

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Penelitian Terkait

Ada berbagai macam penelitian yang telah dilakukan mengenai harmonisa, mulai dari pengukuran tingkat harmonisa seperti pada peralatan distribusi tenaga listrik, dampak yang terjadi pada peralatan yang memiliki harmonisa di atas standar, dan berbagai cara menanggulangi harmonisa yang terjadi baik menggunakan susunan kapasitor bank maupun penggunaan filter. Pada peralatan seperti transformator distribusi juga ada berbagai macam penelitian mengenai harmonisa, berikut ini merupakan rangkuman dari penjabaran berbagai penelitian yang terkait dengan analisis harmonisa pada transformator distribusi dan pengaruhnya terhadap arus netral dan penanggulangannya.

Analisis pengaruh harmonisa terhadap arus netral, rugi-rugi, dan penurunan kapasitas pada transformator distribusi. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran terhadap transformator distribusi di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro untuk dapat mengetahui kandungan harmonisa yang terjadi pada hari libur dan hari kerja, serta pengaruh harmonisa terhadap besarnya arus yang mengalir di kawat netral. Hasil dari penelitian tersebut, didapat persentase pembebanan yang dialami oleh transformator sangat rendah yaitu rata-ratanya kurang dari 20%. Dari hasil pengukuran diketahui THDi paling besar yang terukur pada hari libur terjadi di transformator Teknik Sipil sebesar 38,70% dan THDi paling besar yang terukur pada hari kerja di transformator Teknik Mesin sebesar 26,05%. Sedangkan untuk THDv diketahui tidak ada yang melebihi standar. Arus netral terbesar terjadi pada saat beban puncak atau terjadi saat aktifitas tinggi yaitu, terdapat pada transformator Teknik Elektro sebesar 33.834 A dan THDi yang terjadi sebesar 19,24%. Disebabkan pada waktu tersebut memiliki pembebanan dan kandungan harmonisa ganjil kelipatan 3 yang cukup besar. Dari hasil penelitian ini dapat dilihat bahwa, harmonisa sangat mempengaruhi besar arus yang mengalir pada kawat netral, dimana persentase arus netral yang disebabkan oleh harmonisa cukup besar yaitu, 20% hingga 96% [7].

Pengaruh harmonisa terhadap arus netral transformator distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh harmonisa terhadap arus netral transformator distribusi. Berdasarkan hasil pengukuran dan proses analisis menunjukkan THD arus di Transformator R.S.U Sari Mutiara melebihi standar dimana fasa R melebihi sebesar 2,172%, fasa S sebesar 11,533% dan fasa T sebesar 2,746%, sedangkan untuk THD

tegangan tidak ada yang melebihi standar IEEE 519, selain itu besar arus urutan nol pada fasa R (3,487 A), S (6,761 A), T (3,316 A) dan fasa Netral (13,561 A). Sedangkan besar arus netralnya tergantung dari besar komponen harmonisa ganjil kelipatan 3, dimana menunjukkan bahwa harmonisa memberikan penambahan yang cukup besar terhadap besar arus netral [8].

Perancangan *Single Passive Tuned Filter* terhadap harmonisa pada Transformator Distribusi di UIN SUSKA RIAU. Dari penelitian ini diketahui bahwa beban nonlinier dapat mengakibatkan timbulnya harmonisa. Harmonisa ini mengakibatkan gangguan diantaranya yaitu meningkatnya derating dan faktor-k pada transformator distribusi. Hasil pengukuran pada transformator 1000 kVA di UIN Suska Riau menunjukkan nilai harmonisa melebihi *IEEE Standard 519-1992*. Nilai IHD yang terjadi pada orde ketiga masing-masing fasa transformator melebihi standar yaitu lebih dari 4 %, begitu juga dengan nilai THD melebihi standar yaitu lebih dari 5 %. Harmonisa tersebut menghasilkan faktor-k pada fasa R sebesar 1,062 dengan *derating* 0,81 %, fasa S sebesar 1,075 dengan *derating* 0,97 % dan fasa T sebesar 1,12 dengan *derating* 1,60 %. Dan dari perhitungan didapatkan nilai total *losses* transformator sebesar 9,59 kW. Pereduksian nilai harmonisa dilakukan dengan merancang satu buah *single tuned passive filter* pada masing-masing fasa transformator berdasarkan karakteristik nilai arus, tegangan, daya dan faktor daya transformator. Filter tersebut juga mengurangi faktor-k pada fasa R menjadi 1,04 dengan *derating* 0,61 %, fasa T menjadi 1,05 dengan *derating* 0,71 % dan fasa T menjadi 1,08 dengan *derating* 1,09 %. Serta nilai total *losses* berkurang menjadi 3,89 kW ( penghematan 59,4 %) [2].

Perancangan *High Pass* dan *Single Tuned Filter* sebagai filter harmonisa pada sistem kelistrikan *British Oil Company* Gresik, Jawa Timur. Masalah yang dominan pada sistem kelistrikan *British Oil Company* Gresik ini adalah, adanya harmonisa yang tinggi baik itu harmonisa tegangan maupun harmonisa arus. Untuk mengoptimalkan konsumsi daya dan mengatasi harmonisa, maka perlu dilakukan perancangan filter pasif yaitu *single tuned filter* digunakan untuk menala harmonik orde yang paling dominan, dan *high pass filter* digunakan untuk menala orde harmonik yang terjadi hampir merata dan tidak sesuai dengan standar *individual harmonics distortion* (IHD) yang dikeluarkan oleh IEEE (berdasarkan IEEE Std. 519-1992). Dari hasil pengukuran harmonisa diketahui bahwa nilai harmonisa yang terjadi yaitu, THD<sub>v</sub> pada bus 400-SG-100 sebesar 9,02% dari standar yang diizinkan sebesar 5% dan THD<sub>i</sub> pada bus 420-SG-001 sebesar 48% dari standar yang

dijizinkan 15%. Hasil simulasi setelah pemasangan filter yaitu nilai THDv pada bus 400-SG-100 turun menjadi 2,72% dan nilai THDi pada bus 420-SG-001 turun menjadi 11% [11].

Perencanaan *High Pass* dan *Single Tuned Filter* sebagai filter harmonisa pada sistem kelistrikan *Electrical Submersible Pump*(ESP) di PT.Medco E&P Indonesia. Yang menjadi objek penelitian adalah pada pompa ESP yang dikopel dengan sebuah motor induksi 3 fasa. Dalam pengoperasian motor ESP ini diperlukan sebuah peralatan elektronika daya berupa *Variable Speed Drive* (VSD) untuk mengatur kecepatan putar motor ESP. Dampak dari penggunaan VSD ini ialah harmonisa. Metode yang digunakan untuk meminimalisir harmonisa ialah dengan menggunakan 2 jenis filter pasif yaitu, *single tuned filter* digunakan untuk meminimalisir arus harmonisa yang dominan yaitu pada orde 5 sementara untuk orde harmonisa yang tidak dominan seperti orde 7 dan 11 akan digunakan *high pass filter*. Hasil analisa harmonisa sebelum dan setelah difilter pada KS 236 dengan THDi 22,39% turun menjadi 4,94% dan THDv 8,79% turun menjadi 4,06%, pada KS 35 dengan THDi 22,87% turun menjadi 4% dan THDv 12,36% turun menjadi 4,78%, dan pada KS 264 dengan THDi 22,85% turun menjadi 3,48% dan THDv 15,67% turun menjadi 4,96% [5].

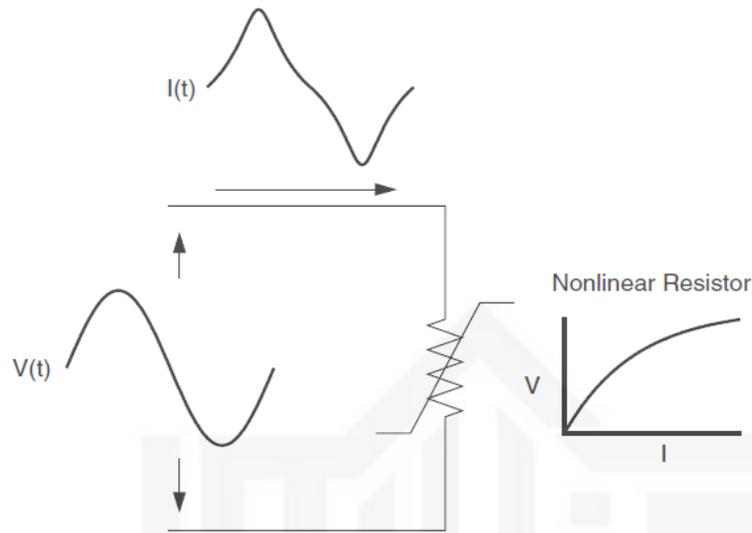
Analisis harmonik dan perancangan *high pass damped filter* pada sistem distribusi standar IEEE 13 Bus dengan menggunakan *software ETAP Power Station 7.0* . Penelitian ini dimulai dengan membuat model sistem distribusi standar IEE 13 bus dengan menggunakan *software ETAP Power Station 7.0* . Kemudian dilakukan penambahan beban nonlinier UPS *Rockwell 6P\_1 VFD* pada sistem tersebut. Dengan adanya beban nonlinier yang dipasang pada model tersebut nilai THDv naik dari 0% menjadi 6.56%, naik 1.56% dari nilai standarnya 5% dan THDi naik dari 0% menjadi 20%. Tingkat distorsi harmonik yang terjadi berada pada orde ke 5. Pemasangan beban nonlinier ini juga meningkatkan rugi-rugi daya dari 37.2 kW menjadi 95.1 kW. Untuk mereduksi harmonisa yang terjadi, dilakukan perancangan *high pass damped filter* dan memasukan parameter filter pada *software ETAP Power Station 7.0* untuk selanjutnya disimulasikan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa, dengan adanya pemasangan *high pass damped filter* nilai THD menjadi turun dari 6,56% menjadi 3,34% dibawah nilai standarnya serta THDi turun dari 20% menjadi 9,71%, THDv turun 3,22% dari nilai THD sebelum pemasangan *high pass damped filter*. Dengan adanya pemasangan filter rugi-rugi daya menurun dari 95,1 kW menjadi 86,4 kW [9].

