

# Penentuan Letak dan Kapasitas Optimal Bank Kapasitor pada Jaringan Transmisi 150 kV Sumatera Utara Menggunakan *Artificial Bee Colony Algorithm*

Andita Noor Shafira, Adi Soeprijanto, Sjamsul Anam

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

*e-mail*: [adisup@ee.its.ac.id](mailto:adisup@ee.its.ac.id), [anam@ee.its.ac.id](mailto:anam@ee.its.ac.id), [andita.noor.shafira14@mhs.ee.its.ac.id](mailto:andita.noor.shafira14@mhs.ee.its.ac.id)

**Abstrak**—Listrik merupakan suatu kebutuhan mutlak yang harus dipenuhi untuk menjamin keberlangsungan hidup masyarakat masa kini. Kebutuhan ini terus meningkat seiring dengan pertumbuhan beban yang semakin bertambah dari tahun ke tahun. Pertumbuhan beban yang diikuti dengan peningkatan permintaan suplai daya reaktif akibat beban bersifat induktif meningkat menyebabkan perencanaan dan operasi dari sistem interkoneksi menjadi lebih kompleks sehingga kualitas sistem menjadi kurang dapat diandalkan. Aliran daya reaktif dapat menyebabkan *drop* tegangan dan kerugian daya dalam sistem transmisi. Untuk itu dilakukan penentuan letak dan kapasitas kapasitor *shunt* untuk mengurangi kerugian daya dengan menggunakan *Newton-Raphson* dan metode optimisasi *Artificial Bee Colony Algorithm*. Pada percobaan ini dilakukan pemasangan lima kapasitor dengan jumlah koloni sebesar 50 dan *Max Cycle Number* sebesar 150. Hasil simulasi menggunakan metode *Artificial Bee Colony Algorithm* menunjukkan bahwa pemasangan kapasitor pada Jaringan Transmisi 150 kV Sumatera Utara dapat menurunkan kerugian daya aktif sebesar 8,37%.

**Kata Kunci**—Aliran Daya Reaktif, *Artificial Bee Colony Algorithm*, Kapasitor

## I. PENDAHULUAN

**L**ISTRIK merupakan suatu kebutuhan mutlak yang harus dipenuhi untuk menjamin keberlangsungan hidup masyarakat masa kini. Pemenuhan kebutuhan ini terus meningkat seiring dengan pertumbuhan beban yang semakin bertambah dari tahun ke tahun. Pertumbuhan beban ini diikuti dengan peningkatan permintaan suplai daya reaktif akibat beban yang bersifat induktif meningkat. Bila suatu jaringan transmisi tidak memiliki sumber daya reaktif di daerah sekitar beban, maka semua kebutuhan beban reaktif dipikul oleh generator sehingga akan mengalir arus reaktif pada jaringan transmisi yang mengakibatkan penurunan faktor daya, kerugian daya besar, dan jatuh tegangan pada ujung saluran meningkat.

Alternatif untuk mengurangi dampak dari arus reaktif yang meningkat adalah dengan melakukan kompensasi daya reaktif yang bertujuan untuk transportasi daya reaktif dan mengurangi kerugian daya. Salah satu langkah penyelesaian yang umum dilakukan adalah dengan penambahan kapasitor pada sistem. Kapasitor berguna sebagai sumber daya reaktif tambahan untuk mengkompensasi daya reaktif akibat pembebanan tersebut [1-2]. Dengan memasang *shunt capacitor* (kapasitor

paralel), maka akan diperoleh keuntungan antara lain kerugian daya yang menurun, tegangan beban meningkat dan efisiensi peralatan di saluran transmisi yang meningkat pula sehingga memungkinkan untuk menambah beban tanpa menambah saluran baru.

Penentuan lokasi pemasangan kapasitor dan kapasitas yang optimal untuk dialokasikan pada jaringan transmisi menjadi suatu permasalahan yang sering terjadi. Oleh sebab itu, digunakan salah satu metode optimisasi sebagai alat bantu. Terdapat dua metode optimisasi, yaitu metode deterministik seperti *Dynamic Programming*, *Simplex*, dan *Linear Programming* serta metode undeterministik seperti *Ant Colony Algorithm*, *Simulated Annealing*, *Genetic Algorithm*, serta *Artificial Bee Colony*.

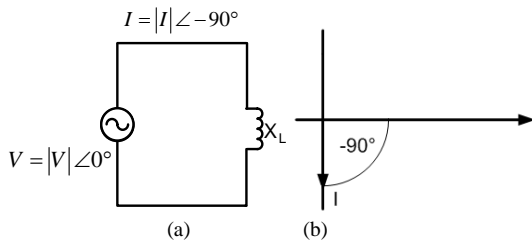
Pada Tugas Akhir ini, metode yang diusulkan adalah *Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm*. *Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm* merupakan suatu algoritma yang dikenalkan oleh Karaboga pada tahun 2005 sebagai suatu teknik masalah optimasi numerik [5]. Algoritma ini dibuat berdasarkan teknik *metaheuristic* untuk mendapatkan hasil optimal dari suatu permasalahan yang telah diterapkan pada algoritma pendahulunya, seperti *Ant Colony Algorithm*, *Particle Swarm Optimization*, *Harmony Search*, dan lain sebagainya. Metode ini dikembangkan berdasarkan perilaku kecerdasan lebah madu dalam suatu koloninya dan performasinya dan dijadikan tolak ukur untuk menghitung nilai suatu fungsi optimisasi.

## II. ALIRAN DAYA REAKTIF PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

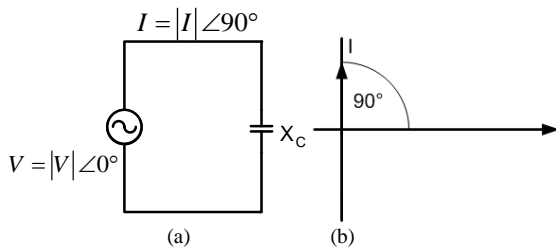
### A. Daya Reaktif dalam Suatu Sistem

Daya aktif dari rangkaian AC diperoleh dari perkalian tegangan dan komponen arus yang sefase. Jika sebuah beban induktif murni dihubungkan dengan sumber tegangan (Volt) akan menghasilkan arus lagging, yaitu arus tertinggal atau terbelakang 90° terhadap tegangan. Sebaliknya, jika sebuah beban kapasitif murni dihubungkan dengan sumber tegangan (Volt) akan menghasilkan arus *leading*, yaitu arus mendahului 90° terhadap tegangan.

Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan rangkaian dan diagram *phasor* antara arus terhadap tegangan suatu beban yang disuplai oleh sumber tegangan.



Gambar 1. Rangkaian dengan beban induktif  
a) Rangkaian AC dengan beban elemen induktif  
b) Diagram *phasor* rangkaian beban induktif



Gambar 2. Rangkaian dengan beban kapasitif  
a) Rangkaian AC dengan beban elemen kapasitif  
b) Diagram *phasor* rangkaian beban kapasitif

Daya listrik dibagi menjadi tiga elemen yang dapat diketahui masing-masing elemen dari daya tersebut, yaitu:

1. Daya total (*S*) :  $S = VI^*$  (VA) (1)
2. Daya aktif (*P*) :  $P = VI \cos \theta$  (Watt) (2)
3. Daya reaktif (*Q*) :  $Q = VI \sin \theta$  (Var) (3)

Disebut sebagai daya nyata, bernilai "positif" bila beban induktif dan bernilai "negatif" bila beban kapasitif.

Faktor daya dapat diketahui dari persamaan 4 berikut:

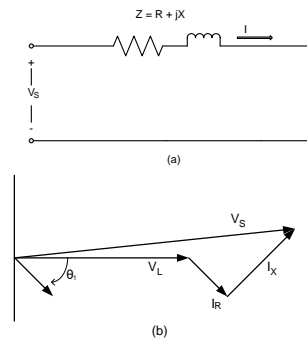
$$\text{Faktor daya} = \frac{\text{daya aktif (KW)}}{\text{daya kompleks (KVA)}} = \cos \theta \quad (4)$$

Faktor daya dikatakan "lagging" apabila beban induktif dan sedangkan "leading" apabila beban kapasitif.

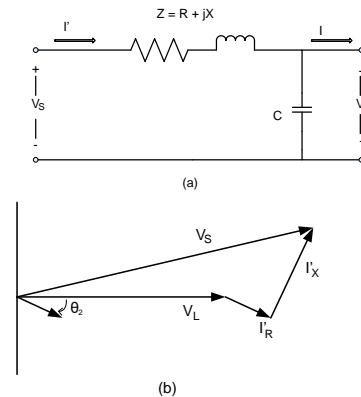
**B. Pengaruh Kompensasi pada Beban Induktif**

Kompensasi beban induktif dilakukan untuk meningkatkan kualitas daya, salah satunya yaitu kerugian daya seminimal mungkin. Dalam hal ini, aliran daya reaktif dapat dikontrol dengan cara memasang peralatan kompensasi paralel pada bus beban untuk menjaga keseimbangan yang tepat antara daya reaktif yang dihasilkan dan daya reaktif yang digunakan. Cara tersebut paling efektif dalam meningkatkan kemampuan transfer daya dari sistem dan meningkatkan stabilitas tegangan.

Kapasitor ini terhubung paralel pada jaring dengan tujuan untuk mengurangi kerugian daya pada jaring transmisi. Gambar 3 menunjukkan bahwa dengan menggunakan kapasitor, maka arus reaktif yang mengalir pada saluran dapat berkurang sehingga kerugian daya dapat diminimalisirkan.



Gambar 3. Sebelum dipasang kapasitor *shunt*  
a) Rangkaian ekuivalen dari saluran  
b) Diagram vektor pada rangkaian pada faktor daya



Gambar 4. Setelah dipasang kapasitor *shunt*  
a) Rangkaian ekuivalen dari saluran  
b) Diagram vektor pada rangkaian pada faktor daya

Dari Gambar 3 dan Gambar 4 diperoleh,

$$P_{Loss} = I^2 R \quad (5)$$

$$P_{Loss} = \left(\frac{S}{V}\right)^2 R \quad (6)$$

$$P_{Loss} = \left(\frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V}\right)^2 R \quad (7)$$

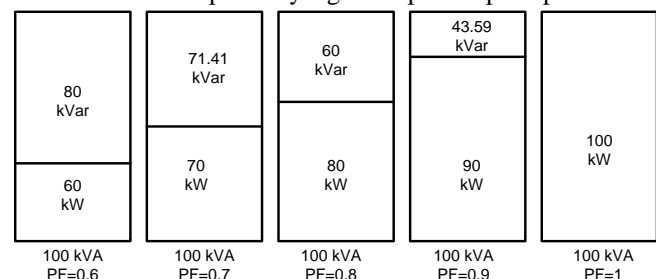
$$P_{Loss} = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} R \quad (8)$$

$$P_{Loss} = \frac{P^2 + (Q^2 - Q_c^2)}{V^2} R \quad (9)$$

sehingga,  
 $P_{Loss} = TURUN$

**C. Koreksi Faktor Daya**

Pembangkitan daya reaktif pada perencanaan daya dan pensuplaiannya ke beban-beban yang berlokasi pada jarak yang jauh adalah tidak ekonomis, tetapi dapat dengan mudah disediakan oleh kapasitor yang ditempatkan pada pusat beban.



Gambar 5. Ilustrasi perubahan daya akibat perubahan faktor daya

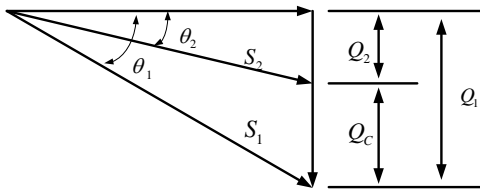
Dengan mengasumsikan bahwa beban disuplai dengan daya nyata (aktif)  $P$ , daya reaktif tertinggal (*lagging*)  $Q_1$ , dan daya semu  $S_1$ , maka rumus persamaan dari faktor daya tertinggal adalah sebagai berikut:

$$\cos \theta_1 = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{(P^2 + Q_1^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

ketika kapasitor *shunt*  $Q_c$  dipasang pada beban, faktor daya dapat ditingkatkan dari  $\cos \theta_1$  menjadi  $\cos \theta_2$  yang dijabarkan pada (11) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \cos \theta_2 &= \frac{P}{S_2} \\ &= \frac{P}{(P^2 + Q_2^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{P}{[P^2 + (Q_1 - Q_c)^2]^{\frac{1}{2}}} \end{aligned} \quad (11)$$

Gambar 6 menunjukkan bahwa daya semu dan daya reaktif menurun dari  $S_1$  kVA menjadi  $S_2$  kVA dan dari  $Q_1$  kvar menjadi  $Q_2$  kvar.



