

---

# **Jurnal** ***Rekayasa Elektrika***

---

VOLUME 12 NOMOR 1

APRIL 2016

---

**Optimalisasi Penempatan dan Besaran Shunt Capacitor pada Fasilitas Interkoneksi Generator Distribusi (Studi Kasus di PT PLN (Persero) Rayon Dolok Sanggul)** 30-40

*Darma Wijaya*

---

JRE	Vol. 12	No. 1	Hal 1-40	Banda Aceh, April 2016	ISSN. 1412-4785 e-ISSN. 2252-620X
-----	---------	-------	----------	---------------------------	--------------------------------------

# Optimalisasi Penempatan dan Besaran Shunt Capacitor pada Fasilitas Interkoneksi Pembangkit Tersebar (Studi Kasus di PT PLN (Persero) Rayon Dolok Sanggul)

Darma Wijaya<sup>1</sup>, Usman Ba'afai<sup>1</sup>, dan Ariadi Hazmi<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Magister Teknik Elektro, Universitas Sumatera Utara  
 Jl. Almamater Kampus USU, Medan 20155  
<sup>2</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Andalas  
 Kampus Limau Manis, Padang 25163  
 e-mail: wijaya86.pln@gmail.com

**Abstrak**—Keberadaan pembangkit tersebar memberikan perbaikan terhadap regulasi tegangan, namun sebaliknya terhadap faktor daya dan susut jaringan pada sistem distribusi Dolok Sanggul. Pola pengoperasian dan panjang fasilitas interkoneksi pembangkit tersebar merupakan penyebab meningkatnya aliran daya reaktif pada sistem distribusi. Peningkatan aliran daya reaktif ini dapat dikompensasi dengan pemasangan *shunt capacitor*. *Optimal Capacitor Placement ETAP Power Station* dengan fungsi objektif meminimalkan biaya sistem distribusi digunakan untuk mencari penempatan dan besaran optimum shunt capacitor pada fasilitas interkoneksi pembangkit tersebar. Setelah pemasangan shunt capacitor, biaya sistem distribusi dapat dihemat sebesar Rp 2.092.403.071,- (US\$ 152.208) pada waktu beban puncak (WBP) dan Rp 8.390.300.625,- (US\$ 610.337) pada luar waktu beban puncak (LWBP) dalam kurun waktu 5 tahun.

**Kata kunci:** *Pembangkit Tersebar, Shunt Capacitor, Optimal Capacitor Placement, Faktor Daya, Susut Jaringan Distribusi*

**Abstract**—The existence of distributed generation (DG) has improved voltage regulation, but it reverses power factor and network losses on Dolok Sanggul distribution system. The operation scheme and the length of interconnection facility of DG have caused the increase reactive power flow on distribution system. The increase in reactive power flow could be compensated by the installment of shunt capacitor. *Optimal Capacitor Placement ETAP Power Station* with the objective function is to minimize the cost of distribution system was used to search the placement and the size of shunt capacitor in the interconnection facility of DG. After the installment of shunt capacitor, the cost of distribution system can be saved by Rp 2,092,403,071,- (US\$ 152,208) in Peak Load Time (WBP) and Rp 8,390,300,625,- (US\$ 610,337) in Outside Peak Load Time (LWBP) in the five-year period.

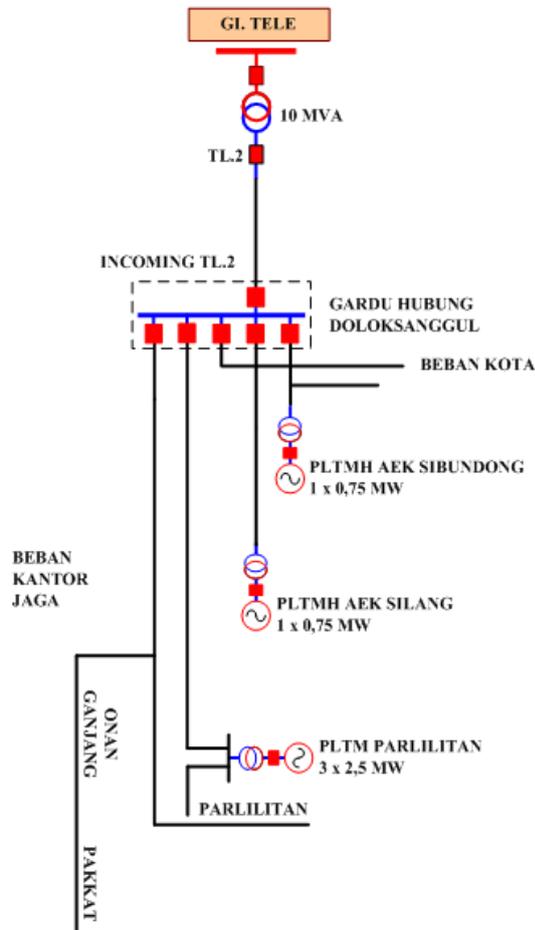
**Keywords:** *Distributed Generation, Shunt Capacitor, Optimal Capacitor Placement, Power Factor, Distribution Network Losses*

## I. PENDAHULUAN

Sumber daya alam seperti minyak bumi, gas, dan batubara merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbarui. Keterbatasan ini menuntut pemerintah untuk mendorong pembangunan pembangkit dari sumber energi terbarukan (*renewable energy resources*). Pemerintah sudah mengeluarkan kebijakan yaitu regulasi harga pembelian energi listrik oleh PLN (Perusahaan Listrik Negara) dari pembangkit berbasis seperti PV (*photovoltaic*), biomassa, biogas, panas bumi, dan air. Regulasi pemerintah hanya mengatur pembelian energi aktif (kWh) tanpa mengatur kompensasi terhadap energi reaktif (kVARh) baik produksi (*overexcited*) maupun menyerap (*underexcited*) untuk kebutuhan sistem pembangkit. Hal ini secara tidak langsung

dapat menimbulkan efek negatif bagi sistem distribusi. Besarnya penetrasi (kuantitas) pembangkit skala kecil di jaringan distribusi akan memberikan pengaruh kepada sistem distribusi seperti energi yang mengalir dari sistem distribusi ke sistem transmisi, pengoperasian jaringan distribusi pada limit batas termalnya, meningkatnya susut jaringan akibat besarnya daya reaktif yang mengalir di sistem distribusi, meningkatnya tegangan pada konsumen yang berada dekat dengan gardu induk dan DG yang bekerja pada kondisi *underexcited* [1].

Pada sistem distribusi Dolok Sanggul seperti pada Gambar 1, terdapat 3 (tiga) unit pembangkit listrik tenaga air (PLTA) skala kecil yaitu PLTM Parlilitan kapasitas 3 x 2,5 MW, PLTMH Aek Silang kapasitas 1 x 750 kW, dan PLTMH Aek Sibundong kapasitas 1 x 750 kW.



Gambar 1. Diagram satu garis sistem distribusi Dolok Sanggul

Dalam penyaluran energinya, pembangkit jenis ini memiliki kelemahan yang tidak dapat dihindari yaitu lokasi yang tidak dapat berpindah dan sebagian besar berada di kawasan hutan yang jauh dari jaringan distribusi eksisting. Berdasarkan aturan pemerintah pembangkit skala kecil dikoneksikan ke sistem distribusi baik pada tegangan menengah maupun tegangan rendah [2]. Dengan kondisi lokasi yang cukup jauh, penyaluran energi dilakukan melalui jaringan distribusi tegangan menengah yang cukup panjang. Besarnya impedansi akibat panjangnya jaringan mengakibatkan sistem terlalu lemah untuk pembebanan [3]. Sehingga muncul permasalahan konsumsi energi reaktif yang cukup besar pada fasilitas interkoneksi.

