

Strategi Efisiensi Konsumsi Listrik di RS Pertamina Panorama Balikpapan dengan Metode *Fuzzy Logic*

Fither Romilado¹, Yunus Effendi¹, Dwi Astharini²

¹Magister Pengelolaan Sumber Daya Alam, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Al-Azhar Indonesia,

²Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Al-Azhar Indonesia,

Jl. Sisingamangaraja No.2, RT.2/RW.1, Selong, Kebayoran Baru, Kota Jakarta Selatan, Jakarta 12110.

Penulis untuk Korespondensi/E-mail: surat.romilado@gmail.com

Abstract – Hospitals play a vital role in providing promotive, preventive, curative, and rehabilitative healthcare services. The highest electricity consumption in hospitals comes from lighting and air conditioning systems, thus requiring the implementation of an energy efficiency culture and appropriate technology selection to achieve environmentally friendly (*green hospital*) operations. This study aims to analyze the potential of applying energy efficiency culture and technology selection as well as to recommend strategies for reducing operational costs and developing energy-saving SOPs as part of green hospital practices. The *fuzzy logic* approach was applied to measure the level of energy efficiency at Pertamina Panorama Hospital Balikpapan, considering technological, electrical, mechanical and operational cost indicators. Data were collected from questionnaires distributed to 70 hospital staff to evaluate how energy-saving culture and technology choices support green hospital implementation. The results show that the adoption of technologies such as BMS, *Smart Energy*, *Smart Material*, *Smart Water*, *Smart Waste*, IEQ and *Resilience & Safety* reduced maintenance costs by 10–20%, despite an initial investment increase of 5–15%. The *centroid fuzzy logic* analysis yielded a crisp value of 84.7%, indicating efficient electricity consumption. The synergy between efficiency culture, modern technology, and cost strategies makes hospitals more energy-efficient, environmentally friendly and sustainable.

Abstrak– Rumah sakit memiliki peran penting dalam menyediakan pelayanan kesehatan promotif, preventif, kuratif dan rehabilitatif. Konsumsi listrik terbesar di rumah sakit berasal dari sistem pencahayaan dan pendingin udara, sehingga diperlukan penerapan budaya efisiensi energi serta pemilihan teknologi tepat guna untuk mewujudkan rumah sakit ramah lingkungan (*green hospital*). Penelitian ini bertujuan menganalisis potensi penerapan budaya efisiensi konsumsi listrik dan pemilihan teknologi serta merekomendasikan strategi efisiensi biaya operasional dan penyusunan SOP hemat energi sebagai bagian dari praktik *green hospital*. Metodologi dengan pendekatan *fuzzy logic* digunakan untuk mengukur tingkat efisiensi energi di Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan melalui indikator teknologi, elektrik, mekanik dan biaya operasional. Data diperoleh dari kuesioner yang diisi oleh 70 staf rumah sakit untuk menilai sejauh mana budaya efisiensi dan pemilihan teknologi mendukung penerapan *green hospital*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi seperti BMS, *Smart Energy*, *Smart Material*, *Smart Water*, *Smart Waste*, IEQ serta *Resilience & Safety* menurunkan biaya pemeliharaan sebesar 10–20% meskipun investasi awal meningkat 5–15%. Nilai *crisp* hasil pendekatan *centroid fuzzy logic* sebesar 84,7% menunjukkan konsumsi listrik tergolong efisien. Sinergi budaya efisiensi, teknologi modern dan strategi biaya menjadikan rumah sakit lebih hemat energi, ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Keywords - Efisiensi Energi, Fuzzy Logic, Green Building, Green Hospital.

PENDAHULUAN

Berdasarkan data International Energy Agency pada tahun 2023, Indonesia menghasilkan emisi CO₂ sebesar 651.671 M/T di tahun 2022 dengan produksi energi tertinggi dari pembakaran batubara yang mencapai 248.576 GWh untuk menyuplai energi listrik di seluruh sektor. Emisi CO₂ termasuk golongan Gas Rumah Kaca (GRK) yang dapat memerangkap radiasi inframerah matahari, sehingga terjadi kenaikan suhu di bumi. Tingginya konsumsi energi listrik menjadi penyebab perubahan iklim karena tingginya emisi CO₂ di atmosfer [1]. Perubahan iklim memiliki dampak negatif terhadap ketersediaan air, pertanian, migrasi, kesehatan dan biodiversitas. Oleh sebab itu diperlukan mitigasi perubahan iklim melalui penggunaan energi terbarukan beserta praktik efisiensi dan konservasi energi listrik [2].

Peningkatan emisi CO₂ sejalan dengan tingginya konsumsi listrik, limbah, dari rumah sakit [3]. Di Indonesia, jumlah rumah sakit pada tahun 2019-2023 mengalami peningkatan hingga 9,7%, yaitu dari 2.877 menjadi 3.155 rumah sakit, meliputi, rumah sakit umum dan rumah sakit khusus dari berbagai tipe (A, B, C, dan D) serta semua kepemilikan (pemerintah dan swasta) [4]. Rumah sakit berperan penting dalam penyediaan fasilitas serta jaminan pelayanan kesehatan secara promotif, preventif, kuratif dan rehabilitatif. Efisiensi penggunaan sumber daya perlu dilakukan sebagai strategi mitigasi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan kualitas pelayanan kesehatan [5].

Konsumsi listrik terbesar di rumah sakit terletak pada penggunaan lampu dan pendingin udara (AC) [5]. Manajemen efisiensi konsumsi listrik perlu dilakukan melalui implementasi kebijakan, strategi dan teknologi yang dapat mengurangi konsumsi energi, emisi serta biaya operasional [6]. Hal ini dapat diwujudkan melalui optimalisasi pada proses bisnis rumah sakit yang melibatkan komitmen manajemen dengan pemberdayaan karyawan untuk berkontribusi mencapai tujuan utama rumah sakit. Perbaikan pada sektor operasional yang belum efisien perlu dilakukan agar dapat menghasilkan efisiensi biaya tanpa mengorbankan kualitas pelayanan [7].

Efisiensi konsumsi listrik merupakan salah satu kriteria *green building* untuk mewujudkan rumah sakit ramah lingkungan (*green hospital*) melalui penggunaan energi ramah lingkungan serta teknologi yang mendukung efisiensi energi. Dalam

sistem pencahayaan, rumah sakit dapat menerapkan kombinasi pencahayaan matahari dengan lampu hemat energi [8]. Pendingin udara menggunakan teknologi yang dapat mengontrol temperatur secara efisien sesuai kondisi ruangan [9]. Upaya tersebut perlu difasilitasi oleh kebijakan yang dapat membentuk budaya efisiensi konsumsi listrik berkelanjutan di seluruh jajaran manajemen dan pegawai rumah sakit [5]. Hal ini perlu dilakukan bersamaan dengan pengembangan sumber daya manusia untuk meningkatkan wawasan serta keterampilan terkait informasi, kebijakan, etika dan isu lingkungan yang mendasari konsep *green hospital* [7].

Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan (RSPB) memperoleh peringkat “Gold” dalam sertifikasi GREENSHIP Bangunan Baru dari Green Building Council Indonesia. Hasil penilaian pada kriteria efisiensi dan konservasi energi, khususnya pada sistem pencahayaan dan pendingin udara akan menjadi fokus utama penelitian ini. RSPB menggunakan lampu LED serta teknologi pendingin udara *Variable Refrigerant Flow* (VRF) yang sesuai standar *green building*, namun pada praktiknya perlu dilakukan pengawasan serta optimalisasi melalui penggunaan energi alami dan buatan pada kondisi tertentu untuk efisiensi dari segi energi maupun finansial [8].

Praktik *green hospital* di Indonesia sebagian besar terbatas dalam penilaian komponen ramah lingkungan menggunakan kriteria GREENSHIP, yang membutuhkan pengawasan berkelanjutan. Salah satunya melalui implementasi budaya efisiensi konsumsi listrik sebagai upaya dalam mengoptimalkan kinerja komponen ramah lingkungan yang telah ada. Penelitian [8] telah mengkaji pengaruh implementasi kebijakan *green hospital* terhadap perilaku hemat energi di kalangan pegawai rumah sakit. Oleh karena itu diperlukan menganalisis penerapan budaya efisiensi konsumsi listrik dan pemilihan teknologi pada sistem pencahayaan dan pendingin udara di Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan. Tujuan khusus penelitian adalah untuk memberikan rekomendasi strategi efisiensi energi dan pemilihan teknologi yang mendukung penghematan biaya operasional rumah sakit, sekaligus mendorong penerapan SOP hemat energi serta kampanye *green hospital* secara berkelanjutan.

METODE

Tempat dan Waktu Penelitian

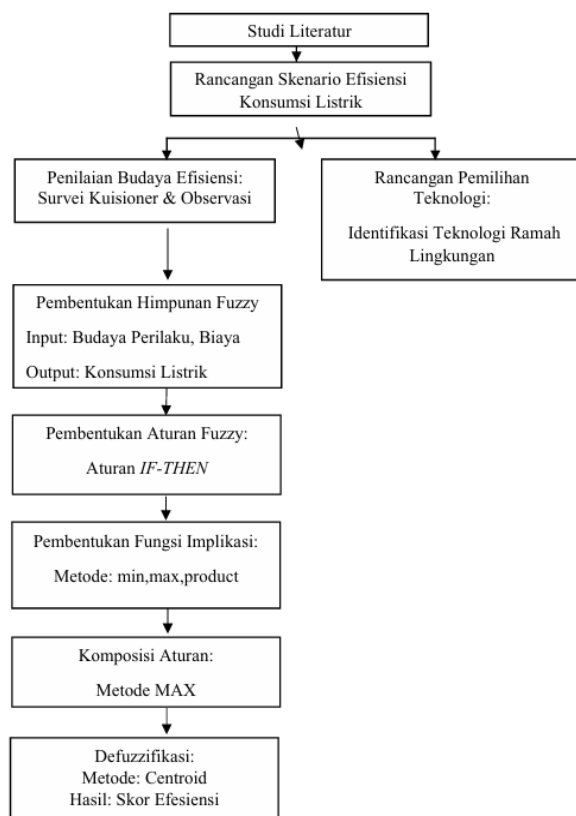
Penelitian dilakukan pada Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan (RSPPB) yang terletak di Jalan Cepu No.1, Mekar Sari, Kecamatan Balikpapan Tengah, Kota Balikpapan, Kalimantan Timur 76122 (gambar 1). Proses pengambilan data dilakukan dari bulan Februari hingga Maret 2025.



Gambar 1. Tampak Depan Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan

Diagram Alir Penelitian

Proses pengolahan data menggambarkan proses analisis dan tahapan kerja sistem dalam penelitian, berikut diagram alir sistem fuzzy yang menjelaskan hubungan antara variabel input, proses inferensi fuzzy dan output yang dihasilkan (gambar 2).



Gambar 2. Diagram Alir Peneliti

Tahapan Penelitian

Standarisasi Greenship

Peninjauan hasil *Final Assessment Greenship New Building* Versi 1.2 milik RSPPB untuk mengidentifikasi parameter yang perlu dioptimalkan dalam mewujudkan *green hospital*. Parameter Efisiensi dan Konservasi Energi (EEC) dijadikan fokus utama penelitian karena rumah sakit memiliki konsumsi energi penggunaannya. Kemudian diperoleh topik penelitian untuk melihat pengaruh dari strategi penerapan budaya efisiensi konsumsi listrik terhadap penggunaan energi sistem pencahayaan (lampu) dan sistem pendingin udara (*Air Conditioning* atau AC). Hal tersebut dijadikan sebagai pedoman dalam mencari referensi ilmiah yang berkaitan dengan topik penelitian.

Rancangan Skenario Efisiensi Konsumsi listrik

Pada tahapan ini dilakukan perancangan skenario *Standard Operational Procedure* (SOP) terkait efisiensi penggunaan sistem pencahayaan dan pendingin udara. Skenario SOP terkait efisiensi sistem pencahayaan dirancang berdasarkan kriteria EEC pada GREENSHIP untuk tolak ukur pencahayaan buatan dan penggunaan pencahayaan alami, sedangkan untuk skenario SOP efisiensi pendingin udara dirancang berdasarkan Permenkes No. 7 Tahun 2019 untuk kriteria baku mutu suhu rumah sakit.

Penilaian Budaya Efisiensi Konsumsi Listrik

Penilaian dilakukan melalui distribusi kuesioner yang terdiri dari pertanyaan seputar skenario SOP efisiensi sistem pencahayaan dan pendingin udara. Tujuannya adalah untuk mengukur sejauh apa budaya efisiensi konsumsi listrik dari lampu dan AC diterapkan di kalangan manajemen, pegawai dan tenaga kesehatan di RSPPB. Kemudian hasil kuesioner yang diperoleh akan digunakan dalam analisis *fuzzy logic*.

