INVESTIGASI HARMONIK JARINGAN DISTRIBUSIPT. SBM BERBASIS SIMULASI

HARMONICSINVESTIGATION OF LINE DISTRIBUTION PT. SBM BASED ON SIMULATION

Usman[1*], Akhyar Muchtar[2]
[1,2]*Politeknik Bosowa, Jln Kapasa Raya No. 23, Makassar*

**E-mail: usman@politeknikbosowa.com*

Diterima 21-09-2017	Diperbaiki 21-10-2017	Disetujui 28-10-2017

ABSTRAK

Indikator kualitas tenaga listrik salah satunya adalah harmonik. Adanya harmonik yang melebihi batas yang telah ditetapkan akan menimbulkan kerugian pada konsumen, khususnya industri.Pada industri harmonik salah satunya penyebanya adalah penggunaan peralatan yang mempunyai impedansi tidak linearsehingga menyebabkan terjadinya distorsi pada gelombang tegangan dan arus yang dikenal dengan THD. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi nilai harmonik pada PT. SBM, dan carameminmalisir harmonic yang timbul. Salah satu caranya adalah dengan pemasangan filter harmonik. Pada penelitian ini digunakan jenis filter pasif yaitu single tuned filter**.** Metode yang digunakan adalah dengan melakukanpemodelan jaringan distribusi TP. SBM kemudian melakukan simulasi harmonik dengan software ETAP. Hasil simulasi ini akan menunjukan THD, orde harmonik, bentuk gelombang arus dan tegangan yang terdistorsi. Hasil simulasi menunjukankondisi harmonik PT. SBM saat adalah 6 dari 4 pada bus-bus utama THD-V melebihi batas ambang dari yang ditetapkan oleh IEEE. Sedangkan THD-I masih berada dibawah standar IEEE. Dengan penambahan single-tuned filter yang ditempatkan pada bus 5P1-1P1 dan dirancang untuk menekan harmonik orde 11. Hasil simulasi menunjukan penurunan dengan rata-rata sebesar 46.33%, sedangkan untuk THD-I ada yang mengalami penurunan dan kenaikan. Untuk IHD-V orde 11 rata-rata penuruanan 86.19%. Sedangkan IHD-I orde 11 sama halnya dengan THD-I ada yang mengalami penurunan ada yang mengalami kenaikan.

Kata kunci:kualitas tenaga listrik, THD, single tuned filter, simulasi.

ABSTRACT

One of them power quality indicators harmonic. The existence of harmonics that exceed the limits that have been set will cause disadvantage to consumers, especially the industrials.In the industrial, the harmonic one of them caused by equipment that has a non-linear impedance while causing voltage and current distortion waveform known as THD. This study aims to investigate the harmonic value at PT. SBM, and how to minimize the harmonics arise. One of method to minimize THD is the harmonic filter. In this experiment, a single type of passive filter tuned filter.The method used is to modelling of the electrical system TP. SBM, simulate harmonics in ETAP software. The results of this simulation will show the THD, harmonic order, current and voltage waveforms are distorted. The simulation results show the harmonic current condition at PT. SBM was 6 of 4 on the main buses THD-V exceeds the IEEE standard. While THD-I was still under the IEEE standard. Addition of single-tuned filter that is placed on the bus 5P1-1P1 and is designed to mitigation the 11^{th} harmonic order. The simulation results showed a decrease by an average of 46.33% for THD-V, while of THD-I there is a decrease and an increase. IHD-V to order 11 decrease average of 86.19%. While the IHD-I 11^{th} harmonic order as well as THD-I there is a decrease there is an increase.

Keywords:*power system quality, THD, single tuned filter, simulation.*

PENDAHULUAN

Kualitas tenaga listrik merupakan isu yang tidak pernah berhenti dibahas pada beberapa dekade ini.Penyedia tenaga listrik dituntut untuk mengirimkan tenaga listrik sesuaidengan standar-standar yang telah ditentukan[1].Menurut [2] salah satu parameter kualitas tersebut adalah harmonik.*Institute of Electrical and Electronic Engineering (IEEE)*standar 519-2014 mendefenisikan harmonik sebagai tegangan ataupun arus

sinusoida yang mempunyai kelipatan bulat dari frekuensi dimana sistem tenaga listrik yang dirancang untuk dioperasikan (50 Hz atau 60 Hz).

Industri sangat membutuhkan kualitas sistem tenaga listrik yang baik, termasuk harmonik.Kualitas daya (*Power Quality*) yang buruk akan menimbulkan banyak kerugian bagi suatu industri, misalnya pada motor listrik akan menyebabkan, pemanasan lebih, getaran dan suara/bising yang belebihan. Pada tarnsformator akan menyebabkan rugi inti dan rugi belitan, yang dapat menyebakan kerugian daya[1,3,4]. Akan tetapi dilain pihak industri semen, seperti PT. Semen Bosowa Maros (PT. SBM) akan memproduksi harmonik tersebut karena penggunaan peralatan yang mempunyai impedansi tidak linear seperti penyearah (*Rectifier*), inverter (*power converters*), pengubah frekuensi (*Frequency Converter/variable speed drive*)[3,4,5,6].

