

Filter Pasif Sebagai Kompensasi Harmonik dari *Cycloconverter* pada Pabrik *Hot Strip Mill*

Fauzan Mahfudin, F. Danang Wijaya, M. Isnaeni B.S.

Jurusan Teknik Elektro dan Teknologi Informasi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jln. Grafika No 2 Kampus UGM, Yogyakarta 55581, Indonesia
fauzanmahfudin@gmail.com

Abstract—Harmonics become one of the factors of power quality. Harmonics are very common in industry because of non-linear loads that become harmonic sources. In steel industry, especially hot strip mill, cycloconverter-fed motors are largely used. Cycloconverters are considered as main harmonic source in steel industry. Passive filters are commonly used to reduce harmonics. Passive filters are chosen because it is simple, reliable, relatively low cost, and also can be used as reactive power compensation.

In this paper passive filters are set to eliminate harmonic characteristics produced by cycloconverter. The calculation of filter also consider the amount of reactive power that would be given as compensation. The passive filters are simulated using Simulink Matlab. The results show that the filter successfully reduce THD current value from 25.68% to 5.27%, thus meets the IEEE 519 standards for harmonic distortion. In addition, the power factor increases as passive filters provide reactive power to the cycloconverter.

Intisari—Harmonik menjadi salah satu faktor dari kualitas daya (*power quality*). Fenomena harmonik sangat umum ditemui dalam industri karena terdapat banyak beban-beban non-linier yang merupakan sumber harmonik dalam jaringan. Pada industri baja khususnya pabrik *hot strip mill*, dalam prosesnya menggunakan beban listrik seperti motor listrik berdaya besar dengan penggerak berupa *cycloconverter*. Penggunaannya dapat menyebabkan timbulnya harmonik pada sistem, dan merupakan salah satu penyumbang harmonik terbesar pada industri baja. Cara mengurangi harmonik adalah dengan menggunakan filter pasif merupakan salah satu jenis filter yang paling umum digunakan. Filter pasif dipilih karena sederhana, handal, dan biayanya relatif rendah, serta dapat digunakan sebagai kompensasi daya reaktif.

Pada penelitian ini pasif filter yang digunakan diatur untuk mengeliminasi harmonik karakteristik yang dihasilkan oleh *cycloconverter*. Perhitungan parameter filter juga mempertimbangkan jumlah daya reaktif yang akan diberikan sebagai kompensasi daya. Pengujian dilakukan dengan simulasi Simulink Matlab. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter berhasil mengurangi nilai THD arus dari 25,68% menjadi 5,27%, sehingga memenuhi standar IEEE 519 untuk distorsi akibat harmonik. Selain itu juga faktor daya meningkat karena filter pasif memberikan daya reaktif bagi *cycloconverter*.

Kata Kunci— *Filter pasif, harmonik, cycloconverter, kompensasi daya reaktif, total harmonic distortion.*

I. PENDAHULUAN

Kualitas daya (*power quality*) suatu jaringan listrik saat ini menjadi salah satu perhatian utama pada dunia industri. Banyak faktor yang menjadi penentu kualitas

daya dari suatu jaringan listrik. Harmonik menjadi salah satu faktor penting kualitas daya jaringan listrik, terutama pada dunia industri yang terdapat banyak beban nonlinier yang digunakan untuk kebutuhan operasinya. Industri baja merupakan salah satu sektor yang paling sering terjadi fenomena harmonik pada sistem jaringan listriknya. *Hot strip mill* yang merupakan salah satu fasilitas dalam industri baja yang terpadu merupakan salah satu bagian penting dalam produksi baja. Dalam salah satu proses produksinya, *hot strip mill* menggunakan motor sinkron putaran rendah berdaya besar dengan penggerak berupa *cycloconverter* [8]. Namun operasi dari *cycloconverter* dapat menyebabkan munculnya harmonik pada jaringan, dan penggunaannya pada industri baja dinilai menjadi salah satu sumber harmonik yang cukup besar bagi jaringan [2].

