JURNAL ILMIAH SISTEM INFORMASI (JUSI)
VOL 4, No. 1, Januari 2025, pp. 58 - 69
p-ISSN : 2803-1507 (media cetak) | e-ISSN : 2803-1531 (media online)
Link Publikasi: https://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JUISI/issue/view/126

Systematic Literature Review: Energy Metrics, Trade-Offs, and Best Practices in Green IT and Green Software

Nanik Qosidah*[1]
[1] Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia
Jl. Majapahit No.605, Pedurungan Kidul, Kec. Pedurungan, Kota Semarang, Jawa Tengah 50192
e-mail*[1]: nanik@stekom.ac.id

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 22-11-2024
Revised: 20-12-2024
Accepted: 02-01-2025
Published: 21-01-2025

ABSTRACT

The rapid growth of information technology, including cloud computing, the Internet of Things, and artificial intelligence, is driving increased energy consumption and carbon emissions in the technology sector. A report by the International Energy Agency (IEA) projects that global data center electricity consumption will more than double, reaching approximately 945 TWh by 2030, or about 3% of global electricity consumption. A Deloitte study even estimates that data centers could contribute around 4% by 2030, primarily driven by the growing use of artificial intelligence. Besides physical infrastructure, software also significantly contributes to energy consumption, necessitating Green IT and Green Software approaches to reduce environmental impact. This research aims to identify and classify energy metrics used in the literature, analyze the trade-offs between energy consumption and system performance, and summarize relevant best practices for application in industrial settings. This research uses the Systematic Literature Review (SLR) method, referring to the Kitchenham protocol. The search was conducted on the IEEE Xplore, ACM Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, and arXiv databases for articles published between 2021 and 2025 that included empirical data or conceptual models related to the energy efficiency of information systems. From the screening process, many articles were obtained and analyzed thematically. The research results show that energy metrics vary from hardware-based measurements (power meter) to estimation models (GSMM, GSMP). A trade-off was also found between energy savings and performance, necessitating a multi-objective optimization approach. This research contributes by providing a framework for classifying energy metrics, visualizing measurement method trends, and offering methodological recommendations that can be integrated into industrial practice. The implications of this research are to support digital sustainability efforts while simultaneously reducing the organization's operational costs.

Keywords: *Green IT, Green Software, Energy Efficiency, Performance Trade-off, Best Practices*

DOI: https://doi.org/10.51903/zezhdt51

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Abstrak

Pertumbuhan pesat teknologi informasi, termasuk komputasi awan, Internet of Things, dan kecerdasan buatan, mendorong peningkatan konsumsi energi dan emisi karbon di sektor teknologi. Laporan International Energy Agency (IEA) memproyeksikan bahwa konsumsi listrik pusat data global akan meningkat lebih dari dua kali lipat, mencapai sekitar 945 TWh pada 2030 atau sekitar 3% dari konsumsi listrik global. Studi Deloitte bahkan memperkirakan kontribusi pusat data dapat mencapai sekitar 4% pada 2030, terutama dipicu oleh pertumbuhan penggunaan kecerdasan buatan. Selain infrastruktur fisik, perangkat lunak juga berkontribusi signifikan terhadap penggunaan energi, sehingga diperlukan pendekatan Green IT dan Green Software untuk menekan dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan metrik energi yang digunakan dalam literatur, menganalisis trade-off antara konsumsi energi dan performa sistem, serta merangkum praktik terbaik yang relevan untuk diterapkan di lingkungan industri. Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) dengan mengacu pada protokol Kitchenham. Pencarian dilakukan pada basis data IEEE Xplore, ACM Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, dan arXiv untuk artikel terbitan 2021–2024 yang memuat data empiris maupun model konseptual terkait efisiensi energi sistem informasi. Dari proses penyaringan, diperoleh sejumlah artikel yang dianalisis secara tematik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metrik energi bervariasi dari pengukuran berbasis hardware (power meter) hingga model estimasi (GSMM, GSMP). Ditemukan pula trade-off antara penghematan energi dan performa, sehingga diperlukan pendekatan optimasi multi-objektif. Penelitian ini berkontribusi dengan menyediakan kerangka klasifikasi metrik energi, visualisasi tren metode pengukuran, dan rekomendasi metodologis yang dapat diintegrasikan dalam praktik industri. Implikasi penelitian ini adalah mendukung upaya keberlanjutan digital sekaligus menekan biaya operasional organisasi.

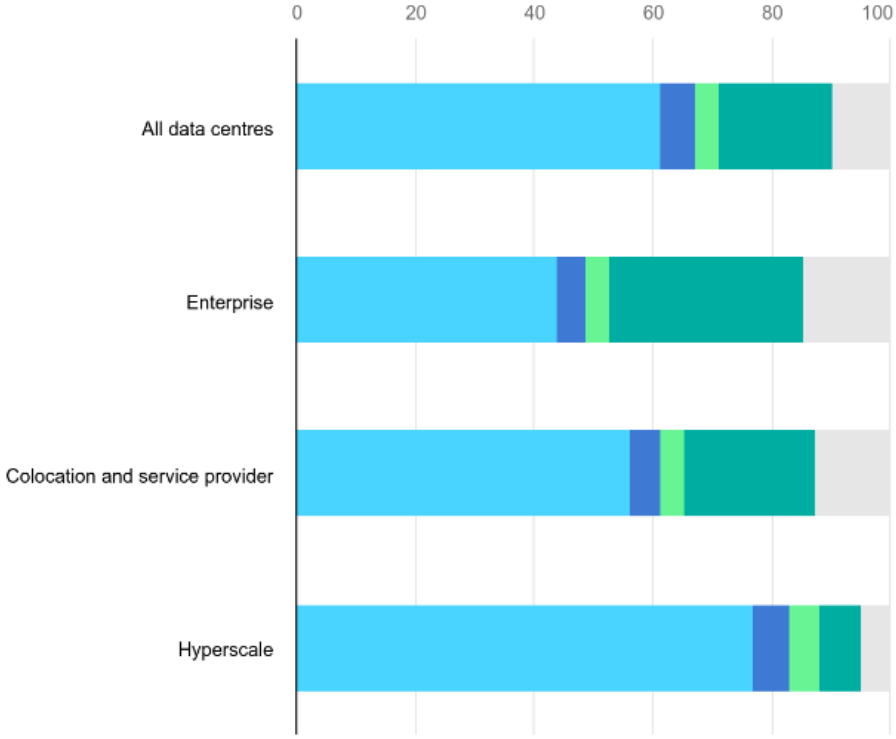
Kata Kunci: *Green IT, Perangkat Lunak Hijau, Efisiensi Energi, Trade-off Performa, Praktik Terbaik*.

