

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, anam@ee.its.ac.id, 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

LISTRIK 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*.

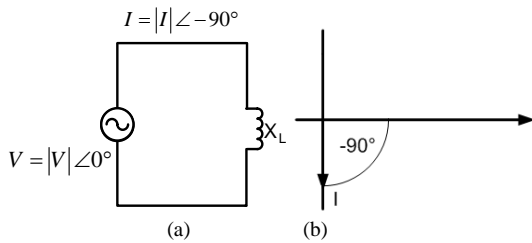
Pada Tugas Akhir ini, metode yang diusulkan adalah *Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm*. *Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm* merupakan suatu algoritma yang dikenalkan oleh Karaboga pada tahun 2005 sebagai suatu teknik masalah optimasi numerik [5]. Algoritma ini dibuat berdasarkan teknik *metaheuristic* 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

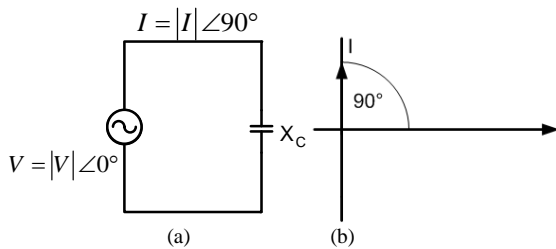
A. Daya Reaktif dalam Suatu Sistem

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:

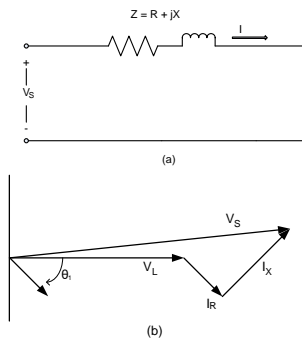
$$\text{Faktor daya} = \frac{\text{daya aktif (KW)}}{\text{daya kompleks (KVA)}} = \cos \theta \quad (4)$$

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

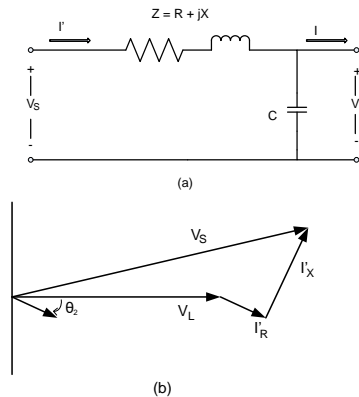
B. Pengaruh Kompensasi pada Beban Induktif

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.

80 kVar	71.41 kVar	60 kVar	43.59 kVar	
60 kW	70 kW	80 kW	90 kW	100 kW
100 kVA PF=0.6	100 kVA PF=0.7	100 kVA PF=0.8	100 kVA PF=0.9	100 kVA PF=1

Gambar 5. Ilustrasi perubahan daya akibat perubahan faktor daya

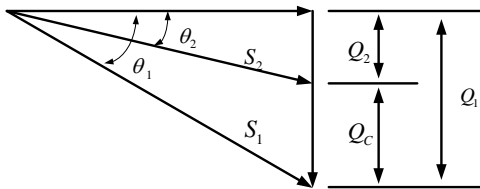
Dengan mengasumsikan bahwa beban disuplai dengan daya nyata (aktif) P , daya reaktif tertinggal (*lagging*) Q_1 , dan daya semu S_1 , maka rumus persamaan dari faktor daya tertinggal adalah sebagai berikut:

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

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:

