

## EVALUASI KINERJA UNIT KAPASITOR BANK IEBE

Eko Yuli Rustanto, Ahmad Paid, Kusyanto  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

### ABSTRAK

Kegiatan evaluasi kinerja unit Kapasitor Bank IEBE telah dilakukan sebagai bagian dari pengelolaan fasilitas sistem di IEBE, agar operasi IEBE berlangsung dengan baik dan berkesinambungan. Dengan metodologi melakukan pengamatan faktor daya ( $\cos \phi$ ) secara langsung di AMR, *Power Faktor Control* (PFC), dan *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP), serta dilakukan pencatatan parameter arus kerja kapasitor-kapasitor pada Kapasitor Bank Panel 1. Pada penggunaan 2 buah trafo semua saklar hubung di Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) dihubungkan dan *coupler* dilepas. Sedangkan pada penggunaan 1 buah trafo saklar hubung di SKTM untuk trafo 2 dilepas dan posisi saklar pada *coupler* dihubungkan. Unjuk kinerja kapasitor bank panel 1, dalam batas baik, dengan sedikit penurunan sebesar 12% di step no.2 sebesar  $\pm 18,9$  ampere dari arus nominal sebesar 21,7 ampere, kapasitor bank dapat memperbaiki  $\cos \phi$  dari 0,77 menjadi 0,89 dengan target FPC 0,92 atau menjadi 0,92 saat target FPC 0,96. Adanya biaya pemakaian KVARH, akibat asumsi yang salah dari nilai  $\cos \phi$  sebesar 0,85 akan menghilangkan biaya KVARH.

**Kata kunci:** faktor daya ( $\cos \phi$ )

### PENDAHULUAN

Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) merupakan fasilitas yang menangani bahan radioaktif untuk produksi dan litbang elemen bakar nuklir. IEBE dilengkapi dengan fasilitas pemroses bahan baku Uranium dan bahan struktur dan dukung hingga menjadi rakitan bahan bakar nuklir. Fasilitas tersebut dapat dikelompokkan menjadi Fasilitas Pemurnian dan Konversi, Laboratorium Fabrikasi Bahan Bakar, dan Laboratorium Kendali Kualitas serta fasilitas penunjang yakni sarana dukung yang meliputi Sistem Tata Udara, Sistem Suplai Media dan Energi, dan Sistem Keselamatan.

Sumber daya listrik yang digunakan di IEBE dalam keadaan normal diperoleh dari P.T. Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan total daya terpasang pada awalnya sebesar 4000 kVA. Untuk penghematan energi kini sudah diturunkan menjadi 1525 kVA<sup>[2]</sup> pada tegangan menengah 20 kV. Sumber daya dari PLN ini didistribusikan ke beban melalui dua buah transformator dengan kapasitas daya masing-masing 2500kVA, yang berfungsi untuk menurunkan tegangan menengah (20kV) menjadi tegangan rendah (220/380 V) yang berada di Gedung 64 atau *Media Energy Supply Building*(MES).

Dalam upaya penghematan energi selain menurunkan daya juga dilakukan pemasangan kapasitor bank yang dimaksudkan untuk menaikkan faktor daya ( $\cos \phi$ ) agar lebih besar dari 0,85 sesuai aturan PLN agar tidak dikenai biaya kVARh atau turun atau menjadi nol<sup>[3]</sup>.

Diharapkan dari kegiatan evaluasi kinerja unit kapasitor bank IEBE dapat menjadi gambaran efektivitas pemasangan Kapasitor Bank dan menjadi masukan kepada

manajemen untuk menentukan penganggaran, pemeliharaan atau pembelian suku cadang yang diperlukan.

## TEORI

Listrik secara umum terdiri dari tegangan dan arus. Tegangan listrik didefinisikan sebagai perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik dan dinyatakan dalam satuan volt (V). sedangkan arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang disebabkan dari pergerakan elektron-elektron, mengalir melalui suatu titik dalam sirkuit listrik tiap satuan waktu. Arus listrik dapat diukur dalam satuan *Coulomb*/detik atau *ampere* (A).

