

## Analisa Harmonisa Pada Unit *Crane Rtg (Rubber Tyred Gantry)* Di PT. Nilam Port Terminal Indonesia

Choirul Anam<sup>1</sup>, Nasyith Hananur Rohiem,<sup>2, 3</sup> Riny Sulistyowati,<sup>4</sup> Wildan Agung Pambudi

<sup>1,2,3,4</sup> Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Surabaya 60117

<sup>3</sup>[riny.971073@itats.ac.id](mailto:riny.971073@itats.ac.id)

**Abstract** – *RTG (Rubber Tyred Gantry) Crane* tends to have harmonic distortions. It is caused by the VSD switching process that converts current from DC to AC, decreasing the power quality and affecting power generation. Disturbance tends to happen on voltage or a current sine wave of the system that contains multiplied frequency from fundamental frequency. It is required to analyze based on the IEEE standard of Std 519-2014 which described that the 20kV bus voltage has a limit value of 3% for VIHD and 5% for VTHD. By using available software, simulation is applied to the *RTG Crane* electrical system. Harmonic distortion will be discussed by gathering simulation result data in the form of the harmonic spectrum and harmonic wave. harmonic filter to be applied is an Active Filter and Passive Filter that then compared the compatibility to solve the harmonic distortion. The analysis is also applied to Power Factor (PF) value changes before and after filter installation.

**Keywords** — *RTG (Rubber Tyred Gantry) Crane, Variable Speed Drive (VSD), Harmonic Distortions, Harmonic Filter, Simulation Software*

**Abstrak**— *RTG (Rubber Tyred Gantry) Crane* cenderung memiliki distorsi harmonisa. Ini disebabkan karena proses switching dari VSD, yaitu merubah bentuk arus dari DC menjadi AC sehingga menurunkan kualitas daya dan berpengaruh terhadap sistem pembangkitan tenaga listrik. Gangguan terjadi pada gelombang sinusoidal tegangan arus sistem yang memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental. Maka diperlukan Analisa berdasarkan standar IEEE Std 519-2014 yakni untuk tegangan Bus 20kV memiliki nilai batasan 3% untuk VIHD dan 5% untuk VTHD. Dengan menggunakan software yang tersedia, dilakukan simulasi terhadap sistem kelistrikan *RTG Crane*. Distorsi harmonisa akan dibahas dengan mengumpulkan data hasil simulasi berupa spectrum harmonisa dan gelombang harmonisa. Filter harmonisa yang digunakan adalah filter pasif dan aktif yang kemudian dibandingkan kecokokannya untuk mengatasi gangguan harmonisa. Analisa juga dilakukan terhadap perubahan nilai PF (Power Factor) sebelum dipasang dan sesudah dipasang filter.

**Kata Kunci** — *RTG (Rubber Tyred Gantry) Crane, Variable Speed Drive (VSD), Distorsi Harmonisa, Filter Harmonisa, Software Simulasi*

### I. PENDAHULUAN

*Crane* merupakan alat berat yang untuk mengangkat beban berat dimana dalam pengoperasiannya menggunakan motor listrik. Motor listrik jenis motor AC atau motor DC, dioperasikan menggunakan power electronic equipment yaitu Variable Speed Drive (VSD). VSD tersebut dapat mengubah frekuensi dan tegangan output untuk mengatur kecepatan Gerakan motor listrik yang terhubung dengan crane. Namun demikian, pengoperasian crane menggunakan VSD menimbulkan permasalahan harmonisa[1]. Harmonisa muncul akibat dari aktivitas komponen switching dari VSD. Aktivitas switching tersebut kemudian menghasilkan frekuensi kelipatan 50 Hz atau kelipatan dari frekuensi fundamental yang masuk ke dalam grid PLN[2-3]. Kondisi ini tentu sangat merugikan karena menyebabkan permasalahan teknis seperti kabel cepat panas karena impedansi kabel yang semakin tinggi, turunnya efisiensi peralatan karena losses pada peralatan yang sangat besar, mengurangi life time peralatan listrik, kesalahan pembacaan alat ukur akibat harmonisa yang ikut terukur ke dalam alat ukur sehingga bukan nilai tegangan atau arus fundamental saja namun termasuk tegangan dan arus gangguan harmonisa serta bahkan kebakaran akibat panas berlebih.

Permasalahan yang muncul karena pengoperasian crane tidak hanya harmonisa saja. Permasalahan lain yang muncul yaitu rendahnya Power Factor. Motor induktif atau motor AC merupakan salah satu beban induktif. Motor induktif dalam keadaan standby namun tidak dibebani, maka daya reaktif saja yang dikonsumsi sedangkan konsumsi daya aktif sangat kecil. Dari perbandingan antara daya aktif dan daya reaktif tersebut, dapat diketahui bahwa nilai Power Factor sangat rendah. Nilai Power Factor yang rendah sangat merugikan bagi penyedia jasa listrik daya disediakan dalam bentuk Daya Semu (S) sedangkan pelanggan hanya membayar Daya Aktif (P) sehingga pelanggan hanya perlu membayar sedikit sesuai dengan Daya Aktif yang digunakan. Hal ini tidak sesuai Daya Semu yang telah disalurkan oleh penyedia jasa listrik dalam jumlah besar. Bagi pelanggan, kerugian disebabkan oleh denda atau penalti yang diberikan penyedia jasa listrik.

Salah satu solusi dari kedua permasalahan tersebut adalah dengan cara menghubungkan Filter Harmonisa atau Filter Pasif. Filter Harmonisa bekerja dengan cara

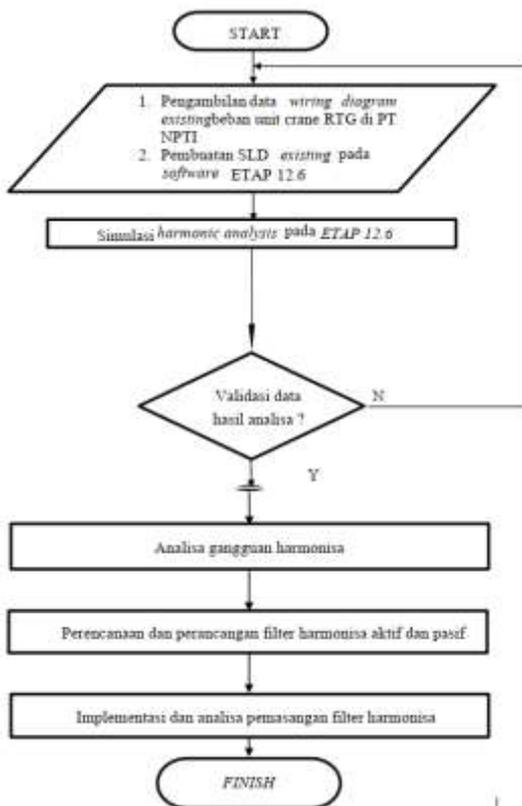
mengeliminasi harmonisa sekaligus mengkompensasi daya reaktif. Kompensasi daya reaktif dilakukan dengan cara memberikan arus listrik yang bersifat kapasitif, sehingga dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif grid yang bersifat induktif. Dengan menggunakan filter harmonisa maka sistem grid akan menerima gangguan harmonisa lebih kecil dan memiliki Power Factor yang baik sehingga dapat meminimalisir kerugian yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut[4-6].

Pada penelitian, akan dianalisa seperti apa gangguan harmonisa pada sebuah Crane RTG yang beroperasi pada sebuah Pelabuhan. Crane RTG ini bekerja selama non-stop 24 jam sehingga tentu akan berpengaruh pada penggunaan daya listrik dan juga peralatan pada crane tersebut. Analisa harmonisa tersebut akan dilakukan menggunakan Software yang tersedia yaitu ETAP.

**II. METODE PENELITIAN**

**Sistematika Penelitian**

Penelitian dilakukan dengan mengikuti sistem kerja seperti ditunjukkan pada *Flowchart* Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Sistematika Penelitian

Berdasarkan flowchart sistem diatas dapat dilihat bahwa Langkah atau tahap pertama yang dilakukan pada penelitian ini adalah perancangan single line diagram

existing yang dapat diperoleh dari pengambilan data wiring diagram Crane RTG. Kemudian data tersebut didesain ulang dan dibuatkan single line diagram baru pada software.

