

Desain Perencanaan Dan Analisis Penghematan Energi Pekerjaan Mechanical Electrical Plumbing (MEP) PT. Lintech Duta Pratama Lamongan

Zainal Abidin^{*1}, Andi Syaiful Amal²

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Lamongan

^{1,2}Program profesi Insinyur, Universitas Muhammadiyah Malang, Indonesia

Email: zainalabidin@unisla.ac.id, andisyaiful@umm.ac.id

Abstrak

Sistem Mechanical Electrical Plumbing (MEP) merupakan komponen utama dalam operasional bangunan industri yang berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi, khususnya pada distribusi listrik, sistem tata udara (HVAC), dan sistem plumbing. Tingginya konsumsi energi pada sistem ini menuntut adanya strategi penghematan yang terukur dan sistematis melalui pendekatan berbasis pemodelan matematis dan optimasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang model matematis konsumsi energi serta mengoptimalkan kinerja sistem MEP guna memperoleh efisiensi energi yang maksimal pada PT. Lintech Duta Pratama. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi parameter-parameter dominan yang mempengaruhi konsumsi energi dan menentukan kondisi operasi optimal sistem. Metode yang digunakan meliputi pemodelan konsumsi energi berdasarkan persamaan keseimbangan daya dan aliran fluida, serta optimasi multi-variabel menggunakan Algoritma Genetika (Genetic Algorithm/GA). Variabel yang dianalisis mencakup efisiensi pompa, beban HVAC, faktor daya listrik, dan distribusi tekanan fluida. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB/Simulink untuk membandingkan kinerja sistem sebelum dan sesudah optimasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan optimasi terintegrasi mampu menurunkan konsumsi energi sebesar 15–30% tergantung pada kondisi operasi dan konfigurasi sistem. Peningkatan efisiensi dicapai melalui pengaturan beban dinamis, optimalisasi faktor daya, pemilihan peralatan hemat energi, serta distribusi energi dan fluida yang lebih efektif. Penelitian ini menyimpulkan bahwa pendekatan pemodelan matematis dan optimasi berbasis algoritma genetika efektif dalam meningkatkan efisiensi energi sistem MEP. Hasil ini dapat menjadi dasar pengembangan desain MEP yang mendukung implementasi bangunan berkelanjutan (green building) pada sektor industri maupun komersial.

Kata kunci: *Algoritma Genetika, Matlab, MEP, model matematis, Penghematan energi.*

Abstract

Mechanical, Electrical, and Plumbing (MEP) systems are key components in industrial building operations, contributing significantly to energy consumption, particularly in electrical distribution, air conditioning (HVAC), and plumbing systems. The high energy consumption of these systems requires a measurable and systematic energy saving strategy through a mathematical modeling and optimization-based approach. This research aims to design a mathematical model for energy consumption and optimize the performance of the MEP system to achieve maximum energy efficiency at PT. Lintech Duta Pratama. Furthermore, this research also aims to identify the dominant parameters influencing energy consumption and determine the system's optimal operating conditions. The methods used include energy consumption modeling based on power balance and fluid flow equations, as well as multi-variable optimization using a Genetic Algorithm (GA). The variables analyzed include pump efficiency, HVAC load, electrical power factor, and fluid pressure distribution. Simulations were performed using MATLAB/Simulink to compare system performance before and after optimization. The results show that the implementation of integrated optimization can reduce energy consumption by 15–30%, depending on operating conditions and system configuration. Efficiency improvements are achieved through dynamic load management, power factor optimization, energy-efficient equipment selection, and more effective energy and fluid distribution. This study concludes that a genetic algorithm-based mathematical modeling and optimization approach is effective in improving the energy efficiency of MEP systems. These results can serve as a basis for developing MEP designs that support the implementation of sustainable buildings (green buildings) in the industrial and commercial sectors.

Keywords: *Energy saving, Genetic Algorithm, Mathematical model, Matlab, MEP*

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan sektor industri dan konstruksi bangunan modern telah meningkatkan kebutuhan terhadap sistem Mechanical Electrical Plumbing (MEP)[1] yang efisien dan andal. Sistem MEP merupakan tulang punggung operasional bangunan yang mencakup distribusi energi listrik, pengaturan suhu dan ventilasi, serta sistem distribusi air dan limbah[2]. Kompleksitas sistem ini menyebabkan konsumsi energi yang signifikan[3], sehingga diperlukan pendekatan desain yang tidak hanya memenuhi aspek fungsional, tetapi juga efisiensi energi[4]. Dalam konteks industri, konsumsi energi pada sistem MEP dapat mencapai lebih dari 60% dari total energi operasional bangunan[5]. Komponen seperti sistem HVAC, pompa air, dan sistem distribusi listrik menjadi kontributor utama terhadap tingginya konsumsi energi[6]. Oleh karena itu, analisis kuantitatif berbasis data dan model matematis diperlukan untuk mengidentifikasi titik-titik inefisiensi dalam sistem tersebut[7].

Pendekatan konvensional dalam perancangan MEP umumnya masih berbasis *rule-of-thumb*[8] dan standar desain statis[9], yang belum mempertimbangkan dinamika beban dan interaksi antar subsistem secara menyeluruh[10]. Hal ini menyebabkan sistem bekerja pada kondisi yang tidak optimal, sehingga meningkatkan losses energi baik dalam bentuk rugi-rugi listrik, tekanan fluida, maupun energi termal[11].

Perkembangan teknologi digital dan komputasi telah membuka peluang penggunaan metode pemodelan matematis yang lebih akurat dalam analisis sistem MEP. Model matematis mampu merepresentasikan hubungan antar variabel sistem seperti daya listrik, debit fluida, tekanan, dan temperatur, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi performa energi secara kuantitatif dan terukur. Seiring dengan perkembangan teknologi komputasi, pendekatan berbasis pemodelan matematis dan simulasi numerik menjadi solusi yang efektif dalam menganalisis performa sistem MEP. Model matematis memungkinkan representasi hubungan antara variabel sistem seperti daya listrik[12], debit fluida, tekanan, dan temperatur[13], sehingga dapat digunakan untuk melakukan evaluasi dan optimasi secara sistematis.[14]

Selain pemodelan, integrasi teknologi seperti Building Information Modeling (BIM) dan Internet of Things (IoT)[15] juga mulai diterapkan dalam sistem MEP modern untuk meningkatkan akurasi perencanaan[16] dan monitoring energi secara real-time[17]. Dengan adanya sistem monitoring berbasis data, proses identifikasi inefisiensi dapat dilakukan secara lebih cepat dan akurat.

