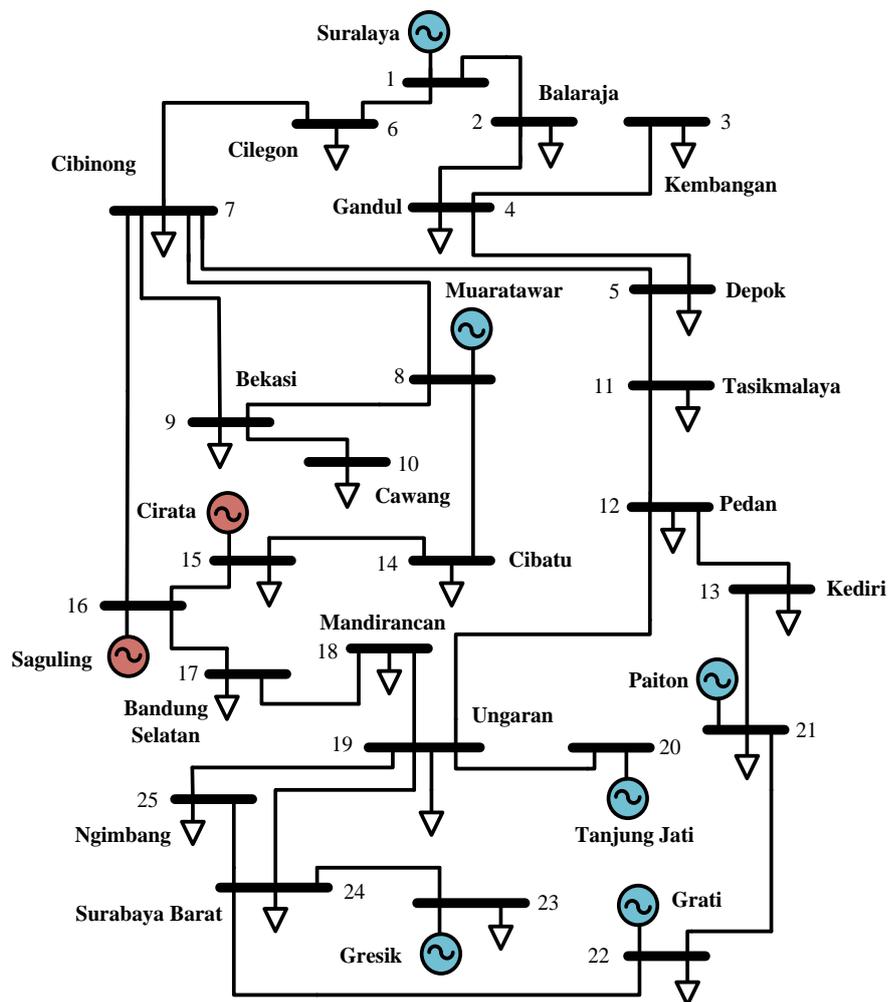


## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian penjadwalan pembangkit termal pada sistem interkoneksi 500kV Jawa-Bali ini adalah untuk membandingkan metode *Simulated Annealing* dengan metode yang digunakan PLN.

#### 3.1 Sistem Interkoneksi 500kV Jawa Bali



Gambar 3.1 Diagram satu garis sistem 500kV Jawa-Bali

(sumber : PLN P3B Gandul)

Sistem interkoneksi 500 kV Jawa Bali terdiri atas 28 bus dengan 31 saluran dan 8 pembangkit. Pembangkit-pembangkit yang terhubung antara lain pembangkit

Suralaya, pembangkit Muaratawar, pembangkit Cirata, pembangkit Saguling, pembangkit Tanjungjati, pembangkit Gresik, pembangkit Paiton, dan Pembangkit Grati. Diantara 8 pembangkit tersebut, pembangkit Cirata dan pembangkit Saguling merupakan pembangkit tenaga air, sedangkan pembangkit yang lainnya merupakan pembangkit listrik tenaga uap, adapun pembangkit Suralaya bertindak sebagai pembangkit slack.

