

ANALISIS UNJUK KERJA HARMONIK DI INSTALASI LISTRIK INDUSTRI DAN UPAYA PENANGGULANGANNYA

Janny F. Abidin¹⁾

¹⁾Jurusan Teknik Elektro Sekolah Tinggi Teknologi Nasional
wiyen_jogja@ymail.com

Abstrak - Beban tak linier seperti konverter statis, pengaturan kecepatan motor (*adjustable speed drives*) dan catu daya kontinu (*uninterruptible power systems*), merupakan beban yang paling banyak digunakan pada jaringan tenaga listrik suatu industri moderen. Hal ini menimbulkan efek samping pada sistem tenaga listrik yaitu timbulnya arus harmonik sebagai akibat perubahan energi listrik. Arus harmonik akan mengakibatkan distorsi bentuk gelombang tegangan sehingga tidak berbentuk sinusoidal murni lagi. Hal ini sangat mengganggu bagi peralatan listrik yang didesain beroperasi pada gelombang tegangan sinusoidal. Akibatnya banyak kerugian yang akan diderita, di antaranya peralatan listrik menjadi lebih cepat panas sehingga dapat terjadi kegagalan isolasi yang berujung pada kerusakan atau makin pendek umur dari peralatan. Penelitian bertujuan untuk mengetahui watak harmonik serta dapat menganalisis arus dan tegangan harmonik, menghitung *Total Harmonic Distortion* (THD). Selain mengetahui watak dan menganalisis harmonik, peneliti juga dapat mendesain tapis paralel (*shunt filter*) untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD).

PENDAHULUAN

Distorsi bentuk gelombang tegangan dan arus yang disebabkan oleh harmonik merupakan satu dari perhatian utama kualitas daya dalam industri daya listrik. Upaya yang sungguh-sungguh telah dilakukan dalam tahun-tahun belakangan ini untuk memperbaiki manajemen distorsi harmonik dalam sistem daya. Standar untuk kendali harmonik telah ditetapkan oleh IEEE dan IEC.

Beban tak linier seperti konverter statis, pengaturan kecepatan motor (*adjustable speed drives*) dan catu daya kontinu (*uninterruptible power systems*), merupakan beban yang paling banyak digunakan pada jaringan tenaga listrik suatu industri moderen. Hal ini menimbulkan efek samping pada sistem tenaga listrik yaitu timbulnya arus harmonik sebagai akibat perubahan energi listrik.

Arus harmonik akan mengakibatkan distorsi bentuk gelombang tegangan sehingga tidak

berbentuk sinusoidal murni lagi. Hal ini sangat mengganggu bagi peralatan listrik yang didesain beroperasi pada gelombang tegangan sinusoidal. Akibatnya banyak kerugian yang akan diderita, di antaranya peralatan listrik menjadi lebih cepat panas sehingga dapat terjadi kegagalan isolasi yang berujung pada kerusakan atau makin pendek umur dari peralatan. Kesalahan ukur pada kwh-meter jenis induksi, makin besarnya rugi daya pada mesin listrik, kegagalan fungsi pada sistem elektronik, sistem komputer, sistem kendali dan sistem rele atau pengaman (Wagner dkk, 1993). Harmonik telah menunjukkan efek rusaknya peralatan transformator, sekering, motor induksi akan mengalami kegagalan pengasutan (*cogging*) dan pemutus tenaga (*circuit breaker*) akan mengalami kesalahan pemutus arus (Sankaran, 1995).

IEEE telah menerbitkan standar tentang batas-batas total distorsi harmonik tegangan (*voltage total harmonic distortion*), total distorsi

harmonik arus (*current total harmonic distortion*) dan pengendalian harmonik dalam sistem tenaga pada titik sambung bersama (*point of common coupling*), yaitu standar IEEE 519-1992.

Standar IEEE 519-1992 menawarkan tiga solusi untuk mengendalikan arus harmonik dalam jaringan tenaga listrik, yaitu:

1. Tapis paralel (*shunt filter*)
2. Penggeseran fasa (*phase multiplication*) dan
3. Kompensasi atau injeksi harmonik (*harmonic compensation or injection*)

Penelitian ini menggunakan solusi nomor satu, yaitu dengan memasang tapis paralel (*shunt filter*) di dekat beban tak linier penyebab sumber harmonik (*harmonic source*) dengan pertimbangan bahwa di samping berfungsi sebagai tapis arus harmonik yang ditala pada frekuensi tertentu, tapis paralel juga dapat menyumbangkan KVAR dalam frekuensi dasar kedalam sistem tenaga listrik sehingga faktor daya beban tak linier semakin baik. Alasan lain adalah rangkaiannya sederhana dan memerlukan hanya sedikit pemeliharaan.

1.1 Tujuan Penelitian

Penelitian bertujuan untuk mengetahui watak harmonik serta dapat menganalisis arus dan tegangan harmonik, menghitung *Total Harmonic Distortion* (THD). Selain mengetahui watak dan menganalisis harmonik, peneliti juga dapat mendesain tapis paralel (*shunt filter*) untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD).

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka

Beban tak linier adalah beban yang menarik gelombang arus menjadi tidak sinusoidal pada saat dicatu oleh sumber tegangan sinusoidal (IEEE-Standard 519-1992). Adanya beban-beban tak linier menimbulkan persoalan yang berhubungan dengan komponen

harmonik. Pengaruh adanya komponen harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi 3 yaitu tekanan pada sistem isolasi karena tegangan harmonik, pemanasan karena arus harmonik, kekacauan unjuk kerja peralatan (Ort Meyer, dkk, 1985).

Apabila terdapat arus terdistorsi akibat adanya beban tak linier maka jatuh tegangan di saluran juga terdistorsi sehingga terjadi perambatan harmonik dalam sistem tenaga listrik yang dapat mengganggu unjuk kerja sistem.

Bentuk gelombang yang meruncing adalah karakteristik dari arus eksitasi transformator, reaktor dan motor induksi juga menyerap arus yang tidak berbentuk sinus akibat dari arus eksitasi. Dapur busur listrik (*arc furnace*) merupakan sumber dari arus harmonik, semua jenis peralatan kontrol yang menggunakan thyristor (*thyristor drive*) dan penyearah (*rectifier*) juga membangkitkan arus harmonik. Bahkan sesungguhnya semua beban pada sistem tenaga listrik AC akan membangkitkan harmonik pada tingkat tertentu sekecil apapun (Ontoseno Penangsang, 2002). Standar IEEE 519-1992 telah menerbitkan standar tentang batas-batas total distorsi harmonik tegangan (*voltage total harmonic distortion*) pada titik sambung bersama adalah 5 % dan 7 % untuk total distorsi harmonik arus (*current total harmonic distortion*).

