotensi mengurangi konsumsi energi (Thumann, 2009).

d. Sistem Komputerisasi

Sistem komputerisasi mencakup komputer, monitor, printer, server, perangkat komunikasi, perangkat jaringan, CCTV, dan berbagai sistem digital lainnya. Walaupun daya masing-masing peralatan relatif kecil dibandingkan HVAC atau sistem yang lainnya, jumlah peralatan yang banyak dan waktu operasi yang panjang dapat menghasilkan konsumsi energi yang signifikan. Server, sistem komunikasi, dan jaringan dapat beroperasi secara kontinu sehingga menjadi bagian dari *base load* suatu gedung.

e. Peralatan Listrik Lainnya

Peralatan lainnya dapat terdiri dari lift, dispenser, lemari pendingin, pemanas air, *charger*, *exhaust fan*, peralatan bengkel, ataupun peralatan khusus yang berkaitan dengan fungsi Gedung Administrasi.

Seluruh peralatan tersebut perlu dimasukkan dalam inventarisasi apabila konsumsi agregatnya berpotensi memberikan kontribusi terhadap total penggunaan energi.

f. Karakteristik Konsumsi Energi Masing-Masing Beban

Konsumsi energi pada suatu peralatan atau kelompok beban dipengaruhi oleh daya peralatan, tingkat pembebanan aktual, jumlah peralatan, serta lama waktu operasi. Apabila daya yang digunakan merupakan daya nominal peralatan,

konsumsi energi dapat diperkirakan dengan mempertimbangkan *load factor* sebagai berikut:

$$E_i = P_i \times LF_i \times t_i \dots \dots \dots (2.23)$$

dengan:

E_i = konsumsi energi peralatan ke- i (kWh)

P_i = daya nominal peralatan ke- i (kW)

LF_i = load factor peralatan ke- i

t_i = waktu operasi peralatan ke- i (jam)

Load factor menunjukkan rasio antara daya rata-rata aktual terhadap daya nominal atau daya maksimum peralatan dan dapat dinyatakan sebagai:

$$LF_i = \frac{P_{avg.i}}{P_{rated.i}} \dots \dots \dots (2.24)$$

Apabila nilai daya masih dinyatakan dalam watt (W), maka persamaan konsumsi energi menjadi:

$$E_i = \frac{P_i \times LF_i \times t_i}{1000} \dots \dots \dots (2.25)$$

Sehingga hasil perhitungan diperoleh dalam kWh.

Untuk kelompok beban yang terdiri atas beberapa peralatan dengan karakteristik yang sama, seperti lampu, komputer, pompa, atau unit AC, persamaan dapat dikembangkan menjadi:

$$E_i = P_i \times n_i \times LF_i \times t_i \dots \dots \dots (2.26)$$

dengan n_i merupakan jumlah peralatan pada kelompok beban ke- i .

Apabila terdapat beberapa jenis peralatan dalam satu kelompok beban, konsumsi energi kelompok tersebut dapat dihitung menggunakan:

$$E_{group} = \sum_{i=1}^m P_i n_i L F_i t_i \dots \dots \dots (2.27)$$

dengan ***m*** merupakan jumlah jenis peralatan dalam kelompok yang dianalisis.

Selanjutnya, kontribusi konsumsi energi setiap kelompok beban terhadap total konsumsi energi dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Kontribusi_i = \frac{E_i}{E_{total}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.28)$$

atau apabila total energi merupakan penjumlahan seluruh kelompok beban:

$$Kontribusi_i = \frac{E_i}{\sum_{j=1}^m E_j} \times 100\% \dots \dots \dots (2.29)$$

dengan:

E_i = konsumsi energi kelompok beban ke-***i***

E_{total} = total konsumsi energi seluruh kelompok beban

Analisis kontribusi konsumsi energi digunakan untuk mengidentifikasi kelompok beban yang memberikan pengaruh terbesar terhadap konsumsi energi fasilitas. Kelompok beban dengan konsumsi yang signifikan dapat menjadi dasar dalam menentukan *Significant Energy Use* (SEU) dan selanjutnya menjadi prioritas dalam audit energi rinci serta identifikasi Peluang Penghematan Energi (PHE).

g. Faktor yang Memengaruhi Konsumsi Energi Peralatan

Konsumsi energi peralatan dipengaruhi oleh kapasitas terpasang, efisiensi, usia peralatan, jam operasi, faktor beban, metode pengendalian, tingkat pemeliharaan, dan perilaku pengguna (Thumann, 2009). Dengan demikian, penggantian peralatan bukan satu-satunya cara untuk melakukan penghematan.

Tetapi dengan cara optimalisasi pengoperasian dan pemeliharaan dapat menghasilkan penghematan tanpa membutuhkan investasi besar.

2.2.9 Peluang Penghematan Energi (PHE)

a. Pengertian Peluang Penghematan Energi

Peluang Penghematan Energi merupakan tindakan yang berpotensi mengurangi konsumsi energi dengan tetap mempertahankan fungsi, keselamatan, keandalan, dan tingkat pelayanan yang dibutuhkan.

Sedangkan audit energi bertujuan tidak hanya untuk mengetahui tingkat konsumsi energi tetapi juga mengidentifikasi tindakan konservasi yang dapat diterapkan secara teknis dan ekonomis (Thumann, 2009)

b. Tujuan Identifikasi PHE

Identifikasi PHE bertujuan untuk mengetahui sumber inefisiensi, memperkirakan energi yang dapat dihemat, serta menentukan tindakan yang layak diterapkan. Suatu rekomendasi PHE yang ideal adalah memenuhi tiga aspek utama, yaitu layak secara teknis, dapat diterapkan secara operasional, dan memberikan manfaat ekonomi.

c. Metode Identifikasi PHE

PHE dapat diidentifikasi melalui beberapa analisis seperti analisis profil konsumsi, observasi lapangan, pengukuran, evaluasi jam operasi, *benchmarking*, pemeriksaan spesifikasi peralatan, serta perbandingan antara kondisi aktual dengan standar teknis. Pendekatan audit energi yang sistematis membantu auditor menelusuri pengguna energi signifikan dan menentukan tindakan yang mempunyai potensi penghematan terbesar (Thumann, 2009)

d. PHE pada Sistem Tata Udara

PHE tata udara antara lain dapat dilakukan melalui optimalisasi pada *set point* temperatur, penyesuaian jadwal operasional, pembersihan *filter* dan *coil*, pemeliharaan sistem, optimalisasi kapasitas, maupun penggantian peralatan dengan teknologi yang lebih efisien (Thumann, 2009). Namun, penerapannya perlu

mempertimbangkan kebutuhan atas ruangan, kenyamanan para pengguna, dan persyaratan temperatur untuk peralatan tertentu seperti pada ruang server.

e. PHE pada Sistem Pencahayaan

Penghematan pada sistem pencahayaan dapat dilakukan melalui penggantian lampu dengan teknologi yang lebih efisien seperti penggantian dari lampu bohlam ke lampu LED, pengurangan *over-lighting* pada ruang kerja atau area tertentu, pemanfaatan pencahayaan alami, pembagian zona, penggunaan sensor okupansi, dan penggunaan sistem kontrol otomatis.

f. PHE pada Sistem Pompa

PHE pada sistem pompa dapat dilakukan melalui optimalisasi jadwal operasional, pengaturan debit air, penyesuaian kapasitas, serta peningkatan pemeliharaan. Namun pompa yang berkaitan dengan keselamatan seperti pompa kebakaran harus tetap memenuhi persyaratan keselamatan dan tidak dapat dioptimalkan hanya berdasarkan pertimbangan konsumsi energi.

