



POTENSI PENGEMBANGAN PERHITUNGAN IKE MODEL HIBRIDA PADA BANGUNAN GEDUNG PERKANTORAN DENGAN PENDEKATAN MULTITEORI: STUDI KASUS GEDUNG MENTERI DAN GEDUNG SUMBER DAYA AIR KEMENTERIAN PEKERJAAN UMUM

Diana Kusumastuti¹, Erni Setyowati², Suzanna Ratih Sari², Agung Dwiyanto²

1) Program Doktor Ilmu Arsitektur dan Perkotaan, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

2) Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

E-mail: dianakusumastuti@students.undip.ac.id, Penulis2@institusi.org

Informasi Naskah:

Diterima:
15 Maret 2025

Direvisi:
7 April 2025

Disetujui terbit:
2 Juni 2025

Diterbitkan:
Cetak:
29 Juni 2025

Online
29 Juni 2025

Abstract: Energy Consumption Index (IKE) is a key indicator in evaluating the energy efficiency of buildings. However, current IKE calculation methods, such as software-based simulations, are often complex, require technical expertise, and large resources, making them impractical. This study explores the potential of a hybrid model in calculating IKE by integrating six theoretical approaches to simplify the process without compromising accuracy. Case studies were conducted at the Ministry of Public Works Building and the Directorate General of Water Resources Building, focusing on benchmarking analysis of HVAC systems, lighting, and energy consumption patterns. The results show that with a multi-theoretical approach and the availability of field data, a hybrid model has the potential to be developed and applied to simplify IKE calculations, especially in the early design and energy performance evaluation stages, although there are challenges in maintaining accuracy and increasing the accessibility of the method for non-technical users. The case study shows a difference in IKE of up to 40% between the Directorate General of Water Resources Building and the Minister of Public Works Building, influenced by factors such as air conditioning systems, lighting, and elevator usage. A hybrid model based on empirical data considering the specific characteristics of each building can be an effective solution to bridge the gap between the complexity and ease of IKE calculation. Further studies are needed to integrate operational data from more buildings and optimize software-based simulations.

Keyword: energy use intensity, office buildings, energy efficiency

Abstrak: Indeks Konsumsi Energi (IKE) adalah indikator utama dalam mengevaluasi efisiensi energi bangunan gedung. Namun, metode perhitungan IKE saat ini, seperti simulasi berbasis perangkat lunak, sering kali kompleks, memerlukan keahlian teknis, serta sumber daya yang besar, sehingga kurang praktis. Penelitian ini mengeksplorasi potensi model hibrida dalam perhitungan IKE dengan mengintegrasikan enam pendekatan teoritis guna menyederhanakan proses tanpa mengurangi akurasi. Studi kasus dilakukan pada Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA dengan fokus pada analisis benchmarking sistem HVAC, pencahayaan, dan pola konsumsi energi. Hasil menunjukkan bahwa dengan pendekatan multiteori dan ketersediaan data lapangan, model hibrida berpotensi untuk dikembangkan dan diterapkan untuk menyederhanakan perhitungan IKE, terutama pada tahap desain awal dan evaluasi kinerja energi, meskipun terdapat tantangan dalam menjaga akurasi dan meningkatkan aksesibilitas metode bagi pengguna non-teknis. Studi kasus menunjukkan perbedaan IKE hingga 40% antara Gedung Ditjen SDA dan Gedung Menteri PU, dipengaruhi oleh faktor seperti sistem tata udara, pencahayaan, dan penggunaan lift. Model hibrida berbasis data empiris dengan mempertimbangkan karakteristik spesifik masing-masing gedung dapat menjadi solusi efektif untuk menjembatani kesenjangan antara kompleksitas dan kemudahan perhitungan IKE. Studi lanjutan diperlukan untuk mengintegrasikan data operasional dari lebih banyak bangunan serta mengoptimalkan simulasi berbasis perangkat lunak.

Kata Kunci: energy use intensity, office buildings, energy efficiency

PENDAHULUAN

Komitmen aktif Indonesia terhadap konservasi energi diakui luas melalui penerbitan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 yang menargetkan penurunan intensitas energi sebesar 1% setiap tahun

(Kementerian ESDM, 2014), bahkan sebelum penandatanganan Perjanjian Paris pada 2016. Sebagai bagian dari Enhanced Nationally Determined Contributions (ENDC), Indonesia menargetkan pengurangan emisi karbon hingga 41%

pada 2030 dan mencapai *net zero emissions* pada 2060 (Puteri, 2024). Sub-sektor bangunan gedung memiliki peran penting dalam mencapai target ini melalui penerapan manajemen energi pada bangunan gedung eksisting maupun konstruksi baru (Ahn et al., 2019; Purnami et al., 2022).

Indeks Konsumsi Energi (IKE), yang menunjukkan konsumsi energi tahunan per satuan luas lantai, menjadi indikator utama dalam desain sistem pengondisian udara (HVAC) bangunan gedung perkantoran sekaligus kinerja Bangunan Gedung Hijau (Dinas P2B Jakarta, 2012). Namun, adopsi IKE di Indonesia menghadapi berbagai tantangan. Nilai IKE yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) belum ditetapkan dalam peraturan sebagai dasar hukum yang kuat untuk implementasi nasional. Para insinyur dan arsitek sering mengandalkan alat simulasi kompleks seperti EnergyPlus atau eQUEST, yang memerlukan keahlian teknis tinggi (Zhao & Magoulès, 2012). Namun, alat ini kerap bergantung pada asumsi variabel seperti sistem HVAC, pola okupansi, dan spesifikasi pencahayaan, yang sering kali belum diputuskan pada tahap desain. Ketergantungan ini menyebabkan perbedaan antara prediksi dan kinerja energi aktual, sehingga diperlukan kalibrasi untuk menyelaraskan estimasi dengan data operasional nyata (Serag et al., 2024).

METODE PERHITUNGAN INDEKS KONSUMSI ENERGI (IKE): KONDISI DAN TANTANGAN PENERAPAN

Metode Perhitungan IKE Saat Ini

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan Chung (2011), perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE) dapat dilakukan menggunakan tiga metode utama, yaitu (a) estimasi berbasis acuan (*benchmarking*), (b) model sederhana berbasis lembar kerja (*spreadsheet*), dan (c) simulasi mendetail menggunakan perangkat lunak khusus.

1. *Benchmarking* menggunakan data historis atau rata-rata industri untuk memberikan estimasi awal konsumsi energi. Metode ini cepat dan sederhana, namun kurang akurat dalam menyesuaikan variabel desain bangunan tertentu.
2. Model *spreadsheet* menawarkan fleksibilitas lebih besar dengan tampilan yang ramah pengguna. Cocok untuk tahap desain menengah seperti *detailed engineering design* (DED), metode ini memerlukan input lebih rinci dan dapat digunakan dalam pengujian iteratif guna menyempurnakan rencana bangunan secara bertahap.
3. Simulasi mendetail dengan perangkat lunak seperti EnergyPlus atau eQUEST memberikan hasil paling akurat dengan mempertimbangkan berbagai parameter operasional dan desain. Metode ini ideal untuk analisis mendalam, tetapi membutuhkan sumber daya besar, waktu pemrosesan yang lebih lama, serta keahlian teknis tinggi (Garg et al., 2010; Pukhkal, 2021; Yang et al., 2015).

Pemilihan metode perhitungan IKE harus mempertimbangkan kebutuhan proyek, tahap desain,

ketersediaan sumber daya, dan tingkat akurasi yang diinginkan. Estimasi berbasis acuan cocok untuk tahap awal desain, model sederhana ideal untuk penyempurnaan iteratif, dan simulasi mendetail memberikan hasil paling akurat untuk analisis komprehensif pada tahap lanjutan.

Tantangan dan Pentingnya Pengembangan Model IKE yang Sederhana

Penerapan Indeks Konsumsi Energi (IKE) sebagai metrik kinerja bangunan gedung menghadapi sejumlah kendala. Keterbatasan data, kompleksitas metode, dan faktor operasional yang sulit diprediksi menjadi hambatan utama. Menurut Choi (2017), penerapan IKE memerlukan keahlian teknis tinggi, data input yang mendetail, serta perangkat keras yang kuat, yang dapat memperpanjang waktu persiapan dan mengurangi efisiensi, terutama pada proyek dengan tenggat waktu ketat. Selain itu, kurangnya standarisasi alat simulasi memperburuk inkonsistensi hasil perhitungan, sementara parameter seperti konfigurasi HVAC, pola okupansi, dan spesifikasi pencahayaan seringkali tidak tersedia pada tahap awal desain (Serag et al., 2024).

Model IKE yang lebih sederhana tetapi tetap akurat diperlukan untuk mengatasi tantangan ini. Model yang ideal harus:

1. Mudah digunakan tanpa memerlukan pelatihan teknis mendalam, sehingga dapat diakses oleh berbagai pemangku kepentingan seperti arsitek, desainer, dan manajer fasilitas (Choi, 2017);
2. Mendukung keputusan awal desain, misalnya untuk mengevaluasi opsi pencahayaan alami berdasarkan jenis jendela, luas, dan geometri bangunan gedung (Krarti et al., 2005); dan
3. Memungkinkan iterasi cepat dengan input minimal, sehingga mempercepat proses evaluasi dan mengurangi biaya (Hilliho et al., 2016).

