

OPTIMISASI PENEMPATAN KAPASITOR BANK UNTUK MEMPERBAIKI FAKTOR DAYA MENGGUNAKAN *PARTICLE SWARM OPTIMIZATION* PADA JARINGAN *AUXILIARY LOAD* PT.PJB PEMBANGKITAN INDRAMAYU 3X330 MW

Rizky Maulana Syaefuddin^{*)}, Hermawan, and Susatyo Handoko

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: maulanarizky178@gmail.com

Abstrak

Pada pembangkit listrik, besarnya energi yang diperlukan untuk auxiliary load sendiri berkisar antara 1-10% dari produksi energi yang dihasilkan. Hal ini sangat tergantung kepada jenis pembangkit listrik, dimana yang paling besar umumnya PLTU yang menggunakan bahan bakar batu bara. Rata-rata konsumen pada beban auxiliary load di pembangkit listrik adalah motor listrik, seperti: pompa uap pengendali turbin, conveyor, dan pompa untuk sirkulasi air. Ada kecenderungan faktor daya rendah pada busbar beban di jaringan auxiliary load ($< 0,85$), diakibatkan banyaknya konsumsi daya reaktif. Pada penelitian ini, dibahas mengenai optimisasi penempatan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya menggunakan PSO. Metode optimisasi yang didasarkan pada swarm intelligence ini disebut algoritma behaviorally inspired sebagai alternatif dari algoritma genetika, yang sering disebut evolution-based procedures. Metode PSO membangkitkan solusi berkualitas tinggi dengan waktu perhitungan yang lebih singkat dan karakteristik konvergensi yang stabil. Hasil penelitian membuktikan bahwa dengan menempatkan 58 kapasitor dengan total rating 1.160 kVAR pada bus 24, 26, 28, 30, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 50, 52, 54, 60, 62, dan 64 mampu memperbaiki faktor daya dan menaikkan profil tegangan pada bus-bus tersebut sehingga rugi daya aktif menurun sebesar 22,6 kW (1,05%) dan rugi daya reaktif menurun sebesar 28,1 kVAR (1,02%) sehingga didapatkan penghematan sebesar \$13.574,2059 dalam kurun waktu 5 tahun.

Kata kunci: auxiliary load, kapasitor, PSO, faktor daya

Abstract

In power plant, the amount of energy required for its own auxiliary load ranges between 1-10% of the production of energy produced. It really depends on the type of power plant, where the most general power plant using coal fuel. The average consumer at the power plant's auxiliary load is an electric motor, such as: pump steam turbine controllers, conveyors, and pumps for water circulation. There is a tendency at the busbar load in the auxiliary load network's power factor is low (< 0.85), caused there's a lot of reactive power consumption. At this time, we will discuss optimal capacitor placement to improve power factor using the PSO. This Method optimization based on swarm intelligence algorithm is called behaviorally inspired as an alternative to genetic algorithm, which is often called evolution-based procedures. PSO technique can generate a high quality solution within shorter calculation time and stable convergence characteristics. The research proves that placing 58 capacitors with whole rating 1.160 kVAR able to improving power factor and raising the voltage profile on those busses so active power losses decreased by 22.6 kW (1,05%) loss of and reactive power decreased by 28.1 kVAR (1,02%) so get saving cost \$13.574,2059 within 5 years.

Keywords: auxiliary load, capacitor, PSO, power factor

1. Pendahuluan

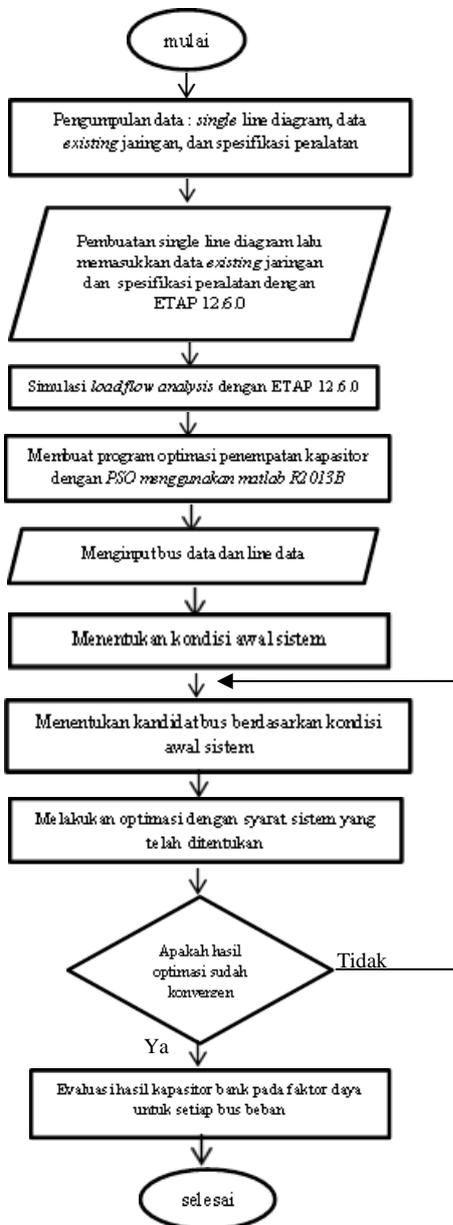
Pada pembangkit listrik, besarnya energi yang diperlukan untuk auxiliary load sendiri berkisar antara 1-10% dari produksi energi yang dihasilkan [1]. Berdasarkan data