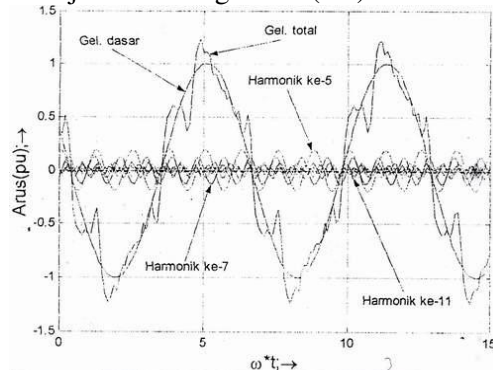
2.2 Landasan Teori

2.2.1 Definisi Harmonik

Harmonik didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari periodik atau besaran yang frekuensinya merupakan kelipatan bulat dari frekuensi fundamental. Apabila komponen frekuensinya dua kali frekuensi fundamental, maka disebut harmonik ke-2 (IEEE std 100-1992 [B-14]).

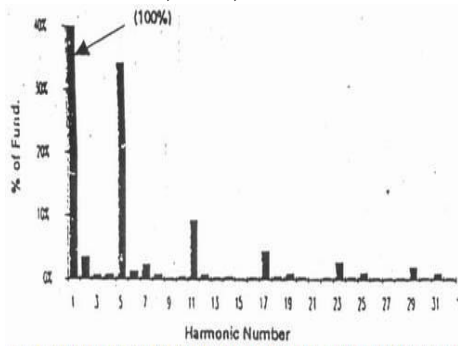
Jadi pada sistem daya 50 Hz, komponen harmonik, h , yang berbentuk sinusoidal mempunyai frekuensi:

$h = n \times 50$
 Hz.....(2.1)
 dimana n adalah bilangan bulat seperti ditunjukkan oleh gambar (2.1).



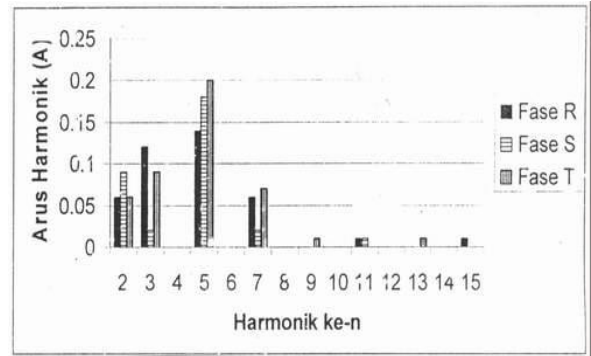
Gambar 2.1 Gelombang total dalam kawasan frekuensi

fundamental, gelombang harmonik ke-5, ke-7, ke-11 dan gelombang total atau gelombang terdistorsi yang dibentuk oleh gelombang fundamental, gelombang harmonik ke-5, ke-7, dan ke-11.



Gambar 2.2 Spektrum harmonik

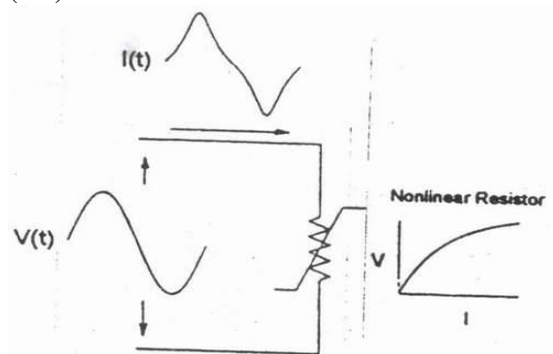
Amplitudo setiap harmonik dapat digambarkan dalam satu kurve yang disebut dengan spektrum harmonik. Spektrum distorsi harmonik suatu gelombang dapat disajikan dalam kawasan frekuensi seperti pada gambar (2.2). Spektrum distorsi harnomik gambar (2.2) memperlihatkan komponen fundamental dan komponen harmoniknya. Pada umumnya spektrum distorsi harmonik disajikan tanpa memperlihatkan komponen fundamental seperti pada gambar (2.3).



Gambar 2.3 Spektrum harmonik dalam kawasan frekuensi

2.2.2 Distorsi Harmonik

Distorsi harmonik disebabkan oleh beban-beban tak linier dalam sistem daya, dimana besar arus tidak proporsional dengan tegangan yang digunakan. Misalnya sebuah tegangan yang dikenakan pada sebuah resistor yang tak linier, maka bentuk gelombang arusnya adalah sinusoidal yang sedikit cacat/terdistorsi bilamana tegangan tersebut dinaikkan beberapa persen maka akan menyebabkan arus menjadi dua kali lebih besar dan bentuk gelombangnya akan sangat berbeda sekali, seperti diperlihatkan oleh gambar (2.4).



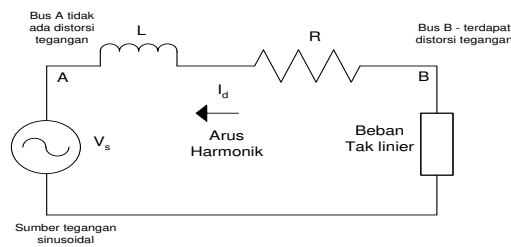
Gambar 2.4 Distorsi arus oleh resistor tak linier

Bentuk gelombang yang terdistorsi dapat diekspresikan sebagai jumlah dari gelombang sinusoidal, bilamana sebuah gelombang sama dengan satu siklus hingga ke siklus berikutnya, maka dapat direpresentasikan sebagai jumlah dari gelombang sinus murni yang mana frekuensi dari masing-masing sinusoidal

tersebut adalah kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental yang gelombangnya terdistorsi. Jumlah sinusoidal ini direpresentasikan dalam analisis fourier.

2.2.2.1 Tegangan dengan distorsi arus

Distorsi tegangan pada sistem tenaga disebabkan oleh interaksi antara arus beban yang terdistorsi dan impedansi linier sistem. Dimisalkan bahwa sumber pada gambar (2.5) adalah ideal sehingga tidak ada distorsi pada titik A. Sumber tersebut mengalirkan daya ke beban tak linier pada bus B melalui jaringan distorsi linier. Impedansi linier Z pada jaringan tersebut terdiri dari elemen induktif L dan elemen resistif R.