Sistem tenaga listrik Jawa-Bali dibagi menjadi 4 (empat) region. Jakarta Raya dan Banten disebut region 1, Jawa Barat disebut region 2, Jawa Tengah dan D.I.Y disebut region 3, serta Jawa Timur dan Bali disebut region 4. Operasi sistem untuk masing-masing region dikendalikan oleh satu *Regional Control Center* (RCC), yaitu RCC Cawang untuk region Jakarta Raya dan Banten, RCC Cigereleng untuk region Jawa Barat, RCC Ungaran untuk region Jawa Tengah dan DIY dan RCC Waru untuk region Jawa Timur dan Bali. Khusus untuk kawasan Bali, terdapat subRCC yang secara teknis berfungsi sebagai region tetapi secara administratif berada dibawah region Jawa Timur dan Bali. Untuk selurus sistem terdapat *Jawa-Bali Control Center* (JCC).

### 3.2 Pengumpulan Data Pembangkit

Data yang digunakan dalam menentukan koordinasi pembangkit adalah data *heat rate* pembangkit *thermal* sistem 500kV Jawa-Bali dan data pembebanan (*Logsheet*) pada tanggal 9 September 2013. Data *heat rate* tersebut akan diolah dan dijadikan persamaan biaya bahan bakar sebagai variabel input untuk pengujian algoritma *simulated annealing* untuk optimasi dalam koordinasi pembangkitan unit thermal dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2010a.

Tabel 3.1 Data heat rate pembangkit *thermal* sistem 500kV

(sumber : PLN P3B Gandul)

Pembangkit	Daya Pembangkitan (MW)				Heat Rate (Mbtu/kWh)			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Suralaya	1703	2221	2561	3247	76.4922	74.4933	73.4542	71.7965
Muaratawar	736	986	1233	1420	147.641	137.1738	122.5266	119.001
Tanjungjati	1227	1525	1812.8	1982.8	28.8	28.48389	28.18652	27.978
Gresik	1061	1355	1675	1993	224.047	222.5759	221.8739	221.263

Binanta Pran Seda Tarigan, 2015

APLIKASI ALGORITMA SIMULATED ANNEALING PADA SISTEM KOORDINASI PEMBANGKITAN UNIT THERMAL

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu

Paiton	2071.5	2792.5	3358.75	4005	76.1617	73.0132	70.8403	68.8973
Grati	330	402	527	746.6	105.511	95.3783	92.9114	91.1029

Tabel 3.2 Harga bahan bakar masing-masing pembangkit

Pembangkit	Biaya Bahan bakar (\$/Jam)
Suralaya	296.1916
Muaratawar	651.32475
Tanjungjati	158.4425
Gresik	323.4908
Paiton	333.3285
Grati	335.2737

Tabel 3.1 merupakan data *heat reat* (laju panas) pembangkit *thermal* sistem 500 KV Jawa-Bali. Setiap unit pembangkit terdiri dari empat titik *heat reat* yang diperoleh dari hasil percobaan. Apabila data tersebut diolah maka akan diperoleh persamaan laju panas dari pembangkit *thermal* dalam MMbtu/h. Perkalian persamaan laju panas dengan biaya bahan bakar akan menghasilkan persamaan baru yang menggambarkan karakteristik biaya bahan bakar pembangkit *thermal*. Tabel 3.2 merupakan harga bahan bakar dari masing-masing pembangkit (\$/jam). Untuk mendapatkan biaya bahan bakar pembangkit (\$MMBtu) yang akan dikalikan dengan persamaan laju panas dapat digunakan rumus berikut ini :

$$FC = \frac{BB}{Q} \quad (3-1)$$

Dimana :

FC : Biaya bahan bakar (\$/MMbtu)

BB : Biaya bahan bakar (\$/jam)

Q : Hasil kali antara *heat rate* dengan daya pembangkitan (MWbtu/Wh)

Tabel 3.3 Biaya bahan bakar masing-masing pembangkit (\$/MMbtu)

