

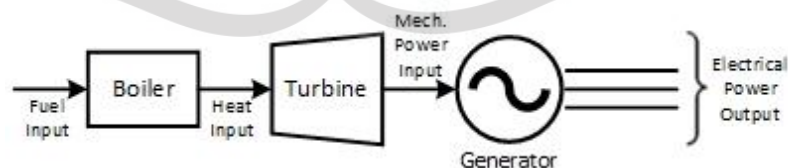
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### A. Landasan Teori

##### 1. Sistem Pembangkitan

Salah satu komponen penting dalam sistem tenaga adalah generator sinkron atau generator AC. Generator sinkron memiliki dua medan berputar yang sinkron: Salah satunya dihasilkan oleh rotor yang digerakkan pada kecepatan yang sinkron dan dieksitasi oleh arus DC. Arus DC untuk belitan rotor disediakan oleh sistem eksitasi. Dewasa ini generator AC menggunakan *rotating rectifier*, yang disebut juga sistem *brushless excitation*. Sistem eksitasi generator berfungsi menjaga tegangan generator dan mengendalikan aliran daya reaktif. Sumber daya mekanis, umumnya dikenal sebagai *prime mover* (penggerak mula), dapat berupa turbin hidroelektrik pada air terjun, turbin uap dengan sumber energi dari pembakaran batu bara, gas, dan bahan bakar nuklir, turbin gas, atau mesin pembakaran internal dengan bahan bakar minyak (Saadat, 2011).



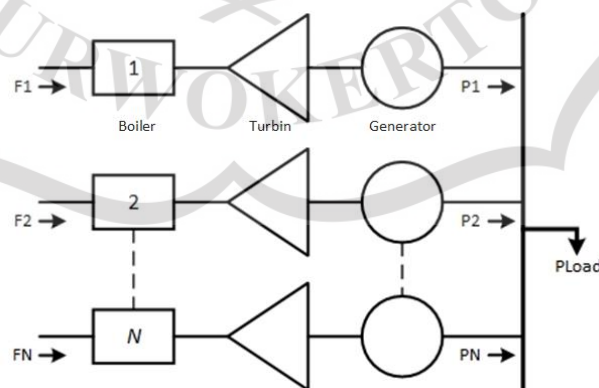
**Gambar 2.1 Sistem Pembangkit Thermal**

**(Sumber: Dokumentasi Pribadi)**

## 2. Economic Dispatch

*Economic dispatch* (ED) adalah kalkulasi untuk menemukan pengoperasian pembangkit dengan biaya paling rendah untuk suatu set pembangkit yang dibatasi oleh batasan-batasan individual dan menghasilkan total pembangkitan yang sama dengan total beban ditambah rugi-rugi (Wood et al., 2014). ED berfokus pada koordinasi daya yang diproduksi serta biaya yang dihasilkan pada semua pembangkit listrik yang beroperasi pada sistem.

Dalam pelaksanaannya, unit pembangkit dengan karakteristik biaya pembangkitan yang rendah akan diprioritaskan penggunaannya selama operasi. Pembebanan pada pembangkit dibagi berdasarkan karakteristik-karakteristik yang dimiliki oleh pembangkit, tiap-tiap unit pembangkit memiliki karakteristik yang berbeda. Efisiensi dan rugi-rugi dari tiap unit pembangkit merupakan penyebab perbedaan karakteristik tersebut, kemudian dari karakteristik tersebut dapat dibuat menjadi persamaan matematis.



**Gambar 2.2** Sistem pembangkit  $N$  unit untuk melayani beban  $P_{load}$

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Gambar 2.2 menunjukkan konfigurasi sistem dari  $N$  unit pembangkit thermal yang terhubung ke satu bus bar yang melayani beban listrik  $P_{load}$ . Masukan pada tiap unit, yang ditunjukkan sebagai  $F_i$ , mewakili tingkat biaya dari tiap unit. Keluaran dari setiap unit,  $P_i$ , adalah daya listrik yang dibangkitkan oleh unit tertentu. Total tingkat biaya dari sistem ini adalah jumlah biaya tiap individu unit. Kendala penting dalam operasi sistem ini yaitu bahwa jumlah daya keluaran harus sama dengan permintaan beban. Secara matematis,  $F_T$  sama dengan biaya total untuk memasok beban yang diperlukan. Permasalahannya adalah untuk meminimalisir  $F_T$  yang dibatasi oleh batasan bahwa jumlah daya yang dibangkitkan harus setara dengan beban yang diterima. Perhatikan bahwa seluruh rugi-rugi transmisi diabaikan dan batasan operasi tidak dinyatakan secara eksplisit saat merumuskan masalah ini, yaitu (Wood et al., 2014):