Solusi dalam mengatasi harmonik tersebut adalah dengan filter pasif yang biasa digunakan untuk mengeliminasi harmonik. Dalam hal ini filter dirancang untuk mengeliminasi harmonik karakteristik yang dihasilkan oleh *cycloconverter*. Filter pasif dipilih karena konfigurasi yang cukup sederhana, handal dan secara ekonomi biaya yang dibutuhkan relatif rendah.

II. LANDASAN TEORI

A. Harmonik

Istilah harmonik dapat didefinisikan sebagai suatu komponen sinusoidal dari suatu gelombang periodis yang memiliki nilai frekuensi sama dengan kelipatan dari frekuensi fundamental dari sistem. Khusus pada kasus sistem tenaga listrik, komponen harmonik yang biasa dan paling sering muncul adalah komponen harmonik ganjil [4]. Munculnya harmonik pada jaringan listrik dapat menyebabkan distorsi pada bentuk gelombang baik arus maupun tegangan yang merupakan akumulasi dari beberapa komponen harmonik. Saat harmonik muncul persamaan gelombangnya dapat direpresentasikan sesuai dengan persamaan (1) dan (2)[1].

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (1)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (2)$$

Dengan $v(t)$ dan $i(t)$ adalah tegangan dan arus berturut-turut, h adalah komponen harmonik, ω_o adalah frekuensi angular, dan θ_h adalah sudut fase harmonik ke- h .

Ada beberapa indeks yang digunakan untuk menggambarkan seberapa besar pengaruh harmonik terhadap tegangan atau arus pada jaringan. Salah satunya adalah *Total Harmonic Distortion* (THD) yang didefinisikan sebagai perbandingan nilai arus atau tegangan harmonik terhadap fundamental. Rumusnya sesuai dengan persamaan (3). Dengan I_h adalah arus pada harmonik ke h dan I_1 adalah arus pada frekuensi fundamental.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3)$$

B. Cycloconverter

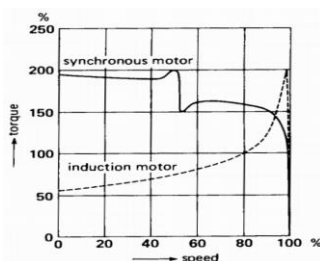
Cycloconverter merupakan rangkaian elektronika daya yang mengubah masukan AC menjadi keluaran AC dengan nilai frekuensi yang lebih rendah dari nilai frekuensi pada masukan [3]. *Cycloconverter* biasa digunakan sebagai kendali untuk motor sinkron dan induksi dengan kecepatan yang rendah dan daya yang besar. Operasi dari *cycloconverter* akan menyebabkan munculnya arus dan tegangan harmonik pada sistem. Bentuk gelombang arus yang ditarik oleh *cycloconverter* dari sumber sangat kompleks, karena sifatnya *lagging* terhadap tegangan sumber dan mengandung komponen-komponen harmonik [10]. Harmonik yang dihasilkan oleh *cycloconverter* dapat dirumuskan dalam persamaan (4)[10]. Suku pertama merupakan harmonik karakteristik dan suku kedua merupakan harmonik non-karakteristik.

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_0 \quad (4)$$

Dengan k dan n adalah bilangan bulat, q adalah banyak pulsa, dan f_o adalah frekuensi *output cycloconverter*.

C. Motor Sinkron

Mesin sinkron merupakan mesin listrik AC yang eksitasinya dicatu oleh sumber DC. Motor sinkron memiliki kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Bagian stator dari motor sinkron yang terhubung dengan sumber AC menghasilkan medan magnet yang berputar, sedangkan pada bagian rotor dicatu oleh sumber DC melalui dua *slip ring*. Motor sinkron memiliki karakteristik yaitu kecepatan putar rotornya sama dengan kecepatan medan putar sinkron atau tanpa slip.

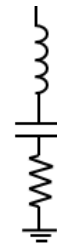


Gambar 1 Perbandingan kecepatan-torsi motor sinkron dan motor induksi

Pada pabrik *hot strip mill* biasanya menggunakan motor sinkron dalam proses untuk mengurangi ketebalan baja. Motor sinkron tersebut dioperasikan pada putaran rendah dengan daya yang besar. Pemilihan motor sinkron untuk operasi tersebut adalah karena pada putaran rendah, faktor dayanya masih bisa dibuat menjadi 1 dan efisiensinya relatif lebih tinggi dibanding dengan motor induksi [11]. Gambar 1 menunjukkan perbandingan kecepatan-torsi antara motor sinkron dengan motor induksi. Motor sinkron memiliki torsi yang lebih tinggi daripada motor induksi khususnya pada putaran rendah.