Dari hasil pengukuran pada gardu hubung Dolok Sanggul sesuai Tabel 1 dapat dilihat bahwa besarnya aliran daya reaktif yang mengalir menuju PLTM Parlilitan yaitu sebesar 2.885 kVar. Sedangkan untuk kebutuhan daya reaktif untuk suplai beban di penyulang Kota, penyulang Kantor Jaga, penyulang Aek Silang, dan penyulang Aek Sibundong semua sudah terpenuhi dengan adanya *shunt capacitor* eksisting sebesar 1.500 kVar yang berada di penyulang Kantor Jaga. Jadi suplai daya reaktif dari gardu induk Tele sebesar 2.191 kVar ke gardu hubung Dolok Sanggul hanya untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif untuk pengoperasian PLTM Parlilitan.

Tabel 1. Pengukuran pada gardu hubung Dolok Sanggul

Parameter	TL.2	PLTM Parlilitan	PLTMH Aek Silang	PLTMH Aek Sibundong	Penyulang Kota	Penyulang Kantor Jaga
P (kW)*	(3.595)	5.632	681	62	(1.329)	(1.474)
Q (kVar)**	2.191	(2.885)	55	(19)	(164)	755
V (kV)	19,53	19,52	19,52	19,52	19,51	19,52
I (A)	125	188	20	2	40	49
PF	- 0,853	- 0,890	0,996	- 0,953	0,993	- 0,890

\* ( ) Aliran daya aktif mengarah keluar gardu hubung Dolok Sanggul  
 \*\* ( ) Aliran daya reaktif mengarah keluar gardu hubung Dolok Sanggul

Untuk mengurangi besarnya aliran daya reaktif ini yaitu dengan mengkompensasi beban yang tujuannya dititikberatkan pada perbaikan faktor daya. Hal ini dilakukan dengan menggunakan kompensator pasif yang dapat membangkitkan arus kapasitif ke jaringan distribusi di titik terpasang [4]. Kompensator yang digunakan adalah *shunt capacitor*, kompensator pasif yang paling sering digunakan pada sistem distribusi [5]. Pada penelitian ini, kandidat lokasi pemasangan *shunt capacitor* pada fasilitas interkoneksi DG yaitu bus gardu hubung Dolok Sanggul, bus outgoing PLTM Parlilitan, bus outgoing PLTMH Aek Silang, dan bus outgoing PLTMH Aek Sibundong. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan aliran daya reaktif di sistem distribusi Dolok Sanggul.

Dari penelitian-penelitian yang sudah ada, fungsi objektif yang digunakan dalam pengoptimalan penempatan dan besaran *shunt capacitor* antara lain untuk meminimalkan biaya susut energi, meminimalkan biaya susut daya, meminimalkan biaya pengadaan *shunt capacitor*, memaksimalkan *saving* biaya sistem, meminimalkan deviasi tegangan, memaksimalkan kapasitas penyulang dan transformator, dan memperbaiki THD (total harmonic distortion) sistem. Metode optimalisasi yang digunakan antara lain *fuzzy-GA*, *fuzzy expert system*, *two stage immune algorithm*, *genetic algorithm*, *loss sensitivity factor and plant growth simulation algorithm*, *optimal capacitor placement (OCP) with ETAP*, *pseudo-polynomial algorithm*, *hybrid honey bee colony algorithm*, *mixed integer nonlinear programming approach*, *teaching learning based optimization*, *clustering based optimization*, *interval arithmetic technique*, dan *gravitational search algorithm* [6]-[21].

Penelitian yang sudah ada menguraikan bagaimana mengoptimalkan penempatan dan besaran *shunt capacitor* pada jaringan distribusi radial dengan fungsi objektif dan metode masing-masing tanpa mempertimbangkan pengaruh pola pengoperasian dan penyaluran energi DG. Terdapat beberapa peneliti yang menggunakan sistem dengan adanya DG, namun hanya terkait dengan peningkatan THD sistem akibat penetrasi (kuantitas) DG. Sedangkan pada penelitian ini, pencarian penempatan dan besaran optimum *shunt capacitor* dengan fungsi objektif meminimalkan biaya sistem distribusi dilaksanakan dengan

mempertimbangkan pola pengoperasian dan fasilitas interkoneksi DG sebagai faktor penyebab meningkatnya aliran daya reaktif pada sistem distribusi. Penelitian ini menggunakan *Optimal Capacitor Placement ETAP Power Station* untuk melakukan pencarian lokasi dan besaran optimum dari *shunt capacitor*.

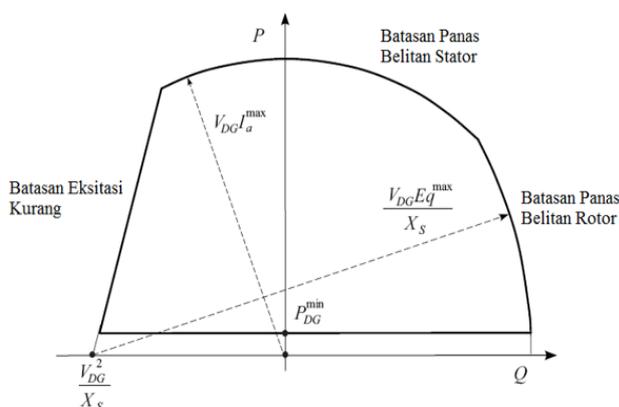
## II. STUDI PUSTAKA

### A. Pembangkit Tersebar

Pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas kecil yang terhubung secara langsung ke sistem distribusi atau dekat dengan alat ukur konsumen dan bukan merupakan bagian dari sistem pembangkit terpusat (*centralized generation system*) disebut sebagai pembangkit tersebar [22]. Teknologi DG umumnya digunakan adalah mesin genset (diesel), turbin gas, CHP (*Combine Heat and Power*), turbin angin, sel surya, dan SHP (*Small Hydro Plant*) [3],[23].

Pada penelitian ini, konversi energi sebagai penghubung (*interface*) DG ke sistem distribusi (*grid*) adalah generator sinkron. Generator sinkron dengan pengaturan governor dan medan, pengoperasian mesin dapat mengikuti beban sesuai kemampuan desainnya. Mesin dapat beroperasi mengirim (*overexcited*) dan menyerap (*underexcited*) daya reaktif secara kontinyu sesuai rating kemampuan generator sinkron. Mesin sinkron yang relatif kecil terhadap kapasitas sistem, generator sinkron yang terhubung pada sistem distribusi biasanya dioperasikan dengan kontrol exciter faktor daya konstan atau VAr konstan. Untuk mesin sinkron yang relatif besar terhadap kapasitas sistem, mesin dioperasikan meregulasi tegangan sistem [3].