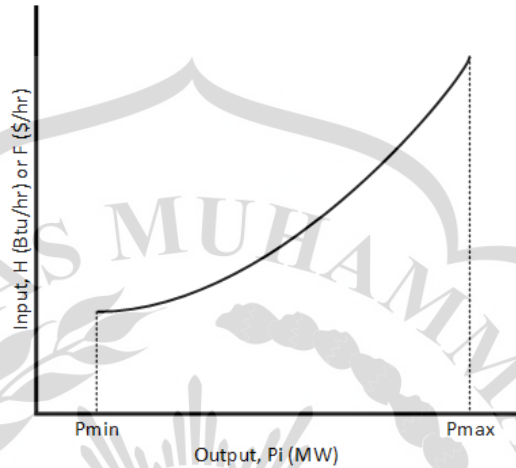
$$F_T = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_N \quad (2.1)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (2.2)$$

### 3. Karakteristik *Input-Output*

Masukan pada unit pembangkit thermal dapat dinyatakan dalam K-cal/hr atau dalam H (Btu/hr) atau dapat dinyatakan juga sebagai fungsi biaya  $F$  (\$/hr) dan keluarannya adalah daya minimum dan maksimum, diukur dengan satuan W (watt) dalam orde kilo maupun mega (Saadat, 2011). Kurva *input-output* dalam bentuk

sederhana dari sebuah unit thermal berupa kurva laju panas ditunjukkan seperti pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3 Kurva *Input-Output***

**(Sumber: Dokumentasi Pribadi)**

Gambar 2.3 menunjukkan kurva karakteristik *input-output* ideal yang tidak linier dan kontinu. Biaya bahan bakar pada generator dapat digambarkan seperti fungsi polinomial kuadrat dari daya nyata pada pembangkit, yaitu (Cekdin, 2010):

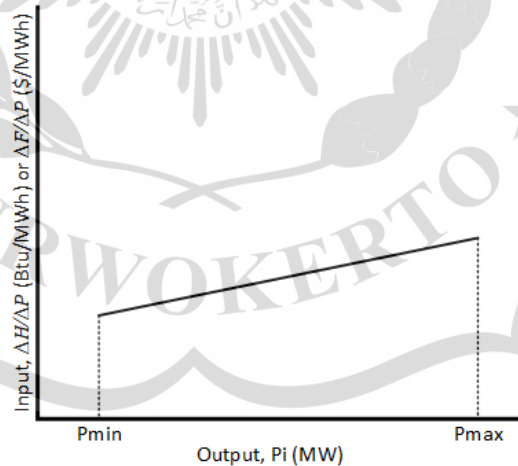
$$C_T = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2.3)$$

Pada persamaan (2.3),  $C_T$  merupakan nilai total biaya bahan bakar. Koefisien  $a_i$  menggambarkan kelengkungan dari kurva laju panas dan merepresentasikan bagaimana laju panas berubah bersamaan dengan nilai kuadrat dari daya keluaran. Nilai  $a_i$  dapat dipengaruhi oleh efisiensi unit pada titik operasi yang berbeda. Koefisien  $b_i$  mewakili *slope* dari persamaan tersebut dan berkontribusi pada variasi laju panas yang linear terhadap daya keluaran. Nilai  $b_i$

dapat dipengaruhi oleh rugi-rugi yang nilainya proporsional terhadap daya yang dibangkitkan. Koefisien  $c_i$  merupakan konstanta pada persamaan tersebut, mewakili titik potong parabola pada sumbu y. Nilai  $c_i$  menggambarkan laju panas ketika *plant* belum membangkitkan daya keluaran.

