

MANAJEMEN ALIRAN ENERGI MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIK PADA DC/AC MIKROGRID

Adhi Kusmantoro

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
Jl. Sidodadi Timur 24 – Dr. Cipto Semarang
e-mail: adhikusmantoro@upgris.ac.id

ABSTRACT

Decentralized electricity generation using renewable energy is increasingly being used to promote social inclusion in rural areas. In areas without electricity network access, more and more grid infrastructure is being installed using generators. This energy source only serves to provide electricity at that location, while the local population's electricity needs increase annually. The use of renewable energy-based microgrids, particularly photovoltaic (PV) energy, in rural locations can contribute to the achievement of sustainable development goals. The management of these microgrids can ensure a sustainable electricity supply for the local population. To achieve convergence between universal access to the population's energy needs and energy provision using microgrids, the use of optimization algorithms for better planning and operational efficiency of microgrids is crucial. To this end, a genetic algorithm was used for optimal energy flow management in a multi-PV and multi-load system, to test the microgrid's ability to achieve these goals. The results showed that optimal microgrid management guarantees a Power Supply Loss Probability of 0.16%, electricity cost savings of 53%, and an emission savings factor of 88.9%. The low cost of electricity obtained demonstrates that this method offers a real opportunity to improve electricity access for low-income rural populations. Similarly, the maximum renewable factor value obtained indicates a reduction in generator operating time, which significantly reduces operational costs and greenhouse gas emissions.

Keywords: Microgrid, Energy Management, Photovoltaic, Wind Turbine, Genetic Algorithm

ABSTRAK

Pembangkitan energi listrik terdesentralisasi memakai energi terbarukan semakin banyak digunakan untuk mendorong inklusi sosial penduduk di wilayah pedesaan. Dalam daerah yang belum terjangkau jaringan listrik, maka semakin banyak infrastruktur jaringan yang dipasang menggunakan genset. Sumber energi ini hanya berfungsi untuk menyediakan listrik di lokasi tersebut, sementara penduduk setempat membutuhkan listrik yang meningkat setiap tahunnya. Penggunaan mikrogrid berbasis energi terbarukan, khususnya energi photovoltaic (PV), di lokasi-lokasi pedesaan dapat berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Pengelolaan mikrogrid ini dapat memastikan pasokan listrik yang berkelanjutan bagi penduduk setempat. Untuk mencapai konvergensi antara akses universal terhadap kebutuhan energi penduduk dan penyediaan energi memakai mikrogrid, maka penggunaan algoritma optimasi untuk perencanaan dan efisiensi operasional mikrogrid yang lebih baik sangatlah penting. Untuk tujuan ini, algoritma genetik digunakan untuk manajemen aliran energi yang optimal dalam sistem multi-PV dan multi-beban, untuk menguji kemampuan mikrogrid dalam mencapai tujuan tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan mikrogrid yang optimal menjamin Probabilitas Kehilangan Pasokan Daya sebesar 0,16%, penghematan biaya listrik sebesar 53%, dan faktor penghematan emisi sebesar 88,9%. Rendahnya biaya listrik yang diperoleh menunjukkan bahwa metode ini merupakan peluang nyata untuk meningkatkan akses listrik bagi penduduk berpenghasilan rendah di pedesaan. Demikian pula, nilai faktor terbarukan maksimum yang diperoleh menunjukkan pengurangan waktu pengoperasian genset, yang berdampak pada pengurangan biaya operasional dan emisi gas rumah kaca secara signifikan.

Kata Kunci: Mikrogrid, Manajemen Energi, Photovoltaik, Turbin Angin, Algoritma Genetik

I. PENDAHULUAN

PADA saat sekarang peningkatan akses sumber listrik sangat penting untuk pembangunan ekonomi, sosial, dan politik. Negara Indonesia menghadapi hambatan yang signifikan untuk kemajuan sosial dan ekonomi, terutama dalam hal pasokan listrik. Meskipun Indonesia memiliki banyak potensi sumber energi terbarukan, namun Indonesia masih tetap menggunakan pembangkit listrik energi fosil yang menyebabkan tingkat produksi listrik mengalami penurunan setiap tahunnya [1]. Oleh karena itu untuk meningkatkan pasokan energi listrik digunakan energi terbarukan dalam meningkatkan akses penduduk terhadap sumber listrik. Tujuan ini selaras rencana

umum energi nasional [2]. Dalam meningkatkan ketersediaan energi listrik, pemerintah Indonesia membuat rencana untuk target pencapaian pembangkit listrik menggunakan energi terbarukan, dengan membuat rancangan rencana umum energi nasional (RUEN). Hal ini disebabkan wilayah negara Indonesia terletak di garis khatulistiwa, sehingga energi matahari dapat diperoleh dengan mudah. Untuk mendukung RUEN maka digunakan energi photovoltaik melalui beberapa proyek peresmian pembangkit listrik photovoltaik atau sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang beroperasi secara mandiri atau terhubung dengan grid, oleh karena itu hal ini untuk meningkatkan dan memperbaiki akses listrik yang digunakan oleh masyarakat atau penduduk. Untuk

mengatasi permasalahan akses sumber listrik di wilayah pedesaan, maka sebagai alternatif digunakan mikrogrid yang terdiri dari photovoltaik (PV) sebagai sumber utama yang terhubung dengan genset, dan penyimpan baterai. Mikrogrid merupakan pembangkit terdistribusi yang berfungsi sebagai pembangkit listrik mandiri yang akan memberikan akses layanan energi listrik. Jika terjadi kelebihan produksi listrik dapat disalurkan ke grid utama.

Strategi baru menggunakan beberapa sumber dan banyak jenis beban ini akan menimbulkan kesulitan dalam proses perencanaan dan operasi. Hal ini disebabkan karakteristik energi surya yang stokastik dan perubahan permintaan listrik penduduk setempat. Untuk memastikan operasi jangka panjang yang stabil dengan perubahan beban, maka mikrogrid harus memiliki sistem manajemen energi yang optimal.

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang berfokus pada masalah optimasi mikrogrid, dalam penelitian yang disajikan dalam [3] sistem manajemen dan kontrol energi cerdas dapat meningkatkan penggunaan listrik yang efisien dan menjaga keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi dengan menggunakan peramalan dan penyimpanan energi. Namun sistem ini belum memakai algoritma optimasi untuk meminimalkan biaya energi, sehingga peneliti [4] menggunakan dua teknik optimasi, yaitu *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Differential Evolution* (DE) untuk mengelola energi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik dengan sumber genset, generator bahan bakar gas alam, photovoltaik (PV), turbin angin. Efektivitas kedua algoritma optimasi diuji dalam mode terhubung grid dan mandiri. Dalam mode terhubung grid, penggunaan jaringan yang optimal selama jam sibuk dan tidak sibuk mencapai biaya operasional rendah.