Pengukuran harmonik bisa disebut dengan indeks harmonik.Secara umum indek harmonik ini dikenal dengan *Total Harmonic Distortion (THD)*yang terdiri dari THD tegangan (THD-v) dan THD arus (THD-i).Kedua indeks ini mempunya batasan-batasan tertentu untuk memenuhi kualitas tenaga listrik yang baik.Standar tersebut tertuang pada IEEE STD 519-2014.Berbagai macam teknik telah dikembangkan untuk mengurangi efek harmonik yang timbul.Ada dua teknik yang digunakan yaitu *pasive filter* dan *active filter*.Dalam penelitian ini akan digunakan *pasive filter*jenis *Single-tuned filter*. Hal ini dikarenakan filter pasif merupakan metode yang efektif dan ekonomis dan untuk memperbaiki harmonic pada sistem distribusi tenaga listrik [7,8].

Penelitian ini berbasiskan simulasi *software*dengan menggunakan *Electrical Trancient Analisys Program* (ETAP) untuk memodelkan sistem distrbusi jaringan distribusi PT. SBM dan melakukan simulasi harmonik. Nilai THD-v dan THD-I akan dibatasi pada bus-bus utama seperti pada bus 11 kV, 700 V dan 400 V. Data-data yang dibutuhkan oleh *software* dan tidak didapatkan dilapangan akan menggunakan nilai *default* pada ETAP.

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah mendapatkan nilai THD-v dan THD-i, orde harmonik dan cara penanganan harmonik yang timbul pada sistem kelistrikan PT SBM. Setelah mendapatkan parameter-parameter tersebut, akan dilakukan perancangan *Single-tuned filter*untuk meminimalkan harmonik. Hasil ini akan dibandingkan dengan kemampuan filter harmonik yang telah terpasang dengan pada saat ini.

Beberapa penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian ini adalah [5,9]menggunakan simulasi *software* untuk anaslisi harmonik. Oleh [5] menitikberatkan pada rekonfigurasi ulang penempatan ulang filter harmonik, sedangkan [9] melakukan simulasi pada sistem IEEE 18 bus kemudian dengan menambahkan beban non-liner untuk menentukan kapasitas *Single-tuned filter*yang akan ditambahkan. Sedangkan [7,8,10,11] membahas tentang mitigasi dari harmonik dengan menggunakan pasif filter maupun aktif filter.Referensi [7] membandingkan penggunaan filter pasif dan aktif pada sebuah gedung didapatkan bahwa filter aktif menunjukan performa yang lebih bagus, oleh [8] mengemukakan bahwa pasif lebih ekonomis dengan mempertimbangkan sistem pengamanan yang baik.Sedangkan [10] melakukan mitigasi harmonik pada industri kecil dengan aktif filter dan [11] melalukan review terhadap mitigasi harmonik dengan *active power filter*.

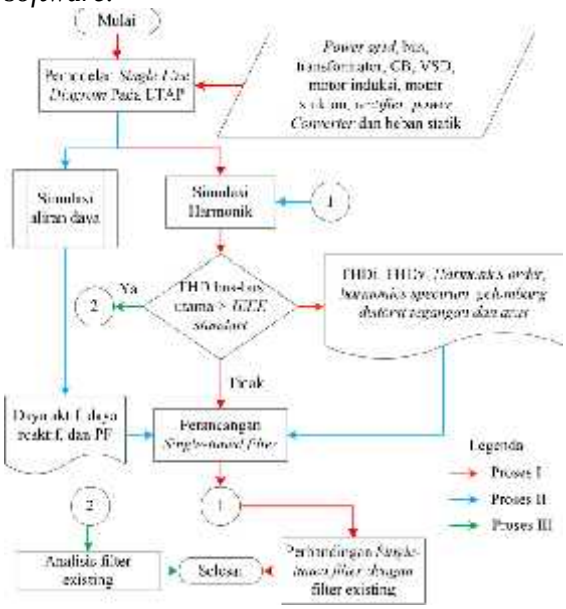
METODOLOGI

Penelitian ini adalah penelitian yang berbasis simulasi. Adapun software yang digunakan adalah ETAP 12.0. Software ini dijalankan pada komputer dengan spesifikasi CPU intel N2830, Windows 10 Pro 32-bit dan 2048MB RAM.Diagram alir dari penelitian inidisajikan padaGambar 1.

GambarSLD sistem kelistrikan PT. SBM sisajikan pada lampiran. Pada sistem ini terdapat 10 bus utama dengan rating tegangan 11 kV, 0.69 kV dan 0.4 kV. 6. Pada pabrik PT. SBM terdapat 8 *substatition/Electrical Room* (ER). Pada umumnya beban yang pada pabrik PT. SBM ini adalah motor dan *lighting*.Data beban pada pabrik semen PT. SBM disajikan pada lampiran.