Generator sinkron memiliki rating maksimum  $MVA_{\text{output}}$  pada faktor daya dan tegangan tertentu (biasanya 0,85 atau 0,9 *lagging*) yang dapat beroperasi secara kontinyu tanpa panas berlebih. Keluaran daya aktif dibatasi oleh kemampuan penggerak mula (*prime mover*) yang terkopel dengan rotor. Sedangkan keluaran daya reaktif dibatasi oleh pemanasan yang terjadi pada inti besi, belitan rotor, dan belitan stator [24]. Batasan keluaran daya reaktif seperti



Gambar 2. Kurva kemampuan generator sinkron [25]

tertuang dalam (1) dapat didefinisikan menggunakan kurva kemampuan generator sinkron pada Gambar 2, dimana  $P_{DG}^{min}$  adalah keluaran daya aktif minimum,  $E_q^{max}$  adalah keluaran daya reaktif,  $V_{DG}$  adalah tegangan internal maksimum, adalah tegangan terminal,  $X_s$  adalah reaktansi sinkron, dan  $I_a^{max}$  adalah arus stator maksimum [25].

$$Q_{DG} \leq -\frac{V_{DG}^2}{X_s} + \frac{1}{X_s} \sqrt{(V_{DG} E_q^{max})^2 - (X_s P_{DG})^2} \quad (1)$$

### B. Kompensasi Daya Reaktif dan Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Shunt Capacitor

Kompensasi daya reaktif dilakukan dengan manajemen beban reaktif untuk memperbaiki kualitas penyaluran pada sistem tenaga listrik. Mengkompensasi beban reaktif memiliki dua tujuan utama yaitu koreksi faktor daya dan memperbaiki regulasi tegangan. Hal ini dilakukan dengan pengurangan karakteristik beban induktif yaitu dengan menambahkan arus *leading* yang membalik beberapa atau semua komponen *lagging* dari beban induktif di titik peralatan pengaturan daya reaktif terpasang.

Kompensator daya reaktif terbagi menjadi 2 (dua) yaitu kompensator pasif dan aktif. Kompensator pasif terdiri dari *shunt reactor*, *shunt capacitor*, dan *series capacitor*. Sedangkan kompensator aktif terdiri dari *synchronous condenser*, *saturated reactor compensator*, *thyristor switched capacitor*, dan *thyristor controlled reactor*. Untuk kompensator pasif, *shunt reactor* secara teknis digunakan untuk mengkompensasi pengaruh kapasitansi jaringan distribusi terutama untuk membatasi kenaikan tegangan pada saat jaringan terbuka atau pada saat beban ringan. Dan *series capacitor* digunakan untuk mengkompensasi panjang jaringan. Tetapi dalam penggunaan *series capacitor* diperlukan pertimbangan terhadap faktor keandalan yaitu kerusakan pada *capacitor* akan menyebabkan terputusnya aliran daya pada sistem tenaga. Sedangkan *shunt capacitor* digunakan untuk meningkatkan kapasitansi alami dengan membangkitkan arus kapasitif pada jaringan. Untuk kompensator aktif sendiri biasanya terhubung paralel dengan peralatan yang memiliki fungsi utama untuk menjaga kestabilan tegangan pada terminal peralatan. Hal ini dilakukan dengan membangkitkan atau menyerap sejumlah kebutuhan daya reaktif untuk mengkoreksi faktor daya dengan tepat sebagai respon dari variasi tegangan pada titik koneksinya [4].

Dengan mayoritas beban sistem distribusi Dolok Sanggul adalah rumah tangga, perubahan beban tidak akan berpengaruh secara signifikan terhadap variasi tegangan pada terminal unit pembangkit. Penggunaan kompensator pasif menjadi pilihan untuk penyelesaian permasalahan daya reaktif. Dengan pertimbangan faktor keandalan, kompensator pasif yang digunakan adalah *shunt capacitor*. Kompensator daya reaktif ini adalah yang paling sering digunakan pada sistem distribusi.

Pemasangan *shunt capacitor* untuk koreksi faktor daya selalu dilakukan dengan tujuan memproduksi daya

reaktif sedekat mungkin dengan beban yang memerlukan daya reaktif, hal ini jauh lebih efektif dibandingkan mensuplainya dari gardu induk yang jauh. Aliran daya reaktif yang sebenarnya tidak dibutuhkan mengakibatkan pengoperasian gardu induk dan jaringan distribusi tidak efisien dan pengaturan tegangan dalam mensuplai sistem dapat menjadi lebih sulit.

C. Penurunan Susut Sistem Distribusi dengan Penempatan Shunt Capacitor

Arus yang mengalir pada percabangan (i,k) menghubungkan bus i dan k seperti tertera pada Gambar 3, diberikan pada (2) [12].

$$I_{ik} = \frac{P_{ik} - jQ_{ik}}{E_i^*} \quad (2)$$

Dengan penambahan *shunt capacitor*, terjadi pengurangan aliran daya reaktif di titik terpasang. Pengurangan aliran daya reaktif ini akan menurunkan nilai arus seperti tertuang pada (3).

$$I_{ik} = \frac{P_{ik} - jQ_{ik}}{E_i^*} \quad (3)$$

Arus yang mengalir terdiri dari dua komponen yaitu komponen aktif dan komponen reaktif. Pengurangan nilai arus reaktif dengan pemasangan *shunt capacitor* ini berpengaruh terhadap nilai susut. Hal ini ditunjukkan dengan (4), (5), (6), dan (7) [26].

$$I_{ik}^2 R = (I_{ik} \cos \theta)^2 R + (I_{ik} \sin \theta)^2 R, \quad (4)$$

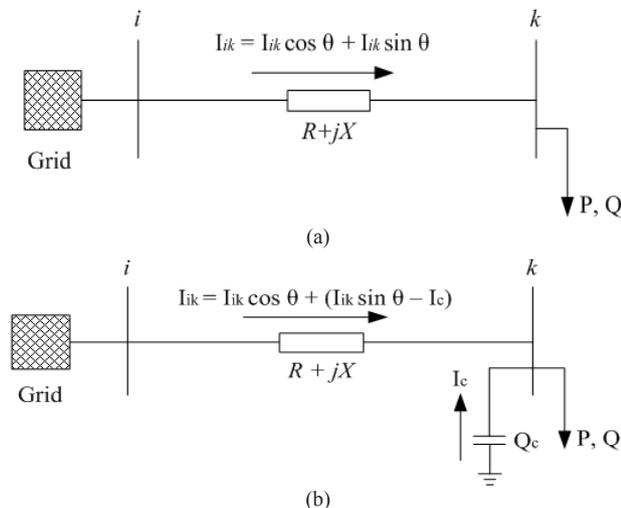
$$I_{ik1}^2 R = (I_{ik} \cos \theta)^2 R + (I_{ik} \sin \theta - I_c)^2 R, \quad (5)$$

$$\Delta P_{LS} = I_{ik}^2 R - I_{ik1}^2 R, \quad (6)$$

$$\Delta P_{LS} = 2(I_{ik} \sin \theta) I_c R - I_c^2 R, \quad (7)$$

Dimana,

$I_{ik}$  = Arus pada percabangan (i, k)



Gambar 3. Diagram satu garis untuk mengilustrasikan penempatan *shunt capacitor* terhadap penurunan susut

- $P_{ik}$  = Daya aktif pada percabangan (i, k)
- $Q_{ik}$  = Daya reaktif pada percabangan (i, k)
- $E_i$  = Tegangan pada titik (bus) i
- $Q_c$  = Besaran *shunt capacitor*
- $I_c$  = Arus kapasitif
- $R$  = Resistansi percabangan (i, k)
- $\Delta P_{LS}$  = Penurunan susut (losses).

D. Optimalisasi Penempatan dan Besaran Shunt Capacitor Menggunakan Optimal Capacitor Placement ETAP Power Station

ETAP *Power Station* menggunakan metode algoritma genetika untuk penyelesaian optimalisasi penempatan dan besaran *shunt capacitor*. Algoritma genetika merupakan salah satu metode metaheuristik yang paling populer. Hal ini disebabkan karena algoritma genetika memiliki performa yang baik untuk berbagai macam permasalahan optimasi [27].

Adaptasi menjadi prinsip yang penting di dalam algoritma genetika. Adaptasi merupakan kemampuan untuk menyesuaikan diri dengan lingkungannya. Dalam algoritma genetika, adaptasi dinyatakan dengan proses memodifikasi struktur individu yang akan meningkatkan kinerja algoritma genetika. Mekanisme kerja algoritma genetika mengikuti fenomena evolusi genetika yang terjadi dalam makhluk hidup.

