

Optimasi Biaya Modal Awal Instalasi Sistem Pembangkit Energi Terbatukan Hibrid Fotovoltaik Dan Turbin Angin

Fadhlan Adha¹; Lutfi Milenia Ramadhan¹; Herminarto Nugroho^{1)}*

1. Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Pertamina, Jl. Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan, DKI Jakarta 12220, Indonesia

**)Email: herminarto.nugroho@universitaspertamina.ac.id*

Received: 06 Agustus 2021 | Accepted: 23 Januari 2024 | Published: 29 Januari 2024

ABSTRACT

The use of energy that continues to increase from time to time cannot be stopped so that the use of electrical energy cannot only rely on fossil energy. Utilization of wind energy and solar energy in a hybrid can be an option to be developed. However, the cost of developing renewable energy is still very high when compared to conventional energy. Therefore, several methods are needed to design so that the initial capital costs of developing renewable energy can be minimized while still meeting needs. There are several methods that can be used, namely Genetic Algorithm (GA) and find the minimum of constrained nonlinear multivariable function (fmincon). From these two methods, it was found that by using fmincon, optimization results were obtained that were faster than GA, but at fmincon it was necessary to recalculate costs manually when the number of wind turbines and the number of photovoltaics that meet the constraints were found. Because, in this case the number of wind turbines and the number of fotovoltaik are units in the form of integers. Thus, the fmincon method does not have the ability to create integer constraints, but the GA method does. For both the GA and the fmincon methods, the optimization results for the amount of photovoltaic, wind turbines and initial capital costs will be equally accurate.

Keywords: *renewable energy, fmincon, photovoltaic, genetic algorithm, wind turbine*

ABSTRAK

Penggunaan energi yang terus meningkat dari waktu ke waktu tidak dapat dibendung sehingga penggunaan energi listrik tidak dapat hanya mengandalkan energi fosil saja. Pemanfaatan energi angin dan energi surya secara hibrid dapat menjadi salah satu pilihan untuk dikembangkan. Namun, biaya pengembangan energi terbarukan masih sangat tinggi jika dibandingkan dengan energi konvensional. Oleh sebab itu, diperlukan beberapa metode untuk mendesain agar biaya modal awal pengembangan energi terbarukan dapat diminimalkan namun tetap memenuhi kebutuhan. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan yaitu Genetic Algorithm (GA) dan find minimum of constrained nonlinear multivariable function (fmincon). Dari dua metode tersebut didapati bahwa dengan menggunakan fmincon diperoleh hasil optimasi yang lebih cepat dibandingkan dengan GA namun pada fmincon perlu dilakukan perhitungan kembali biaya secara manual saat ditemukan jumlah turbin angin dan jumlah fotovoltaik yang memenuhi constraint. Sebab, pada kasus ini jumlah turbin angin dan jumlah fotovoltaik merupakan satuan yang berbentuk bilangan bulat. Sehingga, metode fmincon tidak memiliki kemampuan untuk membuat integer constraint namun metode GA mampu. Baik metode GA maupun fmincon, akan diperoleh hasil optimasi jumlah fotovoltaik, turbin angin, dan biaya modal awal yang sama akuratnya.

Kata kunci: *energi terbarukan, fmincon, fotovoltaik; genetic algorithm, turbin angin*

1. PENDAHULUAN

Populasi penduduk dunia pasti akan terus mengalami pertumbuhan seiring berjalannya waktu. Sebagai contoh, populasi negara-negara ASEAN diperkirakan akan mencapai 768 juta penduduk pada tahun 2040 [1], [2], [3]. Pertumbuhan demografis ini akan berimplikasi pada sektor energi. Akan tetapi pada 2018 lalu, sektor energi berupa listrik ini menjadi kontributor Greenhouse Gas (GHG) kedua, yaitu sebesar 711.98 Mt dari 3.25 Gt CO₂e atau berkontribusi sebesar 21.91% [4]. Berdasarkan prediksi dari apa yang tertulis dalam skenario Baseline oleh ASEAN Energy Outlook 6 (AEO6), emisi energy-related GHG akan mencapai 2228 Mt CO₂e pada tahun 2025 [2], [3]. Pada tahun 2025, sektor listrik menyumbang 38% emisi GHG. Sehingga, sektor listrik menjadi kontributor terbesar GHG di ASEAN. Dengan demikian, Semakin banyak jumlah penduduk akan berakibat pada peningkatan jumlah energi yang mana akan meningkatkan emisi GHG yang diberikan oleh sektor listrik. Maka, diperlukan solusi seperti Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk meminimalisir dampak lingkungan.

