

EVALUASI KINERJA UNIT KAPASITOR BANK IEBE

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

ABSTRAK

Kegiatan evaluasi kinerja unit Kapasitor *Bank* IEBE telah dilakukan sebagai bagian dari pengelolaan fasilitas sistem di IEBE, agar IEBE berlangsung dengan baik dan berkesinambungan. Untuk memperbaiki nilai faktor daya dari PLN, untuk setiap transformator dilengkapi kapasitor *bank*. Kapasitor *bank* yang dioperasikan hanya 1 buah, sesuai dengan transformatornya yaitu transformator 1. Komponen utama kapasitor bank adalah : Pemutus hubung (saklar), *Power Faktor Control* (PFC), kapasitor, kontaktor, pengaman arus baik patron lebur atau *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB). Kondisi terkini kapasitor bank telah dilakukan perubahan-perubahan untuk peningkatan kapasitas terpasang, maupun spesifikasinya. Evaluasi dilakukan untuk mendapatkan informasi efektivitas kapasitor *bank*, maupun degradasi komponen, agar dapat diambil tindakan sesuai. Metodologi yang digunakan untuk evaluasi dengan cara dilakukan pengamatan nilai faktor daya ($\cos \phi$) di AMR, di *Power Faktor Control* (PFC), dan di *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP). Serta diamati arus kompensasi kapasitor-kapasitor pada kapasitor *Bank* Panel 1. Dilakukan penghitungan sesuai dengan persamaan-persamaan terhadap data yang didapat. Hasil evaluasi kinerja kapasitor *bank* panel 1, adalah *step* no. 1, no. 2, dan no. 10, nilainya dibawah referensi, kisarannya 86% sampai dengan 96%. Perbaikan nilai $\cos \phi$ oleh kapasitor *bank* telah berhasil, dengan target pengaturan 0,96, $\cos \phi$ di AMR dari 0,77 diperbaiki menjadi 0,92, dan biaya KVARH tahun 2018 tidak ada.

Kata kunci: kapasitor bank, arus kompensasi, faktor daya ($\cos \phi$)

PENDAHULUAN

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

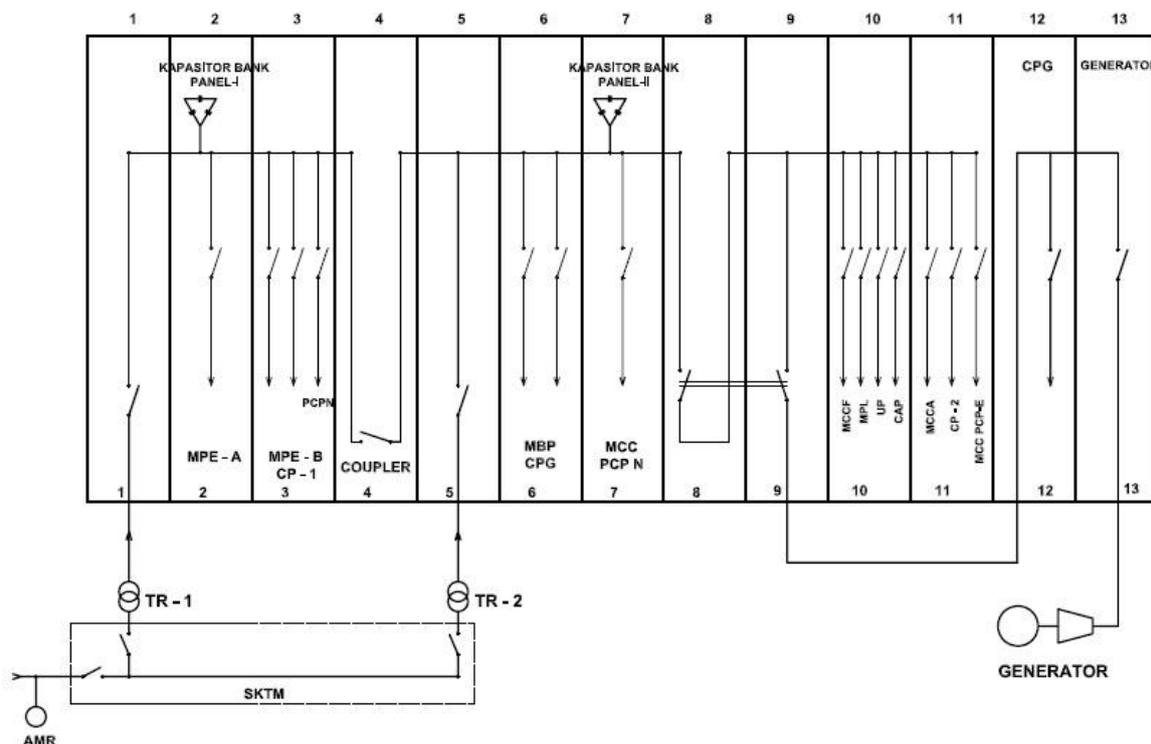
Sumber daya listrik yang digunakan di IEBE dalam keadaan normal diperoleh dari P.T. Perusahaan Listrik Negara (PLN) dengan total daya terpasang pada awalnya sebesar 4000kVA. Untuk penghematan energi kini sudah diturunkan menjadi 1525kVA^[1] pada tegangan menengah 20kV. Sumber daya dari PLN ini didistribusikan 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). Menimbang kapasitas setiap transformator sudah berlebih dari daya terpasang dari PLN, maka kini hanya dioperasikan 1 buah transformator.