Tahap ketiga sistem diatas adalah validasi data hasil simulasi yang dibandingkan dengan data gangguan harmonisa secara real time di lapangan. Data real time tersebut diperoleh dari pengambilan data menggunakan alat harmonic analyzer. Parameter-parameter disesuaikan Kembali luntuk melihat nilai error agar tidak terlalu besar. Jika nilai parameter sudah sesuai maka dapat dilanjutkan ke dalam tahap berikutnya.

Konverter SEPIC (*Single Ended Primary Induktor Converter*) adalah salah satu topologi rangkaian konverter DC-DC yang dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih kecil maupun yang lebih besar dari pada sumber tegangan, konverter topologi ini memungkinkan untuk menghasilkan tegangan keluaran yang berpolaritas sama dengan sumber tegangan masukan. Topologi SEPIC konverter pada dasarnya merupakan topologi *boost converter* yang ditambahkan rangkaian filter berupa induktor dan kapasitor[7-9].

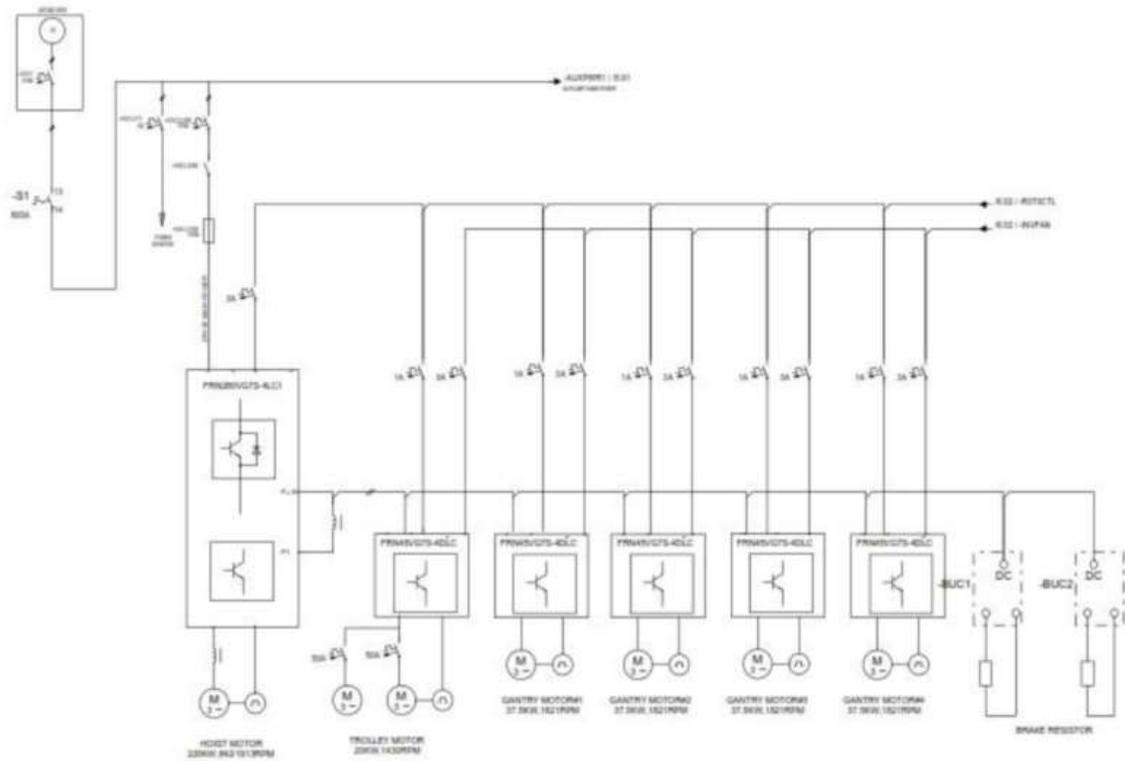
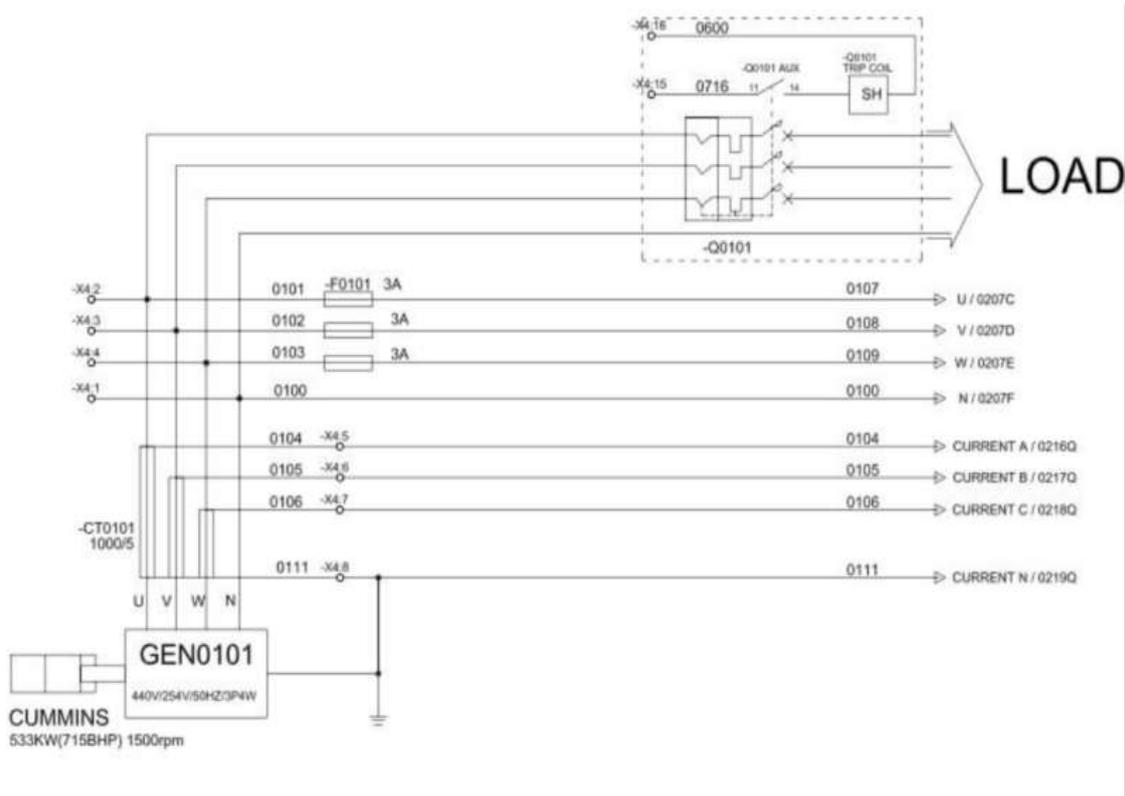
Pada tahap ini akan dilakukan Analisa gangguan harmonisa untuk perencanaan dan perancangan filter harmonisa sebagai salah satu Langkah mengatasi ngangguan harmonisa pada sistem unit Crane RTG. Simulasi harmonic analyzer 1 unit Crane RTG menggunakan software ETAP sebagai validator[10].

Tahap terakhir adalah simulasi ETAP setelah terpasang filter pasif pada sistem dan akan diambil data untuk mengetahui efek dan dampak dari pemasangan filter tersebut terhadap gangguan harmonisa untuk kemudian dianalisa kembali. Data-data yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- Data Single Line Diagram sistem kelistrikan
- Data jumlah dan kapasitas beban nonlinear yang terpasang
- Data Trafo daya yang digunakan
- Data pengukuran THD arus pada panel dengan menggunakan simulasi pada ETAP

**Pengambilan Data Existing SLD**

Pada Gambar 2 berikut dapat terlihat intalasi utama pada unit Crane RTG. SLD existing akan dijadikan acuan untuk perencanaan simulasi. Dalam diagram tersebut berisi data beban dan nilai daya pada 1 unit Crane yang kemudian data-data tersebut akan dijadikan sebagai acuan dalam pengambilan data pada simulasi gangguan harmonisa menggunakan software ETAP. Gelombang harmonisa yang muncul pada simulasi ETAP akan dibandingkan dengan data existing.