Optimasi sistem MEP dapat diformulasikan sebagai permasalahan multi-objektif yang bertujuan untuk meminimalkan konsumsi energi[18] sekaligus mempertahankan performa operasional. Metode optimasi seperti Algoritma Genetika (GA)[19], Particle Swarm Optimization (PSO)[20], dan Model Predictive Control (MPC)[21] telah banyak digunakan dalam berbagai studi untuk meningkatkan efisiensi sistem energi[22]. Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan optimasi berbasis GA untuk mendapatkan konfigurasi sistem yang optimal.

Pendekatan optimasi berbasis algoritma evolusioner seperti GA[23] memiliki keunggulan dalam menangani permasalahan non-linear dan multi-parameter yang kompleks pada sistem MEP[24]. Dengan kemampuan eksplorasi solusi global, metode ini sangat sesuai untuk menentukan konfigurasi optimal [25] dari berbagai variabel seperti efisiensi pompa, beban HVAC, dan faktor daya listrik. PT. Lintech Duta Pratama sebagai perusahaan yang bergerak perusahaan konstruksi, fabrikasi, dan rekayasa teknik (*engineering*) sangat memperhatikan perencanaan Mechanical Electrical Plumbing (MEP) yang memiliki kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi energi[26] dalam proyek-proyek yang dikerjakan. Studi ini difokuskan pada analisis sistem MEP yang ada, termasuk distribusi listrik, sistem pompa, dan HVAC, untuk mengidentifikasi peluang penghematan energi melalui pendekatan rekayasa dan optimasi[27].

Tujuan utama penelitian ini adalah merancang model matematis sistem MEP, melakukan simulasi performa energi, serta mengembangkan strategi optimasi untuk menurunkan konsumsi energi secara signifikan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi dalam perancangan sistem MEP yang efisien dan berkelanjutan, serta memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi bangunan hemat energi di Indonesia.

2. METODE PENELITIAN

a. Kerangka Umum Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan model-based design dan optimasi numerik, dengan tahapan : mengidentifikasi sistem MEP (Electrical, HVAC, Plumbing), memodelkan matematis tiap subsistem, melakukan simulasi baseline (kondisi eksisting), memformulasikan fungsi objektif (*objective function*) , melakukan optimasi menggunakan Algoritma Genetika dan melakukan evaluasi performa dan analisis penghematan energi.[28]

b. Pemodelan Matematis Sistem MEP

1. Sistem Elektrikal

Konsumsi daya listrik total:

$$P_{total} = \sum_{i=1}^n V_i I_i \cos \phi_i \quad (1)$$

Efisiensi sistem:

$$\eta_{elec} = \frac{P_{output}}{P_{input}} \quad (2)$$

2. Sistem HVAC [29]

Model beban pendinginan:

$$Q_{cool} = \dot{m}_{air} \cdot C_p \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

Koefisien performa (COP):

$$COP = \frac{Q_{cool}}{W_{input}} \quad (4)$$

3. Sistem Plumbing (Pompa Fluida)[21]

Daya pompa:

$$P_{pump} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_{pump}}$$

dengan:

- Q = debit aliran
- H = head tekanan
- η_{pump} = efisiensi pompa

4. Formulasi Optimasi

Fungsi objektif:

$$\min J = \alpha P_{total} + \beta P_{pump} + \gamma W_{HVAC} \quad (5)$$

dengan:

- α, β, γ = bobot prioritas energi

c. Algoritma Optimasi

Implementasi Algoritma Genetika dalam permasalahan ini melalui tahapan-tahapan sebagai berikut : (i) inialisasi populasi parameter (flow rate, temperatur, faktor daya), (ii) Evaluasi fitness berdasarkan fungsi objektif, (iii) Seleksi, crossover, dan mutasi, (iv) Iterasi hingga konvergensi

d. Model Prediction Control [30]

Model Predictive Control (MPC) merupakan metode pengendalian berbasis model yang digunakan untuk menentukan aksi kontrol optimal dengan cara memprediksi perilaku sistem di masa depan. MPC bekerja dengan memanfaatkan model matematis sistem untuk menghitung respons keluaran berdasarkan kondisi saat ini dan serangkaian input kontrol yang akan datang. Secara umum, sistem dalam MPC direpresentasikan dalam bentuk model ruang keadaan (state-space) sebagai berikut:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (6)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (7)$$

di mana:

- $x(k)$ adalah vektor keadaan sistem

- $u(k)$ adalah sinyal kontrol
 - $y(k)$ adalah keluaran sistem
 - A, B, C adalah matriks parameter sistem
- Fungsi biaya yang umum digunakan adalah:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} (y(k+i) - y_{ref})^2 + \lambda \sum_{i=1}^{N_c} \Delta u(k+i)^2 \tag{8}$$

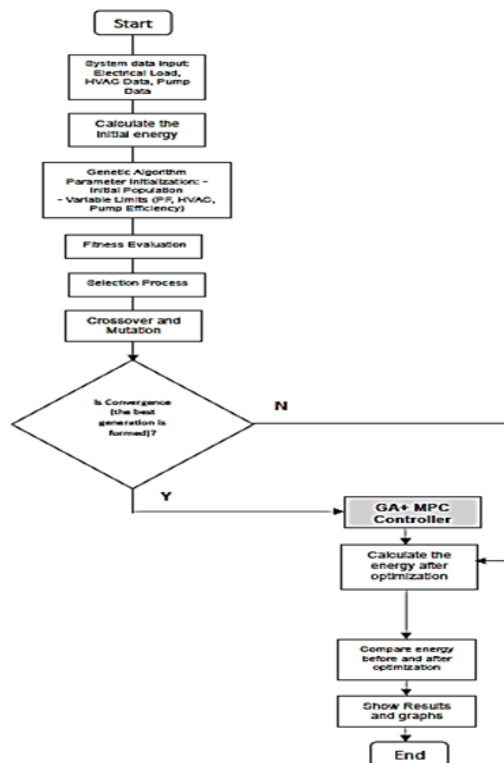
dengan:

- N_p = prediction horizon (jangka waktu prediksi)
- N_c = control horizon (jangka waktu kontrol)
- y_{ref} = nilai referensi yang diinginkan
- λ = faktor pembobot untuk membatasi perubahan kontrol

e. Simulasi Sistem

Untuk mensimulasikan sistem untuk mendapatkan performa optimasi sistem dinamis dan, untuk menganalisis konsumsi energi menggunakan software Matlab. Data input: Beban listrik aktual, data pompa dan HVAC dan profil penggunaan energi harian.

f. Flow chart System

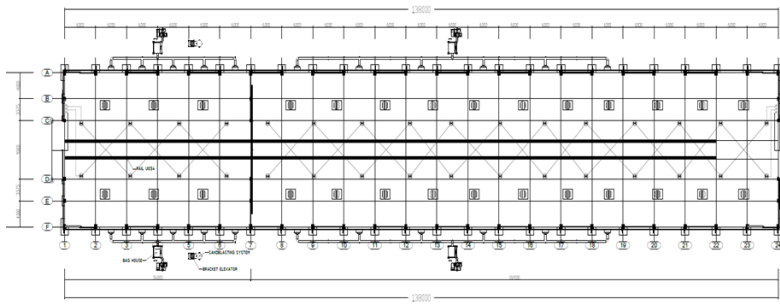


Gambar 1. Diagram Alir kinerja sistem

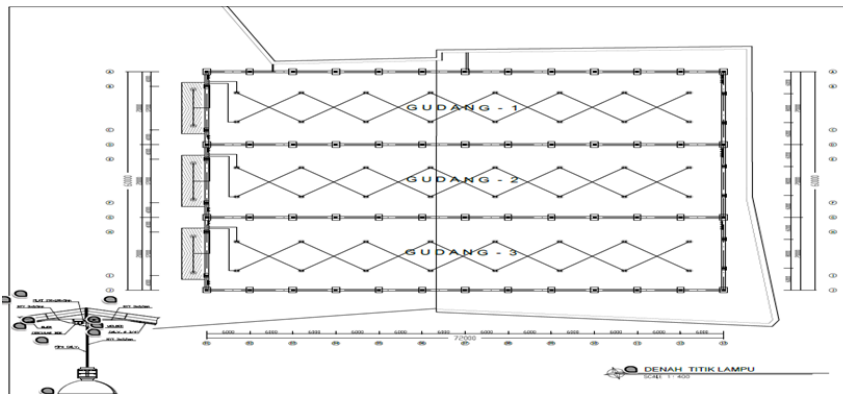
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

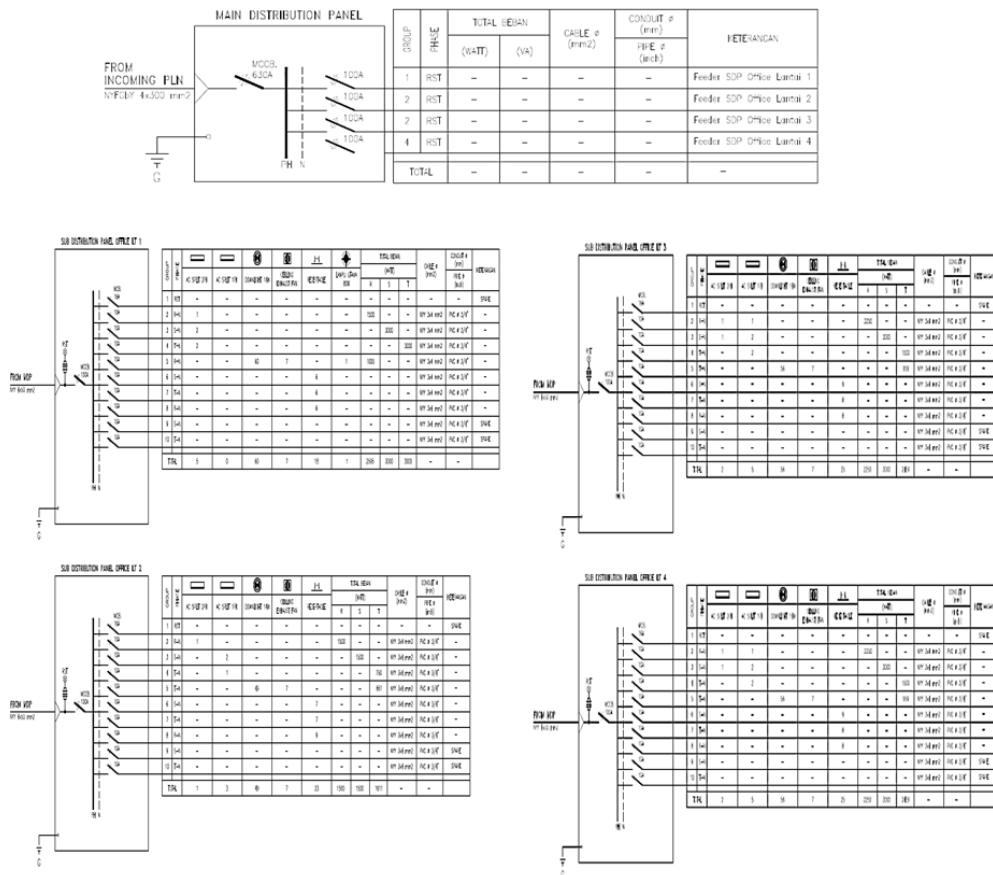
- Data Desain Perencanaan MEP (Mechanical Electrical Plumbing)