D. Filter Harmonik

Secara umum terdapat dua macam filter harmonik, yaitu filter pasif dan filter aktif. Perbedaan dari keduanya adalah filter pasif akan bekerja sebagai impedansi rendah untuk frekuensi tertentu, sedangkan filter aktif akan bekerja dengan menginjeksi arus untuk menghilangkan distorsi akibat harmonik pada sistem [2]. Namun dalam industri pada umumnya menggunakan konfigurasi filter pasif karena pertimbangan biaya yang dibutuhkan lebih rendah dibanding peralatan kompensasi harmonik lainnya [4], selain itu komponen kapasitor pada filter juga dapat digunakan untuk kompensasi daya reaktif bagi sistem.



Gambar 2 Filter pasif *single-tuned*

Filter pasif dengan konfigurasi *single-tuned* mungkin merupakan konfigurasi yang paling umum digunakan untuk aplikasi di industri. Disebut *single-tuned* karena filter pasif ini hanya akan berlaku menjadi impedansi dengan nilai yang rendah untuk satu frekuensi harmonik dan konfigurasinya ditunjukkan pada Gambar 2. Impedans dari filter dinyatakan dalam persamaan (5).

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5)$$

Dengan Z adalah impedans filter, R adalah resistans filter, L adalah induktans induktor dan C adalah kapasitans kapasitor.

Dalam merancang filter pasif juga perlu menentukan faktor kualitas Q . Faktor kualitas Q didefinisikan sebagai rasio dari frekuensi resonan terhadap lebar pita antara frekuensi tersebut pada kedua sisi frekuensi resonan dimana tanggapan dari resonan berbeda 3dB dari frekuensi tersebut. Dalam filter pengaruh faktor kualitas didefinisikan dalam persamaan (6).

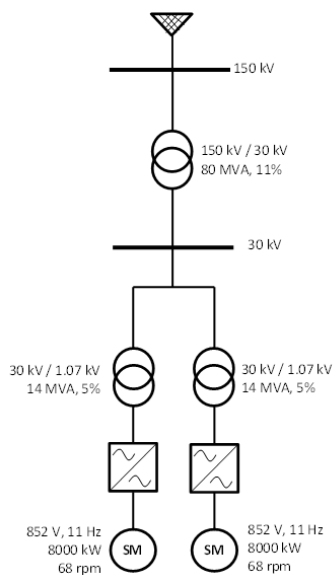
$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{X_{Ch}}{R} = \frac{X_{Lh}}{R} \quad (6)$$

Dengan X_{Ch} dan X_{Lh} adalah reaktans kapasitor dan induktor pada frekuensi harmonik h .

III. METODOLOGI

A. Batasan Objek Penelitian

Pada penelitian ini bahasan utamanya adalah harmonik yang dihasilkan oleh *cycloconverter* pada pabrik *hot strip mill* dan perancangan filter pasif sebagai kompensasi harmonik dan daya reaktifnya. Bahan dan data penelitian diambil dari pabrik *hot strip mill* PT Krakatau Steel, Cilegon, Banten. Lingkup objek penelitian secara rangkaian ditunjukkan pada Gambar 3. Dalam rangkaian terdapat dua *cycloconverter* 6-pulsa untuk merubah frekuensi dari 50 Hz menjadi 11 Hz, dan digunakan sebagai penggerak motor sinkron dengan daya 8 MW dengan frekuensi nominal 11 Hz dan putaran 68 rpm.



Gambar 3 Rangkaian *cycloconverter* pada pabrik *hot strip mill*

Dengan jumlah pulsa dari *cycloconverter* yang digunakan adalah 6, maka secara teoritis komponen harmonik dominan yang akan dihasilkan adalah harmonik ke-5, ke-7, ke-11, ke-13, dan seterusnya.