Salah satu contoh dari energi terbarukan adalah energi angin dan energi surya. Energi ini merupakan energi yang ramah lingkungan dan dapat menjadi salah satu solusi untuk memainkan peranan penting energi di masa depan. Energi angin dan energi surya memiliki potensi yang melimpah yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi listrik dengan bantuan turbin angin dan fotovoltaik. Dengan mempertimbangkan energi yang dibangkitkan dan permintaan daya selama periode 24 jam maka dapat ditentukan kapasitas sistem yang paling sesuai dengan permintaan beban. Akan tetapi, penggunaan EBT ini masih membutuhkan biaya yang tinggi untuk diaplikasikan. Hal ini yang menyebabkan produksi listrik dari cara konvensional lebih mampu bersaing daripada melalui cara yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, dalam keadaan nyata energi terbarukan masih memiliki fluktuasi daya yang dibangkitkan karena bergantung terhadap kondisi cuaca dan alam sehingga penggunaan sistem secara hibrid sangat diperlukan. Oleh karena itu, dibutuhkan upaya efisiensi EBT untuk menyeimbangi antara biaya produksi yang ekonomis namun tetap memperhatikan dampak lingkungannya. Hal ini dapat dilakukan melalui hibridisasi antara fotovoltaik dengan turbin angin. Dari berbagai penelitian membuktikan bahwa penggunaan sistem secara hibrid dapat mengurangi biaya operasi dan juga peningkatan efisiensi sistem [5], [6][7].

Dalam menentukan masing-masing komponen yang terdapat pada sistem seperti jumlah turbin angin, photovoltaic (PV) akan ditentukan menggunakan metode optimasi yaitu genetic algorithm [8], [9], [10] dan fmincon [11], [12]. Dengan menggunakan metode tersebut dapat diketahui jumlah turbin angin dan photovoltaic untuk menghasilkan biaya modal awal seminimal mungkin dalam membentuk sistem yang hibrid.

2. METODE PENELITIAN

Rata-rata terbangkitnya energi listrik dan daya beban ditunjukkan oleh Tabel 1 [13]. Pembangkitan Hibrida dari Turbin angin dan fotovoltaik yang masing-masing berjumlah satu menghasilkan rata-rata keluaran dari fotovoltaik/PV (P_{PV}) dan turbin angin/WT (P_{WT}) dalam rentang waktu satu hari (24 jam) seperti pada tabel. Selain itu, diketahui energi listrik yang dibutuhkan (P_{load}). Sehingga, diperoleh perbedaan daya yang terbangkitkan dengan daya yang dibutuhkan pada waktu tertentu ($\Delta P(t)$).

Tabel 1. Data Daya Rata-Rata yang Dibangkitkan dan Daya Beban untuk Setiap Jam dalam Satu Hari (kWh) Sebelum Dioptimasi

Waktu (t)	P_{load} (t)	$P_{WT}(t)$	PPV (t)	$\Delta P(t)$
1	1.39	0.58	0	-0.81

2	1.25	0.49	0	-0.76
3	1.19	0.48	0	-0.71
4	1.22	0.53	0	-0.69
5	1.34	0.47	0	-0.87
6	1.8	0.51	0	-1.29
7	2.66	0.46	0.0016	-2.198
8	2.9	0.46	0.0034	-2.437
9	2.52	0.61	0.0103	-1.899
10	2.21	0.76	0.0246	-1.425
11	2.05	1.1	0.0317	-0.918
12	1.94	1.53	0.0353	-0.375
13	1.82	1.67	0.0366	-0.113
14	1.71	1.89	0.0374	0..217
15	1.62	2.43	0.0368	0.847
16	1.65	2.45	0.0335	0.833
17	1.87	1.91	0.0242	0.064
18	2.29	1.76	0.0134	-0.517
19	2.58	1.57	0.0056	-1.004
20	2.6	1.16	0.0015	-1.438
21	2.54	0.87	0	-1.67
22	2.49	0.76	0	-1.73
23	2.28	0.74	0	-1.54
24	1.79	0.7	0	-1.09
Total	47.71	25.89	0.2959	-21.523

Berdasarkan Tabel 1, dihasilkan ΔP sebesar -0.375 kWh pada saat $t = 12$, pada saat $t = 20$ dihasilkan ΔP sebesar -1.438 kWh, dan seterusnya. Dalam waktu 24 jam, semua waktu menunjukkan nilai yang negatif. Hal ini menunjukkan bahwa, daya yang terbangkitkan mulai $t = 1$ hingga $t = 24$ selalu kurang dari jumlah daya yang dibutuhkan.

Biaya modal awal dapat diketahui melalui perhitungan pada Persamaan 1 sebagai fungsi objektif pada pengujian [13]. Persamaan tersebut adalah nonlinear.

$$C_{ICC} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} [N_{PV}C_{PV} + N_{WT}C_{WT} + C_{bu}] \quad (1)$$

Adapun parameter dan nilainya ditunjukkan oleh Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Parameter dan Nilai yang Digunakan

Simbol	Parameter	Nilai	Satuan
C_{ICC}	Biaya Modal Awal	-	\$
i	Bunga Tahunan	6	%
n	Umur Sistem	20	tahun
C_{PV}	Biaya Solar Panel	350	\$
C_{WT}	Biaya Turbin Angin	20000	\$
C_{bu}	Biaya Generator Cadangan	2000	\$

N_{PV}	Jumlah Solar Panel	-	unit
N_{WT}	Jumlah Turbin Angin	-	unit

Dalam mencari hasil optimasi biaya modal awal, dibutuhkan *constraint* yang digunakan untuk membatasi lingkup permasalahan yang dimiliki agar semakin akurat. Adapun *constraint* tersebut ditunjukkan oleh Persamaan 2, Persamaan 3, dan Persamaan 4. *Constraint* tersebut adalah linear dan berbentuk pertidaksamaan.

$$N_{WT} \geq 1 \quad (2)$$

$$N_{PV} \geq 1 \quad (3)$$

$$\Delta P(t) \geq 0 \quad (4)$$

N_{WT} dan N_{PV} merupakan *design variable* pada pengujian ini (Nvars).