Demikian pula untuk mode operasi mandiri, penggunaan semua sumber energi untuk menyeimbangkan permintaan beban mencapai biaya operasional rendah. Peneliti [5] menggunakan algoritma PSO untuk mengoptimalkan grid melalui peningkatan mikrogrid. Hasil studi memperlihatkan bahwa model yang diusulkan mampu mengurangi kesalahan prediksi. Peneliti [6] menggunakan *software Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables* (HOMER) untuk menganalisis dan mengoptimalkan grid terhubung PV, turbin angin, dan baterai. Hasil optimasi menunjukkan bahwa energi PV dan turbin angin yang terhubung grid dapat berkontribusi hingga 82% terhadap sumber listrik yang dibutuhkan. Sedangkan peneliti [7] memakai *software* MATLAB untuk merancang sistem PV dalam mode off-grid untuk menyuplai energi listrik yang dibutuhkan wilayah perumahan. Hasil studi menunjukkan bahwa energi PV dapat memenuhi profil beban yang dibutuhkan pada siang hari, dan baterai pada malam hari, sehingga dapat memenuhi beban yang diinginkan. Peneliti [8] mensimulasikan *platform* dengan radiasi matahari pada hari yang cerah dan musim dingin

dengan Matlab. Hasil studi menunjukkan bahwa metode yang diusulkan mampu memenuhi kebutuhan beban dan menunjukkan kinerja yang dibutuhkan. Peneliti [9] mengusulkan metode optimasi memakai algoritma genetika yang diterapkan pada turbin angin, PV, baterai pada mode *off-grid*. Hasil studi menunjukkan bahwa informasi cuaca sangat membantu untuk pembangkit energi jangka panjang dalam memasok wilayah tersebut.

Peneliti [10] memakai algoritma optimasi metaheuristik yang disebut juga optimasi multimoda kawanan partikel tertunda. Sistem yang diusulkan terdiri PV, turbin angin, penyimpan baterai, dan genset. Hasil studi menunjukkan pemakaian energi terbarukan mampu meningkatkan akses energi di daerah terpencil. Metode optimasi ukuran kapasitas PV dan baterai dalam sistem mandiri dengan beban pencahayaan diusulkan peneliti [11]. Sedangkan peneliti [12], [13] mendesain sistem elektrifikasi pedesaan mandiri memakai PV. Metode yang diusulkan dimodelkan dengan Pemrograman Linear Integer yang meliputi aspek ekonomi, teknis dan sosial yang digunakan untuk merancang sistem elektrifikasi di tiga komunitas nyata. Peneliti [14] mengusulkan analisis teknoekonomi PV skala komersial untuk pertanian. Strategi ini dengan pendekatan K-means dengan mengelompokkan data dari 93 petani menjadi sembilan kluster dengan konsumsi listrik yang serupa. Hasil studi menunjukkan bahwa sumber energi terbarukan mampu menghemat biaya pembangkitan.

Untuk menyelesaikan masalah optimasi multi-objektif yang bertujuan meminimalkan biaya operasi, tingkat emisi serta kerugian daya konverter, peneliti [15] menggunakan logika fuzzy untuk memenuhi masalah pengiriman optimasi multi-objektif untuk meminimalkan biaya operasi, tingkat emisi serta kerugian daya konverter.

Dalam penelitian yang dilakukan [16], algoritma genetika digunakan untuk sistem mikrogrid yang terdiri dari PV, genset dan konfigurasi baterai yang optimal. Metode optimasi ini diusulkan untuk merancang mikrogrid dengan mempertimbangkan faktor ekonomi, lingkungan, dan keandalan.

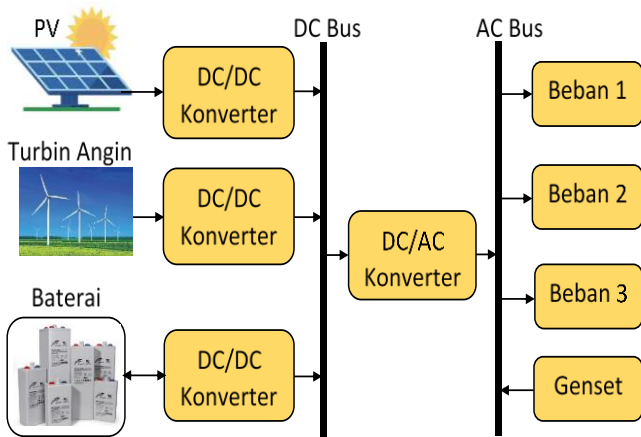
Peneliti [17] melakukan optimasi dan analisis teknoekonomi untuk merancang sistem energi terbarukan hibrida dengan HOMER. Hasil studi menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan lebih efisien ketika energi PV terintegrasi dengan penyimpan baterai. Sedangkan peneliti [18] menggunakan HOMER untuk analisis optimasi dengan mempertimbangkan faktor lingkungan, PV, diesel, baterai. Hasil studi menunjukkan bahwa kondisi pengisian minimum baterai, iradiasi matahari, dan peningkatan beban, berpengaruh pada kinerja sistem yang diusulkan.

Berdasarkan tinjauan penelitian sebelumnya yang melakukan penelitian manajemen aliran energi dalam mikrogrid serta algoritma manajemen energi, maka pada artikel ini diusulkan menggunakan sumber energi

matahari yang masih belum optimal dimanfaatkan di Indonesia. Pada strategi ini digunakan algoritma genetik. Algoritma ini digunakan untuk menyediakan manajemen cerdas dan optimal dengan beberapa sumber energi secara *real time*. Hal ini bertujuan menjaga pasokan listrik yang berkelanjutan pada wilayah pedesaan untuk menyediakan listrik dengan biaya lebih rendah bagi penduduk setempat. Algoritma optimasi ini diperlukan untuk menentukan Biaya Energi Terratakan Minimum (*LCOE*), Probabilitas Kehilangan Pasokan Daya (*LPSP*), dan Faktor Terbarukan Maksimum (*MRF*) untuk menunjukkan efektivitas solusi yang diusulkan.

II. PEMODELAN MIKROGRID

Mikrogrid merupakan klaster pembangkit energi terdistribusi yang terdiri dari sumber dan penyimpanan energi, beban yang saling terhubung. Mikrogrid dapat dapat beroperasi secara mandiri atau terhubung dengan grid utama. Mikrogrid dapat direncanakan sebagai pembangkit listrik DC [19], AC mikrogrid, sistem hibrid AC/DC. Mikrogrid direncanakan dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan ketersediaan sumber energi terbarukan. Kapasitas pembangkitan mikrogrid berdasarkan kebutuhan energi listrik pada lokasi penduduk [20]. Dalam studi ini mengusulkan sistem DC/AC mikrogrid DC-AC yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar. 1. Sistem mikrogrid

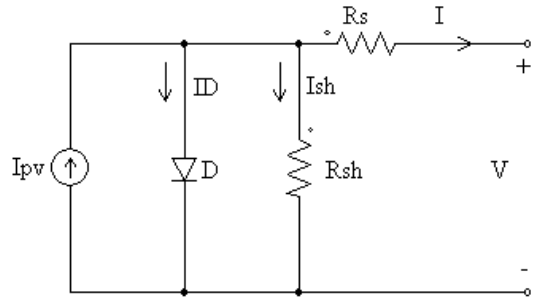
A. Pemodelan Photovoltaik (PV)

Kinerja pada Photovoltaik (PV) tergantung pada intensitas iradiasi matahari dan suhu lingkungan, sedangkan output daya PV dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$P_{pv} = \eta_{pv} \times A_{pv} \times I_r \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan (1), daya keluaran PV (P_{pv}) tergantung terhadap efisiensi PV (η_{pv}), luas penampang PV (A_{pv}), dan intensitas iradiasi matahari (I_r). Sedangkan efisiensi pembangkitan PV (η_{pv}) tergantung dari efisiensi modul PV (η_r) dan efisiensi pengkondisian daya (η_{pc}). Gambar 2 memperlihatkan

model yang paling mewakili model PV. I_{pv} , I_D , I_{sh} adalah arus PV, arus dioda, dan arus *shunt*.