Untuk memperbaiki nilai faktor daya, sumber daya dari PLN telah dilengkapi dengan kapasitor *bank* untuk setiap transformator. Pada awalnya total kapasitas yang terpasang sejumlah 2 x 380 KVAR. Seperti transformator, kini kapasitor *bank* yang beroperasi hanya 1 buah, sesuai dengan transformatornya yaitu transformator 1. Komponen utama kapasitor *bank* adalah : Pemutus hubung (saklar), *Power Faktor Control* (PFC), kapasitor, kontaktor, pengaman arus baik patron lebur atau *Molded Case Circuit Breaker* (MCCB).

Kondisi terkini kapasitor *bank* telah dilakukan perubahan-perubahan untuk peningkatan kapasitas terpasang, maupun spesifikasinya.

Evaluasi dilakukan untuk mendapatkan informasi efektivitas kapasitor *bank*, maupun degradasi komponen, agar dapat diambil tindakan sesuai dengan situasi yang terjadi.



Gambar 1. *Single Line Diagram* Distribusi Listrik IEBE.

TEORI

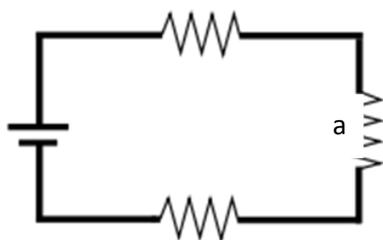
Listrik secara umum terdiri dari tegangan dan arus. Tegangan listrik didefinisikan sebagai perbedaan potensial listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik dan dinyatakan dalam satuan volt (V). sedangkan arus listrik adalah banyaknya muatan listrik yang disebabkan dari pergerakan elektron-elektron, 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(Ω), dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

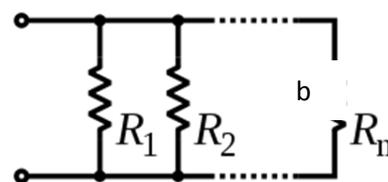
$$R = V / I \text{ [2,3]} \quad (1)$$

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 (induktansi) dilambangkan L, dan kapasitif dari akibat hambatan kapasitor (kapasitansi) dilambangkan C. Satuan nilai yang mengikuti tiap-tiap jenis hambatan masing-masing adalah R dengan satuan ohm (Ω), L mempunyai satuan Henry (H), dan C bersatuan Farad (F).