Gambar 2.5 Hubungan antara distorsi arus dan distorsi tegangan

Arus yang mengalir karena beban tak linier akan menentukan distorsi tegangan pada bus B dapat dicari dengan:

$$V_B = V_S - (I_d \times Z) \dots\dots\dots(2.2)$$

Bagian dari "IdZ" adalah taksinusoidal karena Id adalah taksinusoidal. Jumlah distorsi tegangan pada bus B akan tergantung dari besarnya bagian "IdZ" ini. Jika sistem tidak mempunyai impedans (Z = 0, tidak ada rugi-rugi) maka tidak ada distorsi yang terjadi pada bus B. Bagian drop tegangan "IdZ" dapat dicari dengan

$$I_d Z = \sum_{n=1}^{n=N} I_h (R \times jX_h) \dots\dots\dots(2.3)$$

$$X_h = 2\pi f h L \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan, Id adalah arus beban tak linier
 Ih adalah arus harmonik ke-h

Xh adalah reaktansi sistem untuk harmonik ke-n
 fo frekuensi dasar
 h orde harmonik
 L adalah induktansi sistem
 R adalah resistansi sistem

2.2.2.2 Distorsi harmonik total/total harmonic distortion (THD)

Faktor distorsi menggambarkan tingkat gangguan harmonik pada jaringan listrik. Ada beberapa pengukuran yang umum digunakan, salah satu yang paling umum adalah distorsi harmonik total (THD) yang akan digunakan dalam penelitian ini, untuk tegangan ataupun arusnya.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots(2.5)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana V1 dan I1 merupakan fundamental sedangkan Vh dan Ih komponen harmonik. Ukuran dari distorsi individual untuk tegangan dan arus harmonik ke-h, masing-masing didefinisikan sebagai Vh/V1 dan Ih/I1

2.2.2.3 Distorsi kebutuhan total /total demand distortion (TDD)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana IL adalah arus beban maksimum pada frekuensi fundamental di point of common coupling (PCC), dihitung sebagai arus rata-rata dari beban maksimum selama dua belas bulan sebelumnya.

2.2.2.4 Distorsi faktor daya

Tegangan dan arus yang mengandung komponen harmonik mempunyai nilai RMS sebagai berikut:

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

dan

$$I_{rms} = I_{mrs} I_1 = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \dots\dots\dots(2.9)$$

sehingga total faktor daya menjadi:

$$Pf_{tot} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.10)$$

Sebagian besar kasus hanya sedikit porsi daya rata-rata yang disumbangkan oleh komponen harmonik dan total distorsi tegangan kurang dari 10 % sehingga:

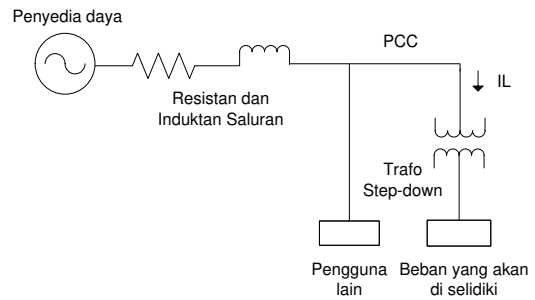
$$Pf_{tot} \approx \frac{P_1}{V_1 I_1} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$Pf_{tot} \approx \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot Pf_{dist} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana $\cos(\theta_1 - \delta_1)$ dikenal sebagai *displacement power factor* dan Pf_{dist} disebut *distortion power factor*.

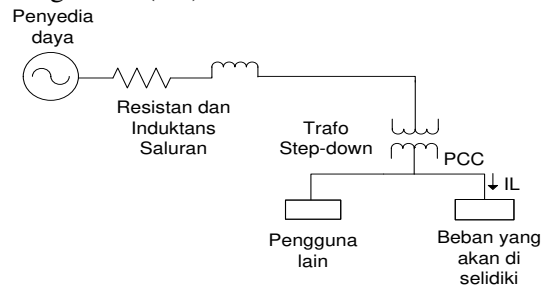
2.2.4 Titik Sambung Bersama/Point of Common Coupling (PCC)

PCC merupakan titik lokasi pada jaringan tempat pengguna dan beban lain dapat disambung. PCC dapat berada pada primer atau sekunder transformator pensuplai, tergantung apakah ada atau tidak pengguna lain yang dilayani dari transformator tersebut. Gambar (2.6) di bawah ini melukiskan PCC yang berada pada primer atau pada sisi tegangan tinggi transformator.



Gambar 2.6 PCC sisi tegangan tinggi transformator

Pengukuran arus atau tegangan harmonik dapat juga dilakukan pada sisi tegangan rendah walaupun PCC dipilih pada sisi tegangan tinggi transformator pensuplai. Hasil pengukuran pada sisi tegangan rendah tersebut kemungkinan direfresentasikan dengan perbandingan belitan transformator yang ditunjukkan oleh gambar (2.7).



Gambar 2.7 PCC sisi tegangan rendah transformator

2.2.6 Dampak Harmonik

Setiap komponen sistem tenaga dapat dipengaruhi oleh harmonik walaupun dengan akibat yang berbeda. Namun demikian, komponen tersebut akan mengalami penurunan kerja dan bahkan akan mengalami kerusakan. Salah satu dampak yang umum dialami adalah panas lebih pada kawat netral dan transformator sebagai akibat timbulnya harmonik ketiga yang dibangkitkan oleh peralatan listrik satu fase.

Arus beban setiap fase dari beban linier yang seimbang pada frekuensi dasarnya akan saling mengurangi sehingga arus netral menjadi nol. Sebaliknya beban tak linier satu fase akan menimbulkan harmonik kelipatan tiga ganjil yang disebut *triplen*

harmonic (harmonik ke-3, ke-9, ke-15, dst). Harmonik ini tidak menghilangkan arus netral, tetapi dapat menghasilkan arus netral yang melebihi arus fasenya.