Dari beberapa penelitian terkait diatas, dapat disimpulkan bahwa harmonisa terjadi karena adanya pemakaian beban nonlinier. Harmonisa ganjil kelipatan tiga merupakan harmonisa yang dapat menyebabkan terjadinya penambahan arus pada netral. Penelitian terkait di atas memiliki kekurangan diantaranya, penelitian untuk mengetahui pengaruh harmonisa terhadap arus netral tidak melakukan perancangan filter. Sedangkan untuk penelitian yang melakukan perancangan filter, mereka tidak melakukan analisa pengaruh harmonisa terhadap arus netral yang umumnya terjadi pada triplen harmonik, padahal diketahui terdapat harmonisa orde ke 3 pada penelitian tersebut. Dari data hasil pengukuran di transformator distribusi Bandara Sultan Syarif Kasim II diketahui bahwa tingkat harmonisa yang terjadi berada pada orde ke 3 dimana harmonisa ini merupakan harmonisa ganjil kelipatan tiga yang dapat mempengaruhi arus netral. Untuk meredam harmonisa ini penulis memilih *high pass damped filter* karena menurut penelitian terkait diatas filter jenis ini dapat membuat impedansi yang rendah untuk spektrum frekuensi harmonisa yang lebar dan terbukti dapat meredam harmonisa serta mengurangi rugi-rugi daya pada sistem. Maka penulis tertarik untuk meneliti bagaimana pengaruh harmonisa terhadap arus netral dan upaya peredaman distorsi harmonik yang terjadi dengan melakukan perancangan *high pass damped filter* pada transformator distribusi di Bandara Sultan Syarif Kasim II.

## 2.2. Harmonisa

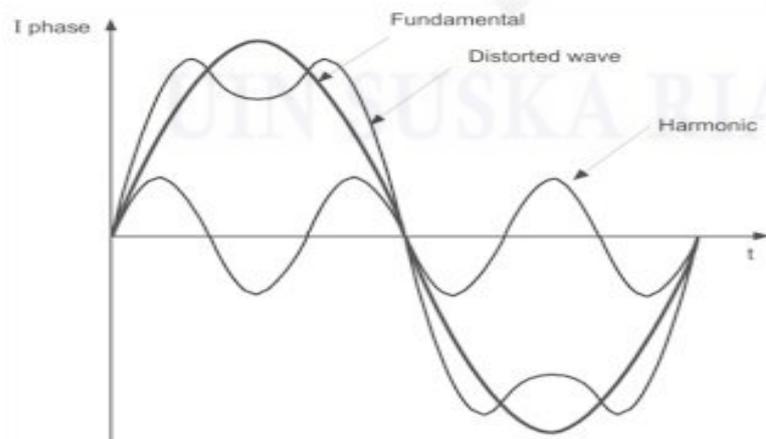
### 2.2.1. Pengertian Harmonisa

Harmonisa merupakan salah satu gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik yang diakibatkan oleh distorsi gelombang arus dan tegangan dari pemakaian beban non linier. Distorsi gelombang ini disebabkan oleh gelombang berfrekuensi tinggi yang merupakan kelipatan dari frekuensi fundamentalnya, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan yang idealnya adalah sinusoidal murni mengalami cacat akibat distorsi harmonisa yang terjadi [12].



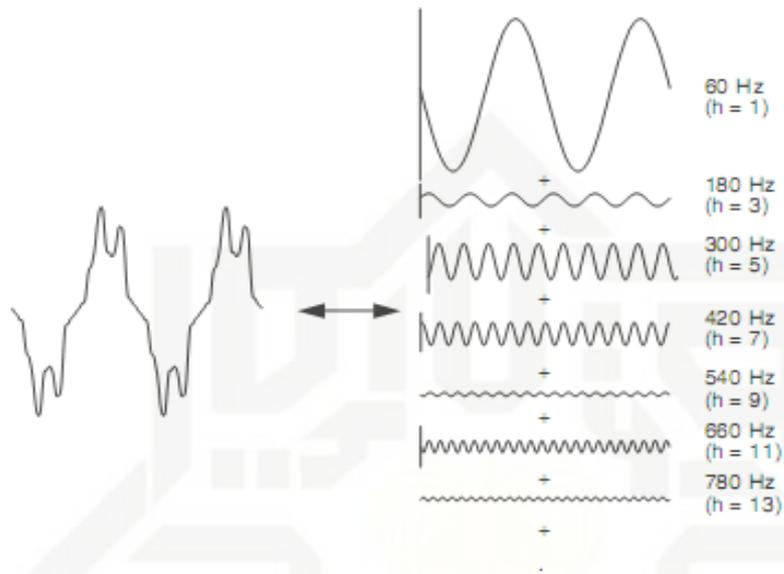
Gambar 2.1 Distorsi arus yang disebabkan oleh resistor non linier [12].

Gambar diatas merupakan ilustrasi dari konsep harmonisa dimana tegangan yang sinusoidal diterapkan kepada resistor non linier sederhana dimana tegangan dan arus yang dialirkan bervariasi sesuai dengan kurva yang ditunjukkan. Namun saat tegangan yang diterapkan sinusoidal sempurna sedangkan hasil yang ditunjukkan oleh arus mengalami distorsi. Contohnya pada peralatan kelistrikan yang digunakan di Indonesia menggunakan standar frekuensi 50 Hz yang apabila mengalami distorsi maka frekuensinya akan menjadi kelipatan dari frekuensi awal / fundamentalnya yaitu 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, dan seterusnya, inilah yang disebut dengan harmonisa. Frekuensi harmonik ini menumpang pada frekuensi fundamentalnya sehingga mengganggu dan mendistorsi frekuensi fundamentalnya menjadi tidak sinusoidal sempurna lagi.



Gambar 2.2 Gelombang terdistorsi [3].

Saat terjadi superposisi antara gelombang frekuensi dasar / fundamentalnya dengan gelombang frekuensi harmonik / kelipatan dari frekuensi dasarnya maka terbentuklah gelombang yang terdistorsi sehingga bentuk gelombang tidak lagi sinusoidal. Pembentukan gelombang non-sinusoidal hasil distorsi harmonik dapat dilihat pada gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Gelombang hasil distorsi harmonik [12].

Pada gambar 2.3 memperlihatkan sebuah gelombang yang terdistorsi dan di representasikan dalam deret seri Fourier. Gelombang yang telah mengalami cacat akibat dari distorsi harmonik yang pada awalnya berupa gelombang sinusoidal sempurna pada orde harmonik pertama (60 Hz). Sedangkan pada orde-orde ganjil berikutnya merupakan kelipatan ganjil dari frekuensi dasarnya atau fundamentalnya yaitu orde ke-3 sampai orde ke-h. Rasio dari frekuensi harmonisa ke-h dengan frekuensi fundamental disebut juga dengan urutan atau orde harmonisa, yang dinyatakan pada persamaan berikut [12] :

$$h = \frac{f_h}{f} \tag{2.1}$$

dengan :

- h = orde harmonisa
- $f_h$  = frekuensi harmonisa
- f = frekuensi dasar

### 2.2.2. Jenis-jenis Harmonisa [12]

#### 1. Harmonisa ganjil dan genap

Harmonisa berdasarkan dari urutan ordenya dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Sesuai dengan namanya harmonisa ganjil adalah

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

harmonisa ke 3, 5, 7, 9, dan seterusnya, sedangkan harmonisa genap merupakan harmonisa ke 2, 4, 6, 8 dan seterusnya. Namun untuk harmonisa pertama tidak bisa dikatakan sebagai hamonisa ganjil, karena merupakan komponen frekuensi dari gelombang fundamentalnya. Sedangkan harmonisa 0 (nol) mewakili konstanta atau komponen DC dari gelombang.

## 2. Harmonisa urutan positif, negatif, dan nol

Pada sistem tenaga listrik tiga fasa yang seimbang diasumsikan mempunyai urutan fasa R,S,T dimana besar arus dan tegangan pada setiap fasa selalu sama dan berbeda sudut  $120^0$  satu sama lain. Sehingga berdasarkan urutan phasanya, harmonisa dapat dibagi menjadi 3 bagian yaitu:

### a. Harmonisa urutan Positif

Harmonisa urutan positif ini mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa  $120^0$  (R,S,T). Harmonisa positif ini terdiri dari harmonisa ke-1, ke-4, ke-7, ke-10, dan seterusnya. Harmonisa tersebut dapat menyebabkan penambahan panas di konduktor, *circuit breaker*, dan panel-panel lainnya.

### b. Harmonisa urutan Negatif

Harmonisa urutan negatif memiliki urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan saling berbeda fasa  $120^0$  (R,S,T). Harmonisa negatif ini terdiri dari harmonisa ke-2, ke-5, ke-8, dan seterusnya. Harmonisa urutan negatif dapat menimbulkan panas dan menyebabkan masalah pada motor induksi sehingga menyebabkan perlambatan pada motor tersebut.

