

Economic Dispatch untuk Sistem Kelistrikan *Microgrid* dengan *Energy Storage* berbasis *Adaptive Particle Swarm Optimization*

Nugroho Wicaksono, Heri Suryoatmojo, dan Rony Seto Wibowo

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: gmnugrohowicaksono@gmail.com, suryomgt@ee.its.ac.id, ronyseto@ee.its.ac.id

Abstrak—Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi membawa pengaruh akan meningkatnya kebutuhan akan daya listrik, namun ketersediaan sumber energi konvensional (*fossil*) semakin menipis yang tentunya akan berdampak pada tingkat ketahanan listrik. Oleh karenanya diperlukan pembangkit-pembangkit tersebar berskala kecil (*microgrid*). Pembangkit tersebar ini diupayakan bersumber pada energi terbarukan dengan meminimalkan pemakaian dari sumber energi konvensional serta digunakan *energy storage* untuk *power balance*. Oleh karena adanya *microgrid* ini maka penting untuk menentukan besarnya pembangkitan daya listrik yang optimal dari masing-masing pembangkit dan kapasitas optimal *energy storage* sehingga kebutuhan daya listrik dapat dipenuhi dengan biaya yang optimal. Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai *economic dispatch* di dalam pengoperasian sistem kelistrikan *microgrid* dengan *energy storage*. Algoritma APSO digunakan untuk memecahkan masalah minimalisasi total biaya sistem. Simulasi komputer menggunakan Matlab dilakukan untuk menunjukkan efektivitas dari metodologi yang diusulkan dan dampak dari harga dan sistem penyimpanan pada *economic dispatch*.

Kata Kunci— *Economic Dispatch (ED)*, *Microgrid*, *Artificial Intelligence*, *Adaptive Particle Swarm Optimization*, *Energy Storage*.

I. PENDAHULUAN

TENAGA listrik dapat dikatakan telah menjadi kebutuhan primer bagi kehidupan manusia saat ini. Seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan infrastruktur, permintaan terhadap daya listrik pun terus bertambah [1]. Namun peningkatan kebutuhan tenaga listrik ini tidak dapat secara langsung diatasi dengan menambah pasokan daya dari pembangkit tanpa memperhatikan biaya dan kemampuan dari masing-masing pembangkit yang digunakan.

Electric Power System (EPS) pun telah mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan ini dikombinasikan dengan kecenderungan untuk produksi yang efisien dan memberikan dampak lingkungan yang semakin baik, mengarahkan untuk mencari sumber energi alternatif baru untuk pembangkit listrik.

Salah satu efek dengan adanya perubahan terhadap EPS adalah adanya pembangkit tersebar (*distributed generation*). Hal ini menciptakan konsep baru terkait dengan peningkatan penggunaan sumber energi baru - terbarukan, memperkenalkan ide *microgrid* [2]. *Microgrid* didefinisikan sebagai bagian dari sistem distribusi dan struktur dasarnya

terdiri dari sumber energi yang terdistribusi, perangkat penyimpanan dan beban yang berubah-ubah. Sistem ini dapat dioperasikan dengan terhubung ke jala-jala atau dengan metode terisolasi (*island-ing mode*) [3].

Dengan adanya konsep *microgrid* dan usaha peningkatan nilai ekonomis dalam pemenuhan kebutuhan beban sistem ini, maka dibutuhkan suatu konsep *Economic Dispatch (ED)*. ED merupakan instrumen yang sangat penting dalam kontrol dan operasi sistem tenaga [4]. ED mempunyai fungsi utama untuk mengatur pembagian beban ke setiap pembangkit untuk dapat memenuhi kebutuhan beban dengan biaya pembangkitan yang paling optimal [5]. Beberapa pembangkit energi listrik yang dimodelkan pada penelitian ini adalah pembangkit sel surya, turbin angin, sel bahan bakar (*fuel cell*), turbin mikro dan generator diesel serta juga media penyimpanan energi (*energy storage*). Pembangkit sel surya dan turbin angin merupakan pembangkit dengan sumber energi baru-terbarukan sehingga kebutuhan akan bahan bakar hanya diperlukan untuk pengoperasian pembangkit berbahan bakar [6].

Dalam penelitian ini diusulkan solusi untuk ED dalam sistem kelistrikan *microgrid* dengan sumber energi baru-terbarukan, pembangkit berbahan bakar dan media penyimpanan energi (baterai) dengan menggunakan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*). *Artificial intelligence* yang digunakan sebagai metode dalam penelitian ini adalah *Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO)*.

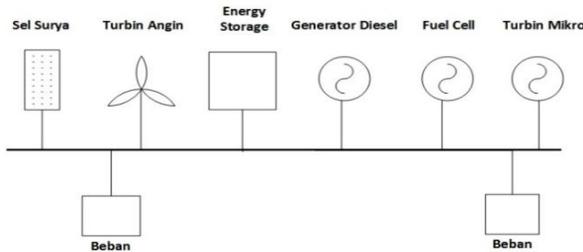
II. DASAR TEORI

A. Sistem Kelistrikan *Microgrid*

Beberapa pembangkit yang digunakan dalam sistem kelistrikan *microgrid* diantaranya pembangkit berbahan bakar serta pembangkit dengan sumber energi baru-terbarukan dan juga media penyimpanan energi. Dengan menggunakan pembangkit tersebar berskala kecil, daya listrik dibangkitkan dekat dengan beban untuk meningkatkan keandalan dan mengurangi rugi-rugi jaringan. Terdapat dua mode operasi dalam sistem kelistrikan *microgrid* yaitu *islanded* dan *grid-connected*.