Gambar. 2. Model PV dengan R_s dan R_{sh} (10).

Dengan menerapkan hukum kirchoff, arus keluaran dinyatakan sebagai berikut

$$I = I_{pv} - I_D - I_{sh} \quad (2)$$

Arus keluaran PV pada persamaan (1) dapat diuraikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$I = I_{pv} - I_0 \left\{ e^{\left(\frac{V + R_s I}{n V_t} \right)} - 1 \right\} - I_{sh} \quad (3)$$

Sedangkan arus yang mengalir pada resistansi R_{sh} dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (4)$$

Oleh karena itu pada rangkaian ekivalen PV, arus keluaran dinyatakan dengan persamaan berikut

$$I = I_{pv} - I_0 \left\{ \exp \left(\frac{V + I R_s}{n N_s V_t} \right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (5)$$

B. Baterai

Baterai digunakan untuk menyimpan daya dan ketika baterai mengeluarkan daya dapat dinyatakan dengan sebuah persamaan di bawah ini

$$P_{bat} = V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (6)$$

Jika $P_{bat} > 0$ maka baterai mengeluarkan daya (*discharge*), sedangkan ketika $P_{bat} < 0$ maka baterai menyimpan akan daya (*charge*). Kondisi *state of charge* (SOC) baterai dengan persamaan di bawah ini

$$SoC(t) = SoC(0) - \frac{1}{C_{norm}} \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (7)$$

Dimana $SoC(t)$ menyatakan tingkat muatan baterai pada waktu t ($0 - t$ atau $0 - 100\%$), $SoC(0)$ menyatakan

SoC awal, dan C_{norm} menyatakan kapasitas nominal baterai (Ah). Dengan memperhatikan SoC maka tegangan rangkaian terbuka baterai merupakan fungsi SoC. Fungsi ini ditentukan berdasarkan karakteristik baterai (eksperimental). Umumnya berbentuk kurva non-linear.

C. Generator Diesel (Genset)

Mesin diesel mengubah energi kimia (bahan bakar) menjadi energi mekanik. Dinamikanya dapat ditulis dengan model ayunan rotor (persamaan *swing*) sebagai berikut:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D_\omega \quad (8)$$

Variable $J \frac{d\omega}{dt}$ menyatakan momen inersia rotor ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$), ω menyatakan kecepatan sudut rotor (rad/s), T_m menyatakan torsi mekanik dari mesin diesel (Nm), T_e menyatakan torsi elektromagnetik generator (Nm), D_ω menyatakan koefisien redaman (Nms/rad). Untuk torsi mekanik dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$T_m = \frac{P_{\text{fuel}}}{\omega} \quad (9)$$

$$P_{\text{fuel}} = \eta_d \cdot m_{\text{fuel}} \cdot \text{LHV} \quad (10)$$

Variabel η_d menyatakan efisiensi mesin diesel, m_{fuel} menyatakan laju aliran massa bahan bakar (kg/s), dan LHV menyatakan *Lower Heating Value* bahan bakar (J/kg). Efisiensi pada genset dinyatakan dalam fungsi *Specific Fuel Consumption* (SFC), yang biasanya diberikan dalam kg/kWh atau g/kWh. Oleh karena itu kita dapat menuliskan efisiensi langsung dengan persamaan di bawah ini

$$\eta_{\text{genset}} = \frac{1}{\text{SFC} \cdot \text{LHV}} \quad (11)$$

D. Model Beban

Perubahan daya yang dihasilkan mikrogrid harus mampu memenuhi permintaan beban, sehingga daya yang dihasilkan mikrogrid lebih besar atau sama dengan kebutuhan beban. Peranan penyimpanan baterai juga sangat penting, sehingga batasan ini dinyatakan dengan tanda ("+" atau "-") yang menyatakan kemampuan baterai untuk pengisian atau melepaskan daya ke beban. Hal ini dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_{\text{beban}}(t) \geq P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{DG}}(t) + P_{\text{bat}}(t) \quad (12)$$

Berdasarkan persamaan di atas beberapa variable daya dinyatakan sebagai berikut.

- $P_{\text{beban}}(t)$ adalah daya beban utama pada waktu t
- $P_{\text{PV}}(t)$ adalah daya generator PV pada waktu t

- $P_{\text{bat}}(t)$ adalah daya baterai penyimpanan pada waktu t
- $P_{\text{DG}}(t)$ adalah daya genset pada waktu t

Setiap sumber daya pembangkit dibatasi oleh nilai maksimum $P_{\text{max}}(t)$ dan nilai minimum $P_{\text{min}}(t)$ yang dapat berfluktuasi dari satu kondisi ke kondisi lainnya. Kondisi ini dinyatakan dengan persamaan di bawah ini.

$$P_{\text{min}}(t) \leq P(t) \leq P_{\text{max}}(t) \quad (13)$$

III. MANAJEMEN ENERGI

Dalam sistem manajemen energi yang diusulkan berfokus pada optimisasi dalam sistem mikrogrid, dengan tujuan untuk minimisasi biaya operasi, yang dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$\min C = \sum_{t=1}^T C_{\text{DG}}(P_{\text{DG},t}) + C_{\text{grid}}(P_{\text{grid},t}) + C_{\text{bat}}(P_{\text{bat},t}) \quad (14)$$

$$P_{\text{DG},t} + P_{\text{RES},t} + P_{\text{grid},t} + P_{\text{bat},t} = P_{\text{beban},t} \quad (15)$$

$$P_{\text{DG}}^{\text{min}} \leq P_{\text{DG},t} \leq P_{\text{DG}}^{\text{max}} \quad (16)$$

$$\text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}_t \leq \text{SoC}_{\text{max}} \quad (17)$$

A. Average Cost of Electricity (ACE)

Dalam sistem manajemen energi pada mikrogrid, *Average Cost of Electricity (ACE)* atau biaya rata-rata listrik adalah metode yang digunakan untuk mengukur biaya rata-rata yang dikeluarkan untuk memproduksi atau menyuplai listrik per satuan energi (kWh) dalam suatu periode tertentu. Ini sangat penting karena membantu operator mikrogrid membuat keputusan ekonomi dan teknis yang efisien. Oleh karena itu ACE dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$\text{ACE} = \frac{\text{Total Biaya Operasional Listrik}}{\text{Total Energi yang Dihasilkan}} \quad (18)$$

Total biaya operasional listrik menyatakan semua biaya yang terkait dengan produksi listrik, termasuk yang meliputi biaya bahan bakar (misal diesel, gas, biomassa), biaya operasional dan pemeliharaan (O&M), biaya penyusutan peralatan/pembangkit, dan biaya pembelian listrik dari jaringan utama (jika ada). Sedangkan total energi yang dihasilkan menyatakan jumlah energi listrik yang dihasilkan oleh mikrogrid dalam periode tertentu (biasanya kWh). ACE dalam sistem mikrogrid digunakan untuk evaluasi ekonomi dalam mengetahui berapa biaya rata-rata untuk setiap kWh yang dihasilkan, sehingga dapat membandingkan

antara berbagai sumber energi (misal PV surya dan genset diesel). Selanjutnya optimalisasi penggunaan sumber energi, misalnya jika ACE dari energi surya lebih rendah daripada genset diesel, sistem dapat memprioritaskan penggunaan energi surya untuk menekan biaya. Penentuan harga listrik internal, pada mikrogrid komunitas atau industri, ACE bisa digunakan sebagai dasar untuk menentukan tarif listrik bagi pengguna akhir.

