



Systematic Literature Review: Pemanfaatan Teknologi Internet of Things (IoT) dan Kecerdasan Buatan untuk Optimalisasi Efisiensi Energi pada Smart Home

Rizki Pangestu

¹Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Sebelas April Sumedang, Indonesia

Penulis Korespondensi: rizki.pangestu0901@gmail.com

Abstract. *The residential sector accounts for a significant portion of global energy consumption. The integration of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) presents a promising solution to mitigate energy waste through Smart Home Energy Management Systems (HEMS). This Systematic Literature Review (SLR) adheres to the PRISMA protocol to analyze 20 primary experimental studies published between 2021 and 2025. This study aims to evaluate the effective hardware architecture, the most accurate machine learning/optimization algorithms, and the measurable economic impact of these systems. The findings reveal that hybrid deep learning models, such as LSTM+GRU and Wavelet-LSTM-SVR, achieve high prediction accuracies exceeding 95%. For demand response scheduling, hybrid metaheuristic algorithms like HGPO and MMGO can reduce electricity costs by up to 57.8% and peak-to-average ratio (PAR) by 74.68% in cluster dwellings. Additionally, the integration of Large Language Models (LLMs) significantly enhances user compliance and sustained energy optimization. Overall, IoT and AI implementation in smart buildings is capable of reducing daily operational costs significantly. Unlike prior reviews that broadly cover HEMS trends, this study specifically bridges IoT hardware topology with state-of-the-art hybrid AI models for load scheduling. The 2021–2025 timeframe was selected to capture post-pandemic smart home adoption and the recent emergence of Large Language Model (LLM)-based energy assistants. These findings offer practical guidance for smart home developers, utility providers, and energy policymakers in designing cost-effective, AI-driven energy management systems. Future research should address data privacy and the scalability of peer-to-peer energy trading.*

Keywords: *Deep Learning; Energy Efficiency; Internet of Things; Smart Home; Systematic Literature Review.*

Abstrak. Sektor perumahan menyumbang porsi yang signifikan terhadap konsumsi energi global. Integrasi *Internet of Things* (IoT) dan Kecerdasan Buatan (AI) menghadirkan solusi menjanjikan untuk memitigasi pemborosan energi melalui *Home Energy Management Systems* (HEMS). *Systematic Literature Review* (SLR) ini mematuhi protokol PRISMA untuk menganalisis 20 studi primer eksperimental yang diterbitkan antara tahun 2021 hingga 2025. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi arsitektur perangkat keras yang efektif, algoritma machine learning/optimalisasi yang paling akurat, dan dampak ekonomi terukur dari sistem tersebut. Temuan menunjukkan bahwa model *deep learning* hibrida, seperti LSTM+GRU dan Wavelet-LSTM-SVR, mencapai akurasi prediksi beban melampaui 95%. Untuk penjadwalan demand response, algoritma metaheuristik hibrida seperti HGPO dan MMGO dapat memangkas biaya listrik hingga 57,8% dan *Peak-to-Average Ratio* (PAR) sebesar 74,68% pada skala klaster perumahan. Integrasi *Large Language Models* (LLM) juga secara signifikan meningkatkan kepatuhan pengguna terhadap optimasi energi. Secara keseluruhan, implementasi IoT dan AI pada bangunan pintar mampu memotong biaya operasional harian secara masif. Berbeda dari tinjauan sebelumnya yang membahas tren HEMS secara umum, penelitian ini secara khusus menjembatani topologi perangkat keras IoT dengan model AI hibrida mutakhir untuk penjadwalan beban. Rentang tahun 2021–2025 dipilih untuk menangkap adopsi smart home pasca-pandemi serta kemunculan asisten energi berbasis *Large Language Model* (LLM). Temuan ini memberikan panduan praktis bagi pengembang smart home, penyedia listrik, dan pembuat kebijakan energi. Penelitian di masa depan perlu mengatasi masalah privasi data dan skalabilitas perdagangan energi peer-to-peer.

Kata Kunci: Efisiensi Energi; *Internet of Things*; Kecerdasan Buatan; *Smart Home*; *Systematic Literature Review*.

1. LATAR BELAKANG

Sektor residensial atau perumahan merupakan salah satu penyumbang terbesar dalam total konsumsi energi global. Menurut tinjauan literatur yang dilakukan oleh (Bindushree, 2022), sektor perumahan menyumbang sekitar 20% hingga 40% dari total konsumsi energi nasional di berbagai negara sebuah proporsi yang signifikan mengingat jumlah rumah tangga terus bertambah seiring pertumbuhan populasi global. Urgensi ini semakin nyata ketika (Poyyamozhi dkk., 2024) mencatat bahwa tanpa intervensi teknologi manajemen energi yang tepat, konsumsi energi bangunan residensial berpotensi terus meningkat, sementara implementasi IoT justru terbukti mampu menurunkan konsumsi hingga 30% dan biaya operasional sebesar 20%. Data ini menegaskan bahwa solusi manajemen energi berbasis IoT bukan sekadar inovasi teknologi, melainkan kebutuhan mendesak untuk keberlanjutan energi jangka panjang. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan tuntutan pelestarian lingkungan, kebutuhan akan solusi manajemen energi yang efisien menjadi sangat krusial. Dalam dekade terakhir, konsep *Smart Home* yang ditenagai oleh teknologi *Internet of Things* (IoT) muncul sebagai fondasi penting untuk memonitor, mengendalikan, dan mengoptimalkan penggunaan energi secara seketika (*real-time*). Poyyamozhi dkk. (2024) dalam ulasan sistematisnya mengonfirmasi bahwa secara arsitektural, implementasi IoT berpotensi menurunkan konsumsi energi bangunan hingga 30% dan biaya operasional sebesar 20%.