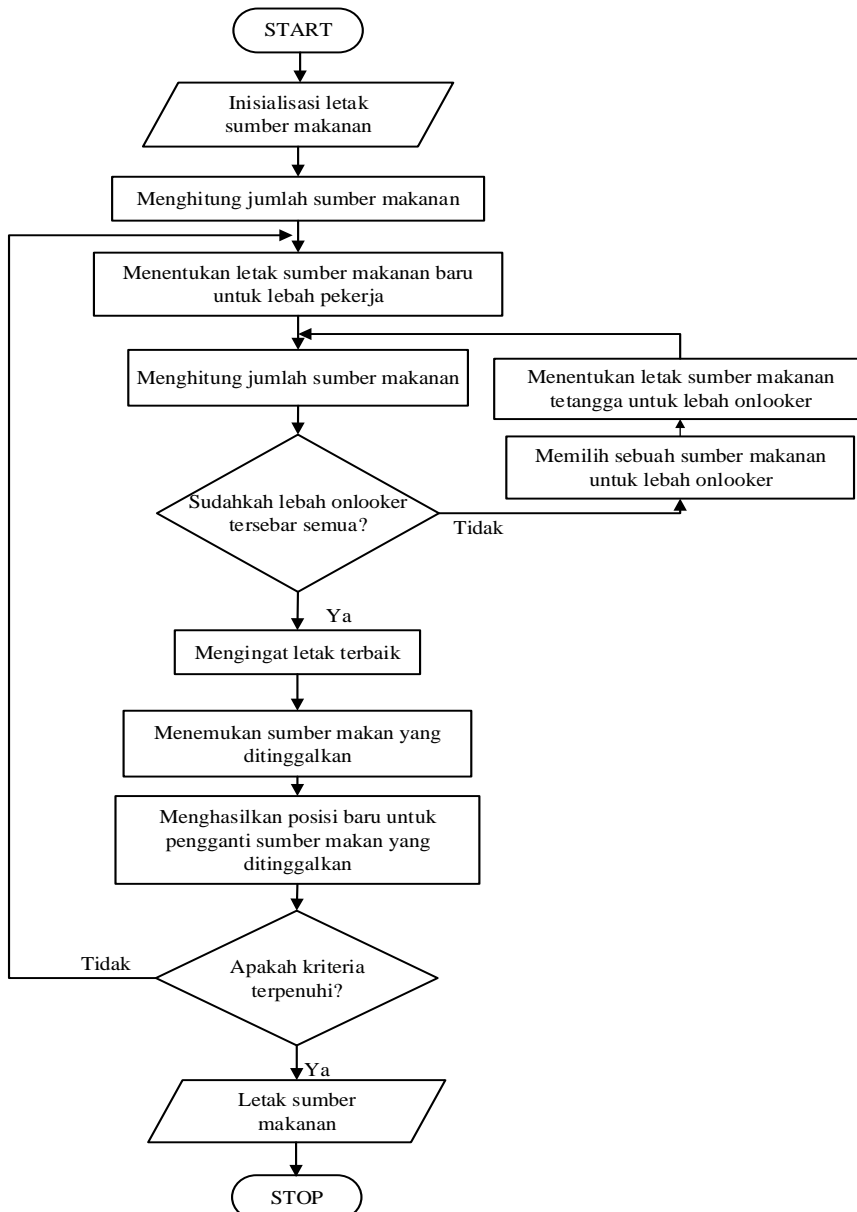
$$|\Delta P_i^{(k)}| \leq \epsilon \tag{31}$$

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

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.

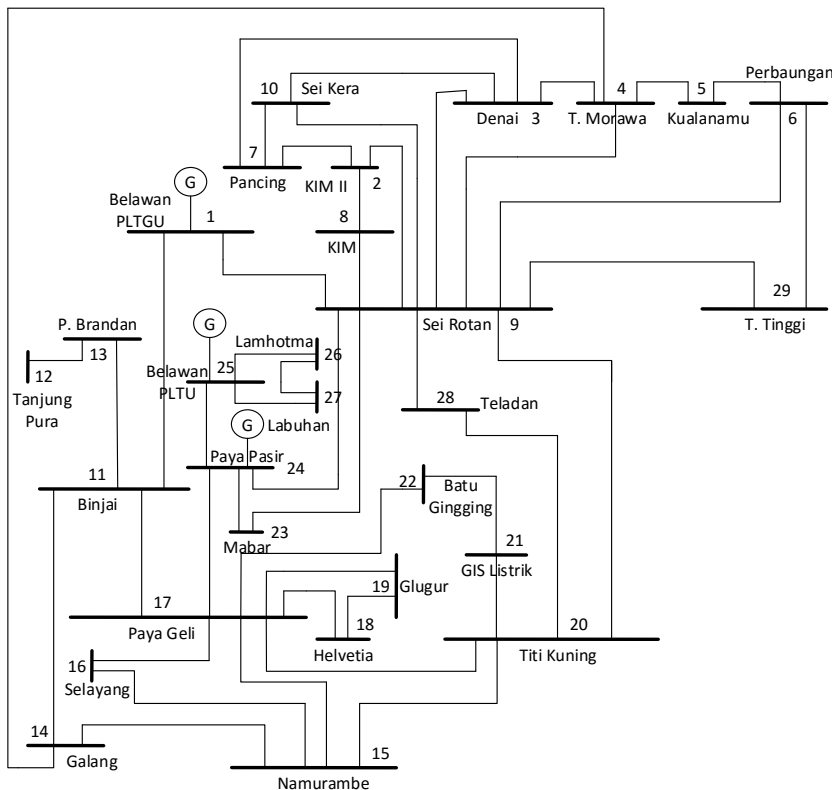
Sistem yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV yang terdiri atas 29 bus, 46 saluran, dan 3 pusat pembangkit seperti yang ditunjukkan Gambar 8.