Jika diantara tegangan listrik diberi suatu hambatan misalnya *resistor* maka terjadi perbandingan tegangan dengan arus listrik yang melewatinya. Hambatan listrik dinyatakan dengan satuan Ohm( $\Omega$ ) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R = V / I$$

Jenis hambatan listrik dari sifatnya terdiri dari resistif, induktif dan kapasitif, dimana resistif akibat dari hambatan berjenis resistor (resistan) dilambangkan R, sedangkan induktif akibat hambatan dari jenis lilitan (induktan) dilambangkan L, dan kapasitif dari akibat hambatan kapasitor (kapasitan) dilambangkan C. Satuan nilai yang mengikuti tiap-tiap jenis hambatan masing-masing adalah R dengan satuan ohm ( $\Omega$ ), L mempunyai satuan Henry (H), dan C bersatuan Farad (F). Karena sifat-sifat hambatan yang berbeda menjadikan perilaku yang berbeda pada masing-masing jenis hambatan. Pada hambatan resistan tegangan dan arus berjalan seiring pada satuan waktu. Sementara pada induktan arus tertinggal terhadap tegangan pada satuan waktu (*lag*), sedangkan kapasitan arus lebih dahulu terhadap tegangan (*lead*). Dengan demikian karena adanya hambatan induktan dan kapasitan terjadi apa yang dikenal dengan faktor daya ( $\cos \phi$ ).

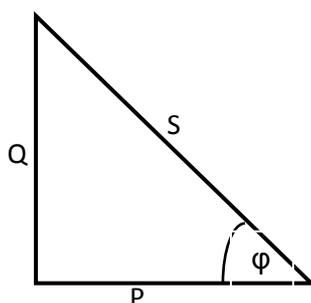
Hambatan atau beban dalam suatu rangkaian listrik menjadi suatu usaha, dan dikenal sebagai daya. Ada 3 jenis daya yang dikenal yaitu daya buta dinyatakan dengan huruf S, daya nyata dengan huruf P, dan daya semu atau reaktif dengan huruf Q, pernyataan-pernyataan tersebut dijabarkan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$S = V * I \text{ (VA)} \quad (1)$$

$$P = V * I * \cos \phi \text{ (Watt)} \quad (2)$$

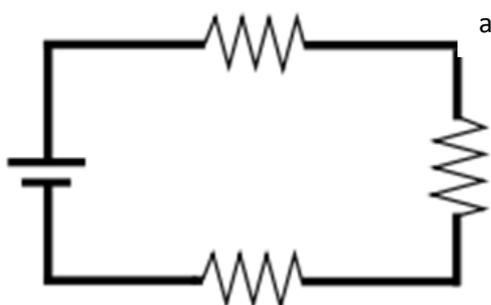
$$Q = V * I * \sin \phi \text{ (VAr)} \quad (3)$$

Hubungan ketiga jenis daya digambarkan pada gambar 1.

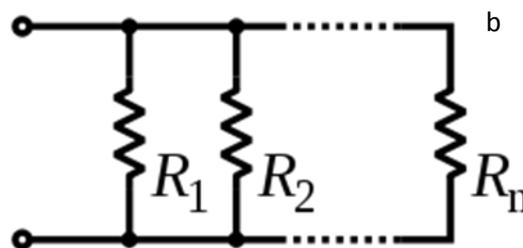


Gambar 1. segi tiga daya <sup>[4]</sup>

Dari cara merangkaikan hambatan (beban) dengan sumber listrik yang paling sederhana adalah rangkaian seri dan rangkaian paralel. Rangkaian yang disusun secara sejajar disebut rangkaian seri, digambarkan pada gambar 2a., sedangkan rangkaian yang disusun secara berderet disebut rangkaian paralel, digambarkan pada gambar 2b. Komponen yang tersusun seri akan terhubung melalui satu jalur, sehingga aliran arus listrik akan mengalir ke semua komponen.



Gambar 2a. Rangkaian Seri



Gambar 2b. Rangkaian Paralel

Pada rangkaian paralel, tegangan yang melewati tiap komponen adalah sama, dan total arus adalah jumlahan arus yang melewati tiap komponen.

Jumlah kebalikan hambatan total rangkaian paralel sama dengan jumlah dari kebalikan hambatan tiap-tiap komponen (beban)<sup>[5]</sup>.