Meskipun potensi IoT sangat masif, implementasi *Home Energy Management System* (HEMS) di dunia nyata menghadapi berbagai kompleksitas. Sejumlah penelitian *Systematic Literature Review* (SLR) sebelumnya telah mencoba memetakan isu ini. Sebuah SLR oleh Rehman dkk. (2025) memberikan analisis mendalam tentang tren HEMS, namun studi tersebut menemukan bahwa fokus penelitian masa lalu banyak mengabaikan elemen perilaku pengguna, perdagangan energi *peer-to-peer*, serta perlindungan data privasi. Di sisi lain, tinjauan oleh Ardabili dkk. (2022) serta Taboada-Orozco dkk. (2024) mengkaji pemanfaatan arsitektur komputasi awan dan algoritma *Machine Learning* untuk energi bangunan secara makro. Menanggapi integrasi IoT pada arsitektur ruang, tinjauan sistematis oleh (Sokienah, 2023) menegaskan bahwa penempatan sensor yang tepat pada desain interior perumahan sangat esensial untuk meningkatkan tata fungsionalitas ruang tanpa mengorbankan penghematan daya. Selain itu, seiring dengan pergeseran otomatisasi rumah menuju lingkungan cerdas (*Ambient Intelligence*) yang lebih berpusat pada kenyamanan pengguna, Y. Park & Han (2025) menegaskan bahwa efisiensi energi tidak boleh lagi mengorbankan kenyamanan penghuni.

Terdapat celah penelitian (*research gap*) yang nyata: Rehman dkk. (2025) memetakan tren HEMS secara luas namun tidak menyentuh topologi perangkat keras secara spesifik, sementara Taboada-Orozco dkk. (2024) berfokus pada Building Management Systems tanpa mengaitkannya dengan algoritma AI generatif terbaru seperti LLM. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menjembatani topologi IoT fisik dan model hibrida Kecerdasan Buatan mutakhir untuk manajemen penjadwalan. Untuk itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi tiga hal utama, yaitu: (1) arsitektur perangkat keras dan protokol komunikasi IoT yang paling efektif diterapkan pada *smart home*; (2) metode *machine learning* dan algoritma optimasi yang memberikan akurasi tertinggi untuk prediksi beban dan penjadwalan energi; serta (3) seberapa besar dampak implementasi teknologi ini terhadap metrik efisiensi energi dan reduksi biaya operasional.

2. KAJIAN TEORITIS

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang menghubungkan berbagai objek fisik—seperti sensor, aktuator, dan perangkat elektronik rumah tangga—ke dalam jaringan digital sehingga mampu saling bertukar data secara otomatis tanpa memerlukan intervensi manusia secara terus-menerus (Bindushree, 2022). Dalam konteks perumahan, penerapan IoT melahirkan konsep *Smart Home*, yaitu hunian yang dilengkapi sistem kendali cerdas untuk memantau dan mengatur penggunaan energi, keamanan, dan kenyamanan penghuni secara *real-time*. Salah satu komponen inti dari *smart home* adalah *Home Energy Management System* (HEMS), yaitu kerangka kerja perangkat keras dan perangkat lunak yang bertugas mengumpulkan data konsumsi energi, memprediksi pola pemakaian, dan mengoptimalkan penjadwalan perangkat listrik guna menekan biaya operasional (Poyyamozhi dkk., 2024).

Untuk mendukung fungsi prediksi pada HEMS, penelitian mutakhir banyak mengandalkan pendekatan *Machine Learning* (ML) dan *Deep Learning* (DL). Secara umum, *Machine Learning* merujuk pada algoritma yang mampu mempelajari pola dari data historis untuk menghasilkan prediksi, sedangkan *Deep Learning* adalah cabang ML yang memanfaatkan arsitektur jaringan saraf tiruan berlapis untuk menangkap pola kompleks dan non-linear, termasuk pola *time-series* pada data konsumsi listrik. Selain aspek prediksi, optimasi penjadwalan daya dikenal dengan istilah *Demand Response* (DR), yaitu strategi menggeser waktu operasional perangkat berdaya besar ke periode tarif listrik rendah atau ke saat pasokan energi terbaru sedang melimpah, dengan bantuan algoritma optimasi maupun metaheuristik.