g. PHE pada Sistem Komputerisasi dan Peralatan Listrik

Pada komputer dan peralatan kantor, PHE dapat dilakukan melalui penggunaan mode *sleep*, pengaturan *automatic shutdown*, penggunaan peralatan hemat energi, dan pengurangan *standby power*. Pada peralatan yang harus beroperasi secara kontinu, tindakan penghematan lebih diarahkan kepada peningkatan efisiensi perangkat atau optimasi sistem dibandingkan mematikan peralatan.

h. Prioritas Penerapan PHE

PHE dapat diklasifikasikan berdasarkan kebutuhan investasi menjadi:

- *no-cost/low-cost measure*, seperti pengaturan jadwal dan set point;
- *medium-cost measure*, seperti pemasangan sensor, submeter; dan
- *high-investment measure*, seperti penggantian sistem HVAC atau peralatan utama.

Prioritas tidak hanya ditentukan berdasarkan biaya, tetapi juga mempertimbangkan besarnya penghematan, keselamatan, keandalan, kemudahan implementasi, usia aset, dan *payback period* (Thumann, 2009)

2.2.10 Strategi Peningkatan Efisiensi Energi

a. Optimalisasi Operasi Peralatan

Optimalisasi operasional dilakukan dengan memastikan bahwa peralatan digunakan sesuai kebutuhan aktual, kapasitas, dan kondisi desain yang telah ditetapkan. Tindakan dapat berupa pengaturan *set point*, penyesuaian jumlah unit yang beroperasi, serta eliminasi operasi peralatan yang tidak memberikan manfaat.

b. Pengaturan Waktu Operasi

Pengaturan waktu operasional merupakan salah satu strategi yang relatif sederhana namun dapat menghasilkan penghematan, seperti jika mematikan peralatan ketika fasilitas tidak digunakan, selain itu pengaturan waktu operasional adalah hal yang bersifat administratif sehingga tidak membutuhkan *cost* yang besar. Pengaturan dapat dilakukan melalui penerapan *Standar Operation Procedure* (SOP) waktu operasional, SOP penghematan energi listrik, penggunaan *timer*, pengaturan jadwal operasi, maupun sistem otomatisasi.

c. Penggantian Peralatan dengan Teknologi Hemat Energi

Penggantian peralatan dapat dilakukan apabila peralatan eksisting mempunyai tingkat efisiensi yang telah rendah, usia pemakaian yang cukup tinggi, atau biaya pemeliharaan yang sudah tidak ekonomis. Keputusan investasi sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan harga awal, tetapi juga penghematan energi, umur peralatan, biaya pemeliharaan, serta biaya siklus hidup (Thumann, 2009)

d. Sistem Kontrol dan Otomatisasi

Sistem kontrol seperti pada penerapan *Building Management System* (BMS), sensor okupansi, sensor pencahayaan, *timer*, *smart meter*, dapat memungkinkan peralatan beroperasi berdasarkan kebutuhan aktual.

e. Pemeliharaan Peralatan

Pemeliharaan peralatan berpengaruh terhadap kinerja energi yang dihasilkan oleh peralatan. Seperti kondisi filter AC yang kotor, kondisi *coil* yang sudah tidak bersih, *bearing* motor yang bermasalah, ataupun sistem pompa yang tidak optimal dapat meningkatkan konsumsi energi. Oleh karena itu, perawatan berkala pada sistem yang ada dapat memberikan manfaat baik dari sisi efisiensi maupun keandalan sistem.

f. Monitoring dan Evaluasi Konsumsi Energi

Monitoring diperlukan untuk memastikan bahwa tindakan penghematan benar-benar menghasilkan peningkatan kinerja energi. Parameter yang dapat dimonitor meliputi total penggunaan kWh, IKE, *base load*, *peak load*, konsumsi kelompok beban, dan penghematan terhadap *baseline*.