Gambar 6. Ilustrasi koreksi faktor daya

**D. Metode Newton-Raphson**

Metode *Newton-Raphson* memiliki perhitungan yang lebih baik untuk aplikasi pada sistem yang besar dalam menyelesaikan persamaan dengan dua variabel atau lebih. Jumlah iterasi yang dibutuhkan untuk memperoleh pemecahan masalah ditentukan oleh besar sistem yang digunakan.

Besar arus pada tenaga listrik dan besar daya yang keluar dan daya yang masuk ke bus dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_i = \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \quad (12)$$

Persamaan diatas bila ditulis dalam bentuk polar adalah:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (13)$$

Daya kompleks pada bus  $i$  adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (14)$$

Substitusi dari (13) untuk  $I_i$  ke dalam (14) menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle \delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (15)$$

Bagian riil dan imajiner dipisahkan sehingga bentuk persamaan tersebut menjadi:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (16)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (17)$$

Persamaan (16) dan (17) membentuk persamaan aljabar *non-linier* dengan variabel sendiri. Besar setiap variabel dinyatakan dalam satuan per unit, sedangkan untuk sudut *fasa*

dinyatakan dalam satuan radian. Persamaan (16) dan (17) dikembangkan menjadi deret *Taylor*, dan dalam bentuk singkat, deret tersebut dapat ditulis sebagai berikut [3]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (18)$$

Elemen matriks *Jacobian* ditentukan dengan  $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$  dengan  $n$  adalah jumlah bus pada sistem, sedangkan  $m$  adalah jumlah *voltage-controlled bus* (bus tegangan) sistem.  $J_1$  diperoleh dari  $(n-1) \times (n-1)$ ,  $J_2$  diperoleh dari  $(n-1) \times (n-1-m)$ ,  $J_3$  diperoleh dari  $(n-1-m) \times (n-1)$  dan  $J_4$  diperoleh dari  $(n-1-m) \times (n-1-m)$ .

Untuk elemen diagonal dan diagonal luar  $J_1$  adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (19)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (20)$$

Untuk elemen diagonal dan diagonal luar  $J_2$  adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (22)$$

Untuk elemen diagonal dan diagonal luar  $J_3$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (23)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (24)$$

Untuk elemen diagonal dan diagonal luar  $J_4$  adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (26)$$

Harga dari  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan disebut *power residual* diberikan dengan (27 - 28):

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (27)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (28)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan pada bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (29)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (30)$$

Prosedur penyelesaian studi aliran daya dengan metode *Newton-Raphson* adalah sebagai berikut:

1. Pada bus berbeda dimana harga  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  ditentukan. Besar tegangan dan susut fasa disamakan dengan nilai *slack bus* atau 1,0 dan 0,0, jadi  $|V_i^{(0)}| = 1,0$  dan  $\delta_i^{(0)} = 0,0$ . Untuk *voltage regulated bus*, nilai  $|V_i|$  dan  $P_i^{sch}$  ditentukan, sedangkan sudut fasa disamakan dengan sudut *slack bus*, jadi  $\delta_i^{(0)} = 0$ .

2. Hitung  $P_i^k$  dan  $Q_i^k$  pada bus beban dengan persamaan 16 dan 17, dan juga  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  dihitung dengan persamaan 27 dan 28.
3. Hitung  $P_i^k$  dan  $\Delta P_i^{(k)}$  pada *voltage control bus* dengan persamaan 16 dan 25.
4. Hitung elemen-elemen matriks *Jacobian*  $J_1, J_2, J_3$  dan  $J_4$  dengan persamaan 18 sampai dengan 26.
5. Hitung harga-harga  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dengan persamaan 18.
6. Hitung harga-harga baru dari sudut fasa dan tegangan  $\delta_i^{(k+1)}$  dan  $|V_i^{(k+1)}|$  dengan persamaan 29 dan 30.
7. Proses ini berlangsung sampai:

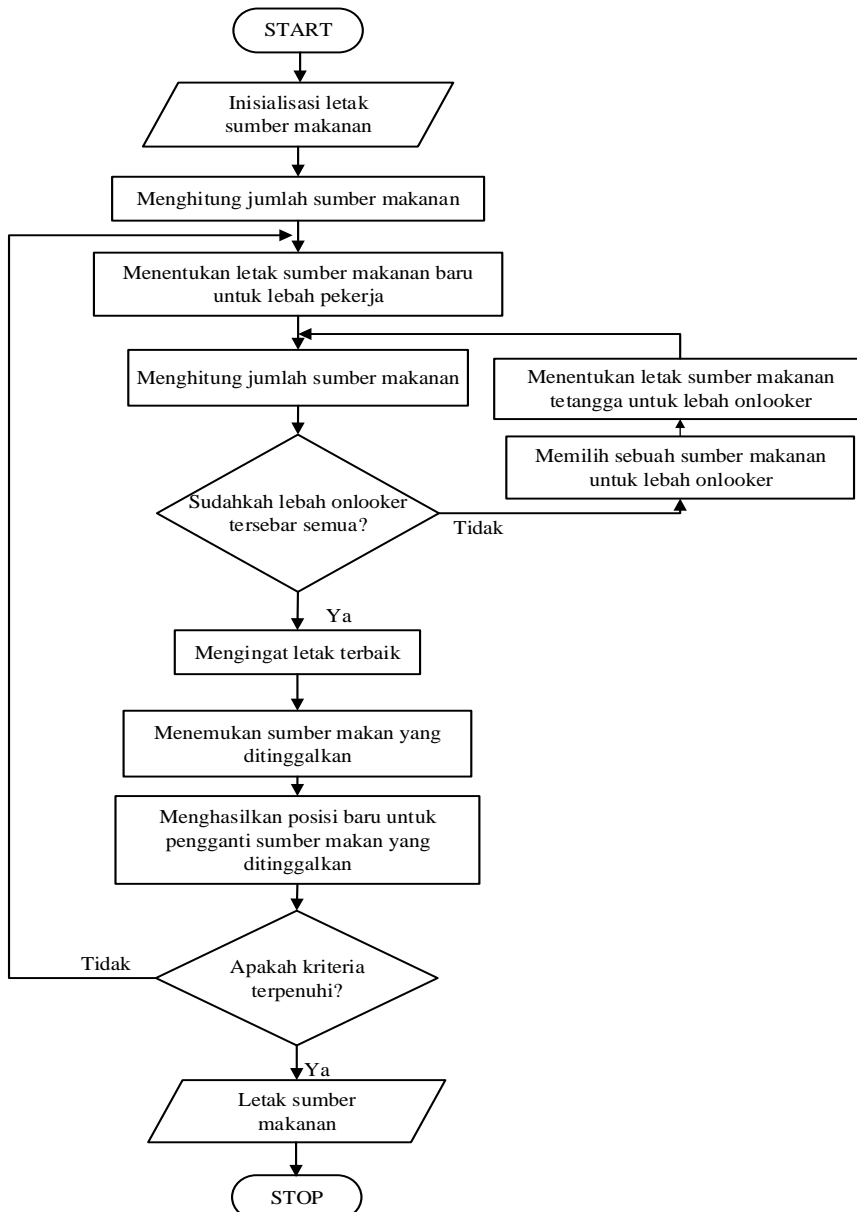
$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon \tag{31}$$