Untuk mensintesis temuan-temuan yang tersebar pada berbagai penelitian primer tersebut secara sistematis dan meminimalkan bias, penelitian ini mengadopsi metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengikuti pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). PRISMA menyediakan kerangka kerja standar yang mencakup tahapan identifikasi, penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), hingga inklusi studi akhir, sehingga proses seleksi literatur dapat ditelusuri secara transparan dan direplikasi oleh peneliti lain.

Perkembangan terbaru menunjukkan peran *Large Language Models* (LLM) dalam manajemen energi rumah tangga semakin signifikan. Berbeda dengan model prediksi konvensional yang hanya menghasilkan angka, LLM seperti GPT mampu menerjemahkan data konsumsi energi menjadi narasi rekomendasi yang mudah dipahami pengguna awam, sehingga meningkatkan tingkat kepatuhan (*compliance*) terhadap saran penghematan energi (Gonçalves dkk., 2025). Kombinasi LLM dengan HEMS konvensional ini membuka paradigma baru interaksi manusia-mesin dalam pengelolaan energi, dari yang semula berbasis dashboard angka menjadi percakapan personal yang kontekstual.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metodologi *Systematic Literature Review* (SLR) yang dikembangkan secara ketat mengikuti pedoman standar PRISMA.

Strategi Pencarian (Identifikasi)

Pencarian literatur dilakukan melalui basis data akademis utama di bidang Informatika dan Teknik Elektro, yaitu IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar. Pencarian menggunakan *Boolean operator* dengan rumusan pencarian (*search string*) sebagai berikut: ("Internet of Things" OR "IoT") AND ("Efisiensi Energi" OR "Energy Efficiency" OR "Home Energy Management System" OR "HEMS") AND ("Smart Home" OR "Smart Building").

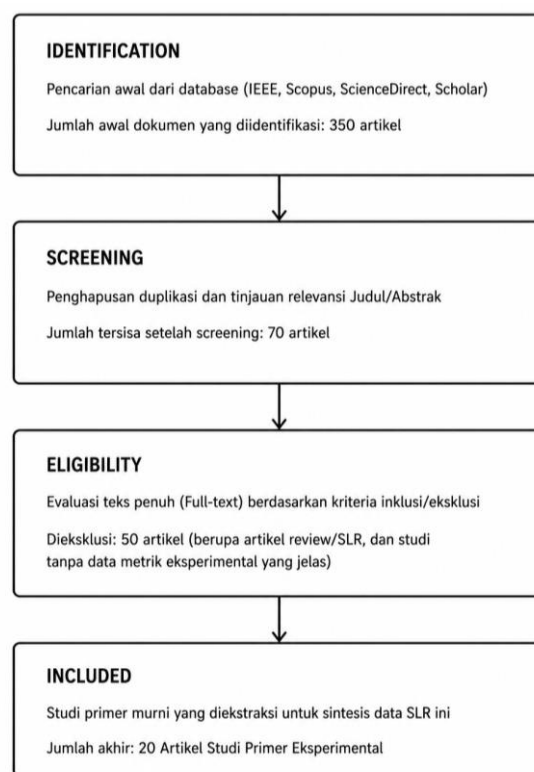
Kriteria Inklusi dan Eksklusi (*Screening & Eligibility*)

Kriteria inklusi (*Inclusion Criteria*) pada SLR ini meliputi: (1) Artikel jurnal penelitian primer eksperimental (*peer-reviewed*). (2) Dipublikasikan dalam rentang waktu tahun 2021 hingga 2025 untuk menjamin kebaruan teknologi. (3) Fokus mengeksplorasi arsitektur perangkat keras IoT, memuat pengujian prediksi energi menggunakan AI/ML, atau menguji algoritma optimasi penjadwalan (*Demand Response*).

Kriteria eksklusi (*Exclusion Criteria*) meliputi: (1) Artikel sekunder berupa *review*, *survey*, atau *Systematic Literature Review* (artikel jenis ini dieksklusi dari matriks analisis utama dan hanya digunakan sebagai literatur referensi pada bagian Latar Belakang). (2) Laporan konferensi tanpa detail metodologi yang jelas (*short papers/extended abstracts*). (3) Artikel yang hanya membahas keamanan jaringan IoT tanpa kaitan langsung dengan manajemen energi/daya.

Proses Seleksi dan Diagram PRISMA

Proses penyaringan literatur divisualisasikan melalui diagram alir PRISMA berikut untuk memastikan seleksi yang ketat (*traceable*):



Gambar 1. Diagram Alir PRISMA.

Penilaian Kualitas Studi (*Quality Assessment*)

Setiap studi primer yang lolos tahap *eligibility* dinilai kualitas metodologisnya menggunakan tiga kriteria: (1) kejelasan deskripsi metode eksperimen/implementasi, (2) ketersediaan data kuantitatif terukur (akurasi, RMSE, persentase penghematan biaya), dan (3) relevansi langsung terhadap efisiensi energi berbasis IoT/AI pada *Smart Home*. Setiap kriteria diberi skor 0-1, sehingga skor maksimal tiap studi adalah 3. Studi dengan skor di bawah 2 dieksklusi dari analisis akhir untuk menjaga kualitas sintesis.