ISO 50006:2023 memberikan panduan mengenai pembentukan dan penggunaan EnPI serta *Energy Baseline* untuk mengevaluasi dan memonitor kinerja energi organisasi (ISO, 2023).

g. Manajemen Energi

Manajemen energi merupakan pendekatan terstruktur untuk meningkatkan kinerja energi secara berkelanjutan. Dan ISO 50001:2018 memberikan kerangka untuk membangun, menerapkan, memelihara, dan meningkatkan sistem manajemen energi melalui pendekatan *Plan-Do-Check-Act* ((ISO), 2018). Dengan pendekatan tersebut, pengelolaan energi tidak hanya dilakukan melalui kegiatan audit satu kali, tetapi menjadi suatu proses berkelanjutan yang mencakup penetapan komitmen, penetapan peraturan, penetapan *baseline*, indikator, target, sumber daya, implementasi tindakan, monitoring, dan evaluasi.

2.2.11 Analisis Potensi Penghematan Energi dan Biaya

Analisis potensi penghematan energi dilakukan untuk mengubah hasil identifikasi Peluang Penghematan Energi (PHE) menjadi besaran yang dapat dievaluasi secara teknis dan ekonomis. Analisis mencakup energi yang dapat dihemat, persentase penghematan, nilai penghematan biaya, kebutuhan investasi, *Simple Payback Period* (SPP), serta penentuan prioritas rekomendasi. Dalam audit

energi, analisis ekonomi digunakan untuk membantu memilih tindakan konservasi energi yang layak diterapkan dengan tetap mempertimbangkan aspek teknis dan operasional

a. Perhitungan Energi yang Dapat Dihemat

Besarnya energi yang dapat dihemat dihitung dari selisih antara konsumsi energi pada kondisi eksisting (*existing condition*) dan konsumsi energi setelah tindakan PHE diterapkan (*proposed condition*). Secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$E_{saving} = E_{existing} - E_{proposed} \dots\dots\dots(2.30)$$

dengan:

E_{saving} = energi yang dapat dihemat (kWh/tahun);

$E_{existing}$ = konsumsi energi pada kondisi eksisting atau kondisi dasar (kWh/tahun);

$E_{proposed}$ = estimasi konsumsi energi setelah tindakan PHE diterapkan (kWh/tahun).

Nilai E_{saving} bernilai positif apabila konsumsi energi pada kondisi usulan lebih rendah daripada kondisi eksisting. Perhitungan ini merupakan bentuk dasar evaluasi manfaat energi dari suatu tindakan konservasi. Dalam penerapannya, periode waktu, batas sistem, dan kondisi operasi yang dibandingkan harus dibuat konsisten agar hasil penghematan tidak bias. Pendekatan perbandingan antara kondisi eksisting dan kondisi usulan merupakan bagian umum dalam analisis proyek efisiensi energi (Thumann, 2009)

b. Persentase Penghematan Energi

Persentase penghematan digunakan untuk menunjukkan besarnya energi yang dapat dikurangi relatif terhadap konsumsi energi kondisi awal. Persamaannya adalah:

$$Saving (\%) = \frac{E_{saving}}{E_{existing}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.31)$$

Dengan mensubstitusikan $E_{saving} = E_{existing} - E_{proposed}$, persamaan tersebut juga dapat ditulis sebagai:

$$Saving (\%) = \frac{E_{existing} - E_{proposed}}{E_{existing}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.32)$$

dengan:

$Saving (\%)$ = persentase penghematan energi (%);

E_{saving} = energi yang dapat dihemat (kWh/tahun);

$E_{existing}$ = konsumsi energi pada kondisi eksisting (kWh/tahun);

$E_{proposed}$ = konsumsi energi setelah tindakan PHE (kWh/tahun).