lapangan, sejak PT. PJB Pembangkitan Indramayu didirikan tanggal 31-10-2010, telah dilakukan studi aliran daya untuk beban pemakaian sendiri (auxiliary load) menghasilkan faktor daya rendah yaitu rata-rata 0.8 pada tiap bus beban (dibawah nilai standar faktor daya yaitu

0.85) [2]. Meskipun pada pembangkit listrik, faktor daya pemakaian sendiri rendah tidak mendapat nilai denda tetapi perlu diadakan perbaikan untuk meningkatkan peningkatan faktor daya untuk menurunkan pemakaian KVA sehingga memberikan daya tambahan yang tersedia pada transformator dan mengurangi masalah kerusakan pada alat [3]. Jika suatu jaringan tidak memiliki sumber daya reaktif maka kebutuhan beban reaktif dipikul oleh generator [4]. Salah satu cara untuk mengurangi drop tegangan dan rugi daya lalu memperbaiki faktor daya adalah dengan menempatkan nilai kapasitor pada lokasi ukuran yang optimal [5].

2. Metode

2.1. Langkah Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Langkah Penelitian

2.2. Pengumpulan Data

Data-data yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari PT.PJB Pembangkitan Indramayu, Sukra di bidang *electrical* dan *engineering*. Data yang diambil berupa data topologi jaringan, data, data gardu induk tujuan, *rating* generator utama, *rating* Trafo utama, *rating* Trafo SST, *rating* Trafo UAT, data beban per busbar di *control room* pembangkitan. Selanjutnya melakukan pengolahan data dan menjalankan *load flow* menggunakan Program ETAP 12.6.0, melakukan analisis aliran daya menggunakan metode newton-rhapon, dan mensimulasikan program penempatan kapasitor dengan Matlab R2013b.

2.3. Pengolahan Data

Setelah data-data yang diperlukan sudah lengkap, menggambar kembali jaringan *auxiliary load* pada ETAP 12.6.0, lalu menjalankan *loadflow analysis* untuk mengetahui proses aliran daya pada sistem sehingga mendapat data awal sebelum dipasang kapasitor bank seperti *voltage magnitude*, Pload, Qload, dan faktor daya pada tiap bus sehingga dapat menjadi acuan untuk pemilihan kandidat bus untuk ditempatkan kapasitor bank yang optimal.

2.4. Optimisasi Penempatan Kapasitor bank dengan metode PSO

Dalam hal ini dapat dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter dari PSO sehingga dapat dilakukan optimasi. Parameter yang dimasukkan berupa iterasi, jumlah *swarm*, C1, C2, *inertia weight*. Setelah dilakukan optimasi maka akan didapatkan *rating*, jumlah, dan lokasi kapasitor bank yang optimal dengan fungsi biaya yang minimum. Langkah selanjutnya melengkapi analisa dengan kesimpulan dan saran.

3. Hasil dan Analisa

3.1. Kondisi Sebelum Penempatan Kapasitor Bank

Pada kondisi sebelum penempatan kapasitor bank akan dihitung berdasarkan data *existing*, Matlab, dan Etap. Kemudian dilakukan perbandingan keadaan sebelum dan setelah pemasangan kapasitor bank.

3.1.2. Perhitungan Kondisi Awal dengan ETAP

Data yang digunakan pada pengujian ini adalah data *auxiliary load* PT.PJB Pembangkitan Indramayu 3x330 MW dengan tegangan kerja sebesar 0,4 kV dan MVAbase 100 MVA. Dengan melakukan studi aliran daya pada software ETAP 12.6.0 maka didapat faktor daya pada tiap bus beban ;

Tabel 1. Data faktor daya pada tiap beban

Bus Beban	Jenis	Menuju Beban	PF awal
22	Beban statis	unit illuminating pc #1	0,98
24	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCA #1	0,8
26	Beban Induktif	unit work PCA #1	0,79
28	Beban Induktif	unit work PCB #1	0,85
30	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCB #1	0,8
32	Beban statis	main building common PCA	0,91
34	Beban Induktif	chemical PCA	0,8
36	Beban Induktif	circulating water PCA	0,8
38	Beban Induktif	coal conveying PCA	0,8
40	Beban Induktif	coal conveying PCB	0,8
42	Beban Induktif	circulating water PCB	0,81
44	Beban Induktif	chemical PCB	0,8
46	Beban statis	main building common PCB	0,97
48	Beban statis	unit illuminating pc #2	0,97
50	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCA #2	0,8
52	Beban Induktif	unit work PCA #2	0,79
54	Beban Induktif	unit work PCB #2	0,83
56	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCB #2	0,8
58	Beban statis	unit illuminating pc #3	0,97
60	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCA #3	0,8
62	Beban Induktif	unit work PCA #3	0,79
64	Beban Induktif	unit work PCB #3	0,85
66	Beban Induktif	electrostatic precipitator PCB #3	0,8

