

Pemodelan Graf *Virtual* Energi dari Data IoT Sekuensial untuk Gedung Cerdas

Virtual Graph Modeling for Smart Building Energy Analysis from Sequential IoT Data

¹M.Febriansyah*, ²Riadi Marta Dinata

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional

²Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional

^{1,2}Jl. Moch. Kahfi II No. 30, Srengseng Sawah, Kec. Jagakarsa, Kota Jakarta Selatan, DKI Jakarta 12630

*e-mail: m.febriansyah@istn.ac.id

(**received:** 3 September 2025, **revised:** 5 December 2025, **accepted:** 11 January 2026)

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan dan memvalidasi sebuah metodologi pemetaan energi sekuensial berbiaya rendah untuk mengatasi tantangan implementasi sistem pemantauan energi yang mahal di gedung cerdas. Dengan menggunakan satu sensor *Internet of Things* (IoT) yang diukur secara bergiliran di lima titik strategis, sebuah Pustaka Profil Energi yang komprehensif berhasil dibangun. Analisis data dari berbagai skenario secara presisi mengidentifikasi *hotspot* energi utama (Laboratorium Komputer, 2.80 kWh/jam), mengkuantifikasi potensi pemborosan dari "beban vampir" sebesar 2,190 kWh/tahun pada satu lokasi, dan mendiagnosis bahwa sistem pendingin ruangan (HVAC) merupakan kontributor dominan (65%) pada beban puncak, bukan unit komputer. Hasil dari profil-profil individual ini kemudian disintesis untuk membangun sebuah peta energi graf virtual yang memodelkan karakteristik dan struktur jaringan energi gedung. Metodologi ini terbukti efektif sebagai langkah fundamental yang efisien secara biaya untuk menyediakan wawasan berbasis data yang dapat ditindaklanjuti, sekaligus menjadi fondasi yang valid untuk pengembangan sistem manajemen energi *real-time* yang lebih canggih di masa depan.

Kata kunci: manajemen energi, analisis graf, *Internet of Things*, pemprofilan beban, gedung cerdas,

Abstract

This study proposes and validates a cost-effective sequential energy mapping methodology to address the challenges of implementing expensive energy monitoring systems in smart buildings. By utilizing a single Internet of Things (IoT) sensor deployed sequentially across five strategic locations, a comprehensive Energy Profile Repository was successfully developed. Data analysis across various scenarios accurately identified major energy hotspots, with the computer laboratory recording the highest consumption at 2.80 kWh/hour. The study also quantified potential energy waste from "vampire loads," estimated at 2,190 kWh/year at a single location. Furthermore, the analysis revealed that the heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system is the dominant contributor (65%) to peak load demand, rather than computer units. The individual energy profiles were subsequently synthesized to construct a virtual energy graph that models the characteristics and structural relationships of the building's energy network. This methodology is proven to be an effective and cost-efficient foundational approach for generating actionable, data-driven insights, while also providing a valid basis for the future development of more advanced real-time energy management systems.

Keywords: energy management, graph analysis, *Internet of Things*, load profiling, smart building

1 Pendahuluan

Transformasi digital telah menjadi pendorong fundamental bagi kemajuan masyarakat modern, namun secara bersamaan menciptakan tantangan signifikan dalam manajemen energi. Peningkatan eksponensial dalam penggunaan pusat data, jaringan komunikasi, dan miliaran perangkat terhubung telah memicu lonjakan permintaan energi global [1], [2]. Dalam konteks ini, lingkungan binaan atau gedung merupakan salah satu konsumen energi terbesar, sehingga menjadikannya arena yang krusial untuk implementasi solusi manajemen energi cerdas [3]. Oleh karena itu, efisiensi energi telah beralih dari sekadar pilihan operasional menjadi pilar strategis untuk keberlanjutan ekonomi dan lingkungan di era digital [4].

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah membuka peluang revolusioner untuk memantau dan mengelola konsumsi energi gedung dengan granularitas yang belum pernah ada sebelumnya [5]. Sensor cerdas dan *smart meter* memungkinkan pengumpulan data *real-time* yang menjadi fondasi bagi berbagai aplikasi analitik canggih [6], [7]. Berbagai penelitian telah menunjukkan keberhasilan pemanfaatan data ini untuk prediksi permintaan (*load forecasting*) [8], [9], deteksi anomali [10], serta optimalisasi strategi respons permintaan (*demand response*) [11], [12]. Sistem Manajemen Energi Gedung (*Building Energy Management System* - BEMS) yang modern mengintegrasikan data ini untuk melakukan kontrol dan optimisasi secara otomatis, menjanjikan penghematan energi yang signifikan [13], [14]. Pemanfaatan teknik *machine learning* dan pemodelan data-driven juga telah terbukti mampu mengungkap pola konsumsi kompleks yang dipengaruhi oleh perilaku penghuni [15], [16].

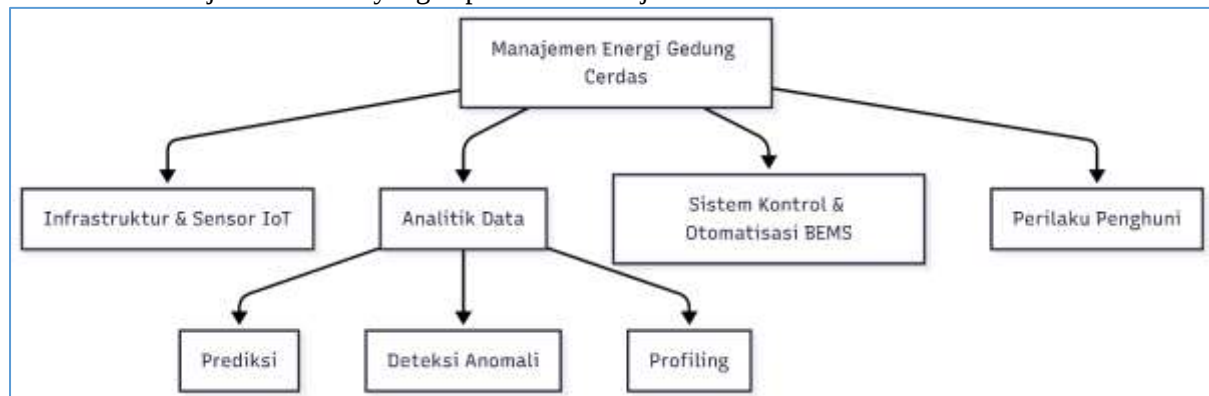
Meskipun kemajuan dalam analitik data energi sangat pesat, tantangan utama dalam implementasi praktisnya adalah biaya investasi awal yang tinggi. Sebagian besar metodologi canggih yang ada di literatur mengasumsikan ketersediaan data granular yang dikumpulkan secara simultan dari puluhan atau bahkan ratusan sensor yang terpasang di seluruh gedung [5], [6]. Kebutuhan akan infrastruktur pemantauan yang komprehensif ini menciptakan penghalang finansial yang signifikan, terutama bagi institusi di sektor publik seperti fasilitas pendidikan, yang sering kali beroperasi dengan anggaran terbatas. Kesenjangan antara potensi analitik data energi dan realitas kendala implementasi di lapangan ini menjadi masalah yang perlu diatasi.

Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi celah tersebut dengan mengusulkan dan memvalidasi sebuah metodologi alternatif yang berbiaya rendah, yaitu pembuatan profil beban (*load profiling*) secara sekuensial dengan menggunakan satu instrumen IoT. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah menyajikan sebuah kerangka kerja yang praktis dan efisien secara biaya untuk melakukan audit energi mendalam dan membangun model pemahaman energi gedung dalam bentuk peta energi graf virtual. Metodologi ini dirancang untuk menjadi langkah fundamental yang dapat menyediakan wawasan berbasis data yang dapat ditindaklanjuti, sekaligus berfungsi sebagai fondasi yang solid untuk pengembangan sistem pemantauan *real-time* yang lebih canggih di masa depan. Sistematika penulisan artikel ini diatur sebagai berikut: Bab II menguraikan metodologi penelitian yang digunakan, Bab III menyajikan hasil analisis data, Bab IV membahas implikasi dari temuan yang diperoleh, dan Bab V merangkum kesimpulan serta arah penelitian selanjutnya.

2 Tinjauan Literatur

Kemajuan pesat dalam teknologi *Internet of Things* (IoT) telah menjadi katalisator utama dalam evolusi manajemen energi gedung, mentransformasi bangunan dari entitas pasif menjadi ekosistem cerdas yang dapat dipantau dan dioptimalkan [3], [5]. Pemanfaatan *smart meter* dan sensor cerdas memungkinkan akuisisi data konsumsi energi dengan resolusi temporal yang tinggi, menyediakan fondasi data yang kaya untuk berbagai aplikasi analitik [6], [7]. Literatur terkini menunjukkan bahwa data ini secara efektif telah dimanfaatkan untuk mengembangkan model prediksi permintaan (*load forecasting*) yang akurat, baik menggunakan metode statistik maupun pendekatan berbasis *machine learning* [8], [9]. Lebih lanjut, data granular ini krusial untuk aplikasi deteksi anomali secara *real-time*, yang memungkinkan identifikasi dini terhadap kegagalan peralatan atau pola konsumsi yang tidak efisien [10]. Di tingkat sistem yang lebih tinggi, data ini menjadi input vital bagi strategi respons permintaan (*demand response*) dan *Building Energy Management Systems* (BEMS), yang bertujuan untuk mengoptimalkan operasi gedung secara dinamis sebagai respons terhadap sinyal harga atau kondisi jaringan [11], [13], [14].

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi metode-metode canggih untuk mengekstraksi wawasan dari data energi yang masif. Teknik *load profiling*, atau pemprofilan beban, telah lama diakui sebagai metode fundamental untuk mengkarakterisasi dan mengklasifikasikan pola konsumsi energi [18]. Seiring dengan kemajuan teknologi, pendekatan yang lebih mutakhir seperti *Non-Intrusive Load Monitoring* (NILM) telah dikembangkan, yang bertujuan untuk memecah data konsumsi agregat dari satu titik pengukuran menjadi profil konsumsi peranti individual [17], [23]. Di sisi lain, beberapa peneliti telah mulai menerapkan teknik *graph mining* untuk menganalisis hubungan kompleks antar berbagai titik data operasional di dalam gedung, yang terbukti mampu mengungkap pengetahuan yang tidak dapat ditemukan melalui analisis statistik konvensional [19]. Keberhasilan penerapan berbagai teknik analitik ini, mulai dari pemodelan prediktif hingga dekomposisi beban, secara kolektif menegaskan bahwa nilai sesungguhnya dari gedung cerdas terletak pada kemampuan untuk mengubah data mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti.



Gambar 1 Peta konseptual area penelitian dalam manajemen energi gedung cerdas

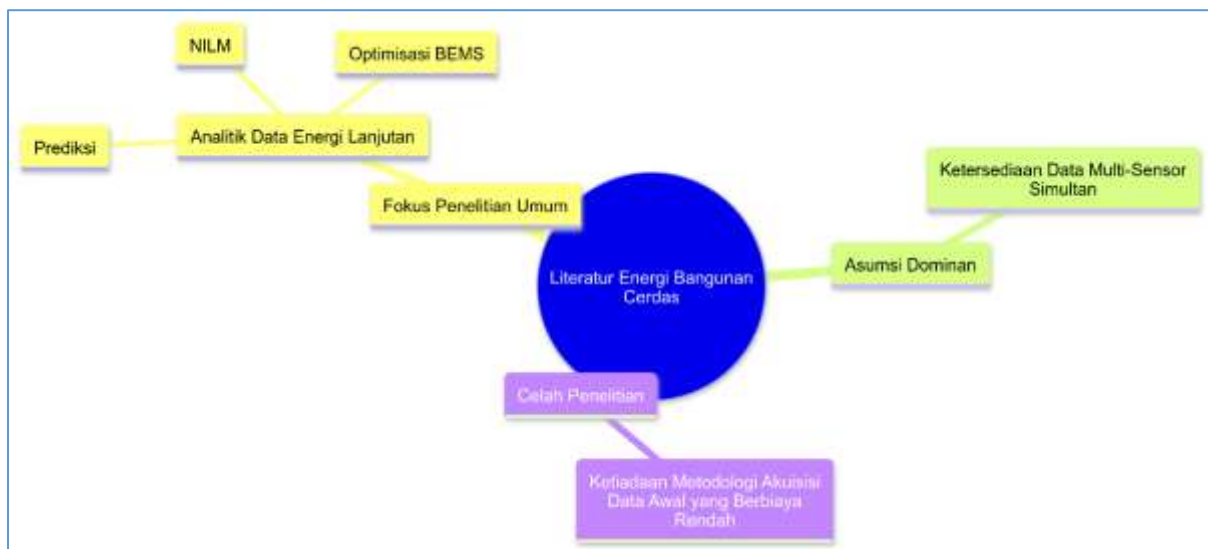
Gambar 1 menyajikan peta konseptual area utama dalam manajemen energi gedung cerdas, di mana gedung dipandang sebagai sistem terpadu yang ditopang oleh empat pilar: infrastruktur dan sensor IoT sebagai penghasil data, analitik data sebagai pengolah data menjadi wawasan, sistem kontrol dan otomatisasi BEMS sebagai eksekutor keputusan pengendalian, serta perilaku penghuni sebagai faktor kontekstual yang memengaruhi pola konsumsi energi. Di dalam kerangka ini, analitik data diuraikan ke dalam tiga fungsi kunci (prediksi, deteksi anomali, dan profiling) dan penelitian ini secara spesifik memposisikan diri pada fungsi profiling, yaitu membangun profil konsumsi energi berbasis data IoT sekuensial sebagai fondasi pemahaman hotspot, beban statis, dan struktur jaringan energi yang nantinya dapat mendukung pengembangan skema prediksi dan pengendalian otomatis oleh BEMS.

Meskipun berbagai studi mutakhir telah menunjukkan potensi besar analitik data untuk prediksi, deteksi anomali, dan optimasi pengendalian, analisis mendalam terhadap literatur yang ada mengungkap sebuah asumsi fundamental yang melandasi sebagian besar penelitian state-of-the-art, yaitu ketersediaan infrastruktur pemantauan multi-sensor yang komprehensif dan beroperasi secara simultan. Sebagian besar metodologi canggih – secara implisit mengasumsikan bahwa data granular dari berbagai lokasi di seluruh gedung telah tersedia untuk dianalisis, suatu kondisi yang mungkin realistis di lingkungan laboratorium atau studi kasus dengan pendanaan besar, tetapi mengabaikan tantangan praktis berupa tingginya biaya investasi awal untuk pengadaan dan instalasi perangkat keras. Akibatnya, masih terdapat kekurangan yang nyata dalam literatur mengenai metodologi yang menjembatani kesenjangan antara kondisi “tanpa data” dan “data melimpah”; kajian yang ada sangat kaya dalam membahas apa yang dapat dilakukan dengan data energi, namun relatif terbatas dalam memberikan panduan bagaimana memperoleh data fondasi yang representatif secara efektif dan efisien dari segi biaya sebagai langkah awal.

