

HARMONISA AKIBAT VARIABLE SPEED DRIVE LIFT

Tony Koerniawan¹; Soetjipto Soewono²

tonykoerniawan84@gmail.com¹

Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknik – PLN

ABSTRACT

Power quality problems are increasing and becoming a concern because of the use of power semiconductors in the industry and the loads that are used are very sensitive to variations. Non-linear loads in a three-phase four-wire system, three-wire systems has generally a large capacity such as for variable speed drive control in a elevator. Generally the use of variable speed drives on a elevator cause harmonic currents dominated by the fifth and seventh order harmonics currents. In this thesis, the measurement of harmonics due to variable speed drives on an elevator and will be concluded by extrapolation.

Keywords: power quality, harmonics, variable speed drive (VSD)

ABSTRAK

Masalah kualitas daya semakin menjadi perhatian karena banyaknya penggunaan power semiconductor di industri dan beban-beban yang digunakan merupakan beban-beban yang sangat sensitif terhadap variasi. Beban non linier yang terdapat pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa tiga kawat adalah beban non linier tiga fasa yang umumnya mempunyai kapasitas yang besar seperti penggunaan variable speed drive sebagai kendali motor listrik pada lift. Penggunaan variable speed drive pada lift pada umumnya menyebabkan timbulnya arus harmonisa yang didominasi oleh komponen arus harmonisa orde kelima dan ketujuh. Pada tesis ini dilakukan pengukuran harmonisa akibat variable speed drive pada sistem penggunaan lift dan dan nantinya disimpulkan dalam bentuk ekstrapolasi.

Kata kunci : kualitas daya, harmonisa, variabel speed drive (VSD)

1. PENDAHULUAN

Pada dasarnya harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi yang merupakan perkalian bilangan bulat dengan frekuensi dasarnya. Sistem tenaga listrik di Indonesia mempunyai frekuensi dasar 50 Hz sehingga urutan harmonisa kedua merupakan gelombang dengan frekuensi 2 X 50 Hz, harmonik ketiga 3 X 50 Hz, dan seterusnya. Gelombang harmonisa ini kemudian menumpang pada gelombang murninya sehingga terbentuk gelombang yang terdistorsi yang merupakan penjumlahan antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmonisanya.

Harmonisa bisa muncul akibat adanya beban-beban non linier yang terhubung ke sistem distribusi. Beban non linier ini umumnya adalah peralatan elektronik yang di dalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, yang dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Beberapa contoh beban non linier adalah berupa aplikasi elektronika daya antara lain: *static power converter (rectifiers* atau *inverters)*, pengisi baterai (*bateray chargers*), *electronic ballast*, *variable frequency*, *electric arc furnace*, *thyristor ac power controllers*, *thyristor-controlled reactor (TCR)*, *silicon controlled rectifier (SCR)*, dan *variable speed drive (VSD)*, yang ini semuanya merupakan penyumbang harmonik.

Tujuan penelitian ini adalah untuk dapat mendalami secara teoritis dan praktis mengenai gangguan arus harmonisa yang disebabkan oleh penggunaan peralatan listrik berbasis elektronik yang umumnya dikategorikan sebagai beban non linier karena beban non linier bersifat membangkitkan harmonisa pada sistem jaringan tegangan rendah dan diharapkan dari hasil penulisan ini dapat digunakan oleh berbagai pihak sebagai bahan sumber pengetahuan mengenai harmonisa.

2. KAJIAN LITERATUR

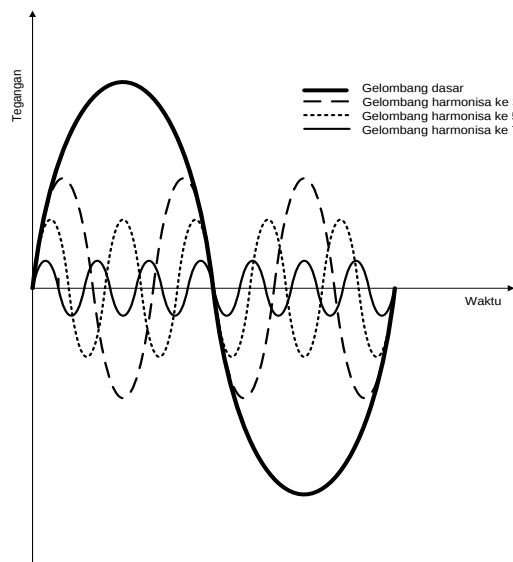
Harmonisa adalah gangguan yang terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik yang diakibatkan oleh terjadinya distorsi gelombang sinusoidal arus/tegangan secara periodik. Pada dasarnya, harmonisa adalah suatu gejala pembentukan gelombang-gelombang dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Frekuensi-frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasarnya disebut dengan frekuensi harmonisa, bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonisa. Frekuensi harmonisa yang mempunyai frekuensi dasar 50 Hz dapat dinyatakan dengan:

$$f_h = h.50\text{Hz}$$

dimana:

- f_h : frekuensi harmonisa orde ke h
 h : orde harmonisa yang merupakan bilangan bulat (2, 3, ...)

Sebagai contoh gelombang sinusoidal dengan frekuensi dasar 50 Hz, frekuensi harmonisa keduanya adalah 100 Hz, frekuensi harmonisa ketiganya 150 Hz dan seterusnya. Gelombang-gelombang harmonisa tersebut menumpang pada gelombang dasarnya, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang dasarnya dan gelombang – gelombang harmonisa tersebut. Bentuk gelombang dasar dan gelombang harmonisa ke 3, ke 5 dan ke 7 diperlihatkan pada Gambar 1. dibawah ini.



Gambar 1. Bentuk gelombang tegangan dasar dan harmonisa

Pembangkit arus harmonisa pada sistem tenaga listrik adalah berbagai beban listrik yang mempunyai karakteristik non linier, sehingga beban non linier ini dapat dikatakan sebagai sumber arus harmonisa bagi sistem distribusi tenaga listrik. Sebagai contoh beban non linier pada peralatan statis berupa penyearah jembatan dioda. Pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa empat kawat tegangan rendah banyak terdapat beban non linier satu fasa berupa peralatan listrik berbasis elektronik seperti konverter kendali kecepatan motor listrik, televisi, komputer, catu daya pengisi baterai, lampu fluorescent yang menggunakan ballast elektronik, mesin fotokopi dan lain sebagainya yang menggunakan penyearah satu fasa. Penyearah satu fasa ini dominan membangkitkan arus harmonisa orde kelipatan tiga. Dengan demikian penyearah satu fasa merupakan sumber arus harmonisa orde kelipatan tiga bagi saluran distribusi tenaga listrik. Beban non linier yang terdapat pada sistem distribusi tenaga listrik tiga fasa tiga kawat adalah beban non linier tiga fasa yang umumnya mempunyai kapasitas yang besar seperti konverter untuk sistem kendali motor listrik di industri, transmisi arus searah dan lain sebagainya.