Metode Sintesis Data

Sintesis data dilakukan secara tematik (*thematic synthesis*), mengelompokkan temuan dari 20 studi primer ke dalam tiga tema besar yang selaras dengan rumusan masalah penelitian: (1) arsitektur perangkat keras dan protokol komunikasi, (2) metode machine learning dan algoritma optimasi, serta (3) dampak efisiensi energi dan reduksi biaya. Data kuantitatif diekstraksi ke dalam matriks studi (Tabel 1) untuk memungkinkan perbandingan langsung antarstudi, sementara data kualitatif disintesis secara naratif pada bagian Hasil dan Pembahasan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai bukti ekstraksi data yang komprehensif, Tabel 1 menyajikan matriks dari 20 studi primer eksperimental yang dianalisis dalam SLR ini guna menjawab tujuan penelitian yang telah dirumuskan.

Tabel 1. Matriks Studi Primer (*Study Matrix*).

No	Penulis & Tahun	Fokus/Metode Utama	Temuan Utama
1	(Hassan dkk., 2022)	Implementasi IoT dapur (ESP32, DHT11, MQ-135)	Sistem mengotomatisasi perangkat dapur, mendeteksi gas, dan mengurangi pemborosan biaya daya secara signifikan.
2	(Bagdadee dkk., 2025)	Integrasi energi terbarukan hibrida dan IoT	Reduksi biaya energi 61%, emisi CO2 turun 61%, efisiensi keseluruhan sistem mencapai 80%.
3	(Natarajan dkk., 2024)	Deep Learning Hibrida (CNN_BiLSTM)	Akurasi prediksi (R^2) 0,96 untuk sektor residensial dan 0,98 untuk sektor komersial.
4	(Alhasnawi dkk., 2021)	Manajemen energi berbasis Multi-agent (GWO, ABC)	Algoritma ABC menghemat biaya 32,75-54,6%; algoritma GWO menghemat 19,47-32,96%.
5	(Lin dkk., 2022)	Neurocomputing terakselerasi GPU (MLP, Stacked LSTM)	Ekstraksi fitur Nonintrusive Load Monitoring memprediksi status alat dengan R^2 rata-rata 0,98.
6	(Habibu dkk., 2025)	Demand Response berbasis metaheuristik hibrida (HGPO)	Algoritma HGPO (GA+PSO+WDO) menurunkan fitness cost 57,8% dibandingkan GA murni.
7	(Hammerschmitt dkk., 2025)	Deep Learning (LSTM+GRU) terintegrasi cuaca	Kombinasi LSTM+GRU mencapai R^2 95,25% dengan resolusi data jeda 6 menit.
8	(Condon dkk., 2023)	HEMS berbasis Cloud-IoT (AWS, Raspberry Pi)	Bukti fungsionalitas koleksi daya real-time via smart meter dan smart plugs berbasis MQTT.
9	(Tutkun dkk., 2021)	Binary-coded genetic algorithms (BCGA)	Mampu menurunkan tagihan listrik harian dan Peak-to-Average Ratio (PAR) secara simultan.
10	(Hasan dkk., 2021)	Kontrol listrik menggunakan ESP8266 & Thing-speak	Pengurangan error pembacaan arus hingga 0,6% dibandingkan sistem ZigBee konvensional.
11	(S. Park, 2023)	Machine Learning efisiensi perangkat IoT	Menghapus sensor redundan berdasarkan korelasi data, menghemat biaya pengadaan perangkat IoT sebesar 13%.

12	(Karuna dkk., 2024)	Optimasi waktu nyata dengan Gradient Boosting	Gradient Boosting mencapai akurasi 0,95, mengungguli model regresi linear dan Random Forest.
13	(Dinmohammadi dkk., 2025)	Sistem monitoring IoT via Raspberry Pi 4B & IFTTT	Otomatisasi notifikasi melalui IFTTT memutus energi tidak terpakai secara proaktif.
14	(Elkholy dkk., 2022)	Smart Home Management System (HAMS) berbasis IoT, Z-Wave, & Linear Programming	Penurunan biaya operasional sebesar 23,13%, penghematan energi 18,16 kWh, serta integrasi kontrol suara untuk disabilitas.
15	(Meteier dkk., 2023)	Sistem Rekomendasi ML untuk Smart Home Bertenaga Surya	Prediksi daya surya harian menghasilkan relevansi rekomendasi penghematan energi bagi pengguna hingga 74%.
16	(Gonçalves dkk., 2025)	Framework MELISSA berbasis Large Language Models (LLM)	Interaksi natural LLM mendorong pemotongan energi sebesar 5,66% (17,7 kWh/bulan) dengan kepuasan pengguna tinggi.
17	(Morcillo-Jimenez dkk., 2024)	Deep Learning prediksi konsumsi bangunan (RNN/Seq2Seq)	Arsitektur memory-based (Seq2Seq dan RNN) mengungguli MLP standar dengan Normalized MAE 0,20.
18	(Wan dkk., 2025)	Wavelet + LSTM + SVR dengan optimasi DHGSO	Developed Henry Gas Solubility Optimization menurunkan RMSE 20% dan MAPE 15% pada prediksi daya.
19	(Jo dkk., 2024)	HEMS dengan pendekatan Equivalent Thermal Parameter (ETP)	Reduksi sensor menjadi hanya 1 smart meter utama memangkas tagihan rumah tangga sebesar 4,4% dibanding baseline.
20	(Ramachandra & Natarajan, 2024)	Multi-objective Mountain Gazelle Optimization (MMGO)	Pada klaster berisi 50 rumah, optimasi MMGO menekan biaya listrik 11% dan menurunkan PAR sebesar 74,68%.