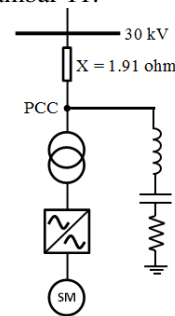
Filter pasif yang dirancang penempatannya pada rangkaian ditunjukkan pada Gambar 4. Filter dipasang paralel terhadap trafo, *cycloconverter* dan motor. Sehingga arus harmonik yang dihasilkan dapat langsung mengalir ke filter dan tidak merambat ke bus 30 kV dan mempengaruhi peralatan listrik lain yang terhubung pada bus tersebut.

Penelitian ini menggunakan *software* simulasi *blockset* dari SimPowerSystems berbasis Simulink Matlab. Komponen-komponen *blockset* yang digunakan dalam simulasi diantaranya.

- *AC voltage source*, yaitu berupa sumber tegangan 3 fase dengan nilai 30 kV fase-ke-fase.
- *Three-phase harmonic filter*, filter pasif 3 fase dengan jenis *single-tuned* untuk harmonik ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13.
- *Three-phase transformer*, trafo 3 fase *step down* 30/1.07 kV dengan kapasitas 14 MVA.

- *Six-pulse Cycloconverter*, konverter yang digunakan untuk menghasilkan tegangan AC dengan frekuensi 11 Hz dari masukan AC dengan frekuensi 50 Hz.
- Beban resistif-induktif RL pada sisi keluaran *cycloconverter* yang nilainya diatur dan disesuaikan sehingga komponen harmonik yang dihasilkan oleh *cycloconverter* dan daya yang diserap sama dengan data hasil pengukuran pada pabrik *hot strip mill*. Dengan asumsi *cycloconverter* bekerja pada kondisi *steady state* (tunak).

Dalam simulasi Simulink, blok rangkaiannya ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 4 Penempatan filter pada rangkaian

B. Perancangan Filter Harmonik

Dalam perancangan filter pasif langkah pertama yang dilakukan yaitu menentukan nilai kapasitor yang dibutuhkan untuk memperbaiki nilai faktor daya. Pada frekuensi fundamental filter bersifat kapasitif, sehingga filter dapat menghasilkan daya reaktif [9]. Perhitungan jumlah dayanya sesuai dengan persamaan (7).

$$Q_{cap} = P (\tan(\varphi_2) - \tan(\varphi_1)) \tag{7}$$

Dengan Q_{CAP} adalah jumlah daya reaktif yang dibutuhkan, P adalah daya aktif, serta φ_1 dan φ_2 adalah sudut daya awal dan sudut daya yang ingin dicapai.

Selanjutnya menghitung nilai reaktor X_{Lh} yang disesuaikan dengan nilai impedans kapasitor X_{Ch} yang diatur untuk harmonik h yang ingin dieliminasi sesuai dengan persamaan (8).

$$X_{Lh} = X_{Ch} \tag{8}$$

Lalu melakukan validasi kerja kapasitor terhadap batas rekomendasi IEEE 18 tentang pemasangan kapasitor *shunt* yang kriterianya ditunjukkan pada Tabel 1

TABEL 1 BATAS REKOMENDASI STANDAR IEEE 18 UNTUK KAPASITOR SHUNT

Tegangan RMS	110 %
Tegangan puncak <i>rated</i> , termasuk harmonik	120 %
Arus RMS	135 %
VAR	135 %

Kemudian melakukan perhitungan untuk mengetahui kondisi resonansi antara filter dengan impedans sistem. Persamaan (9) digunakan untuk menghitung pada harmonik ke berapa filter dan sistem mengalami resonansi. Dengan h_p adalah nilai kelipatan harmonik dimana filter dan sistem mengalami resonansi, MVA_{sc} adalah besar daya *short-circuit* pada PCC, $Mvar_C$ adalah besar daya reaktif yang dihasilkan filter, X_C adalah reaktansi filter, dan X_{sc} adalah reaktansi *short-circuit* pada PCC.