Nilai tersebut menunjukkan proporsi konsumsi energi kondisi awal yang secara teoritis dapat dikurangi melalui penerapan PHE. Persentase ini memudahkan perbandingan antar-alternatif PHE meskipun besaran konsumsi energinya berbeda (Thumann, 2009)

c. Penghematan Biaya

Apabila tarif energi listrik dinyatakan dalam Rp/kWh dan dianggap tetap untuk energi yang dihemat, potensi penghematan biaya tahunan dapat dihitung dengan mengalikan energi yang dihemat dengan tarif listrik:

$$Cost Saving = E_{saving} \times T_{electricity} \dots \dots \dots (2.33)$$

dengan:

$Cost Saving$ = penghematan biaya energi (Rp/tahun);

E_{saving} = energi listrik yang dapat dihemat (kWh/tahun);

$T_{electricity}$ = tarif energi listrik yang digunakan dalam analisis (Rp/kWh).

Persamaan tersebut merupakan pendekatan sederhana yang sesuai apabila komponen biaya utama berubah secara proporsional terhadap penggunaan energi. Apabila tagihan listrik memiliki struktur yang lebih kompleks, misalnya biaya beban atau *demand charge*, tarif waktu pemakaian, penalti faktor daya, atau

komponen biaya lainnya, maka perhitungan penghematan harus disesuaikan dengan struktur tagihan aktual. Analisis biaya energi dan pemahaman terhadap tagihan utilitas merupakan bagian penting dalam audit energi (Thumann, 2009).

d. Estimasi Investasi

Biaya investasi suatu rekomendasi dapat meliputi pembelian peralatan, biaya pemasangan, pekerjaan modifikasi, pekerjaan *commissioning*, biaya pelatihan, dan biaya lain yang diperlukan. Estimasi investasi diperhitungkan bersamaan dengan penghematan biaya untuk mengevaluasi kelayakan ekonomis suatu rekomendasi.

e. Simple Payback Period

Simple Payback Period (SPP) menunjukkan waktu yang dibutuhkan agar investasi awal dapat diperoleh kembali melalui penghematan bersih tahunan yang dihasilkan oleh suatu proyek. SPP dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$SPP = \frac{I_0}{S_{annual}} \dots \dots \dots (2.34)$$

dengan:

SPP = *Simple Payback Period* (tahun);

I_0 = investasi awal (Rp);

S_{annual} = penghematan biaya bersih tahunan (Rp/tahun).

Apabila tidak terdapat perubahan biaya operasi dan pemeliharaan yang material, S_{annual} dapat menggunakan nilai *Cost Saving* tahunan. Sebagai contoh, apabila suatu rekomendasi membutuhkan investasi awal sebesar Rp120.000.000 dan menghasilkan penghematan bersih sebesar Rp60.000.000 per tahun, maka:

$$SPP = \frac{Rp120.000.000}{Rp60.000.000/tahun} = 2 \text{ tahun}$$

Metode SPP banyak digunakan karena sederhana dan mudah dipahami. Namun, SPP tidak memperhitungkan nilai waktu uang dan tidak memasukkan seluruh manfaat atau biaya yang terjadi setelah periode pengembalian tercapai. Oleh karena itu, untuk keputusan investasi yang lebih komprehensif, SPP dapat dilengkapi dengan metode seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), atau *Life Cycle Cost Analysis* (LCCA) (Thumann, 2009).

f. Penentuan Prioritas Rekomendasi

Penentuan prioritas PHE tidak sebaiknya hanya didasarkan pada nilai SPP. Rekomendasi perlu dievaluasi secara multi-kriteria dengan mempertimbangkan besarnya penghematan energi, kebutuhan investasi, periode pengembalian, keselamatan, keandalan, kemudahan implementasi, serta dampaknya terhadap operasional fasilitas.