Pembangkit	Biaya bahan bakar (\$/MMbtu)
Suralaya	0.4131
Muaratawar	1.15488
Tanjungjati	0.854832

Gresik	0.2392
Paiton	0.3807
Grati	1.7632

Sesuai dengan salah satu tujuan dari operasi sistem tenaga listrik yaitu untuk memenuhi kebutuhan permintaan daya dengan biaya yang minimum, dimana sistem harus aman dengan dampak terhadap lingkungan dibawah standar, mempunyai keandalan yang memenuhi standar dan dapat memenuhi permintaan secara *continue* sepanjang waktu, maka dalam mengoperasikan pembangkit listrik haruslah memperhatikan batas-batas dari pembangkit tersebut agar sistem tetap dalam keadaan stabil. Salah satu batas-batas yang harus diperhatikan dalam mengoperasikan pembangkit listrik adalah batas daya minimum dan daya maksimum yang dimiliki oleh pembangkit tersebut, yang berarti bahwa suatu pembangkit listrik tidak dapat dioperasikan dibawah daya minimum dan juga diatas daya maksimum dari pembangkit listrik tersebut.

Tabel 3.4 Batas pengoperasian daya pembangkit

Pembangkit	Pmin	Pmaks
Suralaya	1600	3400
Muaratawar	600	1500
Tanjungjati	1200	2100
Gresik	900	2100
Paiton	1800	4300
Grati	290	800

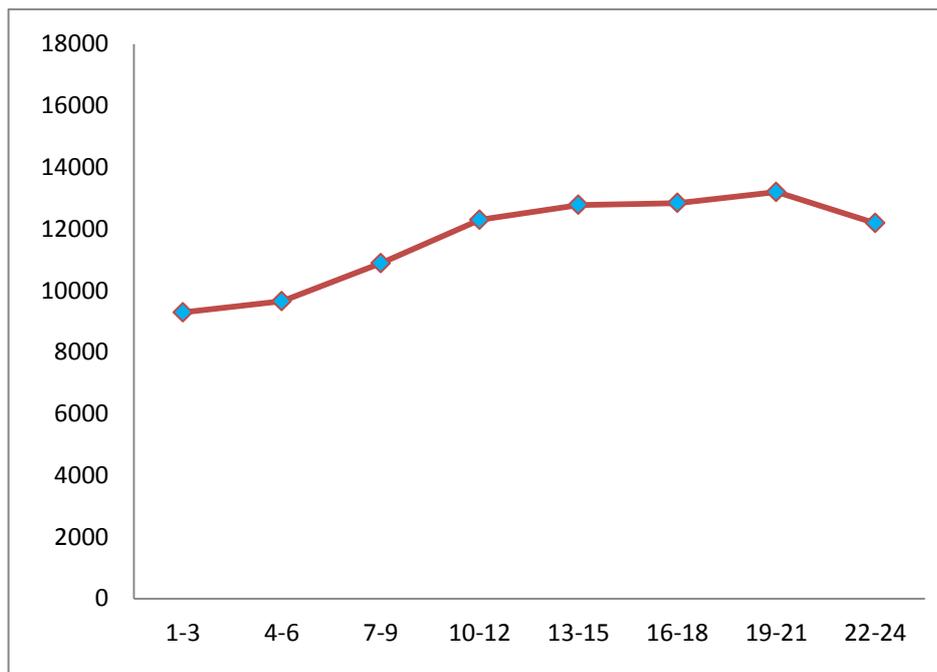
Optimasi pada sistem tenaga listrik khususnya pada masalah koordinasi pembangkit, mengharuskan untuk mencari kombinasi dari beberapa unit pembangkit dengan biaya yang paling murah . Salah satu cara untuk mencari biaya termurah tersebut dapat dilakukan dengan membuat urutan prioritas, yang akan merepresentasikan pembangkit-pembangkit dari biaya yang paling murah hingga biaya yang paling mahal. Urutan prioritas diurutkan berdasarkan biaya rata-rata beban maksimum (*full load average*) yang paling murah. Cara untuk

mendapatkan biaya rata-rata yang paling murah dapat dilakukan dengan mengalikan persamaan laju pertambahan biaya bahan bakar (*incremental cost*) masing-masing unit pembangkit dengan daya maksimum dari pembangkit tersebut. Urutan prioritas pembangkit sistem 500kV Jawa-Bali dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 3.5 Urutan prioritas pembangkit sistem 500kV Jawa-Bali