Arsitektur Perangkat Keras dan Protokol Komunikasi

Analisis dari studi literatur mengungkapkan standar perangkat keras yang sangat efektif dalam perancangan *Home Energy Management Systems* (HEMS). Komputasi di tingkat *node* sering kali ditenagai oleh mikrokontroler murah namun andal seperti ESP8266 dan ESP32 yang memiliki modul Wi-Fi bawaan, atau menggunakan *single-board computer* berkemampuan tinggi seperti Raspberry Pi 3 dan 4B (Condon dkk., 2023; Dinmohammadi dkk., 2025; Elkholy dkk., 2022; Jo dkk., 2024). Untuk menjembatani transmisi data ke platform komputasi awan, protokol MQTT mendominasi karena jauh lebih responsif dibanding HTTP (Alhasnawi dkk., 2021; Condon dkk., 2023; Ramachandra & Natarajan, 2024). Selain MQTT, komunikasi nirkabel berbasis protokol Z-Wave juga dibuktikan keandalannya oleh (Elkholy dkk., 2022) yang mengintegrasikan Raspberry Pi 4B dengan platform IoT Cayenne dan antarmuka LabVIEW.

Keamanan dan kenyamanan fisik juga terintegrasi dalam arsitektur IoT modern. (Elkholy dkk., 2022) tidak hanya memasang sensor suhu (DHT11) dan gerak (PIR), tetapi juga merancang sistem yang ramah bagi penyandang disabilitas melalui perintah suara (*Amazon Alexa*), serta inovasi penambahan sensor suhu tubuh di pintu masuk sebagai tindakan preventif

kesehatan (COVID-19). Penggunaan sensor arus non-intrusif seperti ACS712 juga divalidasi oleh Hasan dkk. (2021), yang memberikan tingkat *error* pembacaan arus sangat rendah, hanya 0,6%. Jo dkk. (2024) bahkan membuktikan bahwa penggunaan tunggal *smart meter* ditambah integrasi data dari perangkat IoT pintar dapat mengurangi beban investasi sensor masif.

Metode Machine Learning dan Algoritma Optimasi

Fungsi analitik tingkat lanjut pada HEMS terbagi menjadi dua ranah utama: prediksi (*forecasting*) beban daya, dan optimasi penjadwalan (*demand response*).

Pada aspek prediksi beban, *Deep Learning* menunjukkan supremasi yang mutlak. Hammerschmitt dkk. (2025) membuktikan bahwa model hibrida *Long Short-Term Memory* (LSTM) dan *Gated Recurrent Unit* (GRU) memberikan akurasi (R^2) tertinggi sebesar 95,25%. Tingkat akurasi ini dicapai secara optimal pada jeda pengumpulan data 6 menit dengan menginkorporasikan variabel cuaca eksternal. Hal ini diperkuat oleh Natarajan dkk. (2024) yang memvalidasi penggabungan *Convolutional Neural Network* dengan *Bidirectional LSTM* (CNN_BiLSTM) yang sanggup menangkap fitur spasial dan temporal sekaligus dengan akurasi R^2 0,96. (Karuna dkk., 2024) serta (Morcillo-Jimenez dkk., 2024) menunjukkan bahwa model *Gradient Boosting* dan *memory-based* (Seq2Seq/RNN) muncul sebagai pilihan utama untuk mereduksi tingkat *error*. Lebih jauh lagi, Wan dkk. (2025) memperkenalkan inovasi *Wavelet decomposition* digabungkan dengan LSTM dan SVR (dioptimasi dengan DHGSO), yang secara empiris menurunkan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 20%. Lin dkk. (2022) bahkan merancang model berbasis GPU (seperti *Autoregressive MLP*) yang sanggup menebak status alat tanpa perlu memasang sensor fisik di colokan (*Nonintrusive Load Monitoring*), mencetak akurasi R^2 0,98.

