

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data yang Diperoleh

Dalam penelitian ini menggunakan data Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy yang telah dikumpulkan untuk menunjang dilakukannya perbaikan kinerja pengaman relai differensial, Berikut adalah beberapa data yang di peroleh :

4.1.1. Data *Sheet* Generator

Data Generator ini diperoleh dari data *sheet* perusahaan yang digunakan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy.

Tabel 4.1 Data *sheet* generator

No	Tipe Generator	Daya (kVA)	Tegangan (kV)	Arus (A)	Power faktor	Frekuensi (Hz)	Rotasi (r/min)
1	GTLRI494/53-2	50,000	13.8	2,092	0.8	50	3.000

4.1.2. Data *Sheet* Transformator

Berikut ini adalah data transformator yang digunakan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy yang diambil dari dokumen pembukuan perusahaan.

Tabel 4.2 Data *sheet* transformator

No	Daya Tranformator (MVA)	Tegangan Primer (kV)	Tegangan Sekunder (kV)	Frekuensi (Hz)	Impedansi (%)
1	50/60	13.8	150	50	13

4.1.3. Data *Setting* Relay Differential

Berikut ini adalah data *setting* relay differensial (87 GT) yang digunakan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy yang terhubung dengan Generator dan Transformer.

Tabel 4.3. Data *Sheet* Relay Differential (87GT)

No	<i>Relay Differsial Spesification (87GT)</i>	<i>Range</i>	<i>Step Size</i>
1	<i>Pickup</i>	0.10-1.00pu	0.01pu
2	<i>Percent slope #1</i>	5-100%	1%
3	<i>Percent slope #2</i>	5-200%	1%
4	<i>Slope break point</i>	1.0-4.0pu	0.01pu
5	<i>2nd, 4th Harmonic restraining</i>	5-50%	1%
6	<i>5th Harmonic restraint</i>	5-50%	1%
7	<i>Pickup at 5th harmonic</i>	0.10-2.00pu	0.01
8	<i>CT 1 tap (W1)</i>	0.10-2.00A	0.01
9	<i>CT 2 tap (W2)</i>	0.10-2.00A	0.01
10	<i>CT 3 tap (W3)</i>	0.10-2.00A	0.01
11	<i>CT 4 tap (W4)</i>	0.10-2.00A	0.01

Tabel 4.4. Data *sheet* penempatan relay differensial (87GT)

No	<i>Input Spesification</i>	<i>Current stepdown</i>	<i>Step Size</i>
1	<i>150kV Line side CT</i>	200/1 A	0.01pu
2	<i>Generator Line side CT</i>	3,000/1A	1%
3	<i>6.3kV SWGR side CT</i>	750/1A	1%

Fungsi ini memberikan perlindungan untuk transformator dari semua kesalahan berliku internal. Pengaturan *pick up* minimal harus ditetapkan untuk mencegah pengoperasian fungsi ini karena arus eksitasi transformator. Nilai rekomendasi dari pengaturan minimum adalah 0,3 p.u.

Pengaturan slope 1 harus ditetapkan menurut berbagai kemungkinan kesalahan. Nilai rekomendasi untuk pengaturan dari slope 1 adalah 40%. Berikut adalah beberapa kemungkinan kesalahan yang ditimbulkan oleh slope 1 :

1. Operasi *Tap Changer* di trafo utama
2. CT (*Current Transformer*) *mismatch* karena kesalahan rasio.
3. Arus eksitasi transformator.

Untuk kesalahan berat yang diakibatkan oleh kesalahan pengaturan slope 2 di luar zona diferensial adalah terjadinya saturasi pada CT (*Current Transformer*). Faktor seperti sisa magnetis di inti CT (*Current Transformer*), karakteristik *mismatch* CT (*Current Transformer*) dan beban *mismatch* dapat berkontribusi saat diferensial besar selama kondisi ini. Pengaturan Slope 2 harus ditetapkan lebih tinggi dari Slope 1. Nilai rekomendasi untuk pengaturan dari Slope 2 adalah 80%. Pengaturan tahanan harmonik kedua dan keempat adalah 10 %. Sedangkan pengaturan tahanan harmonik kelima adalah 30 %.