Simulasi dilakukan dengan beberapa skenario yaitu dengan menggunakan filter *existing*, menambah filter dengan yang baru. Metode yang digunakan untuk penempatan filter yang baru dalam penelitian ini yaitu dengan melihat THD yang tertinggi pada semua bus utama, tidak menggunakan metode pencarian khusus untuk pemasangannya. misalnya dengan menggunakan kecerdasan buatan. Hal ini memberikan kemungkinan untuk penelitian lebih lanjut mengenai metode

optimal untuk penempatan filter harmonik sehingga diperoleh hasil yang maksimal dalam meminimalisasi THD yang timbul. Perancangan *single-tuned filter* dalam penelitian ini dilakukan dengan bantuan *software*.



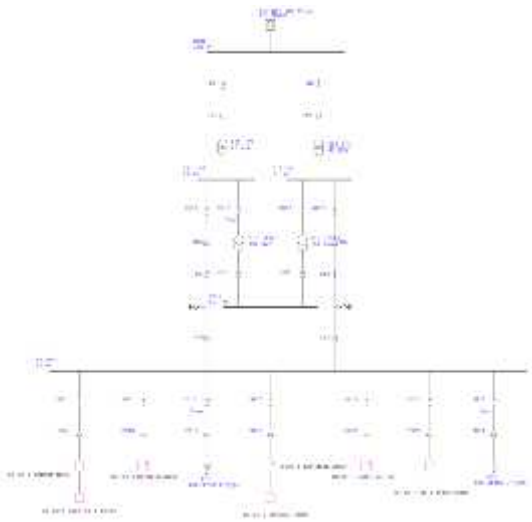
Gambar 1.Diagram alir penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan jaringan distribusi PT. SBM ditunjukan olehGambar 2, sedangkan hasil simulasi untuk THD-v dan THD-i pada sistem kelistrikan PT. SBM di sajikan pada Tabel 1. Berdasarkan tabel tersebut dapat dilihat bahwa THD-v terbesar ada pada bus 5P1-1P1 yaitu 5.38%, ini disebakan karena adanya beban besar yang terhubung pada bus ini yaitu motor sinkron sebesar 5500 kW dengan trafo sebesar 9975 kVA dan VFD sebagai *drive* motornya. Selain itu pada bus ini juga terdapat 4 buah *conveter* dan 2 buah transformator distribusi 2500 kVA, dimana beban-beban dan *equipmqnt* ini merupakan sumber harmonik.

Tabel 1.Hasil simulasi THD skenario I.

No.	Bus		THD-v (%)	Bus		THD-i (%)
	ID	Teg. (kV)		Dari	Ke	
1	MS ER-1	11	5.25		3P1-1P1	1.38
2	2P1-1P1	11	5.28		4P1-1P1	2.88
3	3P1-1P1	11	5.2	MS ER-1	5P1-1P1	4.07
4	3P1-1V2	0.4	4.6		7P1-1V1	4.13
5	4P1-1P1	11	5.38		7P1-1V2	3.26
6	5P1-1P1	11	5.49	5P1-1P1	6P1-1P1	2.86
7	5P1-1V1	0.4	4.67	3P1-1P1	2P1-1P1	2.13
8	6P1-1V1	0.4	5.07			
9	7P1-1V1	0.4	4.66			
10	7P1-1V2	0.4	3.8			

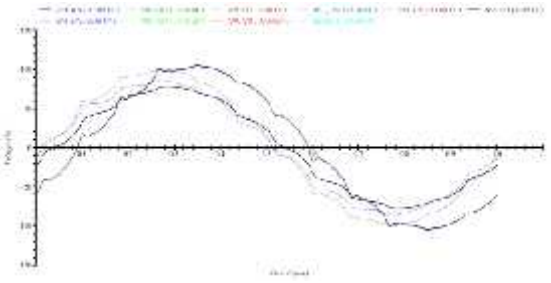


Gambar 2.Pemodelan SLD PT. SBM pada ETAP.

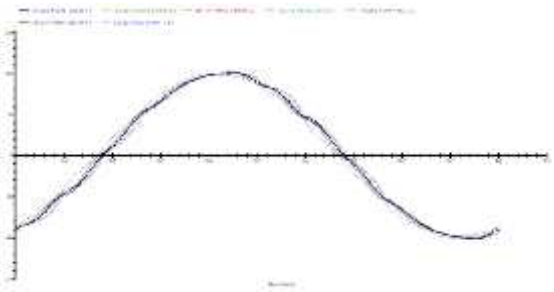
Berdasarkan hasil simulasi di atas dapat dikatakan bahwa kondisi tegangan harmonik melebihi standar tegangan harmonik seperti yang ditetapkan pada [12].Berdasarkan ketentuan ini pada level tegangan 1 kV < V ≤ 69 kV, nilai THD tegangan yang diizinkan adalah sebesar 5%. Akan tetapi pada kenyataannya berdasarkan hasil simulasi ternyata ada beberapa tegangan pada bus melebihi standar yang diizinkan oleh IEEE, seperti bus MS ER-1, 5P1-1P1,4P1-1P1,6P1-1V1,dan 2P1-1P1. Sedangkan untuk arus harmonik tidak ada yang melebihi batas ambang dari pada standar IEEE.Berdasarkan[12] arus distorsi dari maksimal pada kondisi ini adalah 5%. Apabila ditinjau secara IHD-v yang melebihi batas ketentuan berdasarkan [12] pada bus 2P1-1P1, 3P1-1P1, 3P1-1V2, 4P1-1P1, 5P1-1P1, 6P1-1P1, dan 7P1-1V1 yaitu berturut-turut 3.80%, 3.77%, 3.30%, 3.91%, 3.97%, 3.09%, dan 3.52%. Sedangkan untuk arus harmonik semua beradah di bawah ketentuan.