Hubungan tersebut dapat ditulis secara konseptual sebagai:

$$Priority_i = f(E_{saving,i}, I_i, SPP_i, Safety_i, Reliability_i, Implementation_i) \dots (2.35)$$

dengan:

$Priority_i$ = tingkat prioritas rekomendasi ke- i ;

$E_{saving,i}$ = potensi penghematan energi rekomendasi ke- i ;

I_i = kebutuhan investasi rekomendasi ke- i ;

SPP_i = periode pengembalian rekomendasi ke- i ;

$Safety_i$ = pertimbangan keselamatan;

$Reliability_i$ = dampak terhadap keandalan sistem;

$Implementation_i$ = kemudahan atau kompleksitas implementasi.

Pendekatan tersebut sangat penting pada fasilitas MRT karena rekomendasi penghematan tidak boleh menurunkan keandalan maupun keselamatan operasional.

2.3 Regulasi dan Standar

Regulasi dan standar digunakan sebagai acuan dalam melakukan evaluasi kinerja energi serta memastikan pelaksanaan audit energi dilakukan secara sistematis dan sesuai dengan ketentuan yang berlaku. Dalam penelitian ini, acuan yang digunakan mencakup ketentuan pemerintah Republik Indonesia mengenai konservasi energi, serta beberapa standar nasional dan internasional yang berkaitan dengan audit energi, manajemen energi, sistem tata udara, pencahayaan, dan indikator kinerja energi.

Standar seperti SNI 6196:2011, SNI 6197:2020, SNI 6390:2020, ISO 50001:2018, serta standar terkait audit dan evaluasi kinerja energi digunakan

sebagai dasar dalam melakukan *re-assessment* terhadap kondisi aktual Gedung Administrasi PT MRT Jakarta (Persero). Acuan tersebut digunakan untuk membandingkan hasil pengukuran dan perhitungan dengan persyaratan atau *benchmark* yang relevan, sehingga dapat menjadi dasar dalam menentukan Peluang Penghematan Energi (PHE) dan rekomendasi peningkatan efisiensi energi.

2.3.1 Kebijakan Konservasi Energi di Indonesia

Kebijakan konservasi energi di Indonesia saat ini salah satunya didasarkan pada Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2023 tentang Konservasi Energi. Peraturan tersebut menggantikan PP Nomor 70 Tahun 2009 serta mengatur pelaksanaan konservasi energi, kemudahan, insentif dan disinsentif, data dan informasi, pembinaan, serta pengawasan

Sebagai peraturan pelaksana, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral kemudian menerbitkan Permen ESDM Nomor 8 Tahun 2025 tentang Manajemen Energi. Peraturan tersebut mengatur pelaksanaan manajemen energi melalui penunjukan manajer energi, penyusunan program efisiensi energi, pelaksanaan audit energi secara berkala, dan pelaksanaan rekomendasi audit energi

Kebijakan tersebut menunjukkan bahwa konservasi energi tidak hanya merupakan tindakan teknis, tetapi mencakup penerapan sistem pengelolaan energi secara terstruktur dan berkelanjutan.

2.3.2 Peraturan Pemerintah Nomor 33 Tahun 2023

PP Nomor 33 Tahun 2023 mendefinisikan konservasi energi sebagai upaya sistematis, terencana, dan terpadu untuk melestarikan sumber daya energi dalam negeri serta meningkatkan efisiensi pemanfaatannya. Peraturan tersebut mengatur pelaksanaan konservasi energi baik pada sisi penyediaan maupun pemanfaatan energi. Manajemen energi merupakan salah satu pendekatan yang digunakan dalam pelaksanaan konservasi.

Ketentuan lebih lanjut melalui Peraturan Menteri (Permen) ESDM Nomor 8 Tahun 2025 menetapkan bahwa manajemen energi dilaksanakan antara lain melalui penunjukan Manajer Energi, penyusunan program efisiensi energi, pelaksanaan audit energi secara berkala, dan pelaksanaan rekomendasi hasil audit (Indonesia, Peraturan Menteri ESDM No 8 Tahun 2025 Tentang Manajemen Energi, 2025)

Peraturan Menteri (Permen) tersebut menetapkan kewajiban manajemen energi bagi pengguna energi sektor transportasi yang menggunakan energi sebesar atau lebih dari 4.000 setara ton minyak per tahun, sedangkan untuk sektor bangunan gedung ambangnya sebesar atau lebih dari 500 setara ton minyak per tahun (Indonesia, Peraturan Menteri ESDM No 8 Tahun 2025 Tentang Manajemen Energi, 2025).