### c. Harmonisa urutan Kosong/Nol (*zero sequence*)

Harmonisa urutan nol ini memiliki fasor yang sama besarnya dan sephasa satu sama lain (beda fasa satu sama lain  $0^0$ ), harmonisa ini juga biasa disebut *triplen harmonics*. Harmonisa urutan nol tidak memproduksi perputaran medan dikedua arah, sehingga menghasilkan panas yang lebih dibandingkan dengan harmonisa urutan positif dan urutan negatif. Harmonisa urutan nol terdiri dari harmonisa ke-3, ke-6, ke-9, dan seterusnya. Bahaya yang terjadi dari harmonisa urutan nol adalah arus normal yang lebih besar, sehingga arus tersebut dapat menyebabkan kebakaran. Selain itu harmonisa ini tidak menghilangkan arus netral tetapi dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa.

Dari jenis-jenis harmonisa berdasarkan urutan fasa diatas maka dapat disimpulkan dalam tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1. Polaritas komponen harmonik [2]

Harmonik	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Frekuensi (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Urutan	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Tabel 2.2 Pengaruh komponen polaritas harmonik [2]

Urutan	Pengaruh pada Motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif	Menimbulkan medan magnet dengan arah putaran maju ( <i>forward</i> )	Panas
Negatif	Menimbulkan medan magnet dengan putaran arah mundur ( <i>reverse</i> )	Panas dan arah putaran pada motor berubah
Nol	Tidak ada	Panas dan menimbulkan/menambah arus pada kawat netral

### 2.2.3. Sumber Harmonisa

Pada sistem distribusi listrik mengenal 2 jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Beban linier yaitu beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang linear, artinya arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan.

Beban linier ini tidak memberikan dampak yang buruk pada perubahan gelombang arus maupun tegangan. Resistor (R) merupakan beban linier tersebut. Pada beban yang linear, bentuk gelombang arus akan mengikuti bentuk gelombang tegangannya. Jika bentuk gelombang tegangan sumbernya sinusoidal, maka gelombang arus yang mengalir juga akan sinusoidal [4].

Sedangkan beban non linier adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setiap setengan siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Beban non linier yang umumnya merupakan peralatan elektronik yang didalamnya banyak terdapat komponen semi konduktor, dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan atau distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
 2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

komponen semi konduktor dalam peralatan elektronik. Perubahan bentuk gelombang ini tidak terkait dengan sumber tegangannya [15].

Maka dapat dikatakan bahwa yang menjadi sumber utama yang menyebabkan terjadinya harmonisa adalah beban non linier. Beban-beban non linier ini terhubung langsung dengan sistem distribusi tenaga listrik sehingga timbul dampak yang merugikan pada peralatan distribusi listrik seperti pada transformator distribusi dan juga pada beban itu sendiri. Contoh dari beban-beban non linier ini yaitu [4]:

- a) Tungku busur api (pengecoran logam)
- b) Mesin Las
- c) Inti magnet pada trafo dan mesin-mesin yang berputar
- d) Mesin-mesin sinkron
- e) *Adjustable speed drives*
- f) *Solid state switch*
- g) *High voltage DC* transmisi
- h) *Photovoltaic invertors*
- i) Peralatan elektronik perkantoran seperti komputer dan lain-lain
- j) *Air conditioning (AC)*
- k) *Uninterruptible Power Supplies (UPS)*

#### 2.2.4. Akibat yang ditimbulkan harmonisa [3]

Pada tegangan dan arus yang mengandung harmonik memiliki pengaruh yang berbeda-beda pada setiap peralatan listrik yang terhubung dengan jaringan listrik tergantung pada karakteristik beban listrik tersebut. Namun, pada umumnya efek yang ditimbulkan oleh harmonik pada peralatan tenaga listrik ada tiga, yaitu :

- a. Nilai *Root Mean Square (RMS)* baik tegangan maupun arus lebih besar
- b. Nilai puncak (*peak value*) tegangan dan arus lebih besar
- c. Kualitas dari frekuensi sistem turun.

Setiap elemen dapat membangkitkan distorsi yang spesifik. Jika nilai RMS yang lebih besar maka dapat menyebabkan pemanasan yang lebih tinggi pada konduktor. Jika nilai puncak yang lebih besar dapat mengganggu kinerja dari alat ukur sehingga terjadi kesalahan pembacaan. Sedangkan frekuensi dapat mempengaruhi impedansi pada kabel dimana semakin tinggi frekuensi (umumnya frekuensi diatas 400 Hz) berarti semakin sering kabel menerima tegangan puncak sehingga semakin besar tegangan jatuh yang

terjadi. Fenomena resonansi dapat terjadi pada frekuensi tertentu dan dapat menyebabkan arus meningkat.

### 2.2.5. Efek khusus harmonisa pada sistem tenaga listrik [3]

Efek khusus yang dapat ditimbulkan oleh adanya harmonik pada sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi :

#### A. Efek negatif jangka pendek

Adapun efek negatif yang terjadi oleh karena adanya harmonisa untuk sementara atau jangka pendek yaitu :

1. Tegangan harmonik dapat mengakibatkan terganggunya kerja dari peralatan kontrol yang digunakan pada sistem elektronik.
2. Harmonik juga dapat menyebabkan kesalahan pada peralatan pengukuran listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik. Pada umumnya sebuah alat ukur dirancang dan disesuaikan untuk beroperasi pada rangkaian dengan frekuensi dan tegangan standar dengan sedikit atau tidak ada sama sekali distorsi bentuk gelombang. Beberapa pengaruh harmonik terhadap akurasi alat ukur adalah :
  - a. Medan magnet dari koil tegangan dalam sebuah alat ukur non linier dan mengandung beberapa komponen harmonik yang seharusnya dari kompensasi alat. Diyakini bahwa torsi tambahan akan terbentuk, meskipun tidak ada tegangan dan arus harmonik pada jaringan distribusi.
  - b. Alat ukur tidak mengukur komponen daya DC yang seharusnya.
  - c. Alat ukur menjadi sensitif terhadap frekuensi.
3. Harmonik dapat mengganggu kinerja peralatan pengaman pada sistem tenaga listrik seperti relay. Oleh karena sifat dari relay yang sensitif terhadap perubahan arus dan frekuensi maka relay bisa salah beroperasi karena terjadi perubahan frekuensi ataupun arus walaupun saat itu tidak ada gangguan. Selain itu, harmonik dapat menyebabkan perubahan impedansi, arus dan tegangan dari sistem. Sedangkan relay jarak berfungsi berdasarkan prinsip impedansi dan arus, tentunya hal ini dapat mengganggu kinerja dari relay jarak.
4. Pada mesin-mesin berputar seperti generator dan motor, torsi mekanik yang diakibatkan oleh arus harmonik dapat menimbulkan getaran dan suara pada mesin-mesin tersebut. Torsi sesaat yang dihasilkan karena interaksi antara fluks dengan celah udara (hampir semua komponen dasar) dan fluks tersebut dihasilkan oleh arus

harmonik di dalam rotor. Torsi ini mempengaruhi bentuk kurva torsi kecepatan pada motor.

5. Jika ada sistem komunikasi yang berada dekat dengan sistem tenaga listrik maka sistem tersebut dapat terganggu oleh adanya harmonik pada sistem tenaga listrik itu. Biasanya pada sistem kontrol dari sistem telekomunikasi yang terganggu oleh harmonik.

#### B. Efek yang bersifat kontinu

Efek yang bersifat kontinu atau berkelanjutan ini biasanya dapat menyebabkan pemanasan pada peralatan listrik. Adapun peralatan listrik yang mengalami pemanasan karena pengaruh dari adanya harmonik yaitu :

##### 1. Pemanasan kapasitor

Kapasitor merupakan alat yang sangat sensitif terhadap perubahan beban. Jika terjadi harmonik maka rugi-rugi akan meningkat. Saat harmonik terjadi, kereaktifan beban akan semakin menguat sehingga kapasitor harus mencatu lebih banyak daya reaktif kepada sistem. Dan juga yang harus diperhatikan adalah resonansi. Saat terjadi resonansi, impedansi sistem hanya dilihat resistif yang sangat kecil. Sehingga arus yang masuk akan sangat besar dan dapat mengakibatkan kerusakan.

##### 2. Pemanasan pada mesin-mesin listrik

Tegangan yang mengandung harmonik yang melebihi standar jika diterapkan pada mesin listrik dapat menimbulkan masalah-masalah sebagai berikut :

- a) Meningkatkan rugi inti dan rugi belitan
- b) Pemanasan lebih

Tegangan atau arus harmonik ini meningkatkan rugi daya pada rangkaian rotor, gulungan stator, dan laminasi stator dan rotor. Rugi pada penghantar stator dan rotor lebih besar dari pada resistansi DC nya, karena adanya efek arus eddy dan efek kulit. Arus harmonik menimbulkan panas lebih. Bila mesin dioperasikan terus menerus pada kondisi ini, maka umur mesin akan cepat berkurang dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan kerusakan.

##### 3. Pemanasan pada transformator

Frekuensi harmonik yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi dan pada akhirnya mengakibatkan kerugian daya pada transformator. Ini karena biasanya transformator dirancang sesuai dengan frekuensi kerjanya.

Pengaruh utama harmonik pada transformator ialah :

- a) Panas lebih yang dibangkitkan oleh arus beban yang mengandung harmonik.
- b) Kemungkinan resonansi paralel transformator dengan kapasitansi sistem.

Transformator distribusi yang mencatu daya ke beban non linier menimbulkan arus harmonik kelipatan tiga ganjil. Harmonik ganjil ini dapat menghasilkan arus netral yang lebih tinggi dari arus fasa. Akibatnya terjadi peningkatan temperatur pada kawat netral. Sebagai dampak lanjutannya, akan terjadi sirkulasi arus urutan nol pada belitan delta transformator sehingga temperaturnya akan meningkat. Peningkatan temperatur ini akan menurunkan efisiensi transformator dan lebih jauh lagi dapat mengakibatkan kerusakan.