Pada penelitian ini, tipe mode operasi sistem kelistrikan *microgrid* yang digunakan adalah *islanded*. Dengan tipe operasi ini pembangkit yang ada beroperasi secara mandiri untuk memenuhi kebutuhan sistem yang ada. Beberapa sumber energi listrik yang dimodelkan dalam sistem *microgrid* ini yakni sel surya dan turbin angin dengan kapasitas *rating* masing-masing 25 kW dan 20 kW, sel bahan bakar (*fuel cell*)

25 kW, turbin mikro 75 kW dan generator diesel 50 kW dan baterai dengan kapasitas maksimal *charge-discharge* 30 kW seperti yang ditampilkan pada gambar 1. Pemodelan sistem kelistrikan *microgrid* ini mendekati kondisi nyata sistem kelistrikan di pulau-pulau terpencil dimana tidak mendapatkan suplai daya dari jala-jala PLN.



Gambar 1. Sistem Kelistrikan *Microgrid*

B. Sel Surya

Daya keluaran dari modul sel surya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_{pv} = M(P_{stc} \frac{G_{act}}{G_{stc}} (1 + k(T_c - T_r))) \tag{1}$$

dimana P_{pv} dan P_{stc} adalah daya keluaran dari modul sel surya saat radiasi G_{act} (W) dan saat STC (W), G_{act} dan G_{stc} adalah radiasi aktual (W/m^2) dan radiasi saat STC ($1000 W/m^2$), M adalah jumlah modul sel surya, k adalah koefisien suhu untuk daya modul (%/C), T_c dan T_r adalah suhu sel ($^{\circ}C$) dan referensi ($25^{\circ}C$).

Modul sel surya yang digunakan pada penelitian ini adalah SOLAREX MSX-83 sebanyak 302 modul, dimana modul sel surya ini memiliki karakteristik yaitu [6]:

Daya maksimum saat STC (P_{stc}) = 83, tegangan saat daya maksimum = 17.1 V, arus saat daya maksimum = 4.85 A, arus short circuit saat STC = 5.27 A, tegangan open circuit saat STC = 21.2 V, koefisien suhu untuk daya (k) = -0.5

C. Turbin Angin

Pada penelitian ini digunakan turbin angin ReDriven 20 kW sebanyak 2 unit. Didapatkan persamaan seperti berikut:

$$\begin{aligned} P_{wt} &= 0, & V_{act} < V_{ci} \\ P_{wt} &= a \cdot V_{act}^3 + b \cdot V_{act}^2 + c \cdot V_{act} + d, & V_{ci} \leq V_{act} \leq V_r \\ P_{wt} &= 22, & V_r < V_{act} < V_{co} \\ P_{wt} &= 0 & V_{act} > V_{co} \end{aligned} \tag{2}$$

$$P_{wt} = P_{wt} \times J$$

dimana P_{wt} dan $P_{wt,r}$ adalah daya keluaran dari WT (kW) dan *rating* daya WT (kW), J adalah jumlah WT yang terpasang (*unit*), V_{ci} dan V_{co} adalah kecepatan *cut-in* (m/s) dan *cut-out* (m/s), V_r dan V_{act} adalah *rating* kecepatan angin (m/s) dan kecepatan angin aktual (m/s).

Parameter yang digunakan pada penelitian ini adalah:

$a = -0.0196$, $b = 0.5874$, $c = -2.6814$, $d = 4.0076$, $P_{wt,r} = 20$ kW, $V_r = 11$ m/s, $V_{ci} = 2$ m/s, $V_{co} = 18$ m/s.

D. Baterai (Energy Storage)

Pada penelitian ini baterai yang digunakan memiliki koefisien biaya 0.0043\$/kWh [12]. Dengan menggunakan kurs dollar-euro per tanggal 24 April 2016 maka didapatkan koefisien biaya baterai adalah 0.003831 €/kWh. Kapasitas maksimal yang dapat disimpan oleh baterai adalah 300 kWh

dengan SOC minimum baterai 60 kWh. Baterai ini juga memiliki kapasitas maksimal daya yang dapat di *charge-discharge* sebesar 30 kW [12].

Baterai yang digunakan pada simulasi ini beroperasi pada kemampuan daya maksimal *charge-discharge*-nya yakni 30 kW tanpa mempertimbangkan berapa daya yang sudah tersimpan atau terpakai sebelumnya pada baterai.

Ketika kondisi beban *microgrid* lebih kecil dari total pembangkitan oleh pembangkit energi baru-terbarukan maka daya yang disimpan ke dalam baterai dimodelkan:

$$P_{renew} = P_{pv} + P_{wt} \tag{3}$$

$$P_{batt} = P_{renew} - \text{Beban} \tag{4}$$

dimana P_{pv} dan P_{wt} adalah daya terbangkitkan oleh pembangkit sel surya dan turbin angin (kW), P_{renew} adalah total daya terbangkitkan oleh pembangkit energi baru-terbarukan (kW), Beban adalah total kebutuhan daya sistem (kW), P_{batt} adalah daya yang disimpan dalam baterai (kW).

Sedangkan ketika kondisi beban *microgrid* lebih besar dari total pembangkitan oleh pembangkit energi baru-terbarukan maka daya dari baterai akan digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban sistem sebagai berikut:

$$P_{renew} = P_{pv} + P_{wt} \tag{5}$$

$$P_{batt} = \text{Load} - P_{renew} \tag{6}$$

dimana P_{pv} dan P_{wt} adalah daya terbangkitkan oleh pembangkit sel surya (kW) dan turbin angin (kW), P_{renew} adalah total daya terbangkitkan oleh pembangkit energi baru-terbarukan (kW), Load adalah total kebutuhan daya sistem (kW), P_{batt} adalah daya yang digunakan dari baterai (kW).

E. Sel Bahan Bakar (Fuel Cell)

Biaya operasi untuk sel bahan bakar sebagai berikut:

$$F(P_{fc}) = a + b \cdot P_{fc} + c \cdot P_{fc}^2 \tag{7}$$

dimana $F(P_{fc})$ adalah total biaya operasi sel bahan bakar (€/h), a , b , c adalah koefisien biaya sel bahan bakar. P_{fc} adalah keluaran daya dari sel bahan bakar (kW).