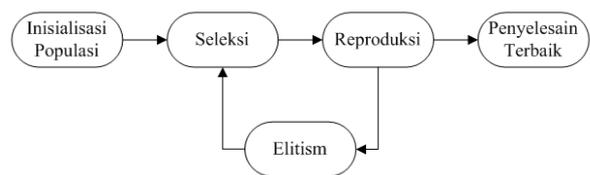
Prosedur algoritma genetika seperti pada Gambar 4 diawali dengan menginisialisasi populasi, proses seleksi, proses produksi (pindah silang dan mutasi), proses *elitism (replacement)*, dan keluaran yaitu penyelesaian terbaik. Populasi terdiri dari sejumlah individu yang tersusun atas kromosom-kromosom. Individu yang telah dibangkitkan kemudian dievaluasi untuk menentukan nilai fitness yang menyatakan kualitas dari individu dan dirumuskan dengan sebuah fungsi objektif.

Fungsi objektif yang digunakan pada penelitian ini adalah meminimalkan biaya sistem distribusi. Biaya ini diukur dengan 4 (empat) cara yaitu [28] :

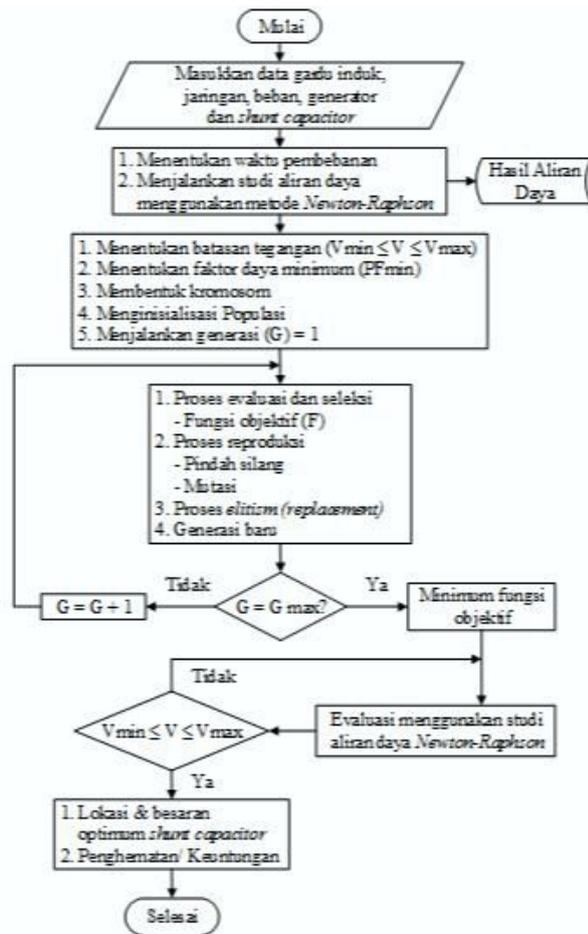
- a. Biaya pemasangan *capacitor*
- b. Biaya pengadaan *capacitor*
- c. Biaya pengoperasian *capacitor*
- d. Biaya susut sistem distribusi

Secara matematis, fungsi objektif di atas diberikan pada (8).

$$F = \sum_{i=1}^{N_{bus}} x_i (Q_{ci} C_{0i} + B_i C_{2i} T) + C_2 \sum_{l=1}^{N_{load}} T_l P_l^l, \quad (8)$$



Gambar 4. Diagram alir algoritma genetika [27]



Gambar 5. Diagram alir optimalisasi penempatan dan besaran *shunt capacitor* menggunakan metode Algoritma Genetika

Dimana,

- $N_{bus}$  = Jumlah bus kandidat
- $x_i$  = 0 dan 1, jika 0 artinya tidak ada *shunt capacitor* terpasang pada bus  $i$
- $C_{0i}$  = Biaya pemasangan *shunt capacitor*
- $C_{1i}$  = Biaya *shunt capacitor* per kVAr
- $Q_{Ci}$  = Besaran *shunt capacitor*, kVAr
- $B_i$  = Jumlah *shunt capacitor*
- $C_{2i}$  = Biaya operasi *shunt capacitor* per bank, per-tahun
- $C_2$  = Biaya susut kWh, dalam \$/ kWh
- $l$  = Level beban, maksimum, rata-rata dan minimum
- $T_l$  = Durasi waktu, dalam jam, dari level beban
- $P_L^l$  = Total susut sistem distribusi pada level beban

Batasan (main constraint) dalam penempatan dan besaran *shunt capacitor* dengan fungsi objektif di atas adalah  $V_{min} \leq V \leq V_{max}$  dan  $PF_{min} \leq PF \leq PF_{max}$ . Dimana variasi tegangan mengacu kepada Standar PLN No. 1 Tahun 1995 yaitu +5% dan -10% dari tegangan nominal [29]. Sedangkan faktor daya mengacu kepada Peraturan Menteri ESDM No. 37 Tahun 2008 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Sumatera yaitu minimum 0,85 lagging [30].

### III. METODE

#### A. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada dua waktu pembebanan yaitu waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Proses optimasi pencarian titik dan besaran *shunt capacitor* pada penelitian ini menggunakan *Optimal Capacitor Placement ETAP Power Station* (metode algoritma genetika) dengan fungsi objektif meminimalkan biaya sistem distribusi. Penelitian didahului dengan melaksanakan studi aliran daya yang bertujuan untuk mengetahui parameter daya reaktif yang mengalir pada sistem distribusi.

Identifikasi kebutuhan daya reaktif (faktor daya minimum) menjadi acuan dalam penentuan kandidat bus pemasangan dan besaran *shunt capacitor*. Faktor daya minimum ( $PF_{min}$ ) ditentukan menggunakan metode *trial and error* hingga mendapatkan fungsi objektif minimum dan memenuhi batasan tegangan yang sudah ditentukan. Hasil optimasi yang diperoleh kemudian dievaluasi kembali menggunakan studi aliran daya untuk memperoleh besaran optimum yang dapat diimplementasikan. Pelaksanaan penelitian secara diagram alir dapat dilihat pada Gambar 5.

#### B. Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada sistem distribusi Dolok Sanggul dengan keberadaan 3 (tiga) unit generator distribusi yaitu PLTM Parlilitan kapasitas 3 x 2,5 MW, PLTMH Aek Silang kapasitas 1 x 750 kW, dan PLTMH Aek Sibundong kapasitas 1 x 750 kW.

#### C. Sistem Distribusi Dolok Sanggul

Sistem kelistrikan Dolok Sanggul secara garis besar terdiri dari gardu induk Tele (power grid) 150 kV/ 20 kV, sistem distribusi radial 20 kV, dan generator distribusi yang terhubung ke sistem 20 kV. Sistem kelistrikan Dolok Sanggul dirancang dalam diagram satu garis menggunakan ETAP *Power Station* yang ditunjukkan pada Gambar 6. Sistem kelistrikan Dolok Sanggul ini dibuat dengan asumsi bahwa sistem distribusi Dolok Sanggul adalah sistem distribusi 3 fasa dan seimbang.

Gardu induk Tele dengan kapasitas trafo daya sebesar 10 MVA memiliki MVA hubung singkat 3 fasa sebesar 1.208,76 dan X/R sebesar 5,83. Untuk trafo generator terdiri dari 3 (tiga) trafo *step up* 6,3/20 kV dengan kapasitas yaitu 10 MVA untuk PLTM Parlilitan, 1 MVA untuk PLTMH Aek Sibundong, dan 1 MVA untuk PLTMH Aek Silang. Untuk data jaringan distribusi 20 kV tertuang pada Tabel 2, sedangkan data beban (*lump load*) tertuang pada Tabel 3 dengan *rating* faktor daya sebesar 0,9 lagging, persentase beban motor sebesar 5% dan persentase beban statis sebesar 95%. Pada sistem distribusi eksisting terdapat *shunt capacitor* sebesar 1.500 kVAR.

