

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik**

Sistem distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*bulk power source*) sampai ke konsumen. Tenaga listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tenaga listrik besar dengan tegangan dari 11 kV sampai 24 kV dinaikkan tegangannya oleh gardu induk dengan transformator penaik tegangan menjadi 70 kV, 154 kV, 220 kV atau 500 kV kemudian disalurkan melalui saluran transmisi. Tujuan menaikkan tegangan ialah untuk memperkecil kerugian daya listrik pada saluran transmisi, dimana dalam hal ini kerugian daya adalah sebanding dengan kuadrat arus yang mengalir (Suhadi & Wrahatnolo, 2008).

Pada masa sekarang ini dimana kebutuhan akan tenaga listrik meningkat, maka diperlukan suatu sistem pendistribusian tenaga listrik dari pembangkit sampai kepada para konsumen yang memiliki keandalan yang tinggi. Tenaga listrik yang didistribusikan tersebut tidak hanya tegangan menengah dan rendah saja, namun juga tegangan tinggi dan ekstra tinggi. Namun yang umum disebut sistem distribusi adalah sistem tegangan menengah (*primer*) dan tegangan rendah (*sekunder*).

#### **2.2. Komponen Utama Jaringan Distribusi**

Dalam melakukan distribusi tenaga listrik diperlukan beberapa komponen-komponen utama yang menunjang distribusi tenaga listrik, yaitu:

##### **2.2.1. Gardu Induk**

Gardu induk merupakan suatu komponen penting dalam distribusi tenaga listrik yang berfungsi sebagai pengatur daya. Gardu induk juga berfungsi mentransformasikan daya listrik yang dihasilkan dari pusat-pusat pembangkit ke gardu induk lain dan juga ke gardu-gardu distribusi yang merupakan suatu interkoneksi dalam distribusi tenaga listrik.

### **2.2.2. Gardu Hubung**

Gardu hubung berfungsi menerima daya listrik dari gardu induk yang telah diturunkan menjadi tegangan menengah dan menyalurkan atau membagi daya listrik tanpa merubah tegangannya melalui Jaringan Tegangan Menengah (JTM) menuju gardu atau transformator distribusi. Gardu hubung merupakan satu gardu yang terdiri dari peralatan-peralatan hubung serta alat-alat kontrol lainnya, namun tidak terdapat transformator daya. Alat penghubung yang terdapat pada gardu hubung adalah sakelar beban yang selalu dalam kondisi terbuka (*normally open*), sakelar ini bekerja atau menutup hanya jika penyulang utama mengalami gangguan.

### **2.2.3. Gardu Distribusi**

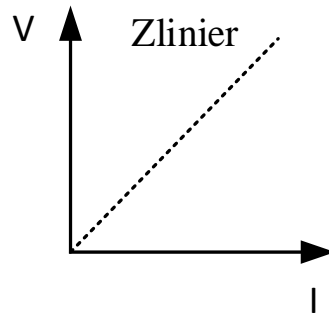
Gardu distribusi adalah suatu tempat atau bangunan instalasi listrik yang didalamnya terdapat alat-alat: pemutus, penghubung, pengaman, dan transformator distribusi untuk mendistribusikan tegangan listrik sesuai dengan kebutuhan tegangan konsumen. Peralatan-peralatan ini adalah dalam menunjang mencapai pendistribusian tenaga listrik secara baik yang mencakup kontinuitas pelayanan yang terjamin, mutu yang tinggi, dan menjamin keselamatan bagi manusia.

## **2.3. Jenis Beban Listrik**

Jenis beban yang terpasang pada sistem kelistrikan dibedakan menjadi dua, yaitu beban linier dan beban non-linier.

### **2.3.1. Beban Linier**

Beban linier merupakan jenis beban yang komponen arusnya proporsional terhadap tegangan dan memberikan bentuk keluaran yang linier sehingga arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Apabila tegangan sumber bentuknya sinusoidal, maka arus yang melewati beban juga harus sama sinusoidal. Gelombang arus yang dihasilkan oleh beban linier akan sama bentuknya dengan bentuk gelombang tegangan. Contoh yang termasuk kedalam jenis beban linier adalah resistor, lampu pijar, pemanas, dan lain-lain (Pasaribu, 2021). Hubungan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban linier seperti pada Gambar 2.1.

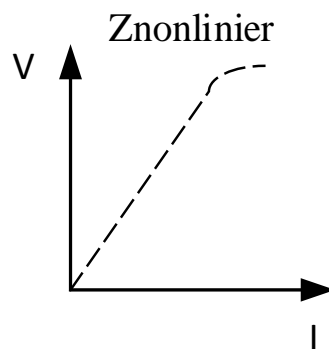


**Gambar 2. 1** Resultan Beban linier

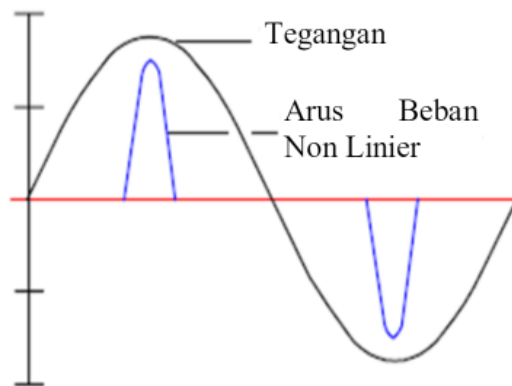
### 2.3.2. Beban Non-Linier

Beban kelistrikan secara umum terbagi menjadi dua yaitu beban linier dan beban non-linier. Beban linier adalah beban yang nilai impedansinya konstan setiap waktu, sehingga arus akan selalu berbanding lurus dengan tegangan. Sementara itu, beban non-linier adalah beban kelistrikan yang nilai impedansinya tidak konstan dalam setiap periode tegangan masukan, sehingga arus yang dihasilkan tidak sebanding dengan tegangan.

Beban non-linier adalah beban yang gelombang arus yang dihasilkan tidak sama bentuknya dengan gelombang tegangan, sehingga memicu terjadinya distorsi gelombang (Pasaribu, 2021). Hubungan yang menunjukkan antara gelombang tegangan dan arus yang dimiliki beban non-linier seperti pada Gambar 2.2 dan 2.3.

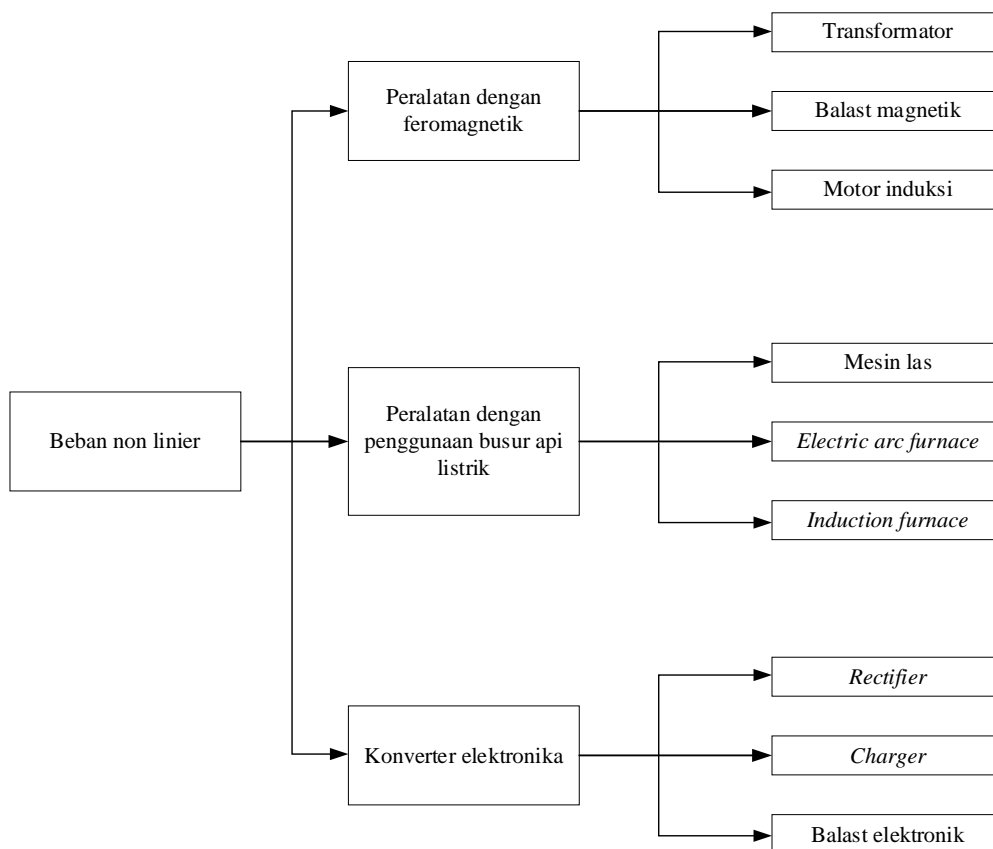


**Gambar 2. 2** Resultan Beban Non-Linier



**Gambar 2. 3** Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Beban Non-Linier  
(Sumber : Pasaribu, 2021)

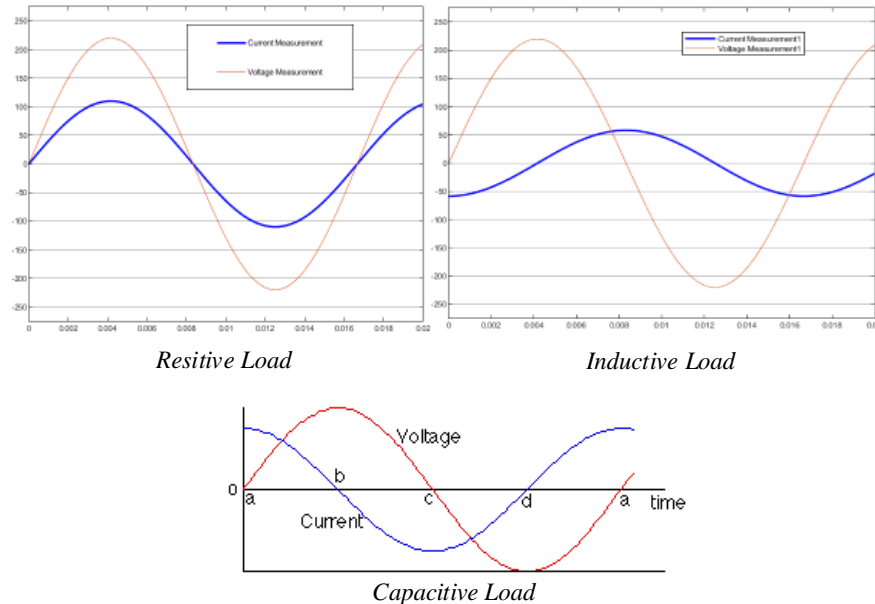
Penggunaan beban non-linier sangat luas, dari sektor industri, komersil, hingga rumah tangga telah memanfaatkan peralatan non-linier. Penggunaan beban non-linier banyak digunakan di hampir setiap sektoral karena kemampuannya yang sangat tinggi dalam membantu mengefisienkan pekerjaan. Klasifikasi beban non-linier secara umum dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 2.4:



**Gambar 2. 4** Klasifikasi Beban Non-Linier

## 2.4. Sifat Beban-Beban Listrik

Dalam sistem listrik arus bolak balik, jenis-jenis beban listrik dapat diklasifikasikan menjadi tiga bagian seperti pada Gambar 2.5, yaitu :



**Gambar 2. 5** Beban Resistif, Induktif dan Kapasitif

### a. Beban Resistif (R)

Beban resistif adalah sebuah peralatan listrik yang didalamnya terdapat komponen yang bekerja dengan sistem resistansi. Jadi, jenis beban ini hanya mengonsumsi daya aktif. Beban resistif tidak akan mengakibatkan perubahan pada faktor daya, sehingga memiliki nilai faktor daya yang tetap.

### b. Beban Induktif (L)

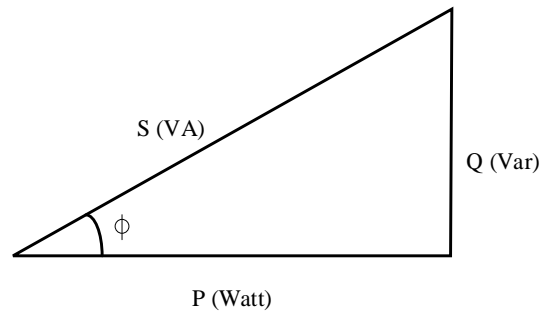
Beban induktif adalah alat listrik yang menggunakan beban induktif biasanya beroperasi dengan prinsip kerja induksi. Tidak hanya itu saja, alat listrik yang menggunakan beban induktif juga memakai kawat penghantar. Umumnya kawat ini dililitkan pada bagian inti kumparan untuk menghambat laju arus pada rangkaian instalasi listrik. Karakteristik lain dari alat yang menggunakan beban induktif yakni adanya daya harmonisa yang dihasilkan. Daya ini nantinya bisa menyerap daya aktif sekaligus daya reaktif dalam rangkaian. Akhirnya faktor daya pada rangkaian listrik tersebut juga akan mengalami penurunan.

c. Beban Kapasitif (C)

Beban kapasitif adalah alat-alat listrik yang bekerja dengan beban kapasitif biasanya memiliki kemampuan kapasitansi. Bisa dikatakan kapasitansi yakni tingkat kemampuan penyerapan energi listrik sementara. Jadi nantinya daya aktif akan diserap dan sebaliknya daya reaktif ini akan dihilangkan.

## 2.5. Faktor Daya

Faktor daya adalah perbandingan antara daya aktif (Watt) dengan daya semu/daya total (VA), atau nilai cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan nilai cosinus sudut dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Nilai faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu (Esye & Lesmana, 2021).



**Gambar 2. 6** Segitiga Daya

Persamaan faktor daya dapat dilihat seperti pada persamaan (2.1).

$$\cos\phi = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (2.1)$$

Rumus daya aktif 1 phasa dan 3 phasa.

$$P = V \times I \times \cos\phi \quad (2.2)$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \quad (2.3)$$

Rumus daya reaktif 1 phasa dan 3 phasa.

$$Q = V \times I \times \sin\phi \quad (2.4)$$

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin\phi \quad (2.5)$$

Rumus daya semu 1 phasa dan 3 phasa.

$$S = V \times I \quad (2.6)$$

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \quad (2.7)$$

Keterangan :

$\text{Cos}\varphi$  = Faktor daya

P = Daya aktif (W)

S = Daya semu (VA)

Q = Daya reaktif (VAr)

I = Arus (A)

$\text{Cos}\varphi$  = Faktor daya beban

$\text{Sin}\varphi$  = Faktor daya reaktif

Menurut sejarahnya, penggunaan konsep daya semu (*apparent power*) dan faktor daya (*power factor*) diperkenalkan oleh kalangan industri penyedia daya listrik, yang bisnisnya memindahkan energi listrik dari satu titik ke titik lain. Efisiensi proses pemindahan daya listrik ini terkait langsung dengan biaya energi listrik yang pada gilirannya menjelma menjadi biaya yang harus dibayarkan oleh konsumen. Hal yang mempengaruhi perpindahan energi listrik tersebut adalah faktor daya. Untuk mencapai efisiensi pemindahan energi 100 %, maka rangkaian harus memiliki nilai faktor daya sebesar 1. Namun hal ini sulit dicapai karena adanya rugi – rugi yang ditimbulkan oleh penghantar listrik dan juga beban listrik, terutama beban induktif. Pada rangkaian induktif, arus tertinggal dari tegangan, oleh sebab itu rangkaian ini memiliki faktor daya tertinggal atau *lagging*. Sedangkan pada rangkaian kapasitif, arus mendahului tegangan, oleh sebab itu rangkaian ini memiliki faktor daya mendahului atau *leading* (Noor dkk., 2017).

Roger C. Dugan (Dugan, 2002) memberikan empat alasan utama perlunya perhatian lebih akan masalah kualitas daya:

1. Perangkat listrik yang digunakan pada saat ini sangat sensitif terhadap kualitas daya listrik yang mana perangkat berbasis mikroprosesor dan elektronika daya lainnya membutuhkan tegangan pelayanan yang stabil dan level tegangannya juga harus dijaga pada tegangan kerja perangkat tersebut.
2. Peningkatan yang ditekankan pada efisiensi daya / sistem kelistrikan secara keseluruhan yang mengakibatkan pertumbuhan lanjutan dalam aplikasi perangkat dengan efisiensi tinggi, seperti pengaturan kecepatan motor listrik dan penggunaan kapasitor bank untuk koreksi faktor daya untuk mengurangi rugi – rugi. Hal ini mengakibatkan peningkatan tingkat harmonisa pada sistem

tenaga dan mengakibatkan banyak praktisi dibidang sistem tenaga listrikan khawatir akan dampak tersebut di masa depan (dikhawatirkan dapat menurunkan kemampuan dari sistem tersebut).

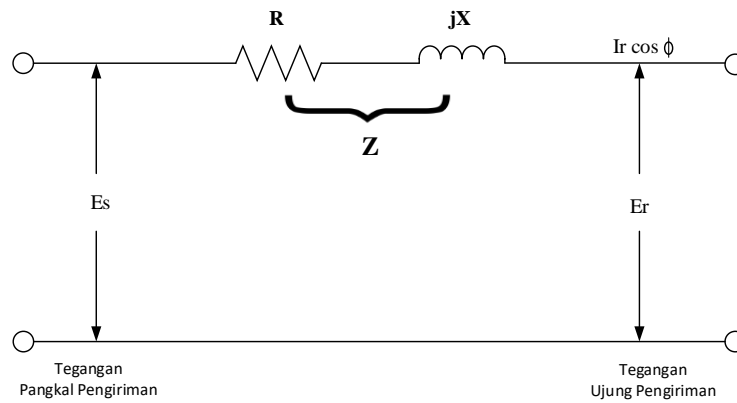
3. Meningkatnya kesadaran para konsumen akan masalah kualitas daya. Dimana pelanggan/konsumen menjadi lebih mengerti akan masalah seperti interupsi, dan transien *switching* dan mengharapkan sistem utilitas listrik untuk meningkatkan kualitas daya yang dikirim.
4. Sistem tenaga listrik sekarang ini sudah banyak yang melakukan interkoneksi antar jaringan, di mana hal ini memberikan suatu konsekuensi bahwa kegagalan dari setiap komponen akan mengakibatkan kegagalan pada komponen lainnya.

## **2.6. Perbaikan *Drop* Tegangan**

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Jatuh tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya jatuh tegangan dinyatakan baik dalam persen atau dalam besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan jatuh tegangan praktis pada batas-batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada sistem jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti.

Jatuh tegangan secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Jatuh tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh tegangan ( $V$ ) pada penghantar semakin besar jika arus ( $I$ ) di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar semakin besar pula. Jatuh tegangan merupakan penanggung jawab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan.





**Gambar 2.7** Resistansi dan Induktansi pada Penghantar  
(Sumber : Zuhail, 2000)

Berdasarkan Gambar 2.7 didapatkan persamaan untuk menghitung jatuh tegangan pada persamaan (2.10) dan (2.11) (Zuhail, 2000).

Untuk satu fasa :

$$E_s = E_r + IR \cos \phi_r + IX \sin \phi_r \quad (2.8)$$

$$E_s - E_r = IR \cos \phi_r + IX \sin \phi_r \quad (2.9)$$

$$\Delta V = I \times Z \quad (2.10)$$

Untuk tiga fasa :

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times Z \quad (2.11)$$

$$\% \Delta V = \frac{\Delta V}{V} \times 100 \% \quad (2.12)$$

Keterangan :

$R$  = Impedansi saluran (ohm)

$jX$  = Induktansi saluran (ohm)

$I$  = Arus yang mengalir (A)

$Z$  = Impedansi saluran (ohm)

$\Delta V$  = Susut tegangan (V)

$V$  = Tegangan pangkal pengiriman (V)

Persentase jatuh tegangan maksimum yang diijinkan bervariasi dari satu negara ke negara lain. Pada sistem pengoperasian tenaga listrik, kita memerlukan adanya kualitas pelayanan yang baik. Salah satu contohnya yaitu memberikan nilai tegangan yang baik kepada pelanggan dan tidak adanya gangguan *drop* tegangan.

Standar *drop* tegangan menurut SPLN 1:1995 adalah -10 % dan +5 % (SPLN 1, 1995).

### 2.6.1. Kawat Penghantar

Jenis kawat penghantar yang biasa digunakan pada saluran transmisi adalah tembaga dengan konduktivitas 100 % (CU 100 %), tembaga dengan konduktivitas 97 % (CU 97 %) dan aluminium dengan konduktivitas 61 % (AL 61 %). Kawat penghantar aluminium terdiri dari berbagai jenis dengan lambang sebagai berikut :

- a. *All-Aluminium Conductor* (AAC) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari aluminium.
- b. *All-Aluminium-Alloy Conductor* (AAAC) yaitu : kawat penghantar yang seluruhnya terbuat dari campuran aluminium.
- c. *Aluminium Conductor Steel Reinforced* (ACSR) yaitu : kawat penghantar aluminium berinti kawat baja.
- d. *Aluminium Conductor Alloy Reinforced* (ACAR) yaitu : kawat penghantar aluminium yang diperkuat dengan logam campuran.

Pada umumnya saluran transmisi yang ada di Indonesia menggunakan jenis kawat penghantar jenis ACSR, seperti yang ditunjukkan seperti pada Gambar 2.9. Karena kawat tembaga mempunyai tahanan yang sama besar, berat dan harga yang lebih mahal dari aluminium. Untuk memperbesar tarik dari aluminium maka digunakan campuran aluminium (*Aluminium Alloy*).



**Gambar 2. 8** Kabel ACSR

**Gambar 2.9** memperlihatkan penampang dari suatu kawat penghantar  
(Sumber : [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com))

ACSR yang banyak digunakan. Penghantar tersebut terdiri dari 7 serat baja/*steel* (St) yang membentuk inti tengah sedangkan di sekelilingnya terdapat dua lapisan serat aluminium (Al) dengan 24 serat. Kawat penghantar semacam ini dispesifikasikan sebagai 24Al/7St atau 24/7 (Abduh & Syamsir, 2001).