Metode optimasi yang dipilih penulis dalam menyelesaikan permasalahan diatas yaitu *fmincon algorithm* dan *Genetic Algorithm*. Kedua metode ini digunakan agar hasil optimasi dapat dibandingkan baik mengenai performa dari setiap metode yang digunakan dan juga bertujuan untuk memvalidasi hasil optimasi yang diperoleh.

2.1. Genetic Algorithm (GA)

Simulasi yang menggunakan metode GA memiliki kelebihan seperti menyelesaikan permasalahan yang kompleks dan bersifat paralelisme [14], [15]. Selain itu, metode GA ini mampu diterapkan pada berbagai tipe optimasi, yaitu apakah *objective function*-nya stasioner atau tidak stasioner, linear atau tidak linear, kontinyu atau tidak kontinyu, atau bahkan permasalahan yang memiliki banyak *noise* [16]. Berdasarkan keutamaan tersebut, dapat diketahui bahwa metode ini begitu menjanjikan. Metode ini mampu mempertimbangkan populasinya, bukan hanya pada titik-titik uji saja. Metode ini juga mampu menyelesaikan permasalahan meskipun masalah tersebut *noisy*. Selain itu, metode ini dilakukan berulang kali hingga hasil akhirnya memenuhi tujuan.

Metode GA dilakukan pada MATLAB dengan fungsi objektif ditunjukkan oleh Persamaan 1. Metode ini memiliki *constraint* yang ditunjukkan oleh Persamaan 2, Persamaan 3, dan Persamaan 4. Persamaan 2 dan persamaan 3 merupakan *constraint* yang akan digunakan untuk *lower bound (lb)*, yaitu batasan bawah optimasi. Selain itu, *upper bound (ub)* ini diatur nilainya menjadi “inf”, sehingga batasan atasnya tidak terhingga. Hal ini sudah sesuai dengan *constraint* pada Persamaan 2 dan Persamaan 3.

Persamaan 4 digunakan untuk matriks A yang mana menunjukkan matriks dari *constraint* sistem. Sehingga,

$$\begin{aligned} \Delta P(i) &\geq 0 \\ (N_{PV} P_{PV} + N_{WT} P_{WT}) - P_{load} &\geq 0 \\ (N_{PV} P_{PV} + N_{WT} P_{WT}) &\geq P_{load} \\ -(N_{PV} P_{PV} + N_{WT} P_{WT}) &\leq -P_{load} \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai total pada Tabel 2,

$$-N_{PV} 0.2959 - N_{WT} 25.89 \leq -47.71 \quad (5)$$

Diperoleh bahwa isi pada matriks A adalah -0.2959 dan -25.89 seperti yang ditunjukkan oleh program. Selain itu, diperoleh bahwa isi pada vektor b adalah -47.71 seperti yang ditunjukkan pada program. Jumlah *design variables* (Nvars) yang digunakan ada 2, yaitu NWT dan NPV. Pada simulasi, kita tidak menggunakan *constraint* yang linear dan berbentuk persamaan, sehingga Aeq dan beq berisi matriks dan vektor yang kosong. Kemudian, pada simulasi juga tidak menggunakan *constraint* yang non-linear sehingga nonlcon juga berisi matriks kosong.

Berikut adalah kode pemrograman yang diketik pada *script editor* MATLAB.

```
clc; clear all;
tic %Memulai pewaktuan
IntCon = 2; %Membulatkan bilangan constraint
rng default %Random number generator

%Memasukan fungsi objektif (Persamaan 1) dan nilai parameter pada Tabel 2
fun = @(N)(6*((N(1)*350)+(N(2)*20000)+2000));

%Menentukan Batasan pada Fungsi Objektif
A = [-0.2959,-25.89]; %Matriks constraint yang linear dan berbentuk pertidaksamaan
b = [-47.71]; %Vektor constraint yang linear dan berbentuk pertidaksamaan
Aeq = []; %Constraint yang linear dan berbentuk persamaan
beq = []; %Vektor constraint yang linear dan berbentuk persamaan
lb = [1;1]; %Lower bound atau batas bawah
ub = [inf;inf]; %Upper bound atau batas atas
nonlcon = []; %Constraint yang non-linear

%Menentukan opsi yang ingin ditampilkan dari fungsi objektif
options = optimoptions('ga','PlotFcn', @gaplotbestf);

%Mencari Biaya dan Jumlah Solar Panel dan Turbin Angin yang Minimal
[x,fval,exitflag,output,population] =
ga(fun,2,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,IntCon,options)
toc %Menghentikan pewaktuan
```