Tabel 2. Data jaringan distribusi Dolok Sanggul

No.	Bus	Ke Bus	Z1 = Z2 (pu)		B/2 (pu)
			R	X	
1.	1	2	0,00315	0,00449	0,00000
2.	1	3	0,78751	1,12542	0,00001
3.	3	4	0,78751	1,12542	0,00001
4.	4	5	0,13415	0,28406	0,00000
5.	5	6	0,13415	0,28406	0,00000
6.	6	7	1,82843	0,83894	0,00001
7.	6	8	0,26795	0,38293	0,00000
8.	8	9	0,26795	0,38293	0,00000
9.	9	10	0,10556	0,04844	0,00000
10.	10	11	0,10556	0,04844	0,00000
11.	9	12	0,33345	0,35139	0,00000
12.	12	13	8,26344	2,71447	0,00002
13.	12	14	1,74623	1,84015	0,00002
14.	14	15	1,74623	1,84015	0,00002
15.	15	16	4,18911	1,37609	0,00001
16.	15	17	0,27203	0,28666	0,00000
17.	17	18	0,27203	0,28666	0,00000
18.	9	19	0,10756	0,07836	0,00000
19.	19	20	0,33337	0,47642	0,00000
20.	19	21	0,03460	0,04944	0,00000
21.	21	22	0,37488	0,53574	0,00001
22.	9	23	0,66045	0,94385	0,00001
23.	23	24	0,96282	0,70143	0,00001
24.	24	25	1,24092	0,90402	0,00001
25.	24	26	0,45477	0,64990	0,00001
26.	26	27	0,45477	0,64990	0,00001
27.	27	28	1,23305	0,89829	0,00001
28.	28	29	1,23305	0,89829	0,00001
29.	29	30	0,34595	0,49440	0,00001
30.	30	31	0,37647	0,27426	0,00000
31.	31	32	0,60209	0,43863	0,00000
32.	33	34	2,13815	1,55767	0,00001
33.	34	35	0,28859	0,21024	0,00000
34.	35	36	0,84739	0,61733	0,00001
35.	35	37	1,53868	1,12095	0,00001
36.	37	38	1,53868	1,12095	0,00001
37.	38	39	1,80234	1,31303	0,00001
38.	9	33	2,29740	4,86458	0,00005

Tabel 3. Data beban distribusi Dolok Sanggul

No.	Nama Beban	Daya (kVA)	Beban (%)	
			LWBP	WBP
1.	BEBAN TL.1	2.820	80	100
2.	BEBAN 1	175	26	55
3.	BEBAN 2	523	31	53
4.	BEBAN 3	473	14	45
5.	BEBAN 4	148	23	33
6.	BEBAN 5	300	8	16
7.	BEBAN 6	235	40	51
8.	BEBAN 7	921	24	48
9.	BEBAN 8	532	22	36
10.	BEBAN 9	189	15	23
11.	BEBAN 10	191	9	18
12.	BEBAN 11	485	29	48
13.	BEBAN 12	1185	26	45
14.	BEBAN 13	976	44	65
15.	BEBAN 14	715	22	53
16.	BEBAN 15	666	23	46
17.	BEBAN 16	510	17	33
18.	BEBAN 17	496	17	31
19.	BEBAN 18	606	16	33
20.	BEBAN 19	857	16	47
21.	BEBAN 20	871	15	38
22.	BEBAN 21	117	25	45
23.	BEBAN 22	225	27	51
24.	BEBAN 23	271	24	53
25.	BEBAN 24	756	18	38

adalah Rp. 13.747,-.

*Shunt capacitor* yang akan dipasang memiliki *rating* tegangan maksimum sebesar 23 kV, *rating* kapasitas sebesar 150 kVAR/bank, biaya pengadaan sebesar Rp. 200.000,-/kVAR (US\$ 15/kVAR), biaya pemasangan sebesar Rp. 9.000.000,-/bank (US\$ 655/bank), dan biaya pengoperasian sebesar Rp. 1.500.000,-/bank/tahun (US\$ 109 /bank/tahun).

Simulasi dilaksanakan dengan dua waktu pembebanan yaitu waktu beban puncak (WBP) dan luar waktu beban puncak (LWBP). Dengan asumsi biaya pengadaan untuk *fixed* dan *switched shunt capacitor* adalah sama, hasil penempatan dan besaran optimum *shunt capacitor* pada fasilitas interkoneksi generator distribusi tertera pada Tabel 4. Biaya sistem distribusi dihitung dalam kurun waktu 5 (lima) tahun, suku bunga 12%, dan dilaksanakan dengan durasi selama 4 jam (pukul 18.01 WIB sampai dengan pukul 22.00 WIB) untuk WBP dan 20 jam (pukul 22.01 WIB sampai dengan pukul 18.00 WIB) untuk LWBP. Analisa aliran daya dan biaya sistem distribusi dilaksanakan dalam tiga tahap yaitu sebelum generator distribusi beroperasi, setelah generator distribusi beroperasi, dan setelah pemasangan *shunt capacitor*. Tegangan operasi, susut jaringan distribusi, pembebanan gardu induk, faktor daya bus beban, dan penghematan

#### D. Studi Kasus

Pada sistem distribusi Dolok Sanggul, PLTM Parlilitan dengan kapasitas sebesar 7,5 MW beroperasi sebagai *voltage control*. Sedangkan PLTMH Aek Sibundong dan Aek Silang dengan kapasitas 750 kW beroperasi sebagai *power factor control* pada faktor daya sebesar 0,85 *lagging*.

Biaya pokok penyediaan energi listrik untuk sistem distribusi Dolok Sanggul adalah sebesar Rp. 1.986,-/ kWh atau US\$ 0,142/ kWh dengan asumsi nilai tengah 1 US\$



**Penerbit:**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh 23111

website: <http://jurnal.unsyiah.ac.id/JRE>

email: [rekayasa.elektrika@unsyiah.net](mailto:rekayasa.elektrika@unsyiah.net)

Telp/Fax: (0651) 7554336



Tabel 4. Penempatan dan besaran optimum shunt capacitor untuk WBP dan LWBP

No.	Lokasi	Shunt Capacitor (kVAR)		
		Fixed	Switched	Total
<b>Waktu Beban Puncak (WBP)</b>				
1.	Bus 9	750	1.050	1.800
2.	Bus 11	-	-	-
3.	Bus 18	-	-	-
4.	Bus 33	1.200	750	1.950
5.	Total Kapasitas	1.950	1.800	3.750
6.	Jumlah Bank	13	12	25
7.	Biaya Pengadaan	Rp 669.642.857,- (US\$ 48.712)		
8.	Biaya Pemasangan	Rp 200.892.857,- (US\$ 14.614)		
9.	Biaya Pengoperasian	Rp 167.410.714,- (US\$ 12.178)		
10.	Biaya Susut Dis- tribusi	Rp 19.560.879.250,- (US\$ 1.422.920)		
11.	Biaya Sistem Dis- tribusi	Rp 20.598.825.679,- (US\$ 1.498.423)		
<b>Luar Waktu Beban Puncak (LWBP)</b>				
1.	Bus 9	750	-	750
2.	Bus 11	-	-	-
3.	Bus 18	-	-	-
4.	Bus 33	1.200	-	1.200
5.	Total Kapasitas	1.950	-	1.950
6.	Jumlah Bank	13	-	13
7.	Biaya Pengadaan	-		
8.	Biaya Pemasangan	-		
9.	Biaya Pengoperasian	-		
10.	Biaya Susut Dis- tribusi	Rp 129.799.155.625,- (US\$ 9.441.999)		
11.	Biaya Sistem Dis- tribusi	Rp 129.799.155.625,- (US\$ 9.441.999)		