Pengembangan model sederhana yang memenuhi kriteria ini dapat meningkatkan efektivitas IKE sebagai alat evaluasi energi kinerja energi bangunan gedung. Menjaga keseimbangan antara akurasi dan aksesibilitas model akan mempermudah adopsi di berbagai tahap desain. Selain itu, model yang lebih sederhana dapat meningkatkan efisiensi operasional dengan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang cepat meskipun dengan informasi awal yang terbatas. Hal ini akan mendorong penggunaan IKE secara luas, baik dalam evaluasi rutin maupun desain awal proyek sehingga dapat mendukung efisiensi energi yang optimal untuk bangunan gedung.

PENDEKATAN MULTI TEORI DALAM PERHITUNGAN IKE

Pemilihan Teori Utama

Penelitian ini menggunakan metodologi penyederhanaan berbasis teori untuk mengatasi tantangan dalam penerapan perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE). Pendekatan ini didasarkan pada enam teori utama: konservasi energi, siklus hidup, zona iklim dan tipologi bangunan gedung, interaksi sistem bangunan gedung, kompromi (*trade-offs*) antara kesederhanaan dan akurasi, serta

pembandingan dan pengambilan keputusan berbasis data. Setiap teori memberikan perspektif yang unik, yang secara kolektif membentuk kerangka kerja yang kokoh untuk menyederhanakan perhitungan IKE dengan tetap menjaga akurasi dan kepraktisan.

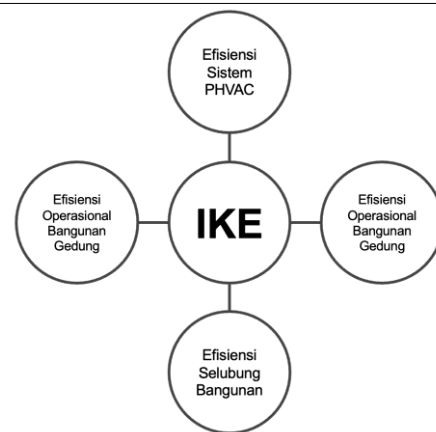
Pemilihan enam teori didasarkan pada kemampuan masing-masing untuk mengatasi tantangan utama dalam perhitungan IKE. Teori konservasi energi memfokuskan model pada sistem bangunan gedung utama seperti HVAC, pencahayaan, dan selubung bangunan gedung yang paling memengaruhi konsumsi energi. Teori siklus hidup memastikan fleksibilitas model dengan memungkinkan penerapan di berbagai tahap pengembangan bangunan gedung. Teori zona iklim dan tipologi bangunan gedung menjadikan model kontekstual dan relevan untuk berbagai kondisi geografis dan desain arsitektur. Teori interaksi sistem bangunan gedung mempertahankan perspektif holistik dengan memperhitungkan keterkaitan antar komponen bangunan gedung. Pendekatan kompromi (*trade-off*) menyeimbangkan kebutuhan kesederhanaan dan akurasi sesuai dengan berbagai tingkat keahlian teknis pengguna. Teori pembandingan (*benchmarking*) dan pengambilan keputusan berbasis data memastikan model tetap adaptif melalui integrasi data empiris, menjadikannya relevan dengan kondisi aktual.

Dengan menggabungkan teori-teori ini, metodologi yang diusulkan menawarkan pendekatan terstruktur dan interdisipliner untuk penyederhanaan perhitungan IKE, yang mencakup dimensi teknis, kontekstual, dan praktis. Kerangka kerja ini tidak hanya menjembatani kesenjangan antara teori dan aplikasi tetapi juga memastikan skalabilitas dan adaptabilitas dalam berbagai kondisi (Al Doury et al., 2020; Antonov et al., 2020; Seyedzadeh et al., 2020)

Teori Konservasi Energi

Teori konservasi energi memastikan model IKE yang disederhanakan berfokus pada optimalisasi sistem utama seperti HVAC, pencahayaan, dan selubung bangunan gedung. Dikembangkan selama krisis energi 1970-an, teori ini menekankan pengurangan konsumsi energi tanpa mengorbankan fungsi dan kenyamanan (Zachariah et al., 2022). Dengan strategi sistematis, teori ini bertujuan mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan energi melalui desain dan operasi yang efisien (Al Doury et al., 2020).

Dalam konteks bangunan gedung perkantoran, IKE menjadi metrik kunci untuk menilai kinerja energi dan mengidentifikasi peluang optimasi pada sistem seperti HVAC dan pencahayaan, khususnya pada fase operasional (Yun & Kim, 2014) yang dapat dimanfaatkan oleh para insinyur, arsitek, maupun manajer fasilitas bangunan gedung (Aldakheel et al., 2023). Sebagai contoh, optimasi HVAC berbasis IKE dapat menghemat energi hingga 28% (Suswitaningrum et al., 2022), sementara pencahayaan alami mampu mengurangi konsumsi energi hingga 30% (Khalil, 2023). Gambar 1 menunjukkan hubungan antara IKE dan teori konservasi energi.



Gambar 1. Keselarasan Indeks Konsumsi Energi (IKE) dengan teori konservasi energi

Dengan menjadi alat diagnostik dan preskriptif, IKE selaras dengan teori konservasi energi, memungkinkan fokus pada sistem energi tinggi tanpa memerlukan simulasi kompleks (Khalil, 2023). Selain itu, teori ini berfungsi sebagai dasar untuk mengidentifikasi ketidakefisienan, memberikan informasi untuk intervensi hemat energi yang terarah, dan menjembatani hubungan dengan teori siklus hidup untuk evaluasi lebih luas sepanjang siklus bangunan.

Teori Siklus Hidup

Teori siklus hidup berasal dari Life Cycle Assessment (LCA), yang menilai dampak lingkungan suatu produk dari produksi hingga pembuangan (Röck et al., 2020). Dalam konteks bangunan gedung, teori ini menekankan optimalisasi energi di setiap tahap siklus hidup, mencakup desain, konstruksi, operasi, dan retrofit (Li et al., 2020). Dengan pendekatan yang adaptif, teori ini memungkinkan strategi yang sesuai dengan kebutuhan setiap fase pembangunan.

IKE mendukung teori ini dengan menyediakan kerangka kerja untuk mengevaluasi konsumsi energi, baik melalui analisis skenario dalam desain, pemantauan real-time saat operasi, maupun intervensi retrofit yang ditargetkan (Ardente et al., 2011). Dengan demikian, teori ini memastikan bahwa strategi manajemen energi tetap adaptif dan relevan sepanjang umur bangunan. Penerapan IKE pada siklus hidup bangunan di peroleh melalui:

1. Fase Desain: Perhitungan IKE memungkinkan analisis skenario cepat guna membantu keputusan desain terkait orientasi bangunan, pemilihan material, dan integrasi sistem, yang dapat mengurangi konsumsi energi hingga 15-20% (Olatunde, 2024). Model iteratif memungkinkan kalkulasi yang fleksibel meskipun data input belum sepenuhnya tersedia.
2. Fase Operasional: IKE memungkinkan pemantauan real-time untuk mengevaluasi kinerja energi dan melakukan penyesuaian operasional guna meningkatkan efisiensi (Saleem et al., 2023).
3. Fase Retrofit: IKE membantu dalam memprioritaskan intervensi efisiensi energi dengan potensi penghematan terbesar, mendukung strategi renovasi berbasis siklus

hidup (Seyedzadeh et al., 2020; Shaikh et al., 2017).

Penyederhanaan IKE memperluas penerapan teori siklus hidup dengan menjadikan evaluasi energi lebih mudah diakses di semua tahap pengembangan bangunan. Pada fase awal desain, IKE memberikan estimasi cepat meskipun data terbatas. Saat bangunan beroperasi, perhitungannya dapat disempurnakan dengan data real-time, memastikan adaptabilitas dan akurasi yang berkelanjutan sepanjang siklus hidup bangunan (Saleem et al., 2023).

Teori Zona Iklim dan Tipologi Bangunan Gedung

Teori zona iklim dan tipologi bangunan gedung mempertimbangkan kondisi iklim regional dan karakteristik bangunan untuk memastikan model IKE yang kontekstual dan aplikatif di berbagai wilayah, termasuk Indonesia. Teori zona iklim dan tipologi bangunan gedung berakar dari penelitian mengenai kinerja termal dan desain responsif iklim (Mazzaferro et al., 2020). Teori ini menekankan penyesuaian strategi terhadap kondisi iklim dan tipologi spesifik, seperti perkantoran, guna meningkatkan efisiensi energi bangunan gedung (Tronchin et al., 2018; Vargas et al., 2017). Evaluasi energi dalam perhitungan IKE mempertimbangkan beban pendinginan, kebutuhan ventilasi, dan pola konsumsi energi sesuai karakteristik bangunan dan lokasi.

Pembandingan (benchmarking) IKE memungkinkan evaluasi berbasis standar referensi yang relevan dengan kondisi tertentu. Sebagai contoh, nilai benchmark beban pendinginan untuk iklim tropis di Indonesia membantu menentukan kebutuhan energi spesifik di wilayah tersebut (Gupta et al., 2024). Metrik berbasis tipologi bangunan gedung memastikan perhitungan IKE mencerminkan ekspektasi kinerja energi yang realistis.

Model IKE yang disederhanakan selaras dengan teori ini melalui penerapan benchmark yang disesuaikan dengan iklim regional dan pola konsumsi energi spesifik. Untuk bangunan perkantoran di iklim tropis, standar beban pendinginan yang telah ditetapkan menjadi alat praktis dalam perhitungan konsumsi energi. Metrik berbasis tipologi memastikan evaluasi yang akurat untuk berbagai skala bangunan, sehingga mendukung pengambilan keputusan yang berbasis data dan kontekstual.