Gambar 3(a) menunjukan bentuk gelombang yang mengalami distorsi dari frekuensi fundamentalnya.Dari gambar tersebut dapat kita lihat bahwa semua bentuk gelombangan teganngan mengalami kecatatan (distorsi). Bus 5P1-1P1 merupakan bus dengan distorsi tegangan yang paling besar sehingga bentuk gembongnya pun mengalami distorsi yang besar pula, sedangkan 7P1-1V2 merupakan bus dengan bentuk distorsi yang terkecil dari semua bus-bus utama pada sistem kelistrikan PT. SBM. Gambar 3(b) menunjukan bentuk gelombang arus harmonik pada bus-bus utama PT. SBM.Bentuk gelombang arus ini lebih baik dari bentuk gelombang tegangan harmonik, karena

mengalami bentuk distorsi yang lebih kecil dibandingkan tengan distorsi tegangannya.



(a)

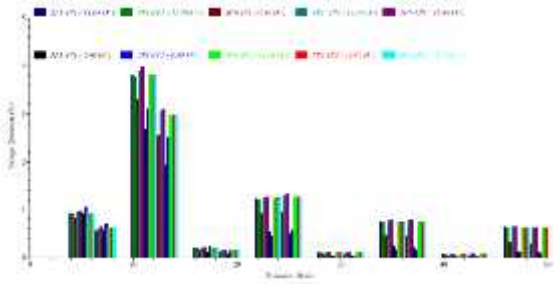


(b)

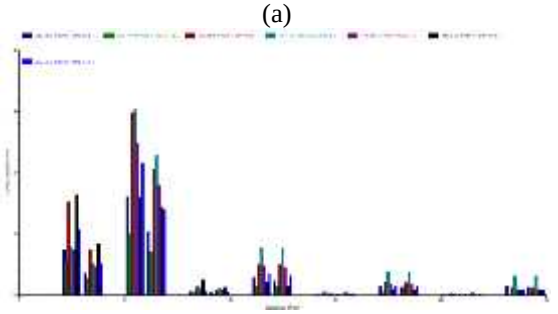
Gambar 3.Bentuk gelombang (a) THD-v dan (b) THD-i pada bus-bus utama.

Gambar 4(a) menunjukan spektrum THD-v dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa orde harmonik yang timbul yang tertinggi secara keseluruhan dari 10 bus utama adalah orde ke-11 yang mencapai 3.97%.Bus tersebut adalah bus 5P1-1P1. Kemudian Gambar 4(b) merupakan spektrum THD-i, dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa orde harmonik yang tertinggi ada pada 7P1.1P1 W0701 yang menghubungkan *sub-station ER-1* dengan*sub-station ER-7* yang nilanya mencapai 3.03%.

Kondisi ini dapat menyebabkan penurunan kualitas sistem tenaga lsitrik, salah satu indikatornya adalah rendahnya faktor daya.Seperti faktor daya dari *MS-ER1* yang menuju *SS-ER9* mencapai 83%. Selain itu salah beberapa akibat yang ditimbulkan oleh indeks harmonik yang berada dibawah standar IEEE pemanasan lebih, getaran dan suara/bising yang belebihan pada motor dan Pada tarnsformator akan menyebabkan rugi inti dan rugi belitanmengakibatkan kerugian daya[13]. Dengan demikian dibutuhkan usaha untuk mengurangi atau menekan tingkat distorsi harmonik ini.Meningkatkan kualitas sistem tenaga pada isndustri ini dapat memberikan keuntungan seperti mengurangi kerugian pada mesin yang berputar, untuk menghindari kegagalan kapasitor, dan gangguan penyambungan relay proteksi[14].Telah dijelaskan sebelumnya bahwa salah satu teknik untuk mengurangi harmonik adalah dengan memasang filter *single-tuned.*Berdasarkan hasil perhitungan pada *software* didapatkan parameter-paramter untuk *single-tuned filter* adalah 1723 kVAR, 45.34 μF, 0.5909 mH, dan 0.1 Ω. Filter ini ditempatkan pada bus 5P1-1P1, pemilihan bus ini didasarkan pada nilai THD-V yang terbesar pada bus utama PT. SBM. Kemudian orde harmonik yang menjadi dasar penentuan filternya adalah orde 11, karena IHD-I ini merupakan terbesar pada bus ini.