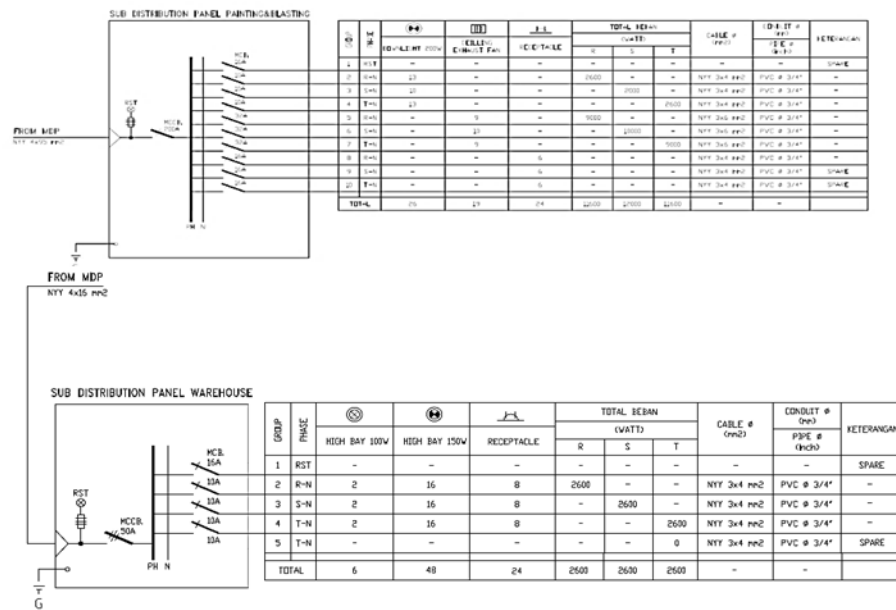
Gambar 2. Tata Letak Titik Cahaya Gedung 1



Gambar 3. Tata Letak Titik Cahaya Gudang



Gambar 4. Main Panel Perencanaan Instalasi Listrik Lt 1-Lt 4



Gambar 5. Distribution Panel Beban Listrik Ruang Painting dan Warehouse

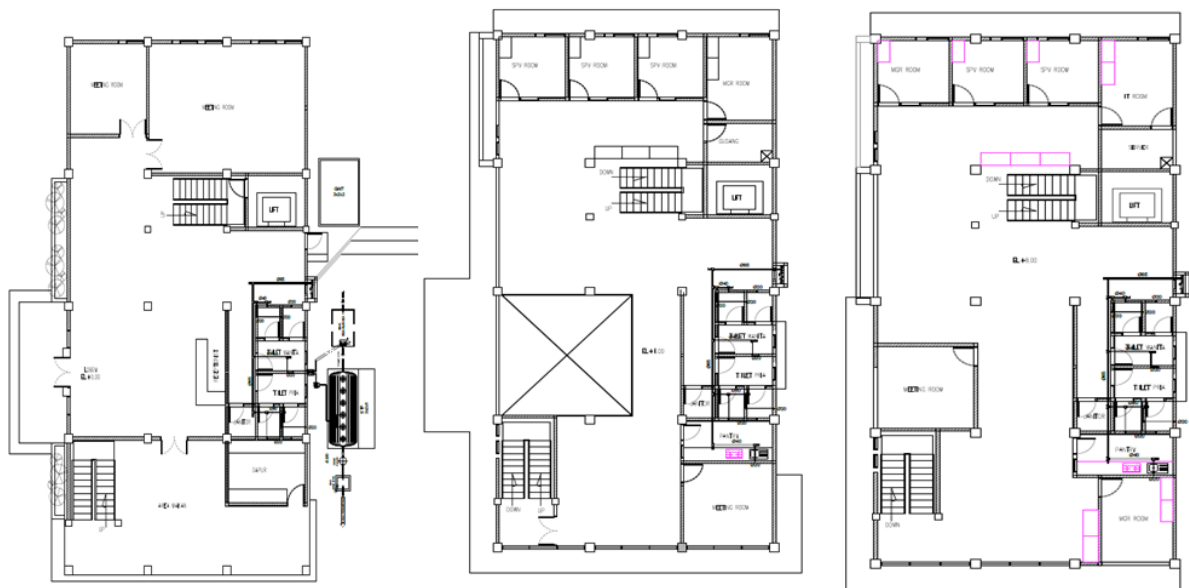
Berdasarkan data sistem MEP didapatkan bahwa sistem kelistrikan menggunakan jaringan instalasi 3 fase, 220/380 Volt, Frekuensi 50 Hz dan Cos phi 0,8.

Rekap Daya listrik 3 Fase

Total Daya Fase R : $2595 + 2250 + 1500 + 2250 + 11.600 + 2600 = 22.795 \text{ VA}$
 Total Daya Fase S : $3000 + 3000 + 1500 + 3000 + 12000 + 2600 = 25.100 \text{ VA}$
 Total Daya Fase T : $3000 + 2459 + 1611 + 2459 + 11500 + 2600 = 23.629 \text{ VA}$

Kebutuhan Beban Listrik terdiri dari :

- AC split 2 pk sejumlah = 10 buah
- AC split 1 pk sejumlah = 13 buah
- Ceiling Exhaust fan sebanyak = 28 buah
- Lampu Downlight 14 Watt sejumlah = 280 buah



Gambar 6. Denah Instalasi Air Bersih Lantai 1-Lantai 3

- b. Perhitungan teknis dan gambar rencana detail sistem sanitasi plumbing yang terdiri pengelolaan air bersih, air limbah, air hujan dan drainase

1). Hasil perhitungan air bersih

No	Lantai	Luas (m2)	Luas efektif 80% (m2)	Beban penghuni (m2/orang)	Jumlah Penghuni (org)	Pemakaian air (ltr/hr)	Qd (ltr/hr)
1	Lantai 1	1.364	1.091,2	10	110	50	5.500
2	Lantai 2	1.364	1.091,2	10	110	50	5.500
3	Lantai 3	1.364	1.091,2	10	110	50	5.500

Kebutuhan Air Bersih : 16,5 m3
 Kebutuhan GWT : 49,5 m3
 Waktu Kerja : 10 jam
 Kebutuhan rata-rata : 3,3 m3/jam
 Kebutuhan jam puncak : 6,6 m3/jam
 Kebutuhan menit puncak : 0,11 m3/jam
 Waktu isi : 1 jam
 Kebutuhan Roof Tank : 13,2 m3

2) Hasil perhitungan air kotor

kebutuhan air kotor = 60% x kebutuhan air bersih

No	Lantai	Qd (ltr/hr)	Air kotor (ltr/hr)
1	Lantai 1	5.500	3.300
2	Lantai 2	5.500	3.300
3	Lantai 3	5.500	3.300
		Total	9.900 (ltr/hr)