Selain itu ada beberapa akibat yang ditimbulkan oleh adanya harmonik dalam sistem tenaga listrik, antara lain:

1. Timbulnya getaran mekanis pada panel listrik yang merupakan getaran resonansi mekanis akibat arus harmonik frekuensi tinggi.
2. Harmonik dapat menimbulkan tambahan torsi pada KWH meter jenis elektromekanis yang menggunakan program induksi berputar. Sebagai akibatnya, putaran piring akan lebih cepat atau terjadi kesalahan ukur dalam KWH meter karena piringan induksi tersebut dirancang hanya pada frekuensi dasar.
3. Pemutusan beban dapat bekerja dibawah arus pengenalnya atau mungkin tidak bekerja pada arus pengenalnya. Pemutus beban yang dapat terhindar dari gangguan harmonik umumnya adalah pemutus beban yang mempunyai respon terhadap arus rms sebenarnya (*true rms current*) atau kenaikan temperatur karena arus lebih.

2.2.7 Batas Distorsi Harmonik

Ada berbagai batas distorsi harmonik di beberapa negara. Kebanyakan industri menggunakan batas distorsi yang dikeluarkan oleh IEEE std-519-1992 (B-15).

2.2.7.1 Batas distorsi arus

Tabel 2.3 Batas distorsi arus untuk sistem distribusi menurut IEEE 519-1992(120 V sampai 69000 V)

Distorsi arus harmonik maksimum (% dari I _L)						
Urutan harmonik individual (harmonik ganjil)						
I _m /I _L	< 11	h < 17	h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
< 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
< 100	10.00	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
< 1000	12.5	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	7.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.2.7.2 Batas distorsi tegangan

Tabel 2.4 Batas distorsi tegangan pada PCC

menurut IEEE 519-1992

Tegangan Bus pada PCC	Batas harmonik indi (%)	THD _V (%)
V ≤ 69 KV	3.0	5.0
69 KV – 161 KV	1.5	2.5
V ≥ 161	1.0	1.5

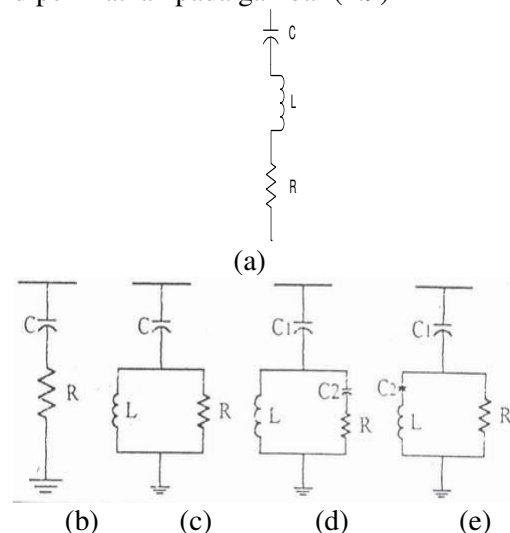
2.3 Teknik Mengurangi Distorsi Harmonik

Ada berbagai teknik yang dapat digunakan untuk memperbaiki gelombang cacat atau terdistorsi, antara lain: tapis, injeksi arus harmonik dan transformator penggeser fase. Teknik yang paling sederhana dan praktis diterapkan adalah tapis paralel pasif.

2.3.1 Filter Penala Tunggal/Single Tuned Filter (STF)

Umumnya tapis terbagi menjadi dua kelompok yaitu tapis pasif dan tapis aktif. Tapis pasif terbuat dari elemen-elemen kapasitor, induktor, dan resistor. Sedangkan tapis aktif terbuat dari komponen semi konduktor dengan prinsip kerja seperti pada elektronika daya.

Tapis pasif dapat berupa tapis penala dan tapis peredam seperti diperlihatkan pada gambar (2.9)



Gambar 2.9 Konfigurasi tapis pasif

Tapis paralel merupakan metode yang paling umum digunakan untuk mengendalikan aliran arus harmonik sehingga tapis ini dapat dirancang dari kombinasi seri reaktor (induktansi) dan kapasitor (kapasitansi) sehingga membentuk penala tunggal. Tapis paralel pasif bertindak sebagai "perangkap" karena menyerap arus harmonik yang ditalanya. Tapis LC dalam kenyataannya mempunyai nilai R yang berasal dari induktor sehingga rangkaian lengkap tapis diperlihatkan oleh gambar (2.9a).

Hubungan antara impedansi tapis dan frekuensi untuk nilai R, L dan C tertentu dengan frekuensi resonansi 50 Hertz adalah:

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \dots\dots\dots(2.16)$$

Ketajaman penalaan ditentukan oleh faktor kualitas yang didefinisikan sebagai perbandingan reaktansi induktif atau kapasitif pada frekuensi resonansi dengan resistansi tapis.

$$Q = \frac{X_o}{R} \dots\dots\dots(2.17)$$

Frekuensi resonansi diberikan oleh:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \dots\dots\dots(2.18)$$

dengan, f_1 adalah frekuensi fundamental

- L adalah induktansi tapis
- C adalah kapasitansi tapis
- X_C adalah reaktansi kapasitif pada frekuensi fundamental
- X_L adalah reaktansi induktif pada frekuensi fundamental

2.3.2 Desain Tapis Penala Tunggal

Langkah-langkah analisis dan desain pemasangan tapis harmonik panala tunggal adalah sebagai berikut:

2.3.2.1 Tentukan besarnya KVAR yang dibutuhkan

Umumnya KVAR yang dibutuhkan disesuaikan dengan tingkat kebutuhan perbaikan faktor daya pada sistem. Pada penelitian ini untuk

menentukan KVAR yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$Q_1 = P \tan \theta_1 \dots\dots\dots(2.20)$$

$$Q_2 = P \tan \theta_2 \dots\dots\dots(2.21)$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 \dots\dots\dots(2.22)$$

- dengan, P = Daya aktif (watt)
- Q_1 = Daya reaktif sebelum pemasangan tapis (VAR)
- S_1 = Daya semu sebelum pemasangan tapis (VA)
- S_2 = Daya semu setelah pemasangan tapis (VA)
- Q_2 = Daya semu setelah pemasangan tapis (VA)
- Q_c = Daya reaktif tapis
- θ_1 = Sudut sebelum pemasangan tapis
- θ_2 = Sudut setelah pemasangan tapis

2.3.2.2 Tentukan besarnya komponen tapis penala tunggal

nilai kapasitor terhubung delta pada gambar (2.11a), maka

$$I_c = \frac{Q_c}{V_{L-L}} \dots\dots\dots(2.23)$$

sehingga,

$$I_{FLcap} = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_{L-L}} \dots\dots\dots(2.24)$$

impedan ekuivalen fase tunggal dari kapasitor adalah

$$X_c = \frac{V_{L-L}}{I_c} \dots\dots\dots(2.25)$$

impedan tapis ditentukan dengan menggunakan

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} \dots\dots\dots(2.26)$$

nilai resistor yang berasal dari impedan tapis adalah

$$R = \frac{X_L}{Q} \dots\dots\dots(2.27)$$

3. Metode Penelitian.

3.1 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini dimaksud untuk mengurangi distorsi harmonik dengan mendesain suatu tapis penala tunggal dan kemudian mensimulasikan bentuk gelombang tegangan dan arus pada masing-masing bus atau rel sebelum dan setelah pemasangan tapis.