(a)



(b)

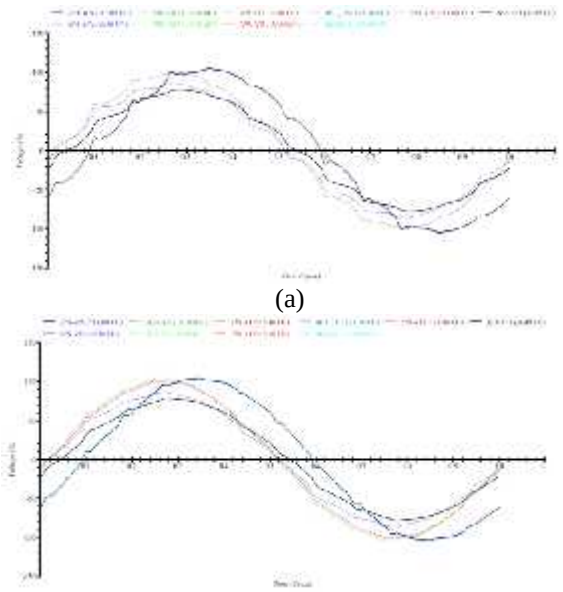
Gambar 4.Spektrum (a) THD-v, dan (b) THD-i.

Hasil simulasi dari penambahan *single-tuned filter* yang ditempatkan pada 5P1-1P1 disajikan pada Tabel 2.Dari tabel tersebut secara signifikan yang mengalami penurunan THD-v adalah bus 5P1-1V1, yaitu sebesar 57.82%.Sedangkan yang mengalami penurunan terrendah adalah pada bus 7P1-1V1 tepatnya 42.49%. Rata-rata penurunan THD-v sebagai dampak pemsangan filter baru ini adalah sebesar 46.33%. Sedangkan untuk THD-i selain ada yang mengalami penurunan adapula yang mengalami kenaikan, milanya pada bus MS ER-1 keb bus 4P1-1P1 dan 5P1-1P1 dan bus 3P1-1P1 ke bus 2P1-1P1 masing-masing 35.76%, 14.00%, dan 20.66% sedangkan lainnya mengalami penurunan. Kenaikan THD-i disebabkan oleh bertambahnya arus karena pemasangan dari filter harmonik [15,16].

Tabel 2.Hasil simulasi THD-Vdan THD-I skenario II.

No.	Bus		THD-V (%)	Bus		THD-I (%)
	ID	Teg. (kV)		Dari	Ke	
1	MS ER-1	11	2.32		3P1-1P1	1.03
2	2P1-1P1	11	2.38		4P1-1P1	3.91
3	3P1-1P1	11	2.32	MS ER-1	5P1-1P1	4.64
4	3P1-1V2	0.4	1.98		7P1-1V1	1.78
5	4P1-1P1	11	2.43		7P1-1V2	1.43
6	5P1-1P1	11	2.34	5P1-1P1	6P1-1P1	1.96
7	5P1-1V1	0.4	2.7	3P1-1P1	2P1-1P1	2.57
8	6P1-1V1	0.4	2.78			
9	7P1-1V1	0.4	1.98			
10	7P1-1V2	0.4	1.67			

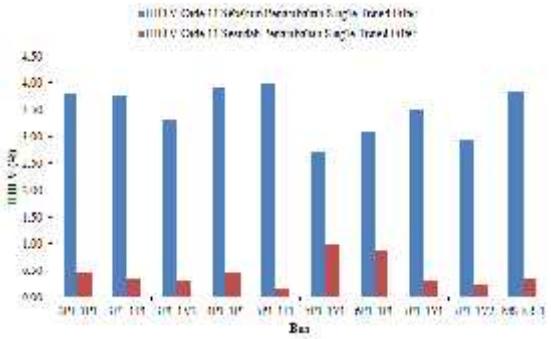
Error! Reference source not found. di atas menunjukan perbandingan antara bentuk gelombang sebelum dan sesudah penambahan *single-tuned filter* pada 5P1-1P1.Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa bentuk gelombang tegangannya menagalami perubahan menjadi lebih baik.SedangkanGambar 6.(a) merupakan perbandingan IHD-V orde 11 sebelum dan sesudah penambahan *single-tuned filter*. Berdasarkan gambar tersebut dapat dilihat bahwa pemasangan jenis filter ini pada bus 5P1-1P1 secara menyeluruh dapat menekan IHD-v orde 11 pada msing-masing bus utama. Secara signifikan penurunan ini dialami oleh bus 5P1-1P1 yaitu sebesar 95.77% dari 3.97 menjadi 0.17.Sedangkan yang mengalami penurunan terkecil adalah bus 5P1-1V1sebesar 62.74% dari 2.70 menjadi 1.01. Rata-rata penuruanan IHD-V orde 11 setelah pemasangan filter ini adalah sebesar 86.19%. Dari data ini dapat dilihat bahwa pemasangan jenis filter ini sangant signifikan menurunkan IHD-v orde 11 [17]. Sama halnya dengan Gambar 6.(b) yang merupakan perbandingan spektrum arus harmonik sebelum dan sesudah penambah filter baru, menunjukan penurunan arus harmonik individual orde 11 pada beberapa penghantar yang menjadi target, misalnya pada penghantar 7P1.1P1 W0701 mengalami penurunan sebesar 91.32% dari 3.03 menjadi 0.26. Sedangkan beberapa pada penyulang lain misalnya 2P1.1P1 W0501, 5P1.1P1 W0201, 560.1T1 W0601, dan E21.1P1 W0331.Penambahan arus harmonik orde 11 yang mengalami peningkatan yang terbesar adalah pada penghantar 560.1T1 W0601 yaitu sebesar 33.98%, dari 1.59 menjadi 2.41, pada bus tempat pemasangan *single-tuned filter*.Kenaikan arus ini disebabkan oleh penambahan arus dari filter itu sendiri [16].