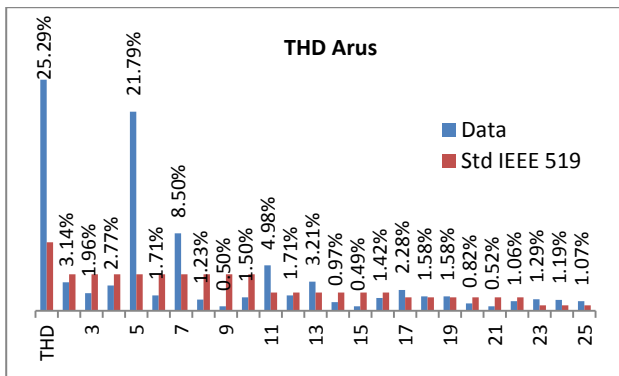
$$h_p = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{Mvar_C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_{sc}}} \quad (9)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

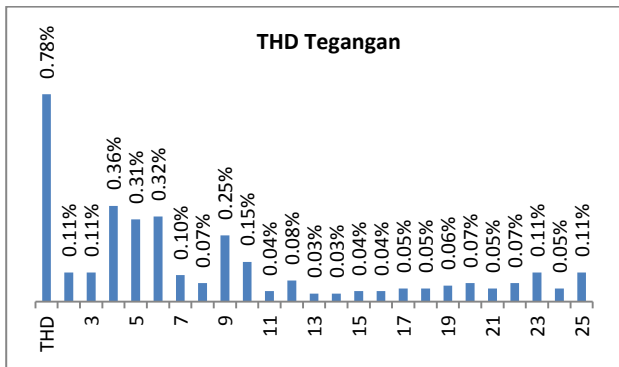
A. Harmonik Cycloconverter

Dari data hasil pengukuran untuk harmonik arus dan tegangan ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Nilai THD arus harmoniknya cukup tinggi, yaitu 25,29%. Harmonik karakteristik ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13 juga besar, sehingga nilai harmonik arusnya melebihi standar IEEE 519 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Sedangkan untuk harmonik tegangan jika dilihat nilai THD tegangan dan harmonik individualnya relatif kecil dan masih dibawah batas standar harmonik tegangan yang ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 5 THD arus pada masukan cycloconverter



Gambar 6 THD tegangan pada masukan cycloconverter

TABEL 2 STANDAR IEEE 519 UNTUK HARMONIK ARUS

I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4 %	2%	1.5%	0.6%	0.3%	7.5%

TABEL 3 STANDAR IEEE 519 UNTUK HARMONIK TEGANGAN

Tegangan Bus pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	Distorsi Tegangan Total (%)
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3	5

B. Perancangan Filter Pasif

Pada awal perancangan filter, perlu mempertimbangkan jumlah daya reaktif yang akan diberikan oleh filter dan nilainya bergantung pada daya reaktif yang diserap oleh cycloconverter. Jumlah daya yang terukur adalah sebesar 25,02 MVA dengan faktor daya sbesar 0,64. Sehingga daya reaktif yang diserap adalah sebesar 19,56 MVAR. Spesifikasi dari kapasitor yang akan digunakan untuk filter adalah 33 kV dengan kapasitas daya reaktif 4 MVAR. Kapasitor untuk semua filter dibuat sama dengan alasan pada aplikasinya akan lebih memudahkan dalam perawatan karena komponen yang digunakan sama. Ada 4 filter pasif yang dirancang untuk mengeliminasi harmonik ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13 dengan faktor kualitas untuk masing-masing filter sebesar 50, 50, 30, dan 20. Dari hasil perhitungan didapat nilai reaktansi dan daya reaktif yang dihasilkan oleh masing-masing filter yang ditunjukkan pada Tabel 4.

TABEL 4 REAKTANSI DAN DAYA REAKTIF YANG DIHASILKAN FILTER

Filter	5	7	11	13
X_{C1}	272,250 Ω	272,250 Ω	272,250 Ω	272,250 Ω
X_{L1}	10,890 Ω	5,556 Ω	2,250 Ω	1,611 Ω
VAR	4.194.324	3.919.326	3.754.544	3.723.150