$$|\Delta Q_i^{(k)}| \leq \epsilon \tag{32}$$

### III. ARTIFICIAL BEE COLONY

Metode optimisasi yang digunakan untuk menentukan letak dan kapasitas dari masing-masing kapasitor adalah metode berbasis kawanan lebah yaitu *Artificial Bee Colony* (ABC). ABC adalah sebuah metode optimisasi yang terinspirasi oleh perilaku mencari makan lebah madu diperkenalkan oleh Karaboga pada tahun 2005 [5].

Terdapat koloni lebah buatan yang terdiri dari tiga kelompok lebah, yaitu lebah pekerja, lebah *onlooker* dan lebah *scout*. Lebah yang menunggu di *dance area* untuk membuat keputusan dalam memilih sumber makanan, disebut sebagai lebah *onlooker* dan lebah yang pergi ke sumber makanan yang pernah dikunjungi sendiri sebelumnya, diberi nama lebah pekerja. Sedangkan lebah yang melakukan pencarian acak disebut lebah *scout*. Untuk setiap sumber makanan, hanya ada satu lebah pekerja. Lebah pekerja yang sumber makanannya telah habis akan menjadi lebah *scout* [4]. Langkah-langkah utama dari algoritma ABC diberikan di Gambar 7.



Gambar 7. Diagram alir algoritma ABC

Langkah-langkah utama proses optimisasi *ABC Algorithm* dapat diuraikan sebagai berikut,

1. Inialisasi posisi sumber makanan.
2. Gerakkan lebah pekerja menuju sumber-sumber makanan dan tentukan jumlah nektarnya.

Untuk tiap lebah pekerja, sebuah sumber makanan baru dihasilkan melalui (33) di bawah ini:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \tag{33}$$

3. Gerakkan lebah *onlooker* menuju sumber-sumber makanan dan tentukan jumlah nektarnya.

Pada langkah ini, lebah *onlooker* memilih sebuah sumber makanan dengan menggunakan perhitungan probabilitas (34) dan mendapatkan sebuah sumber makanan baru dalam area sumber makanan yang telah dipilih melalui (35) berikut:

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \tag{34}$$

4. Tentukan sumber makanan yang harus ditinggalkan dan alokasikan lebah pekerjanya sebagai *scout* untuk mencari sumber makanan baru berdasarkan pencarian secara acak dengan memakai rumusan:

$$x_{ij}^j = x_{min}^j + rand[0,1](x_{max}^j - x_{min}^j) \tag{35}$$

5. Catat sumber makanan terbaik yang telah ditemukan sejauh ini.
6. Ulangi langkah 2–5 hingga kriteria yang diinginkan terpenuhi.

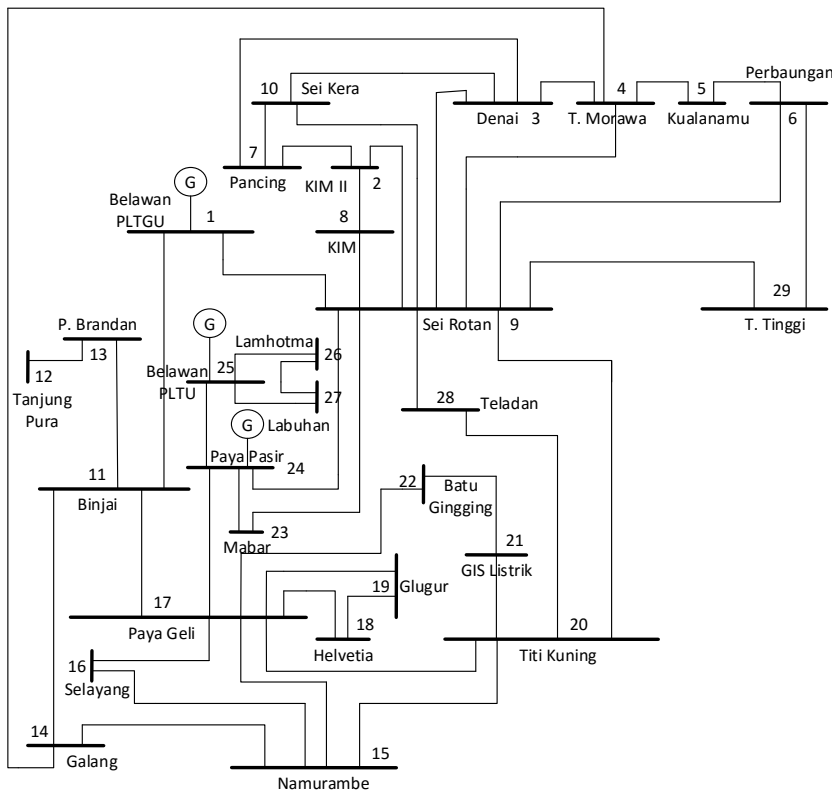
Sistem yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV yang terdiri atas 29 bus, 46 saluran, dan 3 pusat pembangkit seperti yang ditunjukkan Gambar 8.