Dalam penelitian ini, ketentuan tersebut digunakan sebagai bagian dari konteks kebijakan konservasi energi. Terlepas dari terpenuhi atau tidaknya ambang kewajiban pada satu Gedung Administrasi, audit energi tetap dapat digunakan sebagai instrumen peningkatan efisiensi dan pengendalian biaya energi.

2.3.3 Standar Nasional Terkait Efisiensi Energi Bangunan

Indonesia memiliki sejumlah Standar Nasional Indonesia yang berkaitan dengan efisiensi energi pada bangunan. Standar tersebut dapat digunakan sebagai referensi teknis dalam mengevaluasi sistem bangunan.

Beberapa standar yang relevan adalah:

- SNI 6197:2020 tentang Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan; dan
- SNI 6390:2020 tentang Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung

Ketiga standar tersebut masih tercatat berstatus berlaku pada katalog BSN. Dalam penelitian Gedung Administrasi, standar pencahayaan dan tata udara menjadi relevan apabila kedua sistem tersebut termasuk kelompok pengguna energi signifikan.

2.3.4 Standar Nasional Indonesia (SNI) yang Berkaitan dengan Audit Energi

SNI 6196:2011 tentang Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung merupakan salah satu standar nasional yang secara khusus memberikan acuan mengenai audit energi bangunan dan masih tercatat berstatus berlaku. Perkembangan terbaru standar audit energi ditandai dengan penetapan:

- SNI ISO 50002-1:2025 – Audit Energi—Bagian 1: Persyaratan Umum dengan Pedoman Penggunaan (Nasional B. S., SNI ISO 50002-1:2025 Audit Energi – Bagian 1: Persyaratan Umum dengan Pedoman Penggunaan, 2025), dan
- SNI ISO 50002-2:2025 – Audit Energi—Bagian 2: Pedoman Pelaksanaan Audit Energi pada Bangunan Menggunakan ISO 50002-1 (Nasional B. S., SNI ISO 50002-2:2025 Audit Energi – Bagian 2: Pedoman Pelaksanaan Audit Energi pada Bangunan Menggunakan ISO 50002-1, 2025)

Kedua standar tersebut tercatat berstatus berlaku dan secara spesifik menyediakan kerangka audit energi yang lebih mutakhir. Selain itu, evaluasi sistem teknis dapat menggunakan SNI 6197:2020 untuk pencahayaan dan SNI 6390:2020 untuk tata udara ((Nasional B. S., SNI 6390:2020 Konservasi Energi Sistem Tata Udara Bangunan Gedung, 2020). Untuk sistem manajemen dan pengukuran kinerja energi, penelitian juga dapat merujuk SNI ISO 50001:2018 dan SNI ISO 50006:2023 ((ISO), 2018). Dengan demikian, standar yang digunakan dalam penelitian dapat dipetakan sebagai berikut:

- Audit energi: SNI 6196:2011 dan SNI ISO 50002-1/2:2025
- Pencahayaan: SNI 6197:2020
- Tata udara: SNI 6390:2020
- Manajemen energi: SNI ISO 50001:2018
- EnPI dan baseline: SNI ISO 50006:2023.