Sebelum tapis didesain perlu dipelajari keadaan spektrum tegangan harmonik pada sistem baru kemudian didesain suatu tapis berkenaan dengan keadaan harmonik tersebut.

Tahapan-tahapan yang harus dilalui dalam penelitian ini secara garis besar dibagi menjadi:

1. Membuat gambar sistem tenaga listrik pada lembar kerja program aplikasi ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) *powerstation versi 4.0.0*
2. Meng-input semua data yang diperlukan dalam simulasi yaitu data parameter sumber, saluran dan beban sistem.
3. Memulai langkah pertama yaitu melakukan simulasi pada saat tapis penala tunggal belum terpasang.
4. Kemudian simulasi dilakukan dengan memasang tapis penala tunggal.
5. Diagram alur dari proses penelitian ini terlihat pada gambar (3.1).

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data dengan Simulasi Program ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) Sebelum Pemasangan Tapis

Program dan analisis yang dibuat dalam penelitian ini diambil dari diagram satu garis data jaringan sistem kelistrikan Pabrik 4 dan Dyeing di PT.Vonex Indonesia. Gambar satu garis sistem kelistrikan ditunjukkan dilampiran. Beberapa data dalam penelitian ini

diperoleh dari hasil simulasi program ETAP (*Electrical Transient Analyser Program*) *PowerStation 4.0.0*. Data hasil simulasi program disajikan dalam tabel (4.1) dan (4.2).

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Sebelum Dipasang Tapis

Bus	V (Kv)	Arus I (A)	Aliran Daya Total		Pf (%)
			(Mw)	(Mvar)	
Bus A	20	94	2,85	1,59	87,26
Bus B	20	94	2,85	1,59	87,26
Bus C	0,38	385	0,22	0,1	90,27
Bus D	0,22	296	0,09	0,05	87,29
Bus E	0,38	284	0,16	0,08	90,24
Bus F	0,38	329	0,18	0,09	88,9
Bus G	0,22	575	0,18	0,07	92,36
Bus H	0,38	511	0,29	0,14	90,49
Bus I	0,38	159	0,08	0,05	83,77
Bus J	0,38	114	0,06	0,04	84,67
Bus K	0,38	875	0,49	0,24	89,95

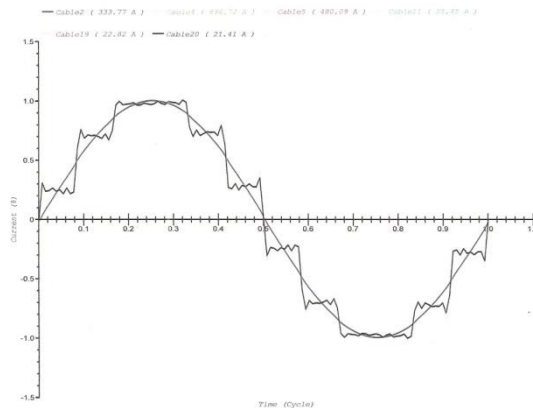
Tabel 4.2 Total THD_V dan THD_I Sebelum Dipasang Tapis

Bus	THD _V (%)	THD _I (%)
Bus A	2,62	0,1
Bus B	2,63	0,1
Bus C	2,93	0,78
Bus D	12,78	17,78
Bus E	2,92	0,59
Bus F	2,92	0,54
Bus G	13,89	3,92
Bus H	2,93	0,7
Bus I	2,93	0,59
Bus J	3,01	0,57
Bus K	3,01	0,55

Dari tabel (4.2) terlihat bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) pada masing-masing bus sebelum tapis dipasang. Grafik THD untuk masing-masing bus ditunjukkan pada gambar (4.1) dan (4.2). Spektrum harmonik arus dan tegangan ditunjukkan oleh gambar (4.3) sampai (4.9) serta gelombang

harmonik arus dan tegangan diperlihatkan oleh gambar (4.10) sampai (4.16).

Gambar 4.3 Spektrum Harmonik Tegangan Sebelum Dipasang Tapis



Gambar 4.15 Gelombang Harmonik Arus Sebelum Dipasang Tapis

4.2 Desain Tapis untuk Mengurangi Distorsi Harmonik

Dari data menunjukkan bahwa harmonik yang dominan berada di harmonik ke-11. Pada penelitian ini untuk mengurangi distorsi harmonik didesain tapis penala tunggal (*single tuned filter*) harmonik ke-11 pada masing-masing bus dengan diolah secara perhitungan manual untuk mendapatkan parameter komponen tapis harmonik. Langkah-langkah analisis dan desain pemasangan tapis harmonik penala tunggal harmonik ke-11 pada masing-masing bus adalah sebagai berikut:

4.2.1 Tentukan Besarnya KVAR yang Dibutuhkan

Dalam perhitungan komponen tapis, penulis hanya memberi contoh pada salah satu bus. Daya nyata pada bus Flat Card A = 60 KW, daya reaktif = 40 KVAR, faktor daya 0,84 dan apabila direncanakan dengan pemasangan tapis harmonik maka faktor daya akan diperbaiki dari 0,84 *lagging* menjadi 0,98 *lagging*, maka total KVAR tapis yang dibutuhkan adalah:

$$\text{Cos } \theta_1 \text{ (terbaca)} : 0,84$$

$$\text{Cos } \theta_2 \text{ (yang diinginkan)} : 0,98$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} 0,84 = 32,85^\circ$$

$$\theta_2 = \cos^{-1} 0,98 = 11,47^\circ$$

$$\text{Besarnya sudut pergeseran} = 32,85^\circ - 11,47^\circ = 21,38^\circ$$

4.2.2 Tentukan Komponen Tapis Penala Tunggal

$$Q_2 = P \text{ tg } \theta_2 = 60 \text{ kW} \cdot \text{tg} (11,47^\circ)$$

$$Q_2 = 12 \text{ KVAR}$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

4.3 Analisis Data dengan Simulasi Program ETAP Setelah Pemasangan Tapis

Data dalam penelitian ini diperoleh dari hasil simulasi program ETAP. Data hasil simulasi program disajikan dalam tabel (4.4) dan (4.5).