2.2. *Fmincon*

Metode optimasi kedua yang digunakan dalam menyelesaikan fungsi objektif yang ditunjukkan oleh persamaan 1 adalah *fmincon* (*find minimum of constrained nonlinear multivariable function*)[17] [11]. Hal ini karena dari sistem yang diuji dimodelkan sebagai fungsi *non-linier* dari biaya modal awal dari sistem hibrid. Fungsi *fmincon* pada MATLAB dirancang untuk menemukan nilai minimum dari fungsi *multi-variabel non-linier* yang memiliki *constraint* dan metode optimasi ini memiliki kemampuan untuk memecahkan masalah pemrograman skala besar dengan cepat [18]. Hal ini dikarenakan algoritma yang digunakan pada *fmincon* adalah *sequential quadratic programming* (sqp). Sebab, sqp hanya memerlukan penggunaan memori yang sedikit. Disamping keunggulan itu juga *constraint* yang dapat dimasukkan pada MATLAB dapat dimasukkan secara lengkap [11].

Berikut adalah kode pemrograman yang diketik pada *script editor* MATLAB.

```
clc; clear all;
```

tic %Memulai pewaktuan

%Memasukan fungsi objektif dan nilai parameter pada Tabel 2

fun = @(N)(6*((N(1)*350)+(N(2)*20000)+2000)); %fungsi yang digunakan

%Menentukan Batasan pada Fungsi Objektif

A = [-0.2959 -25.89]; %Matriks constraint yang linear dan berbentuk pertidaksamaan

b = [-47.71]; %Vektor constraint yang linear dan berbentuk pertidaksamaan

Aeq = []; %Sisi kiri pembatas persamaan (Aeq=...)

beq = []; %Sisi kanan pembatas persamaan (...= beq)

lb = [1;1]; %batas bawah

ub = [inf;inf]; %batas atas

nonlcon = []; %non-linear constraint

x0 = [1,1]; %Titik awal pencarian nilai x

%Menentukan opsi yang ingin ditampilkan dari fungsi objektif

options = optimoptions('fmincon','PlotFcn','optimplotfval','Display','iter','Algorithm','sqp');

%Mencari Biaya dan Jumlah Solar Panel dan Turbin Angin yang Minimal

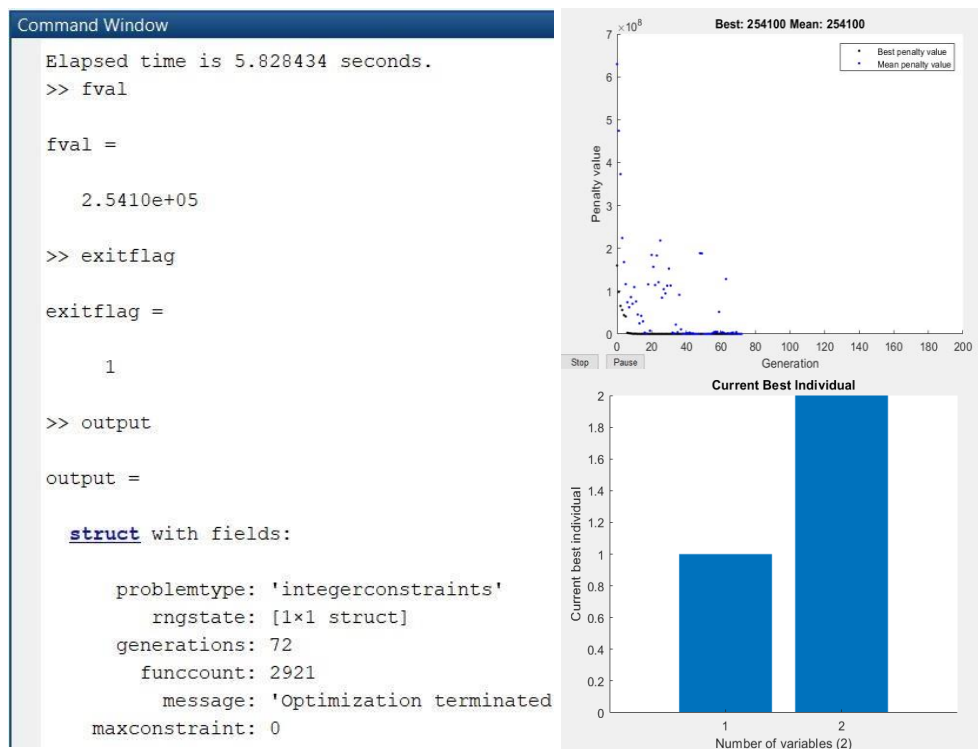
[x,fval,exitflag,output,Algorithm] = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)

toc %Menghentikan pewaktuan

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Jumlah biaya modal awal sistem hibrid energi fotovoltaik dan turbin angin ditentukan oleh jumlah fotovoltaik dan turbin angin dalam sistem. Penentuan jumlah fotovoltaik dan turbin angin tersebut diperoleh dari hasil simulasi optimasi menggunakan metode GA dan Fmincon. Masing-masing metode ini memperoleh hasil optimasi yang identik akan tetapi memiliki performa yang berbeda-beda.