Berdasarkan tabel 1. dapat dilihat bahwa faktor daya bus 26, 52, dan 62 sebesar 0,79 dan bus 24, 30, 34, 36, 38, 40, 44, 50, 56, 60 dan 66 sebesar 0,8. Faktor daya pada bus-bus tersebut jauh dari nilai standar yang ditetapkan PT. PLN yaitu 0,85 sehingga perlu dilakukan penempatan kapasitor bank yang optimal untuk meningkatkan faktor daya pada bus-bus tersebut. Faktor daya rendah dapat disebabkan oleh besarnya rugi daya yang diakibatkan oleh kenaikan arus, dimana kerugian yang timbul berbanding lurus dengan arus pangkat dua dan beban (terutama beban induktif) terlalu banyak mengkonsumsi daya reaktif, dimana daya reaktif dibutuhkan untuk membangkitkan medan magnet pada stator motor.

3.1.3. Perhitungan Kondisi Awal dengan Matlab

Sebelum melakukan optimisasi, diperlukan kondisi awal untuk dibandingkan dengan output dari program apakah sudah sesuai dengan tujuan. kondisi awal sistem dapat diketahui dengan menggunakan metode aliran daya *newton-rhapson* yaitu berupa *voltage magnitude*, *Ploss* awal, *Qloss* awal, dan *Sloss* awal. Berikut merupakan kondisi awal pada sistem sebelum penempatan kapasitor bank:

Tabel 2. Tegangan tiap bus sebelum dipasang kapasitor bank

No Bus	V (pu)	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
1	1	0	0	282,02	97,79
2	0,9937	0	0	0	0
3	0,9808	0	0	0	0
4	1	0	0	282,02	97,79
5	0,9937	0	0	0	0
6	0,9808	0	0	0	0
7	1	0	0	281,68	97,57
8	0,9938	0	0	0	0
9	0,9808	0	0	0	0
10	0,9522	0	0	0	0
11	0,9907	0	0	0	0
12	0,9926	0	0	0	0
13	0,9910	0	0	0	0
14	0,9927	0	0	0	0
15	0,9902	0	0	0	0
16	0,9922	0	0	0	0
17	0,9910	0	0	0	0
18	0,9927	0	0	0	0
19	0,9925	0	0	0	0
20	0,9925	0	0	0	0
21	0,991	0	0	0	0
22	0,9832	0,007	0,001	0	0
23	0,9907	0	0	0	0
24	0,9565	0,172	0,129	0	0
25	0,9909	0	0	0	0
26	0,9632	0,056	0,042	0	0
27	0,9925	0	0	0	0
28	0,9603	0,036	0,022	0	0
29	0,9925	0	0	0	0
30	0,9655	0,055	0,041	0	0
31	0,9902	0	0	0	0
32	0,9886	0,001	0,0005	0	0
33	0,9901	0	0	0	0
34	0,9481	0,054	0,041	0	0
35	0,9894	0	0	0	0
36	0,9569	0,523	0,392	0	0
37	0,9900	0	0	0	0
38	0,9600	0,121	0,091	0	0
39	0,9919	0	0	0	0
40	0,9619	0,121	0,091	0	0
41	0,9916	0	0	0	0

Tabel 3. Lanjutan

No Bus	V (pu)	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
42	0,9672	0,381	0,276	0	0
43	0,9922	0	0	0	0
44	0,9487	0,056	0,042	0	0
45	0,9920	0	0	0	0
46	0,9907	0,001	0,0003	0	0
47	0,9910	0	0	0	0
48	0,9650	0,007	0,002	0	0
49	0,9907	0	0	0	0
50	0,9565	0,172	0,129	0	0
51	0,9909	0	0	0	0
52	0,9629	0,056	0,043	0	0
53	0,9925	0	0	0	0
54	0,9603	0,056	0,042	0	0
55	0,9925	0	0	0	0
56	0,9683	0,049	0,037	0	0
57	0,9926	0	0	0	0
58	0,9833	0,007	0,002	0	0
59	0,9922	0	0	0	0
60	0,9580	0,172	0,129	0	0
61	0,9927	0	0	0	0
62	0,9644	0,056	0,043	0	0
63	0,9925	0	0	0	0
64	0,9603	0,036	0,022	0	0
65	0,9925	0	0	0	0
66	0,9787	0,054	0,004	0	0
67	0,9504	822,7	206,13	0	0
68	0,9937	0	0	0	0
69	0,9915	0	0	0	0
70	0,9929	0	0	0	0
71	0,9937	0	0	0	0
72	0,9915	0	0	0	0
73	0,9929	0	0	0	0
74	0,9937	0	0	0	0
75	0,9928	0	0	0	0
76	0,9929	0	0	0	0
TOTAL		824,94	207,75	845,72	293,15