1. PENDAHULUAN

Di era digital yang berkembang pesat, penggunaan teknologi informasi (TI) telah menjadi tulang punggung operasional berbagai organisasi, baik di sektor publik maupun swasta [1] . Sistem informasi, perangkat lunak, pusat data, dan infrastruktur digital lain semakin banyak permintaannya mulai dari penyimpanan data, komputasi awan [2], AI [3], hingga *Internet of Things* (IoT) [4]. Pertumbuhan ini membawa konsekuensi signifikan terhadap konsumsi energi dan emisi karbon di sektor TI [5]. Ketergantungan terhadap layanan digital semakin meningkat, terutama akibat kebutuhan akan kecepatan akses dan ketersediaan data secara real-time.

IEA memproyeksikan konsumsi listrik pusat data global akan lebih dari dua kali lipat, mencapai sekitar 945 TWh pada 2030, atau sekitar 3% dari konsumsi listrik global. *Data centre* akan menyumbang sekitar 10% dari pertumbuhan permintaan listrik global [6]. Lonjakan ini terutama dipicu oleh meningkatnya jumlah layanan berbasis cloud dan aplikasi intensif data yang berjalan sepanjang waktu. Distribusi konsumsi listrik berdasarkan jenis pusat data ditunjukkan pada Gambar 1, yang mengilustrasikan bahwa pusat data hiperskala mendominasi konsumsi energi global, diikuti pusat *data colocation, enterprise*, dan penyedia layanan lainnya.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531



Gambar 1. Distribusi konsumsi listrik berdasarkan jenis pusat data dan peralatan (IEA, 2024)

Selain infrastruktur fisik, perangkat lunak juga memiliki kontribusi terhadap konsumsi energi. Setiap baris kode, metode algoritmik, arsitektur perangkat lunak, dan teknik pengujian dapat mempengaruhi jumlah energi yang digunakan selama siklus hidupnya. Sayangnya, sebagian besar perangkat lunak yang ada saat ini masih "boros energi" karena desain yang kurang efisien dan minimnya metrik pengukuran energi yang konsisten [7]. Dengan meningkatnya kesadaran global terhadap keberlanjutan (*sustainability*), organisasi kini dituntut tidak hanya memperhatikan fungsi, performa, dan keamanan sistem informasi, tetapi juga dampak lingkungan yang ditimbulkannya [8].

Urgensi ini memunculkan berbagai penelitian yang berfokus pada *Green IT* dan *Green Software* upaya mengurangi konsumsi energi dan emisi karbon dari sistem informasi. Fenomena nyata di lapangan menunjukkan masih ada kesenjangan antara teori dan implementasi. Misalnya, pengukuran energi perangkat lunak belum konsisten, sehingga hasil penelitian sulit dibandingkan [9]; *trade-off* antara performa dan efisiensi energi sering kali belum dipahami secara mendalam [10]; dan banyak organisasi yang belum memasukkan metrik energi ke dalam proses desain maupun pengujian perangkat lunak.

Sejumlah penelitian utama yang relevan telah dilakukan untuk mengatasi tantangan tersebut. Beberapa fokus pada pengembangan model pengukuran energi perangkat lunak seperti *Green Software Measurement Model* (GSMM) [11], sementara yang lain menguji konsumsi energi pada aplikasi *deep learning* di infrastruktur berbeda [12] [13], menganalisis *trade-off* performa-energi pada komputasi paralel [14], hingga mengidentifikasi faktor organisasi dalam penerapan proses pengembangan perangkat lunak hijau [15]. Setiap pendekatan membawa implikasi yang berbeda terhadap praktik pengembangan dan evaluasi efisiensi perangkat lunak di berbagai konteks. Rangkuman penelitian-penelitian utama tersebut dapat dilihat pada Tabel 1, yang memberikan gambaran menyeluruh mengenai fokus, metode, dan kontribusi setiap studi terhadap bidang *Green Software*.

Tabel 1. Penelitian Utama terkait Green IT dan Green Software

No	Judul / Penulis	Intisari Relevansi
1	Development and evaluation of a reference measurement model for assessing the resource and energy efficiency of software products and components — GSMM [11]	Model acuan pengukuran, membantu standardisasi metrik energi perangkat lunak.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

2	Green AI: a Preliminary Empirical Study on Energy Consumption in DL Models Across Different Runtime Infrastructures [12]	Menguji dampak runtime & hardware berbeda terhadap konsumsi energi model AI.
3	C6EnPLS: A High-Performance Computing Job Dataset for the Analysis of Linear Solvers' Power Consumption [16]	Memberikan wawasan tentang hubungan performa dan konsumsi energi.
4	Green Software Process Factors: A Qualitative Study [17]	Meneliti faktor proses software dari sisi green, meliputi teknis & organisasi.
5	GSMP: Green Software Measurement Process [18]	Panduan proses untuk mengukur efisiensi energi software dengan valid dan reliabel.
6	Green Measurements for Software Product Based on Sustainability Dimensions [19]	Mengidentifikasi metrik-metrik hijau dalam produk software dari dimensi keberlanjutan.
7	How Software Design Affects Energy Performance: A Systematic Literature Review [20]	Fokus pada bagaimana desain software mempengaruhi konsumsi energi.
8	Estimating the Energy Footprint of Software Systems: a Primer [21]	Pendekatan awal dan isu metodologi dalam estimasi jejak energi software.
9	EnergiBridge: Empowering Software Sustainability through Cross-Platform Energy Measurement [22]	Alat pengukuran energi lintas platform; mengurangi hambatan praktis.
10	A review of Green Artificial Intelligence: Towards a more Sustainable Future [23]	Mereview literatur terkini tentang green software dan implikasinya terhadap efisiensi energi.

Meskipun penelitian-penelitian ini telah memberikan kontribusi penting, masih ditemukan kesenjangan yang perlu dijembatani. Belum ada standar metrik energi yang digunakan secara konsisten di seluruh studi, sehingga hasil pengukuran sulit dibandingkan secara langsung. Sebagian besar penelitian masih bersifat laboratorium atau simulasi kecil, belum banyak studi yang mengamati implementasi *Green Software* di skala industri dengan beban kerja nyata. Dan aspek non-teknis seperti kebijakan organisasi, biaya implementasi, dan kesadaran pengembang masih kurang mendapat perhatian dalam literatur.