Rancangan Pemilihan Teknologi

Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan telah menerapkan pemilihan teknologi sistem pencahayaan berupa lampu LED dan pendingin udara. Kemudian kedua pemilihan teknologi ini akan dianalisis potensi efisiensinya apabila dilengkapi dengan sensor untuk pengaturan intensitas cahaya dan pengaturan suhu pada sistem pendingin udara secara otomatis. Penggunaan sensor ini nantinya akan dianalisis potensi efisiensinya bersama dengan penerapan budaya efisiensi energi menggunakan metode *fuzzy logic*.

Pembentukan Aturan Fuzzy

Aturan fuzzy dibuat berdasarkan gabungan dari beberapa variabel fuzzy yang telah ditentukan pada tahapan sebelumnya yaitu budaya efisiensi konsumsi listrik, pemilihan teknologi dan konsumsi listrik dengan komposisi aturan berupa IF (budaya efisiensi konsumsi listrik) IS.... AND (pemilihan teknologi) IS....THEN (konsumsi listrik) IS.

Pembentukan Fungsi Implikasi

Tahapan ini bertujuan untuk memetakan nilai keanggotaan dari setiap variabel input dengan output. Ketentuannya adalah jika nilai a adalah A_i dan b adalah B_i , maka nilai c adalah C_i [9]. Pada tahapan ini menggunakan implikasi *MIN* (minimum) dengan rumus (1).

$$\mu(x_i) = \min(\mu_a(x_i), \mu_b(x_i)) \quad (1)$$

Keterangan:

μ_a = nilai keanggotaan *input* fuzzy sampai dengan aturan ke – i

μ_b = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy sampai dengan aturan ke – i

Komposisi Aturan

Komposisi aturan dilakukan untuk memetakan beberapa aturan yang terpenuhi terkait nilai fuzzy [9]. Pada tahapan ini digunakan metode *MAX* (*maximum*) untuk mengambil nilai terbesar dari keluaran suatu aturan dengan rumus (2).

$$\mu(x_i) = \max(\mu_{sf}(x_i), \mu_{kf}(x_i)) \quad (2)$$

Keterangan:

μ_{sf} = nilai keanggotaan *output* fuzzy sampai dengan aturan ke – i

μ_{kf} = nilai keanggotaan konsekuen fuzzy sampai dengan aturan ke – i

Defuzzifikasi

Pada tahapan ini dilakukan penegasan terhadap nilai keluaran dari aturan fuzzy menjadi nilai *crisp* (numerik). Umumnya pada penelitian digunakan metode centroid, berikut rumus (3) defuzzifikasi centroid [10].

$$y = \frac{\sum \mu(x_i)x_i}{\sum \mu(x_i)} \quad (3)$$

Keterangan:

$\mu(x_i)$ = nilai keanggotaan input fuzzy pada titik tersebut

x_i = nilai domain ke – i

HASIL DAN PEMBAHASAN

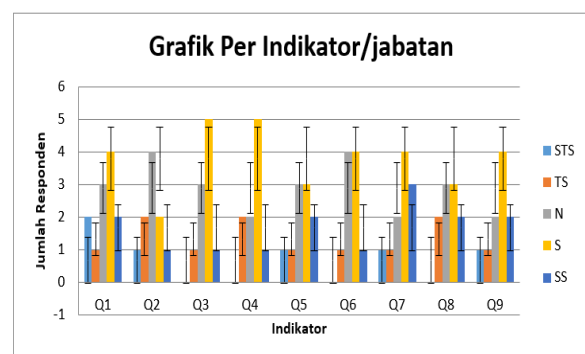
Rancangan Skenario Efisiensi Konsumsi listrik

Skenario SOP pada sistem pencahayaan disusun dengan mengacu pada kriteria *Energy Efficiency and Conservation* (EEC) dalam GREENSHIP, yang menekankan penggunaan pencahayaan alami secara optimal dan pengendalian pemakaian pencahayaan buatan sesuai kebutuhan ruang. Sementara itu, SOP efisiensi pada sistem pendingin udara dirancang berdasarkan Permenkes No. 7 Tahun 2019 yang menetapkan baku mutu suhu ruang rumah sakit untuk mendukung kenyamanan sekaligus efisiensi energi [11].

Kedua skenario SOP ini kemudian menjadi tolak ukur dalam penilaian melalui kuesioner yang dibagikan kepada 70 responden yang terdiri dari manajemen, pegawai dan tenaga kesehatan. Hasil respon kuesioner yang menggambarkan tingkat penerapan SOP tersebut dianalisis lebih lanjut menggunakan pendekatan *fuzzy logic*. Dengan demikian, penerapan rancangan SOP tidak hanya berfungsi sebagai pedoman operasional, tetapi juga sebagai instrumen pengukuran tingkat efisiensi energi rumah sakit.

Penilaian Budaya Efisiensi Konsumsi Listrik

Data penelitian ini diperoleh melalui distribusi kuesioner kepada manajemen, pegawai dan tenaga kesehatan di RSPPB. Kuesioner dirancang berdasarkan skenario SOP efisiensi energi dengan tujuan untuk menilai sejauh mana budaya hemat energi yang diterapkan dalam aktivitas rumah sakit. Berdasarkan kuesioner responden yang terdistribusi menjelaskan bahwa sebagian besar staf RS Pertamina Panorama Balik Panan memiliki pengetahuan terhadap pentingnya menjaga lingkungan dan kepedulian terhadap sistem yang berkelanjutan seperti yang divisualisasikan dalam gambar 3.



Gambar 3. Visualisasi Grafik Likert terkait Distribusi Responden terkait Budaya Efisiensi Konsumsi Listrik

Sebagian besar fasilitas kesehatan masih dirancang dengan pendekatan fungsional konvensional yang lebih menitikberatkan pada efisiensi ruang dan operasional medis. Seperti yang diketahui kondisi iklim tropis di Indonesia sangat mendukung penerapan desain ramah lingkungan seperti pemanfaatan cahaya alami, ventilasi silang serta penggunaan vegetasi tropis sebagai elemen pendukung pemulihan [12].

Penilaian ini dilakukan dengan menganalisis jawaban responden menggunakan pendekatan *fuzzy logic* yang memungkinkan konversi data subjektif menjadi nilai kuantitatif yang terukur sehingga tingkat efisiensi energi dapat dianalisis secara lebih objektif.

Rancangan Pemilihan Teknologi

Rancangan pemilihan teknologi berpaku pada prinsip desain berkelanjutan dengan implementasi *green building* bangunan rumah sakit yaitu integrasi yang harmonis antara arsitektur, lanskap dan desain interior bersama dengan komponen rekayasa listrik, mekanik dan struktural (tabel 1) [13].