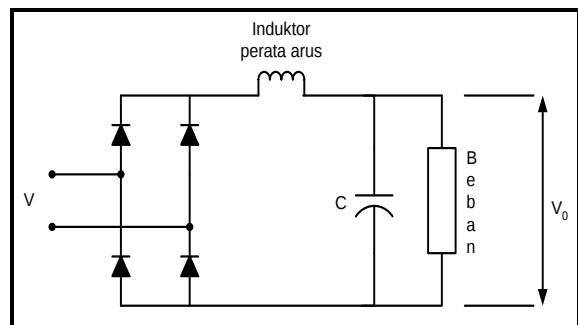
2.1 Penyearah

Sumber utama dari arus harmonisa adalah penyearah yang merupakan peralatan elektronika daya. Peralatan ini berfungsi untuk merubah sistem daya tegangan bolak-balik (ac) menjadi tegangan searah (dc). Perubahan yang disebabkan oleh penyearah ini pada akhirnya menimbulkan distorsi arus dan tegangan pada sistem distribusi tenaga listrik.

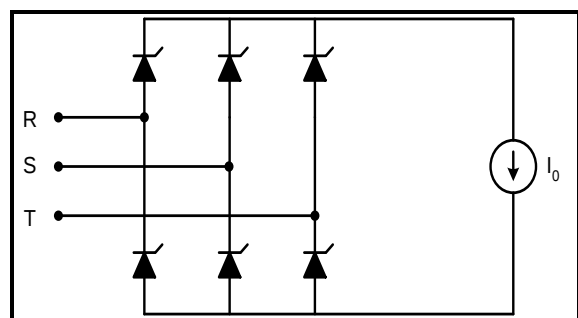
Dari sisi pengendalian, jenis penyearah dibagi menjadi dua, yaitu :

- Penyearah tak terkendali (dengan dioda)
- Penyearah terkendali (dengan Thyristor)

Arus harmonisa dalam jumlah besar dihasilkan dari kedua jenis penyearah tersebut. Penyearah tak terkendali menyumbang arus harmonisa terbesar pada sistem tenaga listrik, khususnya dari jenis penyearah satu fasa yaitu dari sektor perumahan dan perkantoran.



Gambar 2. Penyearah tak terkendali satu fasa



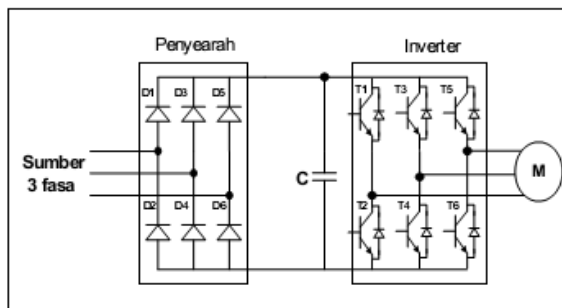
Gambar 3. Penyearah terkendali tiga fasa

3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Variable Speed Drive

Variable speed drive (VSD) atau juga disebut dengan *variable frequency drive* atau singkatnya disebut dengan inverter adalah solusi aplikasi yang membutuhkan kemampuan pengaturan motor lebih lanjut, misal : pengaturan motor sesuai bebannya atau sesuai nilai yang kita inginkan. Aplikasi *variable speed* banyak diperlukan dalam industri. Jika sebelumnya banyak dipergunakan system mekanik, kemudian beralih ke motor slip/ pengereman maka saat ini banyak menggunakan semikonduktor. Tidak seperti *softstarter* yang mengolah level tegangan, inverter menggunakan frekuensi tegangan masuk untuk mengatur speed motor.

Teknologi elektronika daya telah berkembang pesat dalam tiga puluh tahun terakhir ini. Di industri - industri penggunaan yang paling banyak adalah dalam *variable speed drive* (VSD) untuk keperluan kendali motor elektrik. VSD digunakan untuk mengubah sumber AC dengan tegangan dan frekuensi yang tetap ke sumber AC dengan tegangan dan frekuensi yang variabel. Gambar 4 menunjukkan penyearah dalam VSD umumnya menggunakan penyearah dioda 6 pulsa. Lift menggunakan VSD atau *variable speed drive* untuk mengendalikan gerakan motor. VSD merupakan rangkaian semikonduktor penyearah, yang menurut standard IEEE 519-1992 merupakan salah satu beban non linear penyebab gelombang harmonik.



Gambar 4. Skema umum *variable speed drive* (VSD)

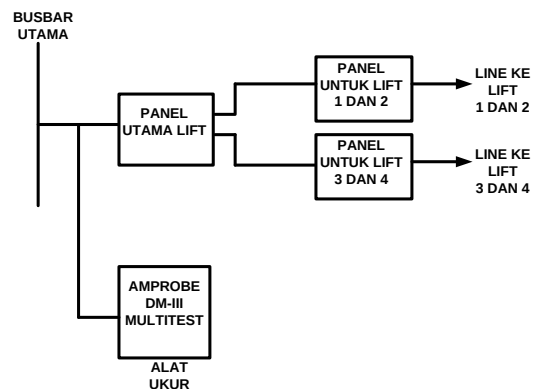
Metode pengambilan disini adalah dengan cara metode pengukuran secara langsung. Metode percobaan yang digunakan untuk mengetahui adanya harmonisa pada beban non linier karena penggunaan *variable speed drive* pada lift adalah dengan menggunakan alat ukur *Amprobe DM III-Multi Test* milik STT-PLN. Pada penelitian ini, akan mengamati adanya harmonisa yang timbul akibat penggunaan *variable speed drive* pada sistem kelistrikan lift, adapun cara mengamatinya adalah dengan mengoperasikan kondisi lift dengan berbagai kondisi.

Adapun tahap-tahap melakukan percobaan pengamatan harmonisa dilakukan yaitu melakukan pengukuran dan dilakukan pada 11 lantai, saat lift naik dan turun secara bersamaan dengan disetiap lantai dilakukan pengukuran, sehingga didapatkan 22 hasil data pada tiap-tiap pengukuran, dengan kondisi lift adalah sebagai berikut :

- Kondisi lift 1 beroperasi dengan kondisi 3 lift lainnya tidak beroperasi (*off*).
- Kondisi lift 1 dan lift 2 beroperasi bersamaan dengan kondisi 2 lift lainnya tidak beroperasi (*off*).
- Kondisi lift 1, 2 dan 3 beroperasi bersamaan dengan kondisi 1 lift lainnya tidak beroperasi (*off*).
- Kondisi keempat lift beroperasi secara bersamaan.