Penyelesaian analisis aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson* didasarkan pada:

1. Base tegangan = 150 kV
2. Base daya = 1000 MVA
3. Akurasi = 0.0001
4. Akselerasi = 1.1
5. Maksimum iterasi = 50

Sedangkan bus-bus yang ada diklasifikasikan sebagai berikut :

- a) *Slack* bus : Belawan PLTGU.
- b) Bus generator : Paya Pasir dan Belawan PLTU.
- c) Bus beban : Sei Kera, KIM II, Denai, T.Morawa, Kualanamu, Perbaungan, Pancing, KIM, Sei Rotan, T.Tinggi, Tanjung Pura, P. Brandan, Lamhotma, Labuhan, Paya Pasir, Teladan, Batu Gingging, GIS Listrik, Glugur, Titi Kuning, Helvetia, Selayang, Helvetia, Glugur, Titi Kuning, Galang, dan Namurambe.

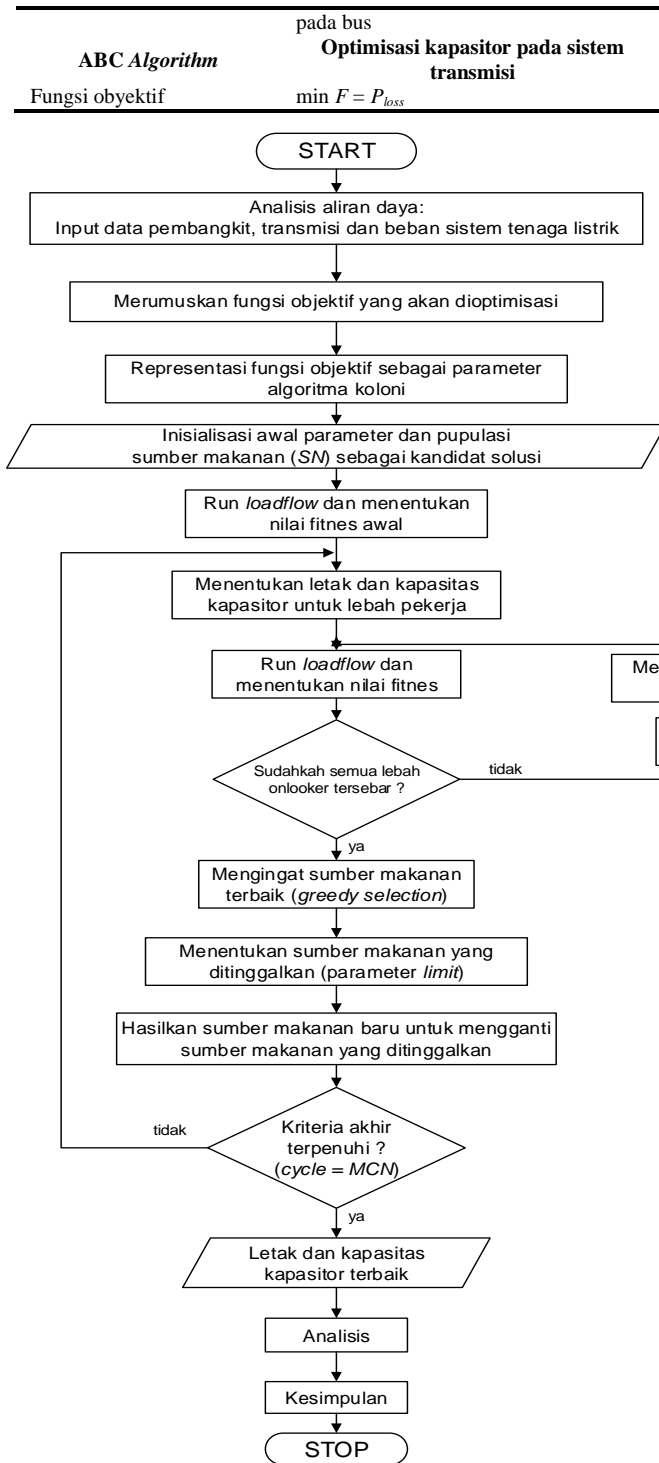


Gambar 8. *Single line diagram* sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV

Sebelum proses optimisasi kapasitor dilakukan pada sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV, maka parameter-parameter terkait yang ada pada proses optimisasi kapasitor harus direpresentasikan terlebih dahulu menjadi parameter-parameter *ABC Algorithm* sehingga pencarian secara acak oleh lebah dapat dilakukan.

Tabel 1.  
Representasi *ABC Algorithm* untuk optimisasi kapasitor

| <i>ABC Algorithm</i>                            | Optimisasi kapasitor pada sistem transmisi  |
|---|---|
| Jumlah lebah pekerja atau posisi sumber makanan | Kandidat bus sebagai posisi kapasitor dan kandidat kapasitas kapasitor yang akan dipasang |
| Dimensi   | Jumlah kapasitor yang akan dipasang   |



$$fitness = \frac{1}{1 + fungsi\_objektif}$$

Proses optimisasi ini dapat ditunjukkan pada Gambar 9.

Gambar 9. Diagram alir implementasi ABC Algorithm untuk optimisasi kapasitor

#### IV. SIMULASI DAN ANALISIS

##### A. Analisis Aliran Daya Sistem Transmisi Sumatera Utara 150 kV Sebelum Kompensasi

Untuk mengetahui kondisi awal dari sistem transmisi Sumatera Utara 150 Kv dilakukan analisis aliran daya dengan menggunakan metode *Newton-Raphson*. Hasil analisis aliran daya ditunjukkan pada Tabel 2, dan kerugian daya pada masing-masing saluran direpresentasikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Aliran daya sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV sebelum pemasangan kapasitor

| No. Bus | Tegangan (pu) | Sudut (derajat) | Beban |      | Pembangkitan |         |
|---------|---------------|-----------------|-------|------|--------------|---------|
|         |               |                 | MW    | MVar | MW           | MVar    |
| 1       | 1,030         | 0,000           | 0     | 0    | 53,751       | 227,308 |
| 2       | 1,063         | -12,079         | 78,7  | 43,5 | 0            | 0       |
| 3       | 1,090         | -12,144         | 69,2  | 39,2 | 0            | 0       |
| 4       | 1,092         | -11,877         | 69,2  | 39   | 0            | 0       |
| 5       | 1,093         | -12,368         | 70,3  | 39,8 | 0            | 0       |
| 6       | 1,094         | -12,474         | 38,1  | 20,7 | 0            | 0       |
| 7       | 1,080         | -12,505         | 109,8 | 64   | 0            | 0       |
| 8       | 1,043         | -11,691         | 167,4 | 95,7 | 0            | 0       |
| 9       | 1,069         | -9,841          | 82,1  | 45,5 | 0            | 0       |