## METODOLOGI

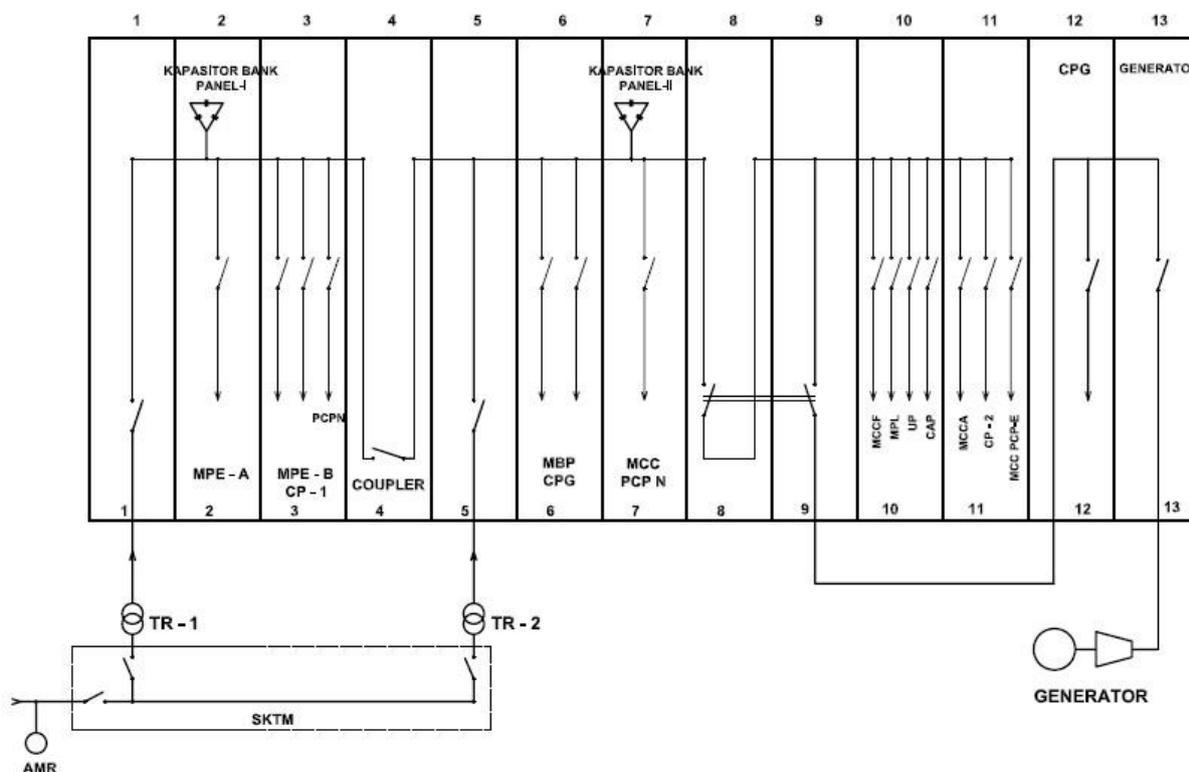
Metode yang digunakan adalah dengan cara melakukan pengamatan faktor daya ( $\cos \phi$ ) secara langsung di AMR, *Power Faktor Control* (PFC), dan *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP), serta dilakukan pencatatan parameter arus kerja kapasitor-kapasitor pada Kapasitor Bank Panel 1. Pada penggunaan 2 buah trafo semua saklar hubung di Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) dihubungkan dan *coupler* dilepas.

Sedangkan pada penggunaan 1 buah trafo saklar hubung di SKTM untuk trafo 2 dilepas dan posisi salkar pada *coupler* dihubungkan.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### HASIL

Sistem elektrikal untuk instalasi IEBE dimulai dari pasokan listrik PLN SR 5D, tegangan 20 kV dengan komponen ukur *Automatic Machine Reading (AMR)*. Dari tegangan 20 kV diturunkan menjadi 380/220 V, menggunakan transformator (trafo) dengan pemutus hubungan Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM). Keluaran trafo didistribusikan seperti pada gambar 1 dan untuk perbaikan faktor daya ( $\cos \phi$ ) serta optimalisasi arus dipasang kapasitor bank. Komponen dari kapasitor bank sebagian dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2. Pengamatan  $\cos \phi$  di AMR maupun di panel dapat dilihat pada tabel 3 dan tabel 4 di mana terjadi perbedaan pembacaan  $\cos \phi$  antara di AMR dengan di panel. Disamping itu juga terjadi perbedaan saat jam kerja dan luar jam kerja. Jumlah trafo yang digunakan untuk distribusi tenaga listrik juga mengakibatkan perbedaan dalam pembacaan  $\cos \phi$ , terutama pada saat luar jam kerja. *Single Line Diagram Distribusi Listrik IEBE* digambarkan Gambar 3.