2.3.5 ISO 50001:2018 tentang Sistem Manajemen Energi

ISO 50001 merupakan standar internasional yang menyediakan kerangka bagi organisasi dalam membangun, menerapkan, memelihara, dan meningkatkan Sistem Manajemen Energi atau *Energy Management System* (EnMS). Tujuan sistem tersebut adalah meningkatkan kinerja energi yang meliputi efisiensi energi, penggunaan energi, dan konsumsi energi melalui pendekatan sistematis dan perbaikan berkelanjutan ((ISO), 2018)

Indonesia telah mengadopsi standar tersebut menjadi SNI ISO 50001:2018 – Sistem Manajemen Energi – Persyaratan dengan Pedoman Penggunaan yang masih tercatat berstatus berlaku ((ISO), 2018)

ISO 50001:2018 menggunakan pendekatan *Plan–Do–Check–Act* untuk mendukung perbaikan berkelanjutan. Organisasi diharapkan mengidentifikasi penggunaan energi, menentukan indikator dan baseline, menetapkan sasaran, menerapkan tindakan peningkatan, serta memonitor hasilnya ((ISO), 2018)

2.3.6 Energy Performance

Energy performance atau kinerja energi merupakan hasil terukur yang berkaitan dengan efisiensi, penggunaan, dan konsumsi energi. Dalam penelitian ini, kinerja energi dapat direpresentasikan antara lain dengan IKE, konsumsi energi tahunan, profil beban, ataupun konsumsi kelompok peralatan.

2.3.7 Energy Baseline

Energy Baseline (EnB) merupakan acuan kuantitatif yang digunakan sebagai dasar dalam membandingkan perubahan kinerja energi. ISO 50006:2023 memberikan panduan mengenai penetapan, penggunaan, dan pemeliharaan *Energy Baseline* serta EnPI untuk mengevaluasi perubahan kinerja energi (Nasional B. S., SNI ISO 50006:2023 Sistem Manajemen Energi – Evaluasi Kinerja Energi Menggunakan Indikator Kinerja Energi dan Baseline Energi, 2024)

Dalam penelitian Gedung Administrasi, konsumsi energi pada periode tertentu dapat digunakan sebagai baseline apabila periode tersebut dianggap representatif terhadap kondisi operasional normal.

2.3.8 Energy Performance Indicator

Energy Performance Indicator (EnPI) merupakan ukuran kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja energi. ISO 50006:2023 memberikan panduan mengenai penetapan dan penggunaan EnPI serta *Energy Baseline* (EnB) untuk mengevaluasi perubahan dan peningkatan kinerja energi (Nasional B. S., SNI ISO 50006:2023 Sistem Manajemen Energi – Evaluasi Kinerja Energi Menggunakan Indikator Kinerja Energi dan Baseline Energi, 2024)

Dalam penelitian ini, Intensitas Konsumsi Energi (IKE) digunakan sebagai EnPI utama karena menghubungkan konsumsi energi listrik tahunan dengan luas bangunan. Indikator ini konsisten dengan data yang digunakan pada BAB III dan menjadi dasar evaluasi hasil pada BAB IV.

$$\text{EnPI} = \text{IKE} = E / A \dots\dots\dots(2.36)$$

dengan:

EnPI / IKE = indikator kinerja energi berbasis luas (kWh/m²/tahun);

E = konsumsi energi listrik selama satu tahun (kWh/tahun);

A = luas bangunan yang dianalisis (m²).

2.3.9 Monitoring dan Evaluasi Energi

Monitoring dan evaluasi merupakan bagian penting dalam sistem manajemen energi karena tindakan peningkatan kinerja perlu diverifikasi berdasarkan hasil pengukuran. ISO 50006:2023 secara khusus memberikan panduan untuk menetapkan dan memelihara EnPI dan EnB serta menggunakannya dalam mengevaluasi peningkatan kinerja energi (Nasional B. S., SNI ISO 50006:2023 Sistem Manajemen Energi – Evaluasi Kinerja Energi Menggunakan Indikator Kinerja Energi dan Baseline Energi, 2024).

Dengan demikian, audit energi pada Gedung Administrasi dapat diposisikan tidak hanya sebagai kegiatan evaluasi sesaat, tetapi sebagai bagian awal dari proses pengelolaan energi yang berkelanjutan.