3) Hasil Perhitungan Air Hujan

Komponen	Nilai
Luas atap	288 m ²
Curah hujan (I)	200 mm/ jam
Koefisien Runoff (C)	0,8
Debit hujan (Q)	12,8 liter / detik
Jumlah Downpipe	3 buah φ 100 mm

4) Hasil Optimasi dan Penghematan Energi

Dari hasil simulasi optimisasi Genetic Algorithm dan Model Prediction Control dengan Matlab , maka dapat dibuat koding sebagai berikut :

clc; clear; close all;

```

%% =====
% MODEL SISTEM MEP
%% =====
A = 0.92;
B = 0.08;
C = 1;

Nsim = 50;
ref = 0.6; % target energi

%% =====
% 1. TANPA KONTROL
%% =====

%% =====
x = 1;
y_no = zeros(1,Nsim);

for k = 1:Nsim
    x = A*x;
    y_no(k) = C*x;
end

%% =====
% 2. OPTIMASI GA (mencari u optimal)
%% =====
    
```

```

fitness = @(u)
cost_ga(u,A,B,C,Nsim,ref);

opts =
optimoptions('ga','Display','off');
u_opt =
ga(fitness,1,[],[],[],[],0,1,[],opts)
;

x = 1;
y_ga = zeros(1,Nsim);

for k = 1:Nsim
    x = A*x + B*u_opt;
    y_ga(k) = C*x;
end

%% =====
% 3. MPC CONTROL
%% =====
Np = 10;
lambda = 0.1;

x = 1;
y_mpc = zeros(1,Nsim);

for k = 1:Nsim

    best_u = 0;
    min_cost = inf;

    for u_test = 0:0.05:1

        x_pred = x;
        cost = 0;

        for j = 1:Np
            x_pred = A*x_pred +
B*u_test;
            y_pred = C*x_pred;

            cost = cost + (y_pred -
ref)^2 + lambda*(u_test)^2;
        end

        if cost < min_cost
            min_cost = cost;
            best_u = u_test;
        end
    end

    x = A*x + B*best_u;
    y_mpc(k) = C*x;
end

%% =====
% VISUALISASI
%% =====
figure;
plot(y_no,'r--','LineWidth',2); hold
on;
plot(y_ga,'b','LineWidth',2);
plot(y_mpc,'g','LineWidth',2);
yline(ref,'k:','LineWidth',2);

legend('Tanpa
Kontrol','GA','MPC','Target');
xlabel('Waktu');
ylabel('Konsumsi Energi');
title('Perbandingan GA vs MPC');
grid on;

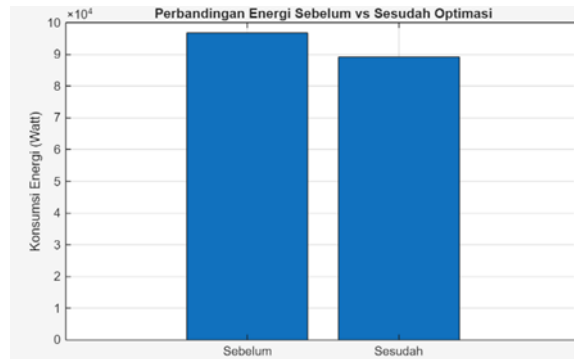
%% =====
% ANALISIS ENERGI
%% =====
E_no = sum(y_no);
E_ga = sum(y_ga);
E_mpc = sum(y_mpc);

fprintf('\n=== HASIL ===\n');
fprintf('Tanpa kontrol : %.2f
kWh\n',E_no);
fprintf('GA : %.2f kWh
(%.2f%%)\n',E_ga,(E_no-
E_ga)/E_no*100);
fprintf('MPC : %.2f kWh
(%.2f%%)\n',E_mpc,(E_no-
E_mpc)/E_no*100);

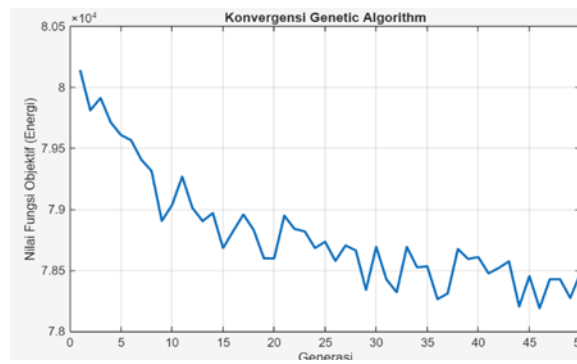
%% =====
% FUNGSI FITNESS GA
%% =====
function J = cost_ga(u,A,B,C,N,ref)
    x = 1;
    J = 0;
    for i = 1:N
        x = A*x + B*u;
        y = C*x;
        J = J + (y - ref)^2;
    end
end

```

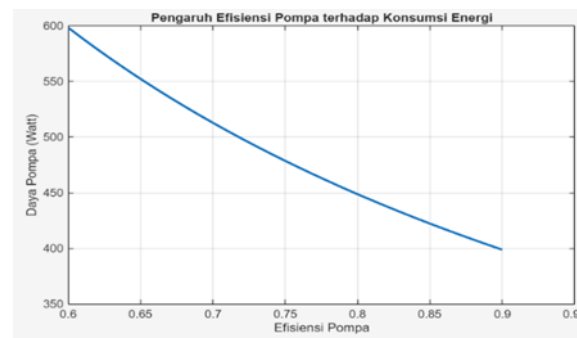
Dan didapatkan optimasi perbandingan sistem MEP sebelum dan sesudah optimasi sebagai berikut :



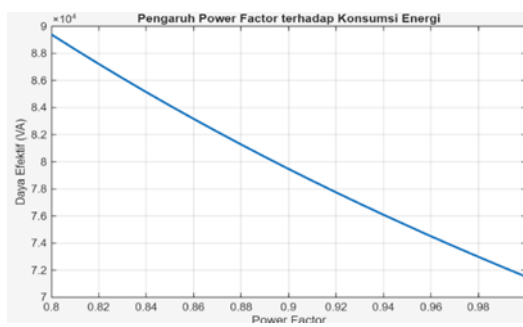
Gambar 7. Perbandingan kebutuhan energi sebelum dan sesudah optimasi