Green building juga dapat digambarkan sebagai pendekatan untuk menciptakan struktur yang lebih efektif meminimalkan dampak lingkungan merugikan melalui praktik konstruksi dan pilihan teknologi yang efisien terhadap sumber daya [14]. Pada dasarnya konsep *green building* adalah memaksimalkan efisiensi energi dari beberapa aspek seperti pengukuran efisiensi energi pada aspek teknologi dilakukan dengan menilai penerapan *Smart System* yang dievaluasi melalui persentase penghematan energi listrik (kWh) dibandingkan sistem konvensional [15]. Aspek perencanaan arsitektur, efisiensi diukur melalui rasio pencahayaan alami terhadap total pencahayaan ruang serta kualitas ventilasi alami terhadap kebutuhan udara segar dengan parameter seperti *daylight factor*, orientasi bangunan dan nilai insulasi termal (*U-value*) [15]. Aspek mekanikal diukur melalui efisiensi sistem pendingin udara menggunakan *Coefficient of Performance* (COP) dan audit energi untuk mengetahui *Energy*

Efficiency Ratio (EER) [16]. Sementara itu, pada aspek elektrik, efisiensi dinilai berdasarkan total konsumsi listrik per meter persegi (kWh/m²/bulan) serta efektivitas sistem otomatisasi seperti sensor gerak dan sensor cahaya [17].

Pembentukan Himpunan Fuzzy

Hasil analisis disajikan berdasarkan hasil responden dengan gambaran tingkat penerapan budaya efisiensi, terdapat beberapa data respon dari pertanyaan dan jawaban. Pertanyaan Q1-Q3 berisi tentang kebijakan rumah sakit terkait hemat energi sesuai standarisasi GreenSHIP, pertanyaan Q4-Q6 berisi tentang budaya pegawai dalam menggunakan listrik dan pertanyaan Q7-Q9 berisi tentang penerapan teknologi. Dengan rincian pertanyaan pada sebagai berikut:

Q1: Apakah di Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan telah menerapkan kebijakan atau SOP terkait dengan efisiensi konsumsi energi listrik dalam penggunaan AC dan lampu?

Q2: Apakah kebijakan atau SOP terkait efisiensi konsumsi listrik dalam penggunaan lampu dan AC dapat dengan mudah diakses oleh anda?

Q3: Apakah anda memahami serta menjalankan kebijakan atau SOP terkait efisiensi konsumsi listrik penggunaan lampu dan AC selama berada di lingkungan kerja rumah sakit?

Q4: Apakah anda mematikan lampu ketika ruangan sedang tidak digunakan atau kosong?

Q5: Apakah anda mematikan lampu ruangan pada waktu tertentu ketika intensitas cahaya matahari yang masuk ke dalam ruang telah mencukupi (minimal 30% luas lantai ruangan)?

Q6: Apakah anda mematikan pendingin udara (AC) ketika ruangan sedang tidak digunakan atau kosong?

Q7: Apakah di Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan telah menerapkan pemilihan teknologi efisiensi energi?

Q8: Apakah sistem pencahayaan di rumah sakit telah menggunakan lampu hemat energi seperti *Light-Emitting Diode* (LED)?

Q9: Apakah pada sistem pencahayaan yang telah ada dilengkapi dengan sistem sensor untuk mengatur intensitas cahaya ruangan secara otomatis?.

Tabel 1. Prinsip Desain *Green Building* Rumah Sakit [13]

Prinsip	Deskripsi / Implementasi	Manfaat / Catatan
Desain Pencahayaan Bangunan	Meningkatkan penggunaan cahaya alami dan mengurangi cahaya buatan; dapat dicapai melalui bukaan transparan, skylight tembus cahaya, atau lampu LED hemat energi	Daylighting berdampak positif pada kesejahteraan pasien dan menjadi sumber Vitamin D yang baik
Kualitas Udara Dalam Ruangan	Menanam tanaman indoor yang menghasilkan oksigen dan mengurangi polutan; menggunakan bahan konstruksi dengan VOC seminimal mungkin	Meningkatkan kualitas udara dan kesehatan pasien serta staf

Prinsip	Deskripsi / Implementasi	Manfaat / Catatan
Material Interior yang Bersih dan Ramah Lingkungan	Dinding dan permukaan dirancang untuk menahan pertumbuhan bakteri, jamur, dan virus patogen	Menjaga kebersihan dan keamanan lingkungan rumah sakit

Komposisi Aturan

Setiap aturan dalam sistem menghasilkan kategori tingkat efisiensi energi yaitu Tidak Efisien, Cukup Efisien, atau Efisien. Pada tahap ini, nilai kekuatan aturan (α) ditentukan menggunakan metode implikasi MAX yaitu dengan mengambil nilai terkecil dari derajat keanggotaan pada setiap aturan yang terbentuk. Apabila terdapat lebih dari satu aturan yang aktif akibat adanya dua derajat keanggotaan yang sama-sama aktif pada tahap fuzzifikasi, maka seluruh aturan aktif tersebut akan dikomposisikan menggunakan metode MAX untuk memperoleh nilai keluaran tertinggi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa aturan ke-8 memiliki nilai kekuatan aturan tertinggi sebesar 0,67, sebagaimana ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Nilai MAX Output

Output Term	MAX α (dari semua aturan)
Tidak Efisien	0
Cukup Efisien	0
Efisien	0.666666667

Defuzzifikasi

Tahap selanjutnya adalah proses defuzzifikasi dengan metode centeroid menggunakan fungsi keanggotaan dengan menghitung nilai *crisp* berdasarkan rata-rata berbobot dari semua nilai x dan $\mu(x)$ (tabel 3).

Berdasarkan proses tersebut diperoleh nilai *crisp* sebesar 84,7%, yang masuk ke dalam domain kategori *Hemat/Efisien* yang selanjutnya akan di defuzzifikasi (centroid) menggunakan hasil agregasi

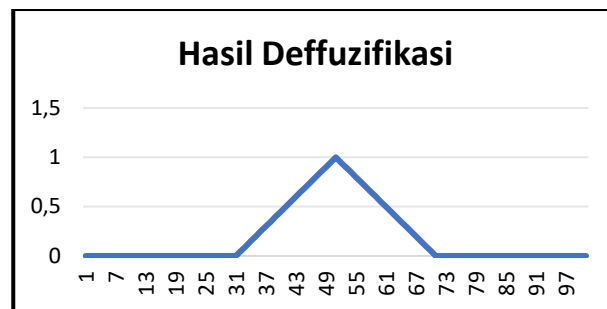
untuk menghasilkan nilai *crisp* akhir yang ditunjukkan pada gambar 4.