#### 4. Karakteristik *Incremental Fuel Cost*

Karakteristik *incremental fuel cost* merupakan *slope* dari karakteristik *input-output* ( $\Delta H/\Delta P$  atau  $\Delta F/\Delta P$ ), menggambarkan perubahan biaya bahan bakar terhadap daya yang dibangkitkan. Jika fungsi kuadrat *input-output* dinyatakan dalam bentuk ideal, kontinu dan mulus, maka karakteristik *incremental fuel cost* akan memiliki garis linier seperti gambar berikut (Wood et al., 2014).



**Gambar 2.4 Kurva Biaya Bahan Bakar**

**(Sumber: Dokumentasi Pribadi)**

## 5. Batasan Operasi

Batasan operasi yang umum digunakan dalam *economic dispatch* statis adalah *equality constraint* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* adalah batasan yang mempresentasikan keseimbangan daya dalam sistem.

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L \quad (2.4)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$P_D$  : Permintaan daya

$P_L$  : Rugi-rugi transmisi

$P_i, P_j$  : Daya nyata dari unit i dan j

$B_{ij}$  : Matriks persegi dengan dimensi yang sama dengan P

$B_{0i}$  : Vektor dengan panjang yang sama dengan P

$B_{00}$  : Koefisien konstan

*Inequality constraint* merupakan batasan yang menunjukkan kapasitas daya nyata minimum dan maksimum yang dapat dibangkitkan oleh unit i (Cekdin, 2010).

$$P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i(\max)} \quad (2.6)$$



## 6. *Dynamic Economic Dispatch*

*Dynamic economic dispatch* (DED) merupakan perluasan permasalahan ED, dimana pada DED, permintaan beban selalu berubah nilainya setiap periode dalam rentang 24 jam. Dalam perhitungan DED, setidaknya perlu menambahkan *ramp rate limit* sebagai salah satu batasan yang diterapkan. *Ramp rate limit* merupakan batasan dinamis yang digunakan untuk menjaga kinerja unit pembangkit. Dalam bentuk persamaan, *ramp rate limit* merupakan besaran laju perubahan daya keluaran pembangkit per satuan waktu, besaran ini menyebabkan keluaran daya pembangkit tidak dapat disesuaikan secara instan tanpa batas. Penambahan *ramp rate limit* mempengaruhi batasan operasi pembangkit seperti berikut (Trivedi et al., 2016):

$$\max (P_{i(\min)}, P_i^{t-1} - DR_i) \leq P_i \leq \min (P_{i(\max)}, P_i^{t-1} + UR_i) \quad (2.7)$$
$$t = 1, 2, 3, \dots, T - 1$$

Dimana  $DR_i$  adalah *down-ramp limit* dari unit  $i$ , dan  $UR_i$  adalah *up-ramp limit* dari unit  $i$ .

Setiap unit pembangkit memiliki *prohibited operating zones* (area dimana keluaran pembangkit dibatasi) yang disebabkan oleh sistem *auxiliary* yang terhubung dan batasan komponen pada unit pembangkit. Apabila pembangkit beroperasi pada area POZ, maka pembangkit akan merasakan getaran drastis yang

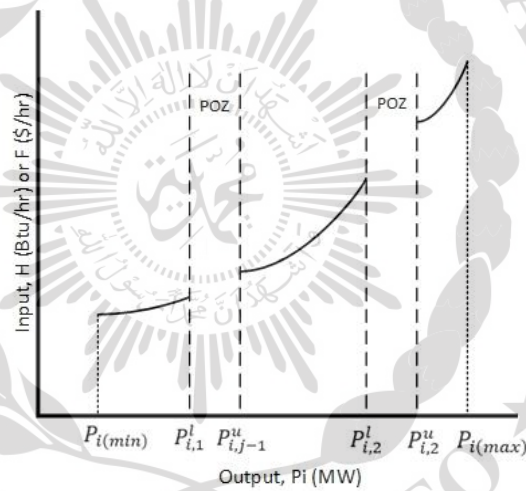
mengganggu pada *shaft bearing* dan dapat menyebabkan kerusakan. Zona operasi unit  $i$  yang sesuai dapat digambarkan seperti berikut (Trivedi et al., 2016):

$$P_{i(\min)} \leq P_i \leq P_{i,1}^l \quad (2.8)$$

$$P_{i,j-1}^u \leq P_i \leq P_{i,2}^l \quad (2.9)$$

$$P_{i,n_i}^u \leq P_i \leq P_{i(\max)} \quad (2.10)$$

$$j = 2, 3, 4, \dots, n_i$$



**Gambar 2.5 Kurva *Input-Output* dengan POZ**

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

Dimana  $j$  merupakan jumlah POZ pada unit  $i$ , dan  $P_{i,j}^l$  serta  $P_{i,j}^u$  merupakan batas bawah dan batas atas POZ (Trivedi et al., 2016).