Tabel 4.4 Data Daya, Tegangan, Arus dan Faktor Daya

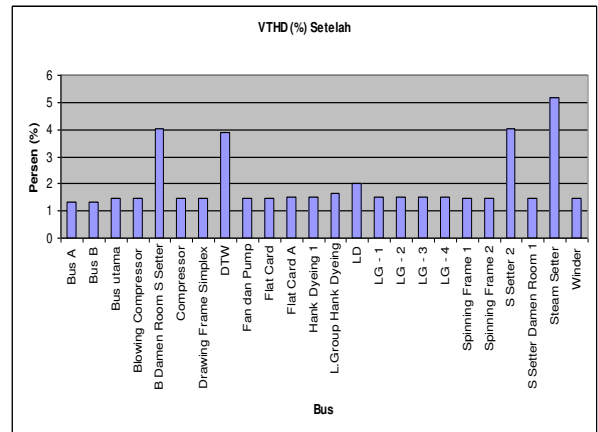
Bus	Teg V (kV)	Arus I (A)	Aliran Daya		Faktor daya Total (%)
			(Mw)	(Mvar)	
Bus A	20	94	3,10	1,36	91,57
Bus B	20	94	3,10	1,36	91,57
Blow Compсор	0,38	471	0,29	0,03	99,41
Damen R. S.	0,22	378	0,13	0,02	99,03
Compressor	0,38	283	0,16	0,08	90,24
Draw Frm S.	0,38	328	0,18	0,09	88,90
DTW	0,22	549	0,18	0,05	95,89
Fan dan Pump	0,38	509	0,29	0,14	90,49
Flat Card	0,38	204	0,12	0,03	97,38
Flat Card A	0,38	153	0,09	0,02	98,12
Hank Dyeing 1	0,38	873	0,49	0,24	90,02
L.G. Hank D.	0,38	4	0,0044	0,002	97,48

Hasil Simulasi Setelah Dipasang Tapis
Tabel 4.5 THD_V dan (THD_I) pada Bus
Setelah Dipasang Tapis

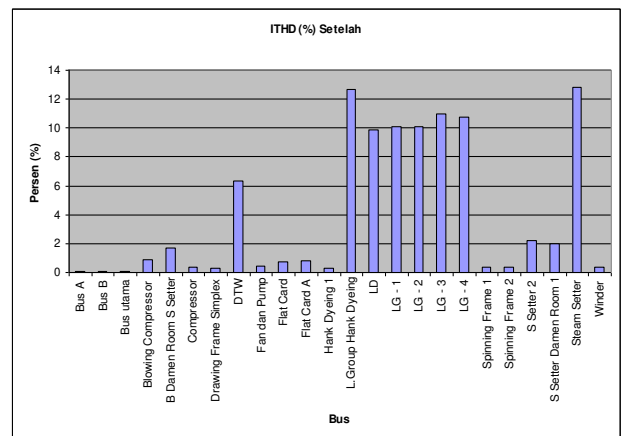
Bus	THD _V (%)	THD _I (%)
Bus A	1,32	0,06
Bus B	1,32	0,06
Bus utama	1,45	0,06
Blowing Compressor	1,46	0,87

Lanjutan Tabel 4.5

Bus	THD _I (%)	THD _V (%)
B Damen Room S Setter	4,04	1,66
Compressor	1,47	0,36
Drawing Frame Simplex	1,47	0,33
DTW	3,9	6,35
Fan dan Pump	1,47	0,43
Hank Dyeing 1	1,51	0,33
L.Group Hank Dyeing	1,66	12,64
LD	2	9,86
LG - 1	1,51	10,13
LG - 2	1,51	10,13
LG - 3	1,52	11
LG - 4	1,52	10,74
Spinning Frame 1	1,47	0,36
Spinning Frame 2	1,47	0,36
S Setter 2	4,02	2,19
S Setter Damen Room 1	1,46	1,98
Steam Setter	5,17	12,8
Winder	1,47	0,36

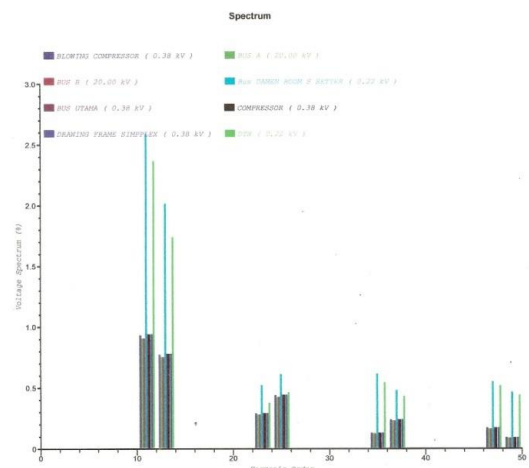


Gambar 4.17 Grafik THD_v (%) Setelah Pemasangan Tapis

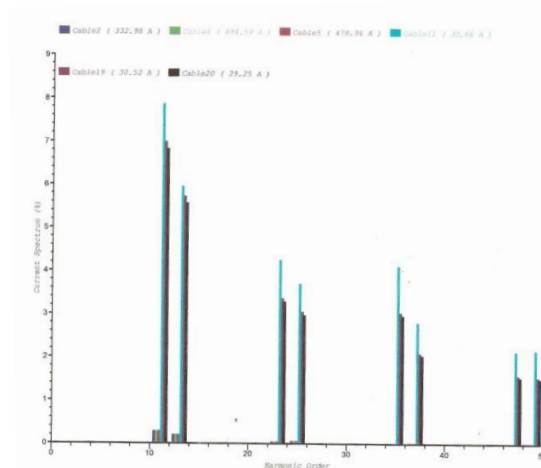


Gambar 4.18 Grafik THDi (%) Setelah Pemasangan Tapis

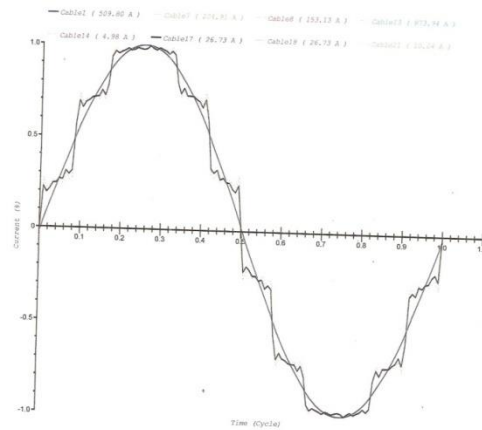
Dari tabel (4.5) terlihat bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) pada masing-masing bus setelah tapis dipasang mengalami pengurangan. Grafik pengurangan THD untuk masing-masing bus ditunjukkan pada gambar (4.17) dan (4.18). Spektrum harmonik arus dan tegangan ditunjukkan oleh gambar (4.19) sampai (4.25) serta gelombang harmonik arus dan tegangan diperlihatkan oleh gambar (4.26) sampai (4.32).