3.2 Rangkaian Percobaan Penelitian

Untuk mengetahui adanya harmonisa akibat *variable speed drive* pada lift, maka dilakukan pengukuran dengan skema rangkaian pengujian seperti pada gambar di bawah ini :

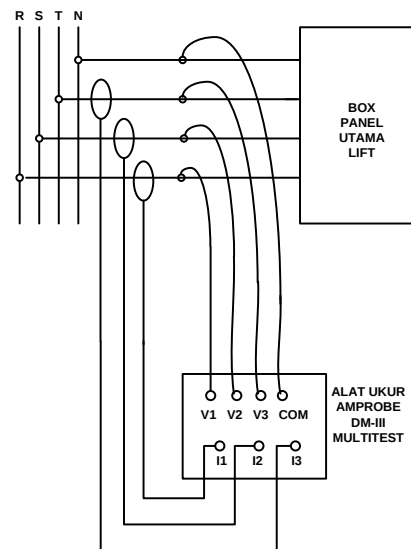


Gambar 5. Skema Rangkaian Percobaan

3.3 Teknik Pengukuran

Pengukuran dilakukan pada jalur panel utama penghubung lift yang berada pada lantai 11, pengukuran harus dilakukan dengan hati-hati karena jalur kabel ini dalam keadaan bertegangan dan arus yang mengalir juga besar. Pengukuran dilakukan dengan menghubungkan kabel untuk tegangan dan kabel arusnya ke alat ukur *Amprobe DM-III Multitest*.

Pengambilan data dilakukan dengan merekam (*recording*) menggunakan alat ukur *Amprobe DM-III Multitest*. Blok diagramnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini :

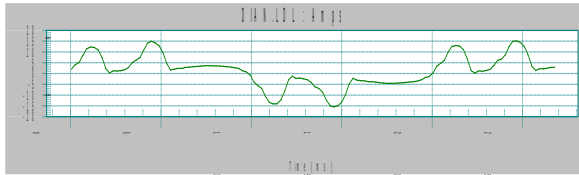


Gambar 6. Blok diagram pengukuran

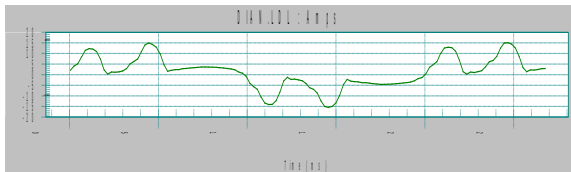
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Grafik hasil percobaan

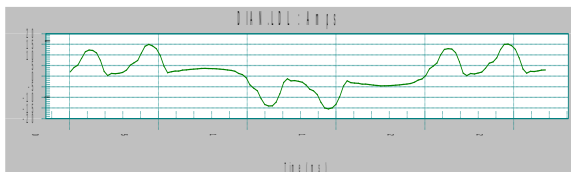
Data data yang diperoleh melalui kombinasi berbagai macam percobaan dapat, kita dapat melihat bagaimana harmonisa arus tersebut. Dari data pengukuran ternyata harmonisa arus didominasi oleh orde ke-5 dan ke-7. Berikut ini adalah gambar grafik harmonisa arus orde ke-5 dan ke -7 yang terekam pada alat ukur *Amprobe DM-III Multitest* tersebut.



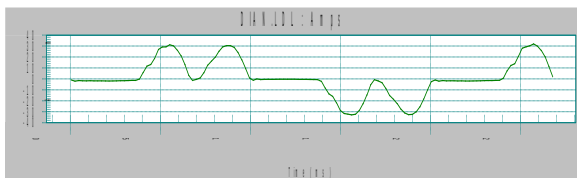
Gambar 7. Grafik rata-rata orde ke-5 pada pengukuran beban lift 1 dan 2 saat beroperasi bersamaan pada fasa R



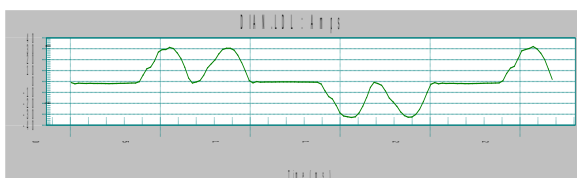
Gambar 8. Grafik rata-rata orde ke-5 pada pengukuran beban lift 1 dan 2 saat beroperasi bersamaan pada fasa S



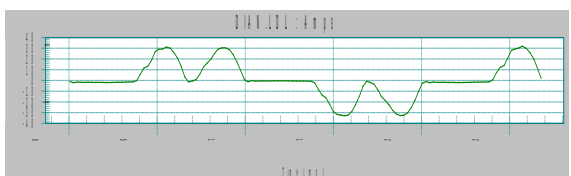
Gambar 9. Grafik rata-rata orde ke-5 pada pengukuran beban lift 1 dan 2 saat beroperasi bersamaan pada fasa T



Gambar 10. Grafik rata-rata orde ke-7 pada pengukuran beban lift 1, 2, 3 atau beban lift 1,2,3 dan 4 saat beroperasi bersamaan pada fasa R



Gambar 11. Grafik rata-rata orde ke-7 pada pengukuran beban lift 1, 2, 3 atau beban lift 1,2,3 dan 4 saat beroperasi bersamaan pada fasa S



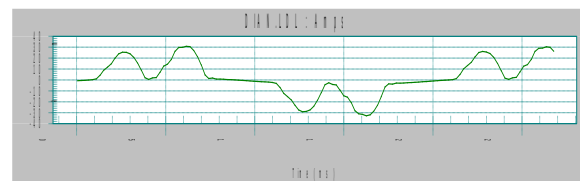
Gambar 12.

Grafik rata-rata orde ke-7 pada pengukuran beban lift 1, 2, 3 atau beban lift 1,2,3 dan 4 saat beroperasi bersamaan pada fasa T

4.2 Analisa Dan Ekstrapolasi Dari Data Pengukuran

Ekstrapolasi adalah metode yang dipergunakan dalam memprediksi nilai dari suatu data atau fungsi yang berada di luar interval (data awal yang telah diperoleh). Untuk dapat memprediksi persamaan yang berada di luar interval maka sebelumnya perlu mengetahui atau terlebih dahulu konsep dari suatu persamaan ketika hanya diberikan sebuah grafik untuk dianalisis dan didapatkan suatu prediksi (pendekatan yang tepat).

Antara grafik orde ke 5 pada pengukuran lift 1 dan lift 2 bersamaan dengan grafik orde ke 7 pada pengukuran lift1, 2, 3 dan 4 bersamaan, setelah kedua grafik dieliminir dengan *software* maka akan diperoleh grafik seperti gambar di bawah ini.



Gambar 13. Grafik arus vs waktu pada fasa R, S, dan T

Grafik di atas dapat berlaku untuk setiap masing-masing fasa. Untuk mempermudah menganalisa grafik diatas pada Gambar 13, maka dalam pengerjaan analisa deret Fourier digunakan metode partisi pada gelombang-gelombang arus yang didapat.