|              |       |         |               |               |                |               |
|--------------|-------|---------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 10           | 1,082 | -12,423 | 59,9          | 32,1          | 0              | 0             |
| 11           | 1,073 | -9,058  | 68,2          | 38            | 0              | 0             |
| 12           | 1,081 | -9,905  | 46,6          | 27,3          | 0              | 0             |
| 13           | 1,078 | -10,180 | 96,3          | 54,5          | 0              | 0             |
| 14           | 1,106 | -11,451 | 12,2          | 6,5           | 0              | 0             |
| 15           | 1,081 | -12,006 | 62,8          | 34,8          | 0              | 0             |
| 16           | 1,071 | -11,835 | 95,2          | 54            | 0              | 0             |
| 17           | 1,062 | -11,391 | 160,8         | 91,2          | 0              | 0             |
| 18           | 1,060 | -11,568 | 99,6          | 56,8          | 0              | 0             |
| 19           | 1,061 | -11,595 | 68,1          | 36,6          | 0              | 0             |
| 20           | 1,076 | -11,997 | 98            | 54,9          | 0              | 0             |
| 21           | 1,072 | -12,215 | 119,2         | 69            | 0              | 0             |
| 22           | 1,069 | -12,129 | 160,2         | 92,8          | 0              | 0             |
| 23           | 1,009 | -10,191 | 50,4          | 30,3          | 0              | 0             |
| 24           | 1,000 | -9,705  | 54,1          | 30,6          | 20             | -84,94        |
| 25           | 1,000 | -9,188  | 0             | 0             | 339,2          | -68,44        |
| 26           | 1,001 | -9,435  | 45,1          | 26,3          | 0              | 0             |
| 27           | 1,000 | -9,381  | 42,2          | 24,4          | 0              | 0             |
| 28           | 1,077 | -12,307 | 144,6         | 89,4          | 0              | 0             |
| 29           | 1,083 | -14,813 | 116,8         | 36,8          | 0              | 0             |
| <b>Total</b> |       |         | <b>2285,1</b> | <b>1273,7</b> | <b>412,951</b> | <b>73,928</b> |

|              |    |                |                 |
|--------------|----|----------------|-----------------|
| 20           | 21 | 0,165          | 35,871          |
| 20           | 28 | 0,259          | 22,198          |
| 21           | 22 | 0,116          | 228,269         |
| 23           | 24 | 0,959          | 19,765          |
| 24           | 25 | 0,331          | 23,245          |
| 25           | 26 | 0,052          | 74,569          |
| 25           | 27 | 0,063          | 36,522          |
| 26           | 27 | 0,005          | 39,858          |
| <b>Total</b> |    | <b>106,437</b> | <b>3125,223</b> |

**B. Simulasi Penggunaan Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm Pada Proses Kompensasi**

Algoritma Artificial Bee Colony (ABC) sebagai metode optimisasi pada proses kompensasi disimulasikan menggunakan data parameter Colony size 50, Maximum cycle 150, dan dimensi 5 (jumlah kapasitor yang akan dipasang). Hasil yang diperoleh dari simulasi ABC yang dijalankan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4.

Aliran daya sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV setelah pemasangan lima kapasitor dengan ABC

| No. Bus      | V (pu) | Sudut (derajat) | Beban         |             | Pembangkitan   |               | Injeksi Kapasitor (MVar) |
|--------------|--------|-----------------|---------------|-------------|----------------|---------------|--------------------------|
|              |        |                 | MW            | MVar        | MW             | MVar          |                          |
| 1            | 1,030  | 0,000           | 0             | 0           | 2024           | 1066          | 0                        |
| 2            | 1,104  | -11,622         | 78,7          | 43,5        | 0              | 0             | 0                        |
| 3            | 1,130  | -11,676         | 69,2          | 39,2        | 0              | 0             | 91,291                   |
| 4            | 1,128  | -11,406         | 69,2          | 39          | 0              | 0             | 0                        |
| 5            | 1,132  | -11,844         | 70,3          | 39,8        | 0              | 0             | 0                        |
| 6            | 1,135  | -11,961         | 38,1          | 20,7        | 0              | 0             | 71,937                   |
| 7            | 1,122  | -11,974         | 109,8         | 64          | 0              | 0             | 53,793                   |
| 8            | 1,086  | -11,316         | 167,4         | 95,7        | 0              | 0             | 0                        |
| 9            | 1,099  | -9,603          | 82,1          | 45,5        | 0              | 0             | 0                        |
| 10           | 1,119  | -11,855         | 59,9          | 32,1        | 0              | 0             | 0                        |
| 11           | 1,091  | -8,774          | 68,2          | 38          | 0              | 0             | 0                        |
| 12           | 1,098  | -9,490          | 46,6          | 27,3        | 0              | 0             | 0                        |
| 13           | 1,095  | -9,720          | 96,3          | 54,5        | 0              | 0             | 0                        |
| 14           | 1,132  | -10,937         | 12,2          | 6,5         | 0              | 0             | 0                        |
| 15           | 1,112  | -11,434         | 62,8          | 34,8        | 0              | 0             | 0                        |
| 16           | 1,102  | -11,294         | 95,2          | 54          | 0              | 0             | 0                        |
| 17           | 1,093  | -10,923         | 160,8         | 91,2        | 0              | 0             | 0                        |
| 18           | 1,092  | -11,072         | 99,6          | 56,8        | 0              | 0             | 0                        |
| 19           | 1,092  | -11,095         | 68,1          | 36,6        | 0              | 0             | 0                        |
| 20           | 1,109  | -11,455         | 98            | 54,9        | 0              | 0             | 0                        |
| 21           | 1,105  | -11,629         | 119,2         | 69          | 0              | 0             | 0                        |
| 22           | 1,101  | -11,553         | 160,2         | 92,8        | 0              | 0             | 0                        |
| 23           | 1,058  | -10,074         | 50,4          | 30,3        | 0              | 0             | 0                        |
| 24           | 1,050  | -9,651          | 54,1          | 30,6        | 20             | 1101,7        | 0                        |
| 25           | 1,050  | -9,182          | 0             | 0           | 339,2          | 320,45        | 57,094                   |
| 26           | 1,054  | -9,457          | 45,1          | 26,3        | 0              | 0             | 0                        |
| 27           | 1,055  | -9,430          | 42,2          | 24,4        | 0              | 0             | 97,965                   |
| 28           | 1,112  | -11,732         | 144,6         | 89,4        | 0              | 0             | 0                        |
| 29           | 1,120  | -13,767         | 116,8         | 36,8        | 0              | 0             | 0                        |
| <b>Total</b> |        |                 | <b>2285,1</b> | <b>1273</b> | <b>2383,31</b> | <b>2488,5</b> | <b>372,08</b>            |