B. Koordinasi Aliran Energi

Strategi yang diusulkan memungkinkan koordinasi aliran energi dalam sistem mikrogrid dengan memprioritaskan penggunaan sumber energi dari photovoltaik (PV). Tujuan dari strategi yang diusulkan ini menyuplai aliran energi tanpa terputus ke beban. Selain menggunakan sumber energi PV, mikrogrid juga menggunakan aliran energi baterai jika terjadi fluktuasi pada PV. Oleh karena itu sistem akan beroperasi sesuai dengan kondisi sebagai berikut.

a. Kondisi 1

- Kondisi awal ketika PV menghasilkan energi yang lebih besar dari permintaan beban ($P_{PV} > P_{beban}$)
- Kondisi ketika $SoC(t) < SoC_{max}$ maka terjadi kelebihan energi untuk disimpan pada penyimpanan energi ($P_E = P_{PV} - P_{beban}$)
- Kondisi ketika $SoC(t) = SoC_{max}$ maka terjadi kelebihan energi untuk menyuplai beban ($P_E = P_{beban}$)

b. Kondisi 2

- Kondisi awal ketika PV menghasilkan energi yang lebih kecil dari permintaan beban ($P_{PV} < P_{beban}$)
- Kondisi ketika $SoC(t) > SoC_{min}$ maka terjadi permintaan beban dipenuhi oleh produksi energi PV dan baterai ($P_{beban} = P_{PV} + P_{bat}$)
- Kondisi ketika $SoC(t) \leq SoC_{min}$ maka terjadi permintaan beban akan dipenuhi oleh produksi energi DG dan PV ($P_{beban} = P_{PV} + P_{DG}$)

c. Kondisi 3

- Kondisi tidak energi yang diproduksi PV ($P_{PV} = 0$)
- Kondisi ketika $SoC(t) > SoC_{min}$ maka kebutuhan beban akan dipenuhi oleh produksi energi yang disimpan dalam batera ($P_{beban} = P_{bat}$)
- Kondisi ketika $SoC(t) < SoC_{min}$ maka beban hanya akan disuplai oleh genset (DG). Kelebihan produksi genset akan digunakan untuk mengisi baterai. ($P_{DG} = P_{beban} + P_{bat}$)
- Namun ketika terjadi produksi PV lagi maka genset dimatikan ($SoC(t) = SoC_{max}$)

C. Algoritma Optimasi

Permasalahan optimasi yang dibahas dalam artikel ini adalah masalah nonlinier dan metode optimasi tradisional tidak cocok dalam menyelesaikan masalah semacam ini. Oleh karena itu digunakan serangkaian metodologi dan pendekatan komputasi untuk menangani masalah-masalah kompleks ini di dunia nyata. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh peneliti [21], [22] memakai jaringan saraf tiruan (ANN), peneliti [23] memakai logika fuzzy, peneliti [24] memakai algoritma pemrograman dinamis, algoritma PSO (*Particle Swarm Optimization*) dilakukan oleh peneliti [25]. Namun dari semua metode ini dianggap tidak ideal untuk semua kondisi ini. Masing-masing pendekatan optimasi memiliki kelebihan dan keterbatasannya. Dengan demikian, pilihan pendekatan optimasi terbaik tergantung pada permasalahan yang akan dianalisis untuk menemukan solusi dengan memaksimalkan atau meminimalkan fungsi yang akan dioptimalkan. Oleh karena itu algoritma yang akan digunakan dalam studi ini harus menyediakan manajemen cerdas dan optimal dari mikrogrid untuk manajemen cerdas dari beberapa sumber secara real-time, sehingga dapat menyuplai daya listrik yang tidak terputus ke beban dengan biaya yang lebih rendah. Pada artikel ini digunakan algoritma genetik (GA) dengan langkah sebagai berikut.

a. Definisikan variabel kontrol (genes)

- Untuk horizon T periode (24 jam, $\Delta t = 1$ jam):
- $P_{bat}(t)$: *day/night charge/discharge (continuous or discretized)*
- P_{beban_shed} : pengurangan beban *schedulable* (discrete % atau *on/off*)
- Jadwal pengisian EV: *start time / rate (discrete)*
- Penggunaan genset: *on/off* atau *output level*

b. Encoding kromosom

- Binary matrik *flattened*: panjang = $N * T$, tiap gen = 0/1.
- Untuk beban kontinyu, gunakan *real-valued* vektor representasi (daya tiap slot).
- Untuk urutan tugas yang tidak bisa diputus, *encode start-time* untuk tiap tugas (integer per tugas).

c. Fungsi *fitness* (*objective*)

Untuk minimisasi kombinasi biaya, emisi, dan penalti kenyamanan dengan fungsi scalar untuk *single-objective* GA sebagai berikut

$$J = \sum_{t=1}^T (C_{grid}(t) \cdot P_{grid}(t)) + \gamma_{em} \cdot E_T + \gamma_{PEN} \cdot PEN \quad (19)$$

Besarnya $P_{grid}(t)$ dihitung dari keseimbangan energi yang dihasilkan PV, genset, pelepasan energi baterai, dan penurunan beban. Sedangkan energi total dihitung berdasarkan emisi dari grid emisi faktor dikalikan

dengan daya grid dan ditambah dengan emisi genset. Untuk PEN merupakan penalty jika *constraint* dilanggar (SoC di luar batas, *unmet load*, *comfort violation*). Gunakan penalti tinggi untuk menjamin *feasibility*.

d. Constraint handling

- Hard *constraints*: Implement repair operator yang menyesuaikan solusi (mis. clipping SoC ke range).
- Soft constraints: penalti di fitness.
- Teknik lain: infeasible solutions dihapus atau diberi fitness sangat buruk.

e. Operator GA

- Selection: tournament atau roulette.
- Crossover: SBX (simulated binary crossover) untuk real-valued, uniform atau one-point untuk discrete.
- Mutation: gaussian perturbation untuk real, bit-flip untuk biner.
- Elitism: simpan top-k individu tiap generasi.

f. Hybrid / Enhancements

- Local search (hill-climb) untuk memperbaiki individu terbaik.
- Co-evolution untuk skenario suhu/permintaan berbeda.
- GA + Model Predictive Control (MPC): GA untuk rencana tinggi-level; MPC untuk kontrol real-time.

D. Pseudocode GA

Initialize population Pop (size N)

For each individual in Pop:

Decode → schedule

Repair(schedule)

Compute J and penalty V

fitness = $1 / (J + \lambda * V + \epsilon)$

For gen = 1..max_gen:

NewPop = []

Preserve best k elitists

While len(NewPop) < N - k:

parent1 = tournament_select(Pop)

parent2 = tournament_select(Pop)

if rand < crossover_rate:

child1, child2 = crossover(parent1, parent2)

else:

child1, child2 = parent1, parent2

mutate(child1); mutate(child2)

repair(child1); repair(child2)

evaluate(child1); evaluate(child2)

NewPop.append(child1); NewPop.append(child2)

Pop = NewPop + elitists

Optionally: adjust mutation rate if stagnation

Return best individual (lowest J, feasible)

%% Parameters - GA

popSize = 120;