Gelombang arus pada fasa ini dipartisi menjadi dua belas gelombang dengan masing-masing gelombang mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 2t & 0 \leq t \leq 1 \\
 y_2 &= 17,33t - 15,33 & 1 < t \leq 2,5 \\
 y_3 &= -17,33t + 71,33 & 2,5 < t \leq 4 \\
 y_4 &= 16t - 62 & 4 < t \leq 6 \\
 y_5 &= -16t + 130 & 6 < t \leq 8 \\
 y_6 &= -t + 10 & 8 < t \leq 10 \\
 y_7 &= -2t + 20 & 10 < t \leq 11 \\
 y_8 &= -17,33t + 188,67 & 11 < t \leq 12,5 \\
 y_9 &= 17,33t - 244,67 & 12,5 < t \leq 14 \\
 y_{10} &= -16t + 222 & 14 < t \leq 16 \\
 y_{11} &= 16t - 290 & 16 < t \leq 18 \\
 y_{12} &= t - 20 & 18 < t \leq 20
 \end{aligned}$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\}$$

$$I_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \times 100\%$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \cos hx \, dx \quad \dim \, ana \, x = \frac{2\pi}{T} \, t ; T = 20 \, ms$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{10}} y_1 \cos hx \, dx + \int_{\frac{\pi}{10}}^{\frac{2.5\pi}{10}} y_2 \cos hx \, dx + \int_{\frac{2.5\pi}{10}}^{\frac{4\pi}{10}} y_3 \cos hx \, dx + \int_{\frac{4\pi}{10}}^{\frac{6\pi}{10}} y_4 \cos hx \, dx \right. \\ \left. + \int_{\frac{6\pi}{10}}^{\frac{8\pi}{10}} y_5 \cos hx \, dx + \int_{\frac{8\pi}{10}}^{\frac{10\pi}{10}} y_6 \cos hx \, dx + \int_{\frac{10\pi}{10}}^{\frac{11\pi}{10}} y_7 \cos hx \, dx + \int_{\frac{11\pi}{10}}^{\frac{12.5\pi}{10}} y_8 \cos hx \, dx \right. \\ \left. + \int_{\frac{12.5\pi}{10}}^{\frac{14\pi}{10}} y_9 \cos hx \, dx + \int_{\frac{14\pi}{10}}^{\frac{16\pi}{10}} y_{10} \cos hx \, dx + \int_{\frac{16\pi}{10}}^{\frac{18\pi}{10}} y_{11} \cos hx \, dx + 18 \int_{\frac{18\pi}{10}}^{\frac{20\pi}{10}} y_{12} \cos hx \, dx \right\}$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \sin hx \, dx \quad \dim \, ana \, x = \frac{2\pi}{T} \, t ; T = 20 \, ms$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{\frac{\pi}{10}} y_1 \sin hx \, dx + \int_{\frac{\pi}{10}}^{\frac{2.5\pi}{10}} y_2 \sin hx \, dx + \int_{\frac{2.5\pi}{10}}^{\frac{4\pi}{10}} y_3 \sin hx \, dx + \int_{\frac{4\pi}{10}}^{\frac{6\pi}{10}} y_4 \sin hx \, dx \right. \\ \left. + \int_{\frac{6\pi}{10}}^{\frac{8\pi}{10}} y_5 \sin hx \, dx + \int_{\frac{8\pi}{10}}^{\frac{10\pi}{10}} y_6 \sin hx \, dx + \int_{\frac{10\pi}{10}}^{\frac{11\pi}{10}} y_7 \sin hx \, dx + \int_{\frac{11\pi}{10}}^{\frac{12.5\pi}{10}} y_8 \sin hx \, dx \right. \\ \left. + \int_{\frac{12.5\pi}{10}}^{\frac{14\pi}{10}} y_9 \sin hx \, dx + \int_{\frac{14\pi}{10}}^{\frac{16\pi}{10}} y_{10} \sin hx \, dx + \int_{\frac{16\pi}{10}}^{\frac{18\pi}{10}} y_{11} \sin hx \, dx + 18 \int_{\frac{18\pi}{10}}^{\frac{20\pi}{10}} y_{12} \sin hx \, dx \right\}$$

Dengan menggunakan program microsoft office exel, maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
y1	0.61803	0	0.23114	-0.05618	-0.12446	-0.09518	-0.03253	0.07034	0.08
	-0.31174	-0.25478	-0.20639	-0.1027	-0.05984	-0.00909	-0.00086	-0.00496	-0.01019
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y2	25.2845	-9.59474	-6.38049	3.27244	5	2.62725	1.89457	0.532308	
	1	1.45875	0.11129	1	-0.03897	1	-0.25355	1	0.062452
	-13.4662	-1.56131	3.32031	1	-1.41611	-0.12018	-1.36719	-0.81985	0.179602
	-6.10272	5.233989	1	0.77781	5.08312	4	0.43963	6	1.225628
y3	-35.2979	-6.12814	-10.199	-3.2089	0.03328	0.28958	0.15820	6	-0.02587
	1	-3.76934	1.70798	-0.46356	7	8	-0.15538	0.37005	2
	17.4009	13.1949	1.58190	0.65470	8	-0.50066	-6.22509	0.37005	2
	3	10.08759	5	3	1.10641	9	-0.81779	-3.4E-15	
y4	30.4338	1	1.02E-14	2.67671	-1.44686	0.48785	0.28528	0.15588	0.88
	1	-3.76934	1.70798	-0.46356	7	8	-0.15538	0.37005	2
	-31.4922	-4.07643	4	-0.26027	6	-0.08724	6	-0.16306	
	-6.9E-15	-7.6E-15	5.9E-15	-2.5E-15	6.35E-15	-4.5E-15	1.09E-15	-1.8E-15	1.21E-15
	16.0649	1	1.96E-14	25.4518	7	-13.7048	5	-0.84552	-7.7462
y5	25.4777	1	-4.07643	0.51995	3	0.21056	15.3884	2	-11.7676
	-47.2253	-2.2E-14	-28.5785	-4.29321	15.3884	2	-11.7676	2.48554	0.33080
y6	4.70228	2	-2E-15	-1.08692	0.42748	6	-0.44756	-0.24749	2
	0.60822	6	0.254777	0.08507	0.00502	7	0.02466	0.01442	0.00788
	5.87785	2.21E-15	2	-0.53435	-0.73158	5	0.55944	0.30936	-0.4135
	6.79837	4	2.54262	5	-0.61803	-1.36911	-1.04696	-0.35781	0.77384
y7	-0.31174	-0.25478	-0.20639	-0.1027	-0.05984	-0.00909	-0.00086	-0.00496	-0.01019
	-6.18034	-4	-2.31148	0.56184	2	5	1	-0.70349	-0.8
	94.2854	2	-68.7733	-43.9219	19.2837	8	8	11.1643	-13.3675
y8	-13.4662	-1.56131	1.45875	0.11129	1	-0.03897	1	-0.25355	1
	-75.1076	64.41597	40.8638	7	-17.4284	-1.47903	-16.8263	-10.0901	3
	-77.5818	-30.6407	-42.2624	-7.05289	0.81311	7	0.62178	20.2099	4
y9	21.9748	1	-3.76934	1.70798	-0.46356	7	8	-0.15538	0.15820
	59.6871	8	34.60156	45.2601	5.42610	2.24572	3	-1.71732	-21.3528
y10	30.4338	1	8.86E-14	2.68701	-1.44686	0.48785	0.28528	0.15588	0.88
	-31.4922	-4.07643	4	-0.26027	6	-0.08724	6	-0.16306	
	-2.5E-14	-8.2E-14	6.9E-14	-2.2E-15	1.52E-14	1.03E-13	-1.3E-14	3.8E-14	-1.1E-13
y11	74.1883	1.14E-13	60.6253	6.74439	-32.6444	24.9633	-3.90465	-18.4512	7.28E-14