## 2.7. Kapasitor Bank

Kapasitor bank adalah rangkaian yang terdiri dari beberapa unit kapasitor. Kapasitas unit kapasitor menyatakan besar daya reaktif nominal yang dihasilkan pada tegangan dan frekuensi nominal, dinyatakan dalam satuan dasar VAR. Insinyur sistem tenaga biasanya menganggap sebuah kapasitor sebagai generator daya reaktif positif, dan bukannya sebagai suatu beban yang memerlukan daya reaktif negatif. Konsep ini sangat masuk akal, karena sebuah kapasitor yang menarik daya reaktif negatif dan terpasang paralel dengan sebuah beban induktif akan mengurangi daya reaktif yang seharusnya disuplai seluruhnya oleh sistem kepada beban induktif. Dengan kata lain, kapasitor mencatu daya reaktif yang diperlukan oleh beban induktif. Hal ini sama saja dengan menganggap sebuah kapasitor sebagai suatu alat yang memberikan arus yang ketinggalan (*lagging*) dan bukannya sebagai alat yang menarik arus yang mendahului (*leading*). Jadi, sebuah kapasitor variabel yang terpasang paralel pada suatu beban induktif dapat diatur sedemikian rupa sehingga arus yang mendahului pada kapasitor menjadi tepat sama besar dengan komponen arus pada beban induktif yang tertinggal  $90^\circ$  terhadap tegangan. Inilah alasannya mengapa insinyur sistem tenaga lebih suka menganggap kapasitor sebagai pencatu daya reaktif kepada beban induktif (William D. Stevenson, 1994). Pemasangan kapasitor bank pada sebuah sistem listrik akan memberikan keuntungan sebagai berikut.

1. Peningkatan kemampuan jaringan dalam menyalurkan daya.
2. Optimasi biaya: ukuran kabel diperkecil.
3. Mengurangi besarnya nilai "*drop voltage*".
4. Mengurangi naiknya arus/suhu pada kabel, sehingga mengurangi rugi-rugi daya.

Peningkatan faktor daya ini tergantung dari seberapa besar nilai kapasitor yang dipasang (dalam kVAR). Sehingga denda VARh Anda bisa dikurangi. Pada kehidupan modern dimana salah satu cirinya adalah pemakaian energi listrik yang

besar. Besarnya energi atau beban listrik yang dipakai ditentukan oleh reaktansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C). Besarnya pemakaian energi listrik itu disebabkan karena banyak dan beraneka ragam peralatan (beban) listrik yang digunakan. Sedangkan beban listrik yang digunakan umumnya bersifat induktif dan kapasitif. Di mana beban induktif (positif) membutuhkan daya reaktif seperti transformator pada *rectifier*, motor induksi (AC) dan lampu TL, sedang beban kapasitif (negatif) mengeluarkan daya reaktif.

Daya reaktif itu merupakan daya tidak berguna sehingga tidak dapat dirubah menjadi tenaga akan tetapi diperlukan untuk proses transmisi energi listrik pada beban. Jadi yang menyebabkan pemborosan energi listrik adalah banyaknya peralatan yang bersifat induktif. Berarti dalam menggunakan energi listrik ternyata pelanggan tidak hanya dibebani oleh daya aktif (kW) saja tetapi juga daya reaktif (kVAR). Penjumlahan kedua daya itu akan menghasilkan daya nyata yang merupakan daya yang disuplai oleh PLN .

### **2.7.1. Prinsip Kerja Kapasitor Bank**

Bila dua buah benda bermuatan dan berlainan tanda yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik maka akan terdapat kapasitansi diantara kedua benda tersebut. Pemberian beda potensial diantara benda konduktor tersebut akan menghasilkan muatan positif pada suatu konduktor dan muatan negatif pada konduktor lainnya. Perbandingan harga listrik dengan harga mutlak beda potensial didefinisikan sebagai suatu kapasitansi.

### **2.7.2. Jenis-Jenis Kapasitor Bank**

Pada umumnya kapasitor bank memiliki jenis-jenis yang berbeda dalam penggunaannya, antara lain sebagai berikut.

#### **1. Kapasitor Bank Filter Harmonisa (*Harmonic Filter Capacitor Bank*).**

Hampir sebagian besar jenis peralatan pada sistem kelistrikan menghasilkan harmonisa, namun tidak hanya ditemukan pada jaringan industri saja. Akan tetapi, bisa juga menyebar ke sistem distribusi dimana menyebabkan masalah untuk para pelanggan. Jenis kapasitor bank filter harmonisa yang terdiri dari kapasitor yang dihubungkan secara seri dengan reaktor. Dimana berbagai

komponen tersebut menghasilkan ruang untuk membuat rangkaian resonansi seri berdasarkan gelombang frekuensi yang dibutuhkan.



**Gambar 2. 9** Kapasitor Bank Filter Harmonisa  
(Sumber : [www.riverspace.org](http://www.riverspace.org))

Keuntungan dari kapsitor bank filter harmonisa

- a) Dapat meningkatkan faktor daya, stabilitas tegangan.
- b) Bisa mengurangi *line loss*.
- c) Filter harmonisa didalam sistem.
- d) Bisa untuk menghindari masalah resonansi dan amplifikasi gangguan listrik.

## 2. Kapasitor Bank *Cubicle*

Jenis kapasitor bank bilik ini memakai sistem kompensasi reaktif tetap untuk kompensasi motor.



**Gambar 2. 10** Kapasitor Bank *Cubicle*  
(Sumber : [www.riverspace.org](http://www.riverspace.org))

## 3. Kapasitor Bank *Open Rack*

Jenis kapasitor ini banyak digunakan untuk meningkatkan faktor daya di dalam jaringan dengan meningkatkan faktor daya, maka akan berpengaruh juga pada

kemampuan transmisi daya dan kontrol aliran daya. Kapasitor *open rack* biasa digunakan untuk meningkatkan stabilitas jaringan listrik. Dengan meningkatnya stabilitas daya, maka kemampuan peningkatan transmisi dan juga kontrol aliran pada daya juga semakin meningkat. Berikut ini adalah manfaat dari kapasitor bank *open rack*, antara lain:

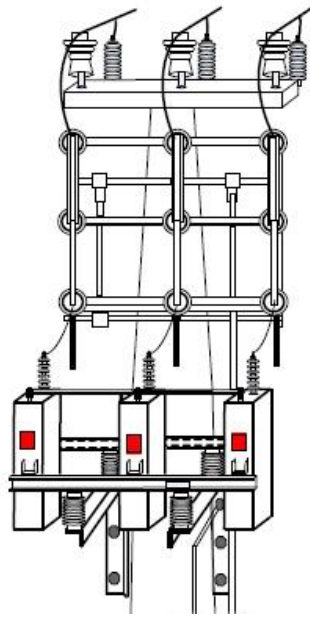
- a) Bisa mengurangi kehilangan jaringan (*network losses*).
- b) Untuk meningkatkan stabilitas tegangan.
- c) Meningkatkan kualitas daya simpan listrik.
- d) Dapat membatasi atau mengurangi biaya dalam penggunaan daya reaktif yang berlebih.
- e) Bisa meningkatkan kemungkinan muatan (*load*) didalam saluran transmisi dan transformator.



**Gambar 2. 11** Kapasitor Bank *Open rack*  
(Sumber : [www.riverspace.org](http://www.riverspace.org))

#### 4. Kapasitor Bank *Pole Mounted*

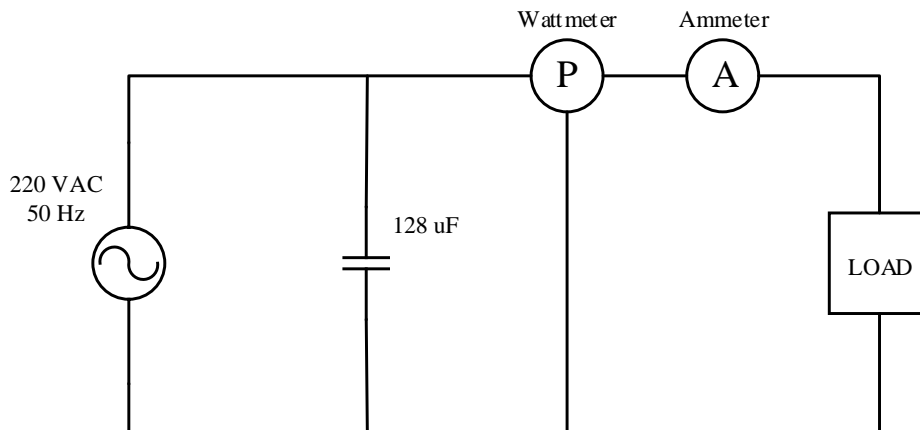
Tidak jauh dari namanya, jenis bank kapasitor ini digunakan pada tiang listrik yang berfungsi dalam memberikan dukungan tegangan. Selain itu, bank kapasitor ini dapat mengurangi terjadinya kehilangan sistem (*losses system*) dan meningkatkan daya dalam sistem penyaluran.



**Gambar 2. 12** Kapasitor Bank *Pole Mounted*  
(Sumber : [www.afb.com](http://www.afb.com))

### 2.7.3. Memperbaiki Faktor Daya Dengan Kapasitor Bank

Seperti yang sudah kita ketahui membangkitkan daya reaktif pada pusat pembangkit tenaga dan menyalurkannya ke pusat beban yang jaraknya jauh, sangatlah tidak ekonomis. Hal seperti dapat dilakukan dengan meletakkan kapasitor bank dipusat beban (Hasibuan dkk., 2020).



**Gambar 2. 13** Perbaikan Faktor Daya Dengan Kapasitor

Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat dihitung dengan bantuan komputer. Perhitungan secara manual dapat dilakukan untuk sistem distribusi yang relatif kecil, kVAR kapasitor yang

dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya dari  $\cos \phi_e$  sampai dengan  $\cos \phi_d$  menggunakan persamaan (2.13) (Wakileh, 1965).

$$Q_C = P [\tan(\cos^{-1} pf_1) - \tan(\cos^{-1} pf_2)] \quad (2.13)$$

Keterangan :

$Q_C$  = Kompensasi daya reaktif (VAr)

$P$  = Daya aktif (W)

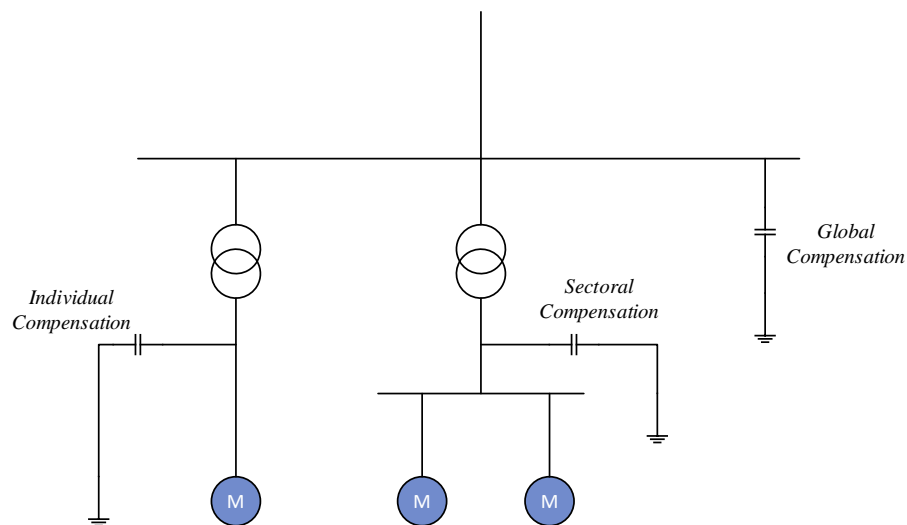
$Q_2$  = Daya reaktif sesudah perbaikan (VAr)

$pf_1$  = Faktor daya sebelum perbaikan

$pf_2$  = Faktor daya yang diinginkan

#### 2.7.4. Metode Instalasi Kapasitor Bank

Ada tiga cara pemasangan kapasitor bank pada instalasi listrik yaitu yang pertama *global compensation*, *sectoral compensation* dan *individual compensation* seperti Gambar 2.14 beserta keterangannya (Yani, 2017).



**Gambar 2. 14** Metode Pemasangan Instalasi Kapasitor Bank  
(Sumber : Yani, 2017)

a. *Global Compensation*

Dengan metode ini kapasitor bank dipasang pada induk panel *Mine Distribution Panel* (MDP) dan arus yang turun dari pemasangan model ini hanya pada penghantar antara panel MDP dan transformator.



b. *Sectoral Compensation*

Dengan metoda ini pemasangan kapasitor bank yang terdiri dari beberapa panel kapasitor yang akan dipasang pada setiap panel *Sub Distribution Panel* (SDP).

c. *Individual Compensation*

Dengan metoda ini kapasitor bank langsung dipasang pada masing masing beban yang akan digunakan khususnya beban yang mempunyai daya yang besar.

### 2.7.5. Menentukan Kapasitas kapasitor Bank

Kapasitor adalah komponen yang hanya dapat menyimpan dan memberikan energi yang terbatas yaitu sesuai dengan kapasitasnya, pada dasarnya kapasitor terdiri atas dua keping sejajar yang dipisahkan oleh medium dielektrik. Kapasitor pada sistem daya listrik menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya, karenanya memasang/menambah kapasitor pada sistem jaringan listrik akan mengurangi kerugian daya listrik. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedang pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan. Pemasangan komponen kapasitor seri dan paralel pada jaringan distribusi listrik mengakibatkan kerugian (*losses*) aliran daya reaktif pada jaringan dapat dikurangi sehingga kebutuhan arus menurun dan tegangan mengalami kenaikan sehingga kapasitas sistem jaringan bertambah. Kapasitor seri tidak digunakan secara luas dalam jaringan distribusi, karena adanya berbagai permasalahan resonansi distribusi dalam transformator.

Ukuran kapasitor untuk memperbaiki faktor daya sistem pada titik-titik tertentu dapat secara manual untuk sistem distribusi yang relatif kecil. Ada beberapa Metode dalam mencari ukuran kapasitor untuk perbaikan faktor daya seperti dengan metode perhitungan sederhana, metode tabel kompensasi dan metode diagram (Yani, 2017).

Untuk menghitung besarnya kapasitansi kapasitor bank dengan persamaan (2.14) dan (2.15) dibawah ini :

$$C = \frac{Q_C \times 10^3}{2\pi f \times V^2} \quad (2.14)$$

Kapasitas total per phasa

$$\frac{1}{C_{tot}} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} \quad (2.15)$$

Reaktansi Kapasitif

$$X_c = \frac{kV^2}{Q_c} \quad (2.16)$$

## 2.8. Resonansi

Resonansi merupakan sebuah fenomena yang dapat terjadi pada sebuah sistem kelistrikan di semua tingkat tegangan. Hal ini yang mendasari agar dapat memahami fenomena feroresonansi. Pada sebuah rangkaian listrik yang terdapat unsur elemen kapasitor (C) dan induktor (L) dapat terjadi fenomena resonansi tersebut. Resonansi terbagi menjadi dua tipe yaitu resonansi seri dan resonansi paralel. Resonansi seri terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktornya dihubungkan secara seri sedangkan resonansi paralel terdapat pada rangkaian listrik dimana kapasitor (C) dan induktor (L) dihubungkan secara paralel.

Resonansi seri merupakan rangkaian listrik dengan komponen induktor dan kapasitor yang disusun secara seri ketika frekuensi sumber diubah-ubah sehingga dapat terjadi resonansi dimana nilai reaktansi induktif sama dengan reaktansi kapasitif (Javier, 2015).

Respon dari resonansi adalah tegangan lebih dan arus lebih terjadi pada satu keadaan *steady-state*. Persamaan untuk mencari frekuensi resonansi adalah sebagai berikut (Wakileh, 1965).

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \quad (2.17)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.18)$$

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}} \quad (2.19)$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} \quad (2.20)$$

Keterangan :

$X_L$  = Reaktansi induktansi (Ohm)

$X_C$  = Reaktansi kapasitif (Ohm)

$f_r$  = Frekuensi resonansi (Hz)

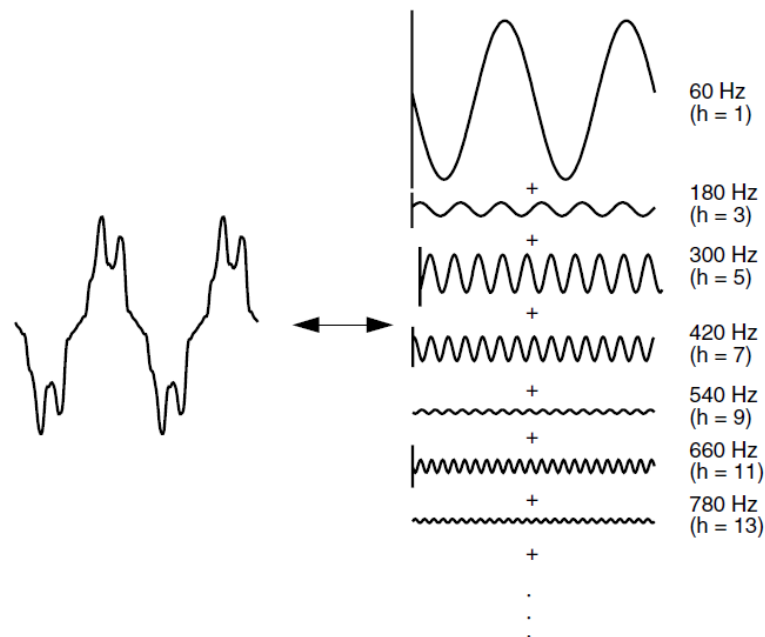
$Q_C$  = Kompensasi daya reaktif (VAr)

$h_r$  = Harmonisa resonansi

Ssc = Daya semu saat terjadi hubung singkat (MVA)

## 2.9. Harmonisa

Distorsi harmonik disebabkan oleh perangkat non-linier dalam sistem tenaga. Perangkat non-linier adalah perangkat yang arusnya tidak proporsional terhadap tegangan yang diterapkan. Gambar 2.16 mengilustrasikan bahwa setiap bentuk gelombang periodik yang terdistorsi dapat terjadi dinyatakan sebagai jumlah sinusoidal. Ketika bentuk gelombang identik dari satu siklus ke yang berikutnya, itu dapat direpresentasikan sebagai jumlah gelombang sinus murni di mana frekuensi masing-masing sinusoidal adalah kelipatan bilangan bulat dari fundamental frekuensi gelombang yang terdistorsi. Kelipatan ini disebut harmonik dari fundamental (Dugan, 2002).



**Gambar 2. 15** Gelombang Hasil Distorsi Harmonisa  
(Sumber : Dugan, 2002)

Dalam harmonisa khususnya pada sistem tenaga listrik dipakai istilah *Total Harmonic Distortion* (THD) yang didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya.

Harmonisa dapat dibedakan menjadi harmonisa ganjil dan harmonisa genap. Berdasarkan namanya, harmonisa ganjil adalah harmonisa yang terjadi pada orde bilangan ganjil (3, 5, 7, 9, 11, dan seterusnya) dan harmonisa genap adalah harmonisa pada orde bilangan genap (2, 4, 6, 8, dan seterusnya). Dalam kondisi sistem tenaga listrik yang normal dan seimbang harmonisa yang terjadi ialah harmonisa ganjil. Keberadaan harmonisa genap justru mengindikasikan bahwa terdapat sesuatu yang salah pada suatu sistem tenaga listrik. Menurut (Wakileh, 1965) persamaan untuk menghitung standar distorsi arus seperti persamaan (2.21) dibawah ini.

$$SC\ ratio = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (2.21)$$

Keterangan :

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

$I_L$  = Arus beban (A)

SCratio = Rasio hubung singkat

$$I_{sc} = \frac{P}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV} \quad (2.22)$$

Keterangan :

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

S = Daya semu transformator (kVA)

kV = Tegangan antar fasa (kV)

%Z = Impedansi transformator (%)

$$I_L = \frac{P}{PF \times \sqrt{3} \times kV} \quad (2.23)$$

Keterangan :

$I_L$  = Arus beban (A)

P = Permintaan rata-rata daya nyata (kW)

kV = Tegangan antar fasa (kV)

PF = Faktor daya

### 2.9.1. Indeks Harmonisa

Harmonisa memiliki beberapa indeks yang umumnya digunakan sebagai indikator seberapa besar dampak harmonisa yang terjadi. Indeks harmonisa dapat diamati melalui *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *Total Harmonic Distortion* (THD). IHD adalah rasio antara nilai RMS dari masing-masing arus harmonisa dibandingkan dengan nilai RMS arus fundamental atau harmonisa pertama. Berdasarkan metode ini, maka harmonisa pertama atau arus fundamental selalu bernilai 100% (Rosyadi, 2017). Berikut adalah persamaan (2.24) untuk menghitung nilai IHD :

$$IHD_n = I_n/I_1 \times 100\% \quad (2.24)$$

Sementara itu, THD adalah rasio antara nilai RMS dari seluruh komponen harmonisa dan nilai RMS dari fundamental yang dinyatakan dalam persen (%). THD dapat diamati melalui besaran THD arus dan tegangan. Menurut (Wakileh, 1965) indeks harmonisa THDi dan THDv dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.27), dan (2.28) :

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + \dots + I_n^2} \quad (2.25)$$

$$THD_i = I_H/I_1 \times 100\% \quad (2.26)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.27)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.28)$$

Keterangan :

$V_n$  = Tegangan RMS pada harmonisa ke-n

$V_1$  = Tegangan fundamental

$I_1$  = Arus fundamental

N = Maksimum harmonisa

### 2.9.2. Standar Harmonisa

Terdapat suatu standar batasan untuk nilai distorsi arus yang diizinkan pada suatu sistem tenaga listrik. Standar ini yang akan menjadi seberapa besar nilai harmonisa yang diperbolehkan pada suatu sistem tenaga listrik. Regulasi harmonisa di setiap negara berbeda-beda tergantung pembuat kebijakan. Secara umum standar harmonisa untuk sistem distribusi dapat mengacu pada standar IEEE Std 519-2014 (IEEE, 2014). Tabel 2.1 dan 2.2 adalah standar harmonisa tegangan dan arus yang terdistorsi :

**Tabel 2. 1** Standar Batas Distorsi Tegangan Harmonisa Maksimum

Tegangan	Individu Harmonisa Orde	Total Tegangan Distorsi (THD <sub>v</sub> )
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0 %	8.00%
$1 \text{ kV} \leq 69 \text{ kV}$	3.0 %	5.00%
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5 %	2.50%
$V > 161 \text{ kV}$	1.0 %	1.50%

(Sumber: IEEE standart 519-2014)

**Tabel 2. 2** Standar Batas Distorsi Arus Harmonisa Maksimum

Maksimal Harmonisa Arus Distorsi (%)						
Orde Harmonisa Individu						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	THD
<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	10,0	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

(Sumber: IEEE standart 519-2014)

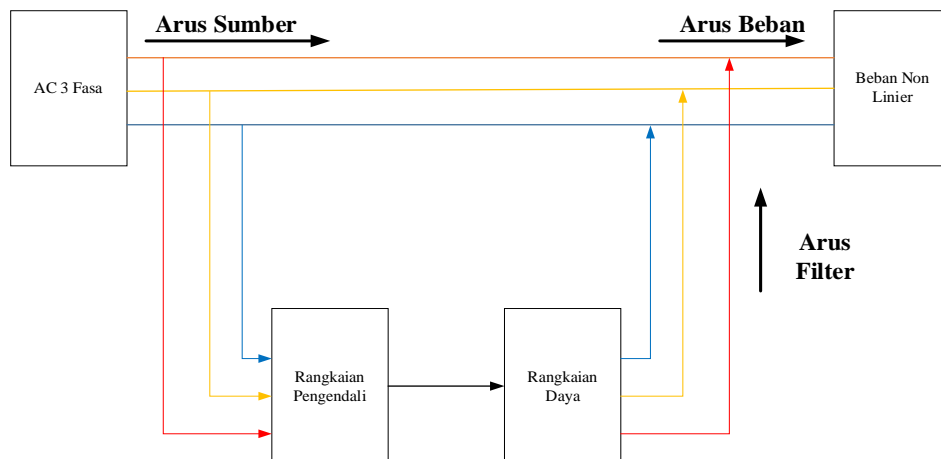
### 2.9.3. Shunt Active Power Filter (SAPF)

*Shunt Active Power Filter* (SAPF) merupakan mekanisme yang digunakan untuk menghilangkan harmonisa arus dan tegangan pada sistem tenaga listrik. Mekanisme filter ini tergantung pada perangkat berbasis elektronika daya yaitu konverter, perangkat penyaklaran, dan inverter. Keuntungan utama dari SAPF yaitu

mampu bekerja secara mandiri dan menangani lebih dari satu harmonisa dalam satu waktu (Vasuniya & Sahajwani, 2020).