Pada tabel 2. dapat dilihat bahwa tegangan pada bus 34 = 0.9481 dan bus 44 = 0.9487. tegangan bus tersebut tidak memenuhi standar SPLN 7 2 tahun 1987 yaitu batas drop tegangan yang dapat ditoleransi yaitu sebesar 5%. Sehingga perlu dilakukan pemasangan kapasitor bank untuk meningkatkan profil tegangan pada sistem agar memenuhi standar . Pada program simulasi ini, fungsi tujuan untuk proses optimisasi dapat dirumuskan dalam bentuk matematis sebagai berikut :

$$\text{Min. } F = \sum_{i=1}^{N_{bus}} (I_{(ii)} \cdot KI + KB \cdot C_{(ii)} + KO \cdot x_{(ii)} T) + T P_{L2}^i KE \quad (1)$$

dimana

- Nbus = Jumlah kandidat bus
- I = 0 atau 1, 0 artinya tidak ada kapasitor bank yang terpasang pada bus
- KI = Biaya pemasangan kapasitor bank tiap bus
- KB = Biaya pembelian kapasitor bank dalam kVar
- C = Ukuran kapasitor bank dalam kVar
- KO = Biaya operasi dan pemeliharaan per bank, per tahun
- X = Jumlah kapasitor bank
- T = Waktu perencanaan (Tahun)
- KE = Biaya energy per kWh

P_{L1}^i = Jumlah rugi daya aktif setelah dipasang kapasitor bank

Dengan meminimumkan fungsi tujuan seperti persamaan (1) maka akan didapatkan biaya minimum dalam penempatan kapasitor bank dengan nilai yang optimal sesuai waktu yang direncanakan. Syarat utama dalam penempatan nilai kapasitor bank yang optimal adalah memenuhi batas-batas tegangan dan rating generator yang telah ditentukan pada tiap bus, yaitu :

a) Tegangan (Vm)

$$V_{min} \leq V_m \leq V_{max}$$

b) Daya aktif generator

$$P_{gen_{min}} \leq P_{gen} \leq P_{gen_{max}}$$

c) Daya reaktif generator

$$Q_{gen_{min}} \leq Q_{gen} \leq Q_{gen_{max}}$$

Penentuan batas daya aktif dan reaktif dari generator diperlukan untuk menyesuaikan dengan rating generator yang digunakan pada sistem, sehingga setelah pemasangan kapasitor bank tidak akan mengganggu kinerja dari generator.

Hasil penghematan setelah penempatan kapasitor bank selama periode waktu yang telah direncanakan dapat dihitung dengan rumus matematis sebagai berikut:

$$S = T(P_{L1}^i - P_{L2}^i)KE - \sum_{i=1}^{N_{bus}} (I_{(ii)} \cdot KI + KB \cdot C_{(ii)} + KO \cdot x_{(ii)} T) \quad (2)$$

Dimana S = Nilai penghematan (\$)

P_{L1}^i = Jumlah rugi daya aktif sistem sebelum penempatan kapasitor bank (MW)

P_{L2}^i = Jumlah rugi daya aktif sistem setelah penempatan kapasitor bank (MW)

3.2. Optimisasi Penempatan Kapasitor Bank dengan PSO

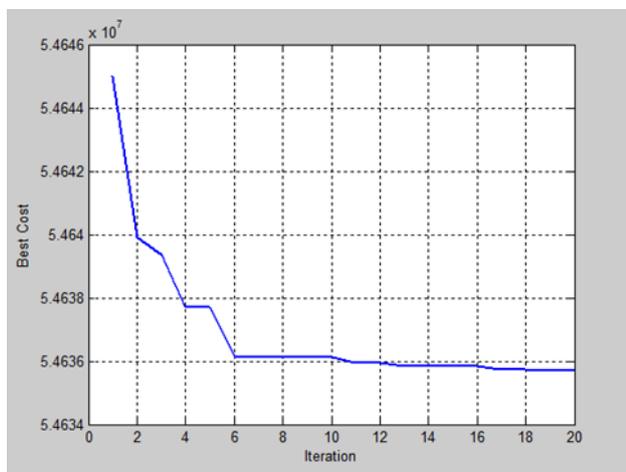
Melalui pengujian ini dimaksudkan akan mendapat nilai kapasitor bank yang optimal untuk menaikkan faktor daya dan memperbaiki tegangan sesuai dengan batas-batas yang telah ditentukan. Dalam pengujian ini batas tegangan yang dapat ditoleransi pada sistem ini adalah 5 % disesuaikan dengan SPLN 72 tahun 1987. Sedangkan parameter PSO yang digunakan adalah Max Iterasi = 20, Jumlah Partikel = 50, C1 = 2, C2 = 2, θ_{min} = 0,4 dan θ_{max} = 0,9. Berikut nilai parameter sistem yang digunakan :