Penelitian ini secara spesifik dirancang untuk mengisi celah tersebut. *Novelty* atau kebaruan yang ditawarkan terletak pada pengusulan dan validasi sebuah metodologi pemetaan energi sekuensial yang menggunakan satu instrumen IoT (*Virtual Energy Graph Map*) sebagai kerangka kerja berbiaya rendah untuk audit energi tahap awal. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada analisis data *real-time* dari banyak sensor, penelitian ini berfokus pada proses sistematis untuk membangun sebuah peta energi graf virtual dari karakteristik beban gedung berdasarkan data yang

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

dikumpulkan secara bergiliran. Kontribusi utamanya adalah menyediakan sebuah pendekatan yang pragmatis dan tervalidasi bagi institusi dengan sumber daya terbatas untuk memulai perjalanan manajemen energi berbasis data mereka. Dengan demikian, penelitian ini tidak bertujuan untuk menggantikan sistem pemantauan komprehensif, melainkan untuk menyediakan sebuah langkah pertama yang fundamental dan sering terlewatkan: membangun pemahaman data yang solid sebelum melakukan investasi teknologi yang lebih besar.



Gambar 2 Identifikasi celah penelitian melalui tinjauan literatur

Gambar 2 menggambarkan proses identifikasi celah penelitian melalui tinjauan literatur mengenai energi bangunan cerdas, yang menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian berfokus pada analitik data energi lanjutan (seperti prediksi, NILM, dan optimisasi BEMS) dengan asumsi dominan bahwa data multi-sensor simultan sudah tersedia secara memadai. Struktur ini menegaskan bahwa arus utama studi lebih banyak berfokus pada pemanfaatan data yang kaya, sementara aspek akuisisi data awal hampir tidak disentuh, sehingga muncul celah penelitian berupa ketiadaan metodologi akuisisi data awal yang berbiaya rendah untuk konteks gedung dengan keterbatasan sumber daya, yang menjadi fokus utama pendekatan yang diusulkan dalam artikel ini.

3 Metode Penelitian

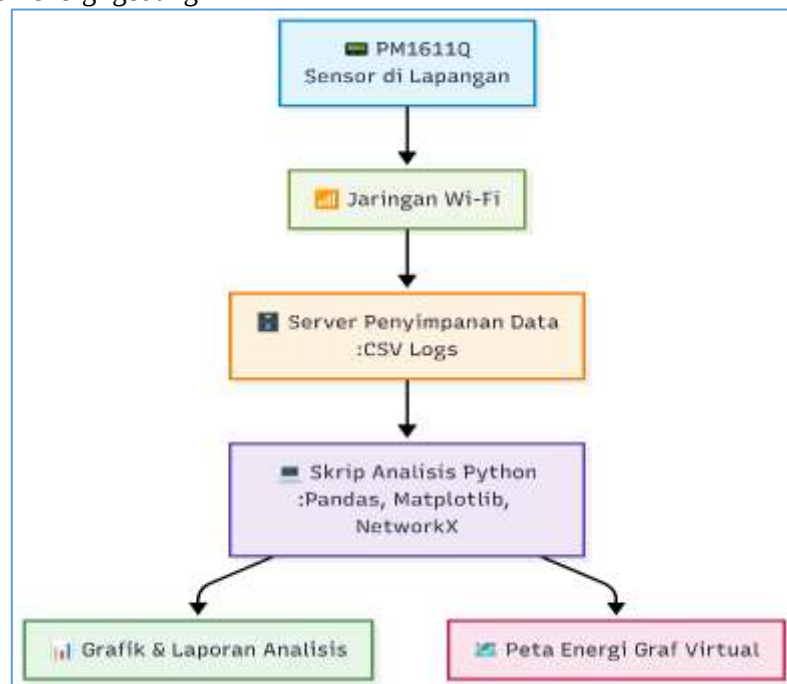
Kerangka kerja metodologis dalam penelitian ini disusun untuk memastikan validitas, reliabilitas, dan replikabilitas proses penelitian. Aspek yang dicakup meliputi pendekatan yang digunakan, arsitektur sistem dan model yang diusulkan, prosedur akuisisi serta analisis data, dan skema evaluasi yang diterapkan.

3.1 Pendekatan Penelitian

Studi kasus kuantitatif diadopsi sebagai pendekatan penelitian utama. Pemilihan ini didasarkan pada kapabilitas pendekatan studi kasus untuk memfasilitasi investigasi yang mendalam dan kontekstual terhadap fenomena konsumsi energi dalam sebuah sistem yang kompleks dan terbatas, yaitu sebuah gedung fakultas. Aspek kuantitatif ditekankan melalui akuisisi dan analisis data numerik dari sensor untuk memodelkan serta memahami perilaku dinamis dari konsumsi energi, sehingga diperlukan rancangan arsitektur sistem yang jelas untuk memastikan alur data berjalan konsisten dari lapangan hingga tahap analisis.

Gambar 3 menggambarkan arsitektur sistem penelitian dari tahap akuisisi hingga analisis data, dimulai dari sensor lapangan PM1611Q yang mengukur daya listrik pada titik-titik terpilih, kemudian mengirimkan data secara nirkabel melalui jaringan Wi-Fi ke server penyimpanan yang merekam log dalam format CSV. Data yang tersimpan selanjutnya diproses oleh skrip analisis berbasis Python dengan memanfaatkan pustaka Pandas untuk manipulasi data, Matplotlib untuk visualisasi, dan NetworkX untuk pemodelan graf, sehingga menghasilkan dua keluaran utama, yaitu grafik serta

laporan analisis numerik, dan Peta Energi Graf Virtual yang merepresentasikan struktur serta karakteristik jaringan energi gedung



Gambar 3 Arsitektur sistem penelitian dari akuisisi hingga analisis data

Rangkaian arsitektur pada gambar 3, adalah untuk memastikan keterhubungan yang jelas antara setiap tahapan, mulai dari pencatatan daya di lapangan hingga pembentukan model graf. Alur tersebut membuat proses pengolahan data berlangsung konsisten dan terstandar. Dengan demikian, hasil analisis yang dihasilkan dapat diandalkan untuk memvalidasi metodologi pemetaan energi sekuensial yang diusulkan dalam penelitian ini

3.2 Arsitektur dan Model

Arsitektur sistem yang diimplementasikan dalam penelitian ini tersusun atas tiga komponen fundamental: (1) Instrumen Akuisisi Data, yang terdiri dari satu unit *power meter* IoT (REMONA PM1611Q) sebagai sensor tunggal; (2) Platform Penyimpanan Data, sebuah server lokal yang berfungsi untuk menerima dan menyimpan data log dari sensor melalui jaringan Wi-Fi; serta (3) Lingkungan Analisis Data, tempat data mentah diolah, dianalisis, dan divisualisasikan menggunakan skrip Python. Luaran utama dari arsitektur ini adalah sebuah Peta Energi Graf Virtual, yang merupakan model konseptual untuk merepresentasikan karakteristik dan struktur topologi jaringan energi gedung.