Pada ranah penjadwalan (*Demand Response*) dan optimasi, algoritma memindahkan jadwal nyala perangkat berat ke waktu dengan tarif listrik yang lebih murah atau saat suplai energi terbarukan sedang tinggi. Elkholy dkk. (2022) mendemonstrasikan efektivitas pemodelan optimasi dengan *Linear Programming* (LP) yang menyeimbangkan beban dari panel surya dan status *state-of-charge* baterai secara otomatis. Tutkun dkk. (2021) menunjukkan bahwa *Binary-coded genetic algorithms* (BCGA) sangat sesuai diaplikasikan untuk mereduksi beban puncak jaringan listrik. (Alhasnawi dkk., 2021) juga berhasil mengeksekusi algoritma *Artificial Bee Colony* (ABC) dan *Grey Wolf Optimizer* (GWO) berbasis agen ganda (*multi-agent*) dengan stabilitas tinggi. Terobosan yang paling progresif diusulkan oleh Habibu dkk. (2025) dengan algoritma hibrida HGPO, serta Ramachandra dan Natarajan (2024) dengan *Multi-objective Mountain Gazelle Optimization* (MMGO) yang

memecahkan masalah multiobjektif yang rumit secara komprehensif. Pendekatan ini semakin interaktif dengan framework MELISSA Gonçalves dkk. (2025) dan Meteier dkk. (2023) yang memanfaatkan *Large Language Models* (LLM) seperti GPT-3.5 untuk memproses model analitik menjadi narasi yang personal kepada pemilik rumah, secara drastis meningkatkan niat pengguna untuk menghemat listrik.

Perbedaan performa antaralgoritma ini tidak lepas dari karakteristik data yang diproses. Model Deep Learning hibrida (LSTM+GRU, CNN_BiLSTM) unggul pada data dengan pola musiman kompleks dan ketersediaan data cuaca eksternal, namun membutuhkan volume data historis yang besar untuk pelatihan, sebuah keterbatasan bagi rumah tangga baru yang belum memiliki riwayat konsumsi panjang. Sebaliknya, algoritma metaheuristik seperti HGPO dan MMGO lebih unggul untuk kasus optimasi penjadwalan *real-time* karena tidak memerlukan data pelatihan historis, namun cenderung lebih sensitif terhadap perubahan tarif listrik yang tiba-tiba. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan algoritma perlu disesuaikan dengan ketersediaan data dan tujuan implementasi, bukan sekadar memilih algoritma dengan angka akurasi tertinggi.

Dampak Efisiensi Energi dan Reduksi Biaya

Penerapan teknologi IoT dan AI di sektor perumahan memberikan dampak ekonomi yang sangat terukur. Dari sudut algoritma optimasi (*Demand Response*), (Habibu dkk., 2025) membuktikan bahwa algoritma hibrida HGPO mampu menekan *fitness cost* secara masif hingga 57,8% dibandingkan jika sistem hanya mengandalkan *Genetic Algorithm* (GA) konvensional. Dampak terukur linier juga dibuktikan oleh (Elkholy dkk., 2022), di mana implementasi HAMS bertenaga surya berhasil memangkas konsumsi daya harian sebesar 18,16 kWh, yang berujung pada penurunan biaya operasional listrik sebesar 23,13%. (Alhasnawi dkk., 2021) mencatat bahwa implementasi algoritma ABC pada perumahan *smart home* terbukti sukses memotong tagihan listrik harian pada rentang 32,75% hingga 54,6%, sementara algoritma GWO mampu mereduksi biaya sebesar 19,47% hingga 32,96%. Hal ini didukung oleh temuan (Ramachandra & Natarajan, 2024), yang menemukan bahwa pada tingkat skala lingkungan klaster (50 rumah), MMGO mampu menekan PAR (*Peak-to-Average Ratio*) secara agregat hingga 74,68%. Gonçalves dkk. (s2025) menegaskan bahwa integrasi HEMS dengan panduan rekomendasi natural dari LLM mampu memotong penggunaan listrik rumah tangga sebesar rata-rata 5,66% (atau sekitar 17,7 kWh per bulan secara konsisten) dengan tingkat kepuasan yang tinggi.

Efisiensi biaya juga dapat dicapai pada pengadaan desain perangkat keras. S. Park, (2023) menemukan bahwa proses analisis regresi dan eliminasi sensor IoT yang redundan dapat menurunkan biaya perangkat keras sebesar 13%. Dampak terukur paling absolut ditunjukkan oleh Bagdadee dkk. (2025), yang membuktikan bahwa jika *smart home* diintegrasikan secara cerdas dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PV) dan baterai penyimpanan energi, sistem hibrida tersebut dapat menghemat tagihan listrik bulanan sebesar 61% dan menurunkan emisi gas rumah kaca (CO₂) sebesar 61%.