Selanjutnya hasil data grafik fuzzifikasi pada gambar 4 menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara budaya efisiensi konsumsi listrik, pemilihan teknologi dan tingkat konsumsi listrik di rumah sakit. Pada kategori pertama, apabila budaya efisiensi rendah dan teknologi yang digunakan masih boros energi (nilai 0–40), maka konsumsi listrik secara otomatis masuk ke dalam kategori tidak efisien atau boros. Hal ini mencerminkan bahwa kebiasaan penggunaan listrik tanpa pengendalian serta teknologi yang tidak hemat energi akan menghasilkan pemborosan energi yang signifikan.

Sebaliknya, pada kategori menengah (nilai 30–70), ketika budaya efisiensi mulai diterapkan meskipun belum maksimal serta teknologi yang digunakan cukup mendukung efisiensi, maka konsumsi listrik akan berada pada tingkat cukup efisien. Hal ini didukung dari keterkaitan Subsistem fuzzy teknologi memiliki nilai-nilai input arsitektur, mekanikal, elektrikal dan biaya untuk mencari nilai seberapa efisien teknologi yang digunakan. Setelah itu output dari teknologi dimasukkan ke dalam sistem Fuzzy dengan input tambahan budaya, dimana ini didapatkan dari kebiasaan karyawan. Interpretasi hasil tersebut dengan meninjau aspek teknologi, elektrikal, mekanikal dan biaya operasional tersebut dengan memberikan pemahaman tentang implikasi hasil terhadap strategi mewujudkan *green hospital* yang berkelanjutan.

Tabel 3. Centroid Diskret

x	M Tidak Efisien(x)	M Cukup Efisien(x)	μ Efisien(x)	μ gabungan(x)	$x \cdot \mu$ gabungan
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70	0,00	0,00	0,50	0,50	35,00
80	0,00	0,00	0,67	0,67	53,33
90	0,00	0,00	0,50	0,50	45,00
100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Gambar 4. Defuzzifikasi

Green building juga dapat digambarkan sebagai pendekatan untuk menciptakan struktur yang lebih efektif meminimalkan dampak lingkungan merugikan melalui praktik konstruksi dan pilihan teknologi yang efisien terhadap sumber daya [14]. Pemilihan *Smart Technology* antara lain adalah Building Management System (BMS)[18], Smart Energy Integrasi energi terbarukan (Solar PV, Geothermal, Baterai, Microgrid) [19,20], Penggunaan Phase Change Materials (PCM), kaca elektro/thermochromic dan ETFE untuk efisiensi termal dan adaptasi iklim [21], life cycle assessment (LCA) dan sensor pengelolaan [22], Indoor Environment Quality (IEQ) [23,24], Resilience & Safety [25], Certification Integration [14].

Aspek Arsitektural pada Rumah Sakit *Green Building*

Implementasi rumah sakit dengan konsep *green building* mengutamakan efisiensi energi dan ventilasi arsitektur, dicapai melalui pemanfaatan strategi pasif dan teknologi aktif yang saling melengkapi. Strategi pasif berupa orientasi bangunan, tata letak ruang, atrium, courtyard dan bukaan silang dirancang untuk memaksimalkan ventilasi alami sehingga ruang-ruang publik seperti lobi, koridor dan ruang tunggu dapat memperoleh udara segar tanpa ketergantungan penuh pada sistem mekanis [15,22]. Pendekatan ini juga didukung dengan penggunaan peneduh dan insulasi termal untuk mengurangi beban pendinginan sehingga konsumsi energi menurun. Dengan demikian, arsitektur rumah sakit berperan penting dalam mengoptimalkan aliran udara alami sekaligus menurunkan kebutuhan energi sistem mekanis, menciptakan kualitas udara dalam ruangan yang sehat, efisien dan ramah lingkungan [26]. Perancangan arsitektur pada pencahayaan dalam ruang, kondisi langit ditetapkan sebagai *overcast sky* untuk menghindari pengaruh faktor lain sehingga hanya pencahayaan alami yang dipertimbangkan dalam simulasi ini. Selain itu, lantai tiga dipilih untuk dilakukan simulasi guna memperoleh *daylight factor* dan tingkat pencahayaan tetap alami (*daylight*

compliance rate) menyajikan *daylight factor* di dalam ruangan [27].

Simulasi ini menunjukkan optimalisasi pencahayaan alami dan pemanfaatan lingkungan angin, dari sisi pencahayaan, tingkat kepatuhan pencahayaan alami mencapai 99% pada gedung rawat inap, 85% pada gedung rawat jalan dan 60% pada gedung medis yang menandakan desain mampu memaksimalkan cahaya matahari untuk mengurangi ketergantungan pada pencahayaan buatan serta meningkatkan kenyamanan visual dan mempercepat proses penyembuhan pasien [28-30]. Dengan demikian, desain arsitektur ini terbukti tidak hanya meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi polusi lingkungan, tetapi juga menciptakan lingkungan rumah sakit yang sehat, nyaman, dan berkelanjutan harus saling bersinergi dengan konsep mekanikal BGH untuk mendukung optimalisasi efisiensi energi [27].

Aspek Arsitektural pada Rumah sakit Konvensional

Di rumah sakit konvensional, aspek arsitektur seringkali menjadi penyebab utama tingginya konsumsi energi, karena prinsip desain berkelanjutan tidak diperhitungkan sejak awal massa bangunan yang cenderung direncanakan secara mendalam membatasi akses terhadap cahaya alami dan ventilasi silang sehingga membutuhkan pencahayaan buatan sepanjang hari. Hal ini semakin diperparah oleh rasio pengaplikasian kaca langsung ke dinding yang tinggi tanpa perlindungan bayangan dan penggunaan kaca bening konvensional yang memungkinkan radiasi panas berlebih masuk ke dalam gedung [23,27].

Desain arsitektur tanpa perbaikan seperti insulasi yang lebih baik, optimalisasi pencahayaan alami dan zonasi termal yang tepat, tindakan penghematan energi yang melibatkan peralatan mekanis dan listrik tidak akan mencapai hasil optimal [29,31,32].

Aspek Mekanikal Rumah Sakit *Green Building*

Sistem Efisien

Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC) Sistem mekanikal menekankan penggunaan HVAC yang berteknologi efisien dan hemat energi. Pengaturan dilakukan dengan sistem *zoning* yaitu membagi area rumah sakit berdasarkan kebutuhan spesifiknya. Efisiensi sistem HVAC merupakan aspek utama dalam penerapan *green hospital* karena rumah sakit memiliki kebutuhan pengendalian suhu dan kelembapan yang sangat ketat [33].