Model Peta Energi Virtual secara formal didefinisikan sebagai sebuah graf berarah (*directed graph*) $G = (V, E)$, di mana:

- V adalah himpunan simpul atau *node* virtual, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\}$, yang merepresentasikan lima titik pengukuran strategis yang telah diidentifikasi.
- E adalah himpunan sisi (*edges*), $E = \{(v_i, v_j)\}$, yang merepresentasikan arah aliran daya fisik berdasarkan struktur sirkuit kelistrikan dari simpul v_i ke v_j .
- Setiap simpul v_i memiliki atribut berupa Profil Beban $P(v_i)$, yang merupakan sebuah fungsi deret waktu dari daya terhadap waktu, $P(v_i, t)$.

Untuk studi kasus ini, himpunan simpul V dan sisi E didefinisikan secara spesifik untuk merepresentasikan struktur fisik jaringan listrik di Gedung FSTT sebagai berikut:

- Himpunan Simpul (V):
 - P: Panel Distribusi Utama
 - N1: Laboratorium Komputer
 - N2: Ruang Server
 - N3: Ruang Kelas
 - N4: Perpustakaan Pusat

- N5: Ruang Dosen
- Himpunan Sisi (E):
 - ('P', 'N2'): Aliran dari Panel Utama ke Ruang Server.
 - ('P', 'N3'): Aliran dari Panel Utama ke Ruang Kelas.
 - ('N2', 'N1'): Aliran dari sub-panel Ruang Server ke Lab Komputer.
 - ('N2', 'N4'): Aliran dari sub-panel Ruang Server ke Perpustakaan.
 - ('N3', 'N5'): Aliran dari sub-panel Ruang Kelas ke Ruang Dosen.

Definisi struktur statis ini menjadi kerangka dasar di mana data profil beban dinamis $P(v_i, t)$ akan dipetakan dan dianalisis. Dan tiga rumus berikut digunakan untuk menurunkan metrik utama dari profil beban setiap node pengukuran:

1. Beban Puncak Rata-rata:

$$P_{\text{puncak}}(v_i) = \frac{1}{N} \sum_{t \in \text{jam sibuk}} P(v_i, t) \quad \dots\dots\dots(1)$$

2. Beban Dasar (kW):

$$P_{\text{dasar}}(v_i) = \frac{1}{N} \sum_{t \in \text{jam non-operasional}} P(v_i, t) \quad \dots\dots\dots(2)$$

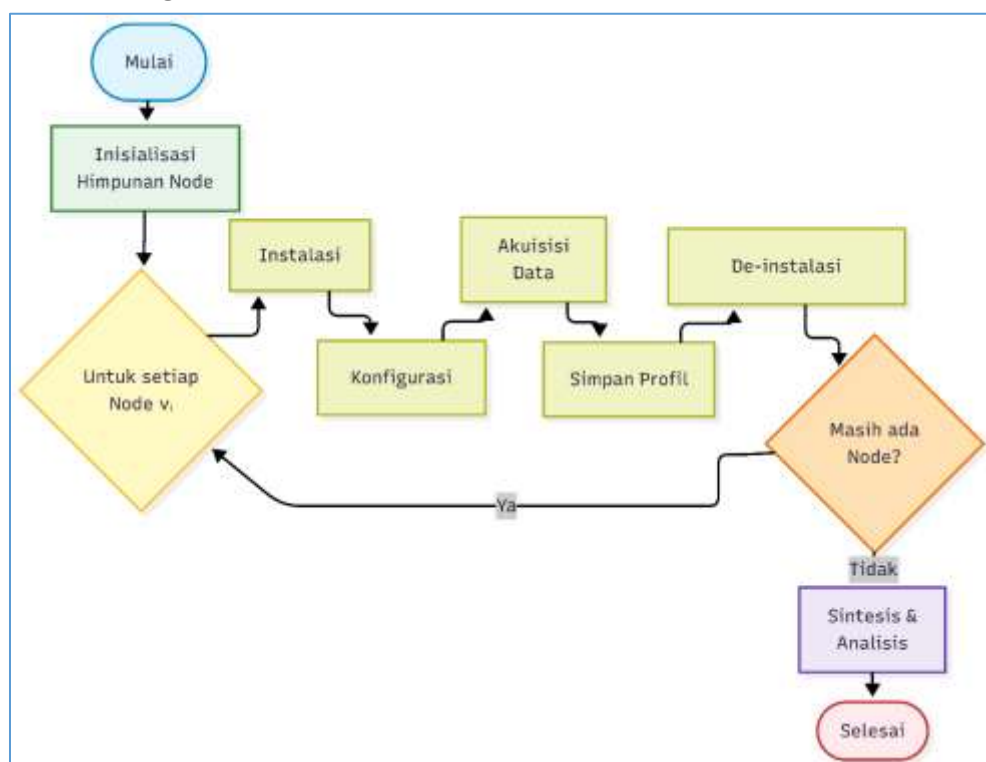
3. Total Konsumsi Energi (kWh):

$$E(v_i) = \int P(v_i, t) dt, \quad \text{selama periode pengukuran} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Persamaan (1) mendefinisikan beban puncak rata-rata, yaitu nilai rata-rata daya selama jam sibuk yang merepresentasikan besarnya beban saat periode operasional tertinggi. Persamaan (2) mendefinisikan beban dasar, yakni rata-rata daya pada jam non-operasional yang menggambarkan besarnya beban statis atau beban siaga yang selalu menyala. Adapun persamaan (3) digunakan untuk menghitung total konsumsi energi dalam satu periode pengukuran dengan mengintegrasikan nilai daya terhadap waktu, sehingga diperoleh nilai energi dalam satuan kWh untuk setiap node

Ekstraksi metrik-metrik fundamental ini merupakan praktik standar dalam analisis profil beban untuk mengkarakterisasi perilaku konsumsi energi [20].

3.3 Prosedur dan Algoritma



Gambar 4 Diagram alir algoritma pembuatan profil beban sekuensial

Gambar 4 menunjukkan diagram alir Algoritma Pembuatan Profil Beban Sekuensial yang menjadi prosedur inti dalam penelitian ini. Proses dimulai dengan inisialisasi himpunan node virtual V yang akan diukur, kemudian untuk setiap node $v_i \in V$ dilakukan siklus instalasi dan konfigurasi sensor, akuisisi serta penyimpanan profil daya, dan diakhiri dengan de-instalasi sebelum berlanjut ke node berikutnya hingga seluruh node selesai diukur. Tahap akhir berupa sintesis dan analisis merepresentasikan proses pengolahan kumpulan profil yang telah diperoleh untuk membentuk Pustaka Profil Energi, menyusun Peta Energi Graf Virtual, serta menghasilkan laporan analisis berisi temuan dan rekomendasi strategis.

Secara rinci, logika algoritma dapat dijabarkan sebagai berikut.