Pada penelitian ini digunakan sel bahan bakar dengan daya *output* maksimal 25 kW dengan koefisien bahan bakar [13]:

$$a = 12, b = 45, c = 0.01$$

F. Turbin Mikro

Biaya operasi dari turbin mikro ini dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat. Biaya operasi untuk turbin mikro sebagai berikut:

$$F(P_{tm}) = a + b \cdot P_{tm} + c \cdot P_{tm}^2 \tag{8}$$

dimana $F(P_{tm})$ adalah total biaya operasi turbin mikro (€/h), a , b , c adalah koefisien biaya turbin mikro, P_{tm} adalah keluaran daya dari turbin mikro (kW).

Pada penelitian digunakan turbin mikro dengan daya *output* maksimal 75 kW dengan koefisien bahan bakar [13]:

$$a = 12, b = 48, c = 0.01$$

G. Generator Diesel

Biaya operasi dari generator diesel ini dapat dimodelkan dengan polinomial kuadrat. Biaya operasi untuk generator diesel sebagai berikut:

$$F(P_{dg}) = a + b \cdot P_{dg} + c \cdot P_{dg}^2 \tag{9}$$

dimana $F(P_{dg})$ adalah total biaya operasi generator diesel (€/h), a , b , c adalah koefisien biaya generator diesel, P_{dg} adalah keluaran daya dari generator diesel (kW).

Pada penelitian ini digunakan generator diesel dengan daya *output* maksimal 50 kW dan memiliki koefisien bahan bakar [13]:

$$a = 10, b = 40, c = 0.01$$

III. ECONOMIC DISPATCH

Economic Dispatch (ED) merupakan suatu teknik yang digunakan untuk membagi daya yang dibangkitkan oleh setiap pembangkit pada kondisi beban tertentu. Pembagian daya yang dibangkitkan oleh pembangkit bertujuan untuk mendapatkan biaya pembangkitan yang paling ekonomis. ED tidak memperhatikan batas *ramp rate* sehingga tidak dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban dalam rentang waktu tertentu. Fungsi total biaya dari setiap generator *unit-i* dimodelkan dengan persamaan polinomial kuadrat yang dirumuskan sebagai berikut:

$$CF(P) = \sum_{n=1}^i C_i \times F_i(P_i) \tag{10}$$

$$F_i(P_i) = (a_i + b_i \cdot P_i + c_i \cdot P_i^2) \tag{11}$$

dimana F_i adalah biaya pembangkitan pada pembangkit *unit-i*, P_i adalah daya *output* dari pembangkit *unit-i*, C_i adalah biaya bahan bakar pada pembangkit *unit-i*, a_i, b_i, c_i adalah koefisien biaya dari generator ke-*i*.

Sistem *microgrid* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan dua jenis pembangkit energi baru-terbarukan dan tiga jenis pembangkit berbahan bakar serta satu jenis *energy storage*. Selain ketiga pembangkit berbahan bakar tersebut, baterai sebagai media penyimpanan energi juga memerlukan biaya dalam pengoperasiannya. Biaya operasi dari baterai ini didapatkan berdasarkan biaya saat investasi pembelian dan perawatan. Sehingga didapatkan fungsi biaya total operasi dari keseluruhan pembangkit tersebut adalah:

$$CF(P) = CF(P_{batt}) + CF(P_{FC}) + CF(P_{MT}) + CF(P_{DG}) \tag{12}$$

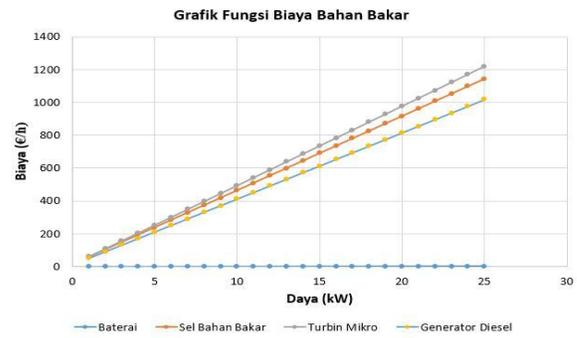
dimana $CF(P_{batt})$, $CF(P_{FC})$, $CF(P_{MT})$, $CF(P_{DG})$ dan $CF(P)$ masing-masing adalah total biaya operasi baterai, pembangkit sel bahan bakar, pembangkit turbin mikro, pembangkit generator diesel dan total biaya operasi keseluruhan pembangkit (€/h).

Berdasarkan penjelasan pada sub-bab sebelumnya, maka parameter fungsi biaya yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Tabel 1. Data Koefisien Harga Pembangkit

| Koefisien | Sel Bahan Bakar | Turbin Mikro | Generator Diesel | Baterai |
|-----------|-----------------|--------------|------------------|----------|
| a | 0.01 | 0.01 | 0.01 | |
| b | 45 | 48 | 40 | 0.003831 |
| c | 12 | 12 | 10 | |

Sehingga grafik perbandingan biaya operasi dari keseluruhan pembangkit yang digunakan adalah:



Gambar 2. Grafik Fungsi Biaya Pembangkit Keseluruhan

A. Constraints

Terdapat beberapa *constraint* yang perlu dipertimbangkan dalam operasi ED yakni *equality* dan *inequality constraint*.

Equality constraint merupakan batasan yang merepresentasikan keseimbangan daya dalam sistem. Karena terdapat dua jenis pembangkit energi baru-terbarukan maka beban daya sistem yang akan dioptimasi oleh ED ini adalah total beban sistem dikurangi daya yang dihasilkan oleh pembangkit energi baru-terbarukan. Fungsi persamaannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{opt} = \text{Beban} - \text{Prenew} \tag{13}$$

dimana P_{opt} adalah daya yang dioptimasi oleh pembangkit berbahan bakar dan baterai, Beban adalah besarnya permintaan daya pada sistem, Prenew adalah daya total yang dapat disuplai oleh pembangkit energi baru-terbarukan.