Dari percobaan ini diperoleh kerugian pada saluran transmisi yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5.

| Kerugian saluran transmisi setelah kompensasi |    |               |                |
|---|----|---------------|----------------|
| Saluran                                       |    | Kerugian Daya |                |
| Dari  | Ke | Aktif (MW)    | Reaktif (MVar) |
| 1   | 9  | 35,989        | 117,822        |
| 1   | 11 | 22,634        | 8,419          |
| 2   | 7  | 0,527         | 102,8          |
| 2   | 8  | 0,731         | 73,959         |
| 2   | 9  | 0,638         | 36,006         |
| 3   | 4  | 0,045         | 176,719        |

Dari hasil analisis load flow dapat dilihat bahwa total daya aktif beban yaitu sebesar 2285,1 MW dan daya reaktif sebesar 1273,7 MW. Sedangkan pada data Tabel 3 diperoleh total kerugian daya aktif transmisi sebesar 106,437 MW dan total kerugian daya reaktif transmisi sebesar 3125,223 MVar.

Tabel 3. Kerugian daya saluran transmisi Sumatera Utara 150 kV sebelum kompensasi

| Saluran |    | Kerugian Daya |                |
|---------|----|---------------|----------------|
| Dari    | Ke | Aktif (MW)    | Reaktif (MVar) |
| 1       | 9  | 33,465        | 104,418        |
| 1       | 11 | 22,218        | 8,509          |
| 2       | 7  | 0,534         | 94,958         |
| 2       | 8  | 0,914         | 67,089         |
| 2       | 9  | 0,742         | 32,956         |
| 3       | 4  | 0,044         | 165,044        |
| 3       | 7  | 0,182         | 121,228        |
| 3       | 9  | 3,217         | 155,978        |
| 4       | 5  | 0,263         | 65,327         |
| 4       | 9  | 4,101         | 100,089        |
| 4       | 14 | 0,043         | 77,569         |
| 5       | 6  | 0,019         | 47,657         |
| 6       | 9  | 1,339         | 48,991         |
| 6       | 29 | 0,618         | 77,500         |
| 8       | 9  | 0,647         | 40,013         |
| 8       | 23 | 2,875         | 87,678         |
| 9       | 20 | 3,541         | 63,676         |
| 9       | 24 | 7,424         | 68,644         |
| 9       | 29 | 2,657         | 68,872         |
| 10      | 3  | 0,124         | 121,691        |
| 10      | 7  | 0,006         | 121,228        |
| 10      | 28 | 0,166         | 27,465         |
| 11      | 12 | 0,517         | 113,788        |
| 11      | 13 | 0,376         | 21,978         |
| 11      | 14 | 0,910         | 38,060         |
| 11      | 17 | 6,025         | 39,691         |
| 12      | 13 | 0,064         | 116,015        |
| 14      | 15 | 0,397         | 234,558        |
| 15      | 16 | 0,573         | 39,329         |
| 15      | 17 | 0,393         | 25,336         |
| 15      | 20 | 0,033         | 182,355        |
| 16      | 17 | 0,667         | 38,211         |
| 17      | 18 | 0,094         | 22,290         |
| 17      | 19 | 0,049         | 53,961         |
| 17      | 20 | 0,153         | 43,342         |
| 17      | 22 | 0,977         | 41,458         |
| 17      | 24 | 8,122         | 54,128         |
| 18      | 19 | 0,002         | 22,683         |

|              |    |               |                 |
|--------------|----|---------------|-----------------|
| 3            | 7  | 0,121         | 130,910         |
| 3            | 9  | 3,574         | 165,776         |
| 4            | 5  | 0,276         | 69,927          |
| 4            | 9  | 4,243         | 106,633         |
| 4            | 14 | 0,017         | 82,185          |
| 5            | 6  | 0,058         | 51,102          |
| 6            | 9  | 1,493         | 52,087          |
| 6            | 29 | 0,448         | 83,813          |
| 8            | 9  | 0,429         | 44,213          |
| 8            | 23 | 2,083         | 100,552         |
| 9            | 20 | 2,908         | 71,352          |
| 9            | 24 | 3,738         | 93,531          |
| 9            | 29 | 2,061         | 75,539          |
| 10           | 3  | 0,175         | 130,231         |
| 10           | 7  | 0,022         | 130,140         |
| 10           | 28 | 0,299         | 28,772          |
| 11           | 12 | 0,402         | 118,021         |
| 11           | 13 | 0,281         | 23,126          |
| 11           | 14 | 0,997         | 39,253          |
| 11           | 17 | 5,010         | 46,608          |
| 12           | 13 | 0,048         | 119,882         |
| 14           | 15 | 0,271         | 247,798         |
| 15           | 16 | 0,511         | 41,991          |
| 15           | 17 | 0,345         | 27,080          |
| 15           | 20 | 0,008         | 193,414         |
| 16           | 17 | 0,567         | 41,029          |
| 17           | 18 | 0,071         | 23,762          |
| 17           | 19 | 0,036         | 57,276          |
| 17           | 20 | 0,169         | 45,977          |
| 17           | 22 | 0,873         | 44,625          |
| 17           | 24 | 4,160         | 79,575          |
| 18           | 19 | 0,002         | 24,055          |
| 20           | 21 | 0,153         | 38,201          |
| 20           | 28 | 0,280         | 23,614          |
| 21           | 22 | 0,135         | 242,383         |
| 23           | 24 | 0,753         | 23,142          |
| 24           | 25 | 0,299         | 26,080          |
| 25           | 26 | 0,105         | 82,283          |
| 25           | 27 | 0,223         | 39,945          |
| 26           | 27 | 0,004         | 44,237          |
| <b>Total</b> |    | <b>98,211</b> | <b>3390,203</b> |