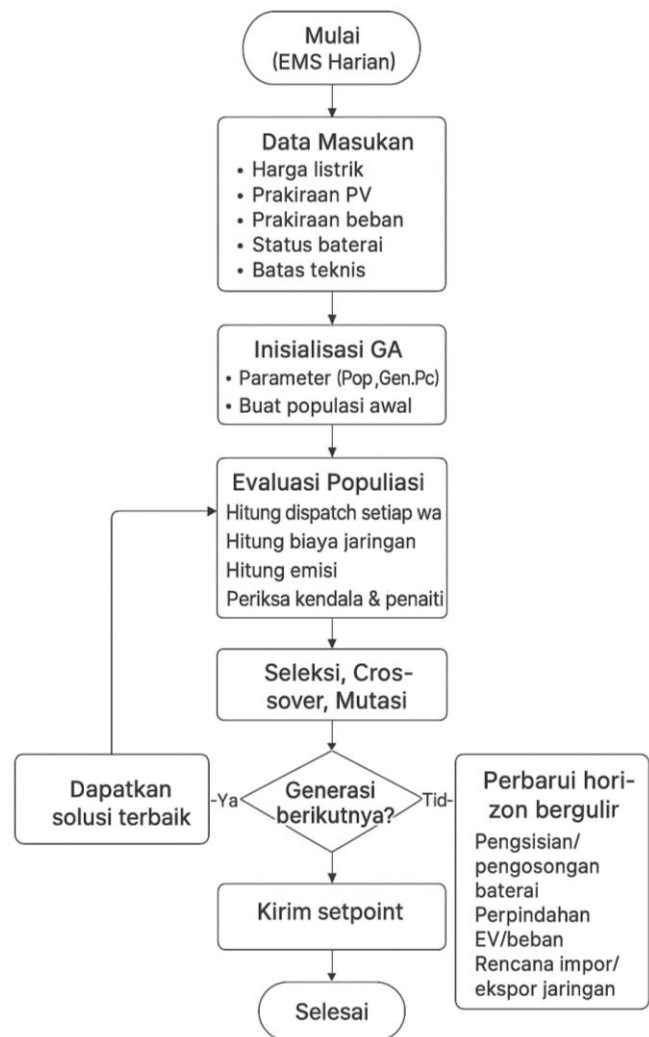
nGen = 400;

crossoverRate = 0.85;

mutationRate = 0.08;

eliteCount = 2; % keep best individuals

tourSize = 3;



Gambar. 3. Flowchart manajemen energi dengan algoritma genetik.

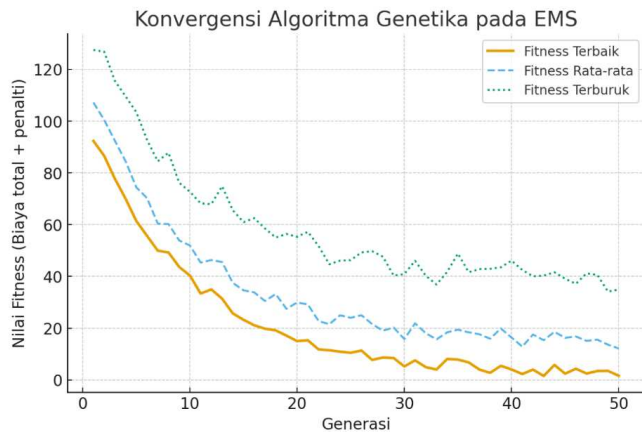
Selanjutnya gambar 3 memperlihatkan *flowchart* dalam manajemen energi mikrogrid dengan strategi optimasi memakai algoritma genetik. Manajemen energi ini untuk mengatur konsumsi dan/atau penyimpanan energi mikrogrid untuk tujuan sebagai berikut:

- Minimalkan biaya listrik (tarif waktu-nyata / ToU)
 - Minimalkan puncak daya (*peak shaving*)
 - Maksimalkan pemakaian energi terbarukan (PV)
 - Minimalkan emisi (jika ada data emisi/karbon)
- Biasanya ada batasan kenyamanan pengguna (jadwal minimal/ maksimal untuk perangkat), kapasitas baterai, dan limit jaringan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

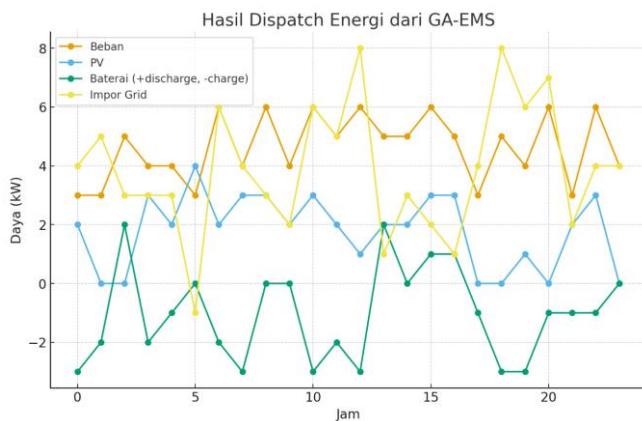
Hasil optimasi algoritma genetik (GA) dengan MATLAB diperlihatkan pada gambar 4. Grafik konvergensi pada sumbu X (generasi) menunjukkan iterasi GA dari awal (generasi 1) hingga akhir (generasi 50). Se-

dangkan pada sumbu Y (nilai *fitness*) merepresentasikan total biaya sistem energi dan penalti *constraint*, semakin rendah nilainya, semakin baik solusi yang dihasilkan.



Gambar. 4. Grafik konvergensi manajemen energi.

Garis *fitness* Terbaik menurun dari generasi awal ke generasi akhir. Hal ini menunjukkan bahwa GA berhasil menemukan solusi yang lebih baik seiring evolusi. Garis *fitness* rata-rata juga ikut menurun sehingga populasi secara keseluruhan membaik, bukan hanya individu terbaik. Garis *fitness* Terburuk tetap lebih tinggi. Hal ini menunjukkan adanya solusi buruk di populasi, tetapi tidak mempengaruhi hasil akhir. Dengan GA maka konvergen dengan baik menjadi solusi semakin optimal. Biaya lebih kecil, penalti *constraint* berkurang ketika generasi bertambah.

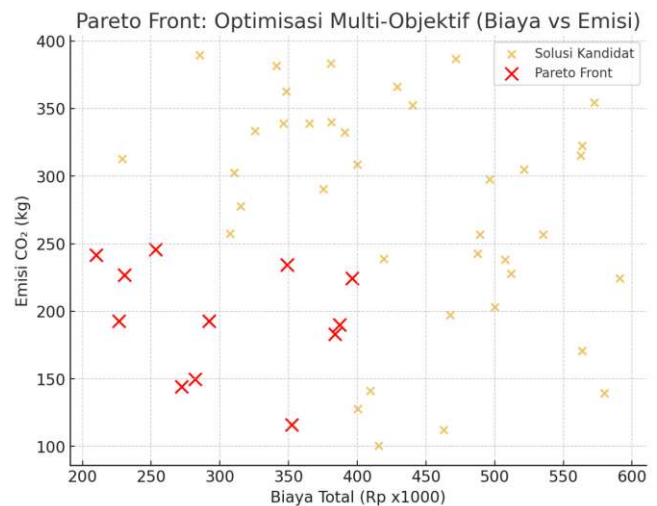


Gambar. 5. Grafik dispatch energi pada mikrogrid.