Gambar 2. Single Line Diagram Unit RTG Crane

**Simulasi ETAP**

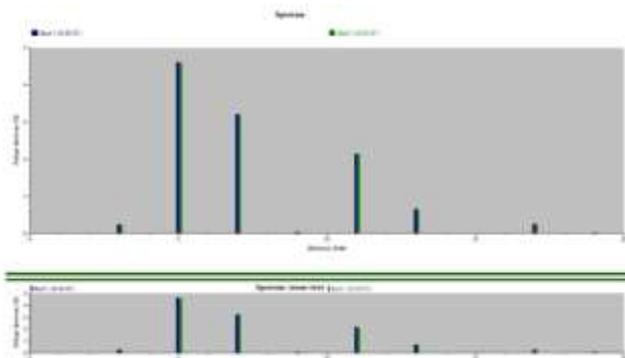
Simulasi pada ETAP akan menunjukkan nilai harmonisa paling besar muncul pada orde ke-n. Nilai hasil harmonisa akan dianalisa sesuai ambang batas ketentuan berdasarkan IEEE Std 519-2014 yaitu untuk

tegangan bus 20kV 3% untuk VIHD dan 5% untuk VTHD, ditunjukkan pada Tabel 1. Bentuk gelombang hasil simulasi sudah menunjukkan bahwa gelombang tersebut tidak sinusoidal murni akibat adanya harmonisa. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan Spektrum dan

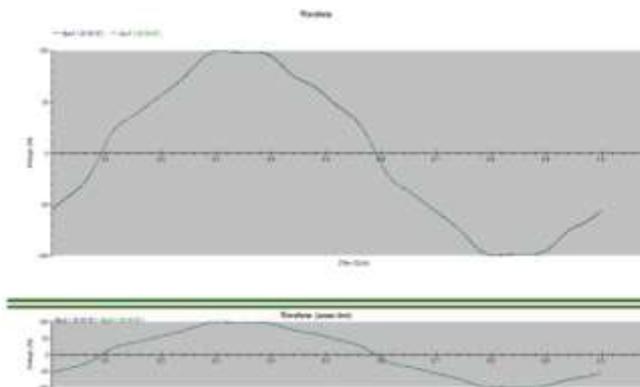
Gelombang harmonisa yang muncul setelah dilakukan simulasi.

**Tabel 1.** Batasan Harmonisa untuk Tegangan

Bus Voltage V pada PCC	Harmonisa Individual %	Total Harmonic Distortion (THD)%
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5



**Gambar 3.** Spektrum Harmonisa pada ETAP



**Gambar 4.** Gelombang Harmonisa pada ETAP

**Proses Analisa Harmonisa**

Setelah mendapatkan hasil dari simulasi data dan dengan membandingkan standar IEEE, dapat diaplikasikan dengan ETAP serta perhitungan secara manual dengan rumus dasar berikut

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{maks}} M_h^2}}{M_1} \tag{1}$$

Dimana M adalah nilai RMS komponen harmonisa h dari kuantitas M. kuantitas M dapat berupa besaran tegangan V maupun besaran arus I, sehinga THDi nilai distorsi harmonisa arus menjadi:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{maks}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \tag{2}$$

Dengan THD adalah persentasi Distorsi Harmonisa Total.

$I_1$  = Arus frekuensi dasar (A)

$I_h$  = arus harmonisa ke-h (A)

Sedangkan untuk nilai Distorsi Harmonisa Tegangan total (THDv) adalah:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{maks}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \tag{3}$$

$V_1$  =Tegangan frekuensi dasar (A)

$V_h$  =Tegangan harmonisa ke-h (A)

Untuk THD memiliki standar yang sudah ditentukan dalam IEEE standard 519/1992 Rev. 2014

**Perencanaan dan Perancangan Filter Harmonisa**

Perancangan nilai filter harmonisa dibuat berdasarkan hasil simulasi pada ETAP. Di bawah ini menunjukkan perhitungan nilai C yang merupakan komponen utama filter. Pada simulasi ETAP akan diperoleh terlebih dahulu nilai PF (Power Factor). Filter yang akan direncanakan dan akan dibandingkan hasilnya adalah filter harmonisa aktif dan filter pasif, dimana komponen utama dari filter pasif tersebut adalah RLC yang terpasang seri dengan bus beban sedangkan untuk filter aktif terpasang parallel dengan bus beban. Pengujian kemudian dilakukan untuk menentukan filter jenis apa yang paling cocok digunakan dalam mengatasi harmonisa pada Crane RTG.

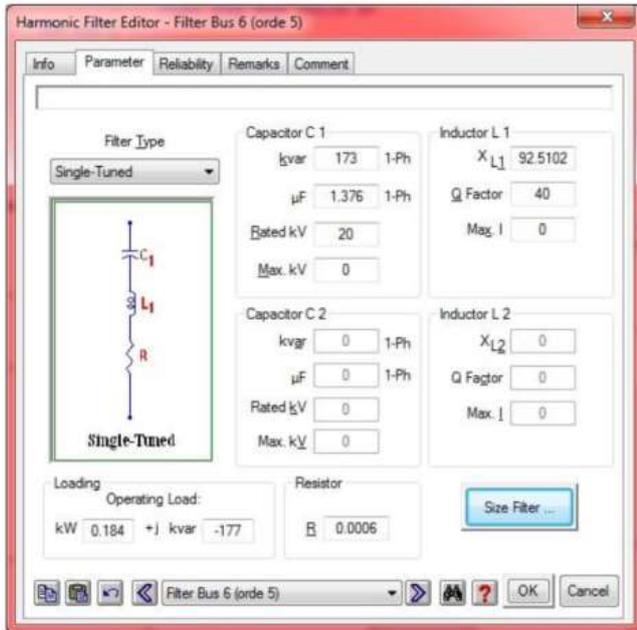
• **Perhitungan Nilai C**

$$\begin{aligned} \phi_{awal} &= \cos^{-1}(x), & \phi_{harapan} &= \cos^{-1}(y) \\ Q_c &= P (\tan \phi_{awal} - \tan \phi_{harapan}) \text{ VAR} \\ X_c &= \frac{V^2}{Q_c} \Omega, & C &= \frac{1}{2\pi f X_c} \mu F \end{aligned}$$

• **Perhitungan Nilai R dan L**

$$X_l = \frac{X_c}{n} \Omega, \quad L = \frac{X_l}{2\pi f} H, \quad R = \frac{X_l}{Q_c} \Omega$$

Setelah diperoleh perhitungan nilai RLC, kemudian dimasukkan ke dalam parameter filter pada ETAP seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Parameter Filter Harmonisa pada ETAP

**Implementasi dan Analisa Pemasangan Filter Harmonisa**

Pada bagian ini, penulis akan melakukan kembali tahapan simulasi harmonisa pada ETAP 12.6 dengan menambahkan filter harmonisa. Setelah dilakukan perhitungan dari 2 jenis filter yaitu filter aktif dan filter passif, selanjutnya akan dibandingkan hasil perhitungan diantara keduanya yang lebih baik dalam mengatasi gangguan harmonisa. Kemudian melihat perubahan spectrum dan gelombang harmonisa setelah implementasi pemasangan filter tersebut.

**Data Beban Crane RTG**

Pada Tabel 2 berikut menunjukkan data beban motor yang ada pada sebuah Crane RTG. Terdapat total 20 beban motor pada satu unit Crane dengan 4 motor diantaranya adalah motor 1 fase. Beban-beban ini dibagi menjadi 4 bus sesuai dengan pembagian bus pada wiring diagram Crane. Kapasitas Motor dapat dilihat pada table berikut ini.

Tabel 2. Data Beban

ETAP Motor	Beban Crane	Kapasitas	Bus
Motor 1	Hoist Motor	3PH 220 kW	1
Motor 2	Trolley Motor	3PH 20 kW	1
Motor 3	Gantry Motor 1	3PH 37,5 kW	1
Motor 4	Gantry Motor 2	3PH 37,5 kW	1
Motor 5	Gantry Motor 3	3PH 37,5 kW	1
Motor 6	Gantry Motor 4	3PH 37,5 kW	1
Motor 7	Farside Wheel Turning Pump	3PH 22 kW	2
Motor 8	Nearside Wheel Turning Pump	3PH 22 kW	2
Motor 9	Farside Gantry Brake 1	1PH 0,16 kW	3
Motor 10	Farside Gantry Brake 2	1PH 0,16 kW	3
Motor 11	Nearside Gantry Brake 1	1PH 0,16 kW	3
Motor 12	Nearside Gantry Brake 2	1PH 0,16 kW	3
Motor 13	Spreader Hyd. Pump For Headblock	3PH 5,5 kW	4
Motor 14	Spreader Hyd. Pump	3PH 7,5 kW	4
Motor 15	Trolley Brake 1	3PH 0,16 kW	4
Motor 16	Trolley Brake 2	3PH 0,16 kW	4
Motor 17	Hoist Blower	3PH 3 kW	4
Motor 18	Hoist Emergency Brake	3PH 4 kW	4
Motor 19	Hoist Brake 1	3PH 0,45 kW	4
Motor 20	Hoist Brake 2	3PH 0,45 kW	4