Berdasarkan identifikasi gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan metrik energi yang umum digunakan dalam literatur *Green IT* dan *Green Software*, menganalisis *trade-off* antara efisiensi energi, performa, dan biaya, serta merangkum praktik terbaik yang dapat diterapkan di lingkungan industri. Kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan kerangka klasifikasi metrik energi yang komprehensif, menyajikan wawasan mendalam mengenai *trade-off* performa-energi pada sistem informasi skala organisasi, dan memberikan rekomendasi metodologis agar pengukuran energi menjadi lebih transparan dan reprodusibel. Studi ini juga mempertimbangkan konteks penerapan nyata di organisasi, termasuk keterbatasan sumber daya dan kebutuhan adaptasi terhadap standar industri yang ada. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan praktis bagi peneliti, pengembang, dan pengambil kebijakan dalam mengintegrasikan prinsip keberlanjutan pada pengembangan sistem informasi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Konseptualisasi Green IT dan Green Software*

Green IT menjadi kerangka penting dalam upaya menanggulangi dampak lingkungan dari teknologi informasi, meliputi efisiensi pusat data, manajemen sumber daya, hingga daur hidup perangkat keras [24]. Perkembangan wacana ini memicu lahirnya *Green Software Engineering*, yaitu disiplin yang menitikberatkan pada efisiensi energi pada tingkat perangkat lunak, baik dari sisi desain arsitektur, algoritma, maupun implementasi kode [25]. Pendekatan ini menegaskan bahwa perangkat lunak bukan hanya artefak fungsional, tetapi juga entitas yang memiliki dampak lingkungan terukur. Transisi menuju pendekatan ini dipicu oleh kekhawatiran terhadap meningkatnya jejak karbon digital yang dihasilkan oleh sistem informasi modern.

Di ranah akademik, kerangka kerja seperti GSMM dikembangkan untuk memberikan panduan sistematis dalam menilai konsumsi energi perangkat lunak [26]. Model ini mencakup definisi objek pengukuran, tujuan, metrik, setup eksperimen, hingga metode evaluasi, sehingga mendorong keterbandingan antar penelitian. Keberadaan model ini menjadi pijakan teoritis bagi banyak studi berikutnya yang berupaya menghubungkan konsep keberlanjutan dengan praktik rekayasa perangkat lunak secara kuantitatif. Penerapan model ini juga memungkinkan validasi silang antara hasil studi, sehingga memperkuat generalisasi temuan.

2.2. *Pengukuran Energi dan Standarisasi Metrik*

Penelitian terkait pengukuran energi perangkat lunak menunjukkan keragaman metode yang signifikan. Beberapa studi hanya mengukur konsumsi daya CPU, sementara yang lain menggunakan data total listrik atau estimasi berbasis model [27] [28]. Perbedaan ini menyebabkan hasil antar penelitian sulit dibandingkan secara langsung, sehingga menghambat pembentukan konsensus tentang praktik terbaik. Untuk menjawab

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

tantangan tersebut, berbagai inisiatif seperti GSMP dikembangkan guna mendefinisikan prosedur pengukuran yang lebih transparan dan dapat direplikasi.

Selain pendekatan konseptual, sejumlah alat praktis seperti *EnergiBridge* dikembangkan untuk memungkinkan pengukuran lintas platform dengan tingkat granularitas tinggi [22]· Meskipun inovasi ini menjanjikan, adopsinya di industri masih terbatas. Sebagian besar perusahaan belum mengintegrasikan metrik energi ke dalam pipeline CI/CD atau sistem pelaporan kualitas, sehingga praktik pengukuran masih sporadis. Hal ini menandakan perlunya panduan yang mudah diterapkan oleh praktisi agar pengukuran energi dapat menjadi bagian dari praktik rekayasa perangkat lunak sehari-hari.

2.3. *Trade-off Performa dan Efisiensi Energi*

Hubungan antara performa sistem dan efisiensi energi merupakan area penelitian yang menarik sekaligus kompleks. Optimalisasi kecepatan eksekusi sering kali meningkatkan konsumsi energi, menciptakan dilema desain bagi pengembang [29]. Studi dalam konteks *High Performance Computing* (HPC) menemukan bahwa konfigurasi yang mencapai performa maksimal seringkali menghasilkan konsumsi daya tertinggi. Temuan ini memunculkan konsep energy-delay product dan analisis pareto untuk mencari keseimbangan antara waktu eksekusi dan efisiensi energi.

Di ranah kecerdasan buatan, penelitian *Green AI* mengungkapkan bahwa pilihan infrastruktur runtime dan hardware memengaruhi jejak energi serta latensi model [30]. Hal ini mengindikasikan bahwa keberlanjutan tidak hanya ditentukan oleh efisiensi algoritmik, tetapi juga oleh ekosistem tempat model dijalankan. Pemilihan perangkat keras dengan efisiensi energi tinggi dapat memberikan dampak signifikan terhadap total konsumsi energi selama pelatihan dan inferensi model. Dengan demikian, *trade-off* antara performa dan energi menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan pada saat perancangan sistem, terutama dalam aplikasi real-time dan layanan skala besar.

2.4. *Faktor Organisasi dan Proses Pengembangan*

Selain faktor teknis, literatur menyoroti pentingnya dimensi organisasi dalam keberhasilan penerapan prinsip green. Studi empiris menunjukkan bahwa keberhasilan inisiatif *Green Software* dipengaruhi oleh dukungan manajemen, kesadaran tim pengembang, serta budaya organisasi [31]. Integrasi keberlanjutan ke dalam proses pengembangan membutuhkan kebijakan internal, pelatihan, dan mekanisme insentif yang mendorong adopsi praktik hemat energi. Tanpa dukungan struktural, upaya teknis cenderung terfragmentasi dan tidak berkelanjutan dalam jangka panjang.

Wawancara dengan praktisi industri menemukan hambatan seperti kurangnya alat ukur yang mudah digunakan, keterbatasan waktu dalam proyek, dan ketidakjelasan manfaat jangka pendek. Faktor-faktor ini menunjukkan bahwa meskipun solusi teknis tersedia, keberlanjutan tidak akan tercapai tanpa strategi perubahan organisasi yang komprehensif [32]. Pendekatan sosioteknis yang menggabungkan inovasi teknis dengan intervensi manajerial menjadi kunci untuk mendorong adopsi secara luas [33]. Hal ini menunjukkan perlunya pendekatan kolaboratif antara tim teknis dan manajerial dalam mendesain strategi keberlanjutan.

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. *Desain Penelitian*

Penelitian ini dirancang dengan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menyajikan gambaran menyeluruh tentang tren, temuan, dan kesenjangan penelitian dalam bidang *Green IT* dan *Green Software*. Pendekatan ini dipilih karena memberikan prosedur terstruktur yang membantu peneliti menemukan, mengevaluasi, dan mensintesis hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan secara transparan dan reprodusibel. Dengan cara ini, penelitian yang dihasilkan bukan sekadar ringkasan, melainkan peta pengetahuan yang memudahkan pemahaman perkembangan konsep efisiensi energi dalam sistem informasi. Metode ini memfasilitasi identifikasi pola dan variasi yang terjadi dalam berbagai studi yang relevan.