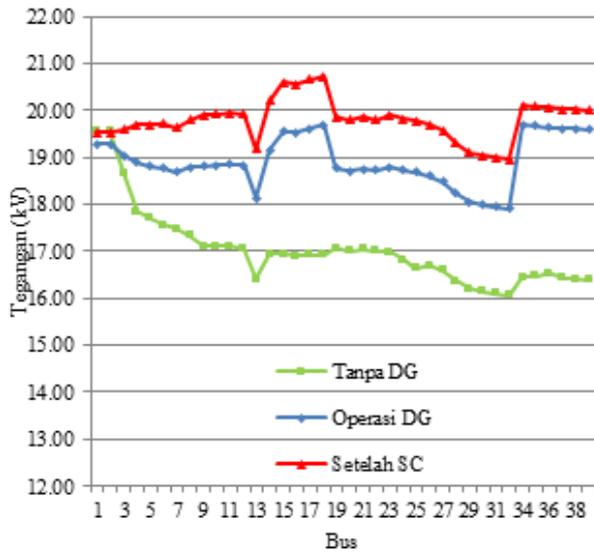
tegangan maksimum sudah mencapai 20,47 kV. Sehingga pemasangan *shunt capacitor* untuk perbaikan faktor daya sistem distribusi ini sudah terbatas dengan standar tegangan operasi maksimum yaitu sebesar +5% tegangan nominal. Setelah pemasangan *shunt capacitor*, tegangan maksimum meningkat sebesar 2,51% dan tegangan minimum meningkat sebesar 0,92%. Dengan pemasangan *shunt capacitor*, semua tegangan operasi sistem distribusi masih memenuhi standar tegangan operasi yaitu 20,98 kV untuk tegangan maksimum dan 19,40 kV untuk tegangan minimum. Profil tegangan operasi pada sistem distribusi Dolok Sanggul untuk WBP dan LWBP dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 5. Evaluasi aliran daya dan biaya sistem distribusi untuk WBP dan LWBP

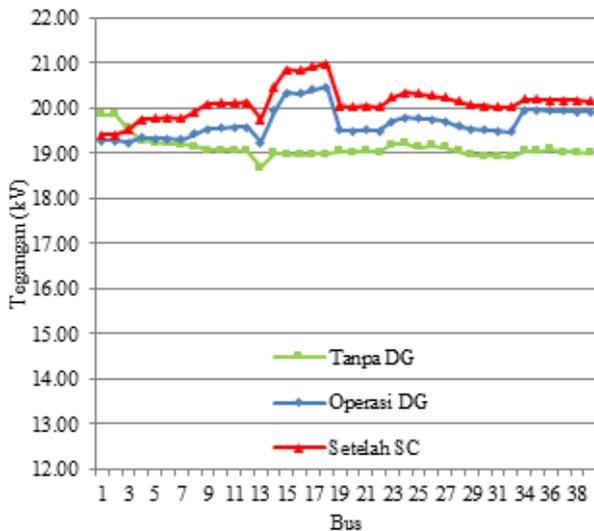
No.	Uraian	Tanpa DG	Operasi DG	Setelah SC
<b>Waktu Beban Puncak (WBP)</b>				
1.	Tegangan Operasi			
	Maks(kV)	19,54	19,97	20,72
	Min (kV)	16,07	17,91	18,96
2.	Susut Jaringan Distribusi			
	Aktif (kW)	516,8	1.942,2	1.542,2
	Reaktif (kVAr)	769,5	3.460,7	2.988,9
3.	Pembebanan Gardu Induk (MVA)	6,837	5,249	3,967
4.	Ketidaksesuaian Faktor Daya Bus Beban			
	Jumlah Bus	-	8	3
	Nilai Min (%)	-	72,0	79,4
5.	Biaya Sistem Distribusi			
	Rupiah	6.557.498.750	22.691.228.750	20.598.825.679
	US\$	477.013	1.650.631	1.498.423
6.	Penghematan Biaya Sistem Distribusi Setelah SC			
	Rupiah	2.092.403.071		
	US\$	152.208		
<b>Luar Waktu Beban Puncak (LWBP)</b>				
1.	Tegangan Operasi			
	Maks(kV)	19,85	20,47	20,98
	Min (kV)	18,69	19,23	19,40
2.	Susut Jaringan Distribusi			
	Aktif (kW)	204,7	2.179,1	2.046,1
	Reaktif (kVAr)	41,9	4.154,2	3.908,5
3.	Pembebanan Gardu Induk (MVA)	4,613	6,250	5,787
4.	Ketidaksesuaian Faktor Daya Bus Beban			
	Jumlah Bus	1	4	3
	Nilai Min (%)	56,5	42,3	42,2
5.	Biaya Sistem Distribusi			
	Rupiah	13.000.843.750	138.189.456.250	129.799.155.625
	US\$	945.722	10.052.336	9.441.999
6.	Penghematan Biaya Sistem Distribusi Setelah SC			
	Rupiah	8.390.300.625		
	US\$	610.337		

B. Susut Jaringan Distribusi

Meningkatnya kebutuhan daya reaktif yang cukup besar setelah beroperasinya generator distribusi



(a)

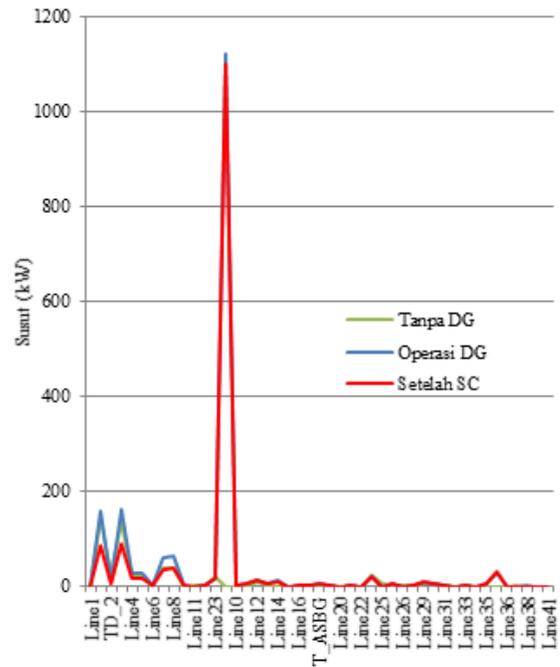


(b)

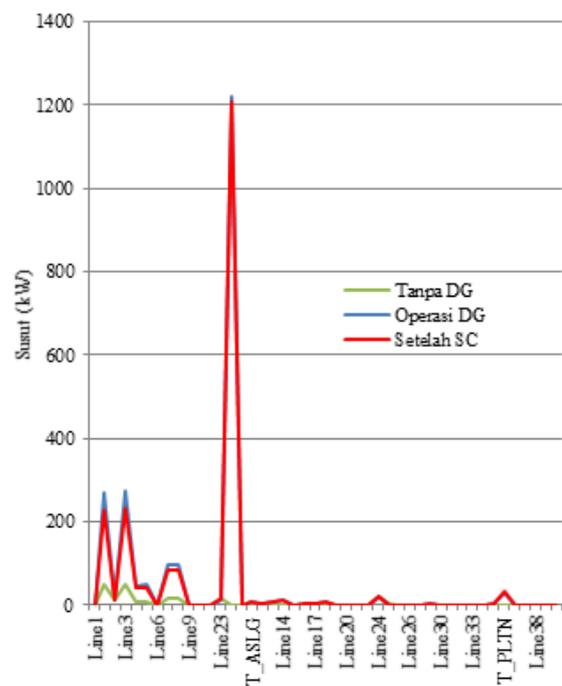
Gambar 7. Tegangan operasi sistem distribusi Dolok Sanggul untuk (a) WBP dan (b) LWBP

disebabkan oleh pola pengoperasian generator distribusi PLTM Parlilitan sebagai pengontrol tegangan (voltage control) dan besarnya kebutuhan arus reaktif pada jaringan interkoneksinya. Hal ini berdampak meningkatnya arus yang mengalir di penyulang utama TL.2 yang mensuplai daya reaktif dari gardu induk Tele. Meningkatnya nilai arus ini berbanding lurus dengan peningkatan susut jaringan distribusi yang diidentikkan sebagai susut daya aktif (kW).