Pengujian pertama menggunakan metode GA. Setelah menjalankan program, diketahui hasil pengujian seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Hasil Pengujian Menggunakan Metode Genetic Algorithm (GA)

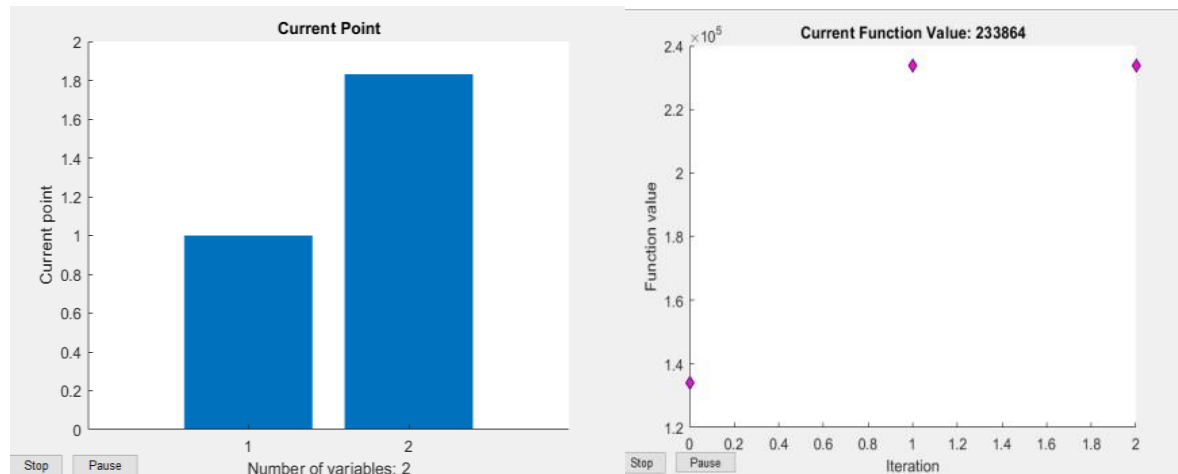
Berdasarkan Gambar 1, diketahui bahwa jumlah fotovoltaik dan turbin angin sebanyak 1 dan 2. Selain itu, Berdasarkan Gambar 1 fval menunjukkan sebesar 2.5410×10^5 . Nilai ini menunjukkan biaya modal awal (C_{IC}) sebesar \$254100. Dengan demikian, dengan fotovoltaik sebanyak 1 unit dan turbin angin 2 unit, akan membutuhkan biaya modal sebesar \$254100.

Hasil tersebut dapat divalidasi dengan *exitflag* pada Gambar 1. *Exitflag* menunjukkan nilai 1 dan positif. Positifnya *exitflag* menunjukkan bahwa hasil optimasi sudah memenuhi kriteria yang dibutuhkan. Nilai 1 pada *exitflag* dalam kasus ini yang menggunakan metode GA menunjukkan hasil optimasi sudah paling memenuhi *constraint* dan kriteria-kriteria yang diinginkan [19], [20]. Kondisi tersebutlah yang menyebabkan proses komputasi dihentikan.

Metode ini memiliki jumlah iterasi/generasi sebanyak 72 dengan populasinya sebanyak 40 sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Prosesnya diakhiri pada generasi ke-72 dengan *best value* sebesar 254100 dan *mean value* 254100. Hal ini menunjukkan bahwa pada iterasi ke-72 didapatkan semua nilai-nilai pada populasi sebesar 254100. Sehingga, individu terbaiknya adalah seluruh populasinya saat generasi ke-72 sebagaimana yang ditunjukkan oleh Gambar 1.

Selain itu, berdasarkan Gambar 1 juga diketahui *funccount* sebanyak 2921 dengan generasi sebanyak 72. Hal ini menunjukkan bahwa pada generasi ke-72, sudah sebanyak 2921 nilai-nilai yang berhasil dievaluasi apakah hasilnya memenuhi keinginan atau belum. Secara keseluruhan, metode GA ini membutuhkan waktu sebanyak 5.83 detik untuk memperoleh hasil optimasinya

Sementara untuk metode optimasi lain yang digunakan adalah *fmincon*. Hasil simulasi dari metode ini didapat dengan menjalankan kode pemrograman pada MATLAB dengan memasukkan *constraint* yang sama dengan pengujian dengan *genetic algorithm* yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Pengujian Menggunakan Metode Fmincon