SAPF bekerja dengan cara menyuntikan arus kompensasi untuk memperbaiki arus yang terdistorsi akibat sumber yang menyuplai beban non-linier. Kompensasi didasarkan pada prinsip penyuntikan arus terdistorsi yang sama dan berlawanan di saluran sistem tenaga listrik. Komponen arus harmonisa yang dihasilkan beban non-linier dihilangkan dan arus sumber menjadi sinusoidal setelah dikompensasi.

Secara umum, SAPF terdiri dari dua rangkaian utama yaitu rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Rangkaian daya adalah rangkaian yang bertanggung jawab untuk menginjeksikan arus kompensasi yang dibutuhkan. Rangkaian daya terdiri dari *Voltage Source Inverter (VSI)* berbasis *Pulse Width Modulation (PWM)* dan kapasitor *DC-link* untuk menjaga dan mengatur tegangan DC, serta menyimpan energi. Sementara itu, rangkaian kontrol adalah rangkaian yang secara kontinu melacak variasi arus harmonisa yang terjadi untuk menentukan arus kompensasi referensi sesaat dan juga untuk mengontrol rangkaian daya agar menginjeksikan arus harmonisa yang dibutuhkan secara tepat (Imam dkk., 2020).



**Gambar 2. 16** Rangkaian Pengendali Dan Rangkaian Daya

Kapasitor *DC-link* berperan untuk meminimalkan variasi tegangan pada VSI saat terjadi perubahan kondisi beban dan menyediakan impedansi rendah untuk arus *ripple* yang dibangkitkan oleh penyaklaran pada VSI. Kompensasi arus harmonisa ditentukan oleh tegangan kapasitor *DC-link*. Ketika tegangan dijaga

sesuai dengan nilai yang ditetapkan, pembangkitan arus kompensasi harmonisa untuk beban non-linier akan tepat.

Untuk mendesain SAPF terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan yaitu pemilihan perangkat, tegangan referensi kapasitor, induktor, kapasitor DC-link, dan unit pengendali. Tegangan DC-link kapasitor harus lebih besar dari nilai maksimum tegangan saluran sistem distribusi (Vasuniya & Sahajwani, 2020). Pada penerapan SAPF yang menggunakan PWM dalam modulasi linier dan faktor *amplitude* modulasinya bernilai 1, maka tegangan DC-link kapasitor dapat diperoleh dengan Persamaan (2.29) :

$$V_{DC} = 2\sqrt{2}V_C \quad (2.29)$$

$$V_S < V_C \leq V_S \quad (2.30)$$

$$2\sqrt{2}V_S < V_{DC} \leq 4\sqrt{2}V_S \quad (2.31)$$

Keterangan :

$V_{DC}$  = Tegangan DC-link kapasitor (V)

$V_C$  = Tegangan AC keluaran *inverter* (V)

$V_S$  = Tegangan fasa di PCC (V)

Kemudian untuk menentukan besarnya kapasitansi kapasitor dan induktansi induktor agar SAPF dapat mengkompensasi harmonisa dapat menggunakan persamaan (2.32) dan (2.33):

$$C_f = \frac{P \times T}{\frac{1}{2} \times V_{DC}^2} \quad (2.32)$$

$$L_f = \frac{\frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} - \frac{V_{line}}{\sqrt{2}}}{\sum_3^{19} n \times \omega \times I_{nh}} \quad (2.33)$$

Keterangan :

$C_f$  = Kapasitansi kapasitor DC-link (F)

$P$  = Daya kompensasi (W)

$V_{line}$  = Tegangan saluran (V)

$T$  = Periode 1 siklus tegangan AC (s)

$I_{nh}$  = RMS arus beban (A)



#### 2.9.4. Hysteresis Current Control

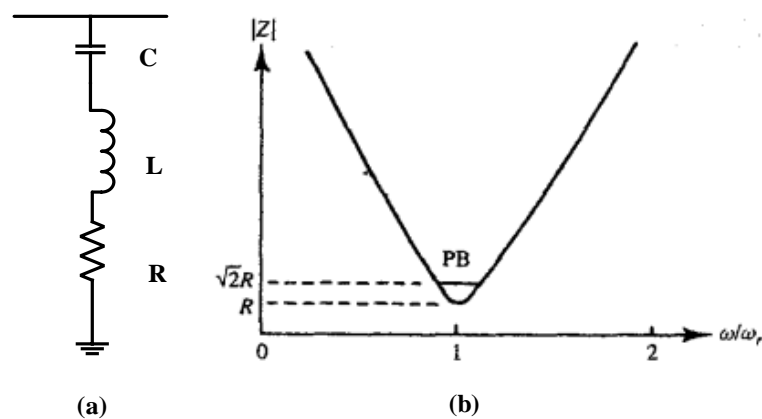
Metode pengendalian arus *hysteresis* atau konvensional untuk SAPF digunakan untuk membangkitkan Gelombang penyaklaran pada *Voltage Source Inverter* (VSI). Pengendali arus *hysteresis* mengoperasikan VSI dengan membandingkan *error* arus  $e(t)$  terhadap pita *hysteresis* tetap. Jika nilai kesalahan arus melebihi batas atas dari pita *hysteresis*  $s$ , maka saklar bagian atas VSI dalam kondisi OFF dan saklar bagian bawah menjadi ON sehingga arus akan meluruh. Jika kesalahan arus melewati batas bawah pita *hysteresis*, maka saklar bagian bawah VSI akan OFF dan saklar atas ON sehingga arus akan kembali kepada pita *hysteresis*. Oleh karena itu, arus aktual digunakan untuk menjaga agar arus referensi tetap di dalam pita *hysteresis* (Karuppanan, 2012).

#### 2.10. Filter Harmonisa

Untuk meredam tingkat distorsi harmonisa dalam sistem tenaga listrik maka perlu dilakukan pemasangan filter harmonisa. Filter diharapkan mampu mereduksi amplitudo frekuensi tertentu dari sebuah tegangan atau arus harmonisa tersebut. Selain itu, penggunaan filter harmonisa juga mengandung komponen kapasitor dimana juga dapat mengkompensasi daya reaktif dan memperbaiki faktor daya sistem. Secara umum filter harmonisa ada tiga jenis, yaitu:

##### 2.10.1. Filter Penalaan Tunggal

Filter penalaan tunggal atau disebut juga filter *single tuned* disusun dengan rangkai seri R, L, dan C (Arrillaga & Watson, 2003).



**Gambar 2. 17** (a) *Single Tuned Shunt* Filter (b) Grafik Antara Impedansi Dan Frekuensi

Persamaan menghitung nilai R, L, dan C filter (Wakileh, 1965)

$$C = \frac{Q_C \times 10^3}{2\pi f \times V^2} \quad (2.34)$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 \times C} \quad (2.35)$$

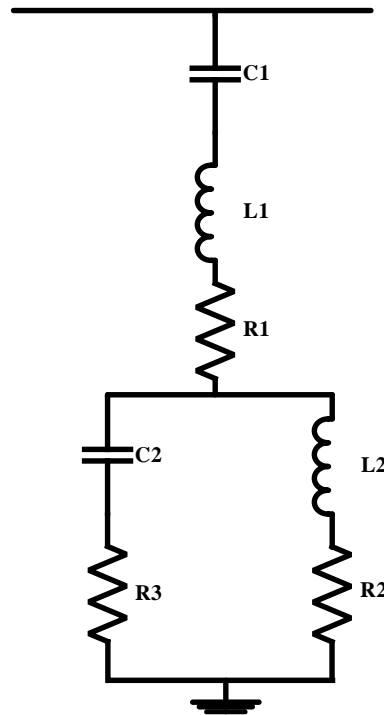
$$X_L = \omega L \quad (2.36)$$

$$R = \frac{X_L}{Q} \quad (2.37)$$

*Single Tuned* Filter ini dirancang untuk menala hanya pada frekuensi tertentu. Pada umumnya, filter ini menala pada suatu frekuensi harmonisa yang paling rendah. Sebuah filter dikatakan ditala pada sebuah frekuensi, jika reaktansi induktif dan kapasitifnya bernilai sama dengan nol.

### 2.10.2. Filter Penalaan Ganda

Sebuah impedansi ekuivalen dari dua buah filter penalaan tunggal yang mempunyai frekuensi resonansi yang berdekatan dalam kenyataanya bernilai sama dengan konfigurasi sebuah filter penalaan ganda. Hubungan dari kedua rangkaian tersebut adalah (Arrillaga & Watson, 2003) :



**Gambar 2. 18** Rangkaian Ekuivalen Filter Pasif *Double Tuned*

Beikut ini persamaan (2.38) sampai (2.44) untuk menghitung parameter filter pasif *double tuned*.

$$C_1 = C_a + C_b \quad (2.38)$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad (2.39)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (2.40)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)^2} \quad (2.41)$$

$$R_2 = R_a \left[ \frac{a^2 (1 - x^2)}{(1 - ax^2)^2 (1 - x^2)} \right] + R_b \left[ \frac{1 - x^2}{(1 - ax^2)^2 (1 - x^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{(1 - x^2)(1 - ax^2)}{(1 - x^2)(1 - ax^2)} \right] \quad (2.42)$$

$$R_3 = -R_a \left[ \frac{a^2 x^4 (1 - x^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + R_b \left[ \frac{1 - x^2}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] + R_1 \left[ \frac{(1 - x^2)(1 - ax^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] \quad (2.4)$$

$$a = \frac{C_a}{C_b} \quad (2.44)$$

$$x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}} \quad (2.45)$$

### 2.10.3. Damped Filter

Perhitungan penalaan *Damped Filter* dapat dilakukan dengan perhitungan *Single Tuned Filter* pula. Penalaan filter pada harmonisa ke n dapat dinyatakan dengan (Arrillaga & Watson, 2003).

$$S = \frac{VS^2}{\left( X_c \left( 1 - \frac{1}{n^2} \right) \right)} = \left( \frac{VS^2}{X_c} \right) \left( \frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \text{MVA} \quad (2.45)$$

*Dumped filter* ada beberapa keuntungan, yaitu :

1. Pemanfaatan dan pembebanannya tidak begitu sensitif terhadap perubahan temperatur, perubahan frekuensi, toleransi komponen dari perusahaan, dan rugi-rugi dari kapasitor.

2. Memberikan impedansi yang rendah untuk *spectrum* frekuensi harmonisa yang lebar, tanpa memerlukan subdivisi paralel.
3. Penggunaan filter penalaan dapat menghasilkan resonansi paralel antara filter dengan admitansi dari sistem di frekuensi orde harmonisa di bawah penalaan filter yang lebih rendah. Dalam sejumlah kasus, penggunaan satu atau lebih *damped* filter dapat menjadi alternatif yang dapat diterima.

*Dumped* filter juga mempunyai beberapa kerugian, yaitu:

1. Dengan level 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 faktor koreksi faktor kerja.
2. Kerugian yang terjadi pada resistor dan reaktansi pada umumnya lebih besar.

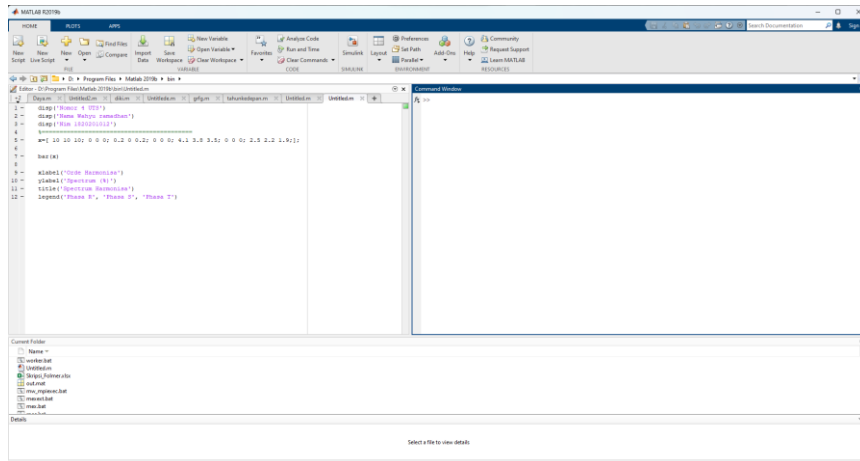
### **2.11. Matrix Laboratory**

*Software* Matrix Laboratory (MATLAB) memiliki pengaplikasian yang berbeda – beda khususnya dalam pengaplikasian yang membutuhkan perhitungan secara matematis. Penting untuk mengetahui bahwa MATLAB melakukan seluruh perhitungan matematis dalam bentuk matriks. Semua operasi matematika dalam MATLAB adalah operasi matriks. MATLAB dapat menunjukkan hasil perhitungan dalam bentuk grafik dan dapat dirancang sesuai keinginan kita menggunakan GUI yang kita buat sendiri.

MATLAB adalah singkatan dari Matrix Laboratory, yang biasanya di gunakan dalam :

1. Pengembangan Algoritma matematika dan komputasi
2. Pemodelan, simulasi, dan pembuatan *prototype* dari penerimaan data
3. Analisa, eksplorasi, dan visualisasi data
4. *Scientific* dan *engineering*
5. Pengembangan aplikasi berbasis grafik dan pembuatan *Graphical User Interface* (GUI)

MATLAB juga bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk menambahkan pada *library*, ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu.



**Gambar 2. 19** Tampilan Awal MATLAB

Secara *default*, MATLAB terdiri dari :

*Command window* yang merupakan tempat di mana kita menuliskan fungsi yang kita inginkan. *Command history* untuk melihat dan menggunakan kembali fungsi–fungsi sebelumnya. *Workspace* yang berisi variabel yang kita gunakan dan untuk membuat variabel baru dalam MATLAB. *Current directory* menunjukkan folder–folder yang berisi file MATLAB yang sedang berjalan.

Kelebihan MATLAB :

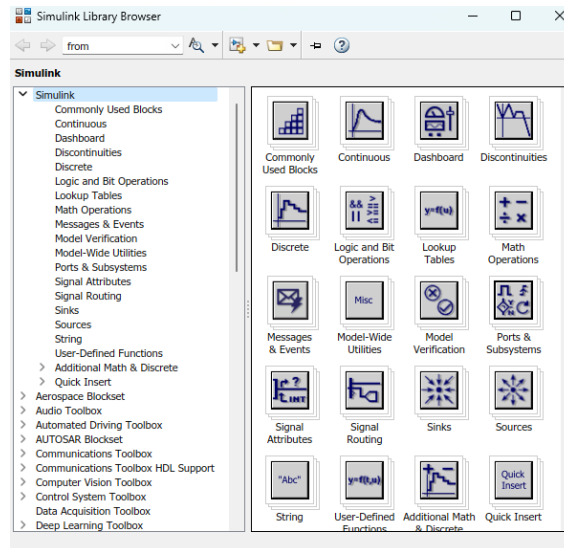
1. Mudah dalam memanipulasi struktur matriks dan perhitungan berbagai operasi matriks yang meliputi penjumlahan, pengurangan, perkalian, invers dan fungsi matriks lainnya.
2. Menyediakan fasilitas untuk memplot struktur gambar (kekuatan fasilitas grafik tiga dimensi yang sangat memadai).
3. *Script* program yang dapat diubah sesuai dengan keinginan *user*.
4. Jumlah *routine powerful* yang berlimpah yang terus berkembang.
5. Dilengkapi dengan *toolbox*, *simulink*, *stateflow* dan sebagainya.

Kelemahan MATLAB :

1. Lebih lambat dalam mengeksekusi
2. Mahal

### 2.11.1. Simulink

Simulink adalah *platform* didalam MATLAB yang digunakan untuk mensimulasikan sistem dinamik secara *realtime*. Untuk memulai simulink dengan ketik simulink pada jendela perintah MATLAB. Maka akan nampak *Library* untuk simulink seperti Gambar 2.20 berikut.



**Gambar 2. 20** Simulink *Library Browser*

Didalam simulink terdapat beberapa menu *block sheet* seperti *dashboard* yang berisi *blok* untuk mengontrol dan memvisualisasikan sinyal dalam model sistem kontrol bahan bakar, *sink* yang berisi komponen yang dapat menampilkan atau mengekspor *blok* data sinyal seperti *scope* dan *to workspace*. Khusus untuk di teknik elektro ada beberapa *blocksheet* antara lain *communications system toolbox* yang menyediakan algoritma dan aplikasi untuk analisis, desain, simulasi *end-to-end*, dan verifikasi sistem komunikasi di MATLAB. *Simscape* yang menyediakan sistem seperti motor listrik, penyearah jembatan, aktuator hidrolik, dan sistem pendingin dengan merakit komponen-komponen mendasar tersebut menjadi skema (Tjolleng, 2017).

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode simulasi yang diawali dengan pengumpulan data, pengukuran faktor daya, pengukuran harmonisa, perhitungan parameter kapasitor bank dan kemudian mensimulasikannya menggunakan *software* Simulink MATLAB untuk melihat hasil perbaikan faktor daya dan mereduksi tingkat harmonisa tegangan agar sesuai dengan standarisasi IEEE 519-2014.

Untuk titik pengukuran harmonisa berada pada sisi *output* transformator daya 28 MVA pada Balam *Substation* PT. Pertamina Hulu Rokan. Pada Balam *Substation* terdapat 4 *feeder* dengan beban motor induksi untuk sumur minyak. Hasil pengukuran merupakan besaran sistem kelistrikan, total harmonisa tegangan, total hamonisa arus, dan parameter lainnya seperti tegangan (V), arus (A), daya nyata (S), daya aktif (P), daya reaktif (Q), faktor daya ( $\text{Cos}\phi$ ) dan frekuensi (Hz).

Pada metode penelitian kali ini adalah metode kuantitatif dengan menggunakan data sistem tenaga listrik yang didapatkan dari PT. Pertamina Hulu Rokan khususnya di Balam *Substation*, kemudian dilakukan permodelan saluran distribusi dan dirancang menggunakan *software* untuk rangkaian pengendali pemasangan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya. Hasil dari simulasi yaitu dalam bentuk grafik dan gelombang.