SLR dijalankan berdasarkan protokol yang mengacu pada pedoman Kitchenham, yang menekankan perencanaan, pelaksanaan, dan pelaporan secara sistematis. Protokol ini memastikan bahwa proses pengumpulan literatur tidak bersifat subjektif, melainkan dapat ditelusuri kembali dan diverifikasi oleh peneliti lain. Pendekatan ini juga memungkinkan temuan penelitian digunakan sebagai landasan pengembangan teori maupun praktik di masa mendatang. Penggunaan protokol tersebut menjaga konsistensi dan keteraturan selama proses penelitian berlangsung.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

3.2. *Strategi Pencarian Literature*

Tahap pencarian literatur dimulai dengan perumusan kata kunci yang relevan seperti *Green IT, Green Software, Energy Efficiency in Information Systems,* dan *Sustainable Software Development*. Kata kunci tersebut dikombinasikan menggunakan operator logis untuk memperluas hasil pencarian sekaligus menjaga relevansi. Pencarian dilakukan pada basis data akademik yang kredibel seperti IEEE Xplore, ACM Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, dan arXiv sehingga diperoleh sumber yang memiliki standar ilmiah tinggi. Strategi ini membantu memperluas cakupan literatur tanpa mengurangi kualitas sumber yang diakses.

Setiap artikel yang ditemukan ditinjau kesesuaiannya dengan fokus penelitian. Hanya artikel yang memuat data empiris atau model konseptual tentang efisiensi energi, dipublikasikan antara 2021 hingga 2024, dan tersedia dalam bahasa Inggris yang dipertahankan untuk dianalisis lebih lanjut. Proses ini bertujuan memastikan literatur yang dikaji mencerminkan kondisi terkini dan relevan dengan kebutuhan penelitian. Seleksi ini menjaga agar analisis hanya menggunakan sumber yang paling relevan dan mutakhir.

3.3. *Penyaringan dan Seleksi*

Proses penyaringan dilakukan secara bertahap untuk memastikan hanya studi yang memenuhi kriteria yang diikutsertakan. Tahap awal melibatkan pemeriksaan judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian dengan fokus penelitian. Artikel yang lolos tahap awal kemudian dibaca secara penuh untuk memverifikasi isi, metodologi, dan kontribusi terhadap topik efisiensi energi. Pendekatan bertahap ini membantu mengeliminasi studi yang kurang relevan sebelum analisis mendalam.

Hasil akhir dari penyaringan ditampilkan dalam sebuah alur visual yang mengacu pada pendekatan PRISMA. Gambar 2 memperlihatkan tahapan mulai dari identifikasi artikel di database, proses penyaringan, pengecekan kelayakan, hingga penentuan artikel yang diikutsertakan dalam sintesis kualitatif. Visualisasi ini membantu pembaca memahami jumlah artikel yang tersaring pada setiap tahap serta alasan pengecualiannya. Setiap tahap tersebut memiliki kriteria khusus yang harus dipenuhi agar artikel dapat lolos ke tahap berikutnya.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531



Gambar 2. Langkah-Langkah Systematic Literature Review (SLR)

3.4. *Ekstraksi dan Sintesis Data*

Data dari setiap artikel yang terpilih diekstraksi secara sistematis menggunakan lembar kerja yang telah disiapkan. Informasi yang dikumpulkan meliputi identitas publikasi, metode penelitian, konteks aplikasi, metrik energi yang digunakan, serta hasil utama. Pendekatan ini memastikan setiap artikel dianalisis secara konsisten sehingga memungkinkan perbandingan yang setara antarstudi. Setiap tahap tersebut memiliki kriteria khusus yang harus dipenuhi agar artikel dapat lolos ke tahap berikutnya.

Hasil ekstraksi kemudian dianalisis menggunakan teknik sintesis tematik. Temuan dari literatur dikelompokkan ke dalam tema-tema yang mencerminkan tren riset, praktik pengembangan, dan *pola trade-off* antara performa, biaya, serta keberlanjutan. Dengan cara ini, penelitian tidak hanya menyajikan daftar temuan, tetapi juga menghubungkannya secara konseptual untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam. Sintesis tematik memudahkan identifikasi isu utama yang berkembang dalam bidang penelitian ini.

3.5. *Validitas dan Reliabilitas*

Upaya menjaga validitas dilakukan melalui triangulasi sumber dengan menggunakan lebih dari satu basis data agar hasil yang diperoleh lebih komprehensif. Setiap keputusan penyaringan dan inklusi didokumentasikan dengan cermat sehingga dapat ditelusuri kembali oleh peneliti lain. Dokumentasi ini berfungsi sebagai audit trail yang mendukung transparansi penelitian. Selain itu, reliabilitas hasil diperkuat dengan melakukan diskusi bersama rekan peneliti untuk memeriksa konsistensi dalam proses seleksi artikel dan penarikan kesimpulan. Langkah ini mengurangi bias individual dan meningkatkan keandalan interpretasi hasil yang disajikan dalam penelitian ini.

3.6. *Etika Penelitian*

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Aspek etika dijaga dengan mengutamakan integritas akademik selama proses penelitian. Semua artikel yang digunakan diperoleh secara sah dari basis data resmi dan dikutip sesuai standar IEEE, sehingga terhindar dari pelanggaran hak cipta maupun plagiarisme. Karena penelitian ini tidak melibatkan subjek manusia atau hewan, risiko etis dapat dikatakan minimal. Namun, prinsip keterbukaan dan akurasi tetap dijaga dengan menyertakan seluruh langkah metodologis dan referensi yang digunakan agar penelitian ini dapat direplikasi di masa mendatang.

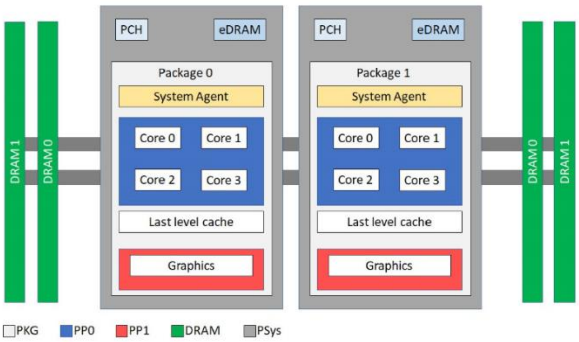
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 *Klasifikasi Metrik Energi*

Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa metrik energi yang digunakan dalam penelitian *Green IT* dan *Green Software* sangat beragam, baik dari sisi metode pengukuran maupun konteks penerapan. Beberapa penelitian menggunakan alat ukur fisik seperti *power meter*, yang diperlihatkan pada Gambar 3, untuk menangkap konsumsi daya secara langsung. Pendekatan lain memanfaatkan metode berbasis perangkat lunak, seperti *Intel RAPL* yang divisualisasikan pada Gambar 4, dan *GreenProfiler* yang divisualisasikan pada Gambar 5, yang memberikan data lebih granular pada level CPU, thread, atau modul perangkat lunak. Selain itu, metode berbasis model seperti *GSMM* dan *GSMP* mulai populer karena memudahkan organisasi mengestimasi konsumsi energi tanpa harus melakukan pengukuran real-time yang kompleks. Metode-metode ini memungkinkan penyesuaian teknik pengukuran sesuai kebutuhan dan sumber daya yang tersedia.