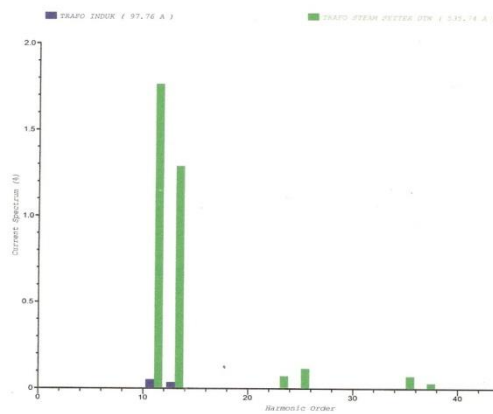
Gambar 4.19 Spektrum Harmonik Tegangan Setelah Dipasang Tapis



Gambar 4.24 Spektrum Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis



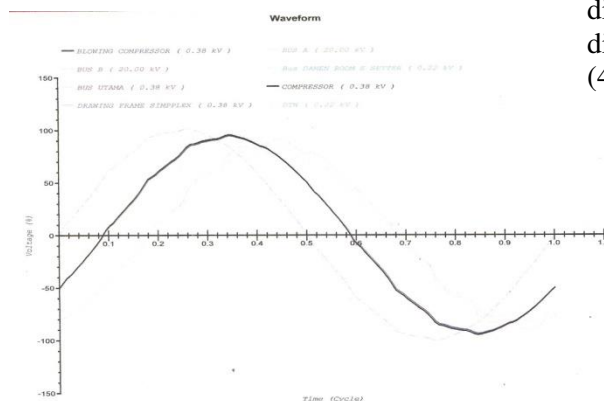
Gambar 4.29 Gelombang Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis



Gambar 4.25 Spektrum Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis

4.4 Perbandingan Analisa Data dengan Simulasi Program ETAP Sebelum dan Setelah Pemasangan Tapis

Dari tabel (4.6) terlihat bahwa pada kondisi dimana tapis setelah dipasang *Total Harmonic Distortion* (THD) mengalami penurunan. Selain mengurangi THD pada masing-masing bus juga memperbaiki daya jaringan yang ditunjukkan pada tabel (4.7). Perbandingan bentuk gelombang harmonik arus dan harmonik tegangan sebelum dipasang tapis dan setelah dipasang tapis untuk masing-masing bus ditunjukkan oleh gambar (4.35) sampai (4.48).



Gambar 4.26 Gelombang Harmonik Tegangan Setelah Dipasang Tapis

Tabel 4.6 Hasil Penelitian Besarnya THD Tanpa dan Dengan Tapis

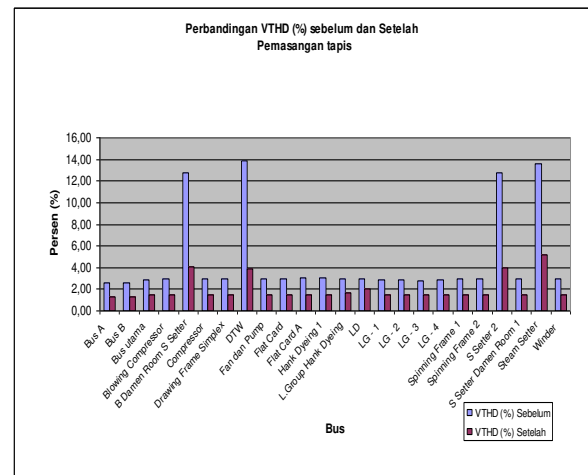
BUS	THD(%)				Ket
	THD _v		THD _i		
	Tanpa Tapis	Dgn Tapis	Tanpa Tapis	Dgn Tapis	
A	2,62	1,32	0,1	0,06	Turun
B	2,63	1,32	0,1	0,06	Turun
C	2,89	1,45	0,09	0,06	Turun
C	2,93	1,46	0,78	0,87	Turun
D	12,78	4,04	17,78	1,66	Turun
F	2,92	1,47	0,59	0,36	Turun
G	2,92	1,47	0,54	0,33	Turun
H	13,89	3,90	3,92	6,35	Turun
I	2,93	1,47	0,7	0,43	Turun
J	2,93	1,47	0,59	0,75	Turun
K	3,01	1,49	0,57	0,79	Turun
L	3,01	1,51	0,55	0,33	Turun
M	2,99	1,66	16,01	12,64	Turun
N	2,95	2,00	15,87	9,86	Turun
O	2,83	1,51	15,32	10,13	Turun
P	2,83	1,51	15,32	10,13	Turun
Q	2,82	1,52	15,34	11,00	Turun
R	2,83	1,52	15,33	10,74	Turun
S	2,93	1,47	0,59	0,36	Turun
T	2,93	1,47	0,59	0,36	Turun
U	12,78	4,02	3,02	2,19	Turun
V	2,97	1,46	3,02	1,98	Turun
W	13,61	5,17	17,78	12,80	Turun
X	2,92	1,47	0,59	0,36	Turun