Inequality constraint merupakan batasan yang merepresentasikan kapasitas daya dari pembangkit. Terdapat tiga jenis pembangkit berbahan bakar dalam sistem kelistrikan *microgrid* yang digunakan dalam penelitian ini. Pembangkit berbahan bakar tersebut mempunyai kapasitas daya maksimum dan minimum yang berbeda-beda. Fungsi pertidaksamaannya adalah sebagai berikut:

$$P_{FCmin} \leq P_{FC} \leq P_{FCmax} \tag{14}$$

$$P_{MTmin} \leq P_{MT} \leq P_{MTmax} \tag{15}$$

$$P_{DGmin} \leq P_{DG} \leq P_{DGmax} \tag{16}$$

$$P_{battchargemin} \leq P_{batt} \leq P_{battchargemax} \tag{17}$$

dimana P_{FCmin} dan P_{FCmax} adalah pembangkitan daya minimum dan maksimum dari pembangkit sel bahan bakar, P_{MTmin} dan P_{MTmax} adalah pembangkitan daya minimum dan maksimum dari pembangkit turbin mikro, P_{DGmin} dan P_{DGmax} adalah pembangkitan daya minimum dan maksimum dari pembangkit generator diesel, $P_{battchargemin}$ dan $P_{battchargemax}$ adalah pembangkitan daya minimum dan maksimum dari baterai.

Dalam penelitian ini parameter yang digunakan adalah: $P_{FCmin} = 5 \text{ kW}$, $P_{FCmax} = 75 \text{ kW}$, $P_{MTmin} = 5 \text{ kW}$, $P_{MTmax} = 25 \text{ kW}$, $P_{DGmin} = 5 \text{ kW}$, $P_{DGmax} = 50 \text{ kW}$, $P_{battchargemin} = 0 \text{ kW}$, $P_{battchargemax} = 30 \text{ kW}$.

IV. PENERAPAN ADAPTIVE PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

A. Particle Swarm Optimization (PSO)

Algoritma PSO merupakan salah satu algoritma kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), termasuk ke dalam kategori *swarm intelligence* yang merupakan algoritma yang terinspirasi oleh perilaku sosial kolektif koloni burung atau

binatang. Pergerakan burung yang direpresentasikan sebagai pergerakan partikel ditentukan oleh nilai posisi sebelumnya dan nilai kecepatan saat ini. Nilai posisi dari partikel ini yang kemudian merepresentasikan solusi yang mungkin pada kasus optimasi dan nilai kecepatan digunakan untuk *update* posisi partikel.

Algoritma PSO ini pertama kali diperkenalkan oleh J. Kennedy [9] pada tahun 1995. Algoritma PSO dimulai dengan inialisasi partikel solusi secara acak. Algoritma PSO akan beriterasi memperbaharui nilai posisi partikel sebagai fungsi dari perubahan kecepatan partikel sampai iterasi maksimal terpenuhi. *Output* dari hasil iterasi algoritma PSO ini didapatkan hasil nilai optimasi. Persamaan *update* rulunya:

$$V_{it} = V_{it-1} + C_1 \cdot \text{rand} \cdot (Pbest_{it} - X_{it-1}) + C_2 \cdot \text{rand} \cdot (Gbest_{it} - X_{it-1}) \quad (18)$$

$$X_{it} = X_{it-1} + V_{it} \quad (19)$$

dimana V_{it} dan X_{it} adalah kecepatan dan posisi partikel saat ini, V_{it-1} dan X_{it-1} adalah kecepatan dan posisi partikel iterasi sebelumnya, $Pbest_{it}$ adalah posisi terbaik partikel, $Gbest_{it}$ adalah posisi terbaik dari seluruh partikel, C_1 dan C_2 adalah konstanta *cognitive* dan sosial *acceleration*, *rand* adalah nilai *random* yang terdistribusi dari 0-1.

Pada tahun yang sama, R. Eberhart memperkenalkan algoritma lokal PSO. Prinsip dari teori lokal PSO adalah bahwa suatu partikel mengalami percepatan yang diakibatkan oleh partikel-partikel yang menjadi tetangga partikel yang bersangkutan, bukan diakibatkan oleh $Gbest$ (posisi terbaik dari seluruh partikel). Sehingga persamaan *update* rulunya:

$$V_{it} = V_{it-1} + C_1 \cdot \text{rand} \cdot (Pbest_{it} - X_{it-1}) + C_2 \cdot \text{rand} \cdot (Lbest_{it} - X_{it-1}) \quad (20)$$

$$X_{it} = X_{it-1} + V_{it} \quad (21)$$

dimana X_{it} dan V_{it} adalah posisi dan kecepatan partikel saat ini, X_{it-1} dan V_{it-1} adalah posisi dan kecepatan partikel iterasi sebelumnya, $Pbest_{it}$ adalah posisi terbaik dari partikel, $Lbest_{it}$ adalah posisi terbaik yang pernah dicapai oleh tetangga-tetangga dari suatu partikel, C_1 dan C_2 adalah konstanta *cognitive* dan sosial *acceleration*, *rand* adalah nilai *random* yang terdistribusi dari 0-1.

Perbedaan kedua metode PSO ini adalah dengan metode J. Kennedy akan menghasilkan nilai optimasi yang konvergen dalam waktu yang sangat cepat namun dengan hasil yang kurang baik karena menggunakan $Gbest$ sebagai dasar acuan pencarian posisi terbaiknya sedangkan metode R. Eberhart akan menghasilkan konvergensi nilai optimasi yang lebih lambat namun dengan hasil performa yang lebih baik.

B. Adaptive Particle Swarm Optimization (APSO)

Salah satu metode *adaptive* PSO yang dapat digunakan untuk optimasi adalah mengubah nilai *inertia weight* PSO setiap iterasinya [10]. Variasi ini merupakan pengembangan dari metode yang dikembangkan oleh J. Kennedy dan R. Eberhart. Dengan demikian *inertia weight* setiap iterasinya menjadi:

$$Wit = Wmax - Wmin * \frac{(itmax-it).it}{itmax} + Wmin \quad (22)$$

dimana $Wmax$ dan $Wmin$ adalah koefisien *inertia weight* maksimal dan minimal, it dan $itmax$ adalah iterasi yang sedang berlangsung dan nilai maksimal dari iterasi yang digunakan, Wit adalah *inertia weight* pada iterasi saat ini.