Gambar 3. Single Line Diagram Distribusi Listrik IEBE

Tabel 1. Distribusi kapasitor pada panel 1 adalah seperti pada tabel dibawah:

Step	( kVAR )	Tipe Kapasitor	Tipe Kontaktor	Jenis Pengaman	Keterangan
1	25 (1 x 25 )	MKD525-D25	B44066-S62010	Patron Lebur 35A	Baik
2	25 (1 x 25 )	MKD525-D25	B44066-S62010	Patron Lebur 35A	Baik
3	50 (2 x 25 )	MKK525-D25	B44066-S62010	MCCB 3VT1 100A	Baik
4	50 (2 x 25 )	MKK525-D25	B44066-S62010	MCCB 3VT1 100A	Baik
5	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	Patron Lebur 160A	Baik
6	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	Patron Lebur 160A	Baik
7	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	Patron Lebur 160A	Baik
8	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	MCCB 3VT1 160A	Baik
9	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	Patron Lebur 160A	Baik
10	85(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25, MKK525-D30	B44066-S62010	Patron Lebur 160A	Baik

Konfigurasi step pada panel kapasitor bank 1 adalah 1,1,2,2,3,3,3,3,3,3 dengan basis 25KVAR/525 atau 15KVAR/400

Tabel 2. Distribusi kapasitor pada panel 2 adalah seperti pada tabel dibawah:

Step	( kVAR )	Tipe Kapasitor	Tipe Kontaktor	Jenis Pengaman	Keterangan
1	5 (1 x 8,5 )	MKK525-D8,5	B44066-S62010 14 s/d 28 A	Patron Lebur 25A	Baik
2	10 (2 x 8,5 )	MKK525-D8,5	B44066-S62010 14 s/d 28 A	Patron Lebur 25A	Baik
3	15 (1 x 25 )	MKK525-D25	B44066-S62010 14 s/d 28 A	Patron Lebur 50A	Baik
4	30 (2 x 25 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 100A	Baik
5	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
6	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
7	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
8	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
9	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
10	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
11	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik
12	45/50(1 x 25, 2 x 30 )	MKK525-D25	B44066-S62010 30 s/d 72 A	Patron Lebur 160A	Baik

Konfigurasi step pada panel kapasitor bank 1 adalah 1,2,3,6,10,10,10,10,10,10,10,10 dengan basis 8,5KVAR/525 atau 5KVAR/400

Tabel 3. Pemakaian Transformator dan Pembacaan  $\cos \phi$ 

No	Trafo	Target $\cos \phi$ Kapasitor	$\cos \phi$ Panel	$\cos \phi$ AMR	
				Kapasitor	Non Kapasitor
1	2 buah (I dan II)	0,96	0,96	0,88	0,77
2	1 buah	0,96	0,96	0,92	0,77

Tabel 4. Pembebanan dan pembacaan  $\cos \phi$ 

No	Operasi Transformator	Waktu Pembebanan	$\cos \phi$ Panel	Target $\cos \phi$ Kapasitor	$\cos \phi$ AMR
1	2 buah (I dan II)	Jam kerja	0,96	0,96	0,88
		Luar jam kerja	1	0,96	0,32
2	1 buah	Jam kerja	0,96	0,96	0,92
		Luar jam kerja	1	0,96	0,60

Tabel 5. Pengukuran arus kapasitor Panel 1

No	Step	Arus (Aktual) (A)			Arus(Nominal)	Keterangan
		R	S	T		
1	1	21,25	21,58	21,40	21.65064	Baik
2	2	18,5	18,99	18,79	21.65064	Baik
3	3	50,6	51,1	50,7	43.30127	Baik
4	4	50,4	51,1	50,8	43.30127	Baik
5	5	75,4	76,7	76,1	72.16878	Baik
6	6	75,5	76,8	76,3	72.16878	Baik
7	7	75,2	76,4	75,7	72.16878	Baik
8	8	75,7	77,0	76,2	72.16878	Baik
9	9	75,9	76,8	76,4	72.16878	Baik
10	10	75,9	76,7	76,6	72.16878	Baik

Tabel 6. Target perbaikan cos φ dan biaya KVARH

No	Target cos φ Kapasitor	cos φ AMR	Biaya KVARH
1	0.92	0.89	Tidak
2	0.92	0.89	Ya
3	0.92	0.89	Ya
4	0.92	0.89	Ya
5	0.96	0.89	Ya
6	0.96	0.92	Tidak
7	0.96	0.92	Tidak
8	0.96	0.92	Tidak
9	0.96	0.92	Tidak
10	0.96	0.92	Tidak
11	0.96	0.92	Tidak
12	0.96	0.92	Tidak