Teori Interaksi Sistem

Teori interaksi sistem menekankan bahwa komponen bangunan seperti HVAC, pencahayaan, dan selubung bangunan saling berpengaruh terhadap kinerja energi secara keseluruhan (B. Chen et al., 2022; Kim et al., 2021). Teori interaksi sistem bangunan gedung berakar dari rekayasa sistem dan termodinamika, menekankan pentingnya keterkaitan dinamis antara komponen sistem. Teori ini menyoroti bahwa optimalisasi hubungan antar sistem dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan.

Perhitungan IKE yang disederhanakan selaras dengan teori ini dengan memprioritaskan interaksi berdampak besar, seperti hubungan HVAC dan selubung bangunan, yang terbukti mampu menghemat energi secara signifikan (Dong et al.,

2019). Studi menunjukkan bahwa optimasi interaksi ini dapat mengurangi konsumsi energi hingga 60% pada iklim tropis (Gupta et al., 2024). Dengan pendekatan ini, model IKE tetap mempertahankan perspektif holistik sambil menyederhanakan kompleksitas simulasi.

Dengan menargetkan sistem yang paling memengaruhi konsumsi energi, model IKE yang disederhanakan memungkinkan evaluasi yang lebih efektif tanpa memerlukan perhitungan yang rumit. Selain itu, pendekatan ini memastikan keseimbangan antara akurasi dan kemudahan penggunaan, menjadikannya lebih praktis bagi berbagai pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan berbasis data.

Teori Trade-Off

Teori kompromi (*trade-off*) berperan dalam menyeimbangkan kompleksitas model dengan kemudahan penggunaan, memastikan bahwa perhitungan IKE tetap praktis dan dapat diterapkan oleh berbagai pemangku kepentingan dengan tingkat keahlian teknis yang berbeda-beda (Balaras et al., 2007). Berasal dari ilmu pengambilan keputusan dan optimasi, teori ini menekankan keseimbangan antara kompleksitas dan aksesibilitas, memastikan bahwa model tetap praktis tanpa kehilangan kredibilitas (Bassi et al., 2021; Pedersen et al., 2021).

Model IKE yang disederhanakan mencerminkan prinsip ini dengan mengombinasikan data historis, pemodelan sederhana, dan analisis statistik, memungkinkan evaluasi energi yang cepat dan akurat. Dengan mengurangi ketergantungan pada simulasi kompleks, model ini tetap dapat digunakan oleh berbagai pemangku kepentingan dalam pengambilan keputusan berbasis data.

Pendekatan hibrida dalam perhitungan IKE mengintegrasikan acuan sederhana dengan penyesuaian prediktif untuk meningkatkan keandalan. Misalnya, model berbasis lembar kerja (*spreadsheet*) yang didukung oleh data historis dapat memberikan wawasan yang dapat diterapkan pada tahap desain awal tanpa memerlukan simulasi mendetail (Su et al., 2024). Pendekatan ini memastikan keseimbangan antara kesederhanaan dan akurasi, membuat metode perhitungan IKE lebih mudah diakses oleh praktisi sambil tetap memberikan hasil yang dapat diandalkan. Tabel 1 di bawah ini memberikan perbandingan antara metode perhitungan IKE, termasuk simulasi kompleks, model sederhana, dan model hibrida yang diusulkan, untuk memperjelas kelebihan masing-masing pendekatan.

Tabel 1. Perbandingan Metode Perhitungan IKE

Simulasi Kompleks	Model Sederhana (termasuk model spreadsheet)	Model Hibrida
Tingkat akurasi tinggi	Mudah digunakan untuk non-ahli	Mengintegrasikan simulasi kompleks dan model sederhana
Membutuhkan data input yang sangat rinci	Bergantung pada asumsi yang terlalu umum	Menggunakan data historis untuk menetapkan acuan awal

Simulasi Kompleks	Model Sederhana (termasuk model spreadsheet)	Model Hibrida
Memerlukan keahlian teknis yang mendalam	Tidak memerlukan interaksi variabel yang kompleks	Memanfaatkan perangkat lunak pemodelan sederhana dan analisis statistik, seperti regresi linear, untuk menyesuaikan hasil berdasarkan variabel
Memakan waktu dan sumber daya besar	Menghasilkan estimasi yang kurang akurat untuk kasus spesifik	Mengurangi kebutuhan data rinci sambil mempertahankan tingkat akurasi yang dapat diterima

Model hibrida sejalan dengan teori kompromi dengan mencapai keseimbangan antara kesederhanaan dan akurasi melalui integrasi antara acuan yang disederhanakan dan penyesuaian prediktif. Keseimbangan ini memastikan model tetap mudah diakses oleh insinyur, arsitek, dan manajer fasilitas, sambil tetap menjaga keandalan untuk mendukung pengambilan keputusan yang terinformasi selama seluruh tahap pengembangan bangunan gedung.

Teori Perbandingan (Benchmarking) dan Pengambilan Keputusan Berbasis Data

Teori perbandingan dan pengambilan keputusan berbasis data mengandalkan bukti empiris dari data historis dan acuan kinerja untuk menjaga model IKE tetap dinamis dan adaptif terhadap perubahan (Al Doury et al., 2020; Soares et al., 2017; Webb & Kneifel, 2020; Zachariah et al., 2022). Berakar dari ilmu manajemen dan evaluasi kinerja, teori ini menetapkan acuan dasar guna mengidentifikasi ketidakefisienan dan menetapkan target energi yang realistis.

Dalam perhitungan IKE, pendekatan ini memastikan model tetap responsif terhadap tren energi yang berkembang, memungkinkan evaluasi yang konsisten dan andal. Dengan perbandingan terhadap bangunan serupa, desainer dan insinyur dapat mengidentifikasi ketidakefisienan serta menetapkan strategi perbaikan (Zhao & Magoulès, 2012). Integrasi data operasional baru lebih lanjut meningkatkan adaptabilitas model, menjaga relevansi evaluasi energi dari waktu ke waktu.

Model IKE berbasis data menyediakan acuan praktis untuk analisis perbandingan yang lebih andal. Keselarasan antara perhitungan IKE yang disederhanakan dan prinsip teori perbandingan memberikan dasar yang kuat untuk penerapan praktis serta solusi dalam pengambilan keputusan berbasis data (Zhao & Magoulès, 2012).

Pengembangan Model Hibrida Perhitungan IKE

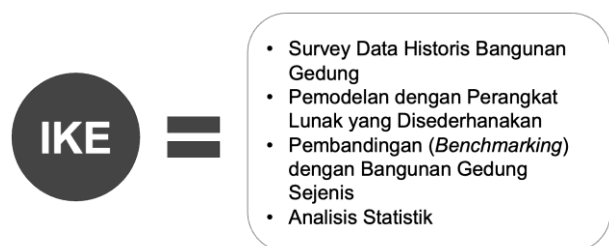
Model hibrida mengintegrasikan keunggulan metode simulasi kompleks dan model sederhana untuk menjembatani kesenjangan antara kesederhanaan dan akurasi dalam perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE). Simulasi kompleks seperti EnergyPlus

menawarkan akurasi tinggi dengan mempertimbangkan variabel seperti iklim, pola operasional, dan karakteristik bangunan, tetapi membutuhkan sumber daya besar dan keahlian teknis (Gupta et al., 2024). Sebaliknya, model sederhana lebih mudah digunakan namun kurang akurat dalam menangkap variasi tipologi bangunan dan kondisi iklim regional (Sharston dan Singh, 2024).

Pendekatan hibrida mengatasi tantangan ini dengan menggabungkan data historis sebagai acuan, pemodelan berbasis spreadsheet untuk kemudahan akses, perangkat lunak sederhana untuk variabel utama, serta analisis statistik guna menyesuaikan hasil berdasarkan tipologi dan pola operasional bangunan (Zhao dan Magoulès, 2012; Khalil, 2023). Dalam konteks Indonesia, model ini difokuskan pada variabel esensial seperti beban pendinginan dan pencahayaan yang dominan dalam konsumsi energi bangunan perkantoran. Keunggulan model hibrida dalam literatur diidentifikasi dalam beberapa hal dibawah ini:

1. Mengombinasikan simulasi dan metode sederhana, memungkinkan evaluasi energi yang cepat dengan tetap mempertahankan akurasi (Li & Yao, 2021; Lee & Kim, 2022).
2. Meningkatkan fleksibilitas dengan memanfaatkan regresi linear dan simulasi Monte Carlo guna menyesuaikan hasil berdasarkan variabel spesifik bangunan (Tushar et al., 2022).
3. Mempermudah perhitungan energi dengan tampilan antarmuka yang lebih intuitif dan aksesibilitas yang lebih luas (Zhao & Magoulès, 2012).

Pendekatan model hibrida IKE yang diusulkan dirancang untuk mengakomodasi keunggulan terbaik dari metode simulasi kompleks dan model berbasis spreadsheet yang ada, dengan mengintegrasikan pemodelan perangkat lunak sederhana dan analisis statistik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 2. Model Hibrida Perhitungan IKE yang Diajukan. Meskipun menawarkan berbagai manfaat, model hibrida juga menghadapi sejumlah tantangan yang perlu diperhatikan untuk meningkatkan efektivitasnya, yaitu:

1. Ketergantungan pada Data Historis: Model bergantung pada data historis yang mungkin tidak selalu sesuai dengan kondisi aktual bangunan baru atau perubahan operasional, sehingga membutuhkan pembaruan berkala agar tetap akurat (Gupta et al., 2024).
2. Keterbatasan dalam Interaksi Sistem: Meski lebih sederhana dari simulasi penuh, model ini belum sepenuhnya menggambarkan hubungan

kompleks antar sistem bangunan seperti HVAC dan selubung (Dong et al., 2019).