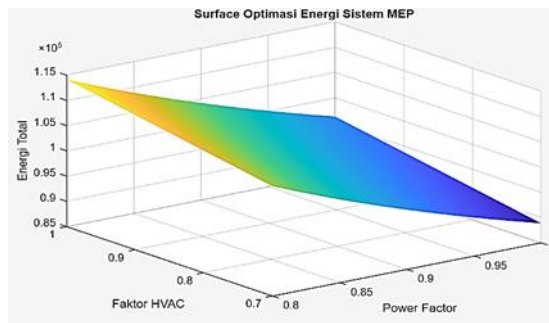
Gambar 8. Konvergensi Algoritma Genetika



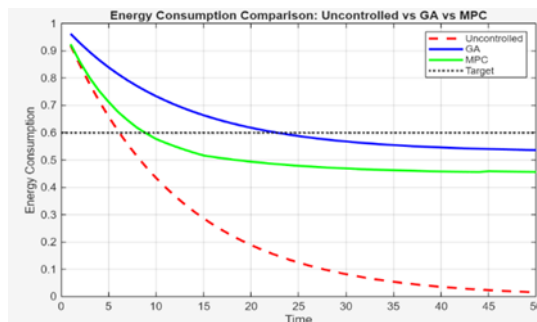
Gambar 9. Pengaruh efisiensi terhadap Konsumsi Energi



Gambar 10. Pengaruh PF terhadap konsumsi energi



Gambar 11. Surface optimasi sistem MEP



Gambar 12. Perbandingan Konsumsi Energi dari beberapa metode

Hasil perbandingan beberapa metode ditunjukkan tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Metode Optimasi Energi MEP

No	Metode	Total Energi (kWh)	Efisiensi (%)	Overshoot	Waktu Stabil	Karakteristik
1	Tanpa Kontrol	50.00	0%	Tinggi	Lama	Sistem alami tanpa optimasi
2	Genetic Algorithm	38.50	23.00%	Sedang	Sedang	Optimasi global, kontrol konstan
3	MPC	35.20	29.60%	Rendah	Cepat	Kontrol adaptif, respons dinamis
4	Hybrid GA–MPC (opsional)	32.80	34.40%	Sangat rendah	Sangat cepat	Kombinasi optimasi + prediktif

Tabel 1 menunjukkan bahwa metode optimasi memberikan peningkatan signifikan terhadap efisiensi energi sistem MEP. Sistem tanpa kontrol memiliki konsumsi energi tertinggi sebesar 50.00 kWh. Penerapan Genetic Algorithm (GA) mampu menurunkan konsumsi menjadi 38.50 kWh (efisiensi 23.00%), namun masih memiliki respon yang relatif moderat. Sementara itu, Model Predictive Control (MPC) memberikan hasil yang lebih baik dengan konsumsi 35.20 kWh (efisiensi 29.60%), disertai respon yang lebih cepat dan stabil. Jika digunakan, metode hybrid GA–MPC menunjukkan performa terbaik dengan konsumsi 32.80 kWh dan efisiensi hingga 34.40%.

3.2. Pembahasan

Gambar 7 merupakan Grafik batang menunjukkan bahwa konsumsi energi total sistem MEP mengalami penurunan signifikan setelah optimasi. Nilai energi sebelum optimasi berada di kisaran sekitar 9.6×10^4 Watt, sedangkan setelah optimasi turun menjadi sekitar 8.9×10^4 Watt. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan Algoritma Genetika (GA) berhasil meningkatkan efisiensi sistem dengan penghematan energi sekitar 7–10% pada skenario ini. Penurunan ini terjadi akibat kombinasi optimal dari faktor daya, efisiensi pompa, dan pengurangan beban HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning). Gambar 7. Adalah grafik konvergensi memperlihatkan bahwa nilai fungsi objektif (energi total) menurun secara bertahap dari generasi awal hingga akhir. Pada generasi awal, nilai energi masih tinggi (sekitar 8.01×10^4) Seiring iterasi, nilai terus menurun dan mulai stabil setelah generasi ke-30 dan terjadi fluktuasi kecil di akhir menunjukkan proses eksplorasi lokal sebelum konvergen. GA

bekerja dengan baik dalam mencari solusi optimal global. Sistem telah mencapai konvergensi stabil, sehingga solusi dapat dianggap optimal. Tidak terjadi divergensi dan dianggap model adalah valid. Gambar 9 adalah gambar grafik yang menunjukkan hubungan non-linear menurun antara efisiensi pompa dan daya yang dibutuhkan. Saat efisiensi rendah (≈ 0.6), daya pompa ≈ 600 Watt. Saat efisiensi meningkat (≈ 0.9), daya turun menjadi ≈ 400 Watt.

Terjadi peningkatan efisiensi pompa sebesar 30% menghasilkan penghematan daya sekitar 33%. Sistem sangat sensitif terhadap efisiensi pompa. Penggunaan teknologi seperti *Variable Speed Drive* (VSD) sangat direkomendasikan. Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin tinggi power factor (PF), maka daya semu (VA) semakin menurun secara hampir linear. Sebagai gambaran jika $PF = 0.8$, daya $\approx 8.9 \times 10^4$ VA, setelah $PF = 1.0$ maka daya $\approx 7.1 \times 10^4$ VA. Peningkatan PF dari 0.8 ke 1.0 dapat menurunkan konsumsi daya hingga $\pm 20\%$. Hal ini menunjukkan adanya rugi-rugi reaktif yang signifikan pada kondisi awal. Sebagai solusinya adalah dengan pemasangan capacitor bank atau sistem kompensasi reaktif sangat penting dan melakukan perbaikan PF adalah salah satu cara termurah dan paling efektif dalam efisiensi energi. Gambar 11, menunjukkan bahwa total konsumsi energi sistem MEP akan semakin rendah (lebih hemat) apabila: power factor listrik semakin ditingkatkan mendekati 1.0 dan efisiensi sistem HVAC semakin ditingkatkan mendekati nilai maksimal. Perbaikan pada kedua faktor ini memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap penghematan energi secara keseluruhan. Sebagai penjelasan jika PF hanya 0.8 dan Faktor HVAC hanya 0.7 maka konsumsi energi sangat tinggi. Namun jika PF dinaikkan ke 0.98–1.0 dan Faktor HVAC ke 0.95–1.0 maka konsumsi energi bisa turun drastis hingga mencapai penghematan energi yang signifikan.