Rugi-rugi yang terjadi pada transformator adalah rugi-rugi inti dan rugi-rugi belitan. Rugi-rugi inti karena fluks yang dibangkitkan di dalam inti bila transformator dieksitasi. Rugi-rugi belitan yang terdiri dari  $I^2R$  dan stray losses dibangkitkan oleh arus yang mengalir melalui transformator.

4. Pemanasan pada kabel dan peralatan lainnya.

Rugi-rugi pada kabel yang dilewati oleh arus harmonik bisa semakin besar. Karena disebabkan meningkatnya nilai resistansi dari tembaga akibat meningkatnya frekuensi (efek kulit). Akibatnya akan terjadi pemanasan pada kawat penghantar.

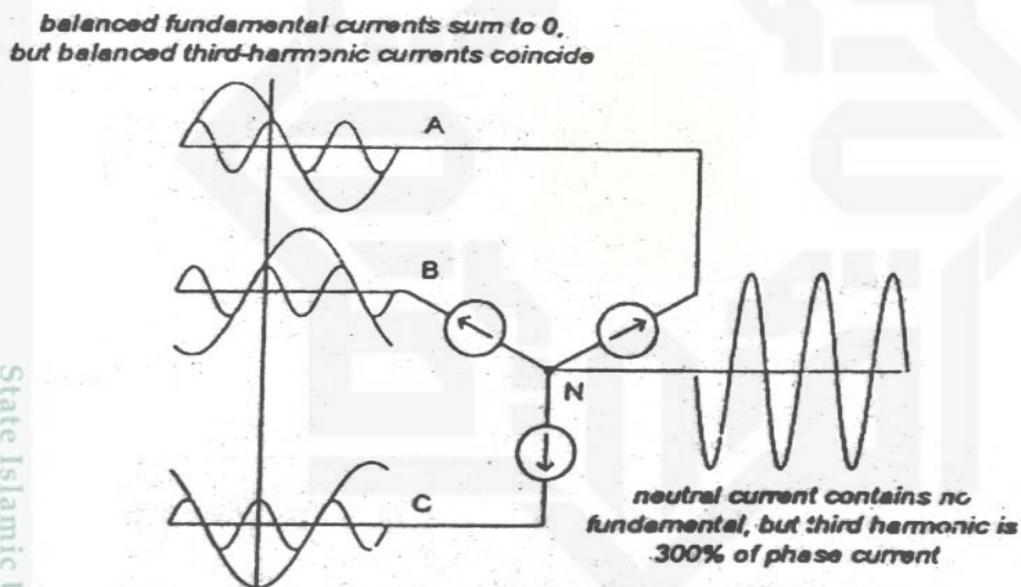
Ada dua tipe mekanisme dimana arus harmonik dapat mengakibatkan pemanasan pada penghantar yang lebih besar dari nilai arus RMS yang diharapkan. Mekanisme pertama yaitu disebabkan distribusi arus dalam penghantar, termasuk efek kulit (*skin effect*) dan efek kedekatan (*proximity effect*). *Skin effect* disebabkan oleh distribusi arus di permukaan yang lebih besar daripada di dalam penghantar, sehingga resistansi efektif meningkat. *Skin effect* meningkat dengan kenaikan frekuensi dan diameter penghantar. Sedangkan *proximity effect* disebabkan medan magnet penghantar mengganggu distribusi arus pada penghantar-penghantar yang jaraknya berdekatan.

Mekanisme kedua disebabkan arus yang tinggi pada penghantar netral pada sistem distribusi tiga fasa empat kawat yang menyuplai beban-beban satu fasa. Beberapa beban dari *power supply switch mode* menghasilkan arus harmonik orde ketiga yang cukup tinggi dan berarti. Untuk beban konverter arus harmonik ketiga dalam rangkaian tiga fasa dapat menghasilkan arus netral yang lebih besar dari arus fasanya. Karena ukuran penghantar netralnya sama dengan penghantar fasa, maka penghantar netral menjadi berbeban lebih dan pada akhirnya terjadi panas yang berlebih. Untuk mengatasi permasalahan ini biasanya dengan memperbesar ukuran pada penghantar netral dua kali atau lebih besar dari ukuran penghantar fasanya.

### 2.2.6. Triplen Harmonik [12]

Kelipatan ganjil dari harmonik ketiga atau disebut dengan Triplen Harmonik ( $h = 3, 9, 15, 21, \dots$ ). Triplen harmonik ini mendapatkan perhatian khusus karena respon sistem yang terjadi pada triplen harmonik umumnya berbeda dengan respon dari orde harmonik yang lain. Triplen harmonik umumnya terjadi pada sistem jaringan bintang yang ditanahkan (*Grounded wye Systems*) dengan arus yang mengalir netral pada sistem tersebut. Karena arus antar fasanya tidak saling menghilangkan akan tetapi saling menjumlahkan akibatnya arus pada netral menjadi *overload*. Hal ini menyebabkan peralatan dapat salah beroperasi karena tegangan fasa yang terdistorsi cukup parah oleh triplen harmonik pada konduktor netral.

Berikut ini merupakan gambar arus yang mengalir pada netral sistem akibat dari triplen harmonik :



Gambar 2.4 Arus netral pada sistem *wye-grounded* akibat triplen harmonik [12]

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa pada sistem yang seimbang, diasumsikan komponen triplen harmonik hadir dalam sistem. Arus fundamental dari setiap fasa yang mengalir pada konduktor netral sistem akan saling menghilangkan, namun yang terjadi pada sistem malah sebaliknya yaitu arus pada konduktor tidak netral, melainkan ada arus triplen harmonik dari ketiga fasa yang saling menjumlahkan. Arus triplen harmonik yang mengalir pada konduktor netral sistem merupakan tiga kali dari arus triplen pada setiap fasanya. Hal ini disebabkan karena fasa dan waktu dari arus triplen yang sama dari setiap fasanya.

### 2.3. Indeks harmonisa

Ada beberapa istilah yang biasa digunakan dalam pengukuran dan perhitungan harmonisa, yaitu :

#### 2.3.1. Root Mean Square (RMS) [12]

Nilai *Root Means Square* merupakan nilai akar kuadrat rata-rata dari fungsi berkala pada suatu periode yang terdapat amplitudo. Untuk menghitung arus rms ( $I_{rms}$ ) dan tegangan rms ( $V_{rms}$ ) dengan persamaan berikut:

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_m} V_h^2} = V_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_m} I_h^2} = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (2.3)$$

Dengan :

$V_{rms}$  = Tegangan rms

$I_{rms}$  = Arus rms

#### 2.3.2. Individual Harmonic Distortion (IHD) [12]

Kontribusi setiap komponen harmonik terhadap distorsi arus dan tegangan dinyatakan oleh *Individual Harmonic Distortion* (IHD). *Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio antara nilai RMS harmonisa individual dengan nilai RMS fundamentalnya. Maka nilai IHD arus dan tegangan harmonik dapat dijabarkan sebagai berikut ini :

$$IHD_i = \sqrt{\frac{I_{sh}^2}{I_1^2}} \times 100\% , \text{ dan} \quad (2.4)$$

$$IHD_v = \sqrt{\frac{V_{sh}^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (2.5)$$

Dengan :

$IHD_i$  = nilai distorsi harmonik individu arus (%)

$IHD_v$  = nilai distorsi harmonik individu tegangan (%)

$I_{sh}$  = nilai arus harmonisa pada orde ke-h (A)

$V_{sh}$  = nilai tegangan harmonisa pada orde ke-h (V)

$I_1$  = nilai arus fundamental (A)

$V_1$  = nilai tegangan fundamental (V)

### 2.3.3. Total Harmonic Distortion (THD) [12]

*Total Harmonic Distortion* (THD) adalah ukuran dari nilai efektif dari komponen harmonik bentuk gelombang yang terdistorsi. Perbandingan antara nilai RMS dari komponen harmonisa terhadap nilai RMS pada frekuensi fundamental disebut dengan *Total Harmonic Distortion* (THD). Besaran THD digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan dari bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinusoidal idealnya, berikut rumus untuk mengukur persentase THD :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmax} M_h^2}}{M_1} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dengan :

THD = *Total Harmonic Distortion* (%)

$M_h$  = nilai RMS (arus atau tegangan) harmonik ke-h (A atau V)

$M_1$  = nilai RMS (arus atau tegangan) pada frekuensi dasar (A atau V)

### 2.3.4. Total Demand Distortion (TDD) [12]

Dalam merepresentasikan tingkat distorsi arus dapat dilihat dari nilai THD, akan tetapi ada beberapa kesulitan yang dapat menyebabkan kesalahan. Contohnya seperti aliran arus yang kecil dapat memiliki nilai THD yang tinggi, namun tidak menjadi ancaman yang dapat merusak ke sistem tenaga listrik. Maka dapat dilakukan dengan melihat THD pada arus beban puncak frekuensi dasar dan bukan melihat sampel sesaat pada frekuensi dasar. Ini disebut dengan *Total Demand Distortion* (TDD), merupakan rasio jumlah akar kuadrat nilai RMS komponen harmonisa arus hingga orde tertentu terhadap nilai RMS arus beban maksimum. TDD dapat dilihat dengan rumus sebagai berikut :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} I_h^2}}{I_L} \times 100\% \quad (2.7)$$

Dengan :

$I_h$  = Arus harmonik orde ke-h

$I_L$  = Arus beban maksimum pada frekuensi dasar pada *Point of Common Coupling* (PCC)

Ada dua cara dalam mengukur  $I_L$  , pertama yaitu pada beban yang telah terpasang pada sistem lalu dihitung nilai rata-rata dari arus beban maksimum dari 12 bulan sebelumnya. Sedangkan untuk sistem yang baru,  $I_L$  harus diperkirakan berdasarkan profil beban yang akan dipasang. Nilai  $I_L$  dapat ditentukan dengan persamaan :