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). Nilai resistansi pengganti pada rangkaian seri atau paralel diberikan dalam bentuk persamaan adalah:

$$R_p = R_1 + R_2 + R_3 + R_n^{[2,3]} \quad (2)$$

Sedangkan pada rangkaian paralel

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_n} \quad [2,3] \quad (3)$$

Persamaan diatas berlaku juga untuk jenis hambatan reaktif induktansi. Sementara pada jenis hambatan reaktif kapasitansi berlaku sebaliknya, nilai C pengganti pada rangkaian seri kapasitansi adalah

$$\frac{1}{C_p} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_n}^{[2,3]} \quad (4)$$

sedangkan rangkaian paralel kapasitansi nilai C pengganti adalah

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + C_n^{[2,3]} \quad (5)$$

Nilai keluaran kapasitor pada arus bolak-balik (*alternating current / AC*) dinyatakan dengan Q_C dengan satuan KVAR^[4,5].

Karena sifat-sifat hambatan yang berbeda menjadikan perilaku yang berbeda pada masing-masing jenis hambatan. Pada hambatan resistansi tegangan dan arus berjalan seiring pada satuan waktu. Sementara pada induktansi arus tertinggal terhadap tegangan pada satuan waktu (*lag*), sedangkan kapasitansi arus lebih dahulu terhadap tegangan (*lead*). Dengan demikian karena adanya hambatan induktansi dan kapasitansi terjadi apa yang dikenal dengan faktor daya ($\cos \phi$).

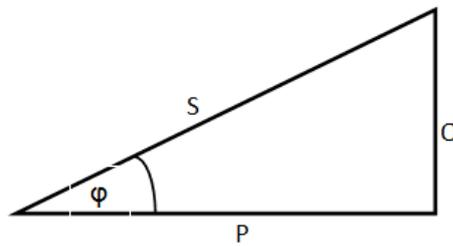
Hambatan atau beban dalam suatu rangkaian listrik menjadi suatu usaha, dan dikenal sebagai daya. Ada 3 jenis daya yang dikenal yaitu daya nyata dinyatakan dengan huruf S, daya nyata dengan huruf P, dan daya semu atau reaktif dengan huruf Q, pernyataan-pernyataan tersebut dijabarkan menggunakan persamaan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

$$S = V * I \text{ (VA)} \quad [2,3,4,5] \quad (6)$$

$$P = V * I * \cos \phi \text{ (Watt)} \quad [2,3,4,5] \quad (7)$$

$$Q = V * I * \sin \phi \text{ (VAr)} \quad [2,3,4,5] \quad (8)$$

Hubungan ketiga jenis daya digambarkan seperti pada gambar .



Gambar 3. segi tiga daya ^[2,3,4,5]

Faktor daya pada arus bolak-balik didefinisikan sebagai rasio perbandingan daya nyata P, dengan daya buta Q.

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad [4,5] \quad (9)$$

Nilai $\cos \varphi$ yang rendah, memiliki kelemahan antara lain: kerugian dalam jalur listrik konsumsi energi dan biaya yang lebih tinggi, meningkatnya penurunan tegangan dalam jaringan distribusi daya, kerugian lebih tinggi pada jalur listrik dan transformer^[4,5].

Sebab dari itu sangat penting untuk meningkatkan faktor daya dengan cara memasang kapasitor *bank* untuk mengurangi daya reaktif dari beban induktif dalam sistem, sehingga meningkatkan $\cos \varphi$. Dengan memiliki nilai $\cos \varphi$ lebih dari 0,9 diharapkan dapat menghindari membayar hukuman biaya KVARH.