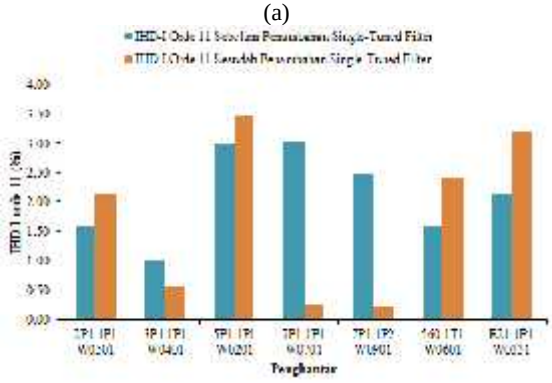
(a)

(b)

Gambar 5.Bentuk gelombang THD-v (a) skenario I dan (b) skenario II.



(a)



(b)

Gambar 6.Perbandingan (a) IHD-V orde 11 dan (b) IHD-V sebelum dan sesudah penambahan *single-tuned filter.*

Berdasarkan dari penjelasan di atas dapat dilihat bahwa pemasangan *single-tuned filter* pada bus 5P1-1V1 dapat menekan THD-v dan IHD-v harmonik yang muncul, sedangkan untuk THD-i dan IHD-i harmonik ada yang mengalami penuruan ada pula yang mengalami kenaikan. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya bahwa mitagasi atau penuruan harmonik pada sistem kelistrikan dapat meningkatkan kualitas sistem tenaga listrik

[14]ini hal ini dapat dilihat pada penghantar antara bus *MS-ER1* ke bus *SS.5P1-1P1* dimana sebelum penambahan filter faktor dayanya adalah 87.1% menjadi 91.5%.

KESIMPULAN

Hasil simulasi yang diperoleh dari kondisi harmonik PT. SBM saat adalah 6 dari 4 pada bus-bus utama THD-V melebihi batas ambang dari yang ditetapkan oleh IEEE. Sedangkan THD-I masih berada dibawah standar IEEE. Melihat kondisi itu maka dibuatkan jenis pasif filter yaitu single-tuned filter ditempatkan pada bus 5P1-1P1. Filter ini dirancang untuk menekan harmonik orde 11. Hasil simulasi dari penambahan *single-tuned filter* menunjukan penurunan dengan rata-rata sebesar 46.33%, sedangkan untuk THD-I ada yang mengalami penurunan dan kenaikan. Hasil simulasi menunjukan rata-rata penuruanan IHD-V orde 11, setelah pemasangan filter ini adalah sebesar 86.19%. Sedangkan IHD-I orde 11 ada yang mengalami penurunan ada yang mengalami kenaikan. IHD-I yang mengalami kenaikan adalah pada penghantar yang terhubung pada bus penempatan filter baru.

SARAN

Penelitian ini dapat dikembangkan dalam penentuan letak pemasangan filter misalnya dengan menggunakan kecerdasan buatan ataupun jenis filter yang digunakan. Kombinasi penambahan filter dengan SVC untuk memperbaiki faktor daya, karena pada penelitian ini hanya bus yang ditambahkan filter faktor dayanya menjadi lebih baik, sedangkan yang lain tidak.Kemudian penelitian yang dapat dikembangkan adalah mengenai rugi-rugi yng timbul dengan penambahan filter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan penulis mengucapkan teri makasih kepada Kementrian Ristek Dikti yang telah memberi bantuan dana dengan nomor kontrak 1589/K9/KT.03/2017 dan kepala LPPM Politeknik Bosowa yang telah meberikan arahan dan bantuan selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Zainal Salam, Tan Perng Cheng, dan Awang Jusoh, "Harmonics Mitigation Using Active Power Filter:A Technological Review," *Elektrika*, vol. 8, no. 2, pp. 17-26, Juni 2006.

[2] Djiteng Marsudi, *Pembangkitan Energi Listrik, 2nd ed*. Jakarta, Indonesia: Erlangga, 2011.

[3] C. Roger Dugan, *Electrical Power Systems Quality, 2nd Ed*. Columbus: McGraw-Hill Education, 2012.

[4] Shamala N and C. Lakshminarayana, "An Insight to Harmonic Suppression Techniques with Power Filters in Power Electronics," *International Journal of Computer Applications*, vol. 111, no. 9, pp. 26-34, Februari 2015.

[5] Sartika dan Alvira Octaviani, "Penanganan Harmonisa Terhadap Peningkatan Kualitas Daya Listrik Berbasis Software ETAP (Studi Kasus PT. Semen tonasa V) ," Makassar, 2013.

[6] Theodore Wildi, *Electrical Machines, Drives and Power Systems, 6th ed*. New Jersey, USA: Pearson Education, Inc, 2006.

[7] I Wayan Rinas , "Analisis Perbandingan Penggunaan Filter Pasif dan Filter Aktif Untuk Menanggulangi Terhad Pada Sistem Kelistrikan Di Ruang Puskom Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana," *Teknologi Elektro*, vol. 10, no. 1, pp. 20-26, 2011.