Gambar 5 memperlihatkan *dispatch* energi pada mikrogrid. Pada sumbu X dari jam 0–23 atau selama periode waktu sehari 24 jam. Sedangkan pada sumbu Y menyatakan daya dalam kW yang menunjukkan besaran daya pada setiap sumber/saluran energi. Pada grafik gambar 5 terlihat beban dengan garis warna hitam menyatakan kebutuhan listrik total rumah/sistem, sedangkan PV dengan garis warna oranye menyatakan produksi energi surya. Pada baterai dengan operasi *discharge* dan *charge* dengan garis warna biru menyatakan keputusan GA. Ketika nilai positif maka baterai *discharge* (menyuplai beban/grid), dan pada saat nilai

negatif maka baterai *charge* (menyimpan energi. Impor Grid dengan garis warna hijau terjadi ketika energi yang diambil dari grid untuk memenuhi kekurangan.

Pada kondisi *dispatch* ini ketika PV memproduksi energi tinggi saat siang maka baterai sering *charge* (nilai negatif) untuk menyimpan surplus energi. Saat beban tinggi di malam hari dan PV nol maka baterai *discharge* (nilai positif) untuk mengurangi impor dari grid. Energi grid hanya dipakai ketika kebutuhan beban tidak bisa dipenuhi PV dan baterai. Hal ini membuat biaya total lebih rendah dibanding tanpa optimisasi.

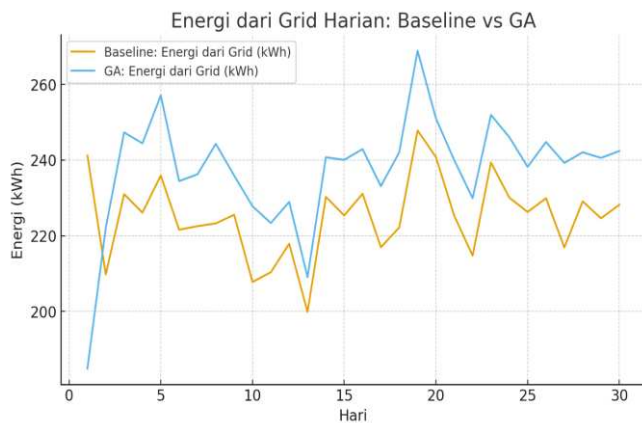


Gambar. 6. Grafik optimisasi multi-objektif

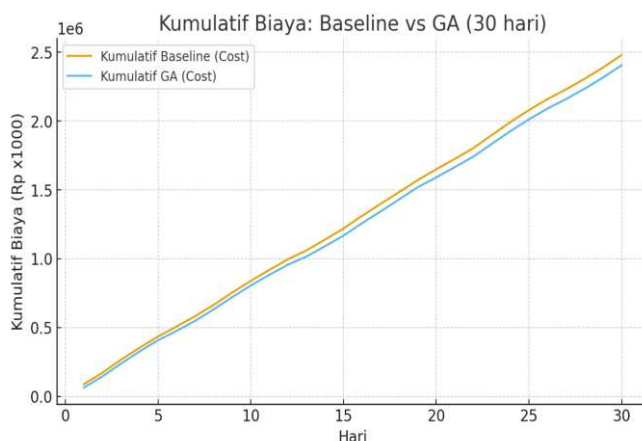
Gambar 6 memperlihatkan grafik *Pareto Front* dari optimisasi multi-objektif dengan GA, yang menampilkan *trade-off* antara biaya total dan emisi CO₂. Semakin ke kiri-bawah maka solusi lebih optimal (biaya rendah & emisi rendah), tapi biasanya ada kompromi. Pada sumbu X menyatakan Biaya Total (Rp ×1000) yang menunjukkan total biaya operasional sistem energi (pembelian listrik dari grid, penggunaan genset, dsb.). Sedangkan sumbu Y menyatakan Emisi CO₂ (kg) yang menunjukkan total emisi karbon yang dihasilkan (dari grid dengan faktor emisi, atau genset berbahan bakar fosil). Titik biru (Solusi Kandidat) menyatakan berbagai solusi yang dihasilkan GA sepanjang evolusi. Titik merah (*Pareto Front*) menyatakan himpunan solusi tidak terdominasi: tidak ada solusi lain yang lebih baik sekaligus di biaya dan emisi.

Pada grafik tersebut merupakan *trade-off* biaya terhadap emisi. Solusi dengan biaya rendah cenderung memiliki emisi lebih tinggi, karena banyak mengandalkan grid/genset murah tetapi intensif karbon. Solusi dengan emisi rendah biasanya lebih mahal, karena lebih sering memaksa penggunaan baterai atau sumber bersih yang butuh investasi energi tambahan. Dalam hal ini tidak ada solusi yang optimal di kedua sisi secara bersamaan dan harus kompromi. Sedangkan *Pareto Front* sebagai batas optimal dengan garis/*cluster* merah menunjukkan batas efisiensi *Pareto*. Jika memilih titik di luar *front* (titik biru), selalu ada solusi lain di *front* yang

lebih baik (misalnya sama-sama murah tapi lebih rendah emisi, atau sama-sama rendah emisi tapi lebih murah). Pada pengambilan keputusan manajemen energi pengguna bisa memilih titik sesuai kebijakan, yaitu jika prioritas hemat biaya, pilih solusi di sisi kiri (biaya minimal meski emisi agak tinggi), jika prioritas lingkungan, pilih solusi di sisi bawah (emisi minimal walau biaya lebih tinggi), dan jika ingin kompromi, pilih titik tengah front maka biaya dan emisi keduanya moderat. Gambar 7 dan 8 memperlihatkan garfik energi grid dan kumulatif biaya.



Gambar. 7. Grafik energi grid



Gambar. 8. Grafik kumulatif biaya.

Gambar 7 merupakan grafik energi dari grid harian dengan *baseline* dengan GA. Pada sumbu X menyatakan hari (1–30), sedangkan sumbu Y merupakan energi dari grid (kWh per hari). Garis biru (*baseline*) adalah total energi yang diimpor dari grid setiap hari tanpa optimisasi, sedangkan garis oranye (GA) adalah energi grid setelah GA mengatur baterai. Perbedaan energi grid tidak sebesar perbedaan biaya. GA menurunkan energi grid hanya sedikit (sekitar 1–2%). Hal ini menunjukkan bahwa penghematan biaya berasal dari *shifting* waktu (menggunakan grid pada jam harga murah dan baterai saat harga mahal), bukan dari berkurangnya total energi yang diimpor. Jadi fokus optimisasi GA di sini lebih ke *time-of-use arbitrage* dibanding sekadar mengurangi kWh grid.

Pada gambar 8 memperlihatkan grafik kumulatif biaya (30 hari). Pada sumbu X menyatakan hari (1–30), sedangkan sumbu Y menyatakan kumulatif biaya (Rp $\times 1000$). Garis warna biru (*baseline*) merupakan akumulasi biaya operasi dari hari 1 sampai hari ke-30. Garis warna oranye (GA) merupakan akumulasi biaya operasi hasil optimisasi GA. Seiring waktu, kedua garis sama-sama naik (karena biaya bertambah tiap hari). Namun, garis GA tumbuh lebih lambat dan jarak antar garis semakin besar maka penghematan biaya menumpuk dari hari ke hari. Setelah 30 hari, selisih kumulatif mencapai $\approx$ Rp 97 juta (dari total *baseline* $\approx$ Rp 1,26 miliar maka hemat $\approx$ 7,7%). Dalam hal ini semakin lama periode operasi, semakin signifikan dampak optimisasi GA terhadap total biaya. Untuk penyesuaian parameter GA untuk konvergensi dan *quality* sebagai berikut