Persamaan kecepatan partikel setiap iterasinya menjadi:

$$V_{it} = W \cdot V_{it-1} + C_1 \cdot \text{rand} \cdot (Pbest_{it} - X_{it-1}) + C_2 \cdot \text{rand} \cdot (Gbest_{it} - X_{it-1}) \quad (23)$$

dimana V_{it} dan V_{it-1} adalah kecepatan partikel saat ini dan pada iterasi sebelumnya, X_{it-1} adalah posisi partikel iterasi sebelumnya, $Pbest_{it}$ adalah posisi terbaik dari partikel, $Gbest_{it}$ adalah posisi terbaik dari seluruh partikel, C_1 dan C_2 adalah konstanta *cognitive* dan sosial *acceleration*, *rand* adalah nilai *random* yang terdistribusi dari 0-1.

Selain itu dengan besarnya nilai konstanta *cognitive* dan kecilnya nilai konstanta *social* di saat awal iterasi memungkinkan partikel untuk bergerak di sekitar ruang pencarian, sehingga tidak langsung bergerak menuju populasi terbaik secara prematur. Selama tahap optimasi selanjutnya, semakin kecilnya nilai konstanta *cognitive* dan semakin besarnya nilai konstanta *social* memungkinkan partikel untuk menuju ke suatu titik global optimum [11]. Sehingga konstanta akselerasi berubah secara *adaptive* seiring dengan bertambahnya iterasi menjadi:

$$C_1 = (C_1^{final} - C_1^{initial}) \left(\frac{iter}{iter_{max}} \right) + C_1^{initial}, C_1^{final} < C_1^{initial} \quad (24)$$

$$C_2 = (C_2^{final} - C_2^{initial}) \left(\frac{iter}{iter_{max}} \right) + C_2^{initial}, C_2^{final} > C_2^{initial} \quad (25)$$

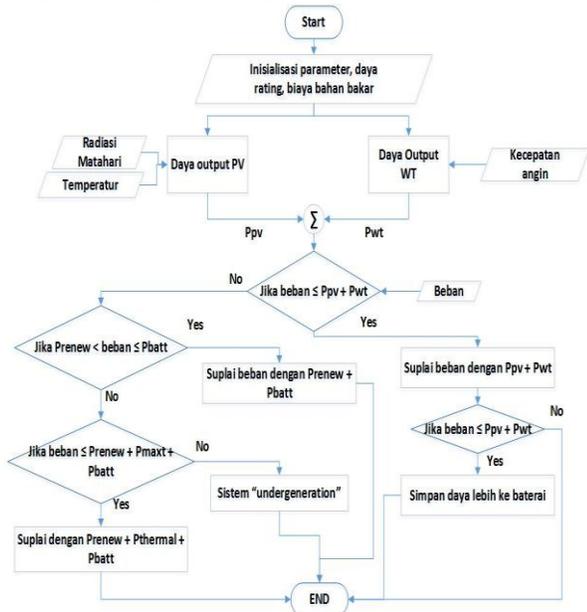
dimana C_1 dan C_2 adalah konstanta *cognitive* dan konstanta *social acceleration*, C_1^{final} dan $C_1^{initial}$ adalah konstanta *cognitive* akhir dan awal, C_2^{final} dan $C_2^{initial}$ adalah konstanta *social acceleration* akhir dan awal, $iter$ dan $iter_{max}$ adalah iterasi yang sedang berlangsung dan nilai maksimal dari iterasi yang digunakan.

C. Implementasi dari Algoritma

Alur algoritma yang digunakan untuk mengoperasikan sistem kelistrikan *microgrid* model *islanded* secara optimal tersebut adalah sebagai berikut:

1. Inisiasi parameter, rating daya, biaya bahan bakar dari setiap pembangkit berbahan bakar.
2. Daya keluaran dari pembangkit sel surya dan turbin angin dihitung sesuai kondisi dari radiasi matahari, temperatur suhu aktual dan kecepatan angin aktual.
3. Diasumsikan bahwa pembangkit sel surya dan turbin angin tidak membutuhkan biaya saat beroperasi.
4. Jika total permintaan beban lebih kecil dari daya keluaran sel surya dan turbin angin maka kebutuhan beban hanya akan dipenuhi oleh pembangkit energi baru-terbarukan dan jika ada daya pembangkitan lebih dari pembangkit energi baru-terbarukan maka daya lebih tersebut akan disimpan di dalam baterai (*energy storage*).
5. Jika total permintaan beban lebih besar daya keluaran sel surya dan turbin angin namun masih dapat disuplai jika ditambah dengan daya dari baterai, maka permintaan beban akan disuplai oleh daya keluaran sel surya, turbin angin dan ditambah dengan daya dari baterai.
6. Beban *netto* untuk dioptimasi menggunakan ED dihitung hanya jika daya keluaran dari pembangkit sel surya, turbin angin dan baterai lebih kecil dari permintaan beban sistem.
7. Beban *netto* yang dioptimasi dihitung berdasarkan beban total permintaan dikurangi dengan beban yang dapat disuplai oleh pembangkit sel surya dan turbin angin (pembangkit energi baru-terbarukan).

8. Beban *netto* disuplai oleh pembangkit berbahan bakar dan baterai yang kemudian pembagian beban per pembangkitnya ditentukan berdasarkan optimasi ED. Alur algoritma dapat dilihat pada gambar 3 berikut:



Gambar 3. Diagram Alir Algoritma *Economic Dispatch Islanded Microgrid* V. SIMULASI DAN ANALISIS

A. Studi Kasus 1

Pada studi kasus 1 total permintaan beban lebih kecil dari daya keluaran pembangkit sel surya dan pembangkit turbin angin sehingga akan ada daya sisa pembangkitan yang akan disimpan ke dalam baterai.