Tabel 4.8 Kenaikan Daya Setelah Dipasang Tapis

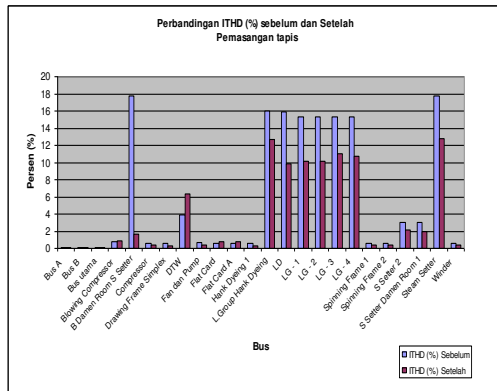
Bus	Kenaikan Daya (%)	Kenaikan Daya (MW)
A	8%	0,25
B	8%	0,25
C	8%	0,25
C	24%	0,07
D	30%	0,04
F	0%	0
G	0%	0
H	0%	0
I	0%	0
J	33%	0,04
K	33%	0,03
L	0%	0
M	0%	0
N	0%	0
O	50%	0,01
P	50%	0,01
Q	50%	0,01
R	50%	0,01
S	0%	0
T	0%	0
U	12,9 %	0,04
V	17,6 %	0,06
W	0%	0
X	0%	0
Total	9,03 %	1,07

Tabel 4.7 Perbandingan Daya Tanpa Tapis dan Dengan Tapis

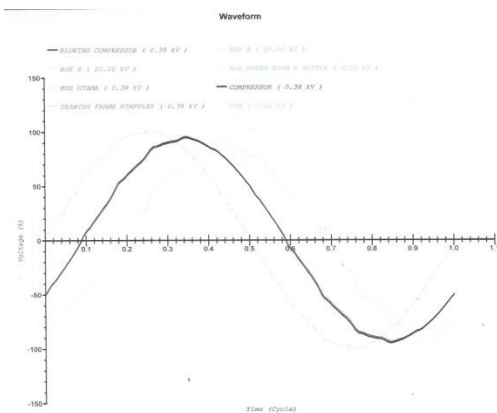
Bus	Daya					
	Tanpa Tapis			Dengan Tapis		
	P (M)	Q (%)	Pf (%)	P (M)	Q (%)	Pf (%)
A	2,85	1,59	87,3	3,1	1,36	91,57
B	2,85	1,59	87,3	3,1	1,36	91,57
C	2,85	1,59	87,3	3,1	1,36	91,57
C	0,22	0,1	90,3	0,29	0,03	99,41
D	0,09	0,05	87,3	0,13	0,02	99,03
F	0,16	0,08	90,2	0,16	0,08	90,24
G	0,18	0,09	88,9	0,18	0,09	88,9
H	0,18	0,07	92,7	0,18	0,05	95,89
I	0,29	0,14	90,5	0,29	0,14	90,49
J	0,08	0,05	83,8	0,12	0,03	97,38
K	0,06	0,04	84,7	0,09	0,02	98,12
L	0,49	0,24	89,9	0,49	0,24	90,02
M	0,004	0,003	85,3	0,004	0,002	97,48
N	0,004	0,003	86,3	0,004	0,001	99,94
O	0,01	0,01	85,2	0,02	0,003	99,82
P	0,01	0,01	85,2	0,02	0,003	99,82
Q	0,01	0,01	85,3	0,02	0,003	99,21
R	0,01	0,01	85,3	0,02	0,004	99,44
S	0,49	0,26	88,6	0,49	0,26	88,56
T	0,26	0,14	88,4	0,26	0,14	88,42
U	0,27	0,14	88,8	0,31	0,09	95,93
V	0,28	0,14	89,3	0,34	0,03	99,57
W	0,01	0,0061	85,1	0,01	0,0031	99,2
X	0,18	0,1	88,6	0,18	0,1	88,62
Total (KW)	11,84	Total (KW)	12,91	Total Kenaikan Daya (%)	9,03	



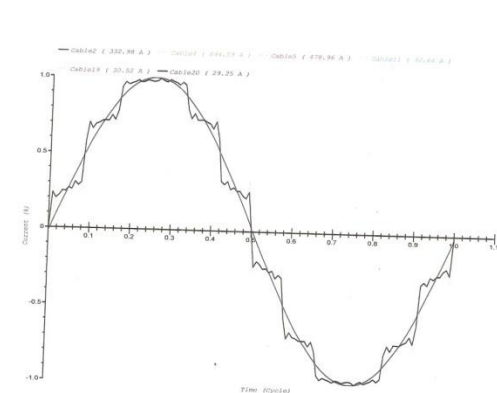
Gambar 4.33 Grafik Perbandingan THD_v



Gambar 4.34 Grafik Perbandingan THD₁



Gambar 4.36 Gelombang Harmonik Tegangan Setelah Dipasang Tapis



Gambar 4.46 Gelombang Harmonik Arus Setelah Dipasang Tapis

5. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang telah dikemukakan pada bab sebelumnya mengenai reduksi *Total Harmonic Distortion* (THD) terhadap perbaikan kualitas daya pada untai 3 fase 4 kawat, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemasangan tapis penala tunggal untuk harmonik ke-11 pada masing-masing bus dalam penelitian terbukti dapat mengurangi THD. Untuk tegangan dari 13.89 % menjadi 3.90 % dengan persen penurunan 9.99 % dan untuk arus dari 17.78 % menjadi 12.80 % dengan persen penurunan 4.98 %.
2. Pemasangan tapis penala tunggal disamping mengurangi THD juga menyumbang KVAR dalam frekuensi dasar, sehingga dapat memperbaiki faktor daya beban tak linier dan kualitas daya akan semakin baik.
3. Perbaikan faktor daya beban dari 0.88 *lagging* menjadi 0.95 *lagging*.

6. DAFTAR PUSTAKA

Arrilangga J., Bradley, D.A, Bodger, P S, 1985, *Power System Harmonic*, John Willey & Sons, New York.

IEEE Std. 519-1992., 1994, *IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converter*. Internet.

M.Isnaeni B.S., 2000, *Pengurangan Arus Harmonik Netral Pada Untai 3 Fase 4 Kawat Berbeban Lampu Fluoresen*, Tesis, UGM Yogyakarta.

Ort Meyer.,dkk, 1985, *Pengaruh Adanya Komponen Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik*.

Penangsang O., 2002, *Faktor Daya dan Harmonisa pada Sistem Kelistrikan yang Mengandung Harmonisa*, Tutorial SSTE, ITS Surabaya.

Roger C. Dugan., Mark F. McGranaghan, H. Wayne Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, New York.

Suprianto., Tumiran, Hamzah Berahim, 2005, *Evaluasi Harmonik Pada Sistem Tenaga Listrik (Studi Kasus P.T Krakatau Steel)*, Makalah Seminar Nasional Teknik Ketenagalistrikan, Fak. Teknik UNDIP Semarang.