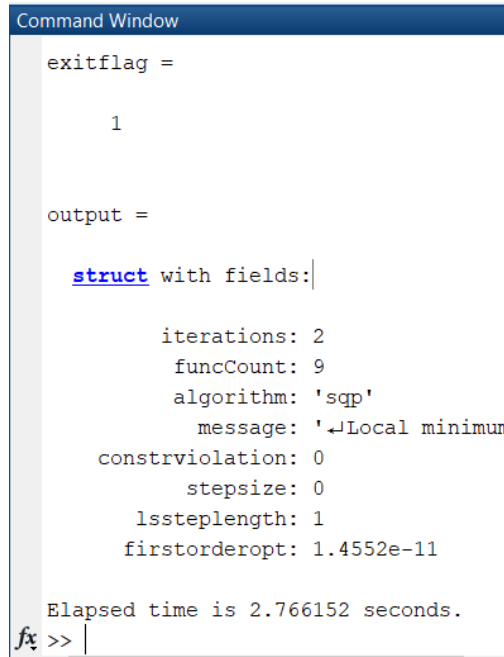
Berdasarkan gambar 2 diperoleh biaya modal awal yang paling minimal untuk sistem hibrid ini sebesar \$233864 dengan jumlah PV sebanyak 1 unit dan jumlah turbin angin sebanyak 1.8 unit. Adapun jumlah iterasi untuk mencapai nilai yang paling minimal yaitu sebanyak 3 iterasi yang ditunjukkan oleh Tabel 3.

Tabel 3. Biaya yang Diperoleh pada Setiap Iterasi dengan Menggunakan Metode Fmincon

Iter	Func-count	Fval	Feasibility	Step Length
0	3	1.341000e+05	2.152e+01	1.000e+00
1	6	2.338641e+05	0.000e+00	1.000e+00
2	9	2.338641e+05	0.000e+00	1.000e+00

Dapat dilihat nilai fungsi (*Fval*) pada iterasi ke 0 bernilai 1.341e+05. Sementara pada iterasi ke-1 dan iterasi ke-2 nilai fungsi (*Fval*) tidak mengalami perubahan sehingga proses optimasi berhenti dan juga disebabkan oleh tidak adanya penurunan ke arah yang layak (*feasible*) pada fungsi objektifnya.

Sementara nilai *func-count* yang didapatkan yaitu bernilai 9 yang menandakan bahwa metode *fmincon* mengevaluasi fungsi sebanyak 9 kali dalam proses mencari nilai minimumnya. Pada kolom ke kelima terdapat *step length* sebesar 1. *Step length* merupakan faktor perkalian yang mengukur arah pencarian nilai minimum. Selain itu, waktu yang diperlukan untuk mendapatkan nilai *minimum* dari metode *fmincon* yaitu selama 2.766152 detik dengan *exitflag* sebesar 1 seperti yang diperoleh pada metode *genetic algorithm*. Gambar 3 merupakan *exitflag* dan *output* dari *fmincon*.



```

Command Window

exitflag =

    1

output =

    struct with fields:

        iterations: 2
        funcCount: 9
        algorithm: 'sqp'
        message: '↵Local minimum'
        constrviolation: 0
        stepsize: 0
        lssteplength: 1
        firstorderopt: 1.4552e-11

Elapsed time is 2.766152 seconds.
fx >>

```

Gambar 3. Exitflag dan Output Simulasi dari *Fmincon*

Dikarenakan pada metode *fmincon* tidak dapat memasukkan *integer constraint* maka nilai yang diperoleh pada pengujian ini bernilai desimal sehingga perlu dilakukan pembulatan dan perhitungan ulang dengan memasukkan PV sebanyak 1 unit dan turbin angin sebanyak 2 unit. Berikut ini merupakan perhitungan untuk mendapatkan biaya modal awal yang paling minimal menggunakan persamaan 1.

$$C_{ICC} = \frac{6(1+6)^{20}}{(1+6)^{20}-1} [(1 \times 350) + (2 \times 20000) + 2000]$$

$$C_{ICC} = \$254100$$

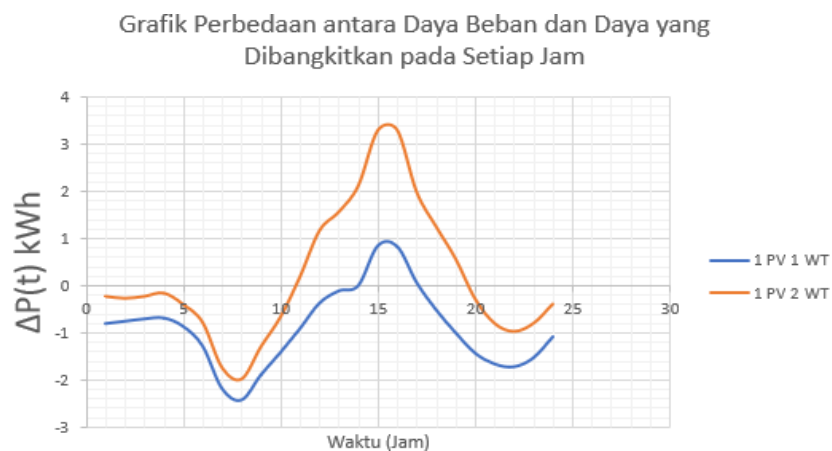
Dari perhitungan diatas diperoleh biaya modal awal yaitu sebesar \$254100. Jika dibandingkan dengan biaya yang diperoleh dengan metode GA, maka didapat nilai yang sama. Sehingga kedua metode ini membuktikan bahwa biaya yang paling minimal dari sistem hibrid ini bernilai \$254100.