Seperti tertera pada Tabel 5, susut jaringan distribusi meningkat sebesar 246,09% untuk WBP dan 964,53% untuk LWBP setelah beroperasinya generator distribusi. Peningkatan yang cukup besar ini disebabkan susut jaringan interkoneksi PLTM Parlilitan dan jaringan penyulang utama TL.2. Setelah pemasangan *shunt capacitor*, susut jaringan sistem distribusi dapat diturunkan sebesar 13,78%



(a)



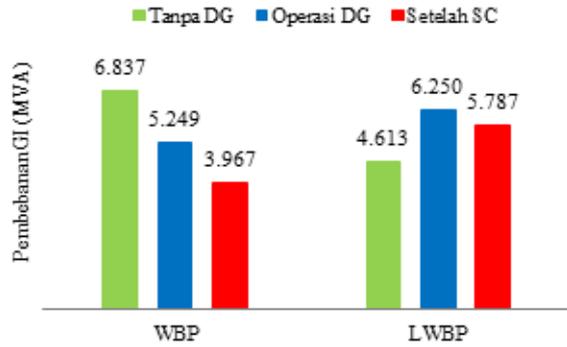
(b)

Gambar 8. Susut jaringan sistem distribusi Dolok Sanggul untuk (a) WBP dan (b) LWBP

untuk WBP dan 6,10% untuk LWBP. Profil susut jaringan sistem distribusi Dolok Sanggul untuk WBP dan LWBP dapat dilihat pada Gambar 8.

### C. Pembebanan Gardu Induk

Pengoperasian generator distribusi pada sistem distribusi Dolok Sanggul memberikan pengaruh cukup besar terhadap pembebanan gardu induk Tele. Setelah beroperasinya generator distribusi, pembebanan



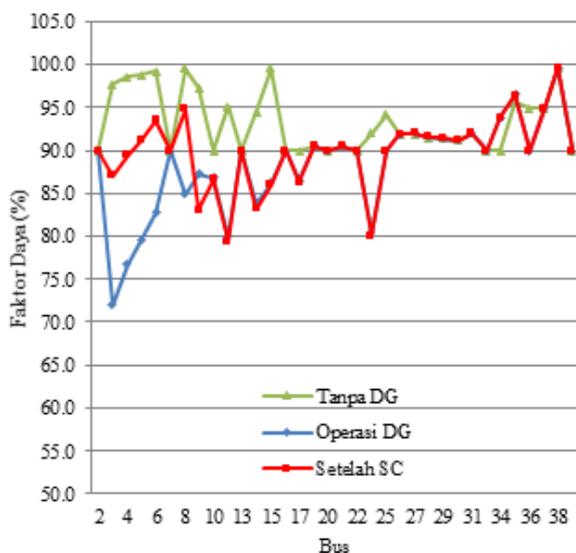
Gambar 9. Pembebanan gardu induk Tele untuk WBP dan LWBP

gardu induk Tele menurun sebesar 23,23% pada WBP dan meningkat sebesar 35,49% pada LWBP. Setelah pemasangan *shunt capacitor*, pembebanan gardu induk Tele menurun sebesar 24,43% untuk WBP dan 7,41% untuk LWBP. Profil pembebanan gardu induk Tele untuk WBP dan LWBP dapat dilihat pada Gambar 9.

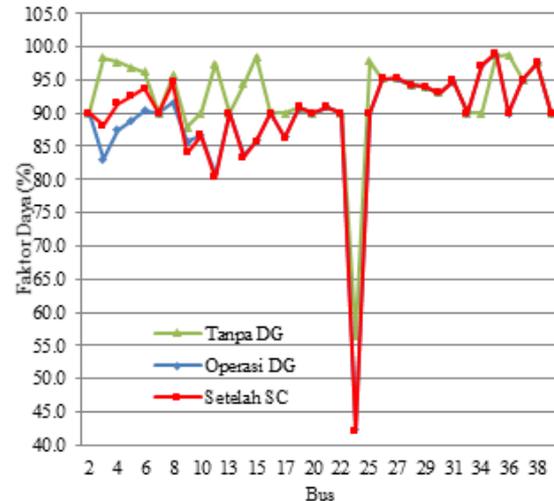
#### D. Faktor Daya

Faktor daya bus beban sebelum beroperasinya generator distribusi, hampir semua bus memiliki nilai di atas standar *grid code* Sumatera yaitu 0,85 *lagging*. Kecuali untuk bus 23 yang terpasang *shunt capacitor* eksisting sebesar 1500 kVAr pada bus 24. Dengan beroperasinya generator distribusi faktor daya pada beberapa bus beban berubah menjadi di bawah standar 0,85 *lagging* terutama pada penyulang utama dan jaringan interkoneksi generator distribusi.

Setelah beroperasinya generator distribusi dan sesuai hasil evaluasi aliran daya pada Tabel 5, untuk WBP terdapat 8 bus beban dengan faktor daya di bawah standar dengan nilai minimum 72% dan untuk LWBP 4 bus beban di bawah standar dengan nilai minimum 42,3%. Setelah pemasangan *shunt capacitor*, jumlah ketidaksesuaian bus



(a)



(b)

Gambar 10. Faktor daya bus beban sistem distribusi Dolok Sanggul untuk (a) WBP dan (b) LWBP

beban berkurang menjadi 3 bus beban dengan nilai minimum 79,4% untuk WBP dan 3 bus beban dengan nilai minimum 42,2% untuk LWBP. Profil faktor daya sistem distribusi Dolok Sanggul untuk WBP dan LWBP dapat dilihat pada Gambar 10.

#### E. Penghematan

Berdasarkan hasil evaluasi aliran daya yang sudah didapatkan pada Tabel 5, biaya sistem distribusi meningkat sejalan bertambahnya susut jaringan sistem distribusi dengan beroperasinya generator distribusi. Untuk WBP, biaya sistem distribusi yang harus dikeluarkan dengan beroperasinya generator distribusi dalam kurun waktu 5 tahun yaitu sebesar Rp 22.691.228.750,- (US\$ 1.650.631). Terjadi penambahan biaya sebesar Rp 16.133.730.000,- (US\$ 1.173.618) dari sebelumnya yang hanya mengeluarkan biaya sistem distribusi sebesar Rp 6.557.498.750,- (US\$ 477.013). Sedangkan untuk LWBP, biaya sistem distribusi yang harus dikeluarkan dengan beroperasinya generator distribusi dalam kurun waktu 5 tahun yaitu sebesar Rp 138.189.456.250,- (US\$ 10.052.336). Terjadi penambahan biaya sebesar Rp 125.188.612.500,- (US\$ 9.106.613) dari biaya sistem distribusi sebelumnya yang hanya sebesar Rp 13.000.843.750,- (US\$ 945.722).