[8] J. C. Das, "Passive filters - potentialities and limitations," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 232-241, Januari 2014.

[9] Novex J. Alfama, "Analisis Harmonik dan Perancangan Single Tuned Filter pada Sistem Distribusi Standar IEEE 18 Bus dengan Menggunakan Software ETAP Power Station 4.0," Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Makalah Seminar Tugas Akhir 2013.

[10] Raneru Nageswara Rao, "Harmonic Analysis of Small Scale Industrial Loads and Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Distribution System," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, no. 4, pp. 1511-1540 , Juli 2013.

[11] Hussein A. Kazem, "Harmonic Mitigation Techniques Applied to Power Distribution Networks," *Advances in Power*

Electronics, vol. 2013, pp. 1-10, Januari 2013.

[12] IEEE Power and Energy Society , "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," New York, 2014.

[13] A.Y. Abdelaziz, S. F. Mekhamer, dan Sherif M. Ismael, "Sources and Mitigation of Harmonics in Industrial Electrical Power Systems: State of the Art," *The Online Journal on Power and Energy Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 320-332, 2012.

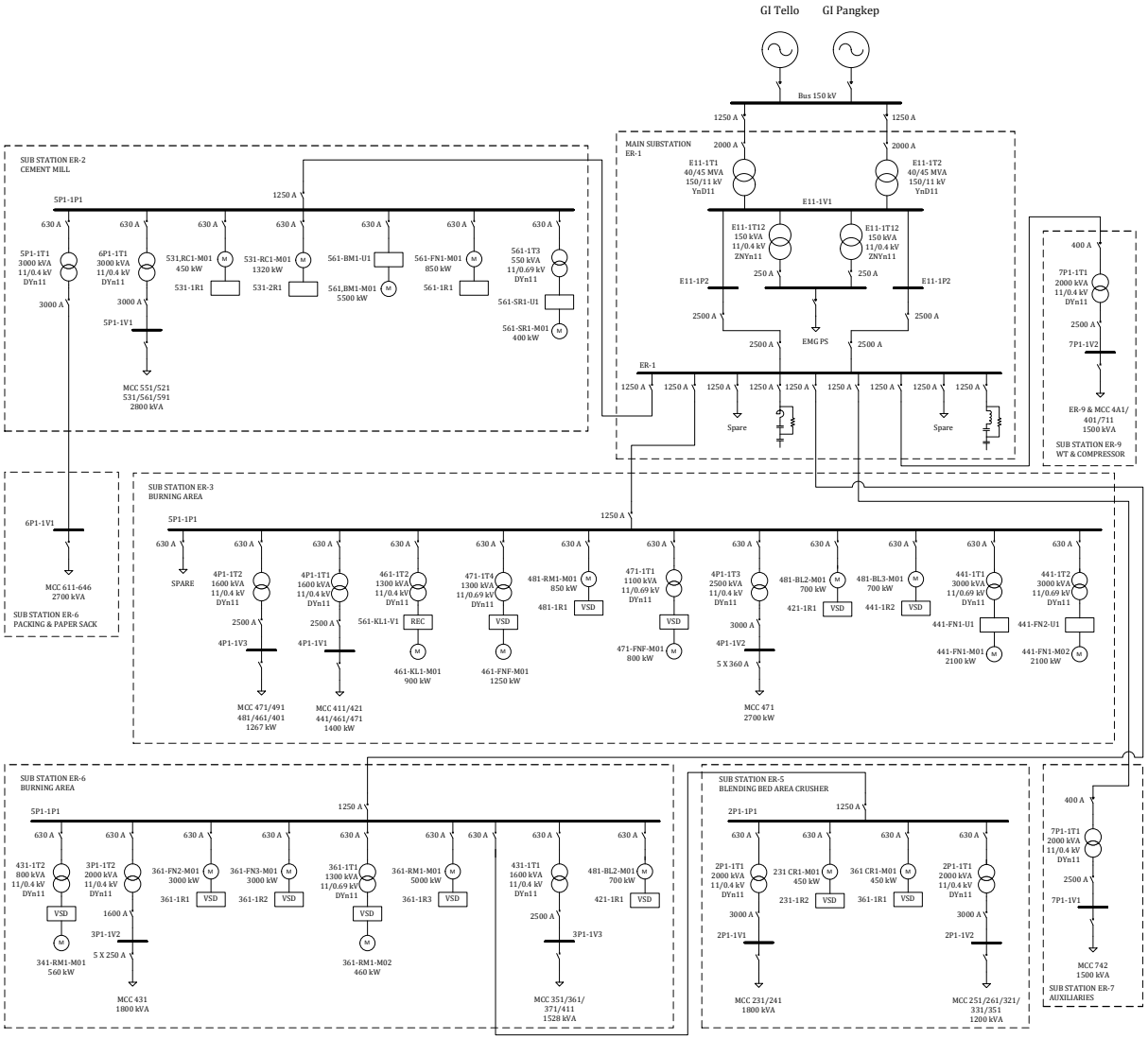
[14] T. Muni Jahnavi, G. Rajesh, dan B. Sarvesh, "Harmnics Analisys and its Mitigation Technique in Industrial Environment," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 7, no. 2, pp. 561-566, November 2015.