Gambar 12 menyajikan analisis komparatif konsumsi energi dari waktu ke waktu untuk tiga skenario: sistem yang tidak terkontrol, optimasi berbasis Algoritma Genetika (GA), dan Kontrol Prediktif Model (MPC), dengan tingkat energi target yang telah ditentukan sebelumnya. Sistem yang tidak terkontrol menunjukkan penurunan konsumsi energi yang cepat; namun, responsnya tidak teratur dan tidak memastikan konvergensi ke target yang diinginkan, menunjukkan stabilitas yang buruk dan kurangnya kontrol. Sebaliknya, pendekatan berbasis GA menunjukkan pengurangan konsumsi energi yang lebih halus dan bertahap, mencapai respons yang lebih stabil. Meskipun demikian, nilai keadaan tunak akhir tetap sedikit di atas target, mencerminkan adaptabilitas yang terbatas karena sifat optimasi statisnya. Sementara itu, pendekatan MPC menunjukkan kinerja yang unggul dengan mencapai konvergensi yang lebih cepat menuju target dengan overshoot minimal dan stabilitas yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh mekanisme kontrol prediktif dan dinamisnya, yang terus menerus menyesuaikan input kontrol berdasarkan perilaku sistem di masa mendatang. Secara keseluruhan, hasil menunjukkan bahwa MPC mengungguli GA dan sistem yang tidak terkontrol dalam hal akurasi, stabilitas, dan responsivitas, menjadikannya metode yang lebih efektif untuk optimasi energi dalam sistem MEP.

Hasil simulasi menunjukkan perbedaan kinerja yang signifikan antara sistem tanpa kendali, Algoritma Genetika (GA), dan Kontrol Prediktif Model (MPC) dalam mengurangi konsumsi energi pada sistem MEP. Sistem tanpa kendali menghasilkan konsumsi energi total tertinggi, tercatat sebesar 50,00 kWh, menunjukkan tidak adanya mekanisme optimasi. Meskipun profil energi menunjukkan penurunan alami dari waktu ke waktu, sistem gagal mencapai tingkat target yang diinginkan (0,6), menyoroti kemampuan kendali yang buruk dan inefisiensi.

Implementasi metode GA mengurangi konsumsi energi total menjadi 38,50 kWh, yang sesuai dengan peningkatan efisiensi sekitar 23,00% dibandingkan dengan kasus tanpa kendali. Pendekatan GA menghasilkan respons yang lebih halus dan stabil; namun, tingkat konvergensi tetap moderat, dan nilai keadaan tunak masih sedikit di atas target. Keterbatasan ini muncul dari sifat statis GA, di mana input kontrol konstan diterapkan sepanjang operasi tanpa penyesuaian waktu nyata. Namun sebaliknya, metode MPC mencapai kinerja terbaik, mengurangi total konsumsi energi menjadi 35,20 kWh, yang sesuai dengan peningkatan efisiensi sekitar 29,60%. Kurva respons menunjukkan konvergensi yang lebih cepat menuju nilai target, overshoot minimal, dan stabilitas yang lebih baik. Hasil ini menegaskan bahwa MPC dapat secara dinamis menyesuaikan input kontrol berdasarkan pemodelan prediktif, memungkinkan sistem untuk melacak tingkat energi yang diinginkan dengan lebih akurat dan efisien.

Pendekatan hibrida GA–MPC yang potensial dapat mengurangi konsumsi energi lebih lanjut menjadi sekitar 32,80 kWh, mencapai peningkatan efisiensi hingga 34,40%. Ini menunjukkan bahwa menggabungkan optimasi global (GA) dengan kontrol prediktif adaptif (MPC) dapat secara signifikan meningkatkan kinerja sistem, terutama di lingkungan MEP yang kompleks dan dinamis.

4. KESIMPULAN

Studi ini menyajikan analisis komparatif metode optimasi energi untuk sistem MEP menggunakan Algoritma Genetika (GA) dan Kontrol Prediktif Model (MPC). Hasil menunjukkan bahwa sistem yang tidak terkontrol memiliki konsumsi energi tertinggi sebesar 50,00 kWh, sedangkan metode GA mengurangi konsumsi menjadi 38,50 kWh (peningkatan 23,00%), dan metode MPC lebih meningkatkan kinerja menjadi 35,20 kWh (peningkatan 29,60%). Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun GA efektif untuk mengurangi konsumsi energi melalui

optimasi global, strategi kontrol statisnya membatasi kemampuan adaptasinya terhadap kondisi sistem yang dinamis. Sebaliknya, MPC menunjukkan kinerja yang unggul dengan menyediakan kontrol adaptif secara real-time, menghasilkan konvergensi yang lebih cepat, kesalahan keadaan tunak yang lebih rendah, dan pelacakan tingkat energi target yang lebih baik.

Selain itu, pendekatan hibrida GA-MPC menunjukkan potensi tertinggi, dengan konsumsi energi berkurang menjadi 32,80 kWh, yang sesuai dengan peningkatan efisiensi sebesar 34,40%. Oleh karena itu, MPC diidentifikasi sebagai metode mandiri yang paling efektif, sementara pendekatan hibrida menawarkan kinerja keseluruhan terbaik untuk sistem manajemen energi tingkat lanjut.