Setelah pemasangan *shunt capacitor*, biaya sistem distribusi minimum yang harus dikeluarkan dalam kurun waktu 5 tahun sebesar Rp 20.598.825.679,- (US\$ 1.498.423) untuk WBP dan Rp 129.799.155.625,- (US\$ 9.441.999) untuk LWBP. Penghematan yang diperoleh jika dibandingkan sebelum pemasangan *shunt capacitor* sebesar Rp 2.092.403.071,- (US\$ 152.208) untuk WBP dan Rp 8.390.300.625,- (US\$ 610.337) untuk LWBP.

#### V. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa keberadaan generator distribusi dengan pola pengoperasian

*voltage control* dan fasilitas interkoneksi panjang membutuhkan suplai daya reaktif yang cukup besar dari gardu induk. Pemasangan *shunt capacitor* sebagai kompensator daya reaktif pada fasilitas interkoneksi generator distribusi dapat memperbaiki tegangan operasi, menurunkan susut jaringan distribusi, menurunkan pembebanan gardu induk, dan memperbaiki faktor daya. Pemasangan *shunt capacitor* dengan fungsi objektif meminimalkan biaya sistem distribusi dapat menghemat biaya pengoperasian sebesar Rp 2.092.403.071,- (US\$ 152.208) untuk WBP dan Rp 8.390.300.625,- (US\$ 610.337) untuk LWBP.

#### REFERENSI

- [1] Music, Mustafa, Samir Avdakovic, dan Ajla Lukac. "Integration of Distributed Generators into a Real Powerless Distribution System." *Energy Market*, 2009. EEM 2009. 6th International Conference on the European (IEEE), 2009: 1-5.
- [2] Sumantri, Oman, et al. *Pedoman Penyambungan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PLN*. Jakarta: PT PLN (Persero), 2014.
- [3] Roger C., Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, dan H. Wayne Beaty. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, 2004.
- [4] Miller, T. J. E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [5] Thatte, Anupam A. dan Marija D. Ilic. "An Assesment of Reactive Power/Voltage Control Devices In Distribution Networks." *Montreal, Power Engineering Society General Meeting*, 2006. IEEE, 2006:1-8
- [6] Huang, Tsong-Liang, Ying-Tung Hsiao, Chih-Han Chang, dan Joe-Air Jiang. "Optimal Placement of Capacitors in Distribution Systems Using an Immune Multi-objective Algorithm." *Electrical Power and Energy Systems* 30 (2008): 184-192.
- [7] Das, D. "Optimal Placement of Capacitors in Radial Distribution System Using a Fuzzy-GA Method." *Electrical Power and Energy Systems* 30 (2008): 361-367.
- [8] Seifi, Alireza, dan Mohammad Reza Hesamzadeh. "A Hybrid Optimization Approach for Distribution Capacitor Allocation Considering Varying Load Conditions." *Electrical Power and Energy Systems* 31 (2009): 589-595.
- [9] Abdelaziz, A. Y., S. F. Mekhamer, dan M. H. Nada. "A Fuzzy Expert System for Loss Reduction and Voltage Control in Radial Distribution Systems." *Electrical Power Systems Research* 80 (2010): 893-897.
- [10] Taher, Seyed Abbas, Mohammad Hasani, dan Ali Karimian. "A Novel Method for Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distribution Systems with Nonlinier Loads and DG Using GA." *Commun Nonlinier Sci Numer Simulat* 16 (2011): 851-862.
- [11] Rao, R. Srinivasas, S. V. L. Narasimham, dan M. Ramalingaraju. "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Plant Growth Simulation Algorithm." *Electrical Power and Energy Systems* 33 (2011): 1133-1139.
- [12] Chopade, Pravin, dan Marwan Bikdash. "Minimizing Cost and Power loss by Optimal Placement of Capacitor using ETAP." *System Theory (SSST)*, 2011 IEEE 43rd Southeastern Symposium on, 2011: 24-29.
- [13] Gonzalez, Jose Federico Vizcaino, Christiano Lyra, dan Fabio Luiz Usberti. "A Pseudo-polynomial Algorithm for Optimal Capacitor Placement on Electric Power Distribution Networks." *European Journal of Operational Research* 222 (2012): 149-156.
- [14] Abdul'Wafa, Ahmed R. "Optimal Capacitor Allocation in Radial Distribution Systems for Loss Reduction : A Two Stage Method." *Electrical Power Systems Research* 95 (2013): 168-174.
- [15] Taher, Seyed Abbas, dan Reza Bagherpour. "A New Approach for Optimal Capacitor Placement and Sizing in Unbalanced Distorted Distribution Systems Using Hybrid Honey Bee Colony Algorithm." *Electrical Power and Energy Systems* 49 (2013): 430-448.
- [16] Nojavan, Sayyad, Mehdi Jalali, dan Kazem Zare. "Optimal Allocation of Capacitors in Radial/ Mesh Distribution Systems Using Mixed Integer Nonlinier Programming Approach." *Electric Power Systems Research* 107 (2014): 119-124.
- [17] Sultana, Sneha, dan Provas Kumar Roy. "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Systems Using Teaching Learning Based Optimization." *Electrical Power and Energy Systems* 54 (2014): 387-398.
- [18] Vuletic, Jovica, dan Mirko Todorovski. "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Systems Using Clustering Based Optimization." *Electrical Power and Energy Systems* 62 (2014): 229-236.
- [19] Ramadan, Husam A., Mohamed A. A. Wahab, Abou-Hashema M. El-Sayed, dan Mohamed M. Hamada. "A Fuzzy-Based Approach for Optimal Allocation and Sizing of Capacitor Banks." *Electric Power Systems Research* 106 (2014): 232-240.
- [20] Mukherjee, M., dan S. K. Goswami. "Solving Capacitor Placement Problem Considering Uncertainty in Load Variation." *Electrical Power and Energy Systems* 62 (2014): 90-94.
- [21] Shuaib, Y. Mohamed, M. Surya Kalavathi, dan C. Christofer Asir Rajan. "Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution System Using Gravitational Search Algorithm." *Electrical Power and Energy Systems* 64 (2015): 384-397.
- [22] Singh, Bindeshwar, V. Mukherjee, dan Prabhakar Tiwari. "A Survey on Impact Assessment of DG and FACTS Controllers in Power Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 42 (2015): 846-882.
- [23] Braun, M. "Reactive Power Supply by Distributed Generators." *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE, 2008: 1-8.
- [24] Kundur, P. "Power System Stability And Control." California: McGraw-Hill (1994): 335-336.
- [25] Medina, A. C. Rueda, Jose Antonio Dominguez Navarro, and A. Padilha Feltrin. "Reactive Power Support Pricing of Distributed Generators with Primary Energy Source Uncertainty." *Latin America: 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2010: 104-109.
- [26] Gonen, Turan. *Electric Power Distribution System Engineering*. Disunting oleh Sanjeev Rao dan J. W. Maisel. California: McGraw-Hill Inc, 1986.
- [27] Purnomo, Hindriyanto D. "Cara Mudah Belajar Metode Optimisasi Metaheuristik Menggunakan Matlab." Yogyakarta: Gava Media, 2014.
- [28] Operation Technology, Inc. *ETAP 12.0 User Guide*. Operation Technology, Inc., 2013.
- [29] Kelompok Pembakuan Bidang Transmisi dengan Surat Keputusan Direksi PLN No. 077/DIR/88 tanggal 21 September 1988. SPLN No. 1 Tahun 1995 tentang Tegangan-tegangan Standar. Jakarta: PT PLN (Persero), 1995.
- [30] Republik Indonesia. *Peraturan Menteri ESDM No. 37 Tahun 2008 tentang Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Sumatera*. Jakarta: 2008.