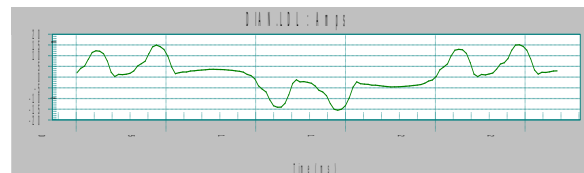
Tabel 2. Nilai b_h

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
y1	-1.90211	-2.5E-17	0.167939	0.172919	0.090429	-0.06915	-0.10011	-0.05111	-2.5E-17
	1.968261	0.254777	0.105163	-0.01627	-0.03049	-0.01783	-0.00545	0.009741	0.010191
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y2	-14.156	6.128141	-5.83268	1.286913	1.573279	-1.2031	2.480282	-0.88924	-1.22563
	21.97481	-3.76934	-1.70798	0.463559	0.033287	0.289588	0.155376	-0.15821	-0.02587
	-3.73975	-2.16799	2.835814	0.339977	-0.14071	0.1076	-1.33788	0.07953	0.433598
y3	-9.21594	19.99454	-12.3902	4.73225	-1.9577	-5.10185	2.740288	-3.77093	1.547652
	-13.4662	-1.56131	-1.45875	-0.11129	-0.03897	0.022791	0.25355	-0.01245	0.062452
	28.39574	-24.3536	15.4493	-6.5891	0.559174	6.361477	-3.81474	4.701961	-0.83568
y4	49.44272	32	-18.4918	4.494793	-9.95713	-7.61428	2.602248	-5.62794	6.4
	5.66E-15	1.25E-15	-6.9E-16	1.87E-16	-4E-16	2.15E-16	-4.7E-17	6.42E-17	-4E-17
	-38.3181	-24.8	14.33116	-3.48346	7.71677	5.901065	-2.01674	4.361857	-4.96
y5	-7.3.8885	44.8	-5.44449	-6.71714	-2.93165	-2.24185	-3.88887	-1.65702	8.96
	18.51064	1.75E-15	1.600251	0.15298	-0.46398	0.271323	-0.05128	-0.14623	5.98E-17
	65	-52	9.285714	5.909091	5	3.823529	3.421053	2.826867	-10.4
y6	-3.52796	-3.6	-1.78173	-0.32071	-0.9594	-0.73366	-0.18566	-0.54227	-0.72
	1.871928	-1.4E-16	-0.06181	0.01547	0.017922	-0.01049	-0.00519	0.005726	-1E-17
	1.90983	4	1.870024	0.173621	1.006836	0.77001	0.100517	0.569138	
y7	-0.92324	4	4.704468	3.720295	2.533175	0.415807	-0.04859	0.307336	0.8
	1.968261	0.254777	0.105163	-0.01627	-0.03049	-0.01783	-0.00545	0.009741	0.010191
	-0.97887	-4	-4.53653	-3.54738	-2.44275	-0.48496	-0.05152	-0.35845	-0.8
y8	28.12777	30.6407	-37.8961	-2.55707	3.164202	-2.41968	17.6071	-1.78946	-6.12814
	21.97481	-3.76934	-1.70798	0.463559	0.033287	0.289588	0.155376	-0.15821	-0.02587
	-46.026	-26.682	34.90104	4.184182	-1.73172	1.324258	-16.4656	0.9788	5.336393
y9	-78.3188	79.1731	-49.9316	20.74456	-3.31647	-20.5601	12.0101	-15.1966	3.578339
	-13.4662	-1.56131	-1.45875	-0.11129	-0.03897	0.022791	0.25355	-0.01245	0.062452
	97.40063	-83.5356	52.99286	-22.6014	1.918029	21.82059	-13.085	16.12826	-2.86649
y10	148.3282	96	-55.4755	13.48438	-29.8714	-22.8428	7.806745	-16.8838	19.2
	5.66E-15	3.75E-15	-2.2E-15	4.68E-17	-2.7E-16	-1.4E-15	1.57E-16	-3.8E-16	1.04E-15
	-137.204	-88.8	51.31479	-12.473	27.63104	21.12962	-7.22124	15.61755	-17.76
y11	-153.889	108.8	-16.8731	-13.9899	-9.0855	-6.94773	-8.0994	-5.13528	21.76
	18.51064	4.25E-15	1.600251	0.15298	-0.46398	0.271323	-0.05128	-0.14823	5.99E-16
	145	-116	20.71429	13.18182	11.15385	8.529412	7.631579	6.304348	-23.2
y12	-5.43769	-7.6	-3.65176	-0.49434	-1.96633	-1.50367	-0.28619	-1.1114	-1.52
	1.871928	-3E-16	-0.06181	0.01547	0.017922	-0.01048	-0.00519	0.005726	-5E-18
	3.81966	8	3.740049	0.347242	2.013872	1.54002	0.201035	1.138276	1.6
7bh	19.65615	-3.23387	-0.9695	0.321159	-0.30715	0.353932	0.220814	-0.19313	0.029807

Tabel 3. Nilai arus harmonisa tiap orde ke-n pada masing-masing fasa

h	1	5	7	11	13	17	19	23	25
ao	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ah	1.777438	-8.58752	3.343288	-0.31832	0.38074	0.440104	-0.27079	0.240598	-0.18445
bh	19.65615	-3.23387	-0.9695	0.321159	-0.30715	0.353932	0.220814	-0.19313	0.029807
lh	19.73635	9.17624	3.48102	0.452188	0.489189	0.564765	0.349405	0.308522	0.186846
lh2	389.5237	84.20339	12.1175	0.204474	0.239305	0.31896	0.122084	0.095186	0.034912
THD	49.99%								

Dari analisa grafik di atas kita dapat analisa ternyata perubahan orde harmonisa antara lift 1 atau lift1 dan lift 2 yang beroperasi bersamaan dengan perubahan orde harmonisa antara lift 1, 2, 3 atau lift 1,2,3 dan lift 4 yang beroperasi bersamaan disebabkan karena ada penambahan orde harmonisa ke-5 dengan nilai arus harmonisa ke-5 sebesar 9,17624 A dan THD sebesar 49,99 % besarnya sama untuk tiap-tiap fasa. Melalui pendekatan ini bila orde ke-7 ditambahkan orde ke-7 arus harmonisa maka gelombang yang didapatkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 14. Grafik penambahan arus harmonisa orde ke-7

Untuk mempermudah menganalisa grafik diatas pada Gambar 14, maka dalam pengerjaan analisa deret Fourier digunakan metode partisi pada gelombang – gelombang arus yang didapat.