Tabel 7. Perbandingan Cos φ dan Sin φ

	Sin φ	
	1	0
Cos φ	0,99	0,1410
	0,98	0,1989
	0,97	0,2431
	0,96	0,2800
	0,95	0,3122
	0,94	0,3411
	0,93	0,3675
	0,92	0,3919
	0,91	0,4146
	0,90	0,4358
	0,89	0,4559
	0,88	0,4749
	0,87	0,4930
0,86	0,5102	
0,85	0,5267	

**PEMBAHASAN**

Terdapat perbedaan pembacaan cos φ AMR dengan cos φ panel karena adanya perbedaan letak alat ukur cos φ seperti terlihat pada gambar 3 dimana AMR membaca

semua beban yang ada pada distribusi listrik IEBE, sementara alat ukur yang terpasang pada panel hanya dapat mengukur beban setelah dari trafo. Dengan keadaan yang demikian maka pembacaan  $\cos \phi$  pada AMR akan lebih rendah daripada pembacaan pada panel. Rendahnya  $\cos \phi$  di AMR terutama dari tahanan dalam trafo yang bersifat induktan, dan beban lain yang berbentuk lilitan seperti motor listrik.

Karakteristik beban listrik secara normal pada saat jam kerja masih bersifat induktif dengan  $\cos \phi$  sebesar 0,77 di AMR maupun di panel (LVMDP dan Kapasitor Bank) tanpa kompensasi kapasitor. *Power Faktor Control (PFC)* memberikan kompensasi arus kapasitor sesuai target *setting* yaitu 0,96 sehingga pembacaan  $\cos \phi$  di AMR dapat diperbaiki seperti terlihat pada tabel 3. Pada saat luar jam kerja karena tidak ada pemakaian atau pemakaian listrik yang sangat kecil PFC tidak memberikan kompensasi disebabkan pembacaannya untuk  $\cos \phi$  adalah 1 atau sesuai target 0,96. Hal ini tidak sama pada pembacaan di AMR, di mana  $\cos \phi$  terbaca 0,32 untuk pemakaian dengan 2 trafo dan 0,60 untuk penggunaan 1 trafo. Ini karena meter AMR membaca beban yang ada pada rangkaian seperti gambar 1 hanya trafo saja, yang merupakan lilitan berinti besi dengan sifat tahanan reaktif induktif.  $\cos \phi$  yang rendah berdampak pada nilai KVAR yang besar, konsekuensinya adalah dikenakan biaya pemakaian KVARH setiap 1 KVARH disaat bayar pemakaian listrik.

Adanya perbedaan  $\cos \phi$  di luar jam kerja dengan pemakaian trafo antara, 2 buah dengan 1 buah, adalah dimana untuk pemakaian 2 trafo  $\cos \phi$  sangat rendah sebesar 0,32 sedangkan 1 trafo sebesar 0,6 dapat dijelaskan dengan bantuan gambar 2b yaitu rangkaian trafo merupakan rangkaian paralel. Diasumsikan untuk pemakaian 1 trafo nilai faktor-dayanya ( $\cos \phi$ ) sebesar 0,6 maka jika 2 buah trafo dihubungkan secara paralel, secara teori dapat dicari nilai penggantinya yaitu dengan menggunakan cara  $\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_n}$  dan akan didapat nilai sebesar 0,3 yang sesuai dengan pembacaan di AMR.

Pengukuran arus kompensasi kapasitor seperti tabel 5 menunjukkan bahwa kinerja kapasitor pada tiap-tiap step umumnya baik, kecuali step no. 2 dimana sudah mengalami penurunan  $\pm 12\%$  dihitung dari arus nominal sebesar 21,7 ampere. Baiknya arus kompensasi yang diberikan kapasitor belum dapat dikatakan kinerja kapasitor bank baik pula jika yang diharapkan pemasangan kapasitor bank adalah untuk menghilangkan biaya KVARH. Seperti terlihat pada tabel 6, terjadi 4 kali harus dilakukan pembayaran terhadap pemakaian KVARH. Hal ini terjadi karena PFC panel 1 mengalami kerusakan program dan harus diganti dengan menggunakan PFC dari panel 2 dan dilakukan *setting* ulang. Asumsi bahwa tidak dikenakan biaya KVARH oleh P.T. Perusahaan Listrik Negara (PLN) jika  $\cos \phi$  minimal 0,85, maka target perbaikan  $\cos \phi$  diatur sebesar 0,92 yang

menghasilkan pembacaan AMR sebesar 0,89 dan sudah diatas dari asumsi yang ada tersebut. Setelah diketahui adanya biaya pemakaian KVARH, secepatnya dilakukan *setting* ulang target perbaikan  $\cos \phi$  menjadi 0,96 dan hasilnya adalah pembacaan AMR sebesar 0,92 serta tidak ada biaya KVARH lagi.