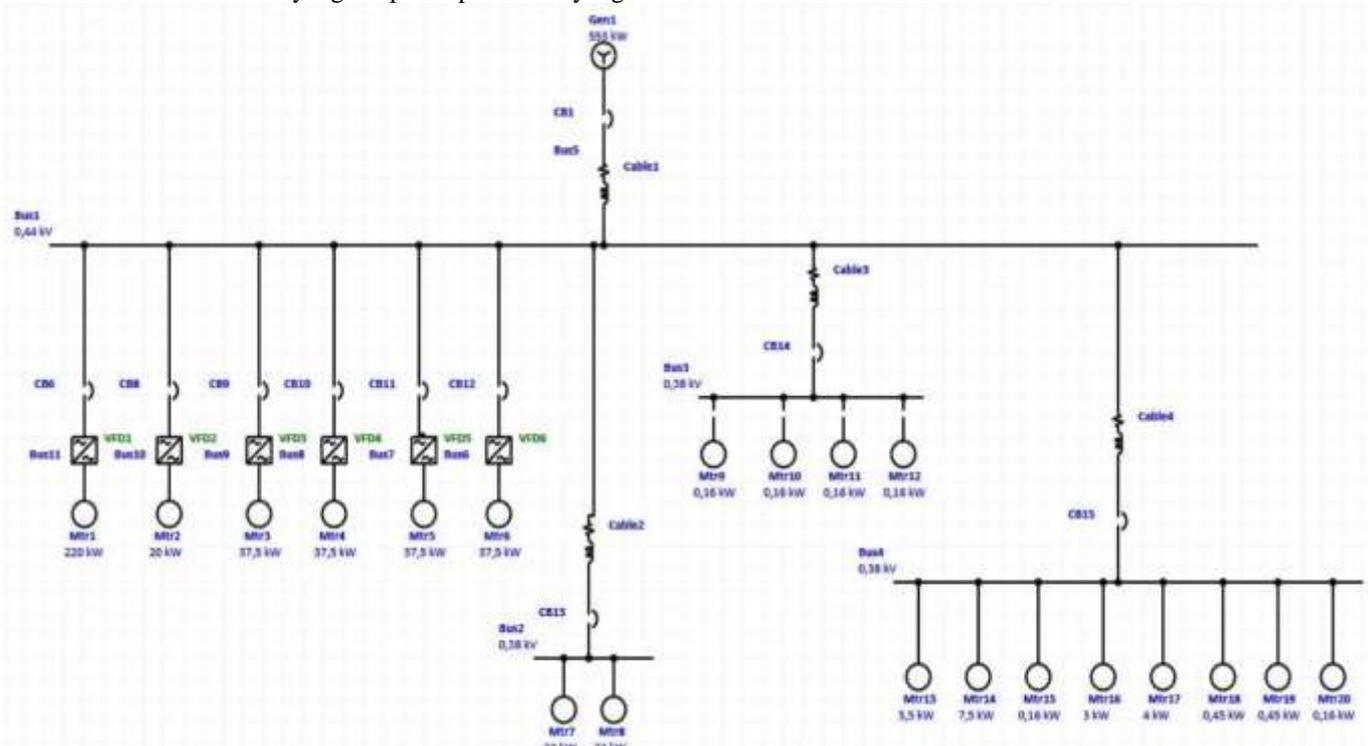
**III. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Analisa dan Simulasi pada ETAP**

Pada penelitian ini daya yang telah disebutkan akan dilihat perubahannya sebelum dan setelah terpasangnya

filter harmonisa, terutama terfokus pada Daya Reaktif (Q). Filter pasif atau Filter Harmonisa dapat membangkitkan daya reaktif karena adanya komponen kapasitor pada filter tersebut, sehingga akan mengurangi penyerapan daya reaktif pada sumber untuk mengurangi denda karena penyerapan daya reaktif yang tinggi dimana PLN memiliki standard yang terpaku pada PF yang

rendah. Gambar 6 berikut ini merupakan Single Line Diagram berdasarkan wiring diagram Crand RTG yang telah dikonversi ke dalam software ETAP. Dari gambar berikut, dapat dilihat bahwa pada Bus 1 terdapat motor 1 hingga motor 6 dengan masing-masing motor dikendalikan oleh 1 inverter.



Gambar 6. Diagram Crand RTG

Tabel 3 di bawah ini menampilkan hasil simulasi aliran daya Crane RTG. Berdasarkan data pada table tersebut, Ketika sistem masinh dalam kondisi normal atau kondisi Crane RTG berjalan sesuai dengan keadaan di lapangan, terlihat bahwa nilai PF pada tiap bus tidak mengalami perubahan yang signifikan. Beban total semua ditanggung oleh satu sumber yaitu generator set (Genset). Namun perbedaan nilai paling signifikan adalah pada Daya Reaktif (Q). dibandingkan pada data masing-masing bus, pada Bus 1 sampai dengan bus 4 Daya Reaktif (Q) terjadi penyerapan. Nilai PF 77,4%, dan arus 1,6 A pada Bus 3 adalah dengan PF terendah pada sistem.

perbaikan harmonisa pada Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4. Perbaikan harmonisa tersebut menggunakan Filter Pasif (Single Tuned) yang akan dipasang pada masing-masing bus tersebut.

Single Line Diagram di Crane RTG menggunakan tipe jaringan radial dan terdiri dari total 4 bus untuk distribusi yaitu 1 bus dari generator set untuk membagi ke masing-masing 3 bus beban. Jaringan distribusi pada Crane ini menggunakan tipe jaringan radial, dimana dari sumber langsung dialirkan lurus terhadap beban, sama dengan jaringan distribusi pada penyulang lain secara umum. Penggunaan sistem radial sendiri merupakan pilihan dari beberapa sistem jaringan yang ada. Pemilihan dari radial sendiri dikarenakan sistem dari radial memiliki biaya investasi yang murah serta perawatan yang lebih mudah. Jumlah dari bus untuk sistem Crane RTG sendiri adalah sebanyak 4 bus utama dengan bus utama yang menerima penyaluran langsung dari power generator set. Penelitian ini akan menganalisa dan mensimulasikan

**Tabel 3.** Hasil Simulasi Aliran Daya Crane RTG

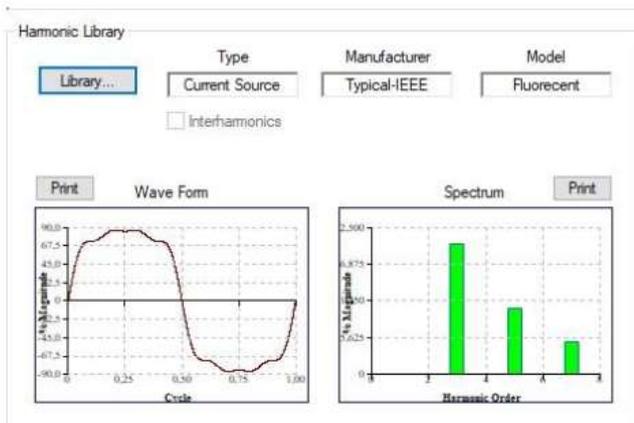
Bus	P (MW)	Q (MVAR)	I (Ampere)	% PF
Bus 1	-0,056	-0,028	90,4	89,1
Bus 2	-0,001	-0,001	1,6	77,4
Bus 3	-0,030	-0,018	49,5	85,1
Bus 4	0,934	0,079	1229,6	99,6
Bus 5	0,057	0,029	90,4	89,4
Bus 6	0,001	0,001	1,6	77,4
Bus 7	0,030	0,018	49,5	85,3
Bus 8	0,409	0,000	579,6	100,0
Bus 9	0,044	0,000	62,8	100,0
Bus 10	0,081	0,000	115,3	100,0
Bus 11	0,081	0,000	115,3	100,0
Bus 12	0,081	0,000	115,3	100,0
Bus 13	0,081	0,000	115,3	100,0
Bus 14	-0,866	-0,047	1229,6	99,9
Bus 15	0,409	0,102	640,3	97,0
Bus 16	0,044	0,013	70,2	95,8
Bus 17	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 18	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 19	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 20	0,081	0,022	128,1	96,5



**Gambar 8.** Batas Harmonisa pada Bus Crane RTG

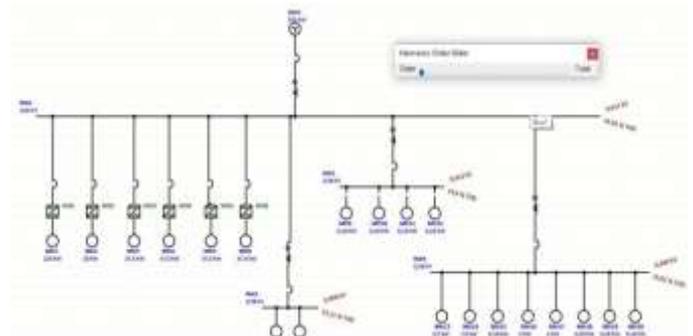
Gambar 8 diatas menunjukkan batas harmonisa yang diperbolehkan dalam sebuah sistem jaringan listrik yaitu VTHD 5% dan VIHD 8% untuk tegangan sistem di bawah 1 kV. Data ini mengacu pada IEEE 519-1992 Standard.