Nilai KVAR dari kapasitor pada nilai kapasitansi C tetap, dapat berubah jika tegangan aktual tidak sama dengan tegangan kapasitor

$$Q_a = \left(\frac{V_a}{V_c}\right)^2 \times \left(\frac{f_a}{f_R}\right) \times Q_c \quad [4,5] \quad (10)$$

dimana :

Q_a = KVAR aktual

V_a =Tegangan aktual

f_a =frekuensi aktual

Q_c = KVAR kapasitor

V_c = Tegangan kapasitor

f_R =frekuensi referensi

dan nilai dari Q_C merupakan hasil perkalian dari tegangan kapasitor dengan arus kapasitor

$$Q_C = V_C \times I_C \quad [4,5] \tag{11}$$

METODOLOGI

Metode yang digunakan adalah dengan cara melakukan pengamatan $\cos \phi$ di AMR, *Power Faktor Control* (PFC), dan *Low Voltage Main Distribution Panel* (LVMDP). Serta pengamatan arus kompensasi kapasitor-kapasitor pada Kapasitor *Bank* Panel 1. Arus kompensasi yang diberikan kapasitor kemudian dihitung untuk mendapatkan nilai kVAR aktual dari tiap-tiap kapasitor. Nilai kVAR dari arus kompensasi kemudian dibandingkan dengan nilai referensi untuk mengetahui kinerja dari tiap kapasitor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

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 serta optimalisasi arus dipasang kapasitor *bank*. Komponen dari kapasitor *bank* pada Tabel 2, sedangkan pengamatan $\cos \phi$ di AMR maupun di panel dapat dilihat pada Tabel 3. Terjadi perbedaan pembacaan $\cos \phi$ antara di AMR dengan di panel. Disamping itu juga terjadi perbedaan saat jam kerja dan luar jam kerja.

Tabel 1. Target perbaikan $\cos \phi$ dan biaya KVARH

No	Target $\cos \phi$ Kapasitor	$\cos \phi$ AMR	Biaya KVARH	
			Tidak	Ya
1	0.96	0.92	√	
2	0.96	0.92	√	
3	0.96	0.92	√	
4	0.96	0.92	√	
5	0.96	0.92	√	
6	0.96	0.92	√	
7	0.96	0.92	√	
8	0.96	0.92	√	
9	0.96	0.92	√	
10	0.96	0.92	√	
11	0.96	0.92	√	
12	0.96	0.92	√	

Tabel 2. Distribusi kapasitor pada panel 1 adalah seperti pada tabel dibawah:

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

*) Sesuai persamaan (4)

^a Peningkatan pengaman dari patron lebur menjadi menggunakan MCCB

Konfigurasi *step* pada panel kapasitor *bank* 1 adalah 1,1,2,2,3,3,3,3,3,3 dengan basis 15 kVAR, sesuai dengan persamaan (10), pada tegangan rata-rata aktual 405 V. Nilai kVAR untuk tiap *step* kapasitor *bank* pada tegangan yang lain didasarkan hitungan diperlihatkan pada tabel 4

Tabel 3. Pembebanan dan Pembacaan cos ϕ

Operasi Transformator	Waktu Pembebanan	cos ϕ Panel	Target cos ϕ Kapasitor	cos ϕ AMR	
				Tanpa Kapasitor	Kapasitor
Transformator 1	Jam kerja	0,96	0,96	0,77	0,92
	Luar jam kerja	1	0,96	0,60 ^{N/A}	0,60 ^{N/A}