Tabel 2. Data Masukan Studi Kasus 1

| Ka-sus | Total Beban (kW) | Kecepatan Angin (m/s) | Jumlah Turbin Angin (unit) | Radiasi Matahari (W/m ²) | Suhu (°C) | Jumlah Sel Surya (modul) |
|--------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 35 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 2 | 20 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 3 | 20 | 8 | 2 | 600 | 50 | 302 |
| 4 | 25 | 12 | 2 | 800 | 30 | 302 |

Hasil simulasi pada studi kasus ini adalah:

Tabel 3.

Hasil Simulasi Studi Kasus 1

| Kasus | Daya Sel Surya (kW) | Daya Turbin Angin (kW) | Total Daya Renewable (kW) | Total Energi Tersimpan (kW) |
|-------|---------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1 | 24.44 | 10.56 | 35 | 22.07 |
| 2 | 20 | 0 | 20 | 37.07 |
| 3 | 13.16 | 6.84 | 20 | 13.37 |
| 4 | 19.55 | 5.45 | 25 | 38.55 |

Sehingga dapat terlihat perbedaan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit sel surya dan turbin angin ketika mendapatkan nilai masukan yang bervariasi. Berbagai variasi total beban disimulasikan untuk mengetahui berapa sisa daya terbangkit yang mampu disimpan ke dalam *energy storage*.

B. Studi Kasus 2

Total permintaan beban lebih besar dari total daya keluaran pembangkit sel surya dan turbin angin sehingga dibutuhkan pembangkit berbahan bakar untuk memenuhi permintaan beban. Pada studi kasus ini juga digunakan baterai pada sistem. APSO digunakan untuk menentukan daya pembangkitan yang optimal untuk masing-masing pembangkit

tersebut. Pada APSO ini diterapkan jumlah iterasi sebanyak 25 kali dan jumlah partikel sebanyak 15. Untuk mengetahui perbedaan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit maka data masukan pembangkit baru-terbarukan disamakan seperti pada tabel 4 berikut ini:

Tabel 4.

Data Masukan Studi Kasus 2

| Ka-sus | Total Beban (kW) | Kecepatan Angin (m/s) | Jumlah Turbin Angin (unit) | Radiasi Matahari (W/m ²) | Suhu (°C) | Jumlah Sel Surya (modul) |
|--------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 77 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 2 | 125 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 3 | 138 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 4 | 148 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 5 | 158 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |

Hasil simulasi pola pengoperasian dari setiap pembangkit pada studi kasus ini dapat dilihat pada tabel 5 berikut ini:

Tabel 5.

Hasil Simulasi Daya Terbangkitkan dan Biaya Studi Kasus 2

| Ka-sus | Daya Pembangkitan (kW/h) | | | | | | Total Biaya Operasi (€/h) |
|--------|--------------------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|----------|---------------------------|
| | Sel Surya | Turbin Angin | Sel Bahan Bakar | Turbin Mikro | Generator Diesel | Bate-rai | |
| 1 | 24.44 | 32.63 | - | - | - | 19.93 | 0.08 |
| 2 | 24.44 | 16.32 | 5 | 5 | 27.93 | 30 | 1624.62 |
| 3 | 24.44 | 32.63 | 5 | 5 | 40.93 | 30 | 2153.57 |
| 4 | 24.44 | 32.63 | 5.93 | 5 | 50 | 30 | 2566.57 |
| 5 | 24.44 | 32.63 | 15.93 | 5 | 50 | 30 | 3018.76 |

Sehingga dapat terlihat perbedaan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit berbahan bakar dan baterai. Pengoperasian baterai menjadi prioritas utama dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar. Setelah penggunaan baterai, pengoperasian pembangkit generator diesel mendapat prioritas pengoperasian karena memiliki biaya operasi lebih murah dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar yang lainnya.

C. Studi Kasus 3

Pada studi kasus 3 total permintaan beban lebih besar dari total daya keluaran pembangkit sel surya dan pembangkit turbin angin sehingga dibutuhkan pembangkit berbahan bakar untuk memenuhi total permintaan beban. Berbeda dengan studi kasus 2, pada studi kasus ini tidak digunakan baterai pada sistem. APSO digunakan untuk menentukan daya pembangkitan yang optimal untuk masing-masing pembangkit berbahan bakar tersebut. Pada APSO ini diterapkan jumlah iterasi sebanyak 25 kali dengan jumlah partikel sebanyak 15. Untuk mengetahui perbedaan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit berbahan bakar dan baterai maka data masukan pembangkit baru-terbarukan disamakan seperti pada tabel 6 berikut ini:

Tabel 6.

Data Masukan Studi Kasus 3

| Ka-sus | Total Beban (kW) | Kecepatan Angin (m/s) | Jumlah Turbin Angin (unit) | Radiasi Matahari (W/m ²) | Suhu (°C) | Jumlah Sel Surya (modul) |
|--------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 77 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 2 | 125 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 3 | 138 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 4 | 148 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 5 | 158 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |

Beban yang digunakan pada studi kasus ini bervariasi sehingga didapatkan pola pengoperasian dari pembangkit yang berbeda-beda dan dapat dilihat pada tabel 7 berikut ini:

Tabel 7.