- Fasa R

Gelombang arus pada fasa ini dipartisi menjadi dua belas gelombang dengan masing – masing gelombang mempunyai persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= 6,67t & 0 \leq t \leq 1,5 \\
 y_2 &= -8,667t + 26 & 1,5 < t \leq 3 \\
 y_3 &= 11,333t - 34 & 3 < t \leq 4,5 \\
 y_4 &= -11,333t + 68 & 4,5 < t \leq 6 \\
 y_5 &= 3t - 18 & 6 < t \leq 8 \\
 y_6 &= -4,5t + 42 & 8 < t \leq 10 \\
 y_7 &= -10t + 97 & 10 < t \leq 11,5 \\
 y_8 &= 8,667t - 112,67 & 11,5 < t \leq 13 \\
 y_9 &= -11,333t + 147,329 & 13 < t \leq 14,5 \\
 y_{10} &= 11,333t - 181,328 & 14,5 < t \leq 16 \\
 y_{11} &= -3t + 48 & 16 < t \leq 18 \\
 y_{12} &= 4,5t - 87 & 18 < t \leq 20
 \end{aligned}$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\}$$

$$I_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$$

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \times 100\%$$

$$a_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \cos hx \, dx \quad \dim \text{ ana } x = \frac{2\pi}{T} t ; T = 20 \text{ ms}$$

$$\begin{aligned}
 a_h = \frac{1}{\pi} \{ & \int_0^{\frac{1,5\pi}{10}} y_1 \cos hx \, dx + \int_{\frac{1,5\pi}{10}}^{\frac{3\pi}{10}} y_2 \cos hx \, dx + \int_{\frac{3\pi}{10}}^{\frac{4,5\pi}{10}} y_3 \cos hx \, dx + \int_{\frac{4,5\pi}{10}}^{\frac{6\pi}{10}} y_4 \cos hx \, dx \\
 & + \int_{\frac{6\pi}{10}}^{\frac{8\pi}{10}} y_5 \cos hx \, dx + \int_{\frac{8\pi}{10}}^{\frac{10\pi}{10}} y_6 \cos hx \, dx + \int_{\frac{10\pi}{10}}^{\frac{11,5\pi}{10}} y_7 \cos hx \, dx + \int_{\frac{11,5\pi}{10}}^{\frac{13\pi}{10}} y_8 \cos hx \, dx \\
 & + \int_{\frac{13\pi}{10}}^{\frac{14,5\pi}{10}} y_9 \cos hx \, dx + \int_{\frac{14,5\pi}{10}}^{\frac{16\pi}{10}} y_{10} \cos hx \, dx + \int_{\frac{16\pi}{10}}^{\frac{18\pi}{10}} y_{11} \cos hx \, dx + 18 \int_{\frac{18\pi}{10}}^{\frac{20\pi}{10}} y_{12} \cos hx \, dx \}
 \end{aligned}$$

$$b_h = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} y \sin hx \, dx \quad \dim \text{ ana } x = \frac{2\pi}{T} t ; T = 20 \text{ ms}$$

$$\begin{aligned}
 b_h = \frac{1}{\pi} \{ & \int_0^{\frac{1,5\pi}{10}} y_1 \sin hx \, dx + \int_{\frac{1,5\pi}{10}}^{\frac{3\pi}{10}} y_2 \sin hx \, dx + \int_{\frac{3\pi}{10}}^{\frac{4,5\pi}{10}} y_3 \sin hx \, dx + \int_{\frac{4,5\pi}{10}}^{\frac{6\pi}{10}} y_4 \sin hx \, dx \\
 & + \int_{\frac{6\pi}{10}}^{\frac{8\pi}{10}} y_5 \sin hx \, dx + \int_{\frac{8\pi}{10}}^{\frac{10\pi}{10}} y_6 \sin hx \, dx + \int_{\frac{10\pi}{10}}^{\frac{11,5\pi}{10}} y_7 \sin hx \, dx + \int_{\frac{11,5\pi}{10}}^{\frac{13\pi}{10}} y_8 \sin hx \, dx \\
 & + \int_{\frac{13\pi}{10}}^{\frac{14,5\pi}{10}} y_9 \sin hx \, dx + \int_{\frac{14,5\pi}{10}}^{\frac{16\pi}{10}} y_{10} \sin hx \, dx + \int_{\frac{16\pi}{10}}^{\frac{18\pi}{10}} y_{11} \sin hx \, dx + 18 \int_{\frac{18\pi}{10}}^{\frac{20\pi}{10}} y_{12} \sin hx \, dx \}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan program microsoft office exel, maka didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai a_h