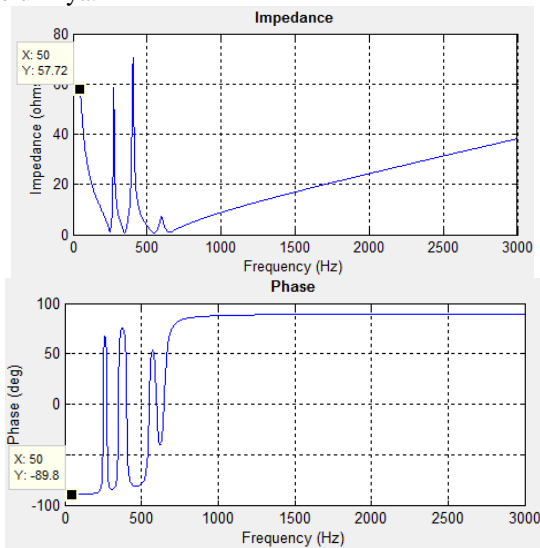
Setelah terhitung parameter dari filter kemudian dilakukan perhitungan untuk menguji kondisi resonansi antara filter dengan impedans sistem. Dengan nilai MVA_{sc} sebesar 261,06 dan total daya reaktif yang dihasilkan filter sebesar 15,59 MVAR sehingga dapat diketahui bahwa frekuensi resonansinya pada kelipatan 4,09. Nilainya tidak sama dengan nilai kelipatan dari filter yang dirancang sehingga filter masih aman dan dapat digunakan untuk mengeliminasi harmonik.

C. Pengujian Filter Pasif

Pengujian yang dilakukan menggunakan blockset SimpowerSystem berbasis Simulink Matlab. Aspek-aspek pengujian yang dilihat diantaranya tanggapan frekuensi impedans, harmonik arus dan kompensasi daya reaktif.

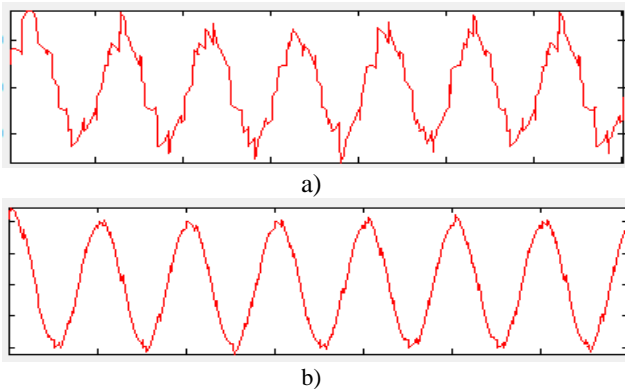
Untuk tanggapan frekuensi impedans hasil simulasinya ditunjukkan pada Gambar 7. Dapat dilihat bahwa nilai impedans filter hampir mendekati nol ohm pada frekuensi 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz, dan 650 Hz. Artinya filter berfungsi sebagai impedans rendah untuk frekuensi harmonik pada frekuensi penalaan. Dan jika dilihat lebih detail, pada frekuensi 50 Hz nilai impedansnya adalah 57,72 ohm dan fasenya bernilai $-89,8^\circ$. Artinya filter bersifat kapasitif pada frekuensi tersebut dan menghasilkan daya reaktif sebesar kuadrat dari tegangan dibagi nilai impedans filter pada 50 Hz, yaitu 15,59 MVAR. Sehingga nilainya sesuai dengan total daya

reaktif yang dihasilkan filter dari hasil perhitungan sebelumnya.



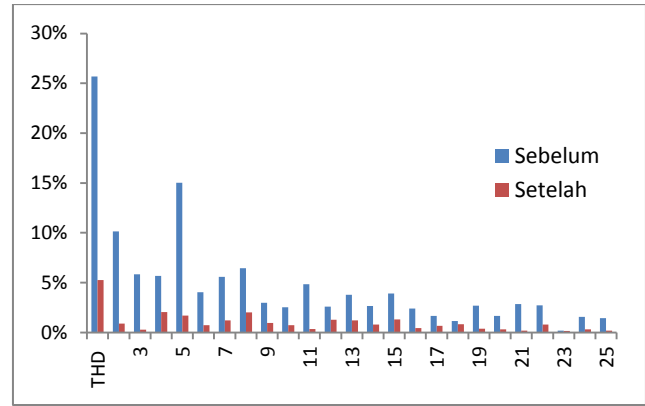
Gambar 7 Tanggapan frekuensi impedans dan fase filter

Kemudian pengujian dilihat dari aspek harmonik arus dari *cycloconverter*. Hasil simulasi bentuk gelombang sebelum dan setelah dipasang filter pasif ditunjukkan pada Gambar 8. Dari gambar dapat dilihat bahwa saat sebelum dipasang filter bentuk gelombangnya terlihat terdistorsi akibat harmonik, sehingga tidak sinusoidal murni lagi. Sedangkan saat setelah dipasang filter bentuk gelombangnya menjadi lebih mendekati sinusoidal dan efek distorsinya terlihat lebih kecil.