Setelah proses optimasi berlangsung maka akan muncul grafik nilai fungsi tujuan tiap iterasi. Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat bahwa sistem belum mencapai konvergen sebelum iterasi maksimum (max iterasi = 20), pada PSO jika belum mencapai konvergen maka akan berhenti pada iterasi maksimum dengan nilai fitness yang minimum sebesar 54.631.507,7. Besarnya jumlah iterasi yang diperlukan dalam pengujian dapat bervariasi

dikarenakan sistem optimasi menggunakan particle swarm optimization yang membangkitkan bilangan random. Rating kapasitor bank yang digunakan adalah 20 Kvar

Tabel 4. Parameter Sistem

Jenis Parameter	Parameter	Nilai
Parameter Fungsi Tujuan	Biaya Energi per KWH (KE)	0,06 \$/kWH
	Vkerja	0,4 kV
	Waktu perencanaan (T)	5 tahun
	Kandidat Bus	22-66
	Vmin	0,9 pu
Syarat Sistem	Vmax	1,05 pu
	Qmin	0 MVAR
	Qmax	400 MW
	Pmin	0 MVAR
	Pmax	900 MW



Gambar 5. Grafik nilai fungsi tujuan dari tiap iterasi

3.3. Kondisi Setelah Penempatan Kapasitor Bank

Setelah proses optimisasi selesai, diperoleh hasil penempatan kapasitor bank yang optimal. Pemasangan kapasitor bank yang optimal dengan kandidat bus 22 – bus 66 adalah pada bus 26, 28, 30, 34, 44, 52, 54, 56, 62, 64 dan 66 sejumlah 1 kapasitor, bus 38 sejumlah 3 kapasitor, bus 40 dan 50 sejumlah 4 kapasitor, bus 24 sejumlah 5 kapasitor, bus 60 sejumlah 6 kapasitor, bus 42 sejumlah 9 kapasitor, dan bus 36 sejumlah 16 kapasitor. berikut kondisi setelah pemasangan kapasitor bank:

Tabel 5. Tegangan tiap bus setelah pemasangan kapasitor bank

No Bus	Vm (pu)	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
1	1	0	0	282,01	97,3
2	0,9937	0	0	0	0
3	0,9808	0	0	0	0
4	1	0	0	282,01	97,3
5	0,9937	0	0	0	0
6	0,9808	0	0	0	0
7	1	0	0	281,69	97,29
8	0,9938	0	0	0	0
9	0,9808	0	0	0	0
10	0,9522	0	0	0	0

11	0,9921	0	0	0	0
12	0,9930	0	0	0	0
13	0,9923	0	0	0	0
14	0,9931	0	0	0	0
15	0,9916	0	0	0	0
16	0,9926	0	0	0	0
17	0,9923	0	0	0	0
18	0,9931	0	0	0	0
19	0,9930	0	0	0	0
20	0,9931	0	0	0	0
21	0,9923	0	0	0	0
22	0,9845	0,007	0,001	0	0
23	0,9920	0	0	0	0
24	0,9719	0,172	0,129	0	0
25	0,9922	0	0	0	0
26	0,9716	0,056	0,042	0	0
27	0,9930	0	0	0	0
28	0,9748	0,036	0,022	0	0
29	0,9930	0	0	0	0
30	0,9730	0,055	0,041	0	0
31	0,9915	0	0	0	0
32	0,9899	0,001	0,0005	0	0

Tabel 6. Lanjutan

No Bus	Vm (pu)	Pload (MW)	Qload (MVAR)	Pgen (MW)	Qgen (MVAR)
33	0,9915	0	0	0	0
34	0,9606	0,054	0,041	0	0
35	0,9908	0	0	0	0
36	0,9725	0,523	0,392	0	0
37	0,9914	0	0	0	0
38	0,9719	0,121	0,091	0	0
39	0,9924	0	0	0	0
40	0,9765	0,121	0,091	0	0
41	0,9921	0	0	0	0
42	0,9792	0,381	0,276	0	0
43	0,9925	0	0	0	0
44	0,9604	0,056	0,042	0	0
45	0,9926	0	0	0	0
46	0,9913	0,001	0,0003	0	0
47	0,9922	0	0	0	0
48	0,9831	0,007	0,002	0	0
49	0,9920	0	0	0	0
50	0,9691	0,172	0,129	0	0
51	0,9922	0	0	0	0
52	0,9712	0,056	0,043	0	0
53	0,9930	0	0	0	0
54	0,9748	0,036	0,022	0	0
55	0,9930	0	0	0	0
56	0,9759	0,049	0,037	0	0
57	0,9930	0	0	0	0
58	0,9839	0,007	0,002	0	0
59	0,9928	0	0	0	0
60	0,9755	0,172	0,129	0	0
61	0,9929	0	0	0	0
62	0,9720	0,056	0,043	0	0
63	0,9930	0	0	0	0
64	0,9748	0,036	0,022	0	0
65	0,9930	0	0	0	0
66	0,9736	0,054	0,004	0	0
67	0,9504	822,709	206,135	0	0
68	0,9937	0	0	0	0
69	0,9928	0	0	0	0
70	0,9933	0	0	0	0
71	0,9937	0	0	0	0
72	0,9926	0	0	0	0
73	0,9933	0	0	0	0
74	0,9937	0	0	0	0
75	0,9932	0	0	0	0
76	0,9933	0	0	0	0
TOTAL		824,94	207,75	845,71	291,9