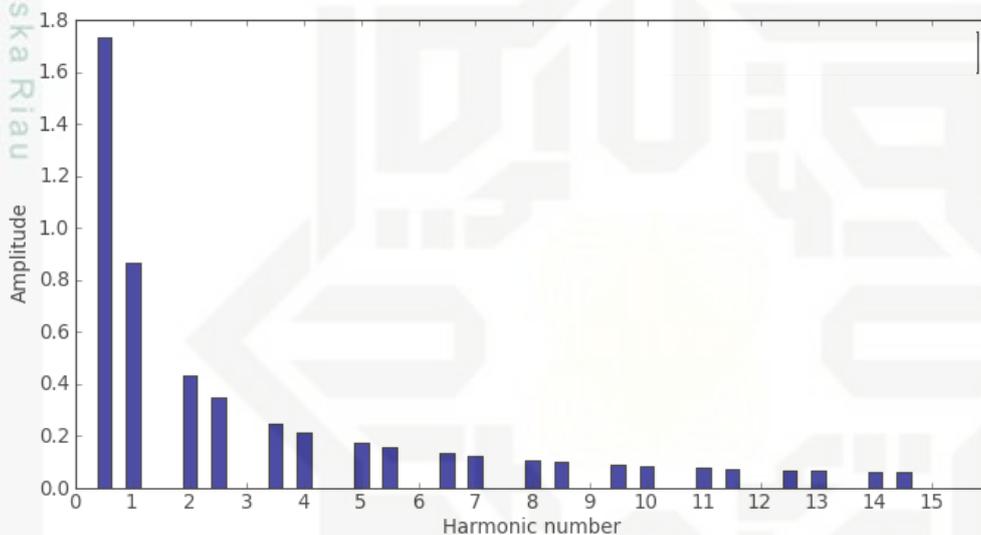
$$I_L = \frac{kW}{PF\sqrt{3}kV} \quad (A) \quad (2.8)$$

Dengan :

- kW = Permintaan daya rata-rata
- PF = *Power Factor*
- kV = tegangan *line to line* PCC

### 2.3.5. Spektrum Harmonisa

Pendistribusian amplitudo dari seluruh amplitudo komponen harmonik sebagai fungsi dari orde harmonisanya disebut dengan spektrum harmonik, spektrum harmonik ini dapat diilustrasikan dengan menggunakan histogram berikut :



Gambar 2.5 Spektrum harmonik [22]

Gambar diatas menunjukkan bahwa spektrum harmonik merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonik terhadap frekuensi fundamental. Biasanya spektrum harmonik ini digunakan sebagai dasar perancangan filter yang akan digunakan untuk mereduksi harmonisa [12].

### 2.4. Kuantitas Listrik Pada Kondisi Non-Sinusoidal

Distorsi harmonik pada sistem kelistrikan dapat menyebabkan terjadinya gelombang non-sinusoidal yang merupakan hasil dari superposisi gelombang pada frekuensi fundamental dengan gelombang dari frekuensi harmoniknya. Untuk nilai rms arus dan tegangan pada saat kondisi non-sinusoidal dapat didefenisikan dengan persamaan berikut [12] :

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} = \sqrt{Y_1^2 + Y_h^2} \quad (2.9)$$

Dengan :

$Y_{rms}$  = tegangan atau arus pada kondisi non-sinusoidal

T = periode v(t) dan i(t)

$Y_1$  = tegangan atau arus pada frekuensi dasar

Daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan juga daya kompleks (S) pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan dalam persamaan berikut [12] :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \text{ Watt} \quad (2.10)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\phi_h - \theta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \text{ VAR} \quad (2.11)$$

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (2.12)$$

Dengan :

P = daya aktif pada kondisi non-sinusoidal (Watt)

Q = daya reaktif pada kondisi non-sinusoidal (VAR)

S = daya kompleks pada kondisi non-sinusoidal (VA)

$P_1$  = daya aktif pada frekuensi dasar (Watt)

$Q_1$  = daya reaktif pada frekuensi dasar (VAR)

$D_1$  = distorsi daya akibat harmonik (VA)

Untuk faktor daya (PF) pada kondisi non-sinusoidal dapat didefinisikan ke dalam bentuk persamaan berikut [12] :

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.13)$$

## 2.5. Batasan distorsi harmonisa arus

Oleh karena dampak yang diakibatkan oleh harmonisa sangat merugikan bagi pengguna listrik (konsumen), maka PT. PLN (Persero) sebagai perusahaan yang menyediakan dan mendistribusikan listrik di Indonesia kepada pelanggan menetapkan batasan maksimum distorsi harmonik yang dapat ditoleransi pada suatu peralatan listrik. Karena sudah kewajiban PLN untuk menjaga kualitas listrik dalam sistem tenaga listrik di Indonesia. Batas distorsi harmonisa arus merupakan kriteria yang digunakan untuk mengetahui distorsi harmonisa pada suatu sistem atau peralatan listrik apakah masih dalam batas yang ditentukan atau melebihi dari batasan tersebut. Pelanggan harus menjaga distorsi harmonisa arus pada titik sambung pelanggan di bawah batas yang ditentukan dalam Tabel 2.3 sesuai pedoman *IEEE Standard 519-1992 "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"*.

Tabel 2.3 Batasan distorsi harmonisa arus [16]

Batasan Distorsi Harmonisa Arus						
$V_n \leq 66 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L$	Distorsi Harmonisa Arus Maksimum Dalam Persen $I_L$					Total Demand Distortion (TDD)
	Orde Harmonisa Individu "h" Harmonisa Ganjil					
	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	
< 20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20-50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50-100	10%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100 - 1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
> 1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%
$66 \text{ kV} < V_n < 150 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L$	Orde harmonisa individu "h" Harmonisa Ganjil					Total Demand Distortion (TDD)
	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	
< 20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50-100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100 - 1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
> 1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%
$V_n > 150 \text{ kV}$						
$I_{sc}/I_L$	Orde Harmonisa Individu "h" Harmonisa Ganjil					Total Demand Distortion (TDD)
	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	
< 20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20-50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%

1. Dianggap mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
 2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Dengan catatan 1 : Tegangan yang termasuk pada tabel diatas merujuk pada SPLN No. 1 Tahun 1995, Tegangan-Tegangan Standar.

Catatan ke 2 [16]: hal-hal yang menjadi perhatian antara lain,

1. Harmonisa genap dibatasi 25% dari Harmonisa ganjil diatasnya;
2. Distorsi arus searah (*Direct Current – DC*) tidak diperbolehkan;
3. Aplikasi semua peralatan pembangkit listrik dibatasi oleh nilai-nilai distorsi arus diatas terlepas dari rasio hubung singkat  $I_{SC} / I_L$ ;
4. Isc adalah Arus hubung singkat maksimum di titik sambung pelanggan;
5. IL adalah Arus beban maksimum (dihitung berdasarkan daya kontrak);
6. TDD adalah *Total Demand Distortion*, distorsi harmonisa arus (%) dari arus beban maksimum (diukur selama 15 menit).

Rasio  $I_{SC}/I_L$  adalah rasio arus hubung singkat yang ada pada *Poin Common Coupling* (PCC). Untuk menghitung nilai arus hubung singkat tiga fasa pada *Point Common Coupling* (PCC) dapat ditentukan dengan persamaan berikut [17] :

$$I_{SC} = \frac{1000 \times MVA}{\sqrt{3}kV} (A) \quad (2.14)$$

Dengan :

$I_{SC}$  = arus maksimum hubung singkat (A)

MVA = kapasitas hubung singkat tiga fasa

kV = tegangan *line to line* PCC

Untuk menentukan batasan maksimum distorsi arus harmonisa digunakan persamaan berikut [12] :

$$\frac{I_{SC}}{I_L} \quad (2.15)$$

Dengan :

$I_{SC}$  = arus maksimum hubung singkat (A)

$I_L$  = arus beban nominal (A)

## 2.6. Pengaruh harmonisa pada transformator distribusi

Salah satu dampak yang umum dari gangguan harmonisa adalah panas lebih pada kawat netral dan transformator serta terjadinya penurun kapasitas pada transformator. Frekuensi harmonisa yang lebih tinggi dari frekuensi kerjanya akan mengakibatkan penurunan efisiensi atau terjadi kerugian daya.

### 2.6.1. Teori perhitungan pengaruh harmonisa terhadap arus netral trafo

Arus pada kawat netral dapat menimbulkan panas lebih pada kawat tersebut dan menambah rugi-rugi pada transformator. *Losses* pada penghantar netral transformator ini dapat dirumuskan melalui persamaan berikut [18]:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \quad (2.16)$$

Dengan :

$P_N$  = *losses* pada penghantar netral trafo (watt)

$I_N$  = arus yang mengalir pada netral trafo (A)

$R_N$  = tahanan penghantar netral trafo ( $\Omega$ )

Sedangkan *losses* yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (*ground*) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \quad (2.17)$$

Dengan :

$P_G$  = *losses* akibat arus netral yang mengalir ke tanah (watt)

$I_G$  = arus netral yang mengalir ke tanah (A)

$R_G$  = tahanan pembumian netral trafo ( $\Omega$ )

Adapun rumus yang digunakan untuk mencari besar arus yang mengalir pada kawat netral akibat harmonisa sebagai berikut [7] :

$$I_{n \text{ phasa}} = THD_{\text{kelipatan tiga ganjil}} \times I_{\text{beban}} \quad (2.18)$$

Dengan :

$I_{n \text{ phasa}}$  = arus netral phasa (A)

$THD_{\text{kelipatan tiga ganjil}}$  = *Total Harmonic Distortion* kelipatan tiga (%)

$I_{\text{beban}}$  = arus pada beban penuh (A)

Dan untuk mencari arus netral totalnya dengan menjumlahkan arus netral ketiga phasa. Besar pengaruh harmonisa terhadap besar penambahan arus netral dapat diketahui dengan rumus sebagai berikut :

$$\%I_{n \text{ akibat harmonisa}} = \frac{I_{n \text{ 3 phasa}}}{I_{n \text{ total}}} \times 100\% \quad (2.19)$$

Dengan :

$\%I_{n \text{ akibat harmonisa}}$  = persentase akibat harmonisa (%)

$I_{n \text{ 3 phasa}}$  = arus netral 3 phasa (A)

$I_{n \text{ total}}$  = arus netral total (A)

### 2.6.2. Teori perhitungan *Load Loss* ( $P_{LL}$ ) transformator distribusi [12]

Transformator dirancang untuk memberikan daya yang diperlukan oleh beban dengan minimum *losses* pada frekuensi fundamental. Distorsi harmonik khususnya yang terjadi pada arus maupun distorsi tegangan akan menyebabkan terjadinya pemanasan pada transformator.