h	1	5	7	9	11	15	17	21	23
y1	4.542175	1.414921	-0.22359	-0.81041	-0.12039	0.581284	0.239062	-0.42964	-0.28298
	-2.31524	-1.4505	-0.86168	-0.09585	-0.00155	-0.085	-0.11127	-0.04644	-0.00995
	1.361971	0.424264	-0.06704	-0.243	-0.0361	0.174298	0.071683	-0.12883	-0.08485
y2	-15.1331	7.038748	-1.43835	0.859247	0.461617	1.227953	1.417755	-0.90762	0.67233
	8.369487	-0.7807	-1.0921	0.237645	0.005983	0.075893	-0.11307	0.041461	0.031228
	9.230689	-8.87696	1.72882	0.193793	-0.30517	-1.9832	-1.72833	1.465841	-0.30461
y3	22.96486	14.01208	-4.80844	3.22579	-0.97281	-2.05493	4.098758	1.518958	-0.0825
	-15.5685	1.020846	-1.35682	-0.11928	-0.01282	0.175472	-0.07441	0.095863	-0.04083
	-6.07483	-11.6083	3.706036	-2.98412	0.379161	1.163979	-3.21516	-0.86033	-0.39833
y4	-14.2993	7.212277	-9.01729	-5.15382	1.293491	-5.02401	6.054767	3.713401	-1.44246
	16.79924	2.46454	-1.2522	-0.20244	0.01751	-0.04434	0.015255	-0.02422	0.016914
	-2.49096	-8.61665	10.12011	4.912209	-0.69985	5.915167	-6.93867	-4.37208	1.92333
y5	-3.01217	-3.7E-15	-4.77221	-0.27383	2.569653	-1.96503	0.158535	1.452413	-1.1E-15
	-4.77707	0.764331	-0.09749	-0.03948	-0.02827	-0.01653	-0.01323	-0.00903	0.030573
	6.538883	3.09E-15	3.957022	0.594444	-2.1307	1.628362	-0.34415	-1.20431	5.29E-16
y6	21.16027	-9E-15	-4.89115	1.923661	2.633695	-2.014	-1.1137	1.48861	-2.6E-15
	2.737018	1.146497	0.382853	0.02262	0.111005	0.064913	0.007582	0.035463	0.04586
	-24.687	9.25E-15	5.706339	-2.24427	-3.07264	2.349669	1.299315	-1.73671	3.29E-15
y7	52.20891	16.26346	-2.56999	9.31507	-1.38384	6.681421	2.747837	-4.93844	-3.25269
	-3.47113	-2.17466	-1.29188	-0.14371	-0.00232	-0.12744	-0.16682	-0.06962	-0.01492
	-44.0371	-13.7179	2.167735	7.857058	1.167242	-5.63563	-2.31774	1.165468	2.743574
y8	-45.9033	36.62974	-7.20131	0.213244	1.478873	7.838861	7.179064	-5.79394	1.687733
	8.369487	-0.7807	-1.0921	0.237645	0.005983	0.075893	-0.11307	0.041461	0.031228
	40.00084	-38.4679	7.491774	0.839796	-1.32242	-8.59411	-7.48963	6.352165	-1.32001
y9	43.11368	52.70536	-17.1615	13.17257	-2.23665	-5.93474	14.81563	4.386548	1.245248
	-15.5685	1.020846	-1.35682	-0.11928	-0.01282	0.175472	-0.07441	0.095863	-0.04083
	-26.3236	-50.3016	16.05913	-12.9309	1.642996	5.043795	-13.932	-3.72802	-1.72608
y10	-10.1478	23.23956	-25.8836	-13.3406	2.459873	-14.8823	17.61887	10.99999	-0.64791
	16.79924	2.46454	-1.2522	-0.20244	0.01751	-0.04434	0.015255	-0.02422	0.016914
	-6.64245	-25.6439	26.9846	13.09898	-1.86623	15.77349	-18.5028	-11.6587	5.128787
y11	-13.9103	-2.1E-14	-11.3672	-1.26457	6.120826	-4.68063	0.732122	3.459598	-1.4E-14
	-4.77707	0.764331	-0.09749	-0.03948	-0.02827	-0.01653	-0.01323	-0.00903	0.030573
	17.43702	2E-14	10.55206	1.585184	-5.68188	4.344965	-0.91774	-3.2115	1.32E-14
y12	47.61061	-4E-14	-11.0051	4.328237	5.925814	-4.5315	-2.50582	3.349373	-2.8E-15
	2.737018	1.146497	0.382853	0.02262	0.111005	0.064913	0.007582	0.035463	0.04586
	-51.1373	4.05E-14	11.82027	-4.64885	-6.36476	4.867172	2.691438	-3.59747	3.41E-15
Yah	3.695731	2.010503	-2.89689	-5.26964	0.039087	0.187797	-0.16393	-0.01665	0.000376

Tabel 5. Nilai b_h

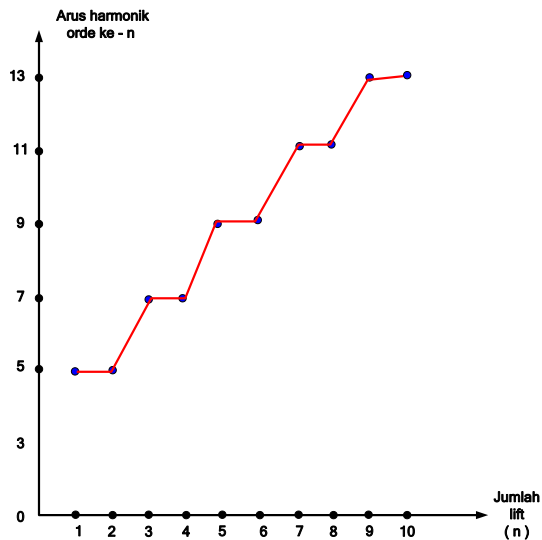
h	1	5	7	9	11	15	17	21	23
y1	-8.91452	1.414921	1.411689	-0.41292	-0.76014	0.092066	0.469185	0.068049	-0.28298
	8.643684	0.600816	-0.06782	-0.15642	-0.01966	0.072597	0.026714	-0.03966	-0.02403
	0.32698	1.024264	0.851866	0.148912	0.002841	0.204077	0.29958	0.150839	0.035147
y2	3.699474	1.839548	5.36598	-1.92592	0.91446	-1.33498	1.414028	-0.98673	-0.36771
	-8.79941	1.884776	-0.26219	-0.0187	0.024921	0.123846	0.096569	-0.06766	0.012935
	7.863753	3.67696	-7.20195	2.462379	0.072364	1.215304	-2.02361	0.898268	0.725393
y3	12.00619	-7.21228	11.11071	2.76241	-1.09008	-3.26399	1.471696	-2.41251	1.442455
	6.44867	2.46454	-0.56202	0.287979	-0.03096	0.07268	0.179632	0.039708	0.016914
	-14.6659	4.808326	-8.94716	-1.23606	-0.15705	2.810094	-1.33176	2.077026	-0.96167
y4	-28.9905	-20.8119	14.35022	2.668917	0.736272	1.874041	-0.68603	1.385161	-1.27746
	1.322129	1.020846	-0.76735	-0.23702	0.028574	-0.18468	0.193833	0.100894	-0.04083
	31.6507	23.21665	-16.5145	-4.19542	0.428868	-1.42011	0.546085	-1.04964	0.79667
y5	13.8541	-8.4	1.020843	1.259464	0.549684	0.420347	0.729163	0.310691	-1.68
	-3.47074	-3.3E-16	-0.30005	-0.02868	0.086996	-0.05087	0.009614	0.027793	-1.1E-17
	-9	7.2	-1.28571	-0.81818	-0.69231	-0.52941	-0.47368	-0.3913	1.44
y6	-15.8754	-16.2	-0.0178	-1.44322	-4.31728	-3.30145	-0.83555	-2.4402	-3.24
	8.423674	-6.3E-16	-0.7816	0.069617	0.08065	-0.04716	-0.02333	0.025765	-4.5E-17
	8.021286	16.8	7.854102	0.729208	4.229132	3.234042	0.422173	2.390379	3.36
y7	-2.46575	36.26346	30.51202	4.344645	-1.04494	6.940586	10.65609	5.129998	0.747309
	14.4583	0.900773	-0.10167	-0.23451	-0.02948	0.108841	0.040051	-0.05946	-0.03603
	-10.5724	-33.1179	-27.5437	-4.81481	-0.09186	-6.59848	-9.65409	-4.87714	-1.13643
y8	-22.5807	14.09554	29.37141	-10.1342	0.670238	-5.38615	8.159654	-3.96107	-2.81911
	-9.79941	1.884776	-0.26219	-0.0187	0.024921	0.123846	0.096569	-0.06766	0.012935
	34.16394	-15.9339	-31.2055	18.67062	0.317485	5.266475	-8.76924	3.892612	3.186788
y9	60.89117	-23.2396	40.93371	6.882503	-0.48458	-12.6307	5.910761	-9.33573	4.647012
	6.44867	2.46454	-0.56202	0.287979	-0.03096	-0.07268	0.179632	0.039708	0.016914
	-83.5509	20.83561	-38.7702	-5.35616	-0.68055	12.1768	-5.77084	9.000242	-1.16712
y10	-61.7401	-59.5052	41.8736	9.661083	0.021513	4.240815	-1.59615	3.134515	-2.60521
	1.322129	1.020846	-0.76735	-0.23702	0.028574	-0.18468	0.193833	0.100894	-0.04083
	84.40031	61.90993	-44.0379	-11.1876	1.143628	-3.78688	1.456199	-2.799	2.124413
y11	28.8541	-20.4	3.1637	2.6231	1.703531	1.3027	1.518637	0.962865	-4.08
	-3.47074	-8E-16	-0.30005	-0.02868	0.086996	-0.05087	0.009614	0.027793	-1E-16
	-24	19.2	-3.42857	-2.18182	-1.84615	-1.41176	-1.26316	-1.04348	3.84
y12	-24.4696	-34.2	-16.4329	-2.22451	-8.84489	-6.76649	-1.28787	-5.00132	-6.84
	8.423674	-1.3E-15	-0.7816	0.069617	0.08065	-0.04716	-0.02333	0.025765	-2.2E-17
	16.61552	34.8	16.26921	1.510502	8.760345	6.699087	0.874501	4.951499	6.96
Ybh	8.118603	4.124687	-1.21143	-5.14382	-0.01559	-0.07504	0.386677	0.059843	-0.07122