3. Penyesuaian terhadap Tipologi Bangunan: Efektivitasnya bervariasi berdasarkan tipologi dan kondisi iklim, sehingga diperlukan parameter khusus untuk berbagai skenario (Sharston & Singh, 2024).
4. Kesederhanaan vs Akurasi: Penyederhanaan model dapat mengurangi akurasi estimasi energi, terutama dalam proyek bangunan yang lebih kompleks (Bassi et al., 2021; Pedersen et al., 2021).

Untuk bangunan perkantoran di Indonesia, di mana pendinginan dan pencahayaan mendominasi konsumsi energi, model IKE difokuskan pada variabel esensial yang sesuai dengan iklim tropis. Model ini dirancang agar sederhana, akurat, dan adaptif bagi arsitek, insinyur, dan manajer fasilitas.

Model hibrida diusulkan untuk mengatasi keterbatasan metode perhitungan IKE yang ada, menjembatani kesenjangan antara kesederhanaan dan akurasi. Dengan mengintegrasikan keunggulan metode yang telah ada, model ini menyederhanakan identifikasi variabel bangunan, menyeimbangkan kepraktisan dan skalabilitas, serta tetap mempertahankan akurasi dalam memprediksi kinerja energi.

Penelitian ini mengembangkan model hibrida perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE) bangunan gedung yang sederhana, akurat, dan sesuai konteks iklim tropis. Melalui kajian literatur, dirumuskan kerangka model berbasis enam pendekatan teoritis dengan fokus pada parameter kunci seperti HVAC, pencahayaan, dan lift. Model diuji melalui walkthrough audit pada dua gedung perkantoran Kementerian PUPR untuk memperoleh data teknis dan konsumsi energi aktual. Hasil evaluasi digunakan untuk mengidentifikasi pengaruh relatif antar parameter dan merumuskan rekomendasi kedalaman survei serta variabel minimum untuk

model prediktif. Temuan ini diharapkan dapat menjadi dasar awal pengembangan alat evaluasi energi yang praktis dan kontekstual bagi bangunan di wilayah tropis.

Gambar 3. Kerangka Penelitian

Integrasi Teori Dan Data Lapangan Melalui Studi Kasus Pendataan Bangunan Gedung

Studi kasus ini dilakukan untuk meninjau kesesuaian dan potensi pengembangan lebih lanjut dari model hibrida perhitungan IKE yang dikembangkan berdasarkan enam pendekatan teoritis: konservasi energi, siklus hidup bangunan gedung, tipologi bangunan gedung dan zona iklim, interaksi sistem, perbandingan berbasis data (benchmarking), serta *trade-off* antara kesederhanaan dan akurasi. Model ini diusulkan untuk menjawab tantangan dalam pengelolaan energi bangunan gedung di Indonesia, khususnya dalam konteks bangunan gedung perkantoran yang telah terbangun di lingkungan tropis. Data lapangan dari dua bangunan gedung perkantoran di lingkungan Kementerian Pekerjaan Umum (PU) digunakan sebagai representasi nyata untuk memvalidasi hipotesis awal serta mengkaji implementasi teoritis ke dalam konteks praktis.

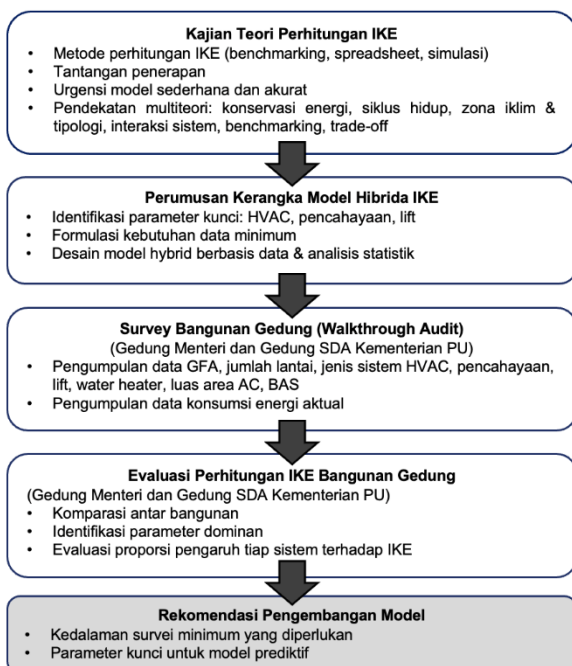
Profil Bangunan Gedung

Dua bangunan gedung yang dipilih sebagai objek penelitian adalah Gedung Menteri Pekerjaan Umum dan Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (Ditjen SDA) Kementerian Pekerjaan Umum. Kedua gedung ini dipilih karena mewakili karakteristik bangunan gedung perkantoran di Indonesia dan memiliki sistem manajemen energi yang relevan untuk dianalisis.

1. Gedung Menteri Pekerjaan Umum

Gedung Menteri Pekerjaan Umum berlokasi di Jl. Pattimura No. 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan. Gedung ini dibangun pada tahun 2011 dengan total Gross Floor Area (GFA) seluas 26.648,07 m² dan menggunakan material tembok bata ringan. Gedung ini memiliki 17 lantai, 1 basement, dan 1 roof office, serta beroperasi setiap hari kerja mulai pukul 07.30 hingga 16.00 WIB. Area parkir indoor di gedung ini memiliki luas 18.631 m², sementara akses vertikal didukung oleh 8 unit lift yang dapat mengangkut maksimal 17 orang dengan kapasitas berat hingga 1.275 kg.

Sistem tata udara gedung menggunakan water-cooled chiller merek Trane RTHD-SVX01C sebanyak 3 unit dengan kapasitas total terpasang 900 TR. Sistem ini telah beroperasi selama 13 tahun dan dilengkapi dengan Building Automation System (BAS) untuk mengatur suhu ruang rata-rata 25°C. Total area yang dilayani sistem AC adalah 22.704 m², dan pemeliharaan dilakukan secara rutin setiap 3 bulan. Sistem pencahayaan gedung menggunakan kombinasi lampu CFL sebanyak 2.077 unit dengan total daya 27.001 Watt, LED sebanyak 1.050 unit dengan total daya 11.721 Watt, serta TL sebanyak 3.011 unit dengan total daya 42.154 Watt. Sistem air panas menggunakan water heater merek Ariston model TI PRO 15 350 W sebanyak 29 unit yang sepenuhnya bersumber dari energi listrik.



Sistem penghematan air telah menggunakan low-flow fixtures sebesar 100%, meskipun belum terdapat sistem pengoptimalan grey water. Dengan pengelolaan energi yang terintegrasi, Gedung Menteri Pekerjaan Umum memberikan representasi nyata dalam penerapan teknologi hemat energi untuk perkantoran di Indonesia.



Gambar 4. Gedung Menteri Pekerjaan Umum

2. Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (Ditjen SDA) berlokasi di Jl. Pattimura No. 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan, dan merupakan bagian dari kompleks Kementerian Pekerjaan Umum. Gedung ini dibangun pada tahun 2008–2009 dengan total Gross Floor Area (GFA) seluas 18.943 m² dan menggunakan material tembok bata ringan. Gedung ini memiliki 8 lantai, 1 basement, dan 1 roof office, serta beroperasi setiap hari kerja mulai pukul 07.30 hingga 16.00 WIB. Akses vertikal didukung oleh 5 unit lift yang mampu mengangkut hingga 20 orang dengan kapasitas berat 1.350 kg.

Sistem tata udara menggunakan air-cooled chiller sebanyak 4 unit dengan merek McQUAY dan SMART, dengan set-point suhu 7°C dan pengaturan suhu ruang rata-rata 25°C. Sistem ini dilengkapi dengan Building Automation System (BAS) dan melayani area AC seluas 11.867,7 m². Pemeliharaan sistem tata udara dilakukan satu kali seminggu untuk setiap lantainya. Sistem pencahayaan menggunakan lampu CFL sebanyak 943 unit dengan total daya 12.259 Watt, LED sebanyak 1.188 unit dengan total daya 15.586 Watt, serta TL sebanyak 2.597 unit dengan total daya 52.732 Watt. Sistem air panas gedung menggunakan water heater listrik sebanyak 15 unit dengan kapasitas total terpasang 3.000 Watt.

Sistem penghematan air di gedung ini juga telah menggunakan low-flow fixtures sebesar 100%, tetapi belum mengoptimalkan sistem grey water. Dengan desain yang mendukung efisiensi energi dan air, Gedung Ditjen SDA memberikan data penting untuk memvalidasi dan mengembangkan model hibrida perhitungan IKE.