Setelah diatur batas harmonisa, sumber harmonisa dan mengisi data parameter beban Crane RTG pada ETAP, maka bisa dilakukan simulasi harmonisa. Tampilan simulasi dapat dilihat pada Gambar 9 dibawah ini.



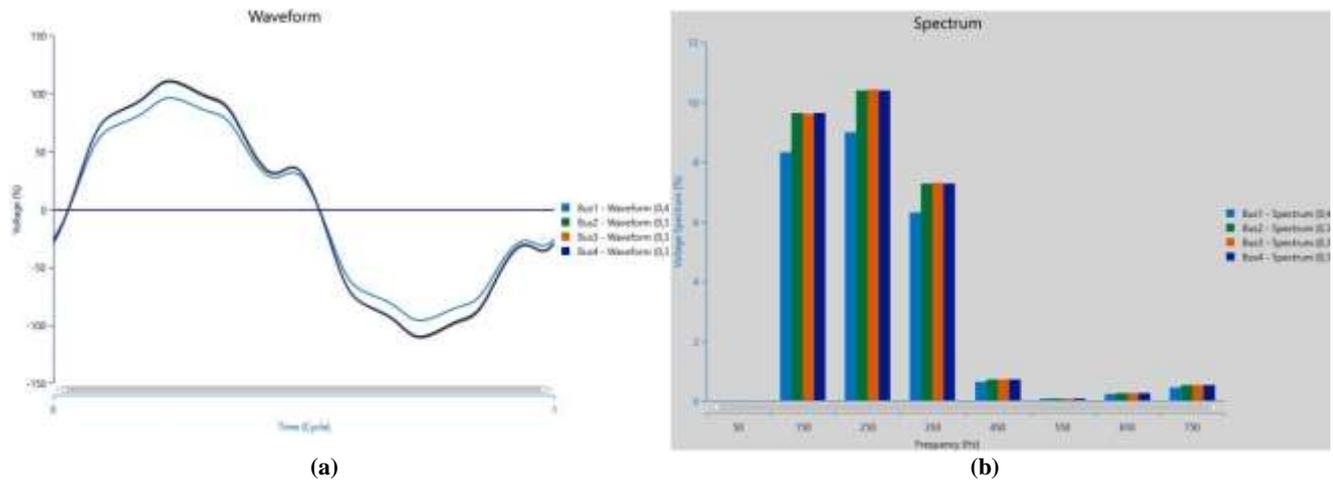
**Gambar 7.** Sumber Harmonisa Inverter

Gambar 7 diatas merupakan data sumber harmonisa pada inverter sebagai control motor di Crane RTG. Berdasarkan gambar diatas, diketahui bahwa sumber harmonisa yang digunakan adalah data tipikal pada software ETAP dengan tipe current source dari IEEE. Bentuk gelombang dan spektrum juga dapat dilihat pada gambar tersebut. Sebelum melakukan simulasi perlu diatur batas harmonisa berdasarkan IEEE.



**Gambar 9.** Simulasi Harmonisa Crane RTG pada ETAP

Setelah dilakukan simulasi harmonisa seperti pada Gambar 9 dan sesuai pada Gambar 6, dapat diamati nilai THD pada Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4. Bus 2 menunjukkan TDH paling besar yaitu 15,11%. Kemudian untuk gelombang harmonisa bisa dilihat pada Gambar 10 di bawah, dimana Gambar 10 (a) menunjukkan gelombang untuk masing-masing bus tidak membentuk gelombang sinusoidal murni. Sedangkan pada Gambar 10 (b) menunjukkan spektrum harmonisa pada Bus 1 sampai dengan Bus 4. Harmonisa tertinggi ada pada frekuensi kelipatan 3 dan 5 dari frekuensi fundamental 50 Hz yaitu pada 150 Hz dan 250 Hz.



Gambar 10. Diagram hasil simulasi Bus 1 hingga Bus 4 berupa (a) Gelombang Harmonisa, (b) Spektrum Harmonisa

Gambar 10 (a) dan (b) diatas merupakan hasil gelombang tegangan dan spektrum analyzer harmonisa yang ditampilkan pada ETAP dimana terlihat bahwa nilai magnitudo yang muncul pada Orde ke-3 sesuai dengan table 4 di bawah, begitu juga selanjutnya. Semakin besar magnitudo yang digunakan maka harmonisa yang muncul akan semakin besar. Gambar gelombang tegangan dapat terlihat bahwa terganggu atau tidak sinus murni dengan munculnya gangguan harmonisa yang telah dirancang, menunjukkan bahwa harmonisa yang dirancang dapat bekerja pada titik yang telah ditentukan untuk menimbulkan gangguan pada sistem, dimana dengan adanya harmonisa akan merusak sistem yang menyebabkan kurangnya lifetime pada komponen yang terpasang.

Tabel 4. VTHD (Voltage Total Harmonic Distortion)

Voltage Distortion (VTHD)			
Bus	% Fundamental	kV	% THD
Bus 1	92,59	0,440	14,91
Bus 2	105,58	0,380	15,11
Bus 3	107,18	0,380	14,90
Bus 4	106,35	0,380	15,01

Tabel 4 diatas adalah data Single Line Diagram yang sudah didesain pada ETAP. Table diatas menunjukkan Bus 2 memiliki VTHD tertinggi yaitu 15,11%. Hal ini disebabkan beban pada bus tersebut diinputkan harmonisa yang telah dirancang. Sedangkan nilai VIHD (Individual Harmonic Distortion) tiap bus ditunjukkan seperti pada Tabel 5 di bawah.

Tabel 5. VIHD (Voltage Individual Harmonic Distortion)

Bus	Voltage Distortion			
ID	kV	% Fundamental	% VIHD	Order
Bus 1	0,440	92,59	8,99	3,00
Bus 2	0,380	105,58	9,13	3,00
Bus 3	0,380	107,18	8,97	3,00
Bus 4	0,380	106,35	9,06	3,00
Bus 1	0,440	92,59	9,72	5,00
Bus 2	0,380	105,58	9,83	5,00
Bus 3	0,380	107,18	9,71	5,00
Bus 4	0,380	106,35	9,77	5,00
Bus 1	0,440	92,59	6,81	7,00
Bus 2	0,380	105,58	6,90	7,00
Bus 3	0,380	107,18	6,81	7,00
Bus 4	0,380	106,35	6,85	7,00
Bus 1	0,440	92,59	0,49	15,00
Bus 2	0,380	105,58	0,50	15,00
Bus 3	0,380	107,18	0,49	15,00
Bus 4	0,380	106,35	0,50	15,00

Dari hasil simulasi tersebut, menunjukkan bahwa harmonisa paling besar muncul pada order ke-5 (F=250 Hz) Bus 2 dengan nilai VIHD 9,83%. Sedangkan pada Bus 1 VIHD 9,72%; Bus 3 VIHD 9,71%; dan Bus 4 VIHD 9,77%. Nilai tersebut di atas ambang batas ketentuan berdasarkan IEEE Std 519-2014 yaitu untuk tegangan Bus < 1 kV 5% untuk VIHD dan 8% untuk VTHD, ditunjukkan pada Tabel 1 sebelumnya. Bentuk gelombang hasil simulasi sudah menunjukkan bahwa gelombang tersebut tidak sinusoidal murni akibat adanya harmonisa.