Gambar 3. Power Meter



Gambar 4. Intel RAPL



Gambar 5. GreenProfiler Software

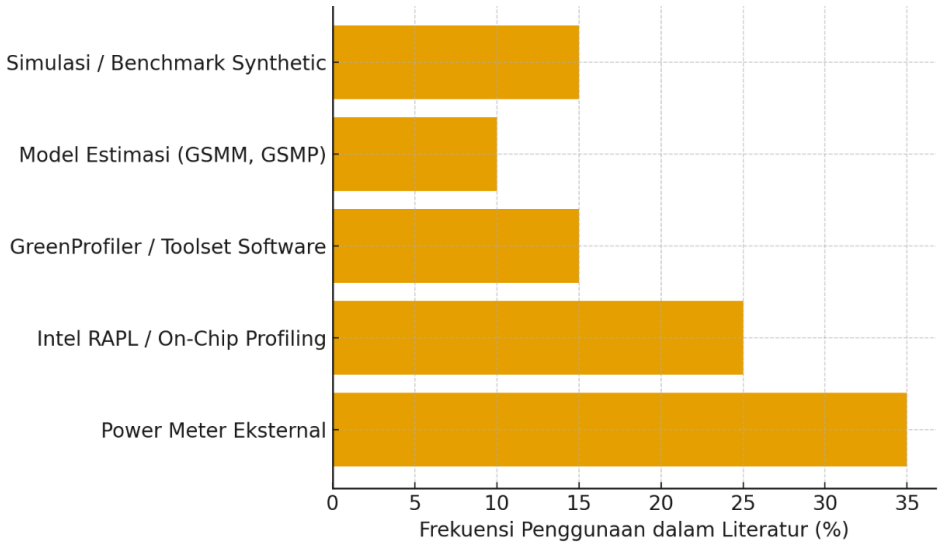
Keragaman ini memberikan gambaran bahwa tidak ada satu metode tunggal yang mendominasi seluruh penelitian, melainkan setiap pendekatan memiliki keunggulan sesuai konteks. Sebagai contoh, pengukuran berbasis *power meter* lebih cocok untuk sistem berskala besar seperti data center, sedangkan profiling tools lebih praktis digunakan dalam penelitian pengembangan aplikasi atau eksperimen laboratorium. Untuk memberikan pandangan yang lebih sistematis, Tabel 2 menyajikan klasifikasi metrik energi berdasarkan metode pengukuran, jenis metrik yang dihasilkan, dan domain aplikasinya. Tabel tersebut memudahkan untuk memahami perbedaan karakteristik masing-masing metode.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Tabel 2. Klasifikasi Metrik Energi yang Digunakan dalam Literatur

Metode Pengukuran	Jenis Metrik yang Dihasilkan	Domain Aplikasi	Kelebihan	Keterbatasan
Power Meter (Hardware-based)	Konsumsi daya real-time (Watt), energi total (kWh)	Data center, server farm, edge computing	Akurasi tinggi, cocok untuk sistem besar	Biaya perangkat tinggi, sulit digunakan pada sistem skala kecil
RAPL (Running Average Power Limit)	Perkiraan konsumsi energi per komponen CPU/GPU	Penelitian efisiensi prosesor, HPC	Resolusi tinggi per komponen, tanpa perangkat tambahan	Hanya mendukung arsitektur tertentu (Intel)
Software Profiler (GreenProfiler, JProfiler, Perf)	Profil penggunaan CPU, memori, thread, estimasi energi	Pengembangan aplikasi, eksperimen laboratorium	Mudah digunakan, murah, hasil cepat	Akurasi bergantung pada model estimasi energi
Simulasi & Model Matematis	Estimasi energi, prediksi konsumsi	Smart grid, IoT, arsitektur sistem	Dapat digunakan sebelum implementasi	Bergantung pada kualitas model dan asumsi
OS-Level Logging / Telemetri	Utilisasi sumber daya, log konsumsi daya perangkat	Mobile computing, embedded system	Terintegrasi dengan sistem, overhead rendah	Detail terbatas, kurang akurat dibanding pengukuran langsung

Selain klasifikasi dalam bentuk Tabel, penelitian ini juga menyajikan gambaran visual agar pola penggunaan metode lebih mudah dipahami. Gambar 6 memperlihatkan proporsi penggunaan metode pengukuran energi dalam literatur, yang menunjukkan bahwa metode berbasis *power meter* dan *profiling tools* mendominasi, sedangkan model estimasi dan simulasi mulai mendapatkan perhatian sebagai solusi yang lebih fleksibel dan ekonomis. Visualisasi ini membantu pembaca memahami tren penelitian sekaligus peluang untuk eksplorasi metode baru di masa depan.



Gambar 6. Proporsi Penggunaan Metode Pengukuran Energi dalam Literatur

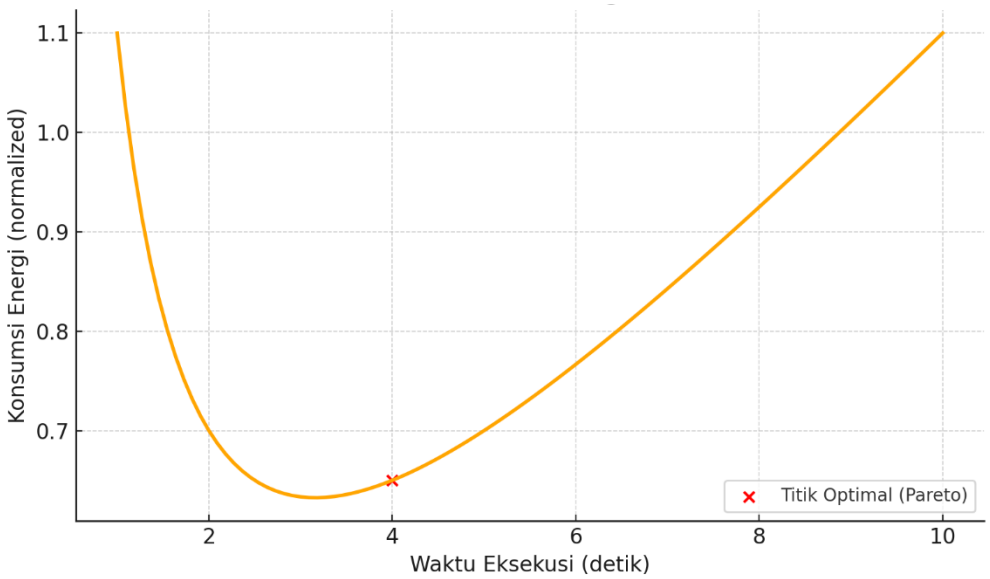
4.2 *Analisis Trade-Off Energi dan Performa*

Temuan literatur mengindikasikan adanya dilema antara penghematan energi dan performa sistem. Beberapa penelitian melaporkan bahwa upaya mengurangi konsumsi energi melalui teknik *underclocking* atau task *scheduling* hemat daya berdampak pada peningkatan waktu eksekusi, yang pada akhirnya dapat mengurangi pengalaman pengguna atau throughput sistem. Sebaliknya, optimasi untuk performa maksimum seringkali meningkatkan konsumsi energi, terutama pada sistem high-performance computing atau machine learning training yang menggunakan GPU intensif. Perlu adanya kompromi yang cermat antara kedua aspek untuk mencapai efisiensi yang optimal.