Ada tiga efek yang mengakibatkan terjadinya pemanasan pada transformator arus beban terdapat harmonisa:

a. Arus rms.

Jika transformator kapasitasnya hanya untuk kVA yang dibutuhkan beban, arus harmonisa dapat mengakibatkan arus rms trafo menjadi lebih besar dari kapasitasnya. Meningkatnya arus rms menyebabkan rugi-rugi pada penghantar juga bertambah.

b. *Eddy-current losses*.

Arus induksi di dalam trafo yang disebabkan oleh fluks magnetik. Arus induksi ini mengalir di belitan, di inti dan di badan penghantar lain yang terlingkupi oleh medan magnet dari transformator dan menyebabkan panas lebih. Komponen rugi-rugi trafo ini meningkat dengan kuadrat dari frekuensi arus penyebab *eddy current*. Oleh karena itu, ini menjadi komponen yang sangat penting dari rugi-rugi trafo yang menyebabkan pemanasan oleh harmonisa.

c. Rugi Inti.

Peningkatan rugi inti yang disebabkan oleh harmonisa bergantung pada pengaruh harmonisa pada tegangan yang diberikan dan rancangan dari inti trafo. Semakin besar distorsi tegangan maka semakin tinggi pula *eddy current* di inti. Peningkatan rugi inti karena harmonisa tidak sekritis dua rugi – rugi di atas.

*Losses* pada transformator dapat dihitung dengan menjumlahkan *losses* tembaga dan *losses* besi pada transformator akibat pengaruh harmonisa orde ke- $h$  (mengambil nilai harmonisa tertinggi). Untuk persamaan *losses* tembaga sebagai berikut [12] :

$$P_{cu} = \sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2 \quad (2.20)$$

Dengan :

$P_{cu}$  = rugi-rugi tembaga (p.u)

$h$  = orde ke- $h$  (p.u)

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

Persamaan untuk *losses* besi pada transformator sebagai berikut [12]:

$$P_{EC} = (\sum_h^{h_{max}} I_h^2 \times h^2). P_{EC-R} \quad (2.21)$$

Dengan :

$$P_{EC} = \text{eddy current losses (p.u)}$$

$$I_h = \text{ arus orde ke-h (p.u)}$$

$$h = \text{ orde harmonisa}$$

$$P_{EC-R} = \text{faktor eddy current losses (\%)}$$

Untuk memudahkan dalam perhitungan *losses*, maka dijadikan dalam satuan per-unit(pu). Persamaan *Losses* akibat harmonisa (PLL) adalah sebagai berikut [3]:

$$P_{LL} = P_{I^2R} + P_{EC} + P_{OSL} \quad (2.22)$$

Persamaan rugi-rugi beban (*load loss*) yang dipengaruhi oleh harmonisa sebagai berikut :

$$P_{LL} \text{ (p.u)} = P_{I^2R} \text{ (p.u)} + P_{EC} \text{ (p.u)} + P_{OSL} \text{ (p.u)} \quad (2.23)$$

$$P_{LL} \text{ (p.u)} = \sum I_h^2 \text{ (p.u)} + (\sum I_h^2 \times h^2) P_{EC} \text{ (p.u)} + (\sum I_h^2 \times h^{0,8}) P_{OSL} \text{ (p.u)} \quad (2.24)$$

Dengan :

$$P_{LL} = \text{rugi-rugi daya (p.u)}$$

$$P_{EC-R} = \text{faktor eddy current loss}$$

$$P_{OSL-R} = \text{faktor other stray loss}$$

$$h = \text{Orde harmonisa}$$

$$I_h = \text{ arus harmonisa}$$

Tabel 2.4 Nilai khusus dari  $P_{EC-R}$  [12]

Type	MVA	Voltage	$P_{EC-R}$ (%)
Dry	$\leq 1$	-	3-8
	$\geq 1,5$	5 kV HV	12-20
	$\leq 1,5$	15 kV HV	9-15
Oil-Filled	$\leq 2,5$	480 V LV	1
	2,5-5	480 V LV	1-5
	$> 5$	480 V LV	9-15

Untuk mencari nilai *losses* transformator hal pertama yang perlu diketahui adalah nilai daya aktif per-phasanya dan juga nilai *losses* trafo tanpa beban. Nilai daya aktif satu fasa dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [3]:

$$P_{base} = \frac{S \times PF}{\sqrt{3}} \quad (2.25)$$

Adapun standar nilai *losses* transformator tanpa beban menurut SPLN D3.002-1 : 2007 adalah sebagai berikut :

Tabel 2.5 *Losses* transformator tanpa beban [29]

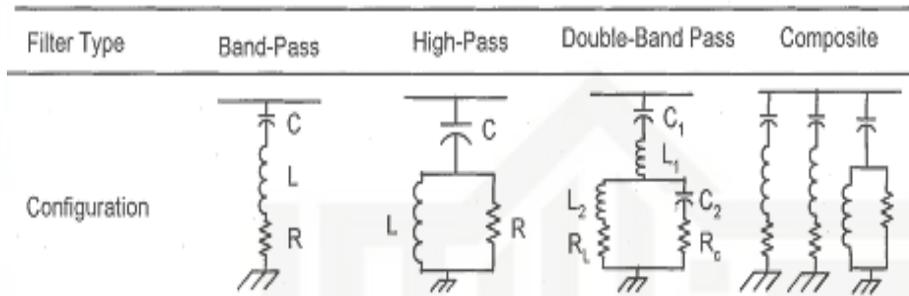
Daya (kVA)	<i>Losses</i> tanpa beban (W)	Daya (kVA)	<i>Losses</i> tanpa beban (W)
1	2	500	700
25	75	630	835
50	125	800	1000
100	210	1000	1100
160	300	1250	1400
200	355	1600	1680
250	420	2000	1990
315	500	2500	2350
400	595		

## 2.7. Desain filter harmonik

Ada berbagai 2 jenis filter yang dapat digunakan untuk meredam harmonisa yang terjadi pada sistem distribusi listrik yaitu filter aktif dan filter pasif. Filter aktif merupakan suatu rangkaian filter yang terdiri dari komponen elektronika daya atau komponen aktif seperti *OP-Amplifier*, *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET) [13]. Filter aktif ini lebih efisien dibandingkan dengan filter pasif karena dapat menyerap harmonisa yang terjadi pada sistem pada orde berapapun oleh karena komponen elektronika pembentuknya yang kompleks dan juga harganya yang lebih mahal dari filter pasif.

Filter pasif merupakan filter yang terdiri dari rangkaian komponen-komponen pasif R (resistor), L (induktor), C (kapasitor). Pemasangan filter pasif pada sistem tenaga listrik salah satu tujuannya adalah untuk mengurangi amplitudo satu orde ke- $h$  dari tegangan atau arus harmonisa, dengan demikian penyebaran arus harmonisa dari sumber-sumber harmonisa dapat diredam [14]. Terdapat dua jenis filter pasif yaitu filter pasif seri dan filter pasif *shunt*. Filter seri harus rancang untuk arus maksimum dari rangkaian utama. Sedangkan pada filter pasif *shunt* hanya membawa arus harmonik dan sebagian arus fundamental yang jauh lebih kecil dari arus yang berada di rangkaian utama. Oleh sebab itu, filter pasif *shunt* lebih murah ketimbang filter pasif seri namun ke efektifannya sama.