Keterbatasan Penelitian

Setiap *Systematic Literature Review* memiliki batasan metodologis yang perlu diakui. Keterbatasan pada penelitian ini mencakup cakupan basis data yang terbatas pada basis data akademik utama dengan filter berbahasa Inggris, sehingga publikasi berkualitas tinggi yang diterbitkan secara lokal di luar bahasa Inggris mungkin tidak terwakili dalam analisis ini. Selain itu, pemfilteran yang ketat menghasilkan 20 studi primer eksperimental mutakhir; meskipun merepresentasikan temuan terkini (2021-2025), sebagian besar persentase penghematan energi diuji pada skema tarif listrik dinamis (*Time of Use*) yang fluktuasinya berbeda jika diterapkan di wilayah dengan tarif dasar listrik tetap (*flat*). Studi ini juga mengukur efektivitas topologi IoT dan kinerja algoritma *Machine Learning* secara arsitektural, namun tidak membandingkan konsumsi daya dari perangkat node IoT fisik secara spesifik (seperti komparasi mendetail konsumsi daya board mikrokontroler ESP32 dibandingkan Raspberry Pi saat menjalankan model *Deep Learning*).

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Tinjauan literatur sistematis ini menyintesis 20 studi primer eksperimental untuk mengevaluasi efektivitas implementasi *Internet of Things* (IoT) dan Kecerdasan Buatan dalam manajemen energi residensial. Hasil kajian menunjukkan bahwa arsitektur perangkat keras yang dikendalikan oleh board seperti Raspberry Pi atau ESP32, yang dihubungkan dengan smart meter/plug, detektor keberadaan (PIR), sensor suhu (DHT), dan menggunakan protokol komunikasi seperti MQTT atau Z-Wave, merupakan topologi paling tangguh. Dari sisi algoritma, model *Deep Learning* hibrida seperti LSTM+GRU, CNN_BiLSTM, dan Wavelet-LSTM-SVR mendominasi arena prediksi beban dengan akurasi R^2 konsisten melampaui 0,95, sementara untuk optimasi penjadwalan perangkat, algoritma Linear Programming serta metaheuristik hibrida mutakhir seperti HGPO dan MMGO menjadi pemecah masalah yang paling komprehensif. Inovasi penggunaan *Large Language Models* (LLM) juga krusial dalam

menyajikan data menjadi bahasa manusia yang persuasif. Dari sisi dampak ekonomi, implementasi IoT dan algoritma optimasinya mampu menggeser beban daya (*demand response*) sehingga memangkas tagihan listrik harian dari rentang 23% hingga melampaui 50%, serta menekan emisi gas karbon.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas fokus ke area keamanan dan privasi aliran data pelanggan, serta memecahkan batasan infrastruktur dalam skema perdagangan energi antar-rumah (*peer-to-peer energy trading*). Selain itu, penelitian mendatang juga disarankan untuk melakukan pengujian pada skema tarif listrik tetap (*flat*) yang umum diterapkan di negara berkembang, serta membandingkan konsumsi daya perangkat node IoT fisik secara lebih rinci guna melengkapi gambaran efisiensi energi secara menyeluruh.

DAFTAR REFERENSI

- Alhasnawi, B. N., Jasim, B. H., Rahman, Z. A. S. A., & Siano, P. (2021). A novel robust smart energy management and demand reduction for smart homes based on internet of energy. *Sensors*, 21(14). <https://doi.org/10.3390/s21144756>
- Ardabili, S., Abdolalizadeh, L., Mako, C., Torok, B., & Mosavi, A. (2022). Systematic Review of Deep Learning and Machine Learning for Building Energy. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.786027>
- Bagdadee, A. H., Rahman, M. S., Al Mamoon, I., Dewi, D. A., Muzahidul Islam, A. K. M., & Zhang, L. (2025). Empowering smart homes by IoT-driven hybrid renewable energy integration for enhanced efficiency. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-25328-2>
- Bindushree, G. T. (2022). IoT-based energy management in smart homes: A literature review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 16(3), 1392–1400. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.16.3.1296>
- Condon, F., Martínez, J. M., Eltamaly, A. M., Kim, Y. C., & Ahmed, M. A. (2023). Design and Implementation of a Cloud-IoT-Based Home Energy Management System. *Sensors*, 23(1). <https://doi.org/10.3390/s23010176>
- Dinmohammadi, F., Farook, A. M., & Shafiee, M. (2025). Improving Energy Efficiency in Buildings with an IoT-Based Smart Monitoring System. *Energies*, 18(5). <https://doi.org/10.3390/en18051269>
- Elkholy, M. H., Senjyu, T., Lotfy, M. E., Elgarhy, A., Ali, N. S., & Gaafar, T. S. (2022). Design and Implementation of a Real-Time Smart Home Management System Considering Energy Saving. *Sustainability (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/su142113840>
- Gonçalves, V. P., Serrano, A. L. M., Rodrigues, G. A. P., de Oliveira, M. N., Meneguette, R. I., Bispo, G. D., Peixoto, M. G. M., & Filho, G. P. R. (2025). An Empirically Validated Framework for Automated and Personalized Residential Energy-Management Integrating Large Language Models and the Internet of Energy. *Energies*, 18(14). <https://doi.org/10.3390/en18143744>