Analisis ini menggarisbawahi pentingnya pemilihan strategi optimasi yang seimbang. Pendekatan berbasis

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

multi-objective optimization yang menggabungkan metrik energi dan performa semakin banyak direkomendasikan dalam penelitian terkini. Gambar 7 menampilkan *kurva trade-off* yang dihasilkan dari kompilasi data literatur, menunjukkan hubungan non-linear antara efisiensi energi dan waktu eksekusi. Kurva ini membantu menvisualisasikan titik optimal yang sering dijadikan acuan oleh peneliti. Kurva ini memberikan insight tentang titik keseimbangan antara konsumsi energi dan performa sistem.



Gambar 7. Kurva Trade-off Energi vs Waktu Eksekusi

4.3 *Praktik Terbaik dan Green IT dan Green Software*

Selain mengidentifikasi metrik dan *trade-off*, SLR ini menemukan praktik terbaik yang konsisten diusulkan oleh berbagai penelitian. Praktik tersebut mencakup desain perangkat lunak yang efisien secara energi, penerapan *code profiling* untuk menemukan hotspot konsumsi daya, serta pemanfaatan sumber energi terbarukan untuk pusat data. Penerapan *feedback loop* berbasis metrik energi juga disarankan agar pengembang dapat memantau dampak keputusan desain sepanjang siklus hidup perangkat lunak. Penerapan praktik ini mendorong pengembangan perangkat lunak yang tidak hanya efektif tetapi juga berkelanjutan.

Praktik ini tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga mendukung inisiatif keberlanjutan di tingkat organisasi. Dengan mengadopsi praktik ini, perusahaan dapat mengurangi jejak karbon digital sekaligus menekan biaya operasional. Tabel 3 memuat ringkasan praktik terbaik yang ditemukan dari literatur, lengkap dengan referensi penelitian pendukung. Dokumentasi praktik tersebut menjadi acuan penting bagi pengembangan standar di bidang Green IT dan Green Software.

Tabel 3. Praktik Terbaik dalam Green IT dan Green Software

Praktik Terbaik	Deskripsi	Dampak
Desain Perangkat Lunak Hemat Energi	Mengoptimalkan algoritma, mengurangi kompleksitas komputasi, dan meminimalkan pemanggilan fungsi berulang.	Menurunkan konsumsi daya CPU, meningkatkan efisiensi aplikasi.
Code Profiling & Hotspot Analysis	Menggunakan profiler seperti GreenProfiler atau JProfiler untuk mengidentifikasi bagian kode yang paling boros energi.	Mengarahkan upaya optimasi ke area paling kritis, mengurangi energi tanpa mengorbankan fungsionalitas.
Virtualisasi & Containerisasi	Mengkonsolidasikan workload pada server fisik menggunakan VM atau container untuk meningkatkan utilisasi sumber daya.	Mengurangi jumlah server aktif, menurunkan konsumsi listrik pusat data.
Pemanfaatan Energi Terbarukan	Mengintegrasikan sumber energi bersih (solar, angin) untuk operasi pusat data.	Mengurangi emisi karbon dan ketergantungan pada energi fosil.
Dynamic Power Management (DPM)	Mengatur frekuensi CPU/GPU, mematikan core tidak aktif, atau menggunakan sleep mode.	Menghemat daya saat beban rendah tanpa memengaruhi performa kritis.
Feedback Loop Berbasis Metrik Energi	Memantau metrik energi secara real-time selama pengembangan dan pengujian perangkat lunak.	Memberikan wawasan langsung bagi pengembang, mendukung *continuous improvement*.

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Green-aware CI/CD Pipeline	Menambahkan analisis energi dalam tahap *build* dan *test* pipeline.	Mengintegrasikan kesadaran energi dalam proses DevOps.

4.4 *Identifikasi Kesenjangan Penelitian*

Hasil SLR menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis pengukuran energi, sedangkan dimensi sosial, ekonomi, dan kebijakan masih jarang dieksplorasi. Kurangnya penelitian yang menghubungkan metrik energi dengan biaya ekonomi dan dampak keberlanjutan jangka panjang menjadi celah yang perlu diisi. Selain itu, masih sedikit penelitian yang menguji implementasi praktik *Green Software* pada skala industri besar dengan *dataset real-world*. Temuan ini menjadi landasan untuk penelitian lanjutan yang dapat mengintegrasikan metrik energi dengan indikator keberlanjutan yang lebih holistik, termasuk jejak karbon, biaya operasional, dan dampak sosial. Dengan mengisi kesenjangan ini, penelitian masa depan akan lebih relevan bagi pengambil keputusan di organisasi dan pembuat kebijakan.

4.5 *Diskusi*

Temuan SLR ini menegaskan bahwa penelitian *Green IT* dan *Green Software* masih sangat terfokus pada aspek teknis, sementara dimensi ekonomi dan sosial belum banyak dieksplorasi. Hal ini sejalan dengan temuan [34] [35] yang menyoroti kurangnya kajian holistik yang menghubungkan metrik energi dengan biaya operasional dan dampak keberlanjutan. Kajian literatur menunjukkan bahwa fokus pada aspek teknis meliputi pengukuran dan optimasi konsumsi energi, sedangkan aspek ekonomi dan sosial masih jarang mendapat perhatian secara mendalam. Dengan demikian, kontribusi utama studi ini adalah menyediakan klasifikasi sistematis metrik energi, mengidentifikasi praktik terbaik, serta memetakan kesenjangan penelitian yang dapat menjadi peta jalan bagi penelitian selanjutnya.

Implikasi praktis bagi industri di Indonesia cukup signifikan. Implementasi praktik terbaik yang diidentifikasi, seperti pemantauan metrik energi secara berkelanjutan dan integrasi *green-aware pipeline* dalam proses DevOps, dapat membantu perusahaan menekan biaya energi hingga 15–20% berdasarkan studi *benchmarking*. Namun, tantangan adopsi mencakup keterbatasan infrastruktur pemantauan, kesenjangan literasi digital, serta kurangnya insentif fiskal bagi perusahaan yang berinvestasi dalam inisiatif hijau. Dengan demikian penelitian mendatang perlu menggabungkan pendekatan teknis dan kebijakan secara simultan, termasuk mengeksplorasi model insentif pemerintah, regulasi energi hijau, dan analisis cost-benefit implementasi green software di skala nasional. Dengan demikian, penelitian akan lebih kontekstual bagi industri Indonesia dan mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 *Kesimpulan*

Penelitian ini telah melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) untuk memetakan perkembangan penelitian *Green IT* dan *Green Software*, khususnya terkait metrik energi, trade-off antara efisiensi energi dan performa, serta praktik terbaik yang direkomendasikan. Hasil sintesis menunjukkan bahwa metrik energi yang digunakan dalam literatur sangat bervariasi, mencakup pengukuran berbasis perangkat keras (power meter), perangkat lunak (Intel RAPL, GreenProfiler), hingga pendekatan berbasis model (GSMM, GSMP). Keragaman ini menegaskan pentingnya standardisasi agar hasil antar penelitian dapat dibandingkan secara konsisten. Pendekatan yang berbeda ini juga menunjukkan adanya kebutuhan untuk mempertimbangkan konteks penggunaan saat memilih metrik yang paling sesuai.