Filter pasif shunt memiliki keuntungan lain yaitu dapat menyuplai daya reaktif pada frekuensi dasar [12]. Ada berbagai bentuk filter pasif shunt yang dipakai, namun yang biasa digunakan adalah *single tuned filter* dan *high pass filter*. Kedua filter tersebut merupakan filter yang paling sederhana dalam desainnya dan murah untuk diimplementasikan. Berikut adalah bentuk rangkaian dari berbagai macam filter pasif :



Gambar 2.6 Rangkaian filter pasif serta konfigurasi dan impedansinya [11]

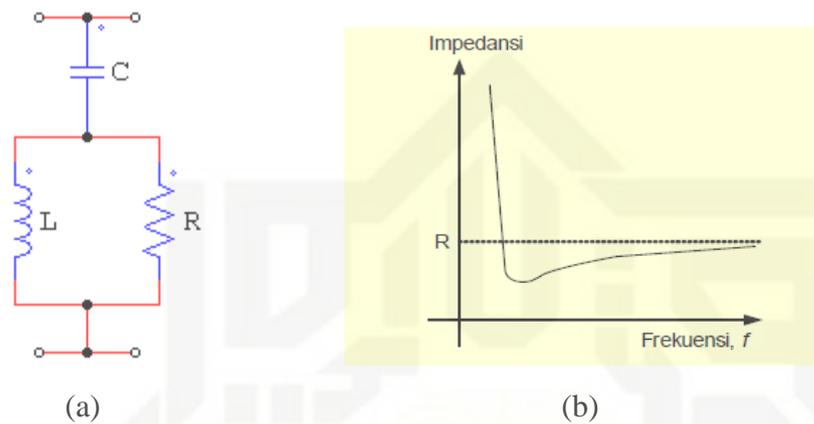
Filter pasif berfungsi untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus dengan cara menyediakan jalur yang rendah impedansinya pada frekuensi harmonisa sehingga dapat menekan penyebaran arus harmonisa ke seluruh jaringan. Filter pasif tersusun dari komponen-komponen resistor (R), induktor (L), dan kapasitor (C). Secara umum filter harmonisa dapat dibedakan dalam tiga jenis antara lain [26]:

- Single Tuned Shunt Filter* (STF) menyediakan jalur dengan impedansi rendah untuk satu frekuensi harmonisa. Nilai *Quality Factor* (Q) yang tinggi ditala secara tajam pada satu frekuensi harmonisa yang rendah.
- Double Tuned Filter* memiliki karakteristik impedansi yang ekuivalen dengan dua buah STF dipasang secara paralel dimana frekuensi yang ditala saling berdekatan.
- High Pass Damped Filter* (HPF) digunakan untuk membuat impedansi yang rendah untuk spektrum frekuensi harmonisa yang lebar. Nilai Q pada HPF umumnya bernilai rendah. Terdapat empat jenis *damped filter* yaitu *damped filter* orde satu, orde dua, orde tiga dan jenis *damped filter* tipe C.

Dari data hasil penelitian diketahui harmonisa yang terjadi pada orde ke-3, namun pada harmonisa orde ke-5 dan ke-7 penulis berasumsi bahwa harmonisa tersebut memiliki potensi untuk mengalami peningkatan, filter jenis *high pass damped* ini sangat cocok digunakan karena dapat meredam harmonisa yang dominan dan yang tak dominan. Hal

tersebut disebabkan oleh kemampuan filter yang dapat membuat impedansi yang rendah untuk spektrum harmonisa yang lebar.

### 2.7.1. Desain High Pass Damped Filter Second Order



Gambar 2.7 : a. High pass damped filter [20].  
 b. Kurva impedansi fungsi frekuensi dari high pass damped filter [20].

High pass damped filter merupakan jenis filter yang melewatkan frekuensi tinggi, tetapi mengurangi amplitude frekuensi yang lebih rendah. Nilai-nilai pengurangan untuk frekuensi berbeda-beda untuk tiap-tiap filter, high pass filter ini terdiri dari kapasitor dan resistor serta induktor yang terhubung paralel. Filter ini terdiri dari sebuah komponen kapasitor yang diserikan dengan komponen induktor dan resistor yang di paralelkan. Impedansi pada high pass filter ini dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut [12]:

$$Z_f = \frac{jR_h X_L}{R + jR_h X_L} - j \frac{X_C}{h} \quad (2.26)$$

$$Z_f = \frac{R(hX_L)^2}{R^2 + (hX_L)^2} + j \left[ \frac{R^2 h X_L}{R^2 + (hX_L)^2} - \frac{X_C}{h} \right] \quad (2.27)$$

Sedangkan untuk magnitude high pass damped filter second order adalah :

$$|Z_f| = \sqrt{\frac{R(hX_L)^2}{R^2 + (hX_L)^2} + j \left[ \frac{R^2 h X_L}{R^2 + (hX_L)^2} - \frac{X_C}{h} \right]} \quad (2.28)$$

Dengan :  $Z_f$  = Impedansi high pass damped filter second order ( $\Omega$ )

R = Resistansi ( $\Omega$ )

h = orde harmonisa yang difilter

$X_L$  = Reaktansi induktif ( $\Omega$ )

$X_C$  = Reaktansi kapasitif ( $\Omega$ )

Filter pasif jenis *high pass damped filter* ini memiliki beberapa keuntungan diantaranya [25] :

- 1) Pembebanan dan pemanfaatannya tidak begitu sensitif terhadap perubahan temperatur, perubahan frekuensi, toleransi komponen dari perusahaan, dan rugi-rugi kapasitor.
- 2) Memberikan impedansi yang rendah untuk spektrum frekuensi harmonisa yang lebar, tanpa memerlukan *subdivision* paralel.
- 3) Penggunaan filter jenis damped filter dapat menghasilkan resonansi paralel antara filter itu sendiri dengan admitansi dari sistem di frekuensi orde harmonik di bawah tuning filter yang lebih rendah. Pada sejumlah kasus, penggunaan satu atau lebih *damped filter* dapat menjadi alternatif yang dapat diterima.

Namun, filter jenis *damped filter* juga memiliki beberapa kerugian, yaitu :

- 1) Dengan filter yang sama, perancangan *damped filter* untuk VA rating yang besar (VA rating pada frekuensi fundamentalnya) akan mengalami kesulitan. Namun dalam hal ini, unjuk kerja yang baik dari suatu peralatan filter termasuk juga koreksi faktor daya.
- 2) Kerugian yang terjadi pada resistor dan reaktansi pada umumnya lebih besar, karena pada filter jenis *damped filter* ini memiliki nilai resistansi dan reaktansi yang cukup besar.

### 2.7.2. Batasan komponen filter

#### 1. Kapasitor

Batas beban yang diperbolehkan berdasarkan *standard* ANSI/IEE 18-1980 sebagai berikut [12] :

- a. kVAR = 135%
- b. tegangan efektif = 110%
- c. jumlah tegangan puncak = 120%
- d. arus efektif = 180%

Walaupun dalam standar batas arus efektif adalah 180%, namun dalam aplikasinya mungkin lebih rendah karena masing-masing unit kapasitor diproteksi pada 125 – 165 % dari arus ratingnya. Dalam mendesain filter, batas arus dan tegangan efektif dan jumlah tegangan puncak pada kapasitor bank sebaiknya berkisar 100% dari rating kondisi normal. Hal ini dilakukan supaya kapasitor dapat mengkompesasi tegangan lebih sistem dan kondisi tidak seimbang pada kapasitor. Komponen harmonik meningkat secara signifikan untuk kondisi ke tidak seimbangan kapasitor bank [23].

2. Induktor

Induktor yang digunakan untuk aplikasi filter biasanya dari tipe inti udara yang memberikan karakteristik linier berkenaan dengan frekuensi dan arus. Toleransi reaktansi  $\pm 5\%$  dapat diterima untuk aplikasi sistem tenaga untuk industri [23]. Parameter-parameter yang digunakan untuk menentukan spesifikasi induktor adalah :

- a. Arus pada frekuensi dasar
- b. Spektrum arus harmonik
- c. Arus hubung singkat
- d. Rasio X/R
- e. Tegangan sistem
- f. BIL (*Basic Insulation Level*)

**2.7.3. Langkah-langkah dalam merancang *High Pass Damped Filter***

- 1) Dalam merancang sebuah filter pasif perlu ditentukan berapa besar daya reaktif pada sistem. Daya reaktif ini berfungsi untuk menentukan besar nilai kapasitansi yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Maka persamaan untuk mencari besarnya daya reaktif yaitu [12]:

$$Q_{VAr} = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \tag{2.29}$$

Dengan :  $Q_{VAr}$  = Nilai kompensasi daya reaktif (VAr)

P = Daya aktif sistem (W)

$\theta$  = Sudut fasa

- 2) Jika daya reaktif sistem sudah diketahui maka selanjutnya mencari nilai reaktansi kapasitif dan nilai kapasitornya, dengan persamaan berikut [12]:

$$X_c = \frac{V^2}{Q_{VAr}} \tag{2.30}$$

Catatan : frekuensi 50 Hz

Dengan :  $X_c$  = Reaktansi Kapasitif ( $\Omega$ )

V = Tegangan sistem (kV)

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \tag{2.31}$$

Dengan : C = Kapasitansi (F)

- 3) Selanjutnya yaitu dengan mencari nilai induktansi dari rangkaian *high pass damped filter*, dengan persamaan berikut [25]:

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \tag{2.32}$$

Dengan :  $X_L$  = Reaktansi Induktif ( $\Omega$ )

$h$  = orde harmonik tegangan yang difilter (disetel sedikit dibawah ordenya)

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.33)$$

Dengan :  $L$  = Induktansi (H)

- 4) Kemudian selanjutnya adalah menghitung karakteristik reaktansi untuk menentukan besarnya nilai resistansi yang dibutuhkan. Maka untuk menghitung karakteristik reaktansi dapat dilakukan dengan persamaan berikut [25] :

$$X_n = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.34)$$

Dengan :  $X_n$  = karakteristik reaktansi

- 5) Dari persamaan diatas maka didapat nilai karakteristik reaktansi maka besarnya resistansi dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut [25]:

$$R = Q \cdot X_n \quad (2.35)$$

Dengan :  $R$  = Resistansi ( $\Omega$ )

$Q$  = *Quality Factor*

Nilai faktor  $Q$  merupakan ukuran ketajaman penyetelan filter dalam mereduksi harmonik. Nilai  $Q$  factor untuk *high pass damped filter* berkisar antara 0,5 sampai 5 [31].