Berikut ini adalah perhitungan manual *setting* tap CT relay diferensial (87GT).

1. CT W1 (*Current Transformer Winding 1*)

$$CT\ W1 = \frac{MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times V1 \times CTr1} = \frac{50\ MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times 6.3\ kV \times 750} = 6.1095$$

Di mana :

- MVA : Kapasitas Transformer
- V1 : Tegangan Transformer 1 (*line – line*)
- CTr1 : Rasio tap CT (750 / 1 = 750)

2. CT W2 (*Current Transformer Winding 2*)

$$CT\ W2 = \frac{MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times V2 \times CTr2} = \frac{50\ MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times 13.8\ kV \times 3,000} = 0.6973$$

Di mana :

- MVA : Kapasitas Transformer
- V2 : Tegangan Transformer 2 (*line – line*)
- CTr2 : Rasio tap CT (3,000 / 1 = 3,000)

3. CT W3 (Current Transformer Winding 3)

$$CT\ W3 = \frac{MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times V3 \times CTr3} = \frac{50\ MVA\ 10^3}{\sqrt{3} \times 150\ kV \times 200} = 0.9623$$

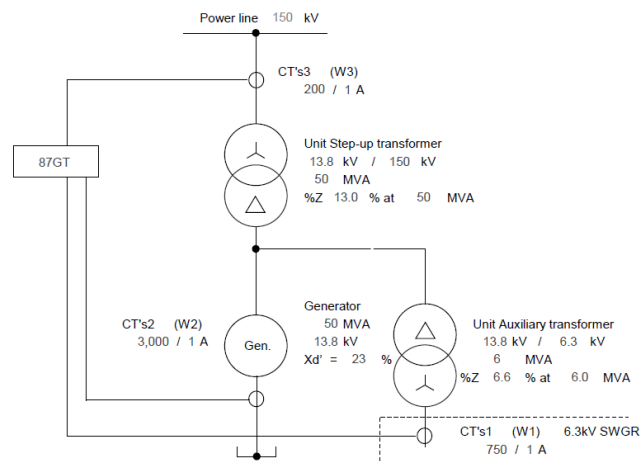
Di mana :

MVA : Kapasitas Transformer

V3 : Tegangan Transformer 3 (*line – line*)

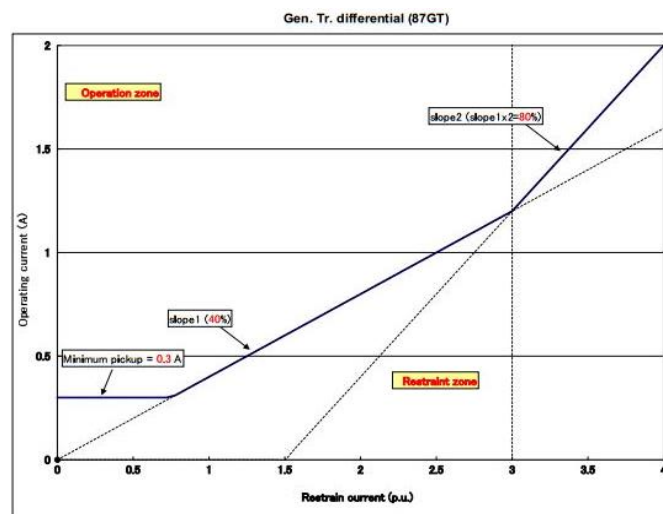
CTr3 : Rasio tap CT (200 / 1 = 200)

Berikut ini adalah gambar rancangan pemasangan dan grafik kerja relay differensial (87GT) pada kamojang unit V



(sumber :Y. Ando, 2014)