Profil tegangan pada tiap bus meningkat dan sudah memenuhi standar SPLN 72 tahun 1987 dengan toleransi 5%. Dimana nilai tegangan minimum terdapat di bus 67 sebesar 0,9504 pu. Penurunan losses tiap saluran ditunjukkan oleh tabel 4.6 berikut ini.

Tabel 7. Rugi daya tiap saluran setelah pemasangan kapasitor

Bus menuju	Bus yang dituju	Ploss (kW)	Qloss (kVAR)
1	2	0,0019	44,4875
2	3	0,0038	796,3071
3	10	619,500	0,00027
4	5	0,0019	44,487
5	6	0,0038	796,3066
6	10	619,3496	0,00027
7	8	0,0019	44,391
8	9	0,0038	796,37
9	10	619,4019	0,00027
11	13	0,0831	0,0181
69	13	0,2305	0,0503
12	14	0,0208	0,0045
70	14	0,0356	0,0078
13	21	0,00006	0,00001
21	22	0,132	0,198
13	23	0,0392	0,0086
23	24	2,7933	4,1899
13	25	0,0043	0,00094
25	26	0,7716	1,1574
14	27	0,0036	0,0007
27	28	1,2692	1,9038
14	29	0,00007	0,00001
29	30	0,1585	0,2377
11	15	0,3289	0,0719
15	31	0,000001	0,0000003
31	32	0,02	0,0301
15	33	0,0041	0,0008
33	34	1,1197	1,6796
15	35	0,3629	0,0792
35	36	8,0871	12,1303
15	37	0,0247	0,0054
37	38	2,1973	3,296
12	16	0,2165	0,0473
16	39	0,0192	0,0042
39	40	1,7116	2,5675
16	41	0,2116	0,0462
41	42	2,9191	10,217
16	43	0,004	0,0009

Tabel 8. Lanjutan

Bus menuju	Bus yang dituju	Ploss(kW)	Qloss(kVAR)
43	44	1,2103	1,8154
16	45	0,000001	0,0000003
45	46	0,0173	0,0259
11	17	0,0829	0,0181
72	17	0,2303	0,0502
17	47	0,00007	0,00001
47	48	0,1411	0,2116
17	49	0,0392	0,0086
49	50	2,7933	4,19
17	51	0,0044	0,0009
51	52	0,7778	1,671
12	18	0,024	0,0052
73	18	0,0354	0,0077
18	53	0,0026	0,0005
53	54	0,9101	1,3651
28	55	0,00007	0,00001

55	56	0,1731	0,2597
12	19	0,002	0,0004
75	19	0,0439	0,0096
19	57	0,00007	0,00001
57	58	0,1409	0,2113
19	59	0,0391	0,0085
59	60	2,7898	4,1848
19	61	0,0044	0,0009
61	62	0,7771	1,656
12	20	0,0229	0,005
76	20	0,0362	0,0079
20	63	0,0026	0,0005
63	64	0,9101	1,3651
20	65	0,0007	0,00001
65	66	0,1585	0,2377
10	67	0,001	0
2	68	0,0156	0,0003
68	69	0,3574	1,3409
68	70	0,0552	0,2072
5	71	0,0156	0,0003
71	72	0,3572	1,3401
71	73	0,0549	0,2058
8	74	0,0056	0,0001
74	75	0,068	0,2553
74	76	0,0562	0,2108
TOTAL		1893,39	2581,183

Pada tabel 7 Dapat diketahui bahwa losses tiap saluran setelah pemasangan kapasitor bank mengalami penurunan. Dimana total penurunan losses daya aktif sebesar 1893.394 kW dan daya reaktif sebesar 2581.183 kVAR. Penurunan Qloss jauh lebih besar, ini dikarenakan kapasitor bank yang tersusun secara paralel pada bus beban menyuplai arus reaktif yang dibutuhkan oleh beban sehingga kebutuhan daya reaktif pada saluran berkurang. Peningkatan faktor daya akibat pemasangan kapasitor bank ditunjukkan tabel 8 berikut ini.