Gambar 5. Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air

Profil kedua gedung ini menyediakan data empiris yang mendukung integrasi enam pendekatan teoritis dalam model hibrida perhitungan IKE, terutama dalam konteks iklim tropis dan desain bangunan gedung perkantoran di Indonesia. Perbandingan profil kedua bangunan gedung tersebut dapat dilihat pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Perbandingan Profil Bangunan Gedung Menteri Pekerjaan Umum dan Gedung Ditjen SDA Kementerian PU

Komponen	Gedung Menteri PU	Gedung Ditjen SDA
Tahun Pembangunan gedung	2011	2008-2009
Jumlah Lantai	17 lantai, 1 basement, 1 roof office	8 lantai, 1 basement, 1 roof office
GFA	26.648,07 m ²	18.943 m ²
Nilai OTTV		
Luas Fasad		
Material Dinding	Bata ringan	Bata ringan
Material Kaca	Data belum tersedia	Data belum tersedia
Sistem Tata Udara	Water-cooled chiller, 900 TR	Air-cooled chiller, 881 TR
Luas Area AC	22.704 m ²	11.867,7 m ²
Building Automation System (BAS)	Ada	Ada
Jumlah Lampu CFL	2.077 unit (27.001 Watt)	943 unit (12.259 Watt)
Jumlah Lampu LED	1.050 unit (11.721 Watt)	1.188 unit (15.586 Watt)
Jumlah Lampu TL	3.011 unit (42.154 Watt)	2.597 unit (52.732 Watt)
Water Heater	29 unit (350 Watt/unit)	15 unit (3.000 Watt total)
Low-Flow Fixtures	100%	100%
Optimasi Grey Water	Tidak	Tidak
Jumlah Lift	8 unit (17 orang, 1.275 kg)	5 unit (20 orang, 1.350 kg)

Analisis Pendekatan Teoritis

1. Teori Konservasi Energi

Model hibrida perhitungan IKE mengintegrasikan teori konservasi energi dengan memprioritaskan variabel utama seperti sistem HVAC, pencahayaan, dan selubung bangunan gedung. Fokus utama pendekatan ini adalah mengidentifikasi komponen yang memberikan kontribusi terbesar terhadap konsumsi energi dan mengoptimalkan efisiensinya. Sistem HVAC, yang merupakan penyumbang energi terbesar pada bangunan gedung tropis, menjadi perhatian utama. Penelitian menunjukkan bahwa water-cooled chiller, yang digunakan di Gedung Menteri PU, lebih efisien dibandingkan air-cooled chillers, dengan potensi penghematan energi 10-15% (C.-W. Chen et al., 2010; Du et al., 2021; Wang et al., 2019). Dalam lingkungan suhu tinggi, air-cooled

chillers mengalami peningkatan konsumsi energi hingga 15-25% (Manimaran et al., 2014; Yik et al., 2012). Jika dikombinasikan dengan Building Automation System (BAS), efisiensi HVAC meningkat hingga 28% (Suswitaningrum et al., 2022). Sistem pencahayaan yang menggunakan lampu hemat energi seperti LED juga memberikan efisiensi tambahan, terutama jika diintegrasikan dengan sensor kontrol pencahayaan (Khalil et al., 2023).

Hasil survei menunjukkan bahwa data pada Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA cukup lengkap untuk mendukung penerapan teori ini. Sistem HVAC di kedua gedung, yang dilengkapi BAS dan jadwal pemeliharaan rutin, menyediakan data penting terkait kapasitas, set-point suhu, dan area layanan AC. Sistem pencahayaan juga mendukung konservasi energi melalui kombinasi lampu CFL, LED, dan TL yang efisien. Selain itu, data mengenai material kaca pada selubung bangunan gedung, seperti penggunaan kaca double-glazed, dapat memberikan wawasan penting tentang efisiensi termal yang memengaruhi beban pendinginan.

Dengan data yang memadai, model hibrida dapat menargetkan variabel signifikan untuk konservasi energi dan menyusun simulasi sederhana yang mendukung pengambilan keputusan. Pendekatan ini memastikan bahwa teori konservasi energi diterapkan secara efektif untuk mendukung efisiensi energi pada bangunan gedung perkantoran di Indonesia.

2. Teori Siklus Hidup Bangunan gedung

Model hibrida mengintegrasikan teori siklus hidup bangunan gedung untuk memastikan relevansi perhitungan IKE di setiap tahap pengembangan bangunan gedung, yakni perencanaan, operasional, dan retrofit. Pada tahap perencanaan, model menggunakan simulasi berbasis data desain awal seperti kapasitas HVAC, jenis pencahayaan, dan material selubung bangunan gedung untuk memproyeksikan efisiensi energi. Studi menunjukkan bahwa analisis skenario dalam tahap desain dapat mengurangi proyeksi konsumsi energi hingga 20% (Olatunde, 2024).

Pada tahap operasional, data penggunaan energi bulanan yang dikumpulkan dari sistem Building Automation System (BAS) memungkinkan pemantauan pola konsumsi dan kebutuhan pemeliharaan rutin. Pemeliharaan sistem HVAC setiap tiga bulan di Gedung Menteri PU dan setiap minggu di Gedung Ditjen SDA memastikan kinerja sistem tetap optimal, mendukung efisiensi sepanjang masa operasional bangunan gedung (Saleem et al., 2023).

Untuk tahap retrofit, model dapat memanfaatkan data historis seperti penggunaan lampu TL dan material kaca untuk merancang intervensi hemat energi, misalnya mengganti lampu TL dengan LED atau meningkatkan insulasi termal selubung bangunan gedung menggunakan kaca double-glazed (Ardente et al., 2011). Data yang dikumpulkan dari kedua bangunan gedung menunjukkan kelengkapan yang memadai untuk mendukung perhitungan pada setiap tahap siklus hidup, memastikan model ini adaptif dan

efektif dalam meningkatkan efisiensi energi bangunan gedung perkantoran di Indonesia.

3. Teori Tipologi Bangunan gedung dan Zona Iklim

Model hibrida perhitungan IKE mengintegrasikan teori tipologi bangunan gedung dan zona iklim untuk memastikan relevansi dengan kondisi lokal, khususnya di wilayah tropis seperti Indonesia. Pendekatan ini memanfaatkan data iklim, seperti suhu rata-rata dan kebutuhan pendinginan, untuk mengakomodasi beban energi spesifik bangunan gedung tropis. Hasil survei pada Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA menunjukkan bahwa kedua bangunan gedung menggunakan sistem HVAC yang dirancang untuk mengatasi kebutuhan pendinginan tinggi, dengan set-point suhu ruang rata-rata 25°C yang dikelola melalui Building Automation System (BAS).

Selain itu, model ini mengakomodasi variasi tipologi bangunan gedung, seperti Gedung Menteri PU dengan 17 lantai dan GFA 26.648,07 m², serta Gedung Ditjen SDA dengan 8 lantai dan GFA 18.943 m². Parameter yang diintegrasikan mencakup kapasitas HVAC, jenis pencahayaan, dan material selubung bangunan gedung, seperti kaca tempered dan laminated, yang memberikan isolasi termal untuk mengurangi beban pendinginan. Data pencahayaan dari kedua gedung, yang menggunakan kombinasi lampu CFL, LED, dan TL dengan daya total lebih dari 80.000 Watt, memberikan masukan penting untuk menyesuaikan model dengan kebutuhan energi spesifik berdasarkan tipologi bangunan gedung.

Ketersediaan data hasil survei memastikan bahwa model hibrida dapat mengintegrasikan variabel tipologi bangunan gedung dan zona iklim secara akurat. Dengan demikian, pendekatan ini mendukung penghitungan IKE yang relevan dan fleksibel untuk berbagai jenis bangunan gedung perkantoran di Indonesia.

4. Teori Interaksi Sistem Bangunan gedung

Pendekatan teori interaksi sistem bangunan gedung dalam model hibrida perhitungan IKE menekankan pentingnya hubungan antara sistem HVAC, pencahayaan, dan selubung bangunan gedung. Interaksi ini memengaruhi kinerja energi secara keseluruhan, seperti bagaimana isolasi termal selubung bangunan gedung dapat mengurangi beban pendinginan pada sistem HVAC (Tronchin et al., 2018; Vargas et al., 2017). Selain itu, penggunaan lampu LED yang menghasilkan panas lebih rendah dibandingkan lampu TL berpotensi mengurangi beban pendinginan HVAC, yang mendukung efisiensi energi bangunan gedung.

Data survei dari Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA sudah mencakup informasi penting, seperti kapasitas HVAC, jenis pencahayaan, dan material selubung bangunan gedung yang mendukung simulasi berbasis data lapangan untuk mengevaluasi hubungan ini, yang kemudian dianalisis menggunakan metode statistik dan disusun dalam format spreadsheet untuk menyediakan tampilan antarmuka yang mudah digunakan. Namun, untuk menjalankan simulasi yang lebih akurat, diperlukan data tambahan seperti as-built drawing,

yang mencakup detail tata letak sistem dan spesifikasi material. Data ini penting untuk memastikan pemodelan sesuai dengan kondisi nyata bangunan gedung.

5. Teori Perbandingan (Benchmarking) Berbasis Data

Pendekatan benchmarking dalam model hibrida perhitungan IKE memanfaatkan data historis untuk menetapkan baseline kinerja energi bangunan gedung sebagai acuan dalam mengevaluasi efisiensi energi bangunan gedung lainnya. Data survei dari Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA memberikan informasi penting tentang konsumsi energi sistem HVAC, pencahayaan, dan luas lantai yang dilayani. Misalnya, Gedung Menteri PU memiliki GFA 26.648,07 m² dengan water-cooled chiller berkapasitas total 900 TR, sedangkan Gedung Ditjen SDA memiliki GFA 18.943 m² dengan air-cooled chiller berkapasitas 881 TR. Data ini berfungsi sebagai dasar perbandingan dengan bangunan lain (Zhao & Magoulès, 2012). Namun, belum adanya standar nasional IKE di Indonesia menjadi tantangan dalam perbandingan lebih luas. Meskipun demikian, data kedua gedung dapat menjadi referensi awal dalam mengembangkan benchmark yang relevan dengan kondisi lokal dan berfungsi sebagai dasar dalam pengembangan regulasi di masa depan (Webb & Kneifel, 2020; Zachariah et al., 2022). Pendekatan ini memberikan landasan yang kuat untuk mendukung pengelolaan energi yang lebih efektif, meskipun standar nasional IKE belum ditetapkan.