1. Inisialisasi: Tentukan himpunan node virtual V yang akan diukur.
2. Iterasi pengukuran: Untuk setiap $v_i \in V$:
 - a) Lakukan instalasi fisik sensor pada sirkuit yang sesuai dengan v_i .
 - b) Konfigurasi jaringan pada sensor.
 - c) Jalankan proses akuisisi dan kumpulkan data deret waktu $P(v_i, t)$ selama durasi standar.
 - d) Simpan data log yang terkumpul ke dalam basis data atau berkas terpisah.
 - e) Lakukan de-instalasi sensor.
3. Sintesis: Setelah semua node diukur, lakukan pengolahan dan analisis pada kumpulan data profil untuk membangun Peta Energi Graf Virtual.

Input utama prosedur ini adalah denah kelistrikan gedung serta data log mentah dari sensor dengan format (timestamp, power_watt), sedangkan output yang dihasilkan meliputi: (1) Pustaka Profil Energi dalam bentuk dataset terolah, (2) Peta Energi Graf Virtual yang memvisualisasikan hotspot dan karakteristik beban, dan (3) laporan analisis yang memuat temuan serta rekomendasi strategis

3.4 Evaluasi dan Validasi

Validasi metodologi ini dilakukan melalui analisis data yang dikumpulkan dari lima skenario pengujian yang dirancang untuk mengungkap karakteristik energi yang berbeda, sebagaimana diuraikan pada Bab 4. Skenario-skenario tersebut adalah: (1) Denyut Puncak, (2) Jeda Malam, (3) Transisi Pagi, (4) Beban Vampir, dan (5) Dekonstruksi Beban.

Keberhasilan metodologi dievaluasi berdasarkan kemampuannya untuk menghasilkan wawasan yang dapat ditindaklanjuti. Metrik evaluasi utama bersifat kualitatif dan analitis, mencakup:

- Kemampuan Identifikasi *Hotspot*: Kejelasan dalam menentukan peringkat kontributor energi terbesar.
- Kuantifikasi Beban Statis: Kemampuan untuk menghitung nilai beban dasar dan beban vampir yang konsisten.
- Koherensi Diagnostik: Kemampuan untuk memberikan penjelasan yang logis mengenai komposisi beban melalui skenario dekonstruksi.

Seluruh pengujian dan analisis dilakukan dalam lingkungan sebagai berikut:

- Objek Penelitian: Gedung FSTT, Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta.
- Perangkat Keras (HW): 1 unit *Power Meter* IoT REMONA PM1611Q.
- Perangkat Lunak (SW): Bahasa Pemrograman Python 3.9, dengan pustaka utama: Pandas 1.5.3 (untuk manipulasi data), Matplotlib 3.7.0 (untuk visualisasi), dan NetworkX 3.0 (untuk pemodelan graf).

4 Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan hasil yang diperoleh dari implementasi metodologi pemetaan energi sekuensial. Selanjutnya, dibahas secara mendalam interpretasi temuan tersebut dalam kaitannya dengan literatur yang relevan. Bagian pertama (4.1) memaparkan data kuantitatif dan kualitatif yang terkumpul, sedangkan bagian kedua (4.2) berfokus pada analisis serta diskusi terhadap hasil penelitian.

4.1 Hasil

Data pada bagian ini merupakan luaran langsung dari proses akuisisi dan pengolahan yang dilakukan di lima titik pengukuran (node virtual) yang telah ditetapkan.

4.1.1 Profil Beban Puncak dan Beban Dasar Operasional

Pengukuran pada hari kerja menghasilkan metrik kuantitatif beban puncak (*peak load*) dan beban dasar operasional (*operational baseload*) setiap node. Ringkasan hasil ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Ringkasan metrik beban puncak dan beban dasar operasional

ID Node	Lokasi	Beban Puncak Rata-rata (kW)	Beban Puncak Maksimum (kW)	Beban Dasar Operasional (kW)
N1	Lab Komputer	2.80	3.51	0.25
N2	Ruang Server	1.50	1.60	1.45
N3	Ruang Kelas A	2.20	3.00	0.05
N4	Perpustakaan	1.20	2.00	0.10
N5	Ruang Dosen	0.40	0.80	0.02

Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata dan maksimum daya selama jam sibuk, serta daya minimum selama jam non-operasional hari kerja, sehingga memberikan gambaran awal mengenai node yang berperan sebagai hotspot utama maupun sumber beban dasar yang dominan di dalam Gedung.

4.1.2 Profil Beban Akhir Pekan (Beban Vampir)

Pengukuran pada akhir pekan (Sabtu) digunakan untuk mengkuantifikasi beban vampir (*vampire load*) dan mengestimasi potensi pemborosan energi tahunan. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Kuantifikasi beban vampir dan estimasi pemborosan tahunan

ID Node	Lokasi	Beban Vampir Rata-rata (kW)	Estimasi Pemborosan Tahunan (kWh)
N1	Lab Komputer	0.25	2,190
N2	Ruang Server	1.45	12,702
N3	Ruang Kelas A	0.05	438
N4	Perpustakaan	0.10	876
N5	Ruang Dosen	0.02	175

Tabel 2 memperlihatkan rata-rata daya yang terukur pada akhir pekan beserta estimasi pemborosan energi tahunan, sehingga memudahkan identifikasi ruang mana yang menyumbang konsumsi energi siaga terbesar dan layak menjadi prioritas intervensi efisiensi.

4.1.3 Hasil Dekonstruksi Beban

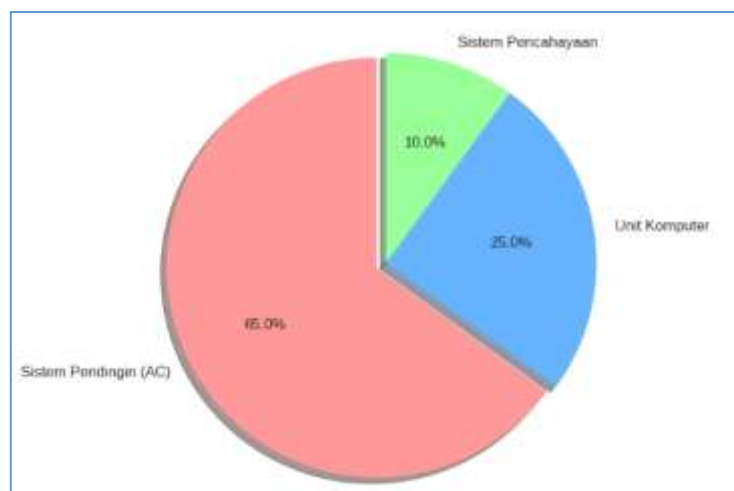
Skenario dekonstruksi beban pada N1 (Laboratorium Komputer) menghasilkan data komposisi konsumsi daya berdasarkan kelompok peranti utama. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3 Komposisi beban di N1 (laboratorium komputer)

Kelompok Peranti	Konsumsi Daya (kW)	Kontribusi (%)
Sistem Pendingin (HVAC)	1.82	65.0
Unit Komputer & Monitor	0.70	25.0
Sistem Pencahayaan	0.28	10.0
Total	2.80	100.0

Tabel 3 merinci kontribusi daya dari masing-masing kelompok peranti terhadap total beban rata-rata, yang mengungkap bahwa pengaruh terbesar berasal dari sistem pendingin (HVAC) dan dengan demikian mengarahkan fokus strategi penghematan pada pengelolaan beban mekanis dibanding hanya pada peralatan komputasi.

Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 3 menegaskan bahwa mayoritas konsumsi daya di Laboratorium Komputer didominasi oleh sistem pendingin (HVAC) dengan porsi 65%, sementara unit komputer dan monitor hanya menyumbang 25% dan sistem pencahayaan sekitar 10%, sehingga upaya penghematan energi yang paling efektif sebaiknya diprioritaskan pada pengelolaan operasi dan pengaturan setelan HVAC sebelum menysasar intervensi pada peralatan lainnya.