Hasil Simulasi Daya Terbangkitkan dan Biaya Studi Kasus 3

| Kasus | Daya Pembangkitan (kW/h) | | | | | | Total Biaya Operasi (€/h) |
|-------|--------------------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|----------|---------------------------|
| | Sel Surya | Turbin Angin | Sel Bahan Bakar | Turbin Mikro | Generator Diesel | Bate-rai | |
| 1 | 24.44 | 32.63 | 5 | 5 | 9.93 | 897.69 | |

| | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|----|---------|
| 2 | 24.44 | 32.63 | 12.93 | 5 | 50 | 2882.78 |
| 3 | 24.44 | 32.63 | 25 | 5.93 | 50 | 3475.25 |
| 4 | 24.44 | 32.63 | 25 | 15.93 | 50 | 3957.43 |
| 5 | 24.44 | 32.63 | 25 | 25.93 | 50 | 4441.62 |

Sehingga dapat terlihat perbedaan daya yang dibangkitkan oleh pembangkit berbahan bakar. Pengoperasian pembangkit generator diesel mendapat prioritas pengoperasian karena memiliki biaya operasi lebih murah dibandingkan dengan pembangkit berbahan bakar yang lainnya. Sedangkan pembangkit turbin mikro mendapatkan prioritas terakhir dalam pengoperasiannya karena memiliki biaya operasi yang paling mahal. Parameter beban yang digunakan pada studi kasus 3 ini disamakan dengan studi kasus 2 sehingga dapat terlihat perbedaan total biaya operasi yang dikeluarkan untuk memenuhi kebutuhan daya sistem.

Tabel 8.

| | Total Biaya Operasi (€/h) | | | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 77 kW | 125 kW | 138 kW | 148 kW | 158 kW |
| Menggunakan <i>energy storage</i> | 0.08 | 1624.62 | 2153.57 | 2566.57 | 3018.76 |
| Tanpa <i>energy storage</i> | 897.69 | 2882.78 | 3475.25 | 3957.43 | 4441.62 |

Berdasarkan dari kelima kasus variasi beban yang telah disimulasikan, dapat terlihat jika menggunakan baterai (*energy storage*) dalam sistem akan berpengaruh pada penghematan biaya operasi untuk pemenuhan kebutuhan sistem jika dibandingkan tanpa menggunakan baterai.

D. Studi Kasus 4

Pada studi kasus 4 ini dilakukan perbandingan hasil dari metode APSO dengan metode *quadratic programming*. Perbandingan ini dilakukan dengan memasukkan nilai beban yang berubah-ubah dengan kondisi data masukan pembangkit baru-terbarukan disamakan seperti pada tabel 9:

Tabel 9.

| Kasus | Total Beban (kW) | Kecepatan Angin (m/s) | Jumlah Turbin Angin (unit) | Radiasi Matahari (W/m ²) | Suhu (°C) | Jumlah Sel Surya (modul) |
|-------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 40 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 2 | 84 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |
| 3 | 175 | 10 | 2 | 1000 | 30 | 302 |

Beban yang digunakan pada studi kasus ini bervariasi sehingga didapatkan pola pengoperasian dari pembangkit berbahan bakar yang berbeda-beda. Data masukan studi kasus ini juga digunakan pada kedua metode untuk mendapatkan perbandingan hasil dari kedua metode tersebut. Hasil simulasi percobaan dengan menggunakan metode APSO dapat dilihat pada tabel 10. Sedangkan hasil simulasi percobaan dengan menggunakan metode QP dapat dilihat pada tabel 11.

Tabel 10.

Hasil Simulasi Daya Terbangkitkan, Biaya Operasi dan Waktu yang Dibutuhkan Studi Kasus 4 APSO

| Kasus | Daya Pembangkitan (kW/h) | | | | | | Biaya Operasi (€/h) | Waktu (s) |
|-------|--------------------------|--------------|-----------------|--------------|------------------|---------|---------------------|-----------|
| | Sel Surya | Turbin Angin | Sel Bahan Bakar | Turbin Mikro | Generator Diesel | Baterai | | |
| 1 | 24.4 | 32.63 | - | - | - | +19.9 | - | 0.0055 |
| 4 | - | - | - | - | - | 3 | - | 2 |
| 2 | 24.4 | 16.32 | - | - | - | - | 0.10 | 0.0043 |
| 4 | - | - | - | - | - | 26.93 | - | 2 |
| 3 | 24.4 | 32.63 | 25 | 12.93 | 50 | -30 | 3812.68 | 0.1780 |
| 4 | - | - | - | - | - | - | - | 8 |

Tabel 11.

Hasil Simulasi Daya Terbangkitkan, Biaya Operasi dan Waktu yang Dibutuhkan Studi Kasus 4 QP

| Kasus | Daya Pembangkitan (kW/h) | | | | | | Biaya Operasi (€/h) | Waktu (s) |
|-------|--------------------------|--------------|-----------------|--------------|-----------|---------|---------------------|-----------|
| | Sel Surya | Turbin Angin | Sel Bahan Bakar | Turbin Mikro | Generator | Baterai | | |

| | a | Bakar | Diesel | | | | |
|---|------|-------|--------|-------|----|-------|---------|
| 1 | 24.4 | 32.63 | - | - | - | +19.9 | 0.0058 |
| 3 | - | - | - | - | - | 3 | 8 |
| 2 | 24.4 | 16.32 | - | - | - | - | 0.10 |
| 4 | - | - | - | - | - | 26.93 | 1 |
| 3 | 24.4 | 32.63 | 25 | 12.93 | 50 | -30 | 3812.68 |
| 4 | - | - | - | - | - | - | 0.2603 |
| | | | | | | | 4 |

Sehingga dapat terlihat bahwa metode APSO maupun metode QP dapat menghasilkan nilai optimasi pembagian beban dan biaya operasi yang sama pada setiap pembangkit. Sehingga untuk membandingkan dapat ditinjau dari aspek lain yakni dimana berdasarkan hasil simulasi tersebut APSO memiliki kemampuan untuk mencari nilai optimum dalam waktu yang rata-rata lebih singkat, namun jumlah iterasi dan partikel pada metode APSO harus disesuaikan berdasarkan kompleksitas dari kasus yang ingin dioptimasi untuk mendapatkan hasil optimum yang konvergen pada setiap kali percobaan.