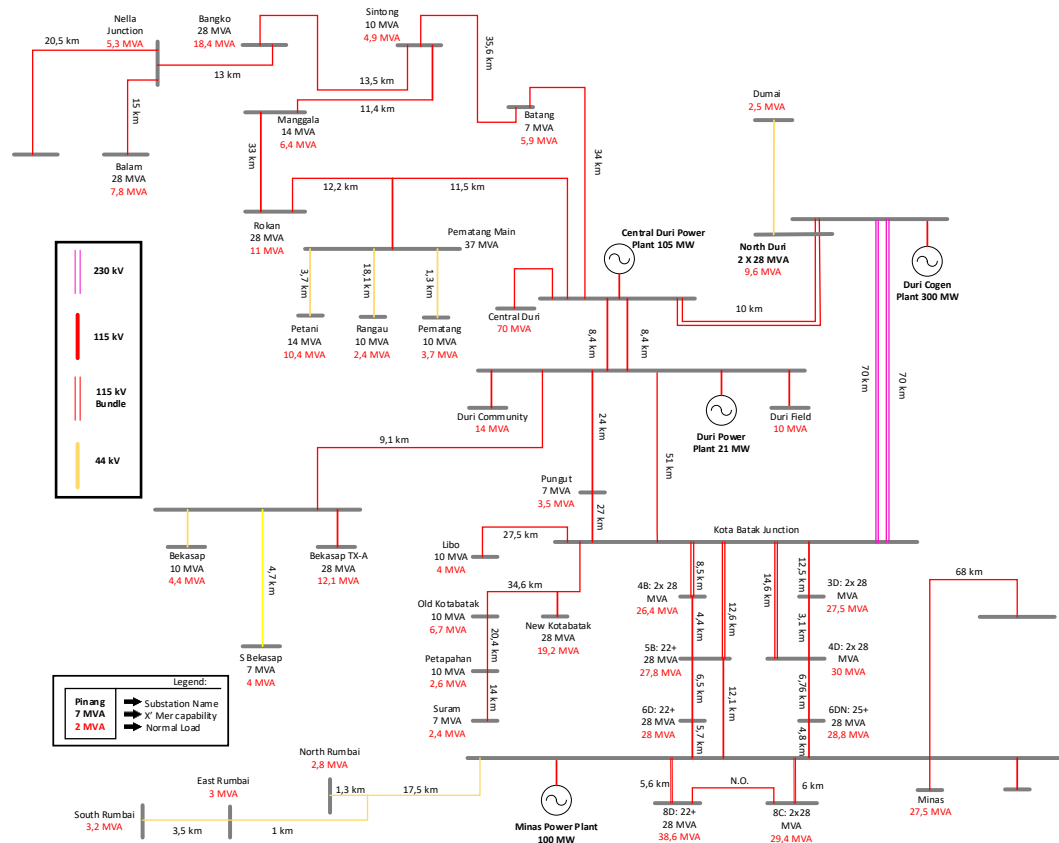
Pemasangan kapasitor bank dipasang pada Bus LV Balam SS. Sebelum pemasangan kapasitor bank untuk perbaikan faktor daya maka dilakukan pengukuran harmonisa menggunakan alat ukur Fluke 434 *Power Quality Analyzer*. Hasil pengukuran adalah berupa besaran kelistrikan *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan.

Pelaksanaan simulasi harmonisa dilakukan beberapa tahapan yaitu simulasi harmonisa dengan lima *step* kapasitor bank. Dari hasil simulasi dengan lima *step* kita dapat melihat kenaikan faktor daya setiap *step*-nya. Selanjutnya dilakukan perancangan filter pasif untuk meredam harmonisa. Dilakukan dua tahapan yaitu simulasi tanpa filter dan simulasi dengan filter pasif jenis *single tuned*. Hasil

simulasi dibandingkan dengan batasan harmonisa sesuai dengan standar IEEE 519-2014.

### 3.2. Sistem Kelistrikan PT. Pertamina Hulu Rokan

PT. Pertamina Hulu Rokan memiliki sistem pembangkit energi listrik sendiri untuk melayani semua beban yang berada pada daerah operasi PT. Pertamina Hulu Rokan. Energi listrik tersebut dibangkitkan, ditransmisikan dan didistribusikan sendiri oleh PT. Pertamina Hulu Rokan yang berada sebuah departemen yang dinamakan *Power Generation and Transmission* (PG&T). Pentingnya energi listrik, maka harus diusahakan agar energi listrik ini dapat tersedia secara terus-menerus dan harus memiliki keandalan yang tinggi. Untuk itu maka PT. Pertamina Hulu Rokan membangun sistem pembangkit listrik sendiri untuk melayani semua beban yang saat ini sudah terinterkoneksi.



**Gambar 3. 1** Diagram Satu Garis Sistem Transmisi Kelistrikan PT. Pertamina Hulu Rokan

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)



*Power Generation and Transmission* (PG&T) bertanggung jawab terhadap pembangkitan tenaga listrik yang dilakukan menggunakan generator turbin yang menggunakan uap air. Setelah listrik dihasilkan oleh generator turbin gas, kemudian listrik ini ditransmisikan ke beban. Dalam penyaluran listrik ini, perlu dilakukan perubahan tegangan agar sistem berjalan dengan efisien. Sistem yang baik ditandai dengan rugi-rugi yang kecil, biaya pembuatan yang tidak terlalu mahal, dan tingkat keamanan dan kenyamanan yang tinggi. Sebelum sampai ke beban, sistem transmisi melewati gardu untuk perubahan tegangan dan sistem distribusi untuk penyaluran daya ke beban.

Kebutuhan listrik PT. Pertamina Hulu Rokan dipasok dari pusat pembangkit listrik yang berada di Minas *Power Plant*, Central Duri *Power Plant*, Duri *Power Plant*, dan North Duri *Power Plant*. Listrik dibangkitkan dari generator turbin gas yang terdapat di masing-masing *power plant* tersebut. Generator turbin gas adalah peralatan mekanikal yang terdiri dari turbin gas sebagai pemutar pada satu poros dan generator sebagai poros lain yang diputar. Central Duri *Power Plant* dan North Duri *Power Plant* disamping menghasilkan energi listrik juga menghasilkan steam. Steam yang dihasilkan ini dialirkan ke ladang minyak Duri untuk diinjeksikan. Sistem pembangkitan terdiri dari dua komponen utama, yaitu turbin dan generator. Di sekitar generator pembangkit biasanya terdapat *switchyard* dimana di dalamnya terdapat *switchgear* (ruang kontrol) dan *substation* (gardu induk). Di ruang kontrol (*switchgear*) ini kita bisa melihat tegangan, arus, faktor daya dan komponen listrik lainnya pada transformator, saluran listrik, dll dan kita bisa memonitor kualitas listrik setiap saat.

Tegangan yang keluar dari pembangkit sebesar 13.8 kV akan dinaikkan oleh transformator daya menjadi 230 kV. Tegangan 230 kV ini ada yang ditransmisikan ke gardu yang lain yang jaraknya cukup jauh dan ada yang diturunkan ke 115 kV oleh transformator 230/115 kV di dalam gardu di dekat pembangkit.

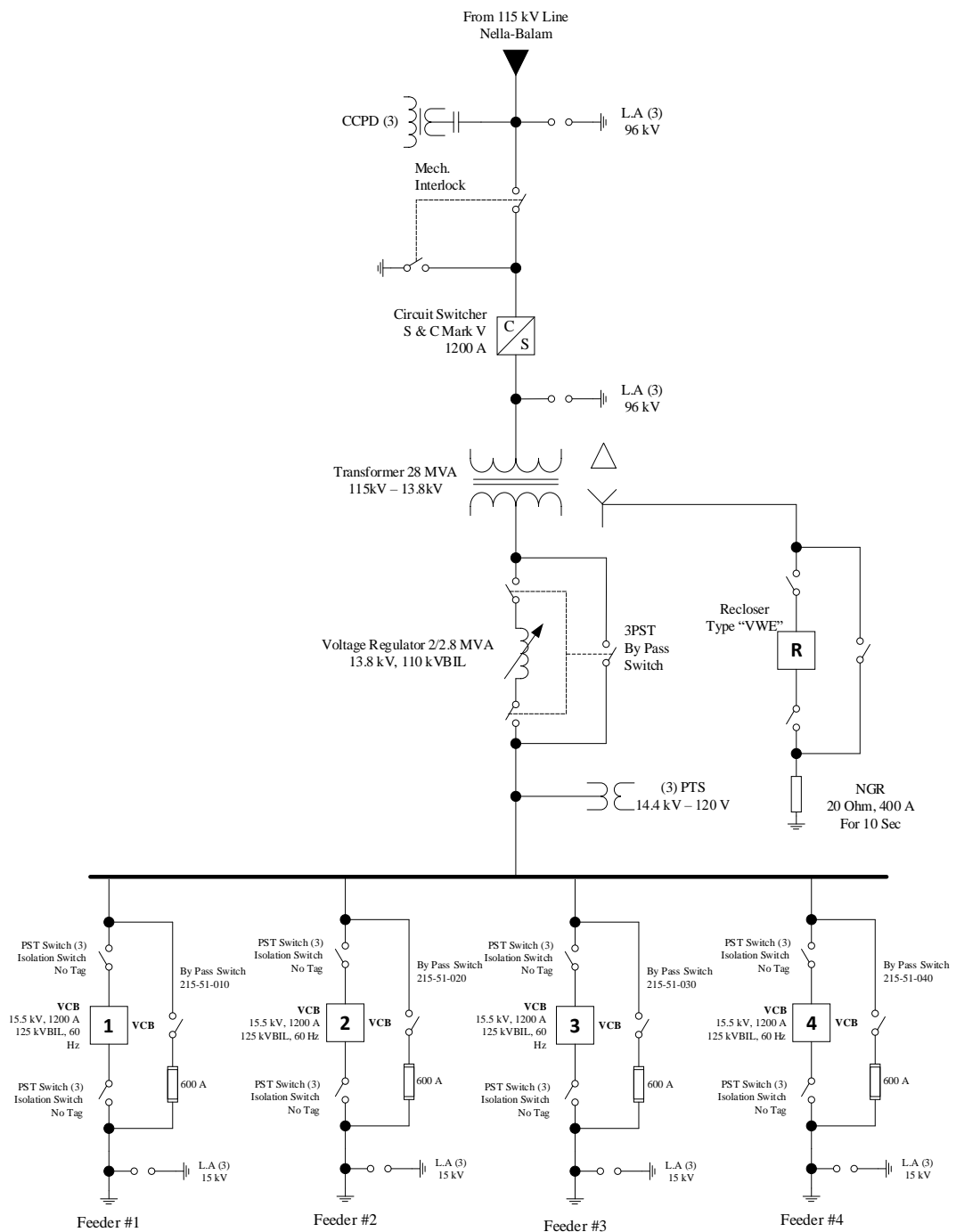
Kemudian tegangan 115 kV akan diturunkan lagi menjadi 13.8 kV untuk disuplai ke saluran. Sistem tenaga listrik terdiri dari beberapa elemen penting, yaitu sistem pembangkit, sistem transmisi, sistem sub-transmisi, dan sistem

distribusi. PT. Pertamina Hulu Rokan menggunakan sistem pembangkit sendiri dengan jaringan tenaga listrik 60 Hz sesuai dengan sistem Amerika Serikat, yang terinterkoneksi di seluruh wilayah operasi yang meliputi Rumbai, Minas, Duri, dan Dumai.

Metode pembangkitan tenaga listrik yang digunakan adalah generator turbin gas. Generator turbin gas digunakan karena tersedianya gas alam sebagai bahan bakar dalam jumlah melimpah sebagai produk sampingan dari lapangan minyak PT. Pertamina Hulu Rokan. Perencanaan sistem tenaga listrik dimulai dari *study* beban *forecasting* (perkiraan beban), berdasarkan hasil perhitungan beberapa beban yang harus disediakan barulah dipikirkan sistem pembangkitan yang digunakan. Setelah perancangan sistem pembangkitan maka dilakukan persiapan untuk menyalurkan energi listrik ke beban. Maka diperlukan perancangan sistem transmisi dan distribusi. Untuk perancangan ketiga sistem tenaga listrik ini, dilakukan dengan menggunakan simulasi komputer, dimana dalam simulasi ini dapat digambarkan bagaimana seandainya beban yang harus disediakan bertambah atau bagaimana apabila salah satu pembangkit tidak beroperasi, namun sistem harus tetap stabil. Salah satu *software* yang digunakan adalah simulasi sistem tenaga listrik *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP).

### **3.2.1. Sistem Kelistrikan Balam *Substation***

Sistem kelistrikan Balam *Substation* memiliki empat *feeder*. Dimana masing-masing *feeder* memiliki beban motor-motor induksi untuk sumur minyak. Balam *Substation* memiliki transformator daya sebesar 28 MVA dengan tegangan 115/13,8 kV. *Single line diagram* Balam *substation* seperti Gambar 3.2.



**Gambar 3. 2** Single Line Diagram Balam Substation  
(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)

### 3.2.2. Spesifikasi Transformator Daya Balam Substation

Transformator daya pada Balam Substation dengan kapasitas 28 MVA merupakan transformator yang berfungsi menurunkan tegangan sebagai sumber energi listrik tegangan tinggi dari saluran transmisi 115 kV yaitu menjadi 13,8 kV.

Pada Balam *substation* memiliki 4 *feeder* yang masing-masing beban merupakan motor induksi untuk sumur minyak yang ada di PT. Pertamina Hulu Rokan khususnya di Balam.

Untuk spesifikasi transformator daya pada Balam *Substation* dapat dilihat seperti pada Tabel 3.1 dan 3.2.

**Tabel 3. 1** Data Transformator Daya di Balam *Substation*

Spesifikasi	Kapasitas
Kapasitas Daya (MVA)	28
Jumlah Phasa	3
Tegangan (kV)	115/13,8
Arus (A)	701
Frekuensi (Hz)	60
Impedansi Tegangan (%)	7,15
Insulation Level (kV)	550/230
Jenis Pendingin	OA/FA1/FA2
Merek	Unindo

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)

**Tabel 3. 2** Data Impedansi Transformator Daya Balam *Substation*

Unit	Urutan	%Z	X/R
TX 1	Positif	7,15	18,6



**Gambar 3. 3** Transformator Daya Balam *Substation*  
(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)

### 3.2.3. Data Saluran pada Balam *Substation*

Saluran distribusi 13,8 kV menggunakan kawat hantaran udara dengan tipe kawat MCM336. Untuk spesifikasi kabel *feeder* pada Balam *Substation* dapat dilihat seperti pada Tabel 3.3 dan Tabel 3.4. Untuk panjang saluran di mulai dari Balam *Substation* ke *feeder*.

**Tabel 3. 3** Impedansi Saluran Distribusi 13,8 kV Pada Balam *Substation*

No	ID Bus		Panjang Saluran (kms)	Arus (A)	Jenis Penghantar	Luas Penampang (mm <sup>2</sup> )	Impedansi (Ohm)	
	Dari	Ke					R	jX
1	Bus FDR 1	61	2,50	156,2	ACSR	170,453	0,431	0,978
2	Bus FDR 1	136	3,70	28,9	ACSR	170,453	0,639	1,448
3	136	359	15	28,9	ACSR	170,453	2,591	5,871
4	61	91	1,20	113,3	ACSR	170,453	0,208	0,471
5	61	435	1,65	43	ACSR	170,453	0,285	0,651
6	91	40	5,30	113,3	ACSR	170,453	0,915	2,074
7	40	113	1,89	35,2	ACSR	170,453	0,326	0,739
8	40	140	6,34	78,3	ACSR	170,453	1,095	2,481
9	140	344	5,21	53,9	ACSR	170,453	0,900	2,039
10	344	439	1,70	22,4	ACSR	170,453	0,293	0,665
11	344	398	4,70	15,6	ACSR	170,453	0,812	1,839
12	Bus FDR 1	Bus FDR 2	1,70	136,2	ACSR	170,453	0,293	0,665
13	Bus FDR 2	Bus FDR 3	1,70	140,8	ACSR	170,453	0,293	0,665
14	Bus FDR 3	Bus FDR 4	3,20	239	ACSR	170,453	0,552	1,252
15	Bus FDR 4	409	0,40	48,5	ACSR	170,453	0,069	0,156
16	409	121	1,10	48,8	ACSR	170,453	0,190	0,156
17	Bus FDR 4	326	1	47,7	ACSR	170,453	0,172	0,391
18	326	410	1,10	47,7	ACSR	170,453	0,190	0,156
19	Bus FDR 4	157	1,60	49,1	ACSR	170,453	0,276	0,626
20	157	48	1	49,1	ACSR	170,453	0,172	0,391
21	Bus FDR 4	56	1,60	35,5	ACSR	170,453	0,276	0,626
22	56	386	1	35,5	ACSR	170,453	0,172	0,391
23	Bus FDR 4	66	1,50	58,1	ACSR	170,453	0,259	0,587

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)

### 3.2.4. Data Tegangan dan Arus di Balam *Substation*

Balam *Substation* memiliki empat *feeder* yang memiliki Jaringan Tegangan Menengah (JTM) 13,8 kV. Untuk data tegangan dan arus pada Balam *Substation* dapat dilihat pada Tabel 3.4 dibawah ini.

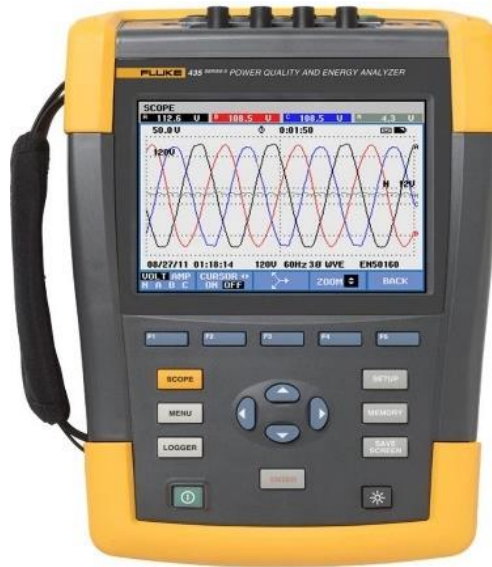
**Tabel 3. 4** Data Tegangan dan Arus di Balam *Substation*

Unit	Parameter	Month						
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul
TX 1	Arus LV ( <i>Low Voltage</i> )	578	612	613	641	660	631	701
	Tegangan LV ( <i>Low Voltage</i> )	13,5	13,2	13,45	13,51	13,33	13,26	13,6
	Faktor Daya	0,71	0,75	0,74	0,75	0,75	0,78	0,78
	lag /lead ?	lag	lag	lag	lag	lag	lag	lag
<i>Feeder</i> 1	Arus	159	161	152	160	172	176	185
<i>Feeder</i> 2		98	66	134	131	133	105	136,2
<i>Feeder</i> 3		136	172	102	134	136	135	140,8
<i>Feeder</i> 4		198	215	220	215	217	215	239

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan, 2022)

### 3.2.5. Data Harmonisa Pada Balam *Substation*

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran harmonisa menggunakan alat ukur Fluke 434 *Power Quality Analyzer*. Dengan titik pengukuran harmonisa pada keluaran transformator daya atau pada sisi sekunder transformator. Transformator yang digunakan merupakan transformator jenis *step down* 115/13,8 kV dengan kapasitas maksimal 28 MVA. Hasil pengukuran dapat dilihat pada tampilan LCD alat ukur. Untuk data pengukuran harmonisa pada Balam *Substation* dapat dilihat pada Tabel 3.5 dan 3.6. Pengukuran dilakukan pada *output* transformator daya pada Bus LV Balam SS. Hasil pengukuran harmonisa menggunakan alat ukur Fluke 434 *Power Quality Analyzer*.

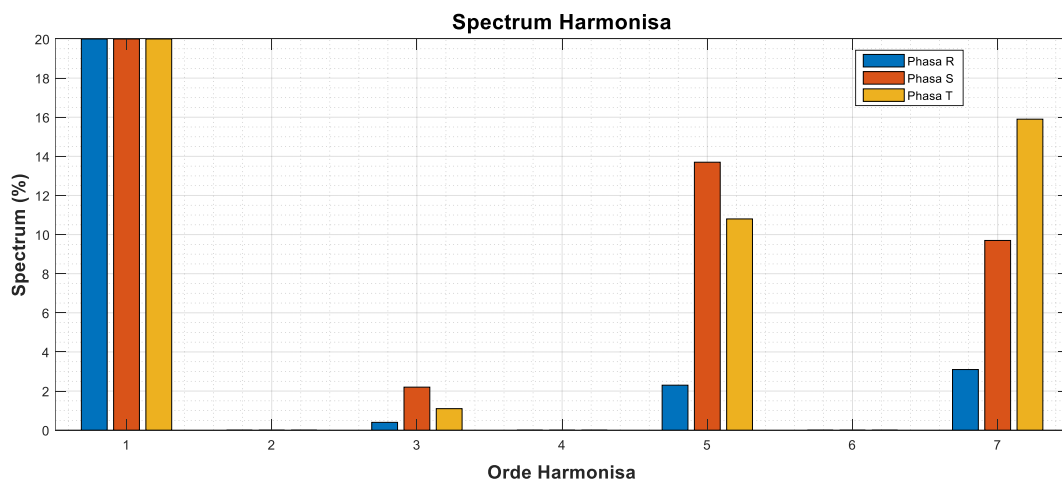


**Gambar 3. 4** Alat Ukur Fluke 434 *Power Quality Analyzer*

**Tabel 3. 5** Hasil Pengukuran Harmonisa Tegangan Pada Bus LV Balam SS Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank

ID	Phasa	Harmonisa Individu (%)				THD (%)
		h1	h3	h5	h7	
Bus LV Balam SS	R	100	0,4	2,3	3,1	3,9
	S	100	2,2	13,7	9,7	16,9
	T	100	1,1	10,8	15,9	19,5

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)