Gambar 5 Dekonstruksi beban setiap kelompok peranti di labkom

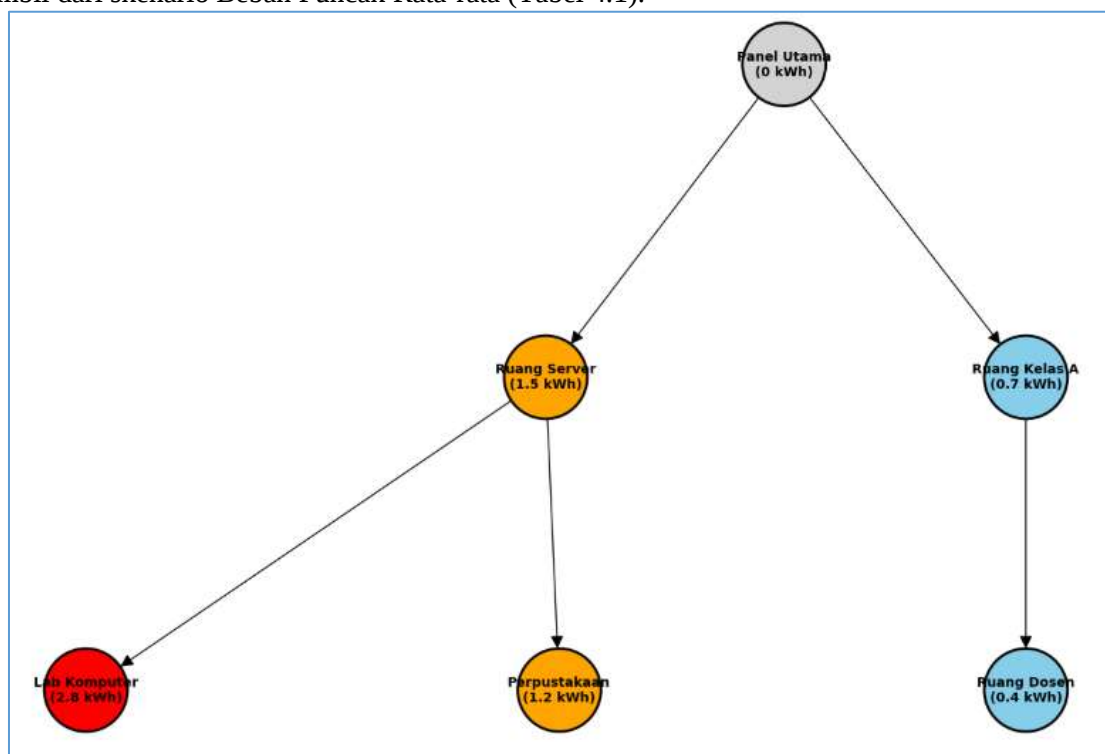
Gambar 5 memvisualisasikan temuan proporsi masing-masing kelompok peranti, di mana sektor terbesar mewakili beban HVAC, diikuti sektor unit komputer dan pencahayaan, sehingga memudahkan pembaca untuk menangkap dengan cepat komponen mana yang paling berkontribusi terhadap beban total di ruang tersebut.

- **4.1.4 Pola Transisi Beban**

Observasi data deret waktu dari skenario transisi pagi (07.00 - 09.00) menunjukkan adanya peningkatan konsumsi daya yang curam pada *node* N1 dan N3, di mana daya meningkat dari sekitar 0.25 kW menjadi lebih dari 3.0 kW dalam kurun waktu singkat.

- **4.1.5 Peta Energi Graf Virtual dan Analisis Jaringan**

Sintesis dari data profil dan informasi struktur sirkuit kelistrikan menghasilkan sebuah Peta Energi Graf Virtual. Gambar 6 memvisualisasikan model graf ini, dengan nilai konsumsi yang diambil dari skenario Beban Puncak Rata-rata (Tabel 4.1).



Gambar 6 Visualisasi peta energi graf virtual pada skenario beban puncak

Gambar 6 mengilustrasikan Peta Energi Graf Virtual gedung pada kondisi beban puncak, di mana setiap lingkaran merepresentasikan sebuah ruang (*node*) dan setiap panah menunjukkan arah aliran daya dari panel utama menuju ruang-ruang turunan. Panel Utama berada di posisi paling atas

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

sebagai sumber distribusi, dengan cabang ke Ruang Server dan Ruang Kelas A, yang kemudian masing-masing meneruskan suplai listrik ke Lab Komputer, Perpustakaan, dan Ruang Dosen sesuai struktur jaringan kelistrikan gedung. Nilai beban pada setiap node ditampilkan di dalam kurung, sehingga terlihat jelas bahwa Lab Komputer dan Perpustakaan “digantungkan” pada sirkuit Ruang Server, sementara Ruang Dosen bergantung pada Ruang Kelas A; representasi ini memudahkan analisis dampak berantai jika terjadi gangguan pada satu node serta membantu menghitung agregasi beban pada tiap jalur distribusi saat jam puncak.

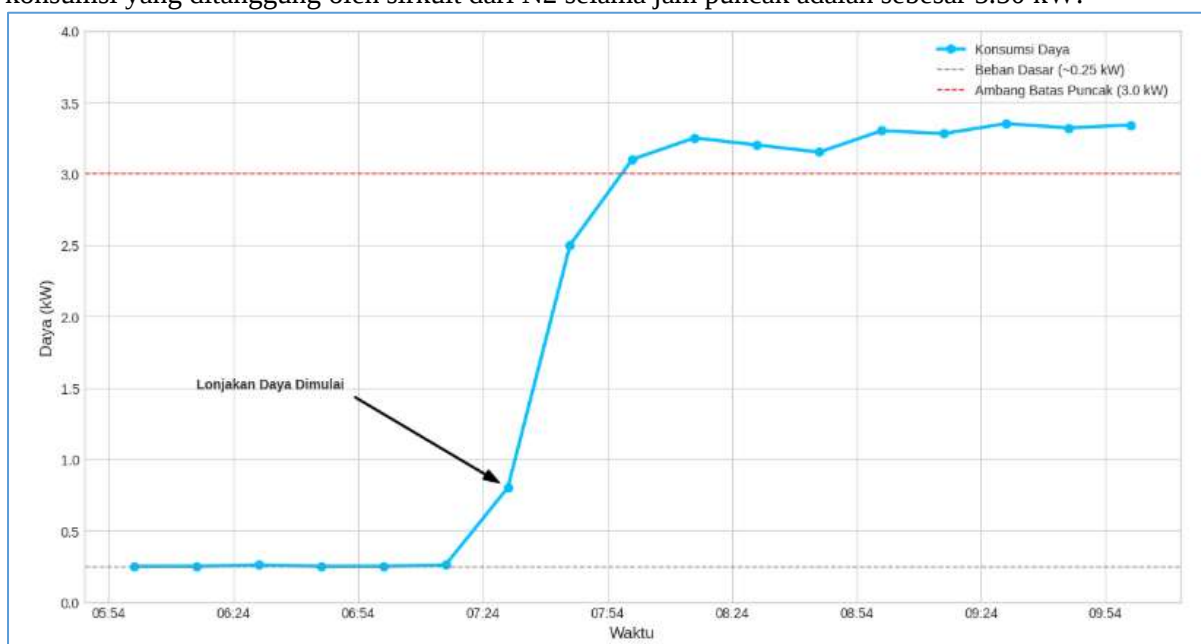
Analisis terhadap model graf ini menghasilkan informasi kuantitatif mengenai struktur dan dependensi jaringan:

- Informasi Dasar Graf:
 - Jumlah Node: 6 (termasuk Panel Utama)
 - Jumlah Edge: 5

Penerapan analisis pada graf ini mengungkap dua wawasan utama:

- Analisis Dampak Berantai:
 - Simulasi kegagalan daya pada *node* N2 (Ruang Server) menunjukkan bahwa *node* turunan yang akan terdampak secara langsung adalah N1 (Lab Komputer) dan N4 (Perpustakaan).
- Analisis Agregasi Konsumsi:
 - Total beban konsumsi yang ditanggung oleh sirkuit dari N2 (Ruang Server) selama jam puncak adalah agregasi dari konsumsi N2, N1, dan N4, yaitu sebesar 5.50 kW ($1.50 + 2.80 + 1.20$).

Simulasi kegagalan daya pada *node* N2 (Ruang Server) menunjukkan bahwa *node* turunan yang akan terdampak secara langsung adalah N1 (Lab Komputer) dan N4 (Perpustakaan). Total beban konsumsi yang ditanggung oleh sirkuit dari N2 selama jam puncak adalah sebesar 5.50 kW.



Gambar 7 Kurva beban transisi pagi di N1 (laboratorium komputer)

Gambar 7 menunjukkan kurva beban untuk N1 (Laboratorium Komputer) pada hari kerja tipikal. Daya meningkat dari sekitar 0.25 kW pada pukul 07.00 menjadi lebih dari 3.0 kW sesaat setelah pukul 08.00.

4.2 Pembahasan

Hasil yang disajikan pada bagian sebelumnya memberikan wawasan mendalam mengenai karakteristik konsumsi energi gedung. Interpretasi terhadap data ini, jika dikaitkan dengan literatur yang relevan, dapat mengungkap signifikansi temuan dan keunikan dari metodologi yang diusulkan. Identifikasi N1 (Laboratorium Komputer) dan N3 (Ruang Kelas A) sebagai *hotspot* energi utama (Tabel 4.1) mengonfirmasi bahwa area dengan konsentrasi perangkat elektronik tinggi dan hunian

padat merupakan kontributor utama beban puncak, sebuah temuan yang konsisten dengan studi-studi mengenai perilaku penghuni dan dampaknya terhadap energi [16]. Temuan yang lebih signifikan adalah terungkapnya pola “mesin ganda” dalam ekosistem energi gedung. Di satu sisi, terdapat beban dinamis yang sangat dipengaruhi oleh aktivitas manusia, dan di sisi lain, terdapat beban statis konstan dari infrastruktur kritis (N2: Ruang Server). Pola ini menyiratkan bahwa strategi manajemen energi tunggal tidak akan efektif; sebaliknya, diperlukan pendekatan hibrida yang menargetkan efisiensi teknologi untuk beban statis dan intervensi perilaku untuk beban dinamis.

Analisis dekonstruksi beban pada N1 (Tabel 4.3) memberikan diagnosis yang paling kuat dan dapat ditindaklanjuti. Temuan bahwa sistem HVAC menyumbang 65% dari total konsumsi energi di *hotspot* utama ini sangat krusial. Hal ini menggeser fokus dari asumsi umum bahwa komputer adalah konsumen utama di laboratorium, ke arah optimalisasi sistem mekanis. Wawasan ini sejalan dengan literatur yang luas yang mengidentifikasi HVAC sebagai salah satu sistem dengan potensi penghematan energi terbesar di gedung komersial dan institusional [22]. Lebih lanjut, kuantifikasi beban vampir di N1 sebesar 2,190 kWh/tahun (Tabel 4.2) memberikan bukti nyata adanya pemborosan energi statis yang signifikan, sebuah fenomena yang telah diidentifikasi sebagai target penting untuk efisiensi energi di berbagai studi [21]. Peta Energi Graf Virtual (4.1.4) juga berhasil memodelkan dependensi kritis dalam jaringan, di mana operasional Lab Komputer dan Perpustakaan bergantung pada sirkuit Ruang Server, sebuah wawasan struktural yang tidak dapat diperoleh dari data konsumsi biasa namun sejalan dengan tujuan *graph mining* dalam manajemen gedung [19].



Gambar 8 Pemasangan perangkat IOT PM1611Q pada MCB

Keunikan dan kelebihan utama dari penelitian ini terletak pada metodologinya. Sementara sebagian besar penelitian *state-of-the-art* berfokus pada analisis data yang dikumpulkan dari jaringan sensor yang ekstensif dan beroperasi secara simultan [6], [14], penelitian ini mendemonstrasikan kelayakan pendekatan *load profiling* sekuensial dengan instrumen tunggal. Metodologi ini terbukti mampu menghasilkan wawasan yang dalam dan spesifik; sebanding dengan yang diharapkan dari audit energi yang lebih mahal—namun dengan biaya investasi perangkat keras yang jauh lebih rendah. Ini secara langsung menjawab celah penelitian yang teridentifikasi, yaitu kebutuhan akan metodologi akuisisi data awal yang efisien secara biaya. Namun, metodologi ini juga memiliki keterbatasan yang jelas. Ketiadaan data simultan menghalangi kemampuan untuk melakukan analisis

<http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>

korelasi *real-time* antar *node*, yang merupakan kekuatan dari sistem multi-sensor. Selain itu, karena pengukuran dilakukan pada minggu-minggu yang berbeda, hasil ini merepresentasikan perilaku “tipikal” dan mungkin tidak menangkap anomali yang disebabkan oleh peristiwa non-standar yang terjadi di seluruh gedung secara bersamaan.

Penelitian ini menghasilkan implikasi ganda, baik dari sisi praktis maupun teoretis. Secara praktis, temuan yang ada menawarkan panduan berbasis bukti bagi manajemen gedung untuk menerapkan program efisiensi energi yang terarah dan memiliki potensi pengembalian investasi (ROI) yang tinggi. Sebagai contoh, rekomendasi untuk memprioritaskan optimalisasi HVAC di Laboratorium Komputer merupakan hasil langsung dari diagnosis data. Secara teoretis, penelitian ini berhasil memvalidasi metode pemetaan sekuensial sebagai sebuah pendekatan awal yang berharga dalam audit energi. Oleh karena itu, arah penelitian selanjutnya disarankan untuk berfokus pada implementasi sistem multi-sensor *real-time* untuk mengembangkan model Peta Energi Graf Virtual menjadi sebuah *digital twin* yang dinamis. Pustaka Profil Energi yang telah dibangun dalam penelitian ini akan berfungsi sebagai data dasar (*baseline*) yang krusial untuk mengkalibrasi dan memvalidasi sistem yang lebih canggih, yang pada akhirnya dapat diintegrasikan dengan BEMS untuk mencapai kontrol dan optimisasi energi secara otomatis [13].