6. Teori Trade-Off

Model hibrida perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE) mengintegrasikan teori trade-off untuk mengurangi kompleksitas analisis tanpa mengorbankan akurasi. Pendekatan ini mengkurasi variabel yang digunakan, seperti kapasitas HVAC, konsumsi listrik bulanan, dan jenis pencahayaan, sehingga sesederhana mungkin namun tetap representatif terhadap kebutuhan energi bangunan gedung. Dengan fokus pada variabel utama, model ini memungkinkan perhitungan yang cepat dan

efisien, terutama pada tahap desain awal, ketika data yang tersedia seringkali masih terbatas (Tushar et al., 2022).

Hasil survei pada Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA menunjukkan bahwa data yang tersedia mendukung pendekatan ini. Misalnya, kapasitas sistem HVAC di Gedung Menteri PU sebesar 900 TR melayani area AC seluas 22.704 m², sementara di Gedung Ditjen SDA, kapasitas 881 TR melayani 11.867,7 m². Data ini, bersama dengan informasi pencahayaan seperti jumlah lampu LED, CFL, dan TL beserta daya totalnya, cukup untuk menghasilkan perhitungan IKE yang presisi. Penggunaan data yang sederhana namun representatif ini memastikan bahwa model hibrida dapat memberikan hasil yang relevan tanpa memerlukan data teknis yang kompleks.

Dengan pendekatan trade-off, model ini memberikan kerangka kerja yang praktis untuk pengambilan keputusan energi yang efisien. Data survei yang sederhana dan mudah diperoleh, namun cukup lengkap, mendukung akurasi perhitungan IKE, menjadikannya relevan untuk diterapkan dalam bangunan gedung perkantoran di Indonesia.

Analisis IKE pada Studi Kasus

Hasil survei terhadap Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA menunjukkan perbedaan signifikan dalam intensitas konsumsi energi (IKE). Gedung Ditjen SDA memiliki IKE 40% lebih tinggi dibandingkan Gedung Menteri PU, masing-masing sebesar 322 kWh/m²/tahun dan 193 kWh/m²/tahun. Secara umum, selisih IKE ini terutama disebabkan oleh konsumsi energi sistem tata udara (HVAC), pencahayaan, dan penggunaan lift. Namun, terdapat anomali pada konsumsi energi pemanas air (water heater) dan pompa, di mana Gedung Menteri PU menunjukkan konsumsi energi lebih tinggi dibandingkan Gedung Ditjen SDA meskipun memiliki kapasitas sistem yang lebih besar. Berikut tabel perbandingan dan uraian dari masing-masing komponen yang diidentifikasi:

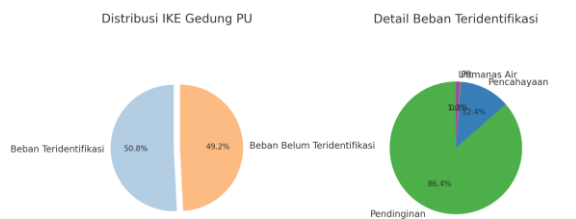
Tabel 3. Perbandingan Hasil Survei IKE Bangunan Gedung Menteri Pekerjaan Umum dan Gedung Ditjen SDA Kementerian PU

No	Komponen Terkait Parameter Energi	Data Hasil Survey		Data Konsumsi Energi		Satuan
		Gedung Menteri PU	Gedung Ditjen SDA	Gedung Menteri PU	Gedung Ditjen SDA	
A	Sistem Tata Udara	Water-cooled chiller, 900 TR	Air-cooled chiller, 881 TR	118,78	163,56	W/m ²
	Konsumsi Energi Sistem Tata Udara			237,55	327,12	kWh/m ²
	Intensitas Konsumsi per th			19,80	27,26	kWh/m ² /th
B	Total Daya Penggunaan Lampu (Watt)	80876	80577	3,03	4,25	W/m ²
	Konsumsi Energi Sistem Pencahayaan			6,07	8,51	kWh/m ²
	Intensitas Konsumsi per th			0,51	0,71	kWh/m ² /th
C	Total Daya Penggunaan Water Heater (Watt)	10150	3000	0,38	0,16	W/m ²
	Konsumsi Energi Water Heater			0,76	0,32	kWh/m ²
	Intensitas Konsumsi per th			0,06	0,03	kWh/m ² /th

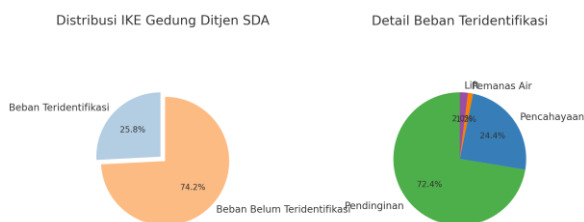
D	Total Daya Listrik Lift (Watt)	96000	92500	3,60	4,88	W/m2
	Konsumsi Energi Lift			7,21	9,77	kWh/m2
	Intensitas Konsumsi per th			0,60	0,81	kWh/m2/th
E	Pompa	436250	301700	16,37	15,93	W/m2
	Konsumsi Energi Pompa			32,74	31,85	kWh/m2
	Intensitas Konsumsi per th			2,73	2,65	kWh/m2/th
IKE Total	193	322	23,69	31,46	kWh/m2/tahun	

Analisis ini dilakukan berdasarkan hasil survei walkthrough audit terhadap dua bangunan gedung perkantoran di lingkungan Kementerian Pekerjaan Umum, yakni Gedung Menteri PU dan Gedung Direktorat Jenderal Sumber Daya Air (Ditjen SDA). Melalui pendekatan manual berbasis Excel, dilakukan perhitungan beban energi dari komponen-komponen utama seperti sistem tata udara (HVAC), pencahayaan, lift, water heater, dan pompa. Metodologi ini menggunakan data yang dikumpulkan langsung di lapangan, dan apabila terdapat data yang tidak tersedia, digunakan asumsi teknis sesuai praktik umum pada bangunan gedung sejenis.

Tingkat Identifikasi dan Komposisi Beban Energi
 Hasil perhitungan menunjukkan bahwa tingkat keteridentifikasi beban energi di kedua gedung masih tergolong rendah. Pada Gedung Menteri PU, total beban energi yang berhasil diidentifikasi mencapai 50,79% dari total IKE, sedangkan pada Gedung Ditjen SDA hanya 25,81%. Ini berarti terdapat 49,21% dan 74,19% konsumsi energi pada masing-masing gedung yang belum teridentifikasi dari sisi jenis bebannya. Hal ini menunjukkan keterbatasan data dari walkthrough audit untuk memperkirakan profil energi bangunan secara akurat, mengingat masih terdapat porsi energi yang signifikan dari peralatan-peralatan lain seperti peralatan komputer, server, genset, dan sistem pendukung lainnya yang belum terukur secara langsung.



Gambar 6. Distribusi Beban Energi Gedung Menteri PU



Gambar 7. Distribusi Beban Energi Gedung SDA
 Jika ditinjau lebih lanjut, beban energi yang berhasil diidentifikasi pada Gedung Menteri PU terdiri dari sistem HVAC sebesar 237,55 kWh/m²/tahun (43,88%

dari total IKE), pencahayaan 6,07 kWh/m²/tahun (3,14%), lift 7,21 kWh/m²/tahun (3,73%), water heater 0,32 kWh/m²/tahun (0,17%), dan pompa 32,74 kWh/m²/tahun (16,96%). Sementara itu, pada Gedung Ditjen SDA, kontribusi masing-masing beban energi terhadap total IKE yaitu: HVAC 327,12 kWh/m²/tahun (18,69%), pencahayaan 8,51 kWh/m²/tahun (2,64%), lift 9,77 kWh/m²/tahun (3,03%), water heater 0,76 kWh/m²/tahun (0,24%), dan pompa 31,85 kWh/m²/tahun (9,89%). Distribusi ini menunjukkan bahwa pada Gedung Menteri PU, sistem HVAC dan pompa menjadi komponen dominan yang dapat dijelaskan secara kuantitatif, sedangkan di Gedung Ditjen SDA, meskipun HVAC tetap menjadi kontributor terbesar yang teridentifikasi, proporsinya terhadap total IKE lebih kecil, mengindikasikan dominasi beban lain yang belum terpetakan dari audit awal.

Jika dibandingkan dengan data benchmarking BPPT (2020) terhadap 48 bangunan perkantoran, komposisi konsumsi energi ideal pada bangunan kantor mencakup: HVAC (64,7%), lampu dan stop kontak (15,0%), lift/eskalator (7,0%), dan peralatan listrik lainnya (13,3%). Berdasarkan data tersebut, kontribusi terbesar seharusnya berasal dari sistem HVAC. Namun, hasil perhitungan pada Gedung Ditjen SDA menunjukkan kontribusi HVAC hanya sebesar 18,69%, sedangkan Gedung Menteri PU sebesar 43,88%. Kesenjangan ini memperkuat argumen bahwa masih terdapat konsumsi energi yang tidak terdeteksi dalam audit terbatas, serta perlunya pendekatan perhitungan yang lebih komprehensif atau metode alternatif yang lebih adaptif seperti model hibrida.