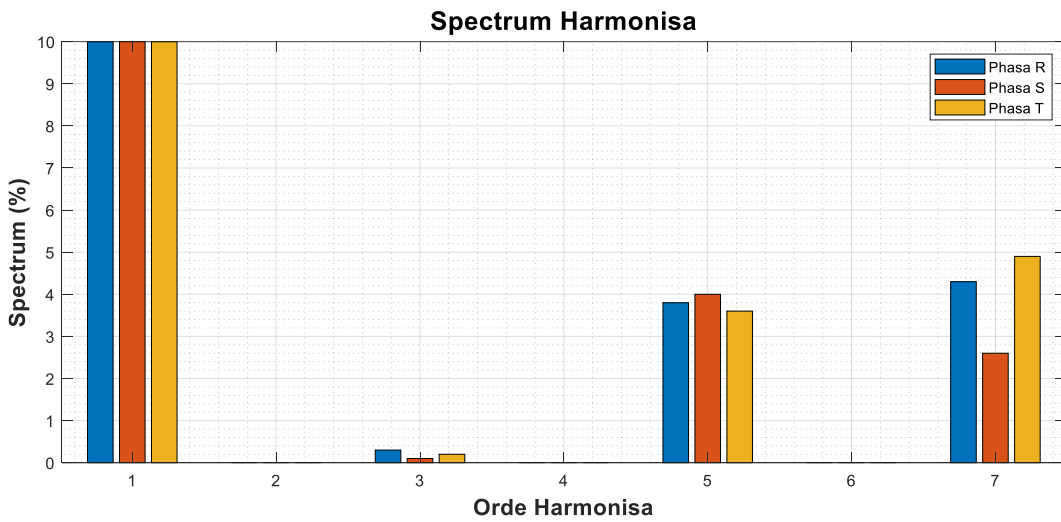


**Gambar 3. 5** *Spectrum* Harmonisa Individu Tegangan Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank

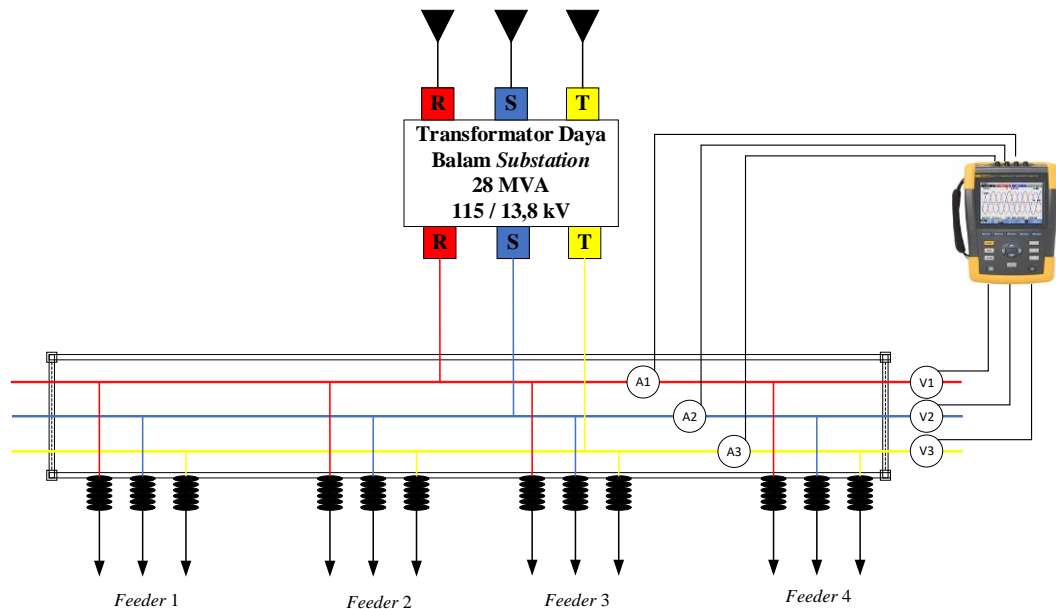
**Tabel 3.6** Hasil Pengukuran Harmonisa Arus Pada Bus LV Balam SS Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank

ID	Phasa	Harmonisa (%)				THD (%)
		h1	h3	h5	h7	
Bus LV Balam SS	R	100	0,3	3.8	4.3	5.9
	S	100	0.1	4.0	2.6	4.8
	T	100	0.2	3.6	4,9	6.1

(Sumber : PT. Pertamina Hulu Rokan)



**Gambar 3.6** *Spectrum* Harmonisa Individu Arus Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank



**Gambar 3.7** Titik Pengukuran Harmonisa

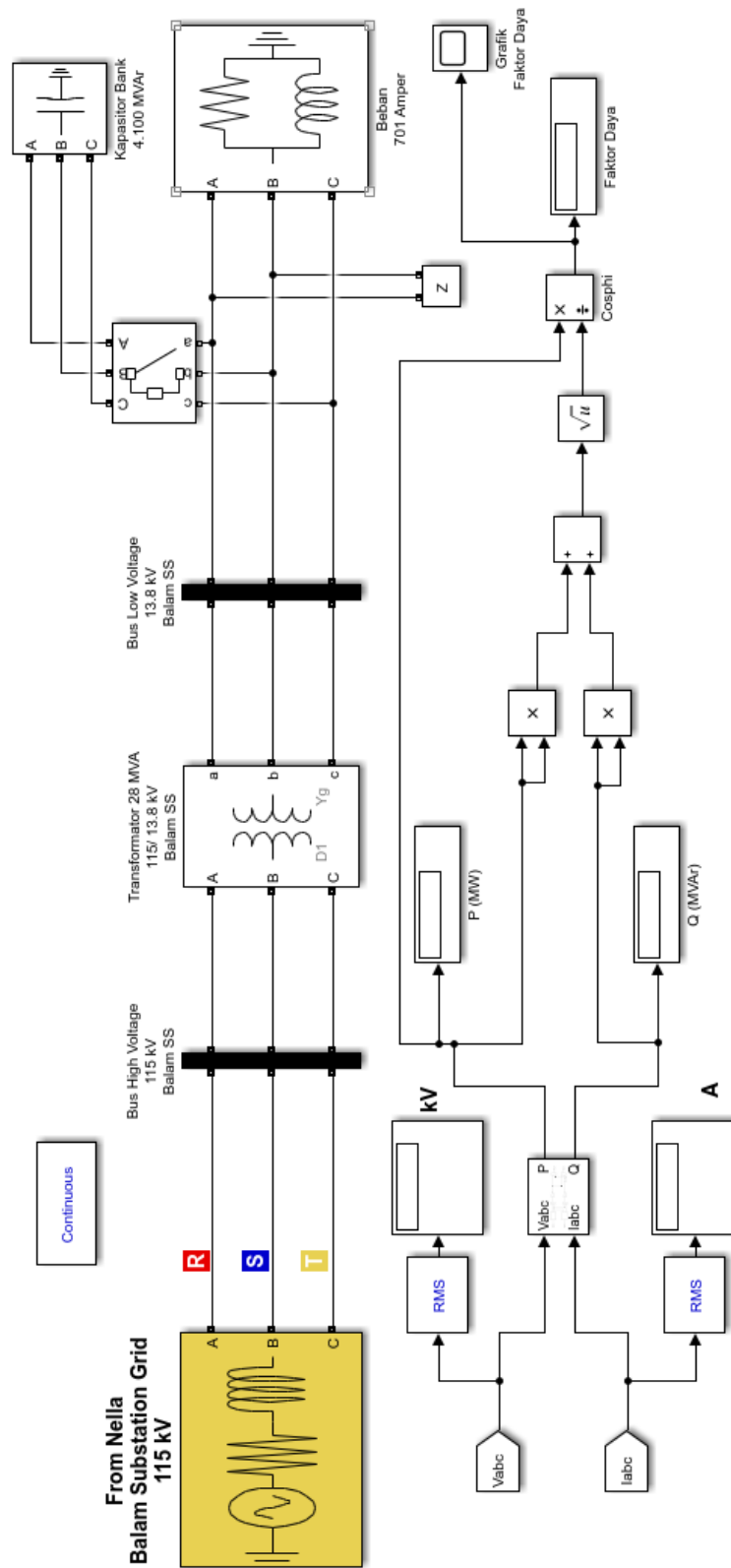


### **3.3. Diagram Simulasi dengan Kapasitor Bank**

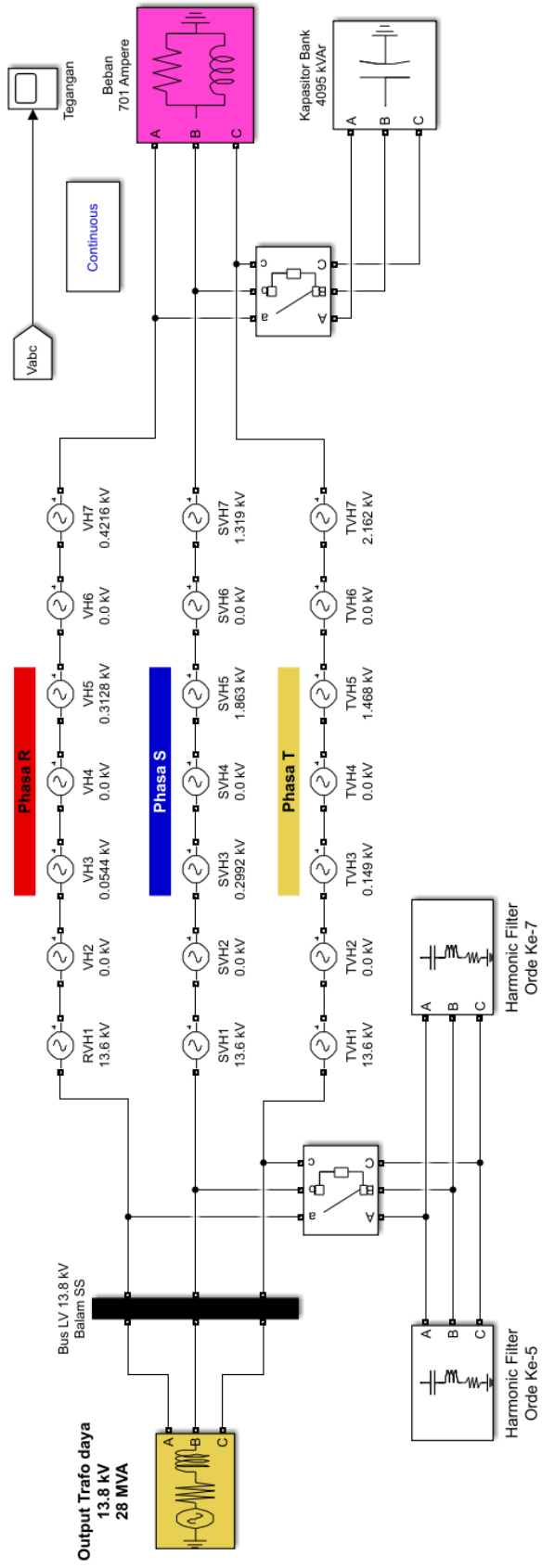
Simulasi dengan kapasitor bank dengan metode menghitung kompensasi daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya pada Bus LV Balam SS 13,8 kV yang sebelumnya 0,78. Pada simulasi ini akan dilihat pengaruh pemasangan kapasitor bank pada Balam *Substation* terhadap faktor daya, arus dan tegangan. Namun pada penelitian ini adalah untuk melihat akibat pemasangan kapasitor bank terhadap tingkat harmonisa. Dimana tingkat harmonisa sebelum pemasangan kapasitor bank pada Balam *Substation* sudah melebihi standar yang diizinkan IEEE 519-2014. Tingkat harmonisa individu tegangan dan arus rata-rata untuk fasa R, S, dan T tinggi pada orde ke 5 dan orde ke 7. Sedangkan kapasitor pabrikan sudah memiliki filter bawaan yang hanya mampu memfilter *Total Harmonic Distortion* (THD) dibawah 5 %. Hal ini perlu dilakukan penambahan filter untuk mereduksi tingkat harmonisa arus dan tegangan yang ada pada sistem. Proses simulasi pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Simulink MATLAB Setelah mendapatkan hasil perhitungan dengan menggunakan data lapangan maka selanjutnya akan di buat pemodelan sistem menggunakan *software* simulink MATLAB dan memasukan data hasil perhitungan kedalam simulasi.

#### **3.3.1. Simulasi Menggunakan MATLAB**

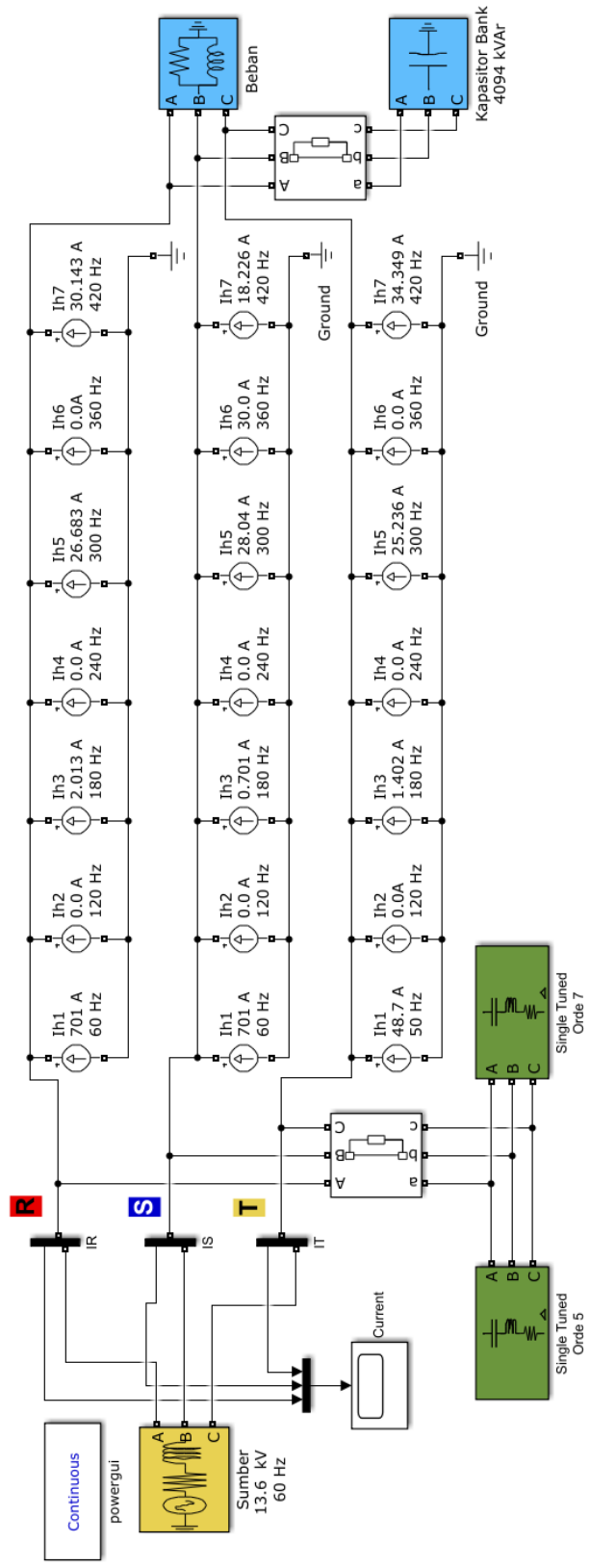
Simulink adalah suatu paket perangkat lunak yang terintegrasi dengan Matlab untuk melakukan simulasi sistem dinamik dengan metode grafis. Dengan Simulink, suatu masalah teknikal atau sains dapat dibuat dalam bentuk diagram blok dan panah-panah yang menggambarkan aliran sinyal dan fungsi-fungsi yang terlibat dalam suatu sistem dinamik. Dalam modul ini akan diperkenalkan juga cara membuat model sistem dinamik, pemodelan *system control* dan penerapannya dalam bidang teknik dan sains.



**Gambar 3. 8** Simulasi Perbaikan Faktor Daya Balam Substation dengan Kapasitor Bank Menggunakan Simulink MATLAB

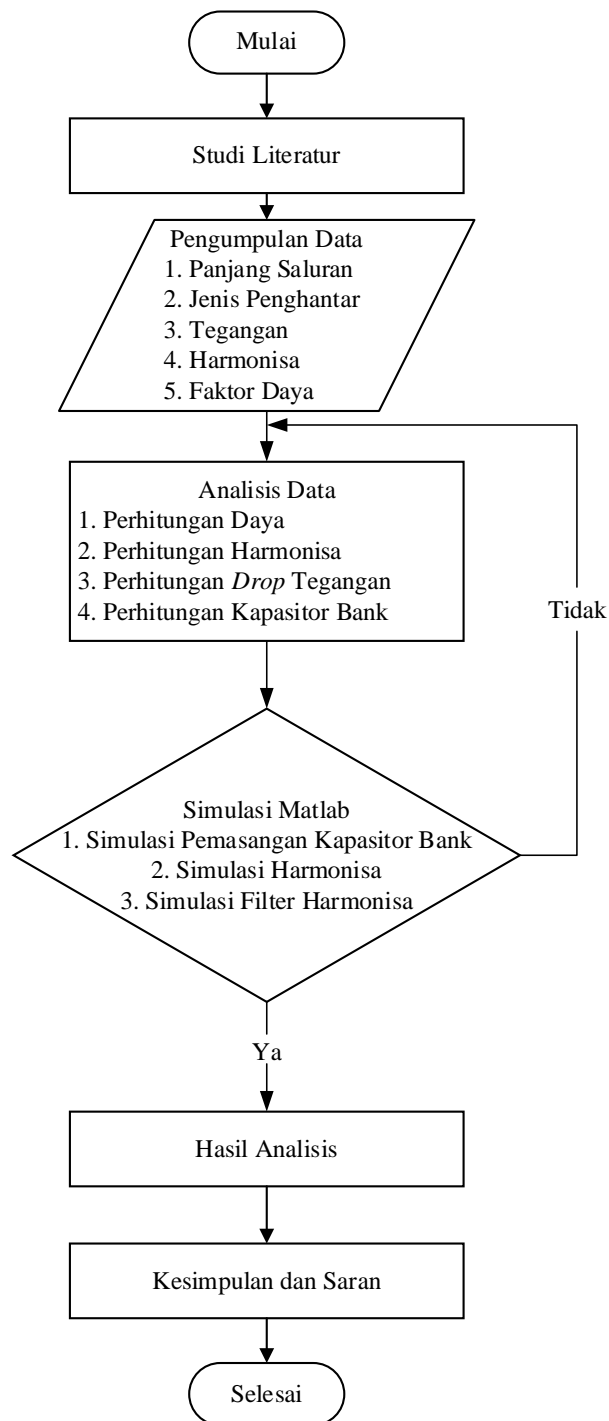


**Gambar 3.9** Simulasi Harmonisa Tegangan Balam Substation Menggunakan Simulink MATLAB



**Gambar 3.10** Simulasi Harmonisa Arus Balam *Substation* Menggunakan Simulink MATLAB

### 3.4. Langkah-Langkah Penelitian



**Gambar 3. 11** *Flowchart* Penelitian

Untuk melakukan perbaikan faktor daya adapun parameter yang harus didapatkan dari Balam *Substation* yaitu tegangan, arus dan daya pada sistem tersebut. Alur penelitian dijelaskan berdasarkan dari *flowchart* pada Gambar 3.11.

1. Studi Literatur

Mencari dan mempelajari berbagai referensi yang mengacu dari berbagai sumber, baik dari buku maupun tugas akhir yang dijadikan referensi untuk memperoleh teori-teori yang dibutuhkan.

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data lapangan yang akan digunakan untuk permasalahan penelitian. Pada penelitian ini pengumpulan data berupa spesifikasi transformator daya pada Balam *Substation*, data saluran, data tegangan dan arus, serta data pengukuran harmonisa di Bus LV Balam SS.

3. Analisis Data

Setelah semua data yang diperlukan didapatkan, maka dilakukan analisis data dengan mengolah data tersebut menjadi informasi yang baru dengan melakukan perhitungan daya, total harmonisa arus dan tegangan.

4. Simulasi MATLAB

Kemudian melakukan simulasi menggunakan Simulink MATLAB dengan membuat rangkaian pemodelan sistem dengan kondisi eksisting dan rangkaian setelah pemasangan kapasitor bank.

5. Hasil Analisis

Jika kapasitor bank sudah bekerja dengan baik sesuai perhitungan, maka dilakukan rangkuman hasil analisis dalam berupa bentuk gambar gelombang, grafik dan tabel.

6. Kesimpulan dan Saran

Selanjutnya adalah menarik kesimpulan dan memberikan saran terhadap hasil analisa yang telah dilakukan.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan dimulai dari perhitungan daya aktif (W), daya nyata (VA) dan daya reaktif (VAr). Setelah itu dilanjutkan dengan perhitungan *drop* tegangan pada masing-masing Bus setiap *feeder*. Lalu menghitung kompensasi daya reaktif untuk kapasitor bank dan nilai kapasitansi dari kapasitor. Pemasangan kapasitor bank dapat menyebabkan terjadinya resonansi harmonisa. Yang dimana sebelum pemasangan kapasitor bank tingkat harmonisa tegangan cukup tinggi dan melebihi standar IEEE 519-2014. Dengan hal ini dilanjutkan dengan perhitungan nilai-nilai untuk spesifikasi filter harmonisa unuk mereduksi tingkat harmonisa tegangan pada Balam *Substation*.

#### 4.1. Perhitungan Daya

Perhitungan daya dilakukan untuk melihat daya yang mengalir ke masing-masing feeder dan membandingkan hasil setelah pemasangan kapasitor bank untuk melihat pengaruh pemasangan kapasitor bank terhadap aliran daya. Untuk parameter arus (A) dan tegangan (V) menghitung daya aktif (W), daya semu (VA) dan daya reaktif (VAr) dapat menggunakan data-data pengukuran yang sudah ada pada Tabel 3.4. Untuk menghitung daya dapat menggunakan persamaan (2.3), (2.5) dan (2.7) segitiga daya.

Daya Semu

$$S = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$S = \sqrt{3} \times 13,6 \text{ kV} \times 701 \text{ A}$$

$$S = 16,512 \text{ MVA}$$

Daya Aktif

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi$$

$$P = \sqrt{3} \times 13,6 \text{ kV} \times 701 \text{ A} \times 0,78$$

$$P = 12,879 \text{ MW}$$

Daya Reaktif

$$Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin\phi$$

$$Q = \sqrt{3} \times 13,6 \text{ kV} \times 701 \text{ A} \times 0,62$$

$$Q = 10,237 \text{ MVAR}$$

Dari hasil perhitungan daya aktif (W), daya semu (VA) dan daya reaktif (VAr) pada Bus LV Balam SS diperoleh hasil masing-masing sebesar 12,879 MW untuk daya aktif, 16,512 MVA untuk daya semu dan 10,237 MVAr untuk daya reaktif.

**Tabel 4. 1** Hasil Perhitungan Daya Aktif (MW), Daya Nyata (MVA) dan Daya reaktif (MVAr)

Unit	Perhitungan			Faktor Daya
	P (MW)	S (MVA)	Q (MVAr)	
Bus LV Balam SS	12,879	16,512	10,237	0,78

(Sumber : Hasil Penelitian)

#### 4.2. Standar Harmonisa Arus dan Tegangan

Menurut standar IEEE 519-2014 bahwa harmonisa arus dan tegangan memiliki klasifikasi seperti Tabel 2.1 dan 2.2. Sesuai data pada Tabel 3.5 dan 3.6 yang didapatkan dari hasil pengukuran harmonisa di Balam *substation* bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.27) dan (2.28).

*Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan fasa R

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{(0,4)^2 + (2,3)^2 + (3,1)^2}}{100} \times 100 \%$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{15,06}}{100} \times 100 \%$$

$$THD_v = \frac{3,880}{100} \times 100 \%$$

$$THD_v = 3,880 \%$$

*Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan fasa S

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{(2,2)^2 + (13,7)^2 + (9,7)^2}}{100} \times 100 \%$$



$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{286,62}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_v = \frac{16,929}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_v = 16,929 \%$$

*Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan phasa T

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \times 100\%$$

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{(1,1)^2 + (10,8)^2 + (15,9)^2}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{370,666}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_v = \frac{3,880}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_v = 19,252 \%$$

Berdasarkan perhitungan diatas, maka diklasifikasikan standar *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan phasa R, S, dan T seperti pada Tabel 4.2.

**Tabel 4. 2** Perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) Tegangan Phasa R, S, dan T di Bus LV Balam SS

ID Bus	Standar IEEE 519-2014	Perbandingan	THD Tegangan (%)		
			R	S	T
Bus LV Balam SS	5%	Pengukuran	3,9	16,9	19,5
		Perhitungan	3,880	16,929	19,252

(Sumber : Hasil Penelitian)

Seperti pada Tabel 4.2 diatas diketahui bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan sudah melampaui standar IEEE 519-2104. Dengan menggunakan persamaan yang sama dengan merubah parameter tegangan (V) menjadi arus (I) dilanjutkan dengan perhitungan THD arus menggunakan data pengukuran pada Tabel 3.6.

*Total Harmonic Distortion* (THD) Arus Phasa R

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{(0,3)^2 + (3,8)^2 + (4,3)^2}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{33,02}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{5,746}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = 5,746 \%$$

*Total Harmonic Distortion (THD) Arus Phasa S*

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{(0,1)^2 + (4,0)^2 + (2,6)^2}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{22,77}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{5,746}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = 4,771 \%$$

*Total Harmonic Distortion (THD) Arus Phasa T*

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \times 100\%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{(0,2)^2 + (3,6)^2 + (4,9)^2}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{37,01}}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = \frac{5,746}{100} \times 100 \%$$

$$\text{THD}_I = 6,083 \%$$

Seperti perhitungan *Total Harmonic Distortion (THD)* tegangan dan arus diatas didapatkan hasil untuk harmonisa tegangan yang terkandung didalam sistem adalah seperti pada Tabel 4.2. Sedangkan untuk standar harmonisa arus harus menghitung beberapa parameter. Berikut ini perhitungan standar harmonisa arus menggunakan persamaan (2.22) maka nilai arus hubung singkat maksimum :

Arus hubung singkat 3 fasa menggunakan persamaan (2.22)

$$I_{sc} = \frac{P}{\%Z \times \sqrt{3} \times kV}$$

$$I_{sc} = \frac{12,879}{7,15 \% \times \sqrt{3} \times 13,6 kV}$$

$$I_{sc} = 7,646 kA$$

Standar harmonisa distorsi arus menggunakan persamaan (2.21)

$$SC \text{ ratio} = \frac{I_{sc}}{I_L}$$

$$SC \text{ ratio} = \frac{7,646 kA}{701 A}$$

$$SC \text{ ratio} = 10,908$$

$I_L$  adalah arus beban pada Bus LV Balam SS yaitu sebesar 701 A pada Tabel 3.4.

Dari hasil perhitungan diatas bahwa rasio *short circuit* standar harmonisa arus yaitu 10,908 . Menurut standar harmonisa arus IEEE 519-2014 pada Tabel 2.2 adalah < 20 yaitu untuk *Total Harmonic Distortion* (THD) 5 %. Klasifikasi standar *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dapat dilihat seperti pada Tabel 4.3.

**Tabel 4. 3** Perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) Arus Fasa R, S, dan T di Bus LV Balam SS

ID Bus	Standar IEEE 519-2014	Perbandingan	THD Arus (%)		
			R	S	T
Bus LV Balam SS	5%	Pengukuran	5,8	4,9	6,1
		Perhitungan	5,746	4,771	6,083

(Sumber : Hasil Penelitian)

### 4.3. Kondisi Tegangan Eksisting Pada Balam *Substation*

Panjang saluran dari pembangkit Central Duri Power Plant 105 MW yaitu 111 kms ke Balam *substation*. Dan di Balam *Substation* terdapat empat *feeder* yang dimana beban masing-masing *feeder* adalah pompa sumur minyak. Pada *feeder* satu memiliki total panjang saluran yaitu 25,254 kms, sedangkan di *feeder* 2 dan *feeder* 3 memiliki total panjang 1,7 kms, dan di *feeder* 4 total panjang keseluruhan yaitu 5,8 kms, sehingga total keseluruhan panjang saluran di Balam *Substation* yaitu 34,454 kms.

#### 4.3.1. Perhitungan *Drop* Tegangan

Perhitungan *drop* tegangan dari Bus LV 13,8 kV Balam SS ke empat *feeder* berdasarkan data-data yang didapat dari sistem jaringan distribusi 13,8 kV PT. Pertamina Hulu Rokan yaitu dari Bus LV Balam SS ke empat *feeder*. Pengolahan data pada perhitungan ini menggunakan data arus dan tegangan. Data sistem jaringan distribusi PT. Pertamina Hulu Rokan dari Balam *Substation* terdapat empat *feeder*. Dengan menggunakan data Tabel 3.3 maka *drop* tegangan dapat dihitung sebagai berikut :

*Drop* tegangan Bus FDR 1 ke Bus 61 menggunakan persamaan (2.11) dan (2.12)

Diketahui:

$$Z = 0,431 + j0,978 \text{ Ohm}$$

$$\Delta V = \sqrt{3} \times I \times Z$$

$$= \sqrt{3} \times 156,2 (0,431 + j0,978)$$

$$= 270,546 (0,431 + j0,978)$$

$$= 270,546 (1,068 \angle 66,217^\circ) = 288,943 \angle 66,217^\circ \text{ V}$$

$$\% \Delta V = \frac{288,943 \text{ V}}{13,6 \text{ kV}} \times 100\% = 2,124 \%$$

Hasil perhitungan *drop* tegangan pada Bus FDR 1 adalah sebesar 2,124 %. Dan tegangan terima pada Bus 61 adalah sebesar 13,311 kV. Dengan menggunakan persamaan yang sama diperoleh hasil perhitungan *drop* tegangan pada Bus selanjutnya pada Tabel 4.4 dengan m.file pada Lampiran 1 :

**Tabel 4. 4** Data Perhitungan *Drop* Tegangan

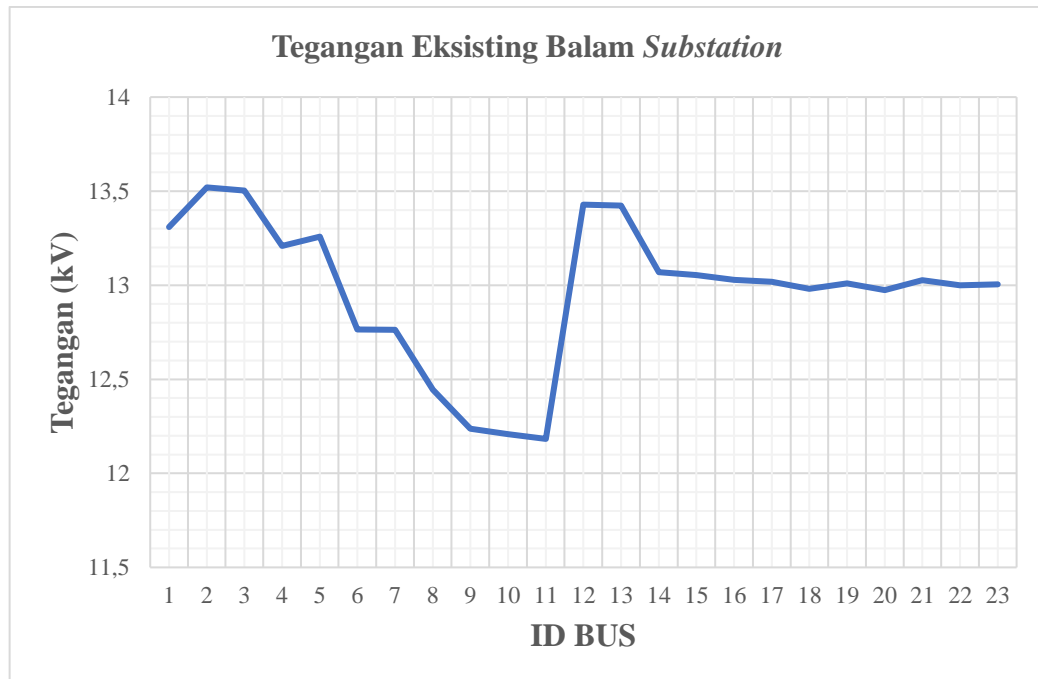
No	ID Bus		Drop Tegangan (%)	Tegangan Ujung (kV)
	Dari	Ke		
1	Bus FDR 1	61	2,126	13,310
2	Bus FDR 1	136	0,581	13,520
3	136	359	0,125	13,503
4	61	91	2,870	13,209
5	61	435	2,513	13,258
6	91	40	6,137	12,765
7	40	113	6,148	12,763
8	40	140	8,487	12,445

Sambungan Tabel 4.4

9	140	344	10,019	12,237
10	344	439	10,229	12,208
11	344	398	10,422	12,183
12	Bus FDR 1	Bus FDR 2	1,259	13,428
13	Bus FDR 2	Bus FDR 3	1,302	13,423
14	Bus FDR 3	Bus FDR 4	3,907	13,069
15	Bus FDR 4	409	4,012	13,054
16	409	121	4,199	13,029
17	Bus FDR 4	326	4,272	13,019
18	326	410	4,588	12,980
19	Bus FDR 4	157	4,335	13,010
20	157	48	4,602	12,974
21	Bus FDR 4	56	4,216	13,027
22	56	386	4,409	13,000
23	Bus FDR 4	66	4,381	13,004

(Sumber : Hasil Penelitian)

Dari hasil perhitungan diatas seperti Tabel 4.4 terdapat ada 3 Bus yang mengalami *drop* tegangan diatas -10 % menurut standar (SPLN 1, 1995). Bus yang mengalami *drop* tegangan diatas -10 % harus dilakukan evaluasi yaitu dengan pemasangan kapasitor bank.



**Gambar 4. 1** Grafik Tegangan Setiap Bus di Balam Substation

Berdasarkan seperti pada Gambar 4.1 merupakan kondisi tegangan eksisting di Balam *Substation* dengan tegangan paling rendah pada Bus 398 dengan tegangan 12,183 kV. Hal ini dikarenakan impedansi saluran yang besar sehingga menimbulkan rugi-rugi.

#### 4.3.2. Simulasi Jatuh Tegangan Kondisi Eksisting

Dengan menggunakan *software* Simulink MATLAB dilakukan pemodelan sistem Balam *Substation* sebelum pemasangan kapasitor bank di Bus LV Balam SS seperti pada gambar Lampiran 7 didapatkan hasil simulasi seperti pada Tabel 4.5.

**Tabel 4. 5** Hasil Simulasi Menggunakan *Simulink* MATLAB Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank

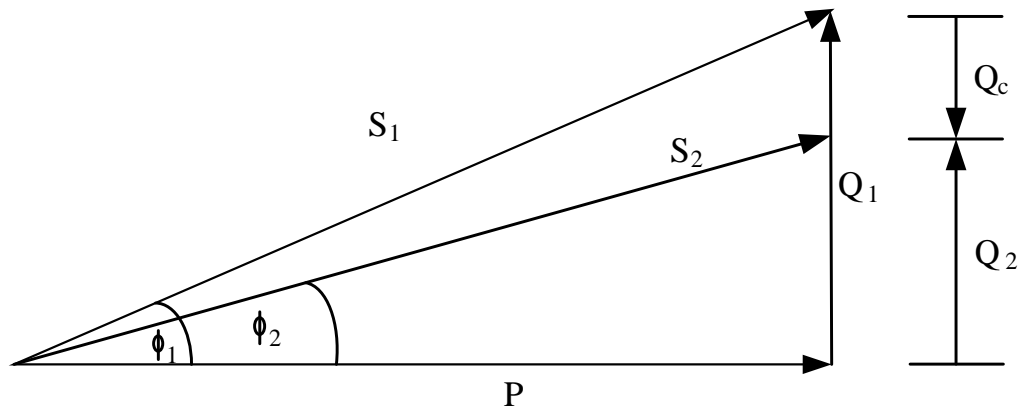
ID Bus		Tegangan (kV)	P (MW)	Q(MVAr)	Faktor Daya
Dari	Ke				
Bus FDR 1	61	13.323	2,706	2,203	0.78
Bus FDR 1	136	13.522	0,544	0,406	0.80
136	359	13,507	0,544	0,405	0.80
61	91	13,228	1,921	1,565	0,78
61	435	13,271	0,775	0,617	0,78
91	40	12,810	1,887	1,492	0,78
40	113	12,734	0,620	0,465	0,80
40	140	12,491	1,248	0,984	0,79
140	344	12,288	0,889	0,714	0,79
344	439	12,249	0,529	0,424	0,78
344	398	12,214	0,357	0,285	0,78
Bus FDR 1	Bus FDR 2	13,434	2,545	1,901	0,80
Bus FDR 2	Bus FDR 3	13,425	2,642	2,007	0,80
Bus FDR 3	Bus FDR 4	13,043	4,283	3,884	0,78
Bus FDR 4	409	13,029	0,846	0,684	0,78
409	121	12,991	0,844	0,681	0,78
Bus FDR 4	326	13,009	0,829	0,670	0,78
326	410	12,971	0,827	0,667	0,78
Bus FDR 4	157	12,986	0,857	0,689	0,78
157	48	12,952	0,856	0,687	0,78
Bus FDR 4	56	13,002	0,623	0,497	0,78
56	386	12,976	0,622	0,496	0,78
Bus FDR 4	66	12,980	1,022	0,812	0,78

(Sumber : Hasil Penelitian)

Berdasarkan dari Tabel 4.5 diatas hasil simulasi menggunakan *software* Simulink MATLAB didapatkan hasil faktor daya rata-rata yaitu 0,78 dengan faktor daya tertinggi 0,80.

#### 4.4. Perbaikan Faktor Daya

Untuk perbaikan faktor daya dan tegangan dilakukan pemasangan kapasitor bank. Disini kapasitor bank akan memperkecil sudut phasa. Standar faktor daya (SPLN 70-1, 1985) yaitu berada diangka 0,85 . Sedangkan di Balam *substation* faktor daya berada diangka 0,78. Hal ini juga akan dilakukan evaluasi atau perbaikan. Sebelum pemasangan kapasitor bank terlebih dahulu dilakukan perhitungan kapasitas yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya pada sistem.



**Gambar 4. 2** Segitiga Daya Untuk Kapasitor Bank Koreksi Faktor Daya

##### 4.4.1. Perhitungan Kapasitas Kapasitor Bank

Dalam perhitungan nilai kapasitas kapasitor bank ada beberapa parameter yang akan dihitung yaitu pertama penulis akan menghitung nilai kompensasi daya reaktif yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai kapasitor. Perhitungan dapat menggunakan rumus persamaan yang ada pada tinjauan pustaka. Untuk data-data yang diperlukan menggunakan data yang ada pada Tabel 3.4.

Perhitungan kompensasi daya reaktif menggunakan persamaan (2.13)

Diketahui:

$$\text{Cos}\phi_1 = \text{pf}_1 = 0,78$$

$$\text{Cos}\phi_2 = \text{pf}_2 = 0,90$$

Maka:

$$Q_C = P [\tan(\cos^{-1} pf_1) - \tan(\cos^{-1} pf_2)]$$

$$Q_C = 12,879 \text{ MW} [\tan(\cos^{-1} 0,78) - \tan(\cos^{-1} 0,90)]$$

$$Q_C = 12,879 \text{ MW} (0,802 - 0,484)$$

$$Q_C = 12,879 \text{ MW} (0,318)$$

$$Q_C = 4,095 \text{ MVAr}$$

Jadi kompensasi daya reaktif yang diperlukan untuk memperbaiki faktor daya dari 0,78 menjadi 0,90 adalah sebesar 4,095 MVAr sehingga dibulatkan menjadi 4,100 MVAr.

Perhitungan kapasitansi kapasitor menggunakan persamaan (2.14)

$$C = \frac{Q_C \times 10^3}{2\pi f \times V^2}$$

$$C = \frac{4095 \text{ kVAr} \times 10^3}{2\pi \times 60 \times 13,6 \text{ kV}^2}$$

$$C = \frac{4095000}{69728,277}$$

$$C = 58,727 \mu\text{F}$$

Karena dipasang seri, kapasitas total per phasa adalah:

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{2}{58,727 \mu\text{F}}$$

$$C_{\text{total}} = 29,363 \mu\text{F}$$

Jadi C total per phasa adalah 29,363  $\mu\text{F}$

Terdapat 5 buah kapasitor dalam 1 bank

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{5}{C}$$

$$\frac{1}{29,363 \mu\text{F}} = \frac{5}{C}$$

$$C = \frac{5 \times 29,363 \mu\text{F}}{1}$$

$$C = 146,815 \mu\text{F}$$

Dari hasil perhitungan diatas didapatkan kapasitas kapasitor bank adalah sebesar 146,815  $\mu\text{F}$ .



Perhitungan reaktansi kapasitif menggunakan persamaan (2.15)

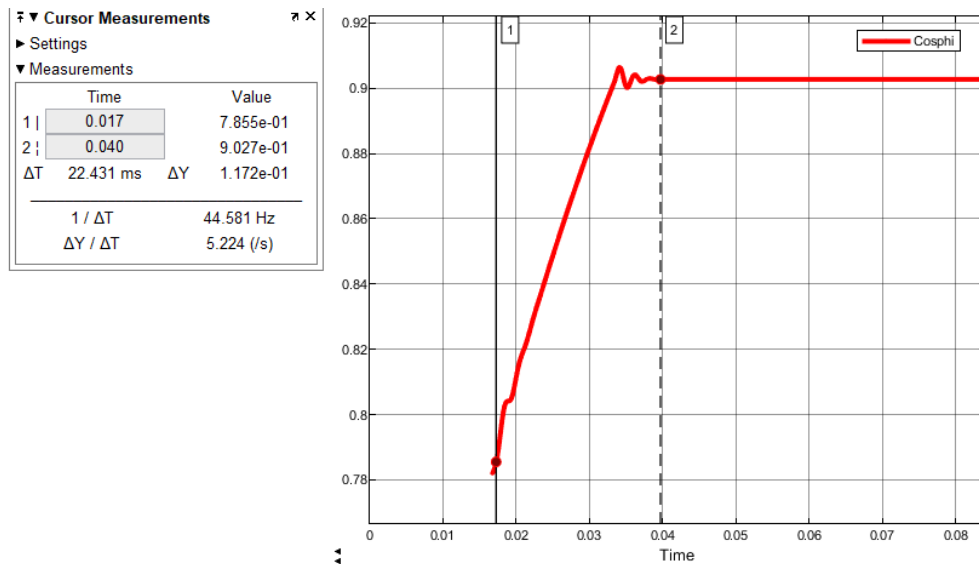
$$X_C = \frac{kV^2}{Q_C} = \frac{13,6^2 kV}{4,095 MVar} = 45,167 \text{ Ohm}$$

Jadi nilai kapasitansi kapasitor yang diperlukan adalah sebesar 58,727  $\mu$ F.

Setelah mendapatkan hasil perhitungan untuk mendapatkan nilai kompensasi daya reaktif dan nilai kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan, selanjutnya data hasil perhitungan tersebut di simulasi menggunakan Simulink MATLAB untuk melihat hasil evaluasi perbaikan faktor daya di Balam *substation*.

#### 4.4.2. Hasil Pemasangan Kapasitor Bank

Setelah melakukan perhitungan langkah selanjutnya membuat pemodelan sistem seperti Gambar 3.6. dan memasukan nilai-nilai hasil perhitungan. Untuk penempatan kapasitor bank pada penelitian ini khusus membahas pada Bus LV Balam SS. Berikut Gambar 4.3 grafik faktor daya dari simulasi menggunakan Simulink MATLAB setelah pemasangan kapasitor bank.



**Gambar 4. 3** Simulasi Grafik Faktor Daya Setelah Pemasangan Kapasitor Bank (Sumber : Hasil Penelitian)

Pada Gambar 4.3 diatas merupakan hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB perbaikan faktor daya dengan pemasangan kapasitor bank di Bus LV Balam SS. Pada waktu 0,017 *second Circuit Breaker* (CB) kapasitor bank di *setting*

dalam keadaan *close*, sehingga  $\cos \varphi$  naik menjadi 0,90 di waktu 0.04 *second*. Pada Tabel 4.6 adalah hasil aliran daya setelah pemasangan kapasitor bank.