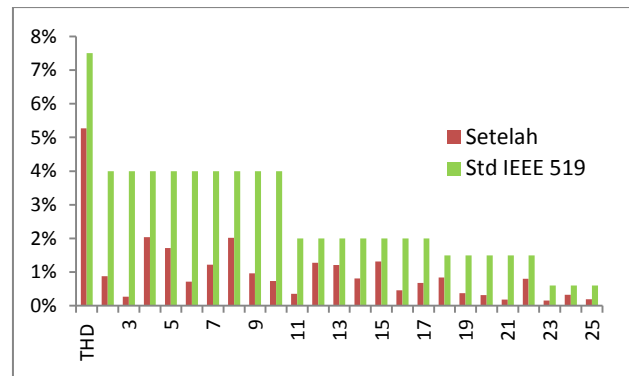


Gambar 8 Bentuk gelombang a) sebelum, dan b) sesudah dipasang filter

Untuk lebih detailnya, komponen-komponen harmonik pada kedua gelombang ditunjukkan pada Gambar 9 dan perbandingan dengan standar IEEE 519 ditunjukkan pada Gambar 10. Gambar tersebut menunjukkan bahwa persentase harmonik terhadap frekuensi fundamental saat sebelum dipasang filter nilainya lebih besar dibanding saat setelah dipasang filter. THD arus sebelum dipasang filter sebesar 25,68% dan setelah dipasang filter sebesar 5,27%. Selain itu komponen harmonik karakteristiknya juga lebih rendah saat setelah dipasang filter dan nilainya berada di bawah nilai rekomendasi standar. Dengan ini filter pasif hasil perhitungan bekerja mengeliminasi harmonik.



Gambar 9 Grafik THD arus saat sebelum dan setelah dipasang filter



Gambar 10 Grafik THD arus setelah dipasang filter dengan standar IEEE 519

TABEL 5 PROFIL DAYA SEBELUM DAN SETELAH DIPASANG FILTER

	Sebelum	Setelah
P (MW)	16,339	14,183
Q (MVAR)	19,364	5,263
S (MVA)	25,332	15,120
Cos φ	0,645	0,938

Selanjutnya pengujian dilihat dari aspek kompensasi daya reaktif. Profil daya hasil simulasi saat sebelum dan setelah dipasang filter ditunjukkan pada Tabel 5. Tabel tersebut menunjukkan bahwa nilai faktor daya menjadi lebih baik saat dipasang filter. Saat sebelum dipasang filter *feeder* mengalirkan daya sejumlah 25,332 MVA dengan daya reaktif sebesar 19,364 MVAR sehingga faktor dayanya sebesar 0,645. Kemudian saat setelah dipasang filter *feeder* hanya mengalirkan daya 15 MVA dengan daya reaktif sebesar 5,263 MVAR. Nilai daya reaktif yang mengalir lebih kecil, hal tersebut dikarenakan daya reaktif yang diserap *cycloconverter* juga diambil dari filter pasif. Sehingga *feeder* hanya perlu mengirim sedikit daya reaktif dan faktor dayanya naik menjadi 0,938.