Penerapan teknologi HVAC modern seperti sensor otomatis dan *predictive maintenance* dapat meningkatkan performa sekaligus mengurangi konsumsi energi secara signifikan. Penerapan retrofit sistem HVAC dengan kombinasi *solar collector*, kogenerasi dan pompa panas absorpsi menurunkan konsumsi energi hingga 43% [34].

Ventilasi dan Kualitas Udara Dalam Ruang (IAQ)

Kualitas udara dalam ruang merupakan aspek penting bagi kesehatan pasien membutuhkan ventilasi mekanis dengan filtrasi tingkat tinggi, seperti HEPA filter. Pemantauan kualitas udara juga dilakukan secara *real-time* melalui sensor untuk memastikan kadar CO₂, kelembapan serta partikel udara tetap berada pada tingkat aman [29].

Pemanfaatan Energi Terbarukan dan Integrasi Mekanikal

Integrasi ini memungkinkan sistem pendingin dan pemanas bekerja lebih hemat energi. Energi surya, pompa panas serta sistem kogenerasi dapat dimanfaatkan untuk mendukung sistem HVAC maupun pasokan energi lainnya [33]. Penerapan energi terbarukan dan manajemen energi di rumah sakit mampu menurunkan jejak karbon secara signifikan [17].

Kontrol Otomatis dan Manajemen Energi

Penerapan *Building Management System* (BMS) menjadi salah satu elemen kunci dalam sistem mekanikal rumah sakit berkonsep hijau. Sistem ini memungkinkan monitoring konsumsi energi secara *real-time* serta pengaturan otomatis pada HVAC, pencahayaan dan utilitas lain sesuai kebutuhan aktual. Penggunaan *smart sensor* pada HVAC dapat meningkatkan efisiensi sekaligus menjaga kenyamanan pasien. Integrasi BIM dan *smart monitoring* dalam manajemen energi rumah sakit dapat meningkatkan transparansi konsumsi energi serta mendukung strategi penghematan jangka panjang [29].

Aspek Mekanikal Rumah Sakit konvensional

Salah satu kelemahan mendasar adalah penerapan ventilasi mekanis konstan (*constant air volume/CAV*) dengan laju pertukaran udara (ACH) tinggi selama 24 jam tanpa mempertimbangkan tingkat okupansi atau risiko ruang. Akibatnya, udara luar dalam jumlah besar terus diproses meski ruang kosong atau digunakan sebentar. Pendekatan ini sangat boros energi, karena ketika laju ventilasi disesuaikan dengan kebutuhan nyata (berbasis sensor kualitas udara atau risiko infeksi), penghematan mencapai 21% energi gas dan 25% energi listrik, tanpa menurunkan standar kualitas udara dalam ruang [23]. Kelemahan ini terlihat jelas di ruang operasi (Operating Rooms/OR), HVAC menyumbang 90–99% energi total ruang [35].

Sistem konvensional tidak dilengkapi *heat exchanger* atau *run-around coil* untuk memanfaatkan energi dari udara buang, padahal studi terbaru menunjukkan bahwa integrasi *heat recovery* dalam sistem rumah sakit dapat secara substansial menurunkan konsumsi energi dan biaya operasional [36, 37].

Sumber energi rumah sakit konvensional masih didominasi oleh boiler berbahan bakar fosil untuk uap, sterilisasi dan humidifikasi. Tidak adanya pemanfaatan *chiller heat recovery* atau *heat pump* membuat sistem utilitas ini sangat intensif energi sekaligus tinggi emisi karbon. Panduan fasilitas kesehatan terbaru menekankan bahwa elektrifikasi sistem *plant* dengan *heat pump* dan pemulihan panas buang adalah kunci menuju keberlanjutan tetapi rumah sakit konvensional masih jauh dari penerapan tersebut [31].

Aspek Elektrikal Rumah Sakit *Green Building*

Strategi pencahayaan hemat energi dengan pemanfaatan lampu LED berkualitas tinggi dengan kontrol otomatis seperti *daylight-responsive dimming* dan *occupancy sensors* dapat menurunkan konsumsi listrik pencahayaan secara signifikan [19]. Integrasi ini tidak hanya mengurangi beban energi, penerapan sistem pencahayaan cerdas dapat menghasilkan penghematan energi lebih dari 40% sekaligus meningkatkan kenyamanan visual pengguna [16]. Algoritma harga listrik berbasis waktu dan analitik dari *Building Energy Management System* (BEMS) rumah sakit dapat menurunkan biaya operasional tanpa mengganggu layanan kesehatan. Strategi ini dengan dukungan penyimpanan energi memberikan keuntungan ganda berupa efisiensi ekonomi dan penurunan emisi karbon [35].

Integrasi dengan sistem HVAC dan manajemen beban menjadi penting agar PV dan baterai dapat bekerja optimal, misalnya menyuplai beban siang hari atau menjaga layanan penting saat terjadi gangguan *grid* [20][30]. Sistem microgrid memungkinkan rumah sakit melakukan *islanding* yaitu tetap beroperasi walau terjadi pemadaman listrik di jaringan utama. Sistem *hybrid* berbasis PV baterai genset ini mampu meningkatkan keandalan energi hingga 72 jam cadangan sekaligus memangkas emisi operasional.

Optimalisasi dalam aspek elektrik perlu didukung dengan pemilihan perlengkapan listrik efisien dan manajemen kualitas daya juga menjadi aspek krusial. Rumah sakit dapat menggunakan transformator efisiensi tinggi, *power factor correction*, motor efisiensi premium dengan *Variable Frequency Drive* (VFD) serta *smart plugs* untuk memangkas konsumsi listrik dari peralatan yang tidak digunakan. Pendekatan ini terbukti menurunkan beban listrik hingga 15–20% di berbagai studi kasus rumah sakit dan fasilitas kesehatan lainnya [39].

Aspek Elektrikal Rumah Sakit Konvensional

Sistem generator diesel sebagai cadangan menimbulkan emisi karbon tinggi, biaya operasional besar dan menambah polusi udara akibat penggunaan bahan bakar fosil saat pengujian maupun pemakaian darurat. Ketergantungan pada genset konvensional juga membuat rumah sakit gagal memanfaatkan peluang integrasi energi terbarukan seperti panel surya dan baterai penyimpanan yang terbukti dapat meningkatkan resiliensi sekaligus menekan emisi [27].

Ketiadaan sub-metering dan BEMS membuat konsumsi energi listrik hanya dipantau secara total tanpa pemetaan detail per zona atau peralatan. Akibatnya, banyak beban non-kritis seperti pencahayaan koridor, peralatan medis dalam mode siaga atau pendingin ruangan tetap menyala terus-menerus tanpa terkontrol yang meningkatkan pemborosan energi [23].