- *Population size*: 100–300
- *Generations*: 200–500 (atau sampai konvergensi)
- *Crossover rate*: 0.7–0.9
- *Mutation rate*: 0.05–0.2 (lebih rendah jika *encoding real-valued*)
- *Elitism*: simpan top 1–5% tiap generasi
- *Runs*: lakukan 10–30 run untuk statistik (*mean*, *std*) hasil terbaik

Untuk unit output biaya dihitung dalam Rp $\times 1000$ (1 = 1.000 Rupiah). Maka total biaya (*baseline* tanpa optimisasi) diperoleh biaya sebesar Rp. 1.261.215 (Rp $\times 1000$) atau Rp. 1.261.215.000. Sedangkan total biaya (GA-optimized) diperoleh Rp. 1.164.171 (Rp $\times 1000$) atau Rp. 1.164.171.000. Untuk penghematan *absolut* yaitu 97.043 (Rp $\times 1000$) atau Rp. 97.043.000 selama 30 hari. Oleh karena itu diperoleh penghematan relatif (biaya) sebesar $\sim 7.69\%$. Untuk Energi dan emisi:

- Energi dari grid (*baseline*) $\approx$ 3.299 kWh (total selama 30 hari).
- Energi dari grid (GA) $\approx$ 3.259 kWh.
- Pengurangan energi dari grid $\approx$ 40.2 kWh atau $\sim 1.22\%$ pengurangan.
- Emisi (*proxy*) turun dari $\approx$ 1.649 kgCO₂ menjadi 1.629 kgCO₂ (pengurangan $\approx 1.22\%$).

Sedangkan untuk kompromi (*Knee*)

- Biaya $\approx$ 272.18 (Rp $\times 1000$)
- Emisi $\approx$ 144.14 kgCO₂
- Representasi *trade-off*: biaya dan emisi keduanya berada di level menengah (*Cost_and_worst* $\approx$ 68.7%, *Emission_and_worst* $\approx$ 58.7%).

Ketika menggunakan baterai dengan kapasitas lain, maka terjadi perubahan grafik simulasi. Pada artikel ini digunakan baterai dengan kapasitas 10000 Ah $\times$ 24 V = 240.0 kWh.

- Dibuat asumsi $P_{batt_max} = 0.25$ °C atau $P_{max} \approx 60.0$ kW (konservatif).
- Efisiensi *charge/discharge*: $\eta_c = \eta_d = 95\%$.
- SoC min/max: 20% / 90% (SoC_{min} = 48 kWh, SoC_{max} = 216 kWh).

- Simulasi memakai data input sintetis. Unit biaya tetap dalam Rp $\times 1000$ (sama style simulasi sebelumnya).

Oleh karena itu diperoleh data biaya sebagai berikut:

- Total cost (*baseline*) = 2.480.022 (Rp $\times 1000$) $\approx$ 2.480.022.000 Rp
- Total cost (GA-optimized) = 2.405.364 (Rp $\times 1000$) $\approx$ 2.405.364.000 Rp
- Penghematan *absolut* = 74.658 (Rp $\times 1000$) $\approx$ 74.658.000 Rp
- Penghematan relatif (biaya) = $\sim 3.01\%$

Namun energi/ emisi naik dengan biaya turun.

- Energi dari grid (*baseline*) = 6.751.608 kWh
- Energi dari grid (GA) = 7.129.912 kWh bertambah $\sim 5.60\%$ (negatif terhadap pengurangan energi)
- Emisi *proxy* naik sebanding ($+5.60\%$) karena peningkatan kWh grid (sintetik faktor emisi = 0.5 kg/kWh)
- *Battery cycle proxy (sum)* ≈ 29.31 (*proxy* total *throughput* / kapasitas, menunjukkan pemakaian siklus sepanjang simulasi)

TABEL I
DATA OPTIMASI 24 JAM

Jam	Beban (kW)	PV (kW)	Baterai (kW)	Grid (kW)	SOC (%)
1	80	10	-20	90	50
2	75	8	-15	82	52
3	70	5	-10	75	54
4	65	2	-5	68	55
5	60	0	0	60	55
6	90	20	0	70	55
7	150	80	10	40	56
8	180	150	20	0	58
9	200	250	30	-80	61
10	210	260	40	-90	65
11	220	270	30	-80	68
12	230	280	20	-70	70
13	225	260	10	-45	71
14	210	240	0	-30	71
15	200	200	-10	10	70
16	180	150	-20	20	68
17	195	100	-30	85	65
18	205	60	-20	145	63
19	220	30	-10	200	62
20	210	15	0	195	62
21	180	8	10	162	63
22	150	5	5	5	5
23	100	2	2	2	2
24	90	1	1	1	1

Skenario pada studi ini dilakukan selama 24 jam, dengan data yang terlihat pada Tabel 1. Dari simulasi 30-hari, GA berhasil mengurangi biaya operasi $\sim 3-8\%$ dibanding *baseline* (tergantung skenario dan parameter). Penghematan terutama berasal dari *time-shifting* (mengisi baterai saat harga murah/PV surplus, *discharge* saat harga mahal). Optimisasi yang hanya mengejar biaya murah sering meningkatkan energi dari grid (karena *charging* saat harga rendah) dan emisi bisa naik. Pemakaian baterai lebih intensif akan mempercepat degradasi jika tidak diperhitungkan biaya siklus. Manajemen energi harus menyeimbangkan ketiga faktor: biaya, keberlanjutan, keandalan.

V. KESIMPULAN

Manajemen energi pada mikrogrid dengan optimisasi algoritma genetik (GA) terbukti mampu menekan biaya operasi dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber energi terbarukan. Namun, pendekatan ini harus diimbangi dengan pengelolaan emisi, degradasi baterai, dan keandalan sistem agar solusi yang diperoleh benar-benar optimal, berkelanjutan, dan layak diterapkan dalam jangka panjang. Algoritma genetik (GA) efektif menurunkan biaya harian dengan memanfaatkan pola harga (*charge* saat murah, *discharge* saat mahal). Energi grid tidak banyak berkurang, tapi biaya turun signifikan karena shifting waktu pembelian listrik. Akumulasi 30 hari menunjukkan dampak finansial yang nyata (hemat $\sim 7,7\%$). Penghematan biaya $\sim 7.7\%$ dalam 30 hari menunjukkan GA berhasil menjadwalkan pengisian dan pengosongan baterai untuk menurunkan pembelian listrik di jam harga tinggi. Pengurangan energi dari grid relatif kecil ($\sim 1.2\%$), karena model sintetis memasukkan PV yang menurunkan kebutuhan grid secara otomatis; GA memindahkan beban dan menggunakan baterai untuk puncak harga, sehingga penghematan biaya lebih karena memindahkan konsumsi ke jam harga rendah, bukan selalu mengurangi total kWh yang diambil. Biaya degradasi baterai dimasukkan sebagai faktor (*alpha_deg*) sehingga GA tidak *over-cycle* baterai secara berlebihan, namun *battery throughput* tetap meningkat (biaya jangka panjang perlu dihitung lebih teliti). Variasi harian seperti beberapa hari gain biaya lebih besar (hari dengan harga puncak tinggi), beberapa hari pemanfaatan baterai terbatas terlihat pada plot harian.