Sesuai pernyataan daya semu (3) variabel  $\sin \phi$  mempengaruhi besarnya daya KVAR yang terjadi. Nilai  $\sin \phi$  harus ditekan sekecil mungkin, dengan cara meningkatkan  $\cos \phi$ . Berapa nilai minimal  $\cos \phi$  agar daya KVAR menjadi kecil, tidak dapat ditentukan karena adanya variabel arus dan tegangan. Jika diasumsikan  $\cos \phi = 0,92$  maka  $\sin \phi = 0,3919$ , nilai ini masih cukup besar, apa bila arus yang mengalir sebesar 1000A sangat mungkin dalam 1 bulan pemakaian listrik akan terkena biaya KVARH. Bila  $\sin \phi$  ditekan sampai sebesar 0,1 maka  $\cos \phi$  yang harus diusahakan sebesar 0,9949 agar tidak terkena biaya KVARH. Dengan bantuan tabel 7 dapat dinyatakan bahwa pemasangan kapasitor bank efektif untuk bisa memperbaiki nilai  $\cos \phi$ , sehingga nilai KVAR menjadi kecil, tetapi tidak dapat dipastikan pemakaian KVAR menjadi = 0.

## KESIMPULAN

Unjuk kinerja kapasitor bank panel 1, cukup baik didasarkan arus kompensasi yang diberikan tiap-tiap step dalam batas baik, dengan sedikit penurunan sebesar 12% di step no. 2 yaitu sebesar  $\pm 18,9$  ampere. Ditinjau dari perbaikan  $\cos \phi$ , kapasitor bank efektif untuk dapat memperbaiki  $\cos \phi$  yaitu dari 0,77 menjadi 0,89 dengan target FPC 0,92 atau menjadi 0,92 saat target FPC 0,96.

## SARAN

Diharapkan mendatang dapat dilakukan pengembangan pengaman arus menggunakan MCCB, dan dapat dilakukan modifikasi agar panel 1 dan panel 2 dapat *interkoneksi* supaya operasi kapasitor bank tidak hanya untuk trafo yang dilayaninya saja, tetapi dapat ditukar-tukar dalam pengoperasiannya

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Budi yana yang telah mengeksekusi agar menggunakan 1 buah trafo yaitu trafo 1.
2. Tonny Siahaan yang telah memberi ijin.

## DAFTAR PUSTAKA

1. C. Dorf, Ed. Richard, *The Electrical Engineering Handbook*, Chan, Shu-Park "Section I – Circuits", Boca Raton: CRC Press LLC, 2000.

2. Anonim, PTBN Batan, Laporan Analisis Keselamatan (LAK) Instalasi Elemen Bakar Eksperimen Revisi : 7, 2012.
3. Latief, Abdul, Evaluasi Penghematan Energi Instalasi Radiometalurgi Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Urania Vol. 16 No. 1, Januari 2010: 1 – 46 (Hal 31 s.d. 39).
4. Kusmantoro, Adhi dkk., Peningkatan Efisiensi Sumber Tenaga Listrik Di Industri Dengan Kapasitor Bank, Science And Engineering Nasional Seminar 1 (SENS 1)- Semarang, 8 Agustus 2015 ISBN : 978-602-0960-12-8 (Hal 126 s.d. 136).
5. Anonim, Rangkaian Seri Paralel, [https://id.wikipedia.org/wiki/Rangkaian\\_seri\\_dan\\_paralel](https://id.wikipedia.org/wiki/Rangkaian_seri_dan_paralel) 25/1/2017.
6. Anonim, Rekening Listrik PT PLN (PERSERO), PT PLN (PERSERO) 2016, Serpong.
7. Anonim, *Power Factor Correction*, Power Quality Solution, EPCOS  $\Phi$  Product Profile 2015 [www.epcos.com](http://www.epcos.com).