V. KESIMPULAN

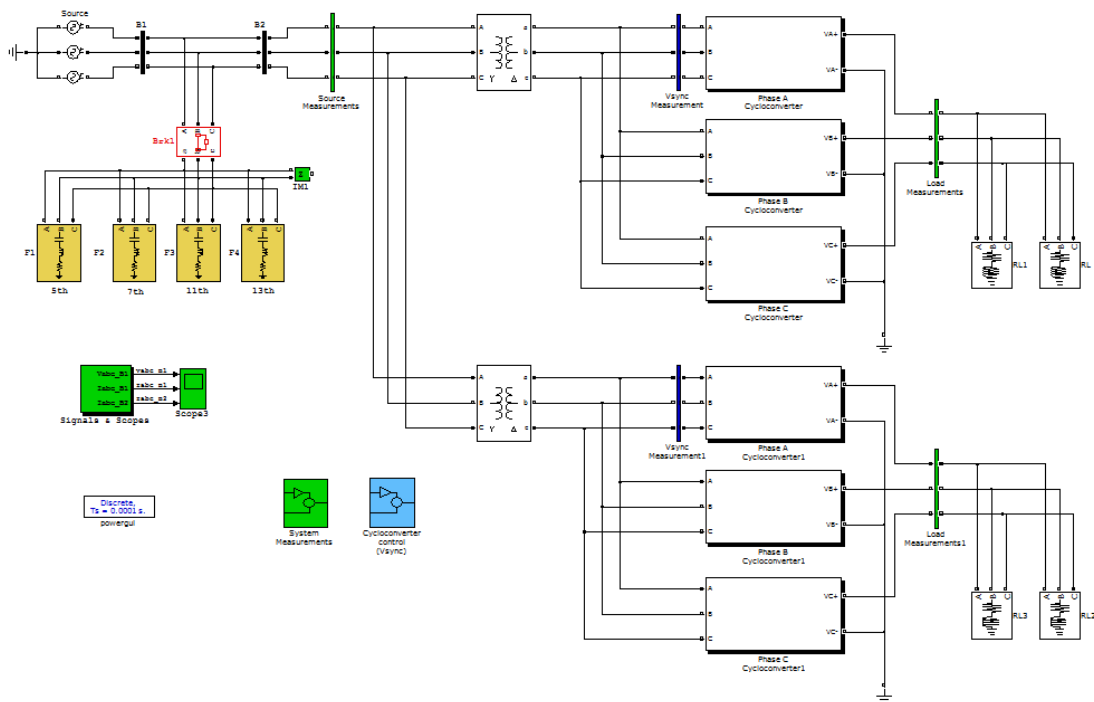
Dari penelitian yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa harmonik karakteristik dominan yang dihasilkan oleh *cycloconverter* 6-pulsa pada pabrik *hot strip mill* adalah harmonik ke-5, ke-7, ke-11, dan ke-13. Maka

filter pasif yang dirancang diatur untuk mengeliminasi harmonik-harmonik tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa filter bekerja mengurangi harmonik dari nilai THD arus sebesar 25,68% menjadi 5,27%. Selain itu faktor dayanya juga meningkat dari 0.645 menjadi 0.938 karena filter pasif tersebut juga mengirimkan daya reaktif ke *cycloconverter*.

REFERENSI

[1] Arrilaga, J., Bradley, D. A., Bodger, P.S. 2003. *Power System Harmonics, Second Edition*. England: John Wiley & Sons, Ltd.
 [2] De La Rosa, F. 2006. *Harmonics and Power Systems*. USA: Taylor & Francis.
 [3] Dorf, Richard C., 2000. *The Electrical Engineering Handbook*. Boca Raton: CRC Press.

[4] Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S., Beaty, H. W., 1996. *Electrical Power Systems Quality, Second Edition*. USA: McGraw-Hill.
 [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Standard 141-1993.
 [6] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Standard 519-2014.
 [7] IEEE Standard for Shunt Power Capacitor, IEEE Standard 18-2012.
 [8] Chattopadhyay, A. K., 1997. *Cycloconverter and cycloconverter-fed drives : A Review*.
 [9] Mishra, Mugda. Gandhi, K. Agarwal, A. *Design of Passive Filter for Six-Pulse Converter*. MIT International Journal of Electrical Engineering and Instrumentation Engineering Vol 3 No 1. MIT Publications. 2013.
 [10] Pelly, B. R., 1971. *Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters*. New York: John Wiley.
 [11] Wildi, Theodore, 2002. *Electrical Machines, Drives, and Power Systems Fifth Edition*, New Jersey: Prentice Hall.



Gambar 11 Rangkaian filter dan *cycloconverter* dalam simulasi Simulink