## 7. Constriction Factor Particle Swarm Optimization

Hingga kini berbagai metode telah dikembangkan oleh para ahli bidang tenaga listrik maupun *computer science* untuk memecahkan permasalahan ED. Lim et al. (2009), menyebutkan bahwa metode konvensional tidak dapat menyelesaikan permasalahan ED yang *non-linear* dan *non-smooth*. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *Dynamic Programming* (DP), namun DP memiliki kecenderungan untuk menemukan optimasi lokal. Di sinilah metode-metode seperti *evolutionary programming*, *genetic algorithm*, *tabu search*, *artificial neural network*, dan *particle swarm optimization* berperan.

*Particle swarm optimization* (PSO) merupakan teknik optimasi berbasis stokastik yang dikembangkan oleh Kennedy dan Eberhart pada 1995 (Lim et al., 2009). Algoritma PSO didasarkan pada perilaku sosial organisme. Perilaku sosial terdiri dari perilaku individu dan pengaruh perilaku individu lain dalam kelompok. Kata "partikel" merujuk pada individu, contohnya seperti seekor burung dalam kawanan burung. Setiap individu atau partikel beroperasi dalam kelompok dengan menggunakan kecerdasannya sendiri dan juga dipengaruhi oleh perilaku kelompok secara kolektif.

Pada PSO konvensional, anggaplah permasalahannya memiliki  $n$  dimensi dan sebuah populasi partikel yang bergerak dalam suatu ruang pencarian untuk mencari sebuah solusi. Setiap partikel memiliki vektor posisi ( $X_i$ ) dan vektor kecepatan ( $V_i$ ). Setiap partikel memiliki memori terkait posisi terbaik ( $P_{best}$ ) dalam

ruang pencarian yang telah dilaluinya, dan mengetahui lokasi terbaik yang telah ditemukan oleh seluruh partikel dalam *swarm* ( $G_{best}$ ). Pada setiap langkah, velositas dari partikel  $i$  akan diperbaharui menurut persamaan berikut:

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 r_1 (P_{best_i}^k - X_i^k) + c_2 r_2 (G_{best_i}^k - X_i^k) \quad (2.11)$$

Keterangan:

$V_i^k$  : Velositas individu  $i$  pada iterasi  $k$

$X_i^k$  : Posisi individu  $i$  pada iterasi  $k$

$\omega$  : Berat inersia

$c_1, c_2$  : Koefisien akselerasi individu dan sosial (2.05)

$r_1, r_2$  : Angka acak antara 0 hingga 1

$P_{best_i}^k$  : Posisi terbaik individu  $i$  pada iterasi  $k$

$G_{best_i}^k$  : Posisi terbaik grup  $i$  pada iterasi  $k$

Pada proses *velocity update*, koefisien akselerasi serta bilangan acak sudah ditentukan sebelumnya. Metode *Constriction Factor Particle Swarm Optimization* (CFPSO) merupakan modifikasi dari algoritma PSO konvensional. Berbeda dengan PSO konvensional, algoritma CFPSO merupakan algoritma *metaheuristic*. Persamaan dasar algoritma PSO dimodifikasi dengan penambahan parameter

*constriction factor*, yang bertujuan untuk mempercepat penelusuran algoritma PSO menuju konvergensi (Syah et al., 2012). Persamaan modifikasi *velocity* pada setiap partikel dengan menggunakan *constriction factor* dinyatakan sebagai berikut (Lim et al., 2009):

$$V_i^{k+1} = K[V_i^k + c_1r_1(P_{best_i}^k - X_i^k) + c_2r_2(G_{best_i}^k - X_i^k)] \quad (2.12)$$