Tabel 9. Perbaikan faktor daya setelah pemasangan kapasitor bank

Bus Beban	Menuju Beban	PF setelah
22	unit illuminating pc #1	0,98
24	electrostatic precipitator PCA #1	0,98
26	unit work PCA #1	0,92
28	unit work PCB #1	0,99
30	electrostatic precipitator PCB #1	0,92
32	main building common PCA	0,89
34	chemical PCA	0,92
36	circulating water PCA	0,98
38	coal conveying PCA	0,96
40	coal conveying PCB	0,99
42	circulating water PCB	0,96
44	chemical PCB	0,92
46	main building common PCB	0,95
48	unit illuminating pc #2	0,95
50	electrostatic precipitator PCA #2	0,95
52	unit work PCA #2	0,91
54	unit work PCB #2	0,99
56	electrostatic precipitator PCB #2	0,94
58	unit illuminating pc #3	0,96
60	electrostatic precipitator PCA #3	0,99
62	unit work PCA #3	0,91
64	unit work PCA #3	0,99
66	electrostatic precipitator PCB #3	0,93

Berdasarkan tabel 8 dapat diketahui bahwa faktor daya tiap bus meningkat dan sudah melewati batas nilai faktor

daya yang ditentukan yaitu 0,85 dimana faktor daya terendah menjadi 0,89 yang semula 0,79.

3.4. Perbandingan Sebelum dan Setelah Penempatan Kapasitor Bank

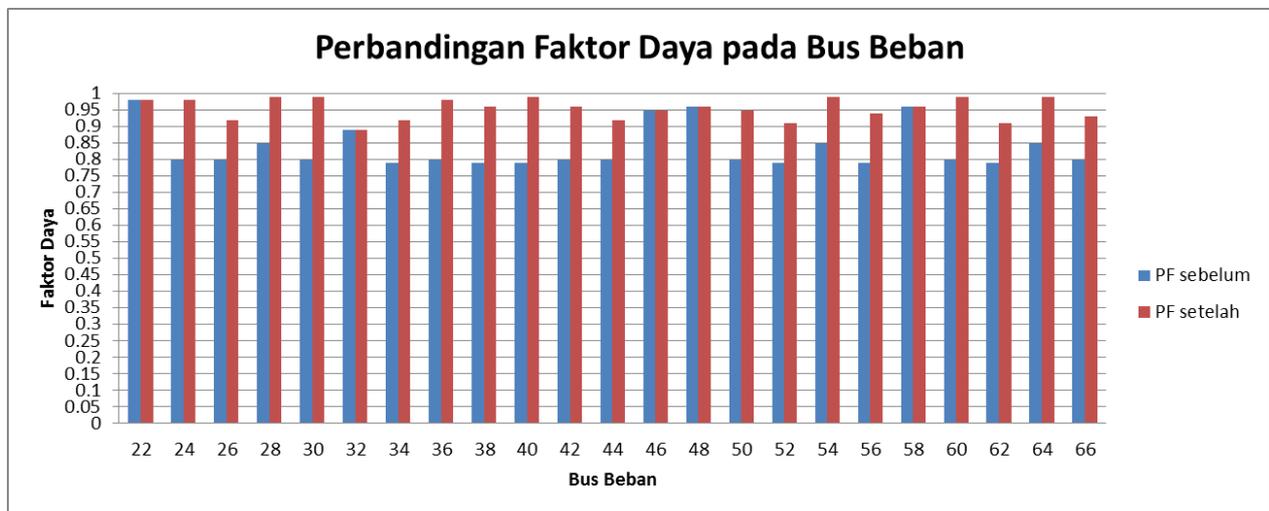
Setelah dilakukan pemasangan kapasitor bank diperoleh perbaikan faktor daya dan perbaikan profil tegangan serta aliran daya saluran. Untuk lebih jelasnya, berikut ini adalah hasil perbandingan kondisi sistem sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank.

Tegangan Minimum (pu)	0,9487	0,9504
Rugi Daya Aktif (MW)	20,7943	20,7712
Rugi Daya Reaktif (MVAR)	85,4292	85,3999
Rugi Daya Nyata (MVA)	87,8965	87,88
Biaya Rugi Energi (\$)	54.698.883,4	54.635.509,2
Penurunan Biaya Energi (\$)	-	62.374,2059
Total Biaya Pemasangan Kapasitor Bank (\$)	-	41.000
Penghematan (\$)	-	13.574,2059

Berdasarkan tabel 10. dapat diketahui bahwa dengan pemasangan kapasitor bank pada bus 26, 28, 30, 34, 44, 52, 54, 56, 62 dan 66 sebesar 20 kVAR, bus 38 sebesar 60 kVAR, bus 40 dan 50 sebesar 80 kVAR, bus 24 sebesar 100 Kvar, bus 56 dan 60 sebesar 120 kVAR, bus 42 sebesar 180 kVAR, dan bus 36 sebesar 320 kVAR. Secara keseluruhan kondisi sistem menjadi lebih baik. Hal ini dapat dilihat dari tegangan terendahnya meningkat dari 0,9487 menjadi 0,9522 yaitu meningkat sebesar 0,35% . Selain itu total rugi daya aktif juga menurun sebesar 0,023 MW yaitu sebesar 1,05 % dan total rugi daya reaktif menurun sebesar 0,029 MVAR yaitu sebesar 1,02 % setelah pemasangan kapasitor bank. Sehingga, mengakibatkan menurunnya biaya energi yang ditanggung oleh PT.PJB Pembangkitan Indramayu untuk auxiliary load , dan akan diperoleh penghematan sebesar \$13.574,2059 dalam kurun waktu 5 tahun.