Setelah memperoleh hasil optimasi jumlah fotovoltaik, jumlah turbin angin, dan biaya modal awal dari metode GA dan *fmincon*, maka diperoleh data daya baru seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1. Berdasarkan Tabel 4, diketahui bahwa $\Delta P(t)$ pada totalnya menunjukkan 4.37 kWh. Oleh karena $\Delta P(t) \geq 0$, maka hal ini sudah sesuai dengan *constraint* pada Persamaan 4. Maka, dengan menggunakan fotovoltaik sebanyak 1 unit dan turbin angin sebanyak 2 unit, akan menghasilkan daya lebih sebanyak 4.37 kWh jika dibandingkan dengan daya total yang dibutuhkan oleh beban. Meskipun daya yang terbangkit melebihi daya yang dibutuhkan beban, akan tetapi biaya modal awal sudah paling minimal, yaitu hanya sebesar \$254100.

Tabel 4. Data Daya Rata-Rata yang Dibangkitkan dan Daya Beban untuk Setiap Jam dalam Satu Hari (kWh) Setelah Dioptimasi

Waktu (t)	Pload (t)	PWT(t)	PPV (t)	$\Delta P(t)$
1	1.39	1.16	0	-0.23
2	1.25	0.98	0	-0.27
3	1.19	0.96	0	-0.23
4	1.22	1.06	0	-0.16
5	1.34	0.94	0	-0.4
6	1.8	1.02	0	-0.78
7	2.66	0.92	0.0016	-1.7384
8	2.9	0.92	0.0034	-1.9766
9	2.52	1.22	0.0103	-1.2897
10	2.21	1.52	0.0246	-0.6654
11	2.05	2.2	0.0317	0.1817
12	1.94	3.06	0.0353	1.1553
13	1.82	3.34	0.0366	1.5566
14	1.71	3.78	0.0374	2.1074
15	1.62	4.86	0.0368	3.2768
16	1.65	4.9	0.0335	3.2835
17	1.87	3.82	0.0242	1.9742
18	2.29	3.52	0.0134	1.2434
19	2.58	3.14	0.0056	0.5656
20	2.6	2.32	0.0015	-0.2785
21	2.54	1.74	0	-0.8
22	2.49	1.52	0	-0.97
23	2.28	1.48	0	-0.8
24	1.79	1.4	0	-0.39
Total	47.71	51.78	0.2959	4.3659

Adapun perbedaan daya beban dan daya yang dibangkitkan pada setiap jam dalam sehari saat sebelum dioptimasi dengan yang sudah dioptimasi dapat dilihat pada Gambar 4 berikut.

**Gambar 4.** Grafik Perbedaan antara Daya Beban dan Daya yang Dibangkitkan pada Setiap Jam

Gambar 4 menunjukkan bahwa perbedaan daya ($\Delta P(i)$) hasil optimasi menunjukkan perbedaan yang lebih positif daripada yang sebelum dioptimasi. Berdasarkan Tabel 1 dan Tabel 4, fotovoltaik mulai menghasilkan daya yang dibangkitkan mulai waktu ke-7 hingga ke-20. Jika menggunakan hasil optimasi, nilai ($\Delta P(i)$) ini menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan pada waktu tersebut.

Setelah mencoba untuk memetakan perbedaan dari hasil sebelum dan sesudah optimasi, penulis juga dapat menemukan perbedaan-perbedaan saat menggunakan metode optimasi GA dengan *fmincon*. Perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Perbedaan Metode GA dengan Metode Fmincon