Analisis *trade-off* mengungkapkan bahwa upaya penghematan energi sering menimbulkan kompromi terhadap performa sistem, sehingga diperlukan strategi optimasi multi-objektif yang menyeimbangkan keduanya. Selain itu, praktik terbaik yang diidentifikasi seperti desain perangkat lunak hemat energi, *code profiling*, penggunaan energi terbarukan, dan integrasi *feedback loo*p berbasis metrik memberikan panduan praktis bagi organisasi untuk mengurangi jejak karbon digital sekaligus meningkatkan efisiensi operasional. Secara keseluruhan, penelitian ini berkontribusi dengan menyediakan kerangka klasifikasi metrik energi, visualisasi tren metode pengukuran, dan rekomendasi metodologis yang dapat digunakan oleh peneliti maupun praktisi untuk mengintegrasikan prinsip keberlanjutan ke dalam pengembangan sistem informasi. Berbagai teknik pengukuran dan optimasi terus dieksplorasi untuk meningkatkan efektivitas penerapan Green IT dan Green Software di berbagai bidang industri.

5.2 *Saran*

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar pengembangan standar metrik energi menjadi prioritas sehingga hasil pengukuran dari berbagai penelitian dapat dibandingkan secara konsisten. Upaya ini perlu dilakukan melalui kolaborasi antara akademisi, industri, dan lembaga standarisasi untuk mempercepat terciptanya panduan global yang dapat diadopsi secara luas. Penelitian lanjutan juga perlu menguji penerapan praktik *Green Software* pada skala industri dengan workload nyata, sehingga dapat mengidentifikasi hambatan praktis sekaligus menilai dampak ekonomi dan keberlanjutan jangka panjang. Proses pengembangan standar ini harus mempertimbangkan berbagai jenis perangkat dan lingkungan operasional agar dapat diterapkan secara universal.

Di sisi praktis, organisasi pengembang perangkat lunak dianjurkan untuk mengintegrasikan analisis energi ke dalam *pipeline continuous integration* dan *continuous deployment* (CI/CD) agar pengukuran energi menjadi bagian dari pengujian rutin dan pengambilan keputusan desain. Selain itu, penelitian di masa depan sebaiknya mengeksplorasi dimensi organisasi, perilaku tim, serta kebijakan manajemen yang mendukung adopsi praktik hemat energi, sehingga transformasi menuju *Green IT* tidak hanya bersifat teknis tetapi juga berkelanjutan secara budaya organisasi. Peneliti juga didorong untuk mengembangkan algoritma optimasi multi-objektif yang mampu menyeimbangkan konsumsi energi, performa, dan biaya operasional, terutama pada sistem komputasi berskala besar seperti *high-performance computing* dan pelatihan model AI. Penggunaan alat monitoring energi yang terintegrasi juga dapat membantu tim dalam melakukan evaluasi berkelanjutan terhadap dampak perubahan kode terhadap konsumsi energi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Attabarok, S. Kamto Sudibyo, and M. Muthohir, "Sistem Informasi Pendaftaran Pasien Rawa Jalan Berbasis Web Menggunakan Metodehot Fit pada Puskesmas Subah Kabupaten Batang," *J. Ilm. Sist. Inf.*, vol. 4, no. 1, pp. 13–24, 2024, doi: 10.51903/f1sm4903.

[2] H. Jamaludin, U. Achlison, and N. Rokhman, "Enhancing AI Model Accuracy and Scalability Through Big Data and Cloud Computing," *J. Technol. Informatics Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 296–307, Dec. 2024, doi: 10.51903/jtie.v3i3.203.

[3] M. U. Dewi, L. Santoso, and A. B. Santoso, "Optimizing AI Performance in Industry: A Hybrid Computing Architecture Approach Based on Big Data," *J. Technol. Informatics Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 308–323, Dec. 2024, doi: 10.51903/jtie.v3i3.201.

[4] E. Azzah Rowani, D. Erwanto, and D. A. Widhining Kusumastutie, "Monitoring Kadar Oksigen Pasien COVID-19 Untuk Isolasi Mandiri Berbasis IoT," *J. Ilm. Sist. Inf.*, vol. 1, no. 3, pp. 14–24, 2022, doi: 10.51903/juisi.v1i3.379.

[5] H. U. Elsa and R. Utomo, "Menimbang Kesiapan Penerapan Carbon Pricing di Indonesia dengan Studi pada Kanada, Britania Raya, dan Australia," *J. PAJAK Indones. (Indonesian Tax Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 410–435, 2022, doi: 10.31092/jpi.v6i2.1866.

[6] I. E. Agency, "Energy and AI: Energy Demand from Data Centres, AI and Cryptocurrencies," Paris, 2024. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/energy-and-ai

[7] A. W. Safitri, S. N. Anisa, A. Al-habsyi, T. Elektro, and P. N. Jakarta, "Implementasi Algoritma Decision Tree dalam rangka Peningkatan Efisiensi Energi Penggunaan Beban Listrik dalam Ruangan," *Semin. Nas. Inov. Vokasi*, vol. 3, no. 1, pp. 506–515, 2022, doi: 10.30865/json.v4i3.5896.

[8] E. G. Margherita and A. M. Braccini, "Industry 4.0 Technologies in Flexible Manufacturing for Sustainable Organizational Value: Reflections from a Multiple Case Study of Italian Manufacturers," *Inf. Syst. Front.*, vol. 25, no. 3, pp. 995–1016, 2023, doi: 10.1007/s10796-020-10047-y.

[9] K. J. Hoffer and G. Savini, "Update on Intraocular Lens Power Calculation Study Protocols: The Better Way to Design and Report Clinical Trials," *Ophthalmology*, vol. 128, no. 11, pp. 115–120, 2021, doi: 10.1016/j.ophtha.2020.07.005.

[10] A. E. I. Brownlee, J. Adair, S. O. Haraldsson, and J. Jabbo, "Exploring the Accuracy - Energy Trade-off in Machine Learning," in *2021 IEEE/ACM International Workshop on Genetic Improvement (GI)*, 2021, pp. 11–18. doi: 10.1109/gi52543.2021.00011.

[11] A. Guldner *et al.*, "Development and Evaluation of a Reference Measurement Model for Assessing

the Resource and Energy Efficiency of Software Products and Components—Green Software Measurement Model (GSMM)," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 155, pp. 402–418, 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.01.033.