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, Marbar, Batu Gingging, GIS Listrik, Helvetia, Titi Kuning, Galang, dan Namurambe.

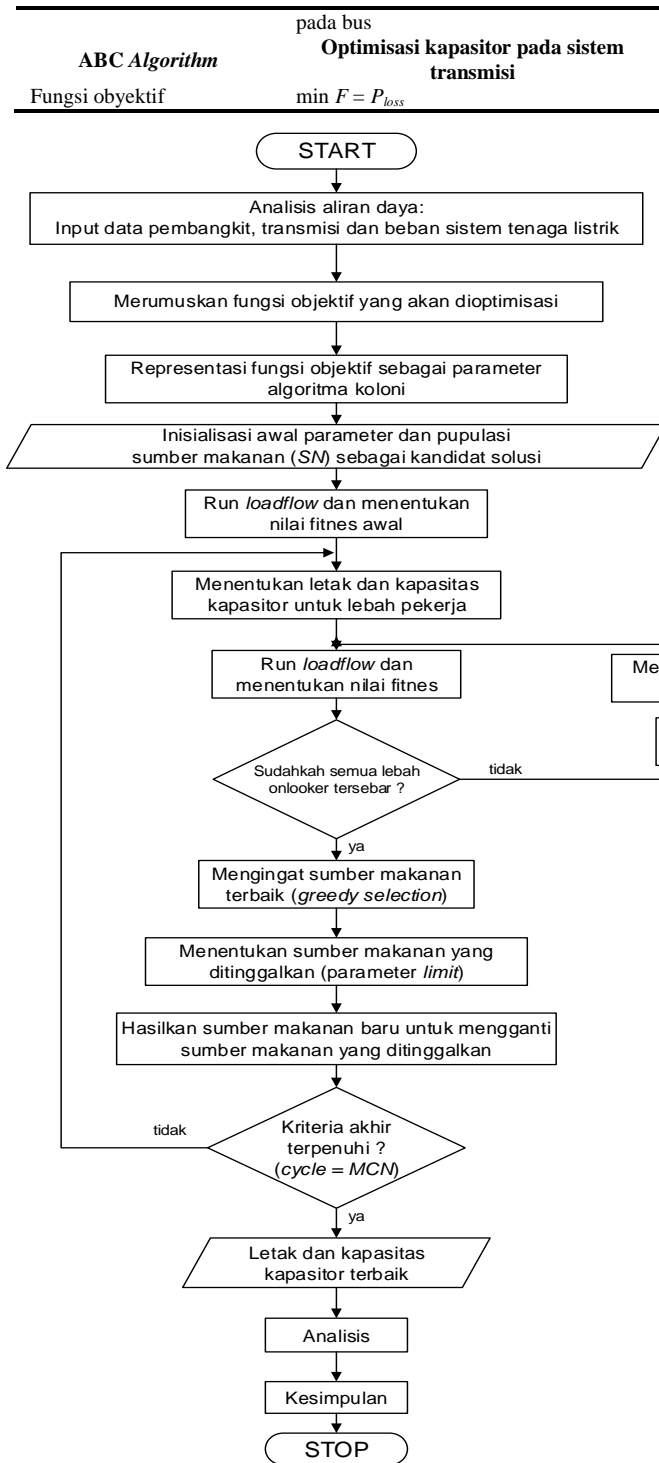


Gambar 8. Single line diagram sistem transmisi Sumatera Utara 150 kV

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

ABC <i>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
Total			2285,1	1273,7	412,951	73,928

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
Total		106,437	3125,223

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
Total			2285,1	1273	2383,31	2488,5	372,08

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

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

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
Total		98,211	3390,203

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
Total		106,437	3125,223	98,211	3390,203

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

Saluran	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