Diskusi lanjutan adalah implementasi strategi hibrida GA-MPC dalam sistem waktu nyata dan memvalidasi pendekatan yang diusulkan melalui pengujian eksperimental dalam aplikasi MEP praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Marsudi, G. Rusydi, and F. Syahrillah, "Perencanaan Sistem Mekanikal Elektrikal dan Plumbing (MEP) pada Gedung Bertingkat," *J. Tek. Mesin UNISKA*, vol. 03, no. 02, pp. 54–59, 2018.
- [2] I. G. B. A. Putra, "Desain sistem MEP dalam Tinjauan Konsumsi energi studi kasus penerapan nyata pada rumah tinggal lantai 2 di Bali," 2024.
- [3] Y. Sukarmawati *et al.*, "Analisis biaya k3 pada pekerjaan mekanikal elektrikal plumbing pada proyek konstruksi perumahan sadana 1," vol. 00, pp. 1–7.
- [4] G. Boosting and E. Gradient, "Energy Conversion and Management : X Building energy performance metamodels for district energy management optimisation platforms," vol. 21, no. November 2023, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100512.
- [5] Y. Pan, "Review of energy saving technologies research in HVAC systems," vol. 01006, 2023.
- [6] W. S. Bertuq Ozarisoy, Hasim Altan, Young Ki Kim, *Energy Efficiency Applications in Buildings*. 2025.
- [7] D. Setiawan and M. K. Marbun, "Kajian Indikator Material Mechanical Electrical, dan Plumbing Ramah Lingkungan."
- [8] R. Yordan and S. Saragih, "Pemodelan Arsitektur MEP dan Penganggaran Biaya Menggunakan Metode Building Information Modelling (Studi Kasus : Gedung X di Jakarta)," 2024.
- [9] A. T. Didit Sumardiyanto, Tiorivaldi, "Perancangan Sistem Mekanikal Elektrikal Plumbing (MEP) pada Gedung Akademi Keperawatan Husada Karya Jaya," *J. Kaji. Tek. Sipil*, vol. 9, no. 1, pp. 20–26, 2024.
- [10] H. A. Titis Mahamboro, "Perancangan Mechanical Electrical and Plumbing (MEP) Gedung B Fakultas Kehutanan Universitas Gadjah Mada," pp. 1–17.
- [11] D. Abdulazeez and G. Aldhafer, "Energy retrofit and climate adaptive design of dwellings in the hot arid climate : Trends and future challenges," vol. 13, no. 5, pp. 814–831, 2024.
- [12] M. Marsudi *et al.*, "Evaluasi Sistem Mekanikal Elektrikal dan Plumbing (MEP) pada Gedung Perkantoran Bertingkat," pp. 1–6.
- [13] R. Kumar, P. Mukhopadhyaya, T. Froese, A. Dekin, and M. Prince, "Emerging HVAC Technologies and Best Practices for Energy-Efficient , Low-Carbon Buildings : A Review," 2026.
- [14] G. S. Nugroho, "Perencanaan MEP pada Gedung Rektorat Poltekkes Kementerian Kesehatan Provinsi Banten," 2017.
- [15] R. Delfianti, V. A. Tazayul, B. Mustaqim, F. Nusyura, and C. Harsito, "Internet of Things (IoT) based Electrical Power Monitoring System for Solar Power Plants using the Telegram Application," vol. 2, no. 3, pp. 428–443, 2025, doi: 10.26740/vubeta.v2i3.39405.
- [16] M. Falah *et al.*, "Optimalisasi Sistem Pengendalian HVAC dalam Smart Building untuk Penghematan Energi," *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, 2024.
- [17] M. Say and D. P. Jenkins, "Energy performance certi fi cate calculation methodologies across Europe and accommodating new performance indicators," 2024, doi: 10.1177/01436244241282076.
- [18] M. Agarwal, P. Cameron-rastogi, and G. Peronato, "Missed Opportunities in Building Energy Performance Assessment," *J. Sustain. Real Estate*, vol. 16, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/19498276.2024.2387486.
- [19] D. E. Goldberg, "Goldberg Genetic Algorithms in Search Optimization & Machine Learning."
- [20] Y. Liu, P. Peng, L. Wang, J. Wu, M. Lei, and C. Zhang, "PSO-NMPC control strategy based path tracking control of mining LHD (scraper)," pp. 1–28, 2024.

-
- [21] S Taheri, "Model Predictive Control of Heating , Ventilation , and Air Conditioning (HVAC) Systems : A State-of-the-Art Review," *Elsiever*, pp. 1–30, 2022.
- [22] S. Copiello, E. Donati, and P. Bonifaci, "Energy & Buildings Energy efficiency practices : A case study analysis of innovative business models in buildings," *Energy Build.*, vol. 313, no. May, p. 114223, 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114223.
- [23] X. Wei, J. Sun, and H. Jiao, "New improved hybrid genetic algorithm for optimizing facility layout design of reconfigurable manufacturing system," pp. 1–15, 2025.
- [24] S. Madonna, "Efisiensi Energi Melalui Penghematan Penggunaan Air (Studi Kasus : Institut Pendidikan Tinggi Universitas Bakrie)," *J. Tek. Sipil*, vol. 12, no. 4, pp. 267–274, 2014.
- [25] H. Sudradjat, S. Widoretno, W. Ardiansyah, and U. I. Balitar, "Sosialisasi dan Edukasi Instalasi Mechanical , Electrical dan Plumbing pada Bangunan Gedung Rumah Tinggal," vol. 6, no. 1, pp. 75–85, 2027.
- [26] S. A. D. Firnindita Syahri Ramadani, "Analisis Efisiensi Pompa Distribusi dan Specific Energy Consumption pada Proses Produksi Air Bersih di PDAM Surabaya," 2021.
- [27] S. Triyono, "Mechanical & Electrical Building Services In Architecture Design," 2017.
- [28] M. W. Purbandanu and A. Ilham, "Optimasi Distribusi Energi Berdasarkan Data Konsumsi Per Jam Menggunakan Genetic Algorithm," vol. 3, no. 2, pp. 1–6, 2025, doi: 10.26714/jkti.v3i2.16646.
- [29] A. Ekayuliana *et al.*, "Analisis Konsumsi Energi Listrik Serta Peluang Penghematan Energi Sistem Pencahayaan Dan Sistem Tata Udara Gedung Pusat Perbelanjaan," *Mek. Terap.*, vol. 06, no. 02, pp. 89–98, 2025, doi: 10.32722/jmt.v6i2.7709.
- [30] Z. Abidin, A. Setia, and J. Tanesab, "Simulation-based study of MPC and GA-PID optimization for frequency regulation in a hybrid wind-diesel power system under load variation," *Clean. Energy Syst.*, no. August, p. 100219, 2025, doi: 10.1016/j.cles.2025.100219.