[12] N. Alizadeh and F. Castor, "Green AI: A Preliminary Empirical Study on Energy Consumption in DL Models Across Different Runtime Infrastructures," in *International Conference on AI Engineering - Software Engineering for AI*, 2024, pp. 134–139. doi: 10.1145/3644815.3644967.

[13] N. Tekin, A. Acar, A. Aris, A. S. Uluagac, and V. C. Gungor, "Energy Consumption of on-Device Machine Learning Models for IoT Intrusion Detection," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 21, pp. 1–13, 2023, doi: 10.1016/j.iot.2022.100670.

[14] A. Lastovetsky and R. R. Manumachu, "Energy-Efficient Parallel Computing: Challenges to Scaling," *Information*, vol. 14, no. 4, p. 248, 2023, doi: 10.3390/info14040248.

[15] F. M. Hejri, C. Valmohammadi, and M. Alborzic, "Analyzing the Factors Influencing Green Software Development Using a Hybrid Fuzzy Approach," *Ijnaa.Semnan.Ac.Ir*, vol. 14, pp. 2008–6822, 2023, doi: 10.22075/ijnaa.2022.26186.3259.

[16] M. Artioli *et al.*, "C6EnPLS: A High-Performance Computing Job Dataset for the Analysis of Linear Solvers' Power Consumption," *Futur. Internet*, vol. 17, no. 5, pp. 1–18, 2024, doi: 10.3390/fi17050203.

[17] S. R. Ahmad Ibrahim, J. Yahaya, and H. Sallehudin, "Green Software Process Factors: A Qualitative Study," *Sustainability*, vol. 14, no. 18, p. 11180, 2022, doi: 10.3390/su141811180.

[18] S. R. A. Ibrahim, J. Yahaya, and H. Sallehudin, "Green Software Process Based on Sustainability, Waste and Evaluation Theory Approach: The Conceptual Model," in *2022 IEEE International Conference on Computing, ICOCO 2022*, IEEE, 2022, pp. 283–288. doi: 10.1109/icoco56118.2022.10031699.

[19] K. Raisian, J. Yahaya, and A. Deraman, "Green Measurements for Software Product Based on Sustainability Dimensions," *Comput. Syst. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 271–288, 2022, doi: 10.32604/csse.2022.020496.

[20] D. Connolly Bree and M. Ó Cinnéide, "How Software Design Affects Energy Performance: A Systematic Literature Review," *J. Softw. Evol. Process*, vol. 37, no. 4, p. 70014, 2024, doi: 10.1002/smr.70014.

[21] T. Ardiyanto, C. Supriadi, and Priyadi, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Deteksi Dini Kebakaran Ruang Server Berbasis IoT," *J. Ilm. Sist. Inf.*, vol. 3, no. 3, pp. 35–45, 2024, doi: 10.51903/432ZJF74.

[22] J. Sallou, L. Cruz, and T. Durieux, "Perancangan User Interface Aplikasi Ourticle pada PT. Kreasi Teknologi Indonesia," *J. Ilm. Sist. Inf.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.51903/juisi.v2i1.521.

[23] V. Bolón-Canedo, L. Morán-Fernández, B. Cancela, and A. Alonso-Betanzos, "A Review of Green Artificial Intelligence: Towards a More Sustainable Future," *Neurocomputing*, vol. 599, p. 128096, 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.128096.

[24] F. Muttaqi, M. Alfaujianto, and A. Surahmat, "Perancangan Framework Green It Untuk Mengurangi Dampak Negatif Dalam Organisasi," *Fortech (Journal Inf. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 50–54, 2024, doi: 10.53564/fortech.v9i1.1561.

[25] Akoh Atadoga, Uchenna Joseph Umoga, Oluwaseun Augustine Lottu, and Enoch Oluwademilade Sodiya, "Tools, Techniques, and Trends in Sustainable Software engineering: A Critical Review of Current Practices and Future Directions," *World J. Adv. Eng. Technol. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 231–239, 2024, doi: 10.30574/wjaets.2024.11.1.0051.

[26] S. Berendes *et al.*, "Evaluating the Usability of Open Source Frameworks in Energy System Modelling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 159, p. 112174, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112174.

[27] K. M. U. Ahmed, M. H. J. Bollen, and M. Alvarez, "A Review of Data Centers Energy Consumption and Reliability Modeling," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 152536–152563, 2021, doi:

p-ISSN : 2803-1507 e-ISSN : 2803-1531

10.1109/access.2021.3125092.

[28] M. Koot and F. Wijnhoven, "Usage Impact on Data Center Electricity Needs: A System Dynamic Forecasting Model," *Appl. Energy*, vol. 291, p. 116798, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116798.

[29] S. Sugiarto and P. Anindita, "Optimalisasi Desain Arsitektural dengan Pendekatan Parametrik: Studi Kasus Efisiensi Struktur dalam Arsitektur Berkelanjutan," *J. Rekayasa Sipil dan Arsit.*, vol. 1, no. 1, pp. 73–85, 2024, doi: 10.51903/mfdg7781.

[30] A. Tabbakh, L. Al Amin, M. Islam, G. M. I. Mahmud, I. K. Chowdhury, and M. S. H. Mukta, "Towards Sustainable AI: a Comprehensive Framework for Green AI," *Discov. Sustain.*, vol. 5, no. 1, p. 408, 2024, doi: 10.1007/s43621-024-00641-4.

[31] S. Zaleski and R. Michalski, "Success Factors in Sustainable Management of it Service Projects: Exploratory Factor Analysis," *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4457, 2021, doi: 10.3390/su13084457.

[32] G. Sartika, "Peran Strategis Manajemen Sumber Daya Manusia dalam Kesuksesan Organisasi," *J. Ekon. dan Bisnis*, vol. 4, no. 1, pp. 177–188, 2024, doi: 10.55182/jtp.v4i1.386.

[33] F. Famila, G. A. K. Yudha, G. Bambulu, and M. Veranita, "Transformasi Manajemen Rumah Sakit di Era Digital: Tinjauan Literatur dalam Fokus Pengembangan Sumber Daya Manusia," *Blantika Multidiscip. J.*, vol. 3, no. 8, pp. 1120–1132, 2024, doi: 10.57096/blantika.v3i8.386.

[34] S. Yin, Y. Yu, and N. Zhang, "The Effect of Digital Green Strategic Orientation On Digital Green Innovation Performance: From the Perspective of Digital Green Business Model Innovation," *SAGE Open*, vol. 14, no. 2, pp. 1–23, 2024, doi: 10.1177/21582440241261130.

[35] E. Afum, Z. Sun, Y. Agyabeng-Mensah, and C. Baah, "Lean Production Systems, Social Sustainability Performance and Green Competitiveness: the Mediating Roles of Green Technology Adoption and Green Product Innovation," *J. Eng. Des. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 206–227, 2023, doi: 10.1108/jedt-02-2021-0099.