Pembangkit	Harga produksi (\$/kWh)	Urutan
Paiton	0.0215449	1
Tanjungjati	0.021724	2
Suralaya	0.0265871	3
Gresik	0.0523438	4
Muaratawar	0.0790631	5
Grati	0.1818127	6

Data uji yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah *Logsheet* pada hari senin tanggal 9 September 2013 yang diperoleh dari PT.PLN (Persero) P3B Gandul-Depok, grafik pembebanan pada tanggal 9 September 2013 dapat dilihat pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik beban unit *thermal* sistem 500kV( senin, 9 september 2013)

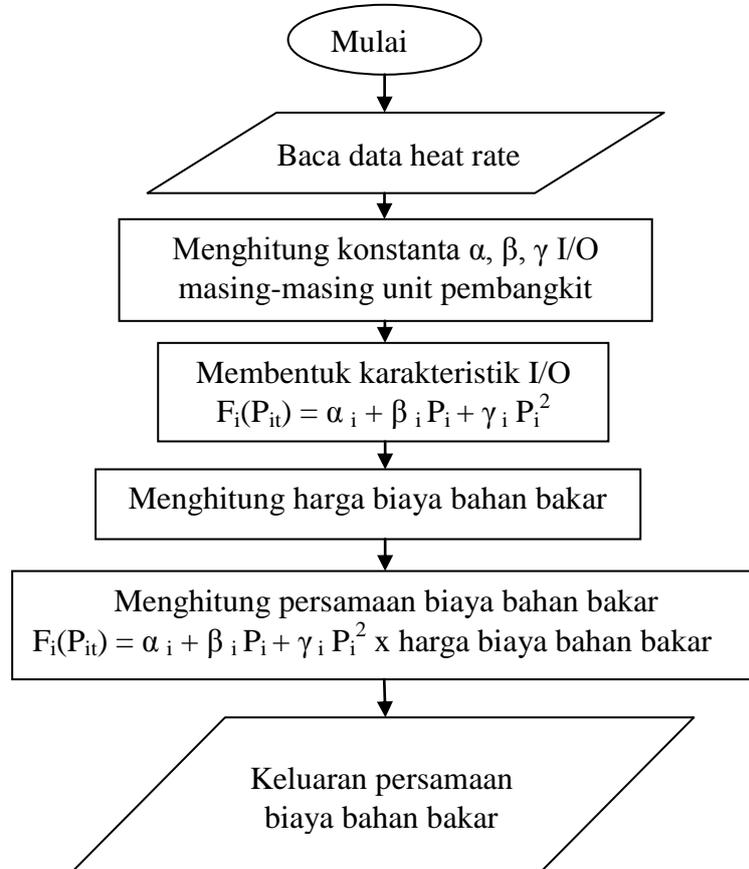
Beban pembangkit unit *thermal* sistem 500kV Jawa-Bali terdiri dari 24 jam yang kemudian dibagi menjadi 8 periode, dimana tiap periodenya merupakan beban rata-rata selama 3 jam. Dari grafik beban tersebut dapat dilihat bahwa beban berubah-ubah tiap periodenya dikarenakan beban akan mengikuti siklus kegiatan manusia sehari-hari, oleh sebab itu untuk menghadapi naik turunnya beban diperlukan koordinasi dari pembangkit unit *thermal* untuk mensuplai kebutuhan daya tetapi dengan harga minimum.