E. Studi Kasus 5

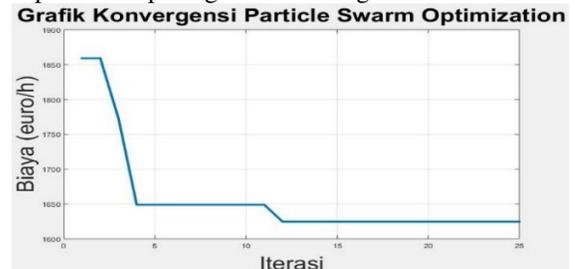
Pada studi kasus 5 ini dilakukan perbandingan metode PSO dengan metode APSO. Perbandingan ini dilakukan pada nilai beban 125 kW. Percobaan dilakukan sebanyak 4 kali untuk masing-masing metode seperti pada tabel 12 berikut:

Tabel 12.

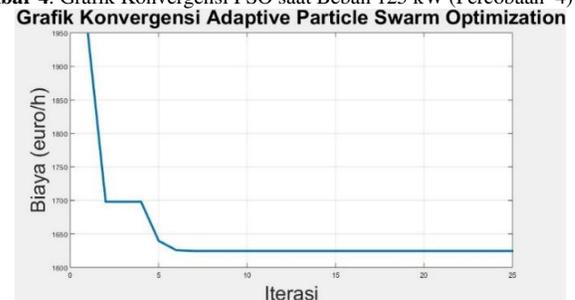
Hasil Simulasi PSO dan APSO

| | PSO | | | | APSO | | | |
|-------------------------|---------------|----|----|----|---------------|----|---|---|
| | Percobaan ke- | | | | Percobaan ke- | | | |
| Konvergensi iterasi ke- | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| | 20 | 19 | 11 | 12 | 8 | 10 | 9 | 7 |

Adapun grafik konvergensi PSO dan APSO pada percobaan ke-4 dapat dilihat pada gambar 4 dan gambar 5:



Gambar 4. Grafik Konvergensi PSO saat Beban 125 kW (Percobaan 4)



Gambar 5. Grafik Konvergensi APSO saat Beban 125 kW (Percobaan 4)

Sehingga dapat terlihat bahwa metode APSO mencapai nilai konvergensi lebih cepat dibandingkan dengan metode PSO. Dengan demikian, metode APSO yang digunakan pada penelitian ini memiliki efisiensi yang lebih baik.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis penelitian dari aplikasi ED pada sistem kelistrikan *microgrid* dengan *energy storage*

menggunakan APSO, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan algoritma APSO pada kasus ED mampu menentukan berapa besarnya daya yang dibangkitkan oleh setiap pembangkit yang ada berdasarkan permintaan beban dalam sistem kelistrikan *microgrid*. Sehingga kebutuhan beban dalam sistem dapat terpenuhi dengan biaya yang paling minimum.
2. Penggunaan *energy storage* dalam sistem kelistrikan *microgrid* memberikan pengaruh penghematan biaya operasi total jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan *energy storage*.
3. Algoritma APSO mampu mencapai nilai optimum pada nilai iterasi yang lebih singkat untuk mencapai nilai konvergensinya daripada algoritma PSO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pathom Attaviriyunpap, Student Member, IEEE, Hiroyuki Kita, Eiichi Tanaka, and Jun Hagewa, Member, IEEE. "A Hybrid EP and SQP for Dynamic Economic Dispatch With Nonsmooth Fuel Cost Function", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 17, No. 2, May 2002.
- [2] Hatzigiorgioudis, N. (2013). *Microgrids: Architectures and Control*, John Wiley & Sons. BELUM
- [3] de Souza Ribeiro, L., Saavedra, O., de Lima, S. and Gomes de Matos, J. (2011). Isolated microgrids with renewable hybrid generation: The case of lecois island, *Sustainable Energy, IEEE Transactions on* 2(1): 1–11.
- [4] D.W. Ross, S. Kim, "Dynamic Economic Dispatch of Generation", *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 6, pp. 2060-2068, Nov. 1980.
- [5] X. S. Han, H. B. Gooi, D. S. Kirschen, "Dynamic Economic Dispatch: Feasible and Optimal Solutions", *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 16, no.1, pp. 22-28, Feb.2001.
- [6] Mohammed Faisal A, Koivo Heikki., "System modelling and online optimal management of MicroGrid using Mesh Adaptive Direct Search", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 32, no 5. 2010, pp. 398-407. BELUM
- [7] Logenthiran, T. and Srinivasan, D. (2009). "Short term generation scheduling of a microgrid", *TENCON 2009-2009 IEEE Region 10 Conference, IEEE*, pp. 1–6.
- [8] Modiri-Delshad, M., Koohi-Kamali, S., Taslimi, E., Kaboli, A., Hr, S. and Rahim, N. (2013). "Economic dispatch in a microgrid through an iterated-based algorithm", *Clean Energy and Technology (CEAT)*, 2013 IEEE Conference on, IEEE, pp. 82–87.
- [9] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", In *IEEE Int. Conf on Neural Networks*, Perth, Australia, 1942-1948, 1995.
- [10] Y. Shi, R. Eberhart, "Empirical Study of particle swarm optimization", In *Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Piscataway, NJ, IEEE Press, pp 1945-1950, 1999.
- [11] K.T. Chaturvedi, M. Pandit, L. Srivastava, "Self-organizing hierarchical particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch", *IEEE Trans. Power Syst.* 23 (3) (2008) 1079-1087.
- [12] Xiaoping Liu, Ming Ding, Jianghong Han, Pingping Han and Yali Peng, "Dynamic Economic Dispatch for Microgrids Including Battery Energy Storage", *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, 2010.
- [13] Deckmyn Christof, L. Vandoom Tine, Moradzades Mohammad and Vandeveld Lieven, "Multi-objective optimization for environmental scheduling in microgrids", 2014.
- [14] Amjady Nima, Rezai Soleymanpour Hassan, "Daily Hydrothermal Generation Scheduling by a new Modified Adaptive Particle Swarm Optimization technique", 2009.
- [15] ReDriven 20 kW, ReDriven Power Inc.