**Analisa dan Hasil Perhitungan Filter Pasif**

Tabel 4 sebelumnya menunjukkan bahwa harmonisa yang telah dirancang dapat mengganggu sistem sehingga sistem melebihi dari standard harmonisa IEEE Std 519-2014 yang tertera pada Tabel 5. Maka diperlukan

perbaikan harmonisa beserta Power Factor yang juga terganggu tertera pada Tabel 3. Perbaikan meliputi PF dan harmonisa pada sistem, harmonisa yang akan diperbaiki ialah pada Orde 3 dan Orde 5 di Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4 dikarenakan pada order tersebut memiliki nilai harmonisa yang cukup tinggi atau diluar dari standard IEEE Std 519-2014. Filter Pasif yang akan dirancang menggunakan mode Single Tuned, sehingga 1 filter pasif hanya dapat menghilangkan 1 gangguan harmonisa pada orde yang ditentukan. Berikut adalah perhitungan Filter Pasif untuk Bus 1 hingga Bus 4.

**a. Bus 1**

Parameter pada Bus 1

$$P = 779 \text{ kW}, \quad S = 862 \text{ kVA}, \quad Q = 369 \text{ VAR}$$

$$V = 440 \text{ Volt}, \quad A = 1229,6 \text{ A}, \quad PF = 0,99$$

Dikarenakan PF yang terukur 0,99, maka tidak perlu perbaikan factor daya. Berikut kalkulasi untuk Filter Pasif

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{440^2}{369} = 524,66 \Omega$$

**Orde 3**

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{524,66}{3^2} = 58,29 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{58,29}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,185 \text{ H}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{58,29}{329} = 0,177 \Omega$$

**Orde 5**

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{524,66}{5^2} = 20,98 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{20,98}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,07 \text{ H}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{20,98}{329} = 0,064 \Omega$$

**b. Bus 2**

Parameter pada Bus 2

$$P = 560 \text{ kW}, \quad S = 630 \text{ kVA}, \quad Q = 280 \text{ kVAR}$$

$$V = 380 \text{ Volt}, \quad A = 90,4 \text{ A}, \quad PF = 0,89$$

Dikarenakan PF yang terukur 0,89, maka tidak perlu perbaikan factor daya. Berikut kalkulasi untuk Filter Pasif

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{380^2}{280k} = 0,51 \Omega$$

**Orde 3**

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0,51}{3^2} = 0,057 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,057}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,0001 \text{ H}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{0,057}{280k} = 0 \Omega$$

**Orde 5**

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0,51}{5^2} = 0,0204 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,0204}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,000065 \text{ H}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{0,0204}{280k} = 0 \Omega$$

**c. Bus 3**

Parameter pada Bus 3

$$P = 10 \text{ kW}, \quad S = 10 \text{ kVA}, \quad Q = 10 \text{ kVAR}$$

$$V = 380 \text{ Volt}, \quad A = 1,6 \text{ A}, \quad PF = 0,77$$

Dikarenakan PF yang terukur 0,77, maka perlu perbaikan factor daya menjadi 0,86. Berikut kalkulasi untuk Filter Pasif

$$\phi_{awal} = \cos^{-1}(0,77) = 39,65,$$

$$\phi_{harapan} = \cos^{-1}(0,86) = 30,6$$

$$Q_C = P(\tan \phi_{awal} - \tan \phi_{harapan})$$

$$Q_C = 10k (\tan 39,65 - \tan 30,6) = 1,6 \text{ kVAR}$$

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{380^2}{1.600} = 90,25 \Omega$$

**Orde 3**

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{90,25}{3^2} = 10,03 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{10,03}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,031 \text{ H}$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{10,03}{1.600} = 0,0063 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,09}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,0007 H$$

Orde 5

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{90,25}{5^2} = 3,61 \Omega$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{0,09}{180k} = 0 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{3,61}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,0115 H$$

Orde 5

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0,09}{5^2} = 0,04 \Omega$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{3,61}{1.600} = 0,0025 \Omega$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{0,04}{2 \times 3,14 \times 50} = 0,00011 H$$

**d. Bus 4**

Parameter pada Bus 4

$$P = 300 kW, \quad S = 350 kVA, \quad Q = 180 kVAR$$

$$V = 380 Volt, \quad A = 49,5 A, \quad PF = 0,85$$

Dikarenakan PF yang terukur 0,85, maka tidak perlu perbaikan factor daya. Berikut kalkulasi untuk Filter Pasif

$$X_C = \frac{V^2}{Q} = \frac{380^2}{180k} = 0,82 \Omega$$

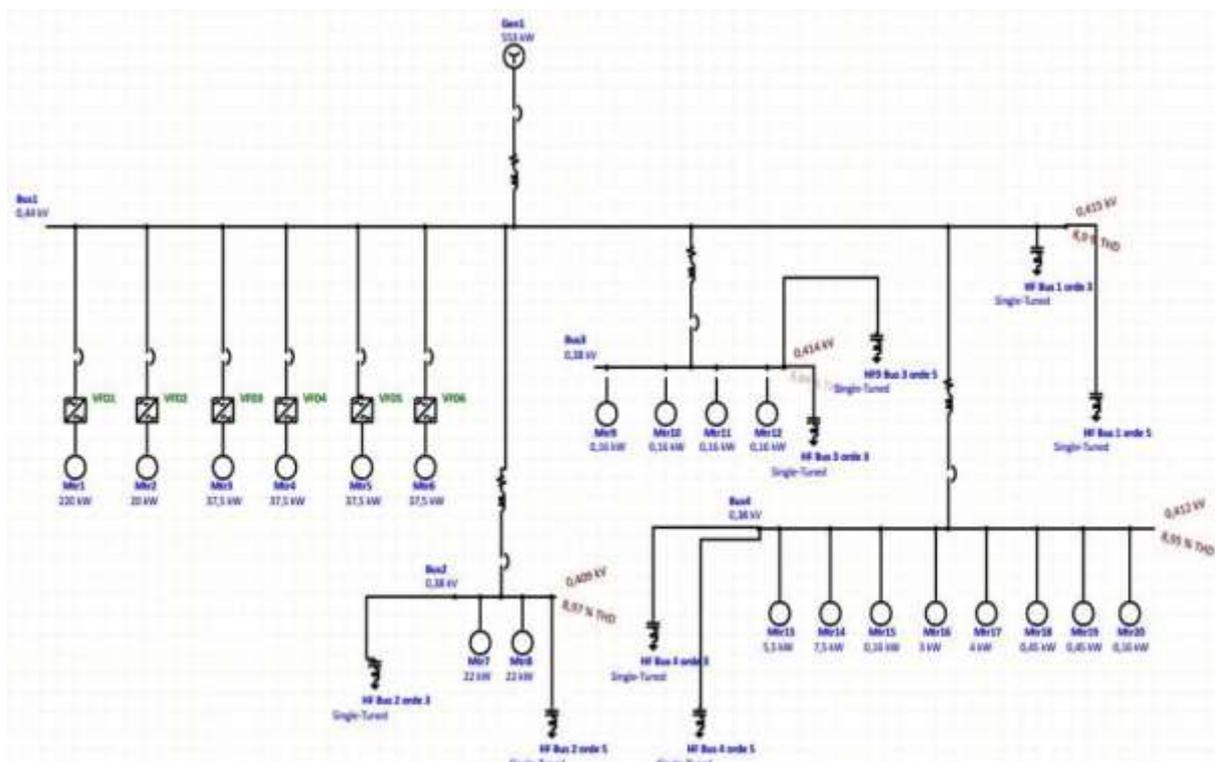
Orde 3

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} = \frac{0,82}{3^2} = 0,09 \Omega$$