**Tabel 4. 6** Hasil Pemasangan Kapasitor Bank Terhadap Aliran Daya

ID Bus		Tegangan (kV)	P (MW)	Q(MVAr)	Faktor Daya
Dari	Ke				
Bus FDR 1	61	13.587	2,814	2,291	0.78
Bus FDR 1	136	13.791	0,566	0,422	0.80
136	359	13,775	0,565	0,422	0.80
61	91	13,490	1,998	1,628	0,78
61	435	13,534	0,806	0,642	0,78
91	40	13,064	1,350	1,110	0,78
40	113	12,986	0,545	0,484	0,80
40	140	12,640	1,298	1,023	0,79
140	344	12,532	0,924	0,743	0,78
344	439	12,492	0,550	0,441	0,78
344	398	12,457	0,372	0,297	0,78
Bus FDR 1	Bus FDR 2	13,700	2,647	1,977	0,80
Bus FDR 2	Bus FDR 3	13,691	2,748	2,088	0,80
Bus FDR 3	Bus FDR 4	13,302	4,454	4,039	0,78
Bus FDR 4	409	13,288	0,879	0,711	0,78
409	121	13,248	0,878	0,708	0,78
Bus FDR 4	326	13,267	0,862	0,696	0,78
326	410	13,228	0,861	0,693	0,78
Bus FDR 4	157	13,244	0,891	0,717	0,78
157	48	13,209	0,890	0,714	0,78
Bus FDR 4	56	13,260	0,648	0,516	0,78
56	386	13,234	0,647	0,516	0,78
Bus FDR 4	66	13,238	1,063	0,845	0,78

(Sumber : Hasil Penelitian)

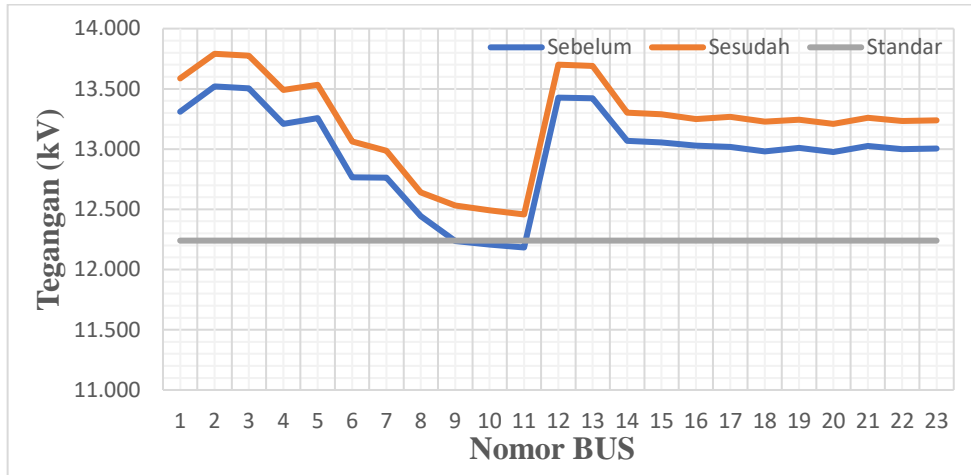
Dengan menggunakan persamaan 2.12 dapat dihitung persentase *drop* tegangan pada Bus 344, 439, dan 398 setelah pemasangan kapasitor bank.

$$\% \Delta V_{344} = \frac{1068 \text{ V}}{13,6 \text{ kV}} \times 100\% = 7,852 \%$$

$$\% \Delta V_{439} = \frac{1108 \text{ V}}{13,6 \text{ kV}} \times 100\% = 8,147 \%$$

$$\% \Delta V_{398} = \frac{1143 \text{ V}}{13,6 \text{ kV}} \times 100\% = 8,404 \%$$

Setelah pemasangan kapasitor bank pada Bus LV Balam SS tegangan sudah berada dibawah standar yang diizinkan. Hasil perbandingan perbaikan tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank seperti pada Gambar 4.4.



**Gambar 4. 4** Grafik Perbandingan Perbaikan Tegangan

Dari Gambar 4.4 diatas dapat dilihat perbandingan tegangan setelah pemasangan kapasitor bank di Bus LV Balam SS. Garis horizontal berwarna abu-abu pada Gambar 4.4 adalah tegangan standar *drop* 10 % dengan nilai tegangan 12,240 kV. Sebelum pemasangan kapasitor bank terlihat pada garis biru terdapat 3 Bus yang melebihi standar. Setelah pemasangan kapasitor bank sudah tidak ada tegangan yang melebihi standar yang diizinkan.

**4.4.3. Analisis Kenaikan Faktor Daya Pemasangan Kapasitor Bank**

Langkah selanjutnya pada penelitian ini penulis akan menganalisa faktor daya setiap *step* bank kapasitor. Tujuannya adalah untuk melihat besaran  $\cos \varphi$  yang dihasilkan setiap *step* bank kapasitor. Disini dilakukan dengan 5 *step* bank kapasitor. Berikut hasil simulasi kenaikan faktor daya di Balam *substation* Seperti Tabel 4.7.

**Tabel 4. 7** Kenaikan Faktor Daya Setiap *Step* Bank Kapasitor

Bus	Step Kapasitor Terhadap Faktor Daya					
	kVAr	820	1640	2460	3280	4095
Bus LV Balam SS	Faktor Daya	0,8069	0,8312	0,8554	0,879	0,9016

(Sumber : Hasil Penelitian)

Data pada Tabel 4.6 diatas merupakan hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB. Dimana hasil kenaikan faktor daya terhadap *step* bank kapasitor rata-rata 2,382 % dan total kenaikan setelah perbaikan yaitu sebesar 12,07 %.

#### 4.5. Resonansi Harmonisa Pemasangan kapasitor Bank

Resonansi linier terjadi pada rangkaian seri yang terdiri dari komponen resistor, induktor, dan kapasitor. Sebuah resonansi baru akan terjadi pada satu frekuensi, sesuai dengan frekuensi sumber. Berikut dibawah ini adalah perhitungan resonansi harmonisa menggunakan persamaan (2.19) dan (2.20) setiap *step* bank kapasitor.

Daya semu saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa menggunakan persamaan (2.7)

$$S_{short\ circuit} = \sqrt{3} \times V \times I_{sc}$$

$$S_{short\ circuit} = \sqrt{3} \times 13,6\text{ kV} \times 7,646\text{ kA}$$

$$S_{short\ circuit} = 180,108\text{ MVA}$$

Frekuensi resonansi setiap *Step* bank kapasitor menggunakan persamaan (2.19) dan (2.20)

##### **Step bank 820 kVAr**

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{short\ circuit}}{Q_c}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{180,108\text{ MVA}}{0,820\text{ MVar}}}$$

$$h_r = \sqrt{219,643}$$

$$h_r = 14,820$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} = 14,820 \times 60\text{ Hz} = 889,2\text{ Hz}$$

##### **Step bank 1640 kVAr**

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{short\ circuit}}{Q_c}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{180,108\text{ MVA}}{1,640\text{ MVar}}}$$

$$h_r = \sqrt{109,821}$$

$$h_r = 10,479$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} = 10,479 \times 60 \text{ Hz} = 628,74 \text{ Hz}$$

### **Step bank 2460 kVAr**

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{short\ circuit}}{Q_c}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{180,108 \text{ MVA}}{2,460 \text{ MVar}}}$$

$$h_r = \sqrt{73,214}$$

$$h_r = 8,556$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} = 8,556 \times 60 \text{ Hz} = 513,36 \text{ Hz}$$

### **Step bank 3280 kVAr**

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{short\ circuit}}{Q_c}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{180,108 \text{ MVA}}{3,280 \text{ MVar}}}$$

$$h_r = \sqrt{54,910}$$

$$h_r = 7,410$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} = 7,410 \times 60 \text{ Hz} = 444,6 \text{ Hz}$$

### **Step bank 4095 kVAr**

$$h_r = \sqrt{\frac{S_{short\ circuit}}{Q_c}}$$

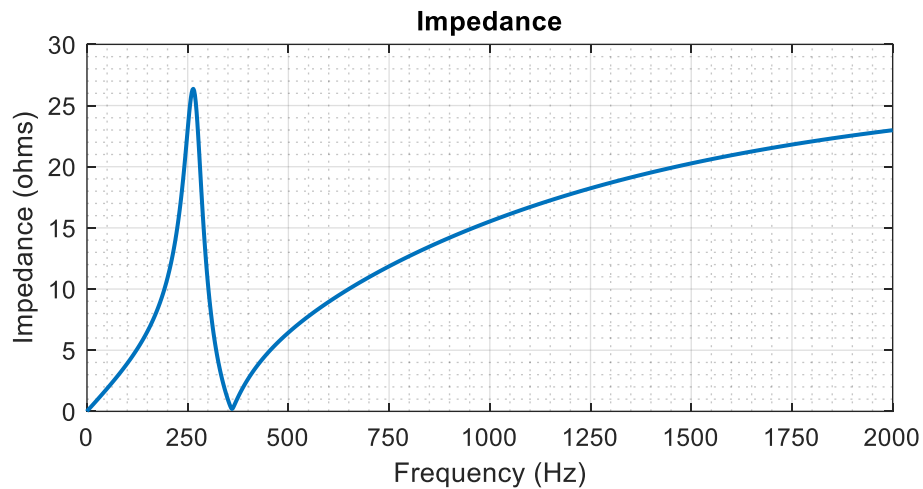
$$h_r = \sqrt{\frac{180,108 \text{ MVA}}{4,095 \text{ MVar}}}$$

$$h_r = \sqrt{43,982}$$

$$h_r = 6,631$$

$$f_r = h_r \times f_{Fundamental} = 6,631 \times 60 \text{ Hz} = 397,86 \text{ Hz}$$

Pada *step* bank kapasitor dengan kompensasi daya reaktif 4,095 MVar resonansi terjadi pada frekuensi 397,86 Hz.



(Sumber : Hasil Penelitian)

**Gambar 4.5** *Magnitude* Resonansi Harmonisa Kompensasi Daya Reaktif 4.095 MVar

Gambar 4.5 diatas merupakan hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB bentuk grafik *magnitude* resonansi harmonisa. Maka dengan menggunakan persamaan yang sama didapatkan hasil resonansi harmonisa setiap bank kapasitor seperti Tabel 4.8.

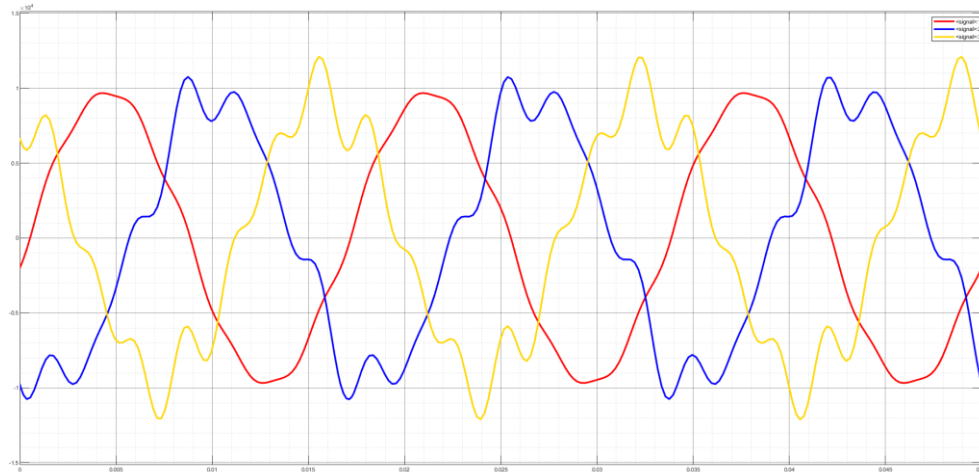
**Tabel 4.8** Frekuensi Resonansi Setiap *Step* Bank Kapasitor

Parameter	<i>Step</i> Bank Kapasitor (kVAr)				
	820	1640	2460	3280	4095
Frekuensi (Hz)	889,2	628,74	513,36	444,6	397,86

(Sumber : Hasil Penelitian)

#### 4.5.1. Simulasi Harmonisa

Berdasarkan dari analisis perhitungan resonansi harmonisa pada Tabel 4.6 diatas, frekuensi resonansi kapasitor bank terjadi di frekuensi 397,86 Hz yang berdekatan dengan frekuensi harmonisa di Bus LV Balam SS di frekuensi 300 Hz dan 420 Hz dan kemungkinan harmonisa naik di frekuensi tersebut sehingga diperlukan penambahan filter untuk mereduksi harmonisa di frekuensi 300 Hz dan 420 Hz. Berikut hasil simulasi harmonisa menggunakan Simulink MATLAB dalam bentuk *spectrum* dan gelombang yang terdistorsi.



(Sumber : Hasil Penelitian)

**Gambar 4. 6** Hasil Simulasi Bentuk Gelombang Tegangan Yang Terdistorsi Harmonisa Fasa R, S, dan T Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank

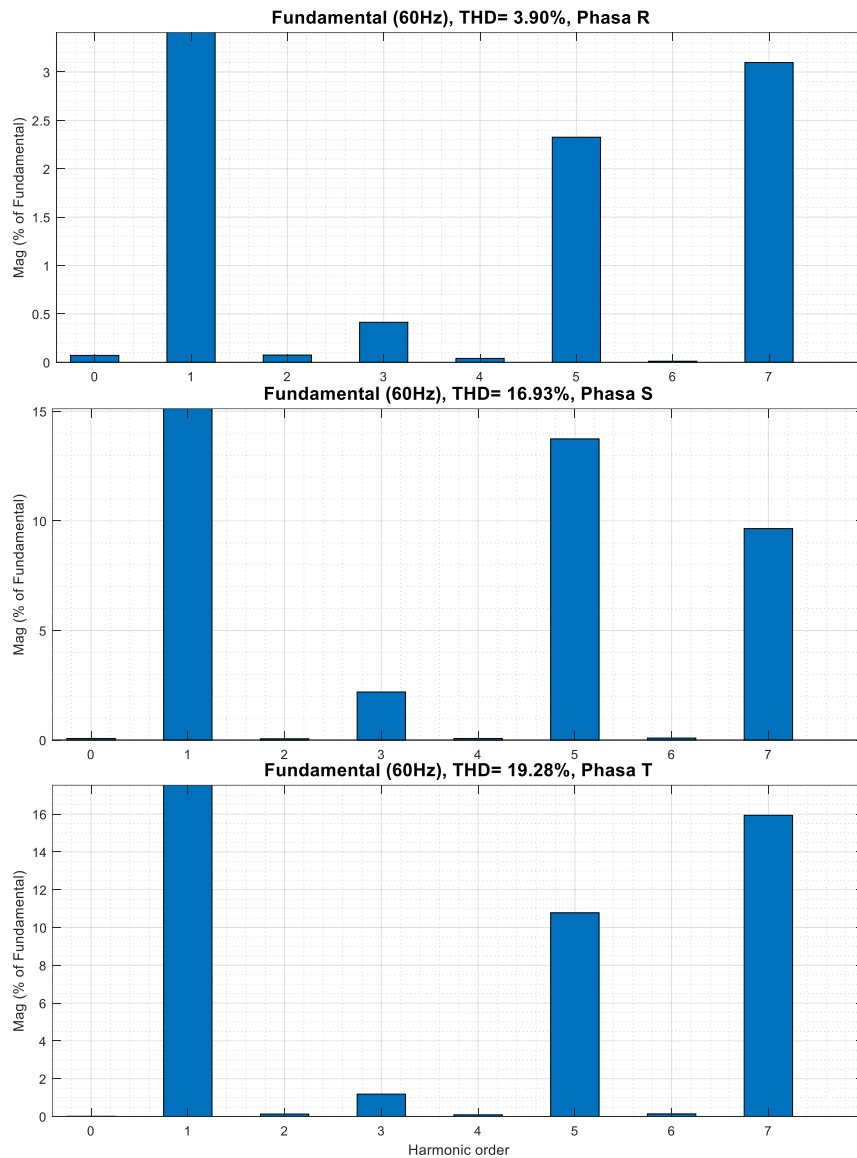
Pada Gambar 4.6 diatas merupakan hasil simulasi menggunakan *software* Simulink/MATLAB sesuai hasil pengukuran dilapangan pada Bus LV Balam SS. Hasil perbandingan simulasi dan pengukuran seperti pada Tabel 4.9. dari gambar gelombang tersebut terlihat perbedaan antar fasa. Hal ini disebabkan perbedaan beban pada tiap fasa.

**Tabel 4. 9** Perbandingan Harmonisa Tegangan Hasil Pengukuran dan Simulasi

ID Bus	Fasa	THD (%)	
		Pengukuran	Simulasi
Bus LV Balam SS	R	3,9	3,90
	S	16,9	16,93
	T	19,5	19,28

(Sumber : Hasil Penelitian)

Dari Tabel 4.9 diatas didapatkan hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB dengan hasil pengukuran. Perbedaan didapatkan pada fasa T dengan selisih 0,22 %. Untuk hasil simulasi *spectrum* gelombang menggunakan *software* Simulink MATLAB seperti pada Gambar 4.6.

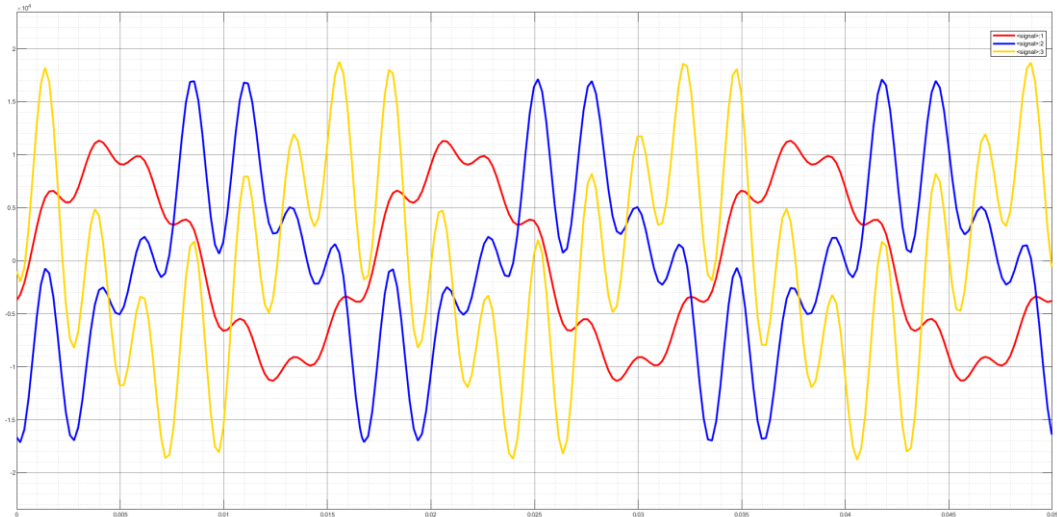


**Gambar 4.7** Hasil Simulasi *Spectrum* Harmonisa Tegangan Phasa R, S, dan T Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank (Sumber : Hasil Penelitian)

Gambar 4.7 merupakan hasil simulasi menggunakan *software* Simulink MATLAB bentuk spectrum harmonisa tegangan sebelum pemasangan kapasitor bank.

Pemasangan kapasitor bank memungkinkan terjadinya peningkatan THD harmonisa tegangan dan arus jika frekuensi resonansi kapasitor bank berdekatan dengan frekuensi harmonisa. Gambar 4.8 adalah hasil simulasi bentuk gelombang yang terdistorsi harmonisa setelah pemasangan kapasitor bank.





**Gambar 4. 8** Simulasi Harmonisa Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank  
(Sumber : Hasil Penelitian)

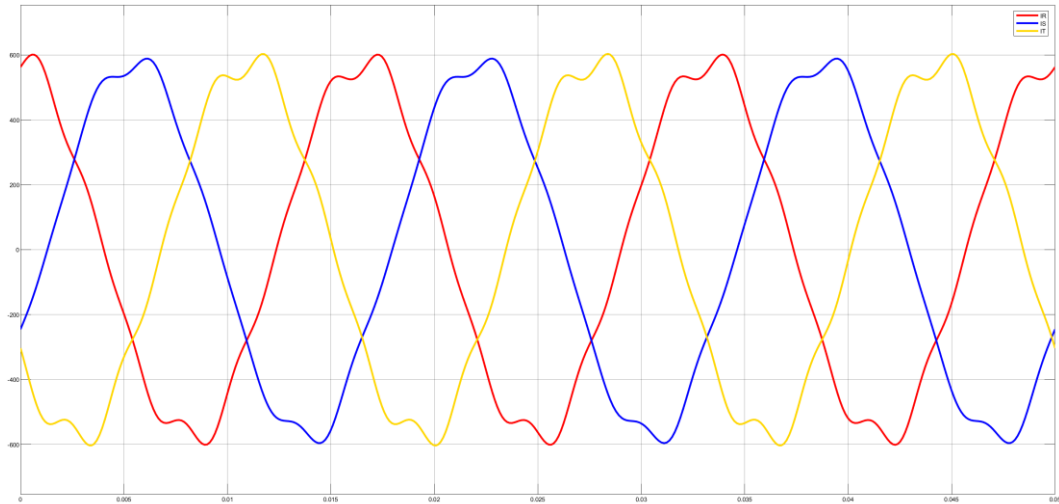
Pemasangan kapasitor bank akan memperkuat tingkat harmonisa pada sistem jika tidak di filter. Kapasitor bank pabrikan sudah memiliki filter standar jika THD pada sistem dibawah 5 %. Jika THD melebihi 5 % maka diperlukan filer tambahan untuk mereduksi harmonisa. Dengan hasil simulasi harmonisa tegangan menggunakan *software* Simulink MATLAB didapatkan harmonisa individu seperti pada Tabel 4.10.

**Tabel 4. 10** Simulasi Harmonisa Tegangan Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

ID Bus	Phasa	Harmonisa Individu (%)							THD (%)
		1	2	3	4	5	6	7	
Bus LV Balam SS	R	100	0,07	0,57	0,07	7,05	0,16	15,72	17,24
	S	100	0,07	3,10	0,32	41,39	0,54	49,28	64,44
	T	100	0,13	1,73	0,31	32,44	0,86	81,23	87,49

(Sumber : Hasil Penelitian)

Berdasarkan hasil simulasi tingkat THD tegangan meningkat melebihi standar IEEE 519-2014. Untuk phasa R, S, dan T masing-masing 17,24 %, 64,44 % dan 87,49 %. Untuk hasil simulasi THD arus pada Gambar 4.9.