Tabel 6. Nilai arus harmonisa tiap orde ke-n

n	1	5	7	9	11	15	17	21	23
ao	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	3.695731	2.010503	-2.89689	-5.26964	0.039087	0.187797	-0.16393	-0.01665	0.000376
bn	8.118603	4.124687	-1.21143	-5.14382	-0.01559	-0.07504	0.386677	0.059843	-0.07122
ln	8.92021	4.588591	3.139995	7.36396	0.042082	0.202235	0.41999	0.062117	0.071222
ln ²	79.57014	21.05517	9.859567	54.22798	0.001771	0.040899	0.176392	0.003859	0.005073
THD	62.65%								

Dari perhitungan di atas dapat dianalisa bahwa setiap penambahan beban 2 lift dan penambahan orde harmonisa sebelumnya penambahan orde ke-7 ditambah orde ke-7 menghasilkan orde ke-9 arus harmonisanya dengan nilai arus harmonisa orde ke-9 sebesar 7,36396 A.

Melalui perhitungan di atas kita dapat membuat pendekatan bahwa setiap penambahan beban 2 lift, dipengaruhi adanya penambahan kelipatan orde arus harmonisanya sebelumnya, sehingga dapat membuat ekstrapolasi banyaknya lift terhadap arus harmonisa orde ke-n dengan grafik ekstrapolasi digambarkan pada gambar 15.



Gambar 15. Grafik ekstrapolasi antara jumlah lift dengan arus harmonisa orde ke-n

Dari grafik ekstrapolasi di atas kita dapat melihat bahwa banyaknya setiap penambahan beban 2 lift yang digunakan maka akan semakin meningkatnya pula terjadinya orde ke-n arus harmonisanya. Maka dari itu, melalui pendekatan analisa ini kita bisa memprediksi jumlah lift pada gedung-gedung bertingkat terhadap orde arus harmonisa ke-n nya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan percobaan dan analisis data harmonisa yang ditimbulkan akibat beban *variable speed drive* pada lift di gedung STT-PLN, maka dapat disimpulkan :

1. Pada percobaan satu lift beroperasi dan dua lift beroperasi bersamaan komponen arus harmonisa terbesar pada orde ke-5, dengan nilai rata-rata arus harmonisa pada orde ke-5 pada masing-masing fasa adalah sebesar 4,5. Pada percobaan tiga lift beroperasi bersamaan dan empat lift beroperasi bersamaan komponen arus

harmonisa terbesar pada orde ke-7, dengan nilai rata-rata arus harmonisa pada kondisi orde ke-7 pada masing-masing fasa adalah 9,8

2. Dari kombinasi berbagai percobaan bahwa penggunaan *variable speed drive* menyebabkan timbulnya arus harmonisa yang didominasi oleh komponen arus harmonisa orde kelima dan ketujuh.
3. Setelah menghitung ekstrapolasi bahwa, setiap penambahan beban 2 lift, dipengaruhi adanya penambahan kelipatan orde arus harmonisanya sebelumnya. Melalui pendekatan ekstrapolasi terlihat bahwa banyaknya setiap penambahan beban 2 lift yang digunakan maka akan semakin meningkatnya pula terjadinya orde ke-n arus harmonisanya
4. Ketinggian gedung tidak mempengaruhi adanya perubahan orde arus harmonisanya.

DAFTAR PUSTAKA

- Antono, Djodi. 2004. "*Harmonisa Sistem Penggerak Dengan Kecepatan Yang Dapat Diatur*", Jurnal ISSN : 2085 – 6245, Politeknik Negeri Semarang.
- Arrillaga, J., Bradley D.A, Bodger P.S. 1985. *Power System Harmonics*, (New York : John Willey dan Sons).
- G.C.Barney dan A.G.Loher. 1990. *Elevator Electric Drivers*, Chishester, Ellis Horwood limited.
- Hyat dan Kemmerly, et al., *Rangkaian Listrik Jilid 2*, Erlangga.
- Rashid, M.H. 1999. *Elektronika Daya Jilid 1*, Jakarta, P.T. Prehallindo.
- Soewono, Soetjipto. 2015. "*Bahan Kuliah Harmonisa*", Jakarta.
- Sutanto, Jusmin dan Haroen, Hanuarsyah. 1999. "*Prediksi pengaruh beban non Linier Terhadap Sistem Distribusi Tenaga Listrik*", Proceedings Third Workshop on Electro Communication and Information, Bandung Institute of Technology, March, 3-4 March.