$$R = \frac{X_L}{Q_C} = \frac{0,04}{180k} = 0 \Omega$$

**Analisa dan Simulasi Pemasangan filter Pasif pada Sistem**

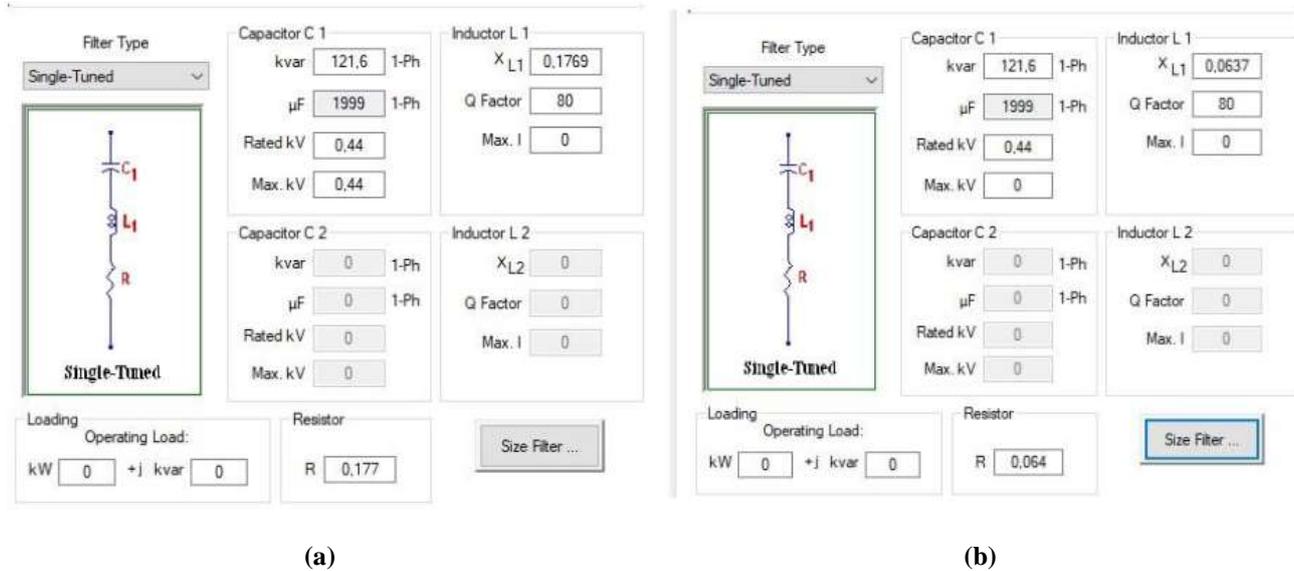
Pada bagian ini akan membahas simulasi yang dilakukan dengan pemasangan Filter Pasif pada Bus 1, Bus 2, Bus 3 dan Bus 4. Karena pada hasil simulasi harmonisa di atas menunjukkan distorsi harmonisa terjadi pada semua Bus yaitu pada Orde 3 dan Orde 5. Pada sistem ini Filter Harmonisa yang terpasang hanya mampu menghilangkan harmonisa Orde ke 3 dan ke 5. Desain Filter Harmonisa yang dilakukan pada simulasi ETAP akan dicocokkan hasilnya sesuai dengan perhitungan secara teori. Gambar 11 berikut ini menunjukkan Single Line Diagram saat terpasang Filter Pasif.



Gambar 11. Single Line Diagram Pemasangan Filter Pasif pada Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4

Dengan Analisa dan perhitungan Filter Pasif yang telah didapat sebelumnya, maka Langkah selanjutnya ialah memasukkan nilai tersebut pada sistem aplikasi ETAP yang telah dirancang dan membandingkan hasil yang diperoleh. Gambar 11 diatas menunjukkan desain parameter Filter Pasif pada Bus 1 untuk menghilangkan

spektrum pada Orde ke 3 atau Frekuensi 150 Hz. Gambar 12 berikut menunjukkan desain parameter Filter Pasif pada Bus 1 untuk menghilangkan spektrum pada Orde ke 5 atau Frekuensi 250 Hz.



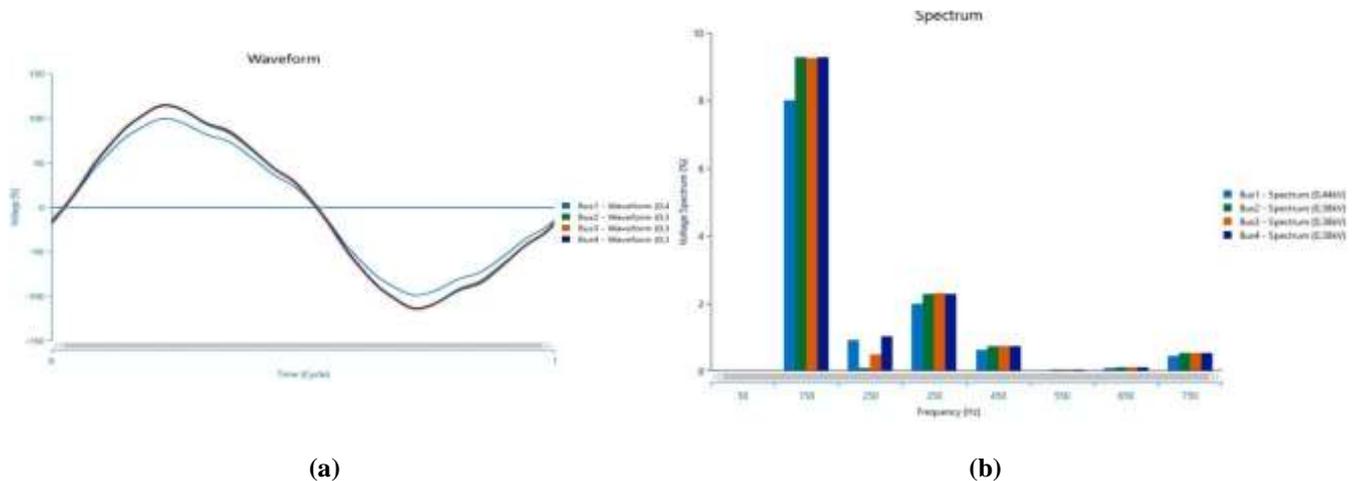
Gambar 12. Parameter Filter Harmonisa Bus 1 untuk (a) Orde 3, (b) Orde 5

Gambar 12 diatas menunjukkan Filter Harmonisa yang diterapkan. Filter Harmonisa terdiri dari 3 komponen yaitu R, L, dan C. Filter Pasif juga menerapkan sistem Single Tuned. Nilai yang dimasukkan ke dalam kolom di atas untuk C adalah nilai kVAR sedangkan untuk L adalah nilai Impedansi Induktif (XL). Nilai-nilai ini memiliki pengaruh penting pada Filter.

Nilai yang dimasukkan di atas disesuaikan dengan perhitungan yang telah dilakukan dan hasilnya yang telah didapat. Tabel 6 berikut menampilkan data secara keseluruhan Filter Harmonisa yang digunakan pada Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4.

Tabel 6. Parameter Filter Pasif atau Filter Harmonisa

Filter	Connected Bus		Capacitor C1			Inductor L1		
	ID	kV	Max kV	kVAR	XL	Q Factory	Max I	Ohm
HF Bus 1 Orde 3	Bus 1	0,440	0,440	121,6	0,1769	80,0	0,0	0,1770
HF Bus 1 Orde 5	Bus 1	0,440	0,000	121,6	0,0637	80,0	0,0	0,0640
HF Bus 2 Orde 3	Bus 2	0,380	0,000	15,7	1,0222	80,0	0,0	0,0000
HF Bus 2 Orde 5	Bus 2	0,380	0,000	15,7	0,3680	80,0	0,0	0,0000
HF Bus 3 Orde 3	Bus 3	0,380	0,000	1,8	8,8569	80,0	0,0	0,0063
HF Bus 3 Orde 5	Bus 3	0,380	0,000	40,3	0,3982	80,0	0,0	0,0000
HF Bus 4 Orde 3	Bus 4	0,380	0,000	40,3	0,3982	80,0	0,0	0,0000
HF Bus 4 Orde 5	Bus 4	0,380	0,000	1,8	3,1885	80,0	0,0	0,0025



Gambar 13. Keluaran Simulasi Pemasangan Filter Harmonisa dengan (a) Gelombang Harmonisa, (b) Spektrum Harmonisa

Gambar 13 (a) merupakan gelombang hasil perbaikan akibat terganggunya sistem terhadap munculnya harmonisa pada Orde 3 dan Orde 5. Apabila dibandingkan dengan sinus dengan sebelum pemasangan filter dapat dilihat bahwa gelombang sinus signifikan mengalami perbaikan yang cukup tinggi, menandakan bahwa selain memperbaiki spektrum analyzer filter, juga memperbaiki sisi gelombang sinus yang mendekati sinusoidal murni.

Gambar 13 (b) menunjukkan spektrum harmonisa dimana gangguan harmonisa pada Orde 5 memiliki nilai kecil yaitu kurang dari 4%. Apabila dibandingkan dengan spektrum analyzer sebelum pemasangan filter terlihat jauh dimana tanpa menggunakan filter harmonisa untuk harmonisa Orde 5 memiliki nilai lebih dari 9% di setiap bus, menandakan bahwa filter yang telah direncanakan berhasil mengurangi gangguan harmonisa pada sistem terhadap harmonisa yang muncul pada Orde ke 5. Namun filter ini belum dapat mengatasi gangguan pada Orde 3 karena semua bus masih memiliki nilai Harmonisa dengan rata-rata 8%.