Pengembangan sistem manajemen energi pada mikrogrid dirancang secara bertahap agar dapat memberikan manfaat nyata, mulai dari skala simulasi hingga implementasi lapangan yang siap dioperasikan secara komersial. Tahap Awal yaitu *Proof of Concept* (PoC), selanjutnya tahap Integrasi Data *Real-Time*, tahap Multi-Objektif dan Penambahan Kendala, tahap Implementasi Lapangan (*Pilot Project*), tahap optimalisasi lanjut, dan tahap komersialisasi dan skalabilitas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Torkan, R., Ilinca, A., & Ghorbanzadeh, "A genetic algorithm optimization approach for smart energy management of microgrids", *Renewable Energy*, vol. 197, hal. 852–863, Sep. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.07.055>.
- [2] Jamal, S., Pasupuleti, J., & Ekanayake, J., "A rule-based energy management system for hybrid renewable energy sources with battery bank optimized by genetic algorithm optimization", *Scientific Reports*, vol. 14, no.1, hal. 1–17, Feb. 2024, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54333-0>.
- [3] Cavus, M., & Allahham, A., "Enhanced microgrid control through Genetic Predictive Control: integrating genetic algorithms with model predictive control

- for improved non-linearity and non-convexity handling”, *Energies*, vol. 17, no. 17, hal. 1–20, Sep. 2024, <https://doi.org/10.3390/en17174458>.
- [4] Dashtdar, M., Flah, A., Hosseinimoghadam, S. M. S., Kotb, H., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M., “Optimal operation of microgrids with demand-side management based on a combination of genetic algorithm and artificial bee colony”, *Sustainability*, vol. 14, no. 11, hal. 1–26, May. 2022, <https://doi.org/10.3390/su14116759>.
- [5] Majeed, M. A., Phichisawat, S., Asghar, F., & Hussan, U., “Optimal energy management system for grid-tied microgrid: an improved adaptive genetic algorithm”, *IEEE Access*, vol. 11, hal. 117351–117361, Oct. 2023, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3326505>.
- [6] Huang, S., Liu, H., Wu, L., Zhou, F., Miao, W., Li, Y., & Gao, J., “Economic optimisation of microgrid based on improved quantum genetic algorithm”, *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, hal. 1167–1174, Dec. 2019, <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8849>.
- [7] Sarda, J. S., Lee, K., Patel, H., et al, “Energy management system of microgrid using optimization approach”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 9, hal. 280–284, Jan. 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.049>.
- [8] Raghavan, A., Maan, P., & Shenoy, A. K., “Optimization of day-ahead energy storage system scheduling in microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization”, *IEEE Access*, vol. 8, hal. 173068–173078, Jan. 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025673>.
- [9] Cheng, Y., Zhang, J., Al Shurafa, M., Liu, D., Zhao, Y., Ding, C., Niu, J., “An improved multiple adaptive neuro-fuzzy inference system based on genetic algorithm for energy management system of island microgrid”, *Scientific Reports*, vol. 15, hal. 1–23, May. 2025, <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98665-x>.
- [10] Ibrahim, A.-W., Xu, J., Al-Shamma’a, A. A., Farh, H. M. H., Aboudrar, I., Oubail, Y., Alaql, F., & Alfraidi, W., “Optimized energy management strategy for an autonomous DC microgrid integrating PV/Wind/Battery/Diesel-Based hybrid PSO-GA-LADRC Through SAPF”, *Technologies*, vol. 12, no. 11, hal. 1–34, Nov. 2024, <https://doi.org/10.3390/technologies12110226>.
- [11] Shafiullah, M. et al, “Review of recent developments in microgrid energy management strategies”, *Sustainability*, vol. 14, no. 22, hal. 1–30, Nov. 2022, <https://doi.org/10.3390/su142214794>.
- [12] Wynn S., Boonraksa T., Boonraksa P., Pinthurat W., Marungsri B., “Decentralized Energy Management System in Microgrid Considering Uncertainty and Demand Response”, *Electron*, vol. 12, no. 1, hal. 1–19, Jan. 2023, <https://doi.org/10.3390/electronics12010237>.
- [13] Rizky W. A. S., Dedi. N., “Analisis, Integrasi PLTB Pada Stabilitas Frekuensi Dalam Jaringan Kelistrikan Sulbagsel Berdasarkan Rate of Change of Frequency”, *Jurnal ElektriKa* vol. 16. no. 2, hal. 84 – 92, Okt. 2024, <https://doi.org/10.26623/elektriKa.v16i2.10342>
- [14] Domenech B., Ferrer-Martí L., García F., Hidalgo G., Pastor R., Ponsich A., “Optimizing PV Microgrid Isolated Electrification Projects-A Case Study in Ecuador”, *Mathematics*, vol. 10, no. 8, hal. 1–24, Apr. 2022, <https://doi.org/10.3390/math10081226>
- [15] Zhang W., Maleki A., Rosen M., Liu J., “Optimization with a simulated annealing algorithm of a hybrid system for renewable energy including battery and hydrogen storage”, *Energy*, vol. 163, hal. 191–207, Nov. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.112>
- [16] Hidalgo-Leon R., “Feasibility Study for Off-Grid Hybrid Power Systems Considering an Energy Efficiency Initiative for an Island in Ecuador”, *Energies*, vol. 15, no. 5, hal. 1–25, Feb. 2022, <https://doi.org/10.3390/en15051776>
- [17] Lagouir M., Badri A., Sayouti Y., “Multi-Objective Optimal Dispatching and Operation Control of a Grid Connected Microgrid Considering Power Loss of Conversion Devices”, *J. Sustain. Dev. Energy, Water Environ. Syst.*, vol. 10, no. 3, hal. 1–22, Aug. 2022, <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0404>
- [18] Hao J., Yang Y., Xu C., Du X., “A comprehensive review of planning, modeling, optimization, and control of distributed energy systems”, *Carbon Neutrality*, vol. 1, no. 1, hal. 1–29, Aug. 2022, <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00029-1>
- [19] Shami T., El-Saleh A., Alswaiti M., Al-Tashi Q., Summakieh M., Mirjalili S., “Particle Swarm Optimization: A Comprehensive Survey”, *IEEE Access*, vol. 10, hal. 10031–10061, Jan.2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>
- [20] Ortiz L., Orizondo R., Águila A., González J., López G., Isaac I., “Hybrid AC/DC microgrid test system simulation: grid-connected mode”, *Heliyon*, vol. 5, no. 12, hal. 1–21, Dec. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02862>
- [21] Medina-Santana A., Cárdenas-Barrón L., “Optimal Design of Hybrid Renewable Energy Systems Considering Weather Forecasting Using Recurrent Neural Network”, *Energies*, vol. 15, no. 23, hal. 1–28, Nov. 2022, <https://doi.org/10.3390/en15239045>.
- [22] Habib M. U. et al, “Wind Powered Agriculture: Enhancing Crop Production And Economic Prosperity In Arid Regions”, *Jurnal ElektriKa*, vol. 16, no. 1, hal. 10–19, Apr. 2024, <https://doi.org/10.26623/elektriKa.v16i1.8999>
- [23] Ahmed. O. et al, “Energy Management Solution for Islanding Based on a Dynamic Neuro-Fuzzy-Optical Microscope Algorithm”, *IEEE Access*, vol. 13, hal. 162256 –162272, Sep. 2025, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3610524>
- [24] Ricardo M. V. et al, “Energy Management of a Building Cooling System With Thermal Storage: An Approximate Dynamic Programming Solution”, *IEEE Access*, vol. 14, hal. 619 – 633, Apr. 2017, <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2635109>

- [25] Hossam. A. G., “Optimal Planning of Nuclear-Renewable Micro-Hybrid Energy System by Particle Swarm Optimization”, *IEEE Access*, vol. 8, hal. 181049 –181073, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3027524>.