Implementasi filter harmonisa, koreksi faktor daya, dan transformator efisiensi tinggi terbukti mampu meningkatkan stabilitas sekaligus mengurangi pemborosan listrik, tetapi pada rumah sakit konvensional praktik ini masih jarang diterapkan [36, 40]. Selain itu, sistem cadangan seperti UPS sering kali dirancang berlebihan (*oversizing*) atau dikonfigurasi paralel tanpa optimasi. Hal ini menimbulkan rugi konversi DC–AC yang besar dan

energi terbuang dalam bentuk *standby losses*. Penggunaan teknologi hemat energi menambah komponen biaya investasi awal sekitar 5–10% dari total pembangunan, namun biaya operasional dapat ditekan secara konsisten, terutama pada penghematan listrik dan air yang bisa mencapai 20–40% setiap tahun. Selain itu, biaya pemeliharaan cenderung lebih rendah karena peralatan yang digunakan umumnya lebih tahan lama dan efisien. Dalam jangka waktu 5–10 tahun, penghematan dari efisiensi energi biasanya mampu menutup selisih investasi awal sehingga menghasilkan *return on investment* (ROI) yang positif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pendekatan *centroid* pada *fuzzy logic* terhadap konsumsi listrik dan pemilihan teknologi di Rumah Sakit Pertamina Panorama Balikpapan, diperoleh nilai *crisp* sebesar 84,7%, yang termasuk dalam kategori hemat energi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan listrik di rumah sakit telah efisien. Temuan ini diperoleh dari data kuesioner pegawai mengenai penerapan budaya efisiensi energi dan pemilihan teknologi. Secara teknologis, penerapan sistem pencahayaan LED, sensor otomatisasi dan pendingin udara berteknologi inverter terbukti menekan konsumsi listrik. Penggunaan *smart grid*, *microgrid* berbasis PV + baterai dan sistem pengendalian beban terintegrasi dapat meningkatkan keandalan pasokan serta mengurangi jejak karbon. Aspek mekanikal difokuskan pada efisiensi sistem pendingin, ventilasi dan tata udara. Meskipun investasi awal teknologi hemat energi cukup besar, manfaat jangka panjang berupa penghematan biaya operasional memungkinkan realokasi dana untuk peningkatan layanan dan kesejahteraan tenaga medis.

Harapannya, penelitian selanjutnya dapat mengkaji besaran serapan emisi karbon dari upaya efisiensi energi, agar manfaatnya dapat dinilai lebih komprehensif dari aspek ekonomi dan lingkungan.

REFERENSI

- [1] R. C. K. Pangestu and A. A. K. Ayuningsasi, "Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia," *Inisiatif: J. Ekon., Akunt. dan Manaj.*, vol. 3, no. 4, pp. 297–311, 2024. doi <https://doi.org/10.30640/inisiatif.v3i4.3154>

- [2] A. M. Kelly and R. D. N. N. Radler, "Does energy consumption matter for climate change in Africa? New insights from panel data analysis," *Innov. Green Dev.*, vol. 3, pp. 1–10, 2024. doi <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100132>
- [3] Yusrawati and Muhandi, "Hospital Management Functions: A Literature Review," *Andalas Obstet. Gynecol. J.*, vol. 7, no. 2, pp. 363–371, 2023. doi <https://doi.org/10.25077/aoj.7.2.363-371.2023>
- [4] Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, *Profil Kesehatan Indonesia 2023*. Jakarta: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia, 2023.
- [5] K. B. d. Oliviera and O. J. d. Oliveira, "Making Hospitals Sustainable: Towards Greener, Fairer and More Prosperous Services," *Sustain.*, vol. 14, pp. 1–21, 2022. doi <https://doi.org/10.3390/su14159730>
- [6] L. P. Orsini, S. Landi, C. Leardini, and G. Veronesi, "Towards greener Hospitals: The effect of green organisational practices on climate change mitigation performance," *J. Clean. Prod.*, vol. 462, pp. 1–10, 2024. doi <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142720>
- [7] N. Prawasari, A. Pakiding, D. D. Ridwan, and R. D. N. V. M. Istyana, "Business Process Reengineering in Hospitals: A Literature Review of Improving Efficiency and Effectiveness of Health Services," *Prepotif: J. Kesehat. Masy.*, vol. 8, no. 2, pp. 4510–4517, 2024. doi <https://doi.org/10.31004/prepotif.v8i2.29318>
- [8] K. Xhexhi and B. Aliaj, "Lighting in Hospitals—Case Study: Military Hospital of Tirana, Albania," *Eng. Innov.*, vol. 8, pp. 17–30, 2023.
- [9] J. Kim et al., "Energy-Saving Potential of Extending Temperature Set-Points in a VRF Air-Conditioned Building," *Energies*, vol. 13, no. 9, pp. 1–17, 2020. doi <https://doi.org/10.3390/en13092160>
- [10] A. N. M. Rahman, C. H. Lim, and A. Fazlizan, "Optimizing the Energy Saving Potential of Public Hospital Through a Systematic Approach for Green Building Certification in Malaysia," *J. Build. Eng.*, pp. 1–14, 2021. doi <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103088>
- [11] R. S. Rohman et al., "Energy audit of lighting system, air conditioning system and medical equipment in YARSI Pontianak General Hospital," *Energy Audit Study*, vol. 1, No. 2, 2023. doi <https://doi.org/10.26418/telectrical.v1i2.72005>
- [12] F. F. Rahman, F. Haris, and K. Febriyanto, "Organizational Support for Green Hospital Initiatives: A Case Study," *J. Medicoeticolegal Manaj. Rumah Sakit*, vol. 13, no. 3, pp. 304–314, 2024. doi <https://doi.org/10.18196/jmmr.v13i3.501>
- [13] S. Aghajari and C.-C. Chen, "The Effectiveness of Lighting Design for Improved Patient Care Considering Energy Conservation," *Eng. Proc.*, vol. 55, no. 1, pp. 1–6, 2024. doi <https://doi.org/10.3390/engproc2023055091>
- [14] D. Asmawati, W. B. B. Adisasmito, and M. Basabih, "The Influence of the Green Hospital Implementation Policy on the Energy Saving Behavior of XYZ Hospital Employees Using the Theory of Planned Behavior Approach," *J. Indones. Health Policy Admin.*, vol. 9, no. 1, pp. 33–41, 2024. doi <https://doi.org/10.7454/ihpa.v9i1.8059>
- [15] S. H. Khahro et al., "Optimizing energy use, cost and carbon emission through building information modelling and a sustainability approach: A case-study of a hospital building," *Sustain.*, vol. 13, no. 7, p. 3675, 2021. doi <https://doi.org/10.3390/su13073675>
- [16] Z. Pang, Y. Chen, J. Zhang, Z. O'Neill, H. Cheng, and B. Dong, "How much HVAC energy could be saved from the occupant-centric smart home thermostat: A nationwide simulation study," *Appl. Energy*, vol. 283, p. 116251, Dec. 2020, doi: [10.1016/j.apenergy.2020.116251](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116251)
- [17] Mohammed, Y., Hayder, G. & Thiruchelvam, S. Green building rating systems comparative study and development methodology from global and local prospective. *Environ Dev Sustain* **27**, 5479–5524 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04113-z>
- [18] R. Saatchi, "Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation," *Inf.*, vol. 15, no. 10, pp. 1–24, 2024. doi <https://doi.org/10.3390/info15100656>
- [19] H. F. L. Al Dzikri, "Penerapan konsep arsitektur healing environment pada rumah sakit umum di Kota Semarang," *J. Archit. Manag.*, vol. 3, no. 3, pp. 331–343, 2025.
- [20] E. S. Alsawaf and A. M. Albadry, "Principles for the sustainable design of hospital buildings," *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 17, no. 6, pp. 1797–1808, 2022. doi [10.18280/ijstdp.170614](https://doi.org/10.18280/ijstdp.170614)
- [21] Y. Wang and L. Liu, "Research on sustainable green building space design model integrating IoT technology," *PLoS ONE*, vol. 19, no. 4,