Tabel 7 diatas menunjukkan bahwa adanya perubahan yang sangat signifikan setelah terpasangnya Filter Harmonisa yang telah direncanakan, bahkan untuk nilai VIHD perubahannya sangat baik hingga dapat benar-benar menghilangkan distorsi atau gangguan yang dihasilkan dari sistem. Namun filter ini hanya bisa menekan gangguan harmonisa pada Orde 5 dimana sebelumnya pada Orde 5 dibandingkan dengan sebelum pemasangan filter yaitu pada Bus 1 VIHD 9,72%; Bus 2 VIHD 9,83%; Bus 3 VIHD 9,71%; dan Bus 4 VIHD 9,77%. Dapat dilihat bahwa terjadi penekanan yang sangat signifikan pada Orde 5 untuk setiap Bus. Setelah pemasangan filter pada bus setelah pemasangan filter pada Bus 1 VIHD 0,97%; Bus 2 VIHD 0,08%; Bus 3 VIHD 0,44%; dan Bus 4 VIHD 0,96%.

Sedangkan untuk Orde 3 tidak terlihat adanya perubahan yang signifikan pada gangguan harmonisa. Karena nilainya masih diatas 8% untuk setiap bus. Apabila dilihat pada standard IEEE Std 519-2014 dimana Batasan untuk tegangan < 1 kV VTHD adalah 8%, dan untuk VIHD 5%. Tabel 8 berikut adalah data VTHD setelah terpasang Filter Harmonisa.

Tabel 7. VIHD (Voltage Individual Harmonic Distortion) setelah terpasang Filter Harmonisa

Bus		Voltage Distortion		
ID	kV	% Fundamental	% VIHD	Orde
Bus 1	0,440	93,84	8,54	3,00
Bus 2	0,380	107,09	8,67	3,00
Bus 3	0,380	108,63	8,53	3,00
Bus 4	0,380	107,88	8,60	3,00
Bus 1	0,440	93,84	0,97	5,00
Bus 2	0,380	107,09	0,08	5,00
Bus 3	0,380	108,63	0,44	5,00
Bus 4	0,380	107,88	0,96	5,00
Bus 1	0,440	93,84	0,49	15,00
Bus 2	0,380	107,09	0,49	15,00
Bus 3	0,380	108,63	0,49	15,00
Bus 4	0,380	107,88	0,49	15,00

Tabel 8. VTHD (Voltage Total Harmonic Distortion) setelah terpasang Filter Harmonisa

Bus		Voltage Distortion	
ID	kV	% Fund.	% VTHD
Bus 1	0,440	93,84	8,90
Bus 2	0,380	107,09	8,97
Bus 3	0,380	108,63	8,84
Bus 4	0,380	107,88	8,95

Tabel 8 diatas merupakan hasil VTHD setelah terpasang Filter Harmonisa. Dapat dilihat bahwa nilai VTHD masih belum memenuhi syarat standard IEEE Std 519-2014 untuk VTHD maksimal yaitu 8%. Nilai pada setiap bus masih diatas 8%. Hal ini karena pengaruh dari VIHD Orde 3 yang tidak secara signifikan mengalami penekanan gangguan harmonisa. Tabel 9 berikut adalah data hasil Load Flow System setelah terpasang Filter Harmonisa.

**Tabel 9.** Load Flow setelah pemasangan Filter Pasif

Bus	P (MW)	Q (MVAR)	I (Amp)	% PF
Bus 1	-0,056	0,011	80,9	-98,3
Bus 2	-0,001	0,004	5,6	-22,5
Bus 3	-0,030	0,087	129,8	-32,2
Bus 4	0,966	-0,294	1325,4	-95,7
Bus 5	0,409	0,102	640,3	97,0
Bus 6	0,044	0,013	70,2	95,8
Bus 7	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 8	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 9	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 10	0,081	0,022	128,1	96,5
Bus 11	-0,088	0,331	1325,4	-93,7
Bus 12	0,057	-0,010	80,9	-98,3
Bus 13	0,001	-0,004	5,6	-22,6
Bus 14	0,032	-0,087	129,8	-34,3
Bus 15	0,409	0,000	571,9	100,0
Bus 16	0,044	0,000	61,9	100,0
Bus 17	0,081	0,000	113,7	100,0
Bus 18	0,081	0,000	113,7	100,0
Bus 19	0,081	0,000	113,7	100,0
Bus 20	0,081	0,000	113,7	100,0

Tabel 9 diatas menunjukkan data aliran daya setelah pemasangan filter harmonisa, diketahui bahwa pada Bus 1 setelah terpasang filter arus meningkat menjadi 1324,4 A dari awal sebelum terpasang filter adalah 1229 A. Nilai PF juga menjadi -95,7. Hal ini menunjukkan beban bersifat kapasitif diakibatkan oleh pemasangan filter yang memiliki unsur Kapasitor. Sama halnya dengan Bus 2, Bus 3, dan Bus 4 memiliki nilai negative. Hal ini disebut juga dengan Faktor Daya Leading (Mendahului)

Diketahui bahwa Filter Harmonisa sangat berguna pada sistem, dimana dapat mengurangi losses yang muncul pada sistem karena distorsi, dimana sistem akan mempunyai beberapa keuntungan dari terpasangnya filter ini, dimana untuk mengurangi denda karena PF yang terlalu rendah, mengurangi penampang penghantar arus atau kabel yang digunakan karena arus menjadi lebih kecil, dan membuat aman alat elektronik atau instrument yang terpasang pada sistem agar lifetime lebih lama.

**IV. KESIMPULAN**

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada penelitian ini, maka dapat ditarik kesimpulan diantaranya yaitu:

1. Hasil simulasi menggunakan ETAP, nilai THD pada Bus 1, Bus 2, Bus 3, dan Bus 4 menunjukkan nilai THD terbesar adalah 15,11% pada Bus 2

2. Nilai VIHD terbesar muncul pada Orde 5 dengan frekuensi 250 Hz pada Bus 2 yaitu sebesar 9,83%, Bus 1 sebesar 9,72%, Bus 3 sebesar 9,71%, dan Bus 4 sebesar 9,77%.
3. Nilai VTHD menurun setelah menggunakan Filter Pasif dimana penurunan tertinggi pada Bus 2 sebesar 8,97%.
4. Nilai VIHD menurun secara signifikan pada Bus 1 yang muncul pada Orde 3 sebesar 8,57%.
5. Penggunaan Filter Pasif berfungsi pada nilai PF yaitu pada Bus 1 bernilai negative atau kapasitif.

**V. DAFTAR PUSTAKA**

[1] Sugiarto,Hadi.2012."Kajian Harmonisa Arus Dan Tegangan Listrik di Gedung Administrasi Politeknik.

[2] Putra N P U, "Harmonic Effect for Voltage Stability Condition in Radial Distribution System", 2019 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications, DOI: 10.1109/ISITIA.2019.8937215

[3] R Sulistyowati , D Widiatmoko , H A Sujono .2021" Harmonics Analysis of Inverter Circuits on Smart Grid System, ICATECH.

[4] Rosa, F.C.D.L. 2006 Harmonic And Ppower System. USA: Taylor & Francis Group, LLC.

[5] Bukit, F.R.A. 2017. Analisa HarmonisapppPadakkKarakteristik Motor Induksi Tiga Fasa. Juitech / Vol.01 / No. 02 / Oktober 2017 / pISSN : 2580-40570/ e-ISSNn: 2597-7261

[6] Budi, A.I.P, dkk. 2018. Analisis Pemasangan Filter Pasif Dan Aktif Terhadap Kandungan Harmonisa Dan Rugi-Rugi Daya Gardu Distribusi KA 2085 Di PT. PLN (Persero) Distribusi Bali Rayon Mengwi. E-Jurnal SPEKTRUM Vol. 5, No. 1 Juni 2018

[7] Ray Ridley. (Nov. 2006). Analyzing the SEPIC converter. Power Systems Design Europe [Online]. Available:http://www.powersystemsdesign.com/d esign\_ tips\_ nov06.pdf

[8] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. (New York: Springer Science+Business Media LLC, 2001).

[9] John Betten and Robert Kollman. (Jan. 25, 2006). No need to fear: SEPIC outperforms the flyback. Planet Analog[Online].Available:http://www.planetanal og.com/ showArticle.jhtml?articleID=177103753.

[10] ETAP Harmonic Analysis. 2005.