|              |    |                |                 |               |                 |
|--------------|----|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 6            | 29 | 0,618          | 77,500          | 0,448         | 83,813          |
| 8            | 9  | 0,647          | 40,013          | 0,429         | 44,213          |
| 8            | 23 | 2,875          | 87,678          | 2,083         | 100,552         |
| 9            | 20 | 3,541          | 63,676          | 2,908         | 71,352          |
| 9            | 24 | 7,424          | 68,644          | 3,738         | 93,531          |
| 9            | 29 | 2,657          | 68,872          | 2,061         | 75,539          |
| 10           | 3  | 0,124          | 121,691         | 0,175         | 130,231         |
| 10           | 7  | 0,006          | 121,228         | 0,022         | 130,140         |
| 10           | 28 | 0,166          | 27,465          | 0,299         | 28,772          |
| 11           | 12 | 0,517          | 113,788         | 0,402         | 118,021         |
| 11           | 13 | 0,376          | 21,978          | 0,281         | 23,126          |
| 11           | 14 | 0,910          | 38,060          | 0,997         | 39,253          |
| 11           | 17 | 6,025          | 39,691          | 5,010         | 46,608          |
| 12           | 13 | 0,064          | 116,015         | 0,048         | 119,882         |
| 14           | 15 | 0,397          | 234,558         | 0,271         | 247,798         |
| 15           | 16 | 0,573          | 39,329          | 0,511         | 41,991          |
| 15           | 17 | 0,393          | 25,336          | 0,345         | 27,080          |
| 15           | 20 | 0,033          | 182,355         | 0,008         | 193,414         |
| 16           | 17 | 0,667          | 38,211          | 0,567         | 41,029          |
| 17           | 18 | 0,094          | 22,290          | 0,071         | 23,762          |
| 17           | 19 | 0,049          | 53,961          | 0,036         | 57,276          |
| 17           | 20 | 0,153          | 43,342          | 0,169         | 45,977          |
| 17           | 22 | 0,977          | 41,458          | 0,873         | 44,625          |
| 17           | 24 | 8,122          | 54,128          | 4,160         | 79,575          |
| 18           | 19 | 0,002          | 22,683          | 0,002         | 24,055          |
| 20           | 21 | 0,165          | 35,871          | 0,153         | 38,201          |
| 20           | 28 | 0,259          | 22,198          | 0,280         | 23,614          |
| 21           | 22 | 0,116          | 228,269         | 0,135         | 242,383         |
| 23           | 24 | 0,959          | 19,765          | 0,753         | 23,142          |
| 24           | 25 | 0,331          | 23,245          | 0,299         | 26,080          |
| 25           | 26 | 0,052          | 74,569          | 0,105         | 82,283          |
| 25           | 27 | 0,063          | 36,522          | 0,223         | 39,945          |
| 26           | 27 | 0,005          | 39,858          | 0,004         | 44,237          |
| <b>Total</b> |    | <b>106,437</b> | <b>3125,223</b> | <b>98,211</b> | <b>3390,203</b> |

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mohammad A. S. Masoum, Marjan Ladjevardi, Akbar Jafarian and Ewald F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, Oktober 2004.
- [2] Ngakan Putu Satriya Utama, "Memperbaiki Profil Tegangan Di Sistem Distribusi Primer dengan Kapasitor Shunt", Teknologi Elektro, 45 Vol. 7, No. 1 Januari -Juni 2008.
- [3] Robandi, Imam. "Desain Sistem Tenaga Modern", ANDI, Yogyakarta, 2006.
- [4] Li-Pei Wong, Malcolm Yoke Hean Low and Chin Soon Chong, "A Bee Colony Optimization Algorithm for Traveling Salesman Problem", Second Asia International Conference on Modelling & Simulation, Vol. 27, No. 4, Oktober 2008.
- [5] Karaboga, D., "An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization", Technical Report-TR06, Erciyes University, The Department of Computer Engineering, 2005.

Sebelum dilakukan kompensasi diketahui total kerugian daya aktif pada saluran transmisi adalah sebesar 106,437 MW, namun terjadi penurunan total kerugian daya pada saluran transmisi sebesar 98,211 MW setelah dilakukan kompensasi.

Dengan menggunakan optimisasi ABC pada percobaan ini yang pada proses pemasangan kapasitor menentukan lokasi dan kapasitas kapasitor yang optimal diperoleh penurunan kerugian daya aktif sebesar 8,37% menjadi 98,211 MW.

Tabel 6.  
Perbandingan kerugian daya pada saluran transmisi sebelum dan setelah dilakukan kompensasi

| Dari | Ke | Kerugian Daya Tanpa Kompensasi |                | Kerugian Daya Setelah Kompensasi |                |
|------|----|--------------------------------|----------------|----------------------------------|----------------|
|      |    | Aktif (MW)                     | Reaktif (MVar) | Aktif (MW)                       | Reaktif (MVar) |
| 1    | 9  | 33,465                         | 104,418        | 35,989                           | 117,822        |
| 1    | 11 | 22,218                         | 8,509          | 22,634                           | 8,419          |
| 2    | 7  | 0,534                          | 94,958         | 0,527                            | 102,8          |
| 2    | 8  | 0,914                          | 67,089         | 0,731                            | 73,959         |
| 2    | 9  | 0,742                          | 32,956         | 0,638                            | 36,006         |
| 3    | 4  | 0,044                          | 165,044        | 0,045                            | 176,719        |
| 3    | 7  | 0,182                          | 121,228        | 0,121                            | 130,910        |
| 3    | 9  | 3,217                          | 155,978        | 3,574                            | 165,776        |
| 4    | 5  | 0,263                          | 65,327         | 0,276                            | 69,927         |
| 4    | 9  | 4,101                          | 100,089        | 4,243                            | 106,633        |
| 4    | 14 | 0,043                          | 77,569         | 0,017                            | 82,185         |
| 5    | 6  | 0,019                          | 47,657         | 0,058                            | 51,102         |
| 6    | 9  | 1,339                          | 48,991         | 1,493                            | 52,087         |