- e0298982, 2024. doi <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298982>
- [22] N. F. Nadhifah and H. Wahyuningsih, "Perancangan konsep green building pada bangunan rumah sakit umum daerah RA. Basoeni di Mojokerto," *J. Archit. Stud.*, vol. 1, no. 1, pp. 24–34, 2020. doi [10.31101/jas.v1i1.1179](https://doi.org/10.31101/jas.v1i1.1179)
- [23] B. Singh, A. Kumar, and J. Watt, "Optimising electrical power supply sustainability using a grid-connected hybrid renewable energy system—a NHS hospital case study," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7084, 2021. doi <https://doi.org/10.3390/EN14217084>
- [24] J. Hervás-Zaragoza et al., "Microgrids as a mechanism for improving energy resilience during grid outages: A post COVID-19 case study for hospitals," *Renew. Energy*, vol. 199, p. 132, 2022. doi <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.08.132>
- [25] T. Pynkyawati et al., "Sustainable concept application to wastewater treatment in NURI building at Dr. M. Salamun Bandung Hospital," *J. Archit. Res. Educ.*, vol. 2, no. 1, pp. 72–81, 2020. doi [10.17509/jare.v2i1.24106](https://doi.org/10.17509/jare.v2i1.24106)
- [26] A. Ackley et al., "Indoor environmental quality (IEQ) in healthcare facilities: A systematic literature review and gap analysis," *J. Build. Eng.*, vol. 86, p. 108787, 2024. doi <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108787>
- [27] M. M. H. Khan et al., "Green buildings and indoor air quality: A health and technological review," *J. Build. Eng.*, vol. 1, 2023. doi [10.20944/preprints202308.0368.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202308.0368.v1)
- [28] P. Sigalingging, R. Ismanto, and M. M. Sudarwani, "The application of healing architecture and green architecture in hospital for children," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 878, p. 012013, 2021. doi [10.1088/1755-1315/878/1/012013](https://doi.org/10.1088/1755-1315/878/1/012013)
- [29] Y. Song et al., "A comparative study on architectural design-related requirements of green building rating systems for new buildings," *Build.*, vol. 13, no. 124, 2023. doi <https://doi.org/10.3390/buildings13010124>
- [30] M. Keil, L. Frehse, M. Hagemeister, M. Knieß, O. Lange, T. Kronenberg, and W. Rogowski, "Carbon footprint of healthcare systems: A systematic review of evidence and methods," *BMJ Open*, vol. 14, no. 4, p. e078464, Apr. 2024, doi: [10.1136/bmjopen-2023-078464](https://doi.org/10.1136/bmjopen-2023-078464).
- [31] D. Saraswati, I. Khaldun, and A. Affiano, "Building information modeling (BIM) applied to daylight simulation & analysis: Comparison of shading device," *BEST: J. Built Environ. Stud.*, vol. 6, no. 6, pp. 47–56, 2025. doi [10.22146/best.v6i1.18779](https://doi.org/10.22146/best.v6i1.18779)
- [32] B. V. F. Silva et al., "Sustainable, green, or smart? Pathways for energy-efficient healthcare buildings," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 100, p. 105013, 2024. doi <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105013>
- [33] J. Qiu, "Analysis of energy consumption and efficiency of green buildings based on BIM technology," in *Proc. CONF-FMCE 2025 Symp.: AI Mach. Learn. Appl. Infrastruct. Eng.*, pp. 23–30, 2025. doi [10.54254/2755-2721/2025.MH25096](https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.MH25096)
- [34] S. Mabdeh, H. Ali, and M. Al-Momani, "Life cycle assessment of energy retrofit measures in existing healthcare facility buildings: The case of developing countries," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 12, no. 6, pp. 418–431, 2022, doi: [10.32479/ijeep.13683](https://doi.org/10.32479/ijeep.13683)
- [35] T. M. Olatunde, E. T. Akinlabi, and P. A. Adedeji, "Review of energy-efficient HVAC technologies for sustainable buildings," *J. Build. Eng.*, vol. 84, p. 107119, 2024. doi [10.53771/ijstra.2024.6.2.0039](https://doi.org/10.53771/ijstra.2024.6.2.0039)
- [36] A. Del Regno et al., "Energy efficiency in hospitals: Comparative analysis of different HVAC configurations," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 3029–3041, 2023. doi <https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2266464>
- [37] R. Zandi Doulabi, M. Amini, and H. Farzaneh, "Green hospitals: A glance at environmental sustainability and energy efficiency in global and Iranian contexts," *PowerTech J.*, vol. 3, no. 1, pp. 45–58, 2024.
- [38] N. A. Muslimin, N. N. Mansor, H. Mokhlis, M. N. Abdullah, and S. P. Ramli, "Lighting system optimization, components, and simulation tools for building installations: A review," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 1–16, Jun. 2025, doi: [10.1109/ACCESS.2025.3578983](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3578983)
- [39] A. Felice et al., "The Case Study of Lacor Hospital's Energy Community: Economic feasibility of reducing diesel generators with PV + BESS," *Energies*, vol. 16, no. 3, p. 1369, 2023. doi <https://doi.org/10.3390/en16031369>