Perbandingan Masing-Masing Beban Energi

1. Sistem Tata Udara (HVAC)

Gedung Menteri PU menggunakan sistem water-cooled chiller dengan kapasitas 900 TR, sedangkan Gedung Ditjen SDA menggunakan air-cooled chiller berkapasitas 881 TR. Meskipun kapasitas terpasang relatif serupa, perbedaan sistem pendinginan ini menghasilkan gap konsumsi energi yang cukup besar: 237,55 kWh/m² pada Gedung Menteri PU dibandingkan 327,12 kWh/m² pada Gedung Ditjen SDA, atau selisih sebesar 27%. Hal ini sejalan dengan literatur yang menunjukkan efisiensi sistem water-cooled chiller lebih tinggi, terutama jika didukung oleh sistem BAS yang baik (Wang et al., 2019; Manimaran et al., 2014). Selisih ini semakin signifikan mengingat luas area yang dilayani HVAC di Gedung Menteri PU hampir dua kali lipat Gedung Ditjen SDA. Temuan ini mengindikasikan pentingnya pemilihan sistem HVAC yang tepat sejak tahap desain bangunan.

2. Sistem Pencahayaan

Total daya lampu di kedua gedung hampir identik (sekitar 80.000 Watt), namun konsumsi energi pencahayaan Gedung Ditjen SDA mencapai 8,51 kWh/m² dibandingkan 6,07 kWh/m² pada Gedung Menteri PU, atau selisih 29%. Hal ini dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari perbedaan intensitas penggunaan, kontrol pencahayaan, jenis ballast, hingga potensi pencahayaan alami yang tidak dimanfaatkan secara optimal. Mengingat sistem pencahayaan menyumbang hingga 15% dari total konsumsi energi dalam studi BPPT, efisiensi pada sistem ini menjadi salah satu peluang penghematan penting, khususnya melalui integrasi sensor otomatis dan optimalisasi daylighting.

3. Lift

Konsumsi energi lift di Gedung Ditjen SDA tercatat sebesar 9,77 kWh/m², lebih tinggi dibandingkan Gedung Menteri PU sebesar 7,21 kWh/m² (selisih 26%). Meskipun jumlah unit lift di Gedung Ditjen SDA lebih sedikit (5 unit) dibandingkan Gedung Menteri PU (8 unit), daya per unit dan frekuensi pemakaian tampaknya lebih intens. Jumlah lantai yang lebih sedikit tidak serta merta mengurangi konsumsi energi jika distribusi lalu lintas vertikal tidak dikendalikan dengan sistem manajemen penggunaan lift yang efisien.

4. Water Heater

Komponen ini menunjukkan anomali menarik. Meskipun daya total water heater di Gedung Menteri PU jauh lebih besar (10.150 Watt) dibandingkan Gedung Ditjen SDA (3.000 Watt), konsumsi energi justru tercatat lebih tinggi di Gedung Ditjen SDA (0,76 kWh/m² vs. 0,32 kWh/m²). Hal ini mengindikasikan perbedaan pola penggunaan yang tidak linier terhadap kapasitas terpasang. Secara kontribusi terhadap IKE total, nilai ini relatif kecil, namun penting sebagai indikator bahwa efisiensi sistem bergantung pada perilaku pengguna dan bukan semata-mata spesifikasi teknis.

5. Pompa

Pompa merupakan beban tersembunyi yang sering luput dari perhatian. Daya terpasang pompa pada Gedung Menteri PU jauh lebih besar (436.250 Watt) dibandingkan Gedung Ditjen SDA (301.700 Watt), namun konsumsi energi tahunan hanya berbeda tipis (32,74 kWh/m² vs. 31,85 kWh/m²). Efisiensi ini bisa berasal dari perbedaan frekuensi operasi, sistem kontrol tekanan air, atau efisiensi dari jenis pompa itu sendiri. Walaupun tidak dominan dalam struktur IKE, pompa tetap berpotensi memberikan efisiensi jika dikendalikan dengan sistem pressure demand atau variable speed pump.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengeksplorasi potensi model hibrida dalam perhitungan Indeks Konsumsi Energi (IKE) dengan mengintegrasikan enam pendekatan teoritis: konservasi energi, siklus hidup bangunan gedung, tipologi bangunan dan zona iklim, interaksi sistem, benchmarking berbasis data, serta *trade-off* antara kesederhanaan dan akurasi. Model hibrida ini diharapkan dapat menjadi solusi yang lebih adaptif dalam mendukung pengelolaan energi di bangunan

gedung perkantoran di Indonesia, terutama dalam konteks iklim tropis dan beragamnya tipologi bangunan.

Hasil tinjauan teori menunjukkan bahwa model hibrida memiliki potensi besar untuk menjembatani kesenjangan antara metode simulasi berbasis fisik yang kompleks dan membutuhkan sumber daya besar dengan metode sederhana yang lebih mudah diterapkan namun kurang akurat. Model ini menawarkan pendekatan yang lebih fleksibel dengan tetap mempertahankan tingkat akurasi yang memadai dalam perhitungan IKE.

Berdasarkan hasil survei awal di Gedung Menteri PU dan Gedung Ditjen SDA, ditemukan bahwa ketersediaan data di lapangan dapat mendukung pengembangan model hibrida lebih lanjut. Dengan pendekatan multiteori, model ini dapat diterapkan dalam kondisi nyata untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan energi. Beberapa temuan utama dari studi ini meliputi:

1. **Konservasi energi:** Model hibrida mampu mengidentifikasi peluang penghematan energi dari sistem pencahayaan dan HVAC, seperti penggunaan *water-cooled chiller* dan *air-cooled chiller* yang menunjukkan perbedaan dalam konsumsi energi di kedua gedung;
2. **Siklus hidup bangunan gedung:** Model hibrida dapat diterapkan dari tahap desain awal hingga operasional dan retrofit bangunan dengan memanfaatkan skenario hasil simulasi untuk memproyeksikan tingkat konsumsi energi bangunan gedung;
3. **Tipologi dan zona iklim:** Perhitungan IKE dengan model hibrida dapat disesuaikan dengan karakteristik bangunan gedung, dengan mempertimbangkan faktor beban pendinginan dan pencahayaan alami yang sangat berpengaruh dalam efisiensi energi bangunan gedung di iklim tropis;
4. **Interaksi sistem bangunan:** model hibrida memungkinkan evaluasi keterkaitan antar sistem, seperti hubungan antara pencahayaan alami dan beban pendinginan. Hasil analisis menunjukkan bahwa optimalisasi desain integratif dapat memberikan peluang penghematan energi yang lebih signifikan;
5. **Benchmarking berbasis data:** Model hibrida dapat digunakan untuk meninjau kinerja energi bangunan gedung secara lebih adaptif. Namun, masih diperlukan standar nasional IKE agar benchmarking ini lebih terstruktur dan dapat diterapkan secara luas; dan
6. **Trade-off:** Model hibrida dapat memberikan kemudahan dengan mengeliminasi variabel yang tidak esensial tanpa mengurangi keakuratan hasil, menjadikannya lebih efisien dibandingkan metode simulasi berbasis fisik yang lebih kompleks.

Analisis data awal dari dua bangunan gedung studi kasus menunjukkan adanya perbedaan IKE antar kedua bangunan gedung, dimana IKE Gedung Ditjen SDA lebih tinggi hingga 40% dari Gedung Menteri PU. Perbedaan IKE disebabkan oleh berbagai faktor yang telah diidentifikasi diantaranya yaitu sistem tata