#### 2.7.4. Perhitungan rating unjuk kerja filter

Untuk menentukan rating kerja dari filter, dilakukan beberapa tahapan langkah sebagai berikut [12] :

1. Perhitungan kerja fundamental filter

Kelengkapan kerja fundamental filter terdiri dari untuk tegangan *phase to phase* dan daya 1 phasa :

- a) Impedansi fundamental

$$X_{fund} = |X_L - X_C| \quad (2.36)$$

- b) Arus fundamental

$$I_{fund} = \frac{V_{actual}}{X_{fund}} \quad (2.37)$$

- c) Tegangan kapsitor

$$V_C = I_{fund} \times X_C \quad (2.38)$$

- d) Rating kapasitor

$$VAR_{fund} = I_{fund} \times V_{rated} \quad (2.39)$$

2. Perhitungan kerja harmonik filter

Ada dua macam arus harmonik yang terjadi pada sistem yaitu harmonik dari sisi sumber dan harmonik dari sisi beban.

A. Arus harmonik yang dihasilkan oleh beban

a) Arus harmonik total filter

$$I_h = I_h(pu) \times \frac{VA}{V_{actual}} \quad (2.40)$$

Dengan:  $I_h$  (pu) = arus harmonik terbesar

b) Tegangan harmonik kapasitor

$$V_{ch} = \frac{I_h \times X_c}{h} \quad (2.41)$$

B. Arus harmonik yang dihasilkan di sisi sumber

Pada trafo yang dijadikan objek penelitian memiliki spesifikasi sebagai berikut :

a) Impedansi fundamental *service transformer*

$$X_T = Z_T (\%) \frac{kV_{rated}^2}{MVA_{rated}} \quad (2.42)$$

b) Impedansi harmonik dari *service* harmonik

$$X_h = h X_T \quad (2.43)$$

c) Impedansi harmonik reaktansi kapasitif

$$X_C (harm) = \frac{X_c}{h} \quad (2.44)$$

d) Impedansi harmonik reaktansi induktif

$$X_L (harm) = h X_L \quad (2.45)$$

e) Arus harmonik *utility*

$$I_{hU} = \frac{V_{h(utility)} (pu) \times V_{rated}}{(X_h - X_C + X_L)} \quad (2.46)$$

Dengan:  $V_{h(utility)}$  = nilai  $THD_V$  pada sisi utilitisasi

C. Perhitungan kerja total filter

a) Arus rms total

$$I_{rms} = \sqrt{I_{fund}^2 + I_{hU}^2} \quad (2.47)$$

b) Tegangan puncak

$$V = V_C + V_{Ch} \quad (2.48)$$

c) Tegangan rms

$$V_{rms} = \sqrt{V_C^2 + V_{Ch}^2} \quad (2.49)$$

d) Daya reaktif kapasitor total ( $Q_C total$ )

$$Q_C total = I_{rms} \times V_{rms} \quad (2.50)$$

Tabel 2.6 Perbandingan batasan kerja filter [12].

Kerja	Definisi	Batasan (%)
Tegangan puncak	$V / V_{rated}$	120
Tegangan RMS	$V_{rms} / V_{rated}$	110
Arus RMS	$I_{rms} / I_{fund}$	180
VAR	$VAR_{total} / VAR_{fund}$	135

### 2.7.5. Menghitung pengurangan nilai arus harmonisa setelah pemasangan filter

Setelah besar kapasitor, induktor, dan resistor untuk desain *high pass damped filter* telah didapatkan, langkah selanjutnya adalah menghitung besar pengurangan arus harmonik pada orde harmonisa yang direduksi. Pengurangan besar arus harmonik dapat dilihat melalui persamaan berikut ini :

1. Menghitung nilai reaktansi dan resistansi hubung singkat sistem [12]:

$$Z_{hs} = \frac{kV \times 1000}{I_{sc}} \quad (2.51)$$

$$X_{hs} = X_{hst} = Z\% \frac{kV^2}{MVA} \quad (2.52)$$

$$R_{hs} = \sqrt{Z_{hs}^2 - X_{hst}^2} \quad (2.53)$$

Dengan :  $Z_{hs}$  = Impedansi hubung singkat sistem ( $\Omega$ )

$X_{hs}$  = Reaktansi hubung singkat sistem ( $\Omega$ )

$X_{hst}$  = Reaktansi hubung singkat transformator dengan asumsi nilai reaktansi merupakan impedansi transformator ( $\Omega$ )

$R_{hs}$  = Resistansi hubung singkat sistem ( $\Omega$ )

Z% = Impedansi pengenal transformator

$I_{sc}$  = Arus hubung singkat (A)

kV = tegangan 3 fasa sekunder transformator (kV)

MVA = kapasitas transformator (MVA)

2. Menghitung nilai reaktansi kapasitif dan induktif pada orde harmonik yang di filter [12]:

$$X_L(h) = h X_L(1) \quad (2.54)$$

$$X_C(h) = \frac{X_C(1)}{h} \quad (2.55)$$

- Menghitung nilai resistansi dan reaktansi hubung singkat orde ke-h pada sistem. Untuk nilai resistansi  $R_{hs} = R_{hs(1)}$ , sedangkan untuk nilai reaktansi hubung singkat pada harmonisa orde ke-h sistem dapat dihitung dengan [12]:

$$X_{hs(h)} = h X_{hs(1)} \quad (2.56)$$

- Menghitung nilai impedansi Z hubung singkat sistem pada harmonik orde ke-h [12]:

$$Z_{hs(h)} = \sqrt{R_{hs(h)}^2 + X_{hs(h)}^2} \quad (2.57)$$

- Menghitung jumlah nilai arus harmonik pada orde ke-h yang difilter [12]:

$$I_f(h) = \frac{Z_{hs}}{Z_{hs} + |X_L(h) - X_C(h)|} \times I_h \quad (2.58)$$

Dengan :  $I_h$  = arus harmonisa orde ke-h yang difilter

- Setelah itu untuk mendapatkan nilai arus pada orde ke-h harmonisa setelah pemasangan filter adalah [12]:

$$I_{h(new)} = I_h - I_f(h) \quad (2.59)$$

### 2.7.6. Menghitung losses penyerapan daya oleh filter

Saat filter bekerja membutuhkan daya untuk memproses arus harmonik tersebut, maka penting untuk dihitung losses akibat penyerapan daya oleh filter tersebut. Persamaan yang digunakan untuk menghitung *losses* dari filter yaitu :

- Perhitungan daya yang diserap oleh filter [2]:

$$P = I^2 \times R \quad (2.60)$$

Dengan : P = daya aktif yang diserap oleh filter (W)

I = Arus fundamental filter (A)

R = Resistansi filter ( $\Omega$ )

- Menentukan besaran faktor daya filter, berikut persamaan untuk mencari faktor daya filter [2]:

$$Q = I^2 \cdot X \quad (2.61)$$

Dengan : Q = daya reaktif (VAR)

X = impedansi fundamental ( $\Omega$ )

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.62)$$

Dengan : S = daya semu (VA)

Maka persamaan untuk faktor daya :

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.63)$$

3. Maka untuk menentukan besar *losses filter* sebagai berikut [2]:

$$Losses\ filter = (\sqrt{(Q - Q_{VAR})^2 + (P)^2}) \times PF \quad (2.64)$$

Dengan : Q = daya reaktif (VAR)

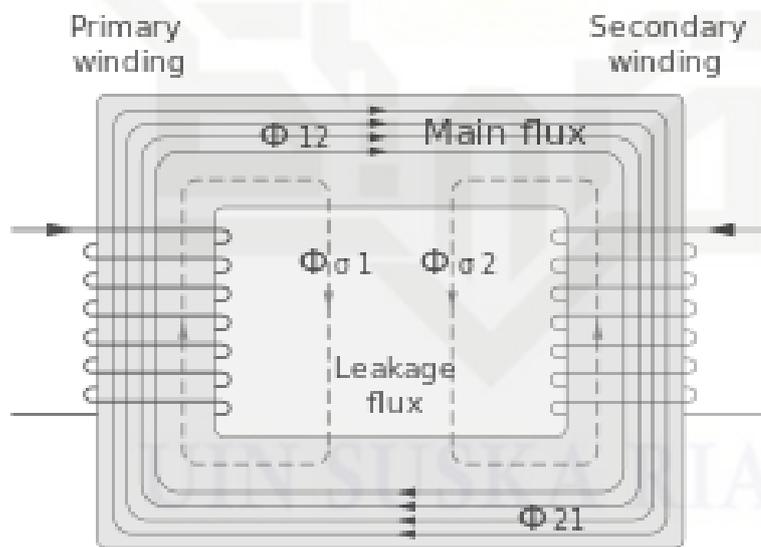
$Q_{VAR}$  = daya reaktif kompensasi sistem (VAR)

P = daya aktif (W)

PF = faktor daya

## 2.8. Teori Transformator Distribusi

Transformator atau Trafo adalah salah satu peralatan listrik yang berfungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan. Transformator bekerja berdasarkan prinsip dari induksi elektromagnetik. Saat tegangan bolak-balik masukan yang dialirkan menuju lilitan primer, kemudian menimbulkan fluks magnetik yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder trafo. Fluks bolak-balik kemudian menginduksikan gaya gerak listrik (ggl) dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, maka semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder [27].



Gambar 2.8 Transformator [27]

Transformator distribusi merupakan suatu komponen yang sangat penting dalam penyaluran tenaga listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Kerusakan pada trafo distribusi menyebabkan kontinuitas pelayanan terhadap konsumen akan terganggu (terjadi pemutusan aliran listrik atau pemadaman). Berdasarkan tenaganya trafo dapat dibedakan menjadi, trafo 500/150 kV dan 150/70 kV yang biasa disebut dengan trafo *Interbus*

*Transformator* (IBT) dan trafo 150/20 kV dan 70/20 kV yang disebut dengan trafo distribusi. Pada umumnya transformator ditanahkan pada titik netral sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan atau proteksi. Contohnya seperti pada trafo 150/20 kV di tanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan trafo 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV [28].



- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.