Data lain yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah penjadwalan pembangkit berdasarkan data riil sistem yang nantinya akan dibandingkan dengan penjadwalan pembangkit setelah dioptimasi dengan algoritma *simulated annealing*. Data riil sistem dapat dilihat pada tabel dibawah ini yang merupakan pembebanan pembangkit unit *thermal* pada tanggal 9 september 2013 yang sesuai dengan data pembebanan pada gambar 3.1, dimana pembebanan tersebut telah dibagi menjadi 8 periode.

Tabel 3.6 Penjadwalan pembangkit unit *thermal* sistem 500kV sebelum optimasi

Pukul	Beban (MW)	Suralaya (MW)	M.tawar (MW)	T.Jati (MW)	Gresik (MW)	Paiton (MW)	Grati (MW)
1-3	9293	2043	684	1664	1315	3179	408
4-6	9658	2418	657	1544	1243	3364	432
7-9	10891	2816	801	1799	1406	3673	396
10-12	12301	3112	1123	1933	1782	4010	341
13-15	12780	3252	1329	1967	1801	4076	355
16-18	12843	3188	1143	1987	1929	4115	481
19-21	13203	3151	1128	1983	2068	4232	641
22-24	12192	2995	835	1976	1998	4060	328
Jumlah	93161	22975	7700	14853	13542	30709	3382
Min	9293	2043	657	1544	1243	3179	328
Max	13203	3252	1329	1987	2068	4232	641
Rata-rata	11645	2871.875	962.5	1856.6	1692.7	3838	422.75

### 3.3 Tahap Perhitungan Persamaan Biaya Bahan Bakar



Binanta Pran Seda Tarigan, 2015

APLIKASI ALGORITMA SIMULATED ANNEALING PADA SISTEM KOORDINASI PEMBANGKITAN UNIT THERMAL

Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu



Gambar 3.3 *Flowchart* Perhitungan Fungsi Biaya Bahan Bakar Pembangkit

Dalam penjadwalan pembangkit termal dengan metode *Simulated Annealing* diperlukan penentuan persamaan biaya bahan bakar terlebih dahulu yang diperoleh dengan mengolah data *heat rate* dari masing-masing unit pembangkit. Di bawah ini adalah tahapan-tahapan untuk menentukan persamaan biaya bahan bakar :

1. Membaca data *heat rate* pembangkit pada tabel 3.1
2. Menghitung konstanta  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$  input/output dari tiap unit pembangkit dengan mengolah data *heat rate* dan daya pembangkit dan membentuk matriks seperti dibawah ini :

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 \\ \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 & \sum_{i=1}^n P_i^3 & \sum_{i=1}^n P_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n F_i \\ \sum_{i=1}^n P_i F_i \\ \sum_{i=1}^n P_i^2 F_i \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Dimana :

$n$  = Jumlah data daya (4)

$\sum_{i=1}^n P_i$  = Jumlah daya output

$\sum_{i=1}^n P_i F_i$  = Jumlah dari hasil kali daya output dengan *heat rate*

Penentuan konstanta  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ ,  $\gamma_i$  dapat ditemukan dengan cara eliminasi gaus atau gaus jordan.

3. Membuat persamaan input/output dari konstanta  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$
4. Menghitung persamaan biaya bahan bakar dari masing-masing pembangkit dengan perkalian antara persamaan input/output pembangkit dengan harga biaya bahan bakar pembangkit.

$$\text{Persamaan biaya bahan bakar } F_i(P_i) = \alpha_i + \beta P_i + \gamma_i^2 \quad (3-3)$$

### 3.4 Kesepakatan Unit Pembangkit Tenaga Listrik

Kesepakatan unit dapat didefenisikan sebagai proses pengambilan keputusan yang optimal, penjadwalan *start-up* dan *shut-down* unit-unit pembangkit guna meminimumkan biaya operasi selama periode pengamatan.