^{N/A} kapasitor *bank* tidak memberikan arus kompensasi

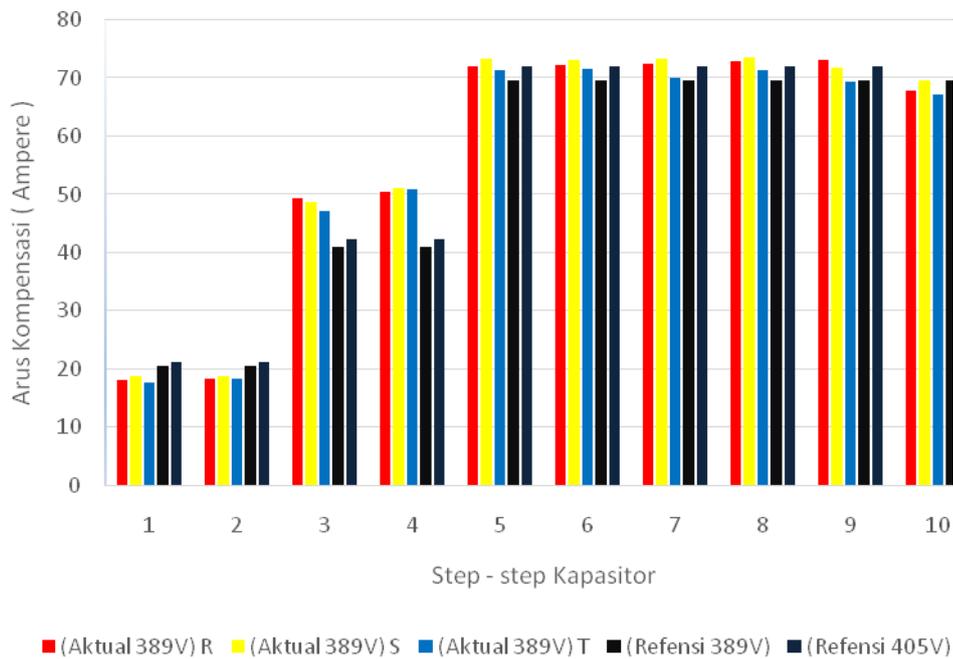
Tabel 4. Arus Kapasitor dan Q_C

No	Step	Arus (_{a/389}) (A)			$Q_{C(525)}$ kVAR	$Q_{C(405)}$ kVAR	$Q_{C(389)}$ kVAR	$Q_{Ca(389)}$ kVAR
		R	S	T				
1	1	18,0	18,7	17,7	25	14,87	13,73	11,93 - 12,60 ↓
2	2	18,3	18,8	18,2	25	14,87	13,73	12,26 - 12,67 ↓
3	3	49,3	48,7	47,2	50	29,75	27,45	31,80 - 32,81 ↑
4	4	50,4	51,1	50,8	50	29,75	27,45	34,23 - 34,43 ↑
5	5	72,0	73,3	71,5	85	50,58	46,67	48,17 - 49,39 ↑
6	6	72,2	73,2	71,6	85	50,58	46,67	48,24 - 49,32 ↑
7	7	72,5	73,3	70,0	85	50,58	46,67	47,16 - 49,39 ↑
8	8	73,0	73,5	71,5	85	50,58	46,67	48,17 - 49,52 ↑
9	9	73,2	71,9	69,5	85	50,58	46,67	46,83 - 48,44 ↑
10	10	67,8	69,6	67,2	85	50,58	46,67	45,28 - 46,89 ↓

a = aktual

↓, ↑ referensi sesuai pers (9)

Nilai kVAR referensi pers (9) 389 V, untuk *step* 1, 2 = 13,73, *step* 3,4 = 27,45 dan *step* 5 s.d. 10 = 46,67



Gambar 4. Grafik Arus kompensasi kapasitor pada tegangan aktual dan tegangan referensi

Terdapat perbedaan pembacaan $\cos \phi$ AMR dengan $\cos \phi$ panel karena adanya perbedaan letak alat ukur $\cos \phi$ seperti terlihat pada gambar 1, 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 dari pada pembacaan pada panel.

Tanpa kompensasi kapasitor beban listrik secara normal pada saat jam kerja masih bersifat induktif, di AMR $\cos \phi$ terbaca sebesar 0,77. *Power Faktor Control (PFC)* memberikan kompensasi arus kapasitor sesuai target *setting* yaitu 0,96, pembacaan $\cos \phi$ di AMR dapat diperbaiki seperti terlihat pada tabel 3, menjadi 0,92. Pada saat luar jam kerja karena tidak ada pemakaian atau pemakaian listrik yang sangat kecil, nilai $\cos \phi$ masih sesuai target 0,96 atau bahkan sama dengan 1, sehingga PFC tidak memberikan kompensasi. Sementara pembacaan di AMR, nilai $\cos \phi$ sebesar 0,60. Ini dapat terjadi karena meter AMR membaca beban yang ada pada rangkaian seperti terlihat pada gambar 1, beban terbesar hanya trafo saja, yang merupakan lilitan berinti besi dengan sifat tahanan reaktif induktif.