5 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi sebuah metodologi berbiaya rendah untuk analisis konsumsi energi di gedung cerdas, yang berhasil dicapai melalui implementasi pemetaan energi sekuensial. Temuan paling signifikan menunjukkan bahwa pendekatan dengan satu instrumen IoT mampu mengidentifikasi *hotspot* energi secara presisi, mengkuantifikasi potensi pemborosan dari beban statis hingga 2,190 kWh/tahun di satu lokasi, serta mendiagnosis bahwa sistem pendingin ruangan (HVAC) merupakan kontributor utama (65%) pada beban puncak. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada validasi metode pemetaan sekuensial sebagai sebuah jembatan pragmatis yang mengisi kesenjangan antara ketiadaan data dengan kebutuhan akan sistem pemantauan komprehensif yang mahal. Implikasi utama dari temuan ini adalah penyediaan sebuah peta jalan yang jelas dan berbasis bukti bagi manajemen fasilitas untuk menerapkan program efisiensi yang tertarget, serta pembentukan sebuah data dasar (*baseline*) yang krusial untuk pengembangan sistem di masa depan. Keterbatasan utama dari metodologi ini adalah ketiadaan data simultan yang menghalangi analisis korelasi secara *real-time*. Oleh karena itu, arah penelitian lanjutan yang disarankan adalah implementasi sistem multi-sensor untuk mentransformasi peta energi graf virtual yang statis menjadi sebuah *digital twin* yang dinamis, dengan memanfaatkan pustaka profil yang telah ada sebagai dasar validasi untuk mencapai sistem manajemen energi yang terintegrasi dan otomatis.

Referensi

- [1] K. M. Al-Obaidi, “A Review of using Internet of Things (IoT) for Energy-Efficient Buildings and Smart Cities: Concepts, Applications, Trends, and Challenges,” *Energies*, Vol. 15, No. 16, Art. No. 5991, 2022. DOI: 10.3390/en15165991.
- [2] C. L. Athanasiadis, T. A. Papadopoulos, G. C. Kryonidis, and D. I. Doukas, “A Review of Distribution Network Applications based on Smart Meter Data Analytics,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 191, Art. No. 114151, 2024. DOI: 10.1016/j.rser.2023.114151.
- [3] S. Banik, S. K. Saha, T. Banik, and S. M. M. Hossain, “Anomaly Detection Techniques in Smart Grid Systems: A Review,” in *Proc. 2023 IEEE World AI IoT Congress (AIIoT)*, 2023. DOI: 10.1109/AIIoT58121.2023.10174485.
- [4] A. Bayasgalan, “A Comprehensive Comparative Analysis of Building Energy Management Models: Grid-Interactive Efficient Buildings Perspective,” *Energies*, Vol. 17, No. 19, Art. No. 4794, 2024. DOI: 10.3390/en17194794.
- [5] B. Chatuanramthamghaka, S. Deb, K. R. Singh, T. S. Ustun, and A. Kalam, “Reviewing Demand Response for Energy Management with Consideration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles,” *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 15, No. 9, p. 412, 2024. DOI: 10.3390/wevj15090412.
- [6] S. Chen, G. Zhang, X. Xia, Y. Chen, S. Setunge, and L. Shi, “The Impacts of Occupant Behavior

- on Building Energy Consumption: A Review,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 45, Art. No. 101212, 2021. DOI: 10.1016/j.seta.2021.101212.
- [7] Y. Chen, “Optimal Control Strategies for Demand Response in Buildings,” *Buildings*, Vol. 12, No. 3, Art. No. 371, 2022. DOI: 10.3390/buildings12030371.
- [8] C. Fan, M. Song, F. Xiao, and X. Xue, “Discovering Complex Knowledge in Massive Building Operational Data using Graph Mining for Building Energy Management,” *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 2481–2487, 2019. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.01.378.
- [9] A. C. Gheorghe, “Advances in Reducing Household Electrical and Electronic Standby Energy Consumption: A Review,” *Energies*, Vol. 18, No. 4, Art. No. 965, 2025. DOI: 10.3390/en18040965.
- [10] M. A. Hannan et al., “A Review of Internet of Energy based Building Energy Management Systems: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 38997–39014, 2018. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2852811.
- [11] G. Kamiya, *New Perspectives on Internet Electricity use in 2030*. International Energy Agency, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/342643762_New_perspectives_on_internet_electricity_use_in_2030
- [12] S. Mari, G. Bucci, F. Ciancetta, E. Fiorucci, and A. Fioravanti, “A Review of Non-Intrusive Load Monitoring Applications in Industrial and Residential Contexts,” *Energies*, Vol. 15, No. 23, Art. No. 9011, 2022. DOI: 10.3390/en15239011.
- [13] D. Mariano-Hernández, L. Hernández-Callejo, A. L. Zorita-Lamadrid, O. Duque-Pérez, and F. Santos García, “A Review of Strategies for Building Energy Management System: Model Predictive Control, Demand Side Management, Optimization, and Fault Detect & Diagnosis,” *Journal of Building Engineering*, Vol. 33, Art. No. 101692, 2020. DOI: 10.1016/j.jobbe.2020.101692.
- [14] S. Nagurvali and P. V. S. S. R. C. Mouli, “A Review on Electricity Load Forecasting using Data Mining,” in *Proc. 2023 7th Int. Conf. on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, 2023, pp. 361–366. DOI: 10.1109/ICCCS57802.2023.10141381.
- [15] “Non-Intrusive Load Monitoring: A Review,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 14, No. 1, pp. 769–784, 2023. DOI: 10.1109/TSG.2023.3261271.
- [16] M. Rana and M. M. Rahman, “Electricity Demand Forecasting Methodologies and Applications: A Review,” *ResearchGate*, Preprint, 2024.
- [17] R. Revichandran, J. S. Mohamed Ali, M. Idres, and A. K. M. Mohiuddin, “A Review of HVAC System Optimization and its Effects on Saving Total Energy Utilization of a Building,” *International Journal of Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, Vol. 93, No. 1, p. 6482, 2022. DOI: 10.37934/arfmts.93.1.6482.
- [18] R. Rituraj, D. T. Várkonyi, A. Mosavi, J. Pap, A. R. Várkonyi-Kóczy, and C. Makó, “Machine Learning in Smart Grids: A Systematic Review, Novel Taxonomy, and Comparative Performance Evaluation,” *Pro Publico Bono – Public Administration*, Vol. 12, No. 1, pp. 53–83, 2024. DOI: 10.32575/ppb.2024.1.3.
- [19] F. Song, “The Effects of Digital Transformation on Corporate Energy Efficiency,” *Frontiers in Sustainability*, 2025. DOI: 10.3389/frsus.2025.1567413.
- [20] Y. Wang, Q. Chen, C. Kang, M. Zhang, K. Wang, and Y. Zhao, “Load Profiling and Its Application to Demand Response: A Review,” *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 20, No. 2, pp. 117–129, 2015. DOI: 10.1109/TST.2015.7085625.
- [21] Y. Wang, Q. Chen, T. Hong, and C. Kang, “Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018. DOI: 10.1109/TSG.2018.2818169.
- [22] Y. Wei, X. Zhang, Y. Shi, L. Xia, S. Pan, J. Wu, M. Han, and X. Zhao, “A Review of Data-Driven Approaches for Prediction and Classification of Building Energy Consumption,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, pp. 1027–1047, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.108.
- [23] Y. Yang, Q. Duan, and F. Samadi, “A Systematic Review of Building Energy Performance Forecasting Approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 223, Art. No. 116260, 2025. DOI: 10.1016/j.rser.2025.116260.