Asumsi yang biasanya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan kesepakatan unit pembangkit dengan algoritma *simulated annealing* adalah :

1. Beban sistem setiap periode pengamatan adalah konstan dan telah diberikan (diperoleh dari estimasi beban)
2. Rugi-rugi transmisi, *start up cost* diabaikan

Berdasarkan asumsi diatas kesepakatan unit pembangkit dapat diformulasikan sebagai berikut :

#### 3.4.1 Fungsi obyektif

Minimisasi (Biaya bahan bakar)

$$F_T = \sum_{i=1}^n [u_i^t F_i(P_i^t)] \quad (3-4)$$

Dimana :

$F_T$  = Total biaya produksi seluruh pembangkit

$F_i(P_i^t)$  = Biaya tiap unit pembangkit untuk satuan waktu t

$P_i^t$  = Daya output yang dihasilkan tiap unit pembangkit pada waktu t

$u_i^t$  = Status unit pembangkit

#### 3.4.2 Kriteria pembatas

Kesetimbangan daya pembangkit dan beban

$$\sum_1^n P_i^t = Pdt \quad (3-5)$$

Dimana :

$P_i^t$  = Daya output unit pembangkit i pada jam ke t

$Pdt$  = Daya beban jam ke t

#### 3.4.3 Kapasitas pembangkit

$$P_i \min \leq P_i^t \leq P_i \max \quad (3-6)$$

Dimana :

$P_i \min$  = Daya minimum yang dapat dihasilkan pembangkit ke i

$P_i^t$  = Daya yang dibangkitkan pembangkit i pada jam t

$P_i$  maks = Daya maksimum yang dapat dihasilkan pembangkit ke  $i$

### 3.5 Implementasi *Simulated Annealing*

Implementasi dari algoritma *simulated annealing* dalam permasalahan kombinatorial memerlukan empat unsur :

1. Deskripsi mengenai kombinasi yang dibentuk dari permasalahan
2. Suatu fungsi obyektif
3. Suatu random generator yang dapat mengubah kombinasi
4. Annealing schedule

#### 3.5.1 Deskripsi kombinasi

Pada penelitian ini kombinasi pada sistem tenaga listrik berupa kombinasi *on-off* unit-unit pembangkit (*unit commitment*) dan kombinasi daya pembangkitan yang ekonomis (*economic dispatch*).

#### 3.5.2 Evaluasi fungsi obyektif

Fungsi obyektif pada penelitian ini merupakan fungsi biaya. Fungsi biaya merupakan jumlah dari biaya produksi semua unit pembangkit yang *on* pada waktu tertentu.

#### 3.5.3 Aturan perubahan kombinasi

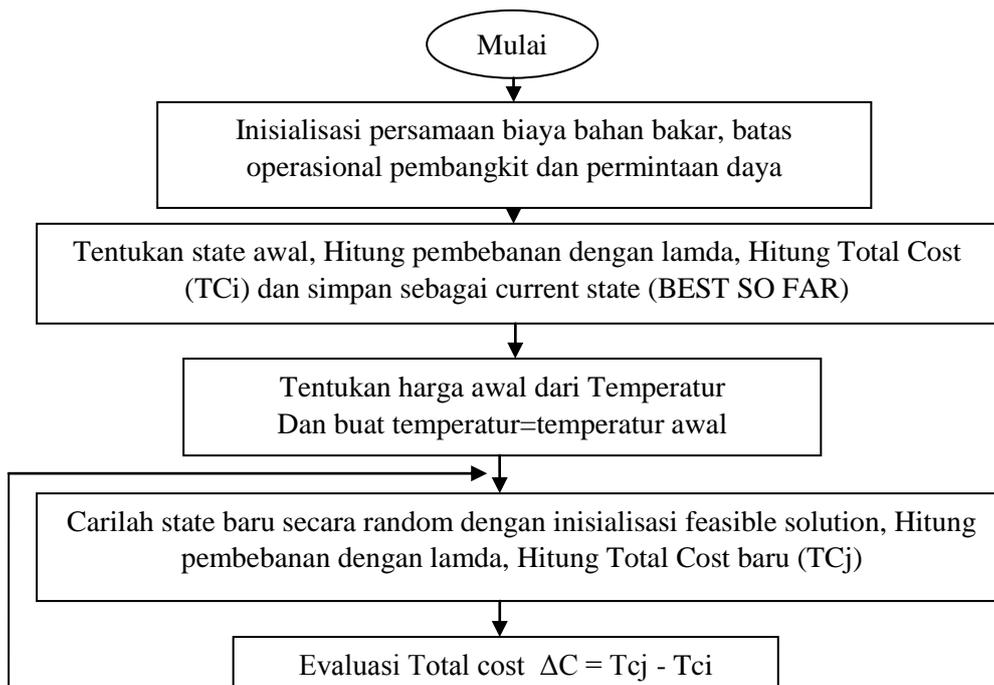
Pada penelitian ini perubahan kombinasi dilakukan secara random. Suatu unit pembangkit digunakan pada waktu tertentu dengan suatu daya pembangkitan maka jika unit pembangkit tersebut digunakan pada waktu berikutnya daya pembangkitannya dapat ditambah atau dikurangi dengan batas daya maksimum dan minimum.