[15] I. Z. Margareta, "Perancangan High Pass Damped Filter Pada Sistem Distribusi Standar IEEE 9 Bus dengan Menggunakan Software ETAP Power Station 7.0," Teknik Elektro, UMS, Surakarta, Skripsi 2014.

[16] W. Prasetyadi, R. S. Wibowo, dan O. Penangsang, "Evaluasi Harmonisa dan Perencanaan Filter Pasif pada Sisi Tegangan 20 kV Akibat Penambahan Beban pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tuban," *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2012.

[17] M. A. Purwanto, A. Warsito, dan A. Nugroho, "Perencanaan High Pass dan Single Tuned Filter Sebagai Filter Harmonisa Pada Sistem Kelistrikan ESP di PT Medco E&P Indonesia," Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang, Skripsi 2016.

Lampiran *Single Line Diagram* PT. SBM



Lampiran Data Beban Pabrik Semen PT. SBM

Sub Station	Komponen	Spesifikasi
Main Sub StationER-1	E11-1T1	40/45 MVA, 150/11 kV, YnD11
	E11-1T2	40/45 MVA, 150/11 kV, YnD11
	E11-1T12	150 kVA, 11/0.4 kV, ZNYn11
	E11-1T12	150 kVA, 11/0.4 kV, ZNYn11
	E11-1P2 dan E11-1P2	0.4 kV
	ER-1 dan E11-1V1	11 kV
	E21-1C1	Harmonik
	E21-1C2	Harmonik
Sub Station ER-2, Cement Mill	5P1-1T1	3000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	6P1-1T1	3000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	561-1T3	550 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	531-RC1-M01	450 kW
	531-RC1-M01	1320 kW
	561,BM1-M01	5500 kW
	561-SR1-M01	400 kW
	531-1R1	500 kW
	531-2R1	1400 kW
	561-BM1-U1	5500 kW
	561-1R1	900 kW
	561-SR1-U1	450 kW
	5P1-1P1	11 kV
	5P1-1V1	2800 kVA
Sub Station ER-3, Burning Area	4P1-1T2	1600 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	4P1-1T1	1600 kVA, 11/0.4 kV, DYn11

	461-1T2	1300 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	471-1T4	1300 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	471-1T1	1100 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	4P1-1T3	2500 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	441-1T1	3000 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	441-1T2	3000 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	461-KL1-M01	900 kW
	461-FNF-M01	1250 kW
	471-FNF-M01	800 kW
	481-RM1-M01	850 kW
	481-BL2-M01	700 kW
	481-BL3-M01	700 kW
	441-FN1-M01	2100 kW
	441-1T2	3000 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	461-KL1-M01	900 kW
	461-FNF-M01	1250 kW
	481-RM1-M01	850 kW
	471-FNF-M01	800 kW
	481-BL2-M01	700 kW
	481-BL3-M01	700 kW
	441-FN1-M01	2100 kW
	441-FN1-M02	2100 kW
	561-KL1-V1	1000 kW
	471-1R1	1300 kW
	561-KL1-V1	1000 kW
	481-1R1	900 kW
	471-1R1	900 kW
	481-1R1	800 kW
	481-1R2	800 kW
	441-FN1-U1	2200 kW
	441-FN2-U1	2200 kW
	5P1-1P1	11 kV
	4P1-1V3	0.4 kV, 1300 kVA
	4P1-1V1	0.4 kV, 1400 kVA
	4P1-1V2	0.4 kV, 2700 kVA
Sub Station ER-4, Burning Area	431-1T2	800 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	3P1-1T2	2000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	361-1T1	1300 kVA, 11/0.69 kV, DYn11
	431-1T1	1600 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	341-RM1-M01	560 kW, 0.38 kV
	361-FN2-M01	3000 kW, 11 kV
	361-FN3-M01	3000 kW, 11 kV
	361-RM1-M02	460 kW, 0.69 kV
	361-RM1-M01	5000 kW, 11 kV
	341-1R1	600 kW
	361-1R1	3100 kW
	361-1R2	3100 kW
	361-1R1	700 kW
	361-1R3	5100 kW
	3P1-1V2	1800 kVA
	3P1-1V3	1528 kVA
Sub Station ER-5 Blending Bed Area Crusher	2P1-1T1	2000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	2P1-1T1	2000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	231 CR1-M01	450 kW, 11 kV
	231 CR1-M02	450 kW, 11 kV
	231-1R2	500 kW
	231-1R1	500 kW
	2P1-1V1	0.4kV, 1800 kVA
	2P1-1V2	0.4kV, 1200 kVA
Sub Station ER-6, Packing & Paper Sack	6P1-1V1	0.4kV, 2700 kVA
Sub Station ER-7, Auxiliaries	7P1-1T1	2000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	7P1-1V1	0.4 kV, 1500 kVA
Sub Station ER-9, WT & Compressor	7P1-1T2	2000 kVA, 11/0.4 kV, DYn11
	7P1-1V2	0.4 kV, 1500 kVA