udara, pencahayaan, dan penggunaan lift. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa model hibrida harus mempertimbangkan karakteristik spesifik masing-masing bangunan gedung untuk menghasilkan perhitungan IKE yang lebih akurat. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan dalam hal pengolahan data. Keterbatasan data survei menyebabkan analisis yang dilakukan masih sebatas perbandingan sederhana, sehingga belum dapat menguraikan secara mendalam interaksi sistem bangunan yang lebih kompleks serta kontribusi masing-masing komponen terhadap total konsumsi energi. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan penelitian lanjutan yang mengintegrasikan data historis operasional dari berbagai bangunan gedung dengan cakupan sampel yang lebih luas dengan pengambilan data dan analisis yang lebih komprehensif. Selain itu, pemanfaatan simulasi berbasis perangkat lunak diperlukan untuk menguraikan data teknis bangunan yang lebih detail guna mendukung pengembangan model hibrida yang akurat dan aplikatif.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa analisis berbasis survei dan data awal dapat menjadi pendekatan awal (*proxy*) untuk mengevaluasi potensi penerapan model hibrida untuk perhitungan IKE. Dengan pengembangan lebih lanjut, model ini berpotensi menjadi alat yang lebih komprehensif untuk mendukung kebijakan efisiensi energi serta mendorong penerapan strategi pengelolaan energi yang lebih berkelanjutan di bangunan gedung perkantoran di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahn, K. U., Shin, H. S., & Park, C. S. (2019). Energy Analysis of 4625 Office Buildings in South Korea. *Energies*, 12(6), 1114. <https://doi.org/10.3390/en12061114>
- Al Doury, R. R. J., Ozkan, S., & Mengüç, M. P. (2020). Cascaded Thermodynamic and Environmental Analyses of Energy Generation Modalities of a High-Performance Building Based on Real-Time Measurements. *Entropy*, 22(4), 445. <https://doi.org/10.3390/e22040445>
- Aldakheel, J., Bahrar, M., & El Mankibi, M. (2023). Indoor environmental quality evaluation of smart/artificial intelligence techniques in buildings – a review. *E3S Web of Conferences*, 396, 01101. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202339601101>
- Antonov, Y., Heiselberg, P., Flourentzou, F., & Pomianowski, M. (2020). Methodology for Evaluation and Development of Refurbishment Scenarios for Multi-Story Apartment Buildings, Applied to Two Buildings in Denmark and Switzerland. *Buildings*, 10(6), 102. <https://doi.org/10.3390/buildings10060102>
- Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2011). Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.022>
- Balaras, C. A., Dascalaki, E. G., Gaglia, A. G., Droutsas, K., & Kontoyiannidis, S. (2007). Energy performance of European buildings. *Energy Sustainability*, 47977, 387–396.
- Bassi, A. M., Costantini, V., & Paglialonga, E. (2021). Modelling the European Union sustainability transition: A soft-linking approach. *Sustainability (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/su13116303>
- Chen, B., Guo, Q., Yin, G., Wang, B., Pan, Z., Chen, Y., Wu, W., & Sun, H. (2022). Energy-Circuit-Based Integrated Energy Management System: Theory, Implementation, and Application. *Proceedings of the IEEE*, 110(12), 1897–1926. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2022.3216567>
- Chen, C.-W., Lee, C.-W., & Chen, C.-Y. (2010). To enhance the energy efficiency of chiller plants with system optimization theory. *Energy & Environment*, 21(5), 409–424.
- Choi, J.-H. (2017). Investigation of the correlation of building energy use intensity estimated by six building performance simulation tools. *Energy and Buildings*, 147, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.078>
- Chung, W. (2011). Review of building energy-use performance benchmarking methodologies. *Applied Energy*, 88(5), 1470–1479. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.022>
- Dinas P2B Jakarta. (2012). Peraturan Gubernur DKI Jakarta No. 38 Tahun 2012 tentang Bangunan Gedung Hijau. In *JDIH BPK*.
- Dong, B., Prakash, V., Feng, F., & O'Neill, Z. (2019). A review of smart building sensing system for better indoor environment control. *Energy and Buildings*, 199, 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.025>
- Du, J., Li, S., & Li, X. (2021). Modelling And Optimization Of A Chilled-Water Cooling System With Multiple Chillers. *Thermal Science*, 25(5 Part B), 3873–3888. <https://doi.org/10.2298/TSCI200606328D>
- Garg, V., Chandrasen, K., Tetali, S., & Mathur, J. (2010). EnergyPlus Simulation Speedup Using Data Parallelization Concept. *ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability*, 1041–1047. <https://doi.org/10.1115/ES2010-90509>
- Gupta, G., Mathur, S., & Mathur, J. (2024). A composite indicator-based energy-efficiency benchmarking for residential buildings. *Benchmarking: An International Journal*. <https://doi.org/10.1108/BIJ-02-2023-0099>
- Hilliaho, K., Kovalainen, V., Huuhka, S., & Lahdensivu, J. (2016). Glazed spaces: A simplified calculation method for the evaluation of energy savings and interior temperatures. *Energy and Buildings*, 125, 27–44. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.063>
- Kementerian ESDM. (2014). Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional. In *JDIH BPK*.
- Khalil, A. (2023). Design Optimization of Building Form and Fenestration for Daylighting and Thermal Energy in Three Variations of the Hot Climate of Egypt. *Building Simulation Conference Proceedings*. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10198243/>
- Khalil, A., Lila, A. M. H., & Ashraf, N. (2023). Optimization and Prediction of Different Building Forms for Thermal Energy Performance in the Hot Climate of Cairo Using Genetic Algorithm and Machine Learning. *Computation*, 11(10), 192. <https://doi.org/10.3390/computation11100192>
- Kim, J., Hong, T., Hastak, M., & Jeong, K. (2021). Intelligent planning unit for the artificial intelligent based built environment focusing on human-building interaction. *Journal of Asian Architecture and*

- Building Engineering*, 20(6), 729–746. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1803076>
- Krarti, M., Erickson, P. M., & Hillman, T. C. (2005). A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. *Building and Environment*, 40(6), 747–754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.007>
- Li, C. Z., Lai, X., Xiao, B., Tam, V. W. Y., Guo, S., & Zhao, Y. (2020). A holistic review on life cycle energy of buildings: An analysis from 2009 to 2019. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 134). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110372>
- Manimaran, V., Chacko, S., & Kumar, P. (2014). Performance Evaluation of Air-Cooled Screw Chillers at Low Part Load Ratios and Outdoor Temperatures in Dubai and Measures to Improve the Performance. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*. <https://doi.org/10.12720/sgce.4.1.85-91>
- Mazzaferro, L., Machado, R. M. S., Melo, A. P., & Lamberts, R. (2020). Do we need building performance data to propose a climatic zoning for building energy efficiency regulations? *Energy and Buildings*, 225, 110303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110303>
- Olatunde, T. M. (2024). Review of Energy-Efficient HVAC Technologies for Sustainable Buildings. *International Journal of Science and Technology Research Archive*, 6(2), 012–020. <https://doi.org/10.53771/ijstra.2024.6.2.0039>
- Pedersen, T. T., Victoria, M., Rasmussen, M. G., & Andresen, G. B. (2021). Modeling all alternative solutions for highly renewable energy systems. *Energy*, 234, 121294. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121294>
- Peraturan Pemerintah No. 79 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional (2014).
- Pukhkal, V. (2021). Numerical Modeling of Energy Consumption in Residential Buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1079(5), 052025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1079/5/052025>
- Purnami, N. A., Arianti, R., & Setiawan, P. (2022). Analisis Intensitas Konsumsi Energi (IKE) pada Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto (ITDA) Yogyakarta. *Aviation Electronics*, 4(2), 225–240.
- Puteri, D. S. (2024). Making Indonesia Sustainable: Shaping the Law to Reduce Digital Carbon Footprint. *Indonesian Journal of Advocacy and Legal Services*, 6(1), 77–102. <https://doi.org/10.15294/ijals.v6i1.78500>
- Röck, M., Saade, M. R. M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>
- Saleem, M., Shakir, M., Usman, M., Bajwa, M., Shabbir, N., Shams Ghahfarokhi, P., & Daniel, K. (2023). Integrating Smart Energy Management System with Internet of Things and Cloud Computing for Efficient Demand Side Management in Smart Grids. *Energies*, 16(12), 4835. <https://doi.org/10.3390/en16124835>
- Serag, H., Mahmoud, M., Kamel, T., & Fahmy, A. (2024). Comparative Validation of a Building Energy Model Calibration Methodology with a Focus on Residential Buildings. *Civil Engineering and Architecture*, 12(3), 1447–1462. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120314>
- Seyedzadeh, S., Pour Rahimian, F., Oliver, S., Rodriguez, S., & Glesk, I. (2020). Machine learning modelling for predicting non-domestic buildings energy performance: A model to support deep energy retrofit decision-making. *Applied Energy*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115908>
- Shaikh, P. H., Shaikh, F., Sahito, A. A., Uqaili, M. A., & Umrani, Z. (2017). An Overview of the Challenges for Cost-Effective and Energy-Efficient Retrofits of the Existing Building Stock. In *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* (pp. 257–278). Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081011287000095>
- Sharston, R., & Singh, M. (2024). The role of passive, active, and operational parameters in the relationship between urban heat island effect (UHI) and building energy consumption. *Energy and Buildings*, 323, 114720. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114720>
- Soares, N., Bastos, J., Pereira, L. D., Soares, A., Amaral, A. R., Asadi, E., Rodrigues, E., Lamas, F. B., Monteiro, H., Lopes, M. A. R., & Gaspar, A. R. (2017). A review on current advances in the energy and environmental performance of buildings towards a more sustainable built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 845–860. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.027>
- Suswitaningrum, E., Hudallah, N., Putri, R. D. M., & Sunarko, B. (2022). Analisis Intensitas Konsumsi Energi Listrik dan Peluang Penghematan Energi Listrik pada Gedung C Kantor Sekretariat Daerah Kabupaten Semarang. *Jurnal ELTIKOM*, 6(1), 26–39. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v6i1.545>
- Tronchin, L., Manfren, M., & James, P. A. (2018). Linking design and operation performance analysis through model calibration: Parametric assessment on a Passive House building. *Energy*, 165, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.037>
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., & Zhang, G. (2022). Energy simulation and modeling for window system: A comparative study of life cycle assessment and life cycle costing. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129936. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129936>
- Vargas, G., Lawrence, R., & Stevenson, F. (2017). The role of lobbies: short-term thermal transitions. *Building Research & Information*, 45(7), 759–782. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1304095>
- Wang, L., Lee, E. W. M., Yuen, R. K. K., & Feng, W. (2019). Cooling load forecasting-based predictive optimisation for chiller plants. *Energy and Buildings*, 198, 261–274. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.016>
- Webb, D., & Kneifel, J. (2020). *Gas vs Electric: Sustainability Performance of Heating Fuel Options in the NIST NZERTF*. National Institute of Standards and Technology. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.2120.pdf>
- Yang, X., Ergan, S., & Knox, K. (2015). Requirements of Integrated Design Teams While Evaluating Advanced Energy Retrofit Design Options in Immersive Virtual Environments. *Buildings*, 5(4), 1302–1320. <https://doi.org/10.3390/buildings5041302>
- Yik, F. W. H., Lai, J. H. K., Fong, N. K., Leung, P. H. M., & Yuen, P. L. (2012). A case study on the application

of air- and water-cooled oil-free chillers to hospitals in Hong Kong. In *Building Services Engineering Research and Technology* (Vol. 33, Issue 3, pp. 263–279).

<https://doi.org/10.1177/0143624411408034>

Yun, G. Y., & Kim, J. T. (2014). Creating Sustainable Building through Exploiting Human Comfort. *Energy Procedia*, 62, 590–594.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.421>

Zachariah, A., Rao, P., Corn, B., & Davison, D. (2022). *Zero Shot Learning for Predicting Energy Usage of Buildings in Sustainable Design*. arXiv.

<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2202.05206>

Zhao, H., & Magoulès, F. (2012). A review on the prediction of building energy consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3586–3592.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.049>