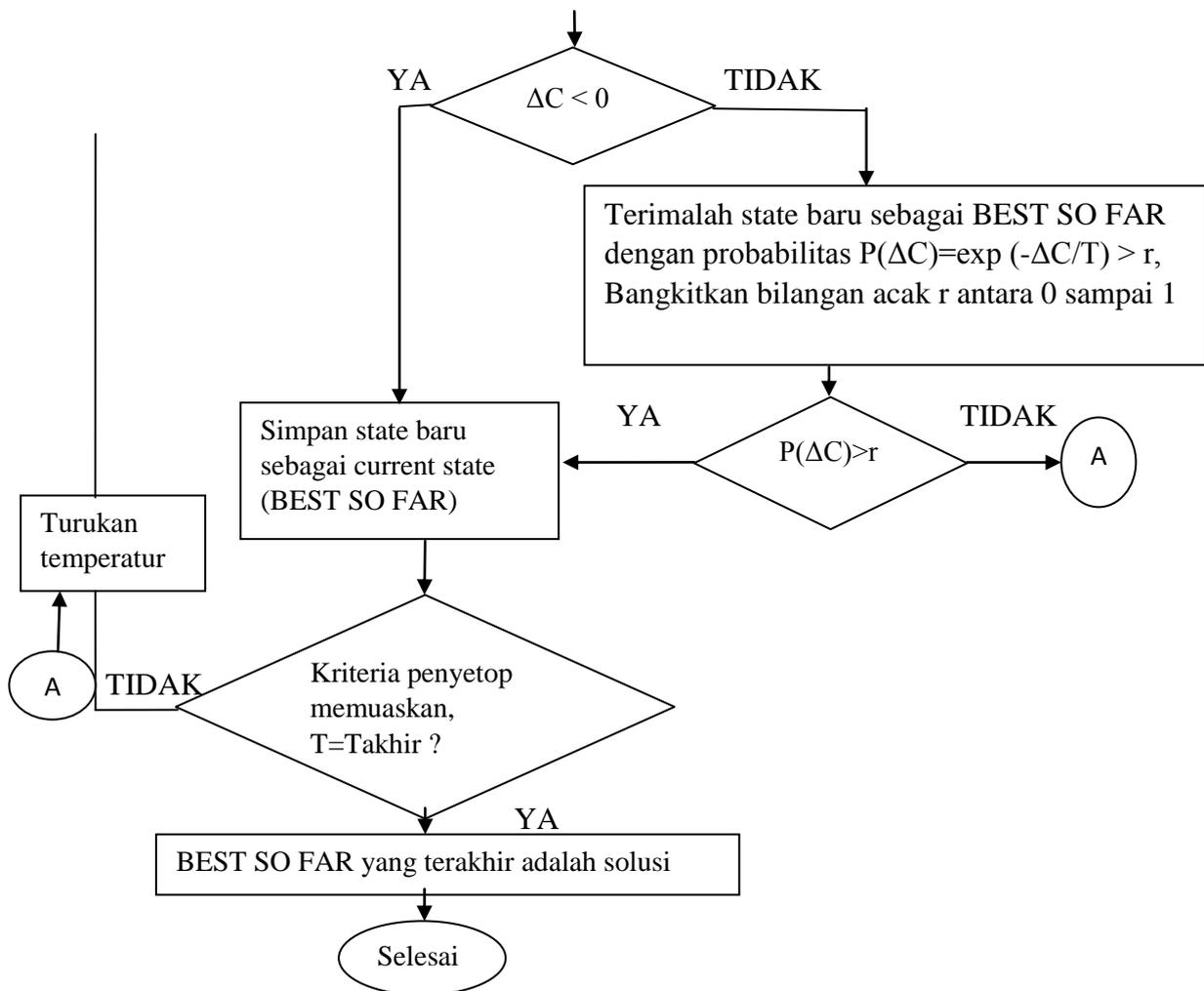
#### 3.5.4 Annealing schedule

*Annealing schedule* berperan dalam menentukan pergerakan yang diperbolehkan selama proses pencarian berlangsung. Proses *cooling* atau *annealing* adalah mencairkan sistem pada temperatur yang tinggi dan menurunkan temperatur dengan tahap lambat sampai titik beku.

Biaya komputasi dari implementasi metode *simulated annealing* selalu didominasi oleh fungsi obyektifnya. Oleh sebab itu penting sekali jika fungsi obyektif ditampilkan secara efisien. Komponen yang penting dalam *simulated annealing*

adalah pembangkit bilangan random, yang digunakan pada saat dilakukan proses perubahan secara random pada kombinasi. Hal ini menjadi penting khususnya pada saat menyelesaikan permasalahan dalam ukuran besar dengan ribuan iterasi.





Gambar 3.4 Flow chart algoritma *simulated annealing*

Susunan algoritma penjadwalan pembangkit termal mengabaikan rugi-rugi pada saluran transmisi dengan metode *Simulated Annealing* adalah sebagai berikut:

1. Menentukan kombinasi awal pembangkit (*initial state*)
2. Menghitung pembebanan unit pembangkit sesuai *state* dengan lamda dan dengan constraint  $\sum_{i=1}^n P_i = Pd$

$$\lambda = \frac{PD + \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{2\gamma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\gamma_i}} \quad P_i = \frac{\lambda - \beta_i}{2\gamma_i}$$