Dengan  $K$  (*constriction factor*), yaitu:

$$K = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|} \quad (2.13)$$

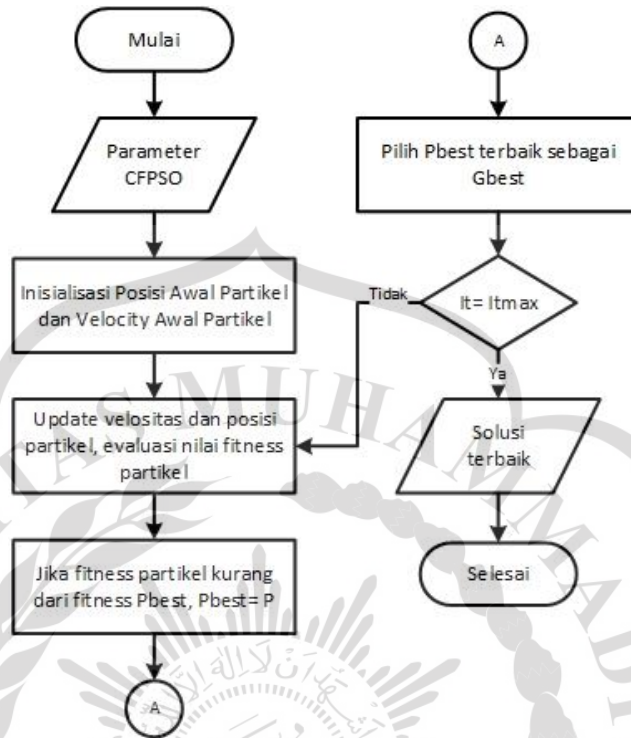
Dimana,  $\varphi = c_1 + c_2$  dan  $\varphi > 4$

Dengan velositas yang dimodifikasi, tiap individu bergerak dari posisinya masing-masing ke posisi selanjutnya menggunakan persamaan berikut:

$$X_i^{k+1} = X_i + V_i^{k+1} \quad (2.14)$$

Keterangan:

$X_i^{k+1}$  : Posisi individu  $i$  pada iterasi  $k+1$



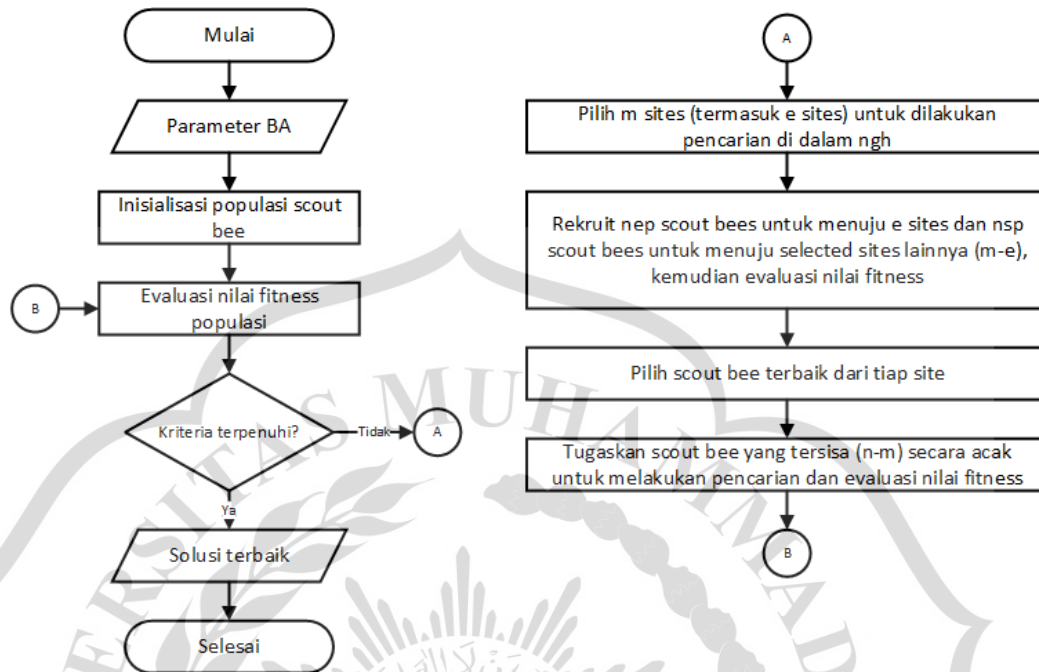
**Gambar 2.6 Diagram Alir Algoritma CFPSO**  
(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