Tabel 10. Perbandingan sebelum dan sesudah penempatan

DESKRIPSI	SEBELUM	SESUDAH
Lokasi Kapasitor Bank (no bus)	-	24,26,28,30,34,36,38,
Total Kapasitas Kapasitor Bank (MVAR)	-	40,42,44,50,52,54,56, 60,62,66 1,16



Gambar 6. Perbandingan faktor daya sebelum dan sesudah penempatan kapasitor bank

Berdasarkan gambar 6 terlihat adanya perbaikan terhadap sistem, dimana faktor daya pada tiap bus beban setelah dipasang kapasitor bank sudah melewati batas minimal nilai faktor daya yang ditetapkan yaitu 0,85. Kenaikan Kenaikan profil faktor daya sangat signifikan terjadi pada bus 24,26,28,30,34,36,38,40,42,44,50,52,54,60, 62,64 dan 56 ini dikarenakan kapasitor bank dipasang paralel pada bus-bus tersebut. Sesuai dengan teori, bahwa pemasangan kapasitor shunt pada beban lagging mengakibatkan daya reaktif menurun dan meningkatkan faktor daya.

Setelah pemasangan kapasitor bank, kenaikan faktor daya terbesar ada pada bus 60 yaitu dari 0,8 menjadi 0,99. Besarnya kenaikan ini dipengaruhi oleh banyaknya

kapasitor yang dipasang hasil optimisasi pada bus tersebut yaitu 6 kapasitor bank dengan *rating* 120 kVAR. Program *PSO* menganggap bus 60 perlu diberi 6 kapasitor bank dikarenakan beban pada bus tersebut banyak mengkonsumsi daya reaktif yaitu sebesar 129 kVAR.

Bus 22, 32, 46, 48, 54, dan 58 mempunyai faktor daya yang tidak berubah, ini dikarenakan pada bus – bus tersebut tidak ditempatkan kapasitor bank dikarenakan program *PSO* menganggap faktor daya pada bus – bus tersebut sudah bagus dan memenuhi nilai standar yang diinginkan.

4. Kesimpulan

Dari pembahasan penelitian ini yaitu mengenai penempatan kapasitor bank pada jaringan *auxiliary load* PT.PJB Pembangkitan Indramayu 3x330 MW, dapat menentukan ukuran kapasitor bank 1200 kVAR dan penempatan optimal bus 26, 28, 30, 34, 44, 52, 54, 56, 62 dan 66 sebesar 20 kVAR, bus 38 sebesar 60 kVAR, bus 40 dan 50 sebesar 80 kVAR, bus 24 sebesar 100 Kvar, bus 56 dan 60 sebesar 120 kVAR, bus 42 sebesar 180 kVAR, dan bus 36 sebesar 320 kVAR. Biaya pembelian minimum kapasitor bank didapatkan 11.600 \$, biaya pemasangan minimum kapasitor bank didapatkan 10.800 \$, dan biaya operasional minimum kapasitor bank didapatkan 18.600 \$. Total rugi daya aktif menurun sebesar sebesar 22,6 kW dan rugi daya reaktif menurun sebesar 28,1 kVAR sehingga didapatkan penghematan sebesar \$13.574,2059 dalam kurun waktu 5 tahun . Faktor daya pada tiap bus beban sudah memenuhi standar yang diinginkan yaitu minimal 0,85.

Referensi

- [1]. Data beban pemakaian sendiri tahun 2016 PT.PJB Pembangkitan Indramayu, Sukra, Indramayu, Jawa Barat.
- [2]. Marsudi Djiteng. 2011. “Pembangkitan Energi Listrik”. Erlangga. Jakarta.
- [3]. Willian D. Stevenson, Jr. 1996. “Analisa Sistem Tenaga Listrik “. Erlangga. Bandung.
- [4]. Saadat, Hadi. 1999. “*Power System Analysis*”. Mc Graw Hill
- [5]. Erviana, Mira. “Optimasi Penempatan dan Kapasitas Kapasitor Bank Pada Sistem Distribusi Untuk Mereduksi Rugi Daya Menggunakan Particle Swarm Optimization”, Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [6]. Fahnani, Gunara Fery. “Simulasi Optimasi Daya Reaktif dan Tegangan Pada Sistem JAMALI 500kV Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization”, Universitas Diponegoro. Semarang. 2011
- [7]. Gampa, Srinivasa Rao. 2015 “Optimum Placement of Shunt Capacitors in a Radial Distribution System for Substation Power Factor Improvement Using Fuzzy GA Method”. India
- [8]. Lee, Chung-Sec.2014 “Capacitor placement of distribution systems using PSO approaches”. Taiwan