3. Evaluasi pembebanan unit pembangkit dengan persamaan constraint

$$\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad \text{untuk} \quad P_{\min} < P_i < P_{\max}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \leq \lambda \quad \text{untuk} \quad P_i = P_{\max}$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} \geq \lambda \quad \text{untuk} \quad P_i = P_{\min}$$

4. Hitung total biaya kombinasi  $F_T = \sum_{i=1}^n [u_i^t F_i(P_i^t)]$
5. Simpan kombinasi dan pembebanan unit pembangkit tersebut sebagai *current state* (BEST SO FAR)
6. Tentukan harga temperatur awal dan buat temperatur = temperatur awal
7. Carilah kombinasi baru (*new state*) secara random dengan *inisialisasi feasible solution*, Hitung pembebanan masing-masing unit pembangkit serta total biaya dari kombinasi tersebut.
8. Hitung  $\Delta E = \text{Total biaya baru} - \text{Total biaya BEST SO FAR}$ ,

Jika  $\Delta E \leq 0$  maka terimalah kombinasi baru (*new state*) sebagai *current state* (BEST SO FAR).

Jika  $\Delta E > 0$  maka terimalah kombinasi baru (*new state*) sebagai *current state* (BEST SO FAR) dengan probabilitas  $P(\Delta C) = \exp(-\Delta C/T) > r$ , dan bangkitkan bilangan acak  $r$  antara 0 sampai 1.

9. Jika kriteria penyetop memuaskan atau temperatur = temperatur akhir maka kembalikan BEST SO FAR yang terakhir sebagai solusi, Jika tidak maka turunkan temperatur sesuai dengan jadwal pendinginan dan kembali ke langkah 7.