### 8. *Bees Algorithm*

*Bees algorithm* (BA) adalah teknik optimasi *metaheuristic* berbasis *swarm* yang diusulkan oleh Pham D.T. pada tahun 2005. Algoritma ini terinspirasi oleh perilaku alami lebah madu dalam mencari makanan. Lebah madu menggunakan beberapa mekanisme untuk mencari dan mengeksploitasi sumber makanan. Mekanismenya terdiri dari tiga komponen penting, yaitu lokasi sumber makanan, *scout bee* yang tidak bekerja, dan *scout bee* yang dipekerjakan (Sharma et al., 2016).

Hal yang membedakan antara BA dengan metode optimasi berbasis *swarm* lainnya yang juga terinspirasi oleh perilaku lebah adalah proses *waggle dance*. Secara singkat, proses tersebut merupakan proses transfer informasi dari *scout bee* yang sudah menemukan sumber makanan kepada *scout bee* yang masih berada di dalam sarang. Algoritma ini memerlukan sejumlah parameter untuk ditentukan, yaitu:

1.  $nc$  : Jumlah iterasi
2.  $ns$  : Jumlah *scout bee* atau populasi lebah pekerja
3.  $m$  : Jumlah *selected site* yang dipilih oleh *scout bee*
4.  $e$  : Jumlah *elite site* dari seluruh *selected site*
5.  $nep$  : Jumlah *scout bee* yang dipekerjakan untuk menuju *elite site*
6.  $nsp$  : Jumlah *scout bee* yang dipekerjakan untuk menuju *selected site* ( $m-e$ )
7.  $ngh$  : *Neighborhood radius*



**Gambar 2.7 Diagram Alir *Bees Algorithm***

(Sumber: Dokumentasi Pribadi)

## 9. Sistem IEEE 6 Unit Thermal

Sistem IEEE n-unit thermal lebih umum digunakan untuk menyelesaikan simulasi *dynamic economic dispatch* dibandingkan untuk menyelesaikan simulasi *static economic dispatch* maupun *optimal power flow* yang memerlukan data saluran bus untuk menghitung aliran daya pada sistem. Sebagian besar parameter yang ada pada sistem IEEE n-unit thermal berupa koefisien, sehingga memudahkan dalam mengaplikasikan parameter tersebut ke dalam persamaan. Sistem IEEE 6 unit thermal terdiri dari enam buah pembangkit thermal dengan



total keluaran 1470 MW. Parameter-parameter dari sistem ini yaitu sebagai berikut:

**Tabel 2.1 Permintaan Beban Sistem IEEE 6 Unit Thermal**

Jam	Beban	Jam	Beban	Jam	Beban	Jam	Beban
1	963	7	997	13	1263	19	1170
2	949	8	1032	14	1276	20	1102
3	942	9	1136	15	1262	21	1031
4	937	10	1160	16	1233	22	992
5	942	11	1212	17	1213	23	983
6	971	12	1247	18	1263	24	967

**Tabel 2.2 Kapasitas dan Koefisien Bahan Bakar Sistem IEEE 6 Unit Thermal**

Unit	Batas Generator		$P_0$	Koefisien Bahan Bakar		
	$P_{min}$	$P_{max}$		$a_i$	$b_i$	$c_i$
1	100	500	440	0.007	7	240
2	50	200	170	0.0095	10	200
3	80	300	200	0.009	8.5	220
4	50	150	150	0.009	11	200
5	50	200	190	0.008	10.5	220
6	50	120	110	0.0075	12	190

**Tabel 2.3 Ramp Rate Limit dan Prohibited Operating Zones Sistem IEEE 6 Unit Thermal**

Unit	UR	DR	POZ
1	80	120	[210 240] [350 380]
2	50	90	[90 110] [140 160]
3	65	100	[150 170] [210 240]
4	50	90	[80 90] [110 120]
5	50	90	[90 110] [140 150]
6	50	90	[75 85] [100 105]