- Habibu, M. A., Sivakumar, S., Kanagachidambaresan, G. R., & Mwanandiye, E. S. (2025). An effective IoT-based demand response for energy-efficient smart homes. *Energy Informatics*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00590-w>
- Hammerschmitt, B. K., Rambo, M. V. H., Leone, A. de S., Iantorno, L. M., Schiavon, H. B., Corrêa, D. P., Lissa, P., Keane, M., & Riella, R. J. (2025). Deep Learning for Residential Electrical Energy Consumption Forecasting: A Hybrid Framework with Multiscale Temporal Analysis and Weather Integration. *Energies*, 18(22). <https://doi.org/10.3390/en18225885>
- Hasan, M. K., Ahmed, M. M., Pandey, B., Gohel, H., Islam, S., & Khalid, I. F. (2021). Internet of Things-Based Smart Electricity Monitoring and Control System Using Usage Data. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6544649>
- Hassan, C. A. U., Iqbal, J., Khan, M. S., Hussain, S., Akhunzada, A., Ali, M., Gani, A., Uddin, M., & Ullah, S. S. (2022). Design and Implementation of Real-Time Kitchen Monitoring and Automation System Based on Internet of Things. *Energies*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/en15186778>
- Jo, H. C., Park, H. A., Kwon, S. Y., & Cho, K. H. (2024). Home Energy Management Systems (HEMSs) with Optimal Energy Management of Home Appliances Using IoT. *Energies*, 17(12). <https://doi.org/10.3390/en17123009>
- Karuna, G., Poornima, E., Akshatha, S., Anupama, P., Sanjana, T., Aman, M., Saurabh, R., & Habelalmateen, M. I. (2024). Smart energy management: real-time prediction and optimization for IoT-enabled smart homes. *Cogent Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>
- Lin, Y. H., Tang, H. S., Shen, T. Y., & Hsia, C. H. (2022). A Smart Home Energy Management System Utilizing Neurocomputing-Based Time-Series Load Modeling and Forecasting Facilitated by Energy Decomposition for Smart Home Automation. *IEEE Access*, 10, 116747–116765. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3219068>
- Meteier, Q., El Kamali, M., Angelini, L., & Abou Khaled, O. (2023). A Recommender System for Increasing Energy Efficiency of Solar-Powered Smart Homes. *Sensors*, 23(18). <https://doi.org/10.3390/s23187974>
- Morcillo-Jimenez, R., Mesa, J., Gómez-Romero, J., Vila, M. A., & Martin-Bautista, M. J. (2024). Deep learning for prediction of energy consumption: an applied use case in an office building. *Applied Intelligence*, 54(7), 5813–5825. <https://doi.org/10.1007/s10489-024-05451-9>
- Natarajan, Y., Sri, S. P., Wadhwa, G., Choi, Y., Chen, Z., Lee, D. E., & Mi, Y. (2024). Enhancing Building Energy Efficiency with IoT-Driven Hybrid Deep Learning Models for Accurate Energy Consumption Prediction. *Sustainability (Switzerland)*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/su16051925>
- Park, S. (2023). Machine Learning-Based Cost-Effective Smart Home Data Analysis and Forecasting for Energy Saving †. *Buildings*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/buildings13092397>
- Park, Y., & Han, J. (2025). Smart Home Advancements for Health Care and Beyond: Systematic Review of Two Decades of User-Centric Innovation. *Journal of Medical Internet Research*, 27(1). <https://doi.org/10.2196/62793>

- Poyyamozi, M., Murugesan, B., Rajamanickam, N., Shorfuzzaman, M., & Aboelmagd, Y. (2024). IoT—A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/buildings14113446>
- Ramachandra, N., & Natarajan, R. (2024). State-of-the-art and real-time implementation of an IoT-based home energy management system for a cluster of dwellings. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35887>
- Rehman, U. ur, Faria, P., Gomes, L., & Vale, Z. (2025). Future of Energy Management Models in Smart Homes: A Systematic Literature Review of Research Trends, Gaps, and Future Directions. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 9(4), 1169–1198. <https://doi.org/10.1007/s41660-025-00506-x>
- Sokienah, Y. (2023). Exploring the integration of IoT systems in interior design and the built environment: A systematic review. *Heliyon*, 9(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22869>
- Taboada-Orozco, A., Yetongnon, K., & Nicolle, C. (2024). Smart Buildings: A Comprehensive Systematic Literature Review on Data-Driven Building Management Systems. *Sensors*, 24(13). <https://doi.org/10.3390/s24134405>
- Tutkun, N., Burgio, A., Jasinski, M., Leonowicz, Z., & Jasinska, E. (2021). Intelligent scheduling of smart home appliances based on demand response considering the cost and peak-to-average ratio in residential homes. *Energies*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/en14248510>
- Wan, H., Huang, G., Huang, Y., & Ghadimi, N. (2025). Energy consumption prediction in buildings using LSTM and SVR modified by developed Henry gas solubility optimization. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-21835-4>