GA	Fmincon
Jumlah iterasi lebih banyak	Jumlah iterasi lebih sedikit
Membutuhkan waktu pemrosesan lebih banyak	Membutuhkan waktu pemrosesan lebih sedikit
Hasil optimasi dapat berupa bilangan bulat	Hasil optimasi tidak dapat berupa bilangan bulat
Funccount hanya dapat diketahui secara kumulatif	Funccount dapat diketahui secara kumulatif maupun per iterasi.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh hasil optimasi menggunakan metode GA dan *fmincon* yaitu, jumlah fotovoltaik sebanyak 1 unit dan turbin angin sebanyak 2 unit. Sehingga, biaya modal awal pun dapat diperoleh yang paling minimal akan tetapi masih dapat memenuhi kebutuhan daya beban. Biaya modal awal dibutuhkan sebanyak \$254100 untuk membangkitkan daya rata-rata dalam sehari sebesar 52.08 kWh. Daya tersebut dapat memenuhi kebutuhan daya beban yang sebesar 47.71 kWh. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa kedua metode tersebut dapat menghitung nilai optimal biaya modal awal investasi sistem hibrid turbin angin dan PV. Namun, karena yang diinginkan adalah angka turbin angin dan PV yang merupakan bilangan bulat, maka metode GA lebih cocok digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Wang, X. Yang, Q. Lou, and X. Xu, "Achieving a sustainable development process by deployment of solar PV power in ASEAN: A SWOT analysis," *Processes*, vol. 9, no. 4, p. 630, 2021.
- [2] C.-Y. Park and B. Yeung, "An Integrated and Smart ASEAN: Overcoming Adversities and Achieving Sustainable and Inclusive Growth," 2021.
- [3] N. A. Ludin, N. A. A. Affandi, N. H. Hamid, M. M. Junedi, K. Purvis-Roberts, and S. Jusof, "Sustainability and Life-Cycle Cost Analysis of Solar Photovoltaic-Generation Systems in ASEAN Countries," in *Energy Sustainability and Climate Change in ASEAN*, Springer, 2021, pp. 277–302.
- [4] J. S. T. Pedersen, D. P. Van Vuuren, B. A. Aparicio, R. Swart, J. Gupta, and F. D. Santos, "Variability in historical emissions trends suggests a need for a wide range of global scenarios and regional analyses," *Communications Earth & Environment*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [5] Y. Sawle, S. C. Gupta, and A. K. Bohre, "Review of hybrid renewable energy systems with comparative analysis of off-grid hybrid system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 2217–2235, 2018.
- [6] C. Mokhtara, B. Negrou, A. Bouferrouk, Y. Yao, N. Settou, and M. Ramadan, "Integrated supply--demand energy management for optimal design of off-grid hybrid renewable energy

- systems for residential electrification in arid climates,” *Energy Conversion and Management*, vol. 221, p. 113192, 2020.
- [7] H. Harmini and T. Nurhayati, “Pemodelan sistem pembangkit hybrid energi solar dan angin,” *Elektrika*, vol. 10, no. 2, pp. 28–32, 2018.
- [8] N. F. Istighfarin, R. A. Rahmastati, and H. Nugroho, “Penerapan Metode Particle Swarm Optimization (PSO) Dan Genetic Algorithm (GA) Pada Sistem Optimasi Visible Light Communication (VLC) Untuk Menentukan Posisi Robot,” *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer*, vol. 11, no. 1, pp. 279–286, 2020.
- [9] A. Mehmood, A. Zameer, S. H. Ling, A. ur Rehman, and M. A. Z. Raja, “Integrated computational intelligent paradigm for nonlinear electric circuit models using neural networks, genetic algorithms and sequential quadratic programming,” *Neural Comput Appl*, vol. 32, no. 14, pp. 10337–10357, 2020.
- [10] H. Nugroho, C. Aditya, and S. Nungsizu, “Penerapan Metode Genetic Alghorithm untuk Meminimalkan Biaya Perawatan Sistem Pembangkit Energi Hibrid Solar Panel dan Turbin Angin,” *ENERGI \& KELISTRIKAN*, vol. 13, no. 2, pp. 172–177, 2021.
- [11] A. M. Albaghdadi, M. Bin Baharom, and S. A. bin Sulaiman, “Parameter design optimization of the crank-rocker engine using the FMINCON function in MATLAB,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, p. 12072.
- [12] I. M. S. Putra, “Penerapan Algoritma Genetika Dan Implementasi Dalam MATLAB,” vol. 53, pp. 1689–1699, 2018.
- [13] D. K. Geleta and M. S. Manshahia, “Artificial bee colony-based optimization of hybrid wind and solar renewable energy system,” in *Handbook of research on energy-saving technologies for environmentally-friendly agricultural development*, IGI Global, 2020, pp. 429–453.
- [14] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*. MIT press, 1998.
- [15] M. Tabassum, K. Mathew, and others, “A genetic algorithm analysis towards optimization solutions,” *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*, vol. 4, no. 1, pp. 124–142, 2014.
- [16] M. R. Fariez, F. G. Maulana, and H. Nugroho, “Penggunaan Metode Optimasi Genetic Algorithm dalam Penentuan Letak Turbin Angin,” *JURNAL TEKNOLOGIA*, vol. 2, no. 2, 2020.
- [17] The Mathworks, “{MATLAB} {R}2015a {D}ocumentation.” 2015.
- [18] L. Bokopane, K. Kusakana, and H. J. Vermaak, “Optimal energy management of an isolated electric Tuk-Tuk charging station powered by hybrid renewable systems,” in *2015 International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*, 2015, pp. 193–201.
- [19] F. Rahmawati, “Strategi penetapan harga pada dual channel supply chain untuk produk recycled (studi kasus: Rumah Duatujuh),” *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2015.
- [20] B. P. Jocom, N. Hidayat, and P. P. Adikara, “Penerapan Genetic Algorithm untuk Optimasi Peningkatan Laba Persediaan Produksi Pakaian,” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer e-ISSN*, vol. 2548, p. 964X, 2018.