**Gambar 4. 9** Simulasi Harmonisa Arus Sebelum Pemasangan Kapasitor Bank  
(Sumber : Hasil Penelitian)

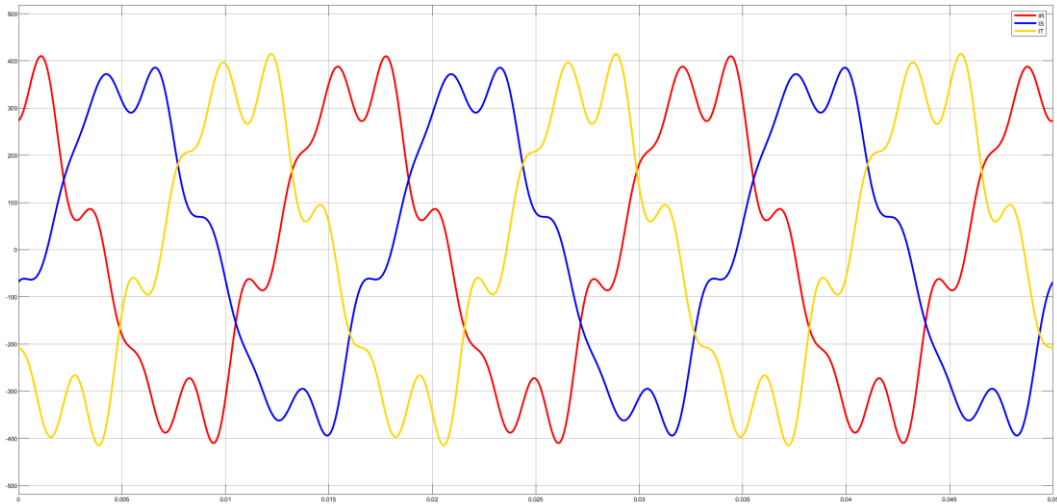
Gambar 4.9 merupakan bentuk gelombang yang terdistorsi hasil simulasi menggunakan *software* Simulink MATLAB sebelum pemasangan kapasitor bank. Berikut hasil perbandingan hasil pengukuran dilapangan dengan simulasi Simulink MATLAB pada Tabel 4.11.

**Tabel 4. 11** Perbandingan Harmonisa Arus Hasil Pengukuran dan Simulasi

ID Bus	Phasa	THD (%)	
		Pengukuran	Simulasi
Bus LV Balam SS	R	5,9	5,98
	S	4,8	5,07
	T	6,1	6,30

(Sumber : Hasil Penelitian)

Berdasarkan pada Tabel 4.10 dapat dianalisis perbandingan hasil pengukuran lapangan dan simulasi menggunakan *software* Simulink MATLAB bahwa terdapat selisih perbedaan dari masing-masing phasa R, S, dan T yaitu 0,08 %, 0,27 %, dan 0,2 %. Harmonisa arus kemungkinan juga akan mengalami kenaikan setelah pemasangan kapasior bank jika tanpa filter. Bentuk gelombang yang terdistorsi setelah pemasangan kapasitor bank seperti pada Gambar 4.9.



**Gambar 4. 10** Simulasi Harmonisa Arus Setelah Pemasangan Kapasitor Bank  
(Sumber : Hasil Penelitian)

Dari Gambar 4.10 diatas dapat dilihat gelombang sudah semakin tidak sinusoidal murni setelah pemasangan kapasitor bank. Hasil harmonisa individu setelah pemasangan kapasitor bank seperti pada Tabel 4.11.

**Tabel 4. 12** Simulasi Harmonisa Arus Setelah Pemasangan Kapasitor Bank

ID Bus	Phasa	Harmonisa Individu (%)							THD (%)
		1	2	3	4	5	6	7	
Bus LV Balam SS	R	100	0,16	0,71	0,15	12,11	0,15	16,24	20,27
	S	100	0,21	0,11	1,56	12,71	0,14	9,84	16,15
	T	100	0,17	0,51	0,03	11,28	0,0	18,57	21,74

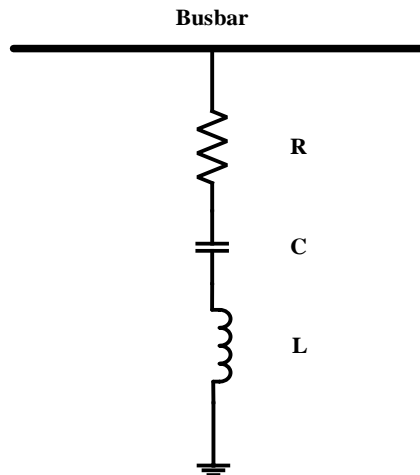
(Sumber : Hasil Penelitian)

Berdasarkan hasil simulasi tingkat THD arus meningkat melebihi standar IEEE 519-2014. Untuk phasa R, S, dan T masing-masing 20,27 %, 16,15 % dan 21,74 %.

#### 4.6. Perancangan Filter Harmonisa Pada Bus LV Balam SS

Perancangan filter pasif atau R, L dan C Pada Bus LV Balam SS adalah filter *single tuned* pada orde ke 5 dan 7, karena pada pemasangan kapasitor bank terdapat resonansi yang menyebabkan pada orde ke 5 dan 7 mengalami kenaikan harmonisa. Untuk menentukan kapasitas nilai filter diperlukan pendekatan pada faktor daya beban yang menghasilkan harmonisa. Dari hasil perhitungan daya reaktif didapatkan nilai pada Bus LV Balam SS 10,237 MVar. Sedangkan untuk perbaikan

faktor daya dari hasil perhitungan kompensasi daya reaktif pada Bus LV Balam SS dengan nilai 4,095 MVar dimana hasil faktor daya menjadi 0,90. Berikut perhitungan filter *single tuned* orde ke 5 dan 7 pada Bus LV Balam SS.



**Gambar 4. 11** Rangkaian Filter Pasif *Single Tuned*

#### 4.6.1. Perhitungan Dua Filter Pasif R, L, dan C *Single Tuned*

Dari hasil perhitungan didapatkan hasil faktor daya yaitu 0,90 dengan kompensasi daya reaktifnya 4,095 MVar. Dikarenakan ada dua orde yang berdekatan dengan frekuensi resonansi yaitu orde ke 5 dan 7, maka total kompensasi daya reaktif yaitu :

Diketahui:

$$\text{Orde ke 5} = 2095 \text{ kVAr}$$

$$\text{Orde ke 7} = 2000 \text{ kVAr}$$

$$2095 \text{ kVAr} + 2000 \text{ kVAr} = 4095 \text{ kVAr}$$

Kapasitas kapasitor dalam mikro Farad diketahui 58,727  $\mu\text{F}$

$$C_1 = 58,727 \mu\text{F}$$

Jadi nilai kapasitor masing-masing dipilih sesuai dengan seperti Gambar 4.12 yaitu:

$$C_a = \frac{Q_5 \times 10^3}{2\pi f \times V^2} = \frac{2095 \times 10^3}{2\pi \times 60 \times 13,6 \text{ kV}^2} = 30,045 \mu\text{F}$$

$$C_b = \frac{Q_7 \times 10^3}{2\pi f \times V^2} = \frac{2000 \times 10^3}{2\pi \times 60 \times 13,6 \text{ kV}^2} = 28,682 \mu\text{F}$$

Nilai  $L_a$  dan  $L_b$  dapat dihitung menggunakan persamaan (2.35)

$$L_a = \frac{1}{(\omega_n)^2 \times C_a} = \frac{1}{(2\pi \times 300)^2 \times 29,180 \mu\text{F}} = 9,367 \text{ mH}$$

$$L_b = \frac{1}{(\omega_n)^2 \times C_b} = \frac{1}{(2\pi \times 420)^2 \times 27,857 \mu\text{F}} = 5,006 \text{ mH}$$

Nilai  $C_2$  dapat dihitung menggunakan persamaan (2.39)

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2}$$

$$C_2 = \frac{30,045 \mu\text{F} \times 28,682 \mu\text{F} (30,045 \mu\text{F} + 28,682 \mu\text{F}) (9,367 \text{ mH} + 5,006 \text{ mH})^2}{(9,367 \text{ mH} \times 30,045 \mu\text{F} - 5,006 \text{ mH} \times 28,682 \mu\text{F})^2}$$

$$C_2 = \frac{8,617 (58,727) \times (2,065)}{(2,814 - 1,435)^2}$$

$$C_2 = \frac{1044,994}{1,901}$$

$$C_2 = 549,707 \mu\text{F}$$

Nilai  $L_1$  yang dibutuhkan sebagai filter harmonisa dapat dihitung menggunakan persamaan (2.40)

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} = \frac{9,367 \text{ mH} \times 5,006 \text{ mH}}{9,367 \text{ mH} + 5,006 \text{ mH}} = \frac{46,891 \text{ mH}}{14,373 \text{ mH}} = 3,262 \text{ mH}$$

Sedangkan nilai  $L_2$  dapat dihitung menggunakan persamaan (2.41)

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)^2}$$

$$L_2 = \frac{(9,367 \text{ mH} \times 30,045 \mu\text{F} - 5,006 \text{ mH} \times 28,682 \mu\text{F})^2}{(30,045 \mu\text{F} + 28,682 \mu\text{F})^2 (9,367 \text{ mH} + 5,006 \text{ mH})^2}$$

$$L_2 = \frac{(2,814 - 1,435)^2}{(58,727)^2 (14,373)^2}$$

$$L_2 = \frac{1,901 \times 10^{-14}}{3,253 \times 10^{-9} \times 2,190 \times 10^{-4}}$$

$$L_2 = 26,7 \text{ mH}$$

Nilai  $R_1$  yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.37)

$$R_1 = \frac{X_L}{Q} = \frac{2\pi \times 60 \times 3,262 \text{ mH}}{40} = 0,0307 \text{ Ohm}$$

Dengan nilai *quality factor* (Q) sebesar 40 maka nilai  $R_a$  dan  $R_b$  untuk masing-masing filter dapat dihitung menggunakan persamaan (2.37), sehingga diperoleh

$R_a$  dan  $R_b$  sebesar :

$$R_a = \frac{X_L}{Q} = \frac{2\pi \times 60 \times 9,367 \text{ mH}}{40} = 0,0882 \text{ Ohm}$$

$$R_b = \frac{X_L}{Q} = \frac{2\pi \times 60 \times 5,006 \text{ mH}}{40} = 0,0471 \text{ Ohm}$$

Nilai  $R_2$  yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.42)

$$R_2 = R_a \left[ \frac{a^2(1-x^2)}{(1+ax)^2(1+x^2)} \right] -$$

$$R_b \left[ \frac{1-x^2}{(1+ax)^2(1+x^2)} \right] +$$

$$R_1 \left[ \frac{a(1-a)(1-x^2)}{(1+ax)^2(1+x^2)} \right]$$

Dimana nilai (a) dan nilai (x) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.44) dan persamaan (2.45). Hasil perhitungan sebagai berikut :

$$a = \frac{C_a}{C_b} = \frac{30,045 \mu\text{F}}{28,682 \mu\text{F}} = 1,047$$

$$x = \sqrt{\frac{L_b C_b}{L_a C_a}} = \sqrt{\frac{5,006 \text{ mH} \times 28,682 \mu\text{F}}{9,367 \text{ mH} \times 30,045 \mu\text{F}}} = \sqrt{\frac{1,435 \times 10^{-7}}{2,814 \times 10^{-7}}} = 0,714$$

sehingga nilai  $R_2$  yaitu:

$$R_2 = 0,0909 \left[ \frac{1,047^2(1-0,714^2)}{(1+1,047 \times 0,174)^2(1+0,714^2)} \right] -$$

$$0,0485 \left[ \frac{1-0,714^2}{(1+1,047 \times 0,174)^2(1+0,714^2)} \right] +$$

$$0,0316 \left[ \frac{1,044(1-1,044)(1-0,714^2)}{(1+1,047 \times 0,174)^2(1+0,714^2)} \right]$$

$$R_2 = 0,0882 \left[ \frac{0,537}{4,615} \right] - 0,0471 \left[ \frac{0,489}{4,615} \right] + 0,0307 \left[ \frac{-0,0244}{4,615} \right]$$

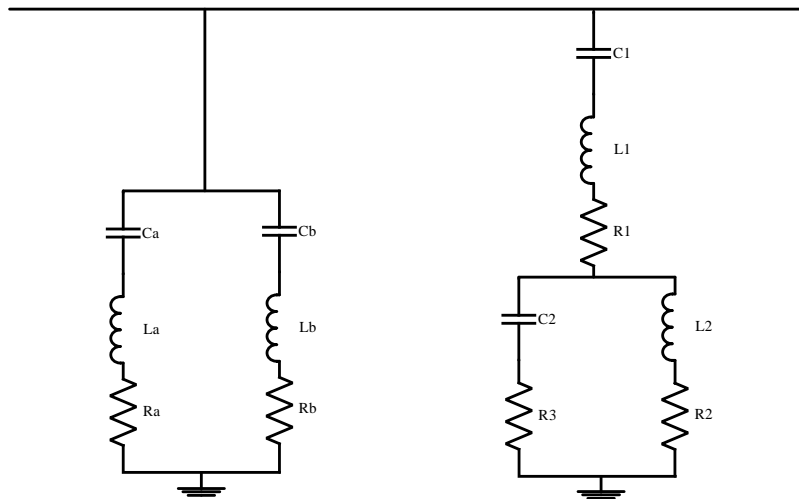
$$R_2 = 0,0883 [0,116] - 0,0471 [0,105] + 0,0307[-5,287 \times 10^{-3}]$$

$$R_2 = 0,0102 - 4,945 \times 10^{-3} - 1,623 \times 10^{-4}$$

$$R_2 = 5,092 \times 10^{-3} \text{ Ohm} \approx 5,092 \text{ m Ohm}$$

Nilai  $R_3$  yang dibutuhkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.43)

$$\begin{aligned}
 R_3 &= -R_a \left[ \frac{a^2 x^4 (1 - x^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] \\
 &+ R_b \left[ \frac{1 - x^2}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] \\
 &+ R_1 \left[ \frac{(1 - x^2)(1 - ax^2)}{(1 + ax^2)^2 (1 + x^2)} \right] \\
 R_3 &= -0,0882 \left[ \frac{1,047^2 \times 0,714^4 (1 - 0,714^2)}{(1 + 1,047 \times 0,714^2)^2 (1 + 0,714^2)} \right] \\
 &+ 0,0471 \left[ \frac{1 - 0,714^2}{(1 + 1,047 \times 0,714^2)^2 (1 + 0,714^2)} \right] \\
 &+ 0,0307 \left[ \frac{(1 - 0,714^2)(1 - 1,047 \times 0,714^2)}{(1 + 1,047 \times 0,714^2)^2 (1 + 0,714^2)} \right] \\
 R_3 &= -0,0882 \left[ \frac{0,139}{3,555} \right] + 0,0471 \left[ \frac{0,489}{3,555} \right] + 0,0307 \left[ \frac{0,228}{3,555} \right] \\
 R_3 &= -0,0882[0,0390] + 0,0471[0,137] + 0,0307[0,0641] \\
 R_3 &= -3,439 \times 10^{-3} + 6,452 \times 10^{-3} + 1,967 \times 10^{-3} \\
 R_3 &= 4,98 \times 10^{-3} \text{ Ohm} \approx 4,98 \text{ m Ohm}
 \end{aligned}$$



**Gambar 4. 12** Rangkaian Filter *Single Tuned* dan Filter *Double Tuned*

Q adalah nilai *quality factor* untuk filter *single tuned* dengan *range* 30 sampai dengan 60. Pada perancangan ini digunakan nilai Q 40.

**Tabel 4. 13** Hasil Spesifikasi Filter Pasif R, L, dan C *Single Tuned*

<b>Spesifikasi Filter <i>Single Tuned</i></b>	
$R_a$	0,0882 Ohm
$R_b$	0,0471 Ohm
$L_a$	9,367 mH
$L_b$	5,006 mH
$C_a$	30,045 $\mu$ F
$C_b$	28,682 $\mu$ F

(Sumber : Hasil Penelitian)

**Tabel 4. 14** Hasil Spesifikasi Filter Pasif R, L, dan C *Double Tuned*

<b>Spesifikasi Filter <i>Double Tuned</i></b>	
$R_1$	0,0307 Ohm
$R_2$	5,092 m Ohm
$R_3$	4,98 m Ohm
$L_1$	3,262 mH
$L_2$	26,7 mH
$C_1$	58,727 $\mu$ F
$C_2$	549,707 $\mu$ F

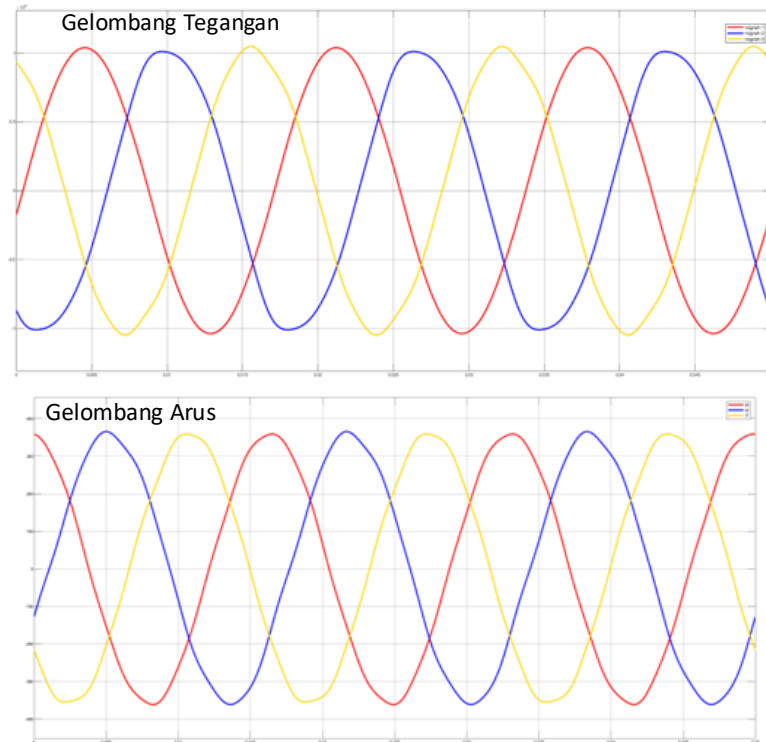
(Sumber : Hasil Penelitian)

Tabel 4.13 dan 4.14 diatas merupakan hasil perhitungan untuk nilai-nilai R, L, dan C untuk merancang filter pasif *single tuned* untuk meredam harmonisa pada Bus LV Balam SS. Selanjutnya hasil perhitungan disimulasikan menggunakan Simulink MATLAB.

#### **4.6.2. Hasil Simulasi Pemasangan Filter Pasif *Single Tuned***

Dilakukan pemodelan sistem untuk simulasi hasil pemasangan filter pasif *single tuned*. Berikut Gambar 4.13 bentuk gelombang yang terdistorsi dan *spectrum* harmonisa setelah dilakukan penambahan filter pasif *single tuned*. Hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB untuk hasil pemasangan filter pasif R, L, dan C *single tuned*.





**Gambar 4.13** Hasil Simulasi Gelombang Tegangan dan Arus Setelah Pemasangan Filter Bus LV Balam SS  
(Sumber : Hasil Penelitian)

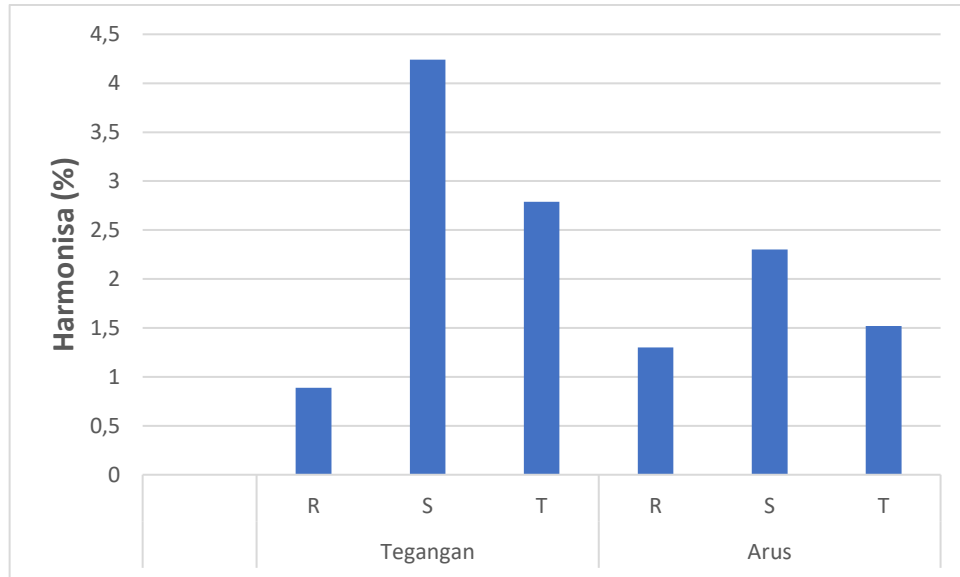
Dari hasil simulasi menggunakan Simulink MATLAB bentuk gelombang yang terdistorsi harmonisa sudah terlihat baik dengan pemasangan filter pasif *single tuned* untuk orde ke 5 dan orde ke 7. Kesimpulannya dengan pemasangan filter pasif *single tuned* dapat menurunkan tingkat harmonisa pada sistem. Berikut ini hasil *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan dan arus setelah pemasangan filter pasif *single tuned* seperti pada Tabel 4.14.

**Tabel 4.15** Total Harmonisa Tegangan dan Arus Setelah Pemasangan Filter Pasif *Single Tuned*

Parameter	Phasa	Harmonisa Individu (%)							THD (%)
		1	2	3	4	5	6	7	
Tegangan	R	100	0,34	0,76	0,12	0,11	0,06	0,23	0,89
	S	100	0,38	4,04	0,09	1,10	0,03	0,58	4,24
	T	100	0,50	2,39	0,22	1,04	0,18	0,76	2,79
Arus	R	100	0,08	0,55	0,56	0,16	0,03	1,02	1,30
	S	100	0,15	0,21	1,92	0,55	0,03	1,11	2,30
	T	100	0,14	0,30	0,58	0,41	0,03	1,30	1,52

(Sumber : Hasil Penelitian)

Dari hasil seperti pada Tabel 4.14 diatas dapat dilihat bahwa nilai harmonisa individu mengalami penurunan setelah pemasangan pemasangan filter pasif R, L, dan C *single tuned*. Setelah pemasangan filter pasif R, L, dan C *single tuned* tidak terdapat harmonisa yang melebihi standar IEEE 519-2014 dan sistem dalam kondisi baik maupun dalam segi harmonisa dan faktor daya.



**Gambar 4. 14** Grafik *Total Harmonic Distortion* (THD) Tegangan dan Arus

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.14 bahwa *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan sudah berada dibawah standar IEEE 519-2014 yaitu 5 %. Dengan pemasangan filter *single tuned* pada orde ke 5 dan orde ke 7 dapat menurunkan *Total Harmonic Distortion* (THD) arus dan tegangan.