Kinerja kapasitor pada tiap-tiap *step* nya dengan tegangan referensi 389 V, dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5. Nilai arus kompensasi kapasitor pada *step* no. 1, no. 2, dan no. 10, dengan menggunakan persamaan (9), dan (10), menunjukkan nilainya dibawah referensi. Nilai arus aktual kapasitor pada referensi yang sama berada pada kisar 86% sampai dengan 96%. Perhitungan menggunakan referensi kVAR yang berbasis tegangan 405 V menghasilkan kisar 84% hingga 89%. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitor pada *step* 1, 2, dan 10 sudah mulai turun kinerjanya, dan berpengaruh terhadap waktu hidup dari kapasitor. Sebab dari turunnya kinerja kapasitor *step* 1, 2, dan 10 kemungkinan disebabkan sering terjadinya *switching* yang melebihi 5000 kali pertahun^[4]. Ini dikarenakan oleh PFC *step-step* tersebut sering kali terpaksa harus dipaksakan *switching*, untuk melengkapi arus kompensasi yang diperlukan. *Switching* juga berpengaruh pada komponen-komponen seperti yang ditampilkan pada Tabel 2. Pengaman yang terpasang, baik jenis patron lebur atau MCCB, dan kontaktor. Dengan semakin seringnya *switching* maka secara otomatis waktu hidupnya akan terus menurun. Sebagai contoh waktu hidup dari kontaktor sampai 150.000 kali operasi, 120 kali per jam^[4]. Untuk masalah ini pengembangan spesifikasi pengaman lebur menjadi MCCB pada *step* 1, 2, dan 5, serta penambahan *step-step* senilai *step* 1 dan 2 dapat mejadi pertimbangan.

Dari Tabel 3, perbaikan nilai $\cos \phi$ oleh kapasitor *bank* secara teori dapat dikatakan berhasil, tetapi akan lebih baik lagi jika diiringi hilangnya biaya KVARH seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Disini terlihat perbaikan $\cos \phi$ yang ada di AMR menjadi 0,92 sudah menghilangkan biaya KVARH^[8].

KESIMPULAN

Unjuk kinerja kapasitor *bank* panel 1, *step*no. 1, no. 2, dan no. 10, nilainya dibawah referensi kisarannya 86% sampai dengan 96%. Perbaikan nilai $\cos \phi$ oleh kapasitor *bank* berhasil, dengan target *setting* 0,96, $\cos \phi$ di AMR 0,77 diperbaiki menjadi 0,92. Biaya KVARH tahun 2018 tidak ada.

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

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim, PTBN Batan, "Laporan Analisis Keselamatan (LAK) Instalasi Elemen Bakar Eksperimen" Revisi : 7,2012
2. C. Dorf, Ed. Richard " *The Electrical Engineering Handbook*, Chan, Shu-Park "Section I – Circuits", Boca Raton: CRC Press LLC, 2000
3. Alexander, Charles " *Fundamentals of Electric Circuits*"
http://sabotin.ung.si/~mv0029/pdf/Alexander_2.pdf 25/2/2019
4. Anonim, " *Power Factor Correction, Power Quality Solutions*" EPCOS Product Profile 2015 www.epcos.com
5. Anonim, " *Power Factor Correction Components*" ICARProduct Catalogue 2014
6. 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)
7. Anonim, "Rangkaian Seri Paralel,"
<https://id.wikipedia.org/wiki/Rangkaianseridanparalel>25/1/2017
8. Anonim,"Rekening Listrik PT PLN (PERSERO)", PT PLN (PERSERO) 2018, Serpong.