*Loss Coefficients* Sistem IEEE 6 Unit Thermal

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0001 & -0.001 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.001 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.015 \end{bmatrix} \times 10^{-2}$$

$$B_{0i} = [-0.3908 \quad -0.1297 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.6635] \times 10^{-3}$$

$$B_{00} = 0.056$$

**10. Sistem IEEE 15 Unit Thermal**

Sistem ini terdiri dari 15 unit pembangkit thermal dengan total keluaran mencapai 3542 MW. Parameter rugi-rugi transmisi ditampilkan pada bab lampiran. Parameter-parameter pada sistem ini yaitu seperti berikut:

**Tabel 2.4 Permintaan Beban Sistem IEEE 15 Unit Thermal**

Jam	Beban	Jam	Beban	Jam	Beban	Jam	Beban
1	2255.51	7	2352.16	13	2813.57	19	2679.33
2	2234.21	8	2466.50	14	2866.57	20	2610.13
3	2245.35	9	2678.78	15	2997.24	21	2455.29
4	2255.51	10	2759.15	16	2994.14	22	2332.85
5	2312.91	11	2816.76	17	2942.92	23	2280.89
6	2336.92	12	2818.89	18	2838.31	24	2273.77

**Tabel 2.5 Kapasitas dan Koefisien Bahan Bakar Sistem IEEE 15 Unit Thermal**

Unit	Batas Generator		$P_0$	Koefisien Bahan Bakar		
	$P_{min}$	$P_{max}$		$a_i$	$b_i$	$c_i$
1	150	455	400	0.000290	10.1	671
2	150	455	300	0.000183	10.2	574
3	20	130	105	0.001126	8.8	374
4	20	130	100	0.001126	8.8	374
5	150	470	90	0.000205	10.4	461
6	135	460	400	0.000301	10.1	630
7	135	465	350	0.000364	9.8	548
8	60	300	95	0.000338	11.2	227
9	25	162	105	0.000807	11.2	173
10	25	160	110	0.001203	10.7	175
11	20	80	60	0.003586	10.2	186
12	20	80	40	0.005513	9.9	230
13	25	85	30	0.000371	13.1	225
14	15	55	20	0.001929	12.2	309
15	15	55	20	0.004447	12.4	323

**Tabel 2.6 Ramp Rate Limit dan Prohibited Operating Zones Sistem IEEE 15 Unit Thermal**

Unit	UR	DR	POZ
1	80	120	
2	80	120	[185 225] [305 335] [420 450]
3	130	130	
4	130	130	
5	80	120	[180 200] [305 335] [390 420]
6	80	120	[230 255] [365 395] [430 455]
7	80	120	
8	65	100	
9	60	100	
10	60	100	
11	80	80	
12	80	80	[30 40] [55 65]
13	80	80	
14	55	55	
15	55	55	

## 11. Software Matlab

Matlab adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh MathWorks untuk melakukan perhitungan numerik, visualisasi, dan pemrograman. Dalam penerapan algoritma optimasi, Matlab memiliki banyak fitur dan fungsi yang sangat berguna. Beberapa di antaranya adalah pemodelan matematis, optimasi, pengolahan sinyal, simulasi sistem, dan visualisasi data. Dalam pemodelan matematis, Matlab dapat digunakan untuk membangun model matematika dari sistem yang kompleks dengan mudah dan cepat. Matlab juga memiliki fungsi untuk melakukan analisis matematika yang sangat berguna dalam penerapan algoritma optimasi.

Matlab juga memiliki fitur optimasi numerik yang dapat digunakan untuk menemukan nilai maksimum atau minimum dari suatu fungsi sehingga pengguna dapat menyelesaikan berbagai jenis masalah optimasi, termasuk optimasi linear, non-linear, dan *multi-objective*. Selain itu, Matlab dapat digunakan untuk membangun dan memvalidasi model simulasi sistem. Dalam penerapan algoritma optimasi, simulasi sistem sangat berguna untuk menguji dan mengevaluasi kinerja algoritma.

## B. Hipotesis

Penerapan metode CFPSO dapat menyelesaikan simulasi DED tanpa melanggar batasan yang diterapkan pada kedua sistem dan mencapai konvergensi dengan cepat.