Gambar 4.1. Rancangan pemasangan relay differensial pada Kamojang Unit V

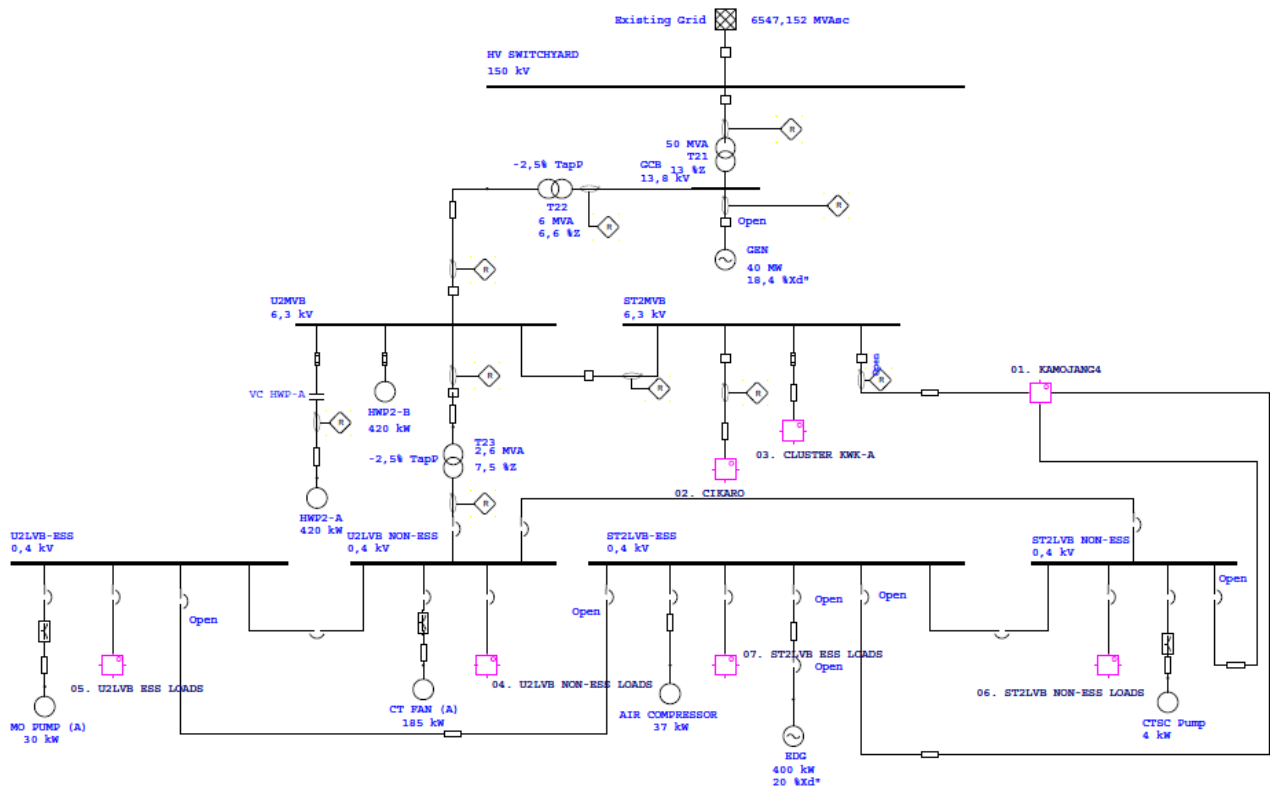


(sumber :Y. Ando, 2014)

Gambar 4.2. Grafik kerja relay differensial (87GT) Kamojang Unit V

4.1.4. Single Line Diagram Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy

Berikut ini adalah *single line diagram* yang menggambarkan sistem jaringan kelistrikan yang ada pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V yang dimiliki oleh PT. Pertamina Geothermal Energy. *Single line diagram* ini telah di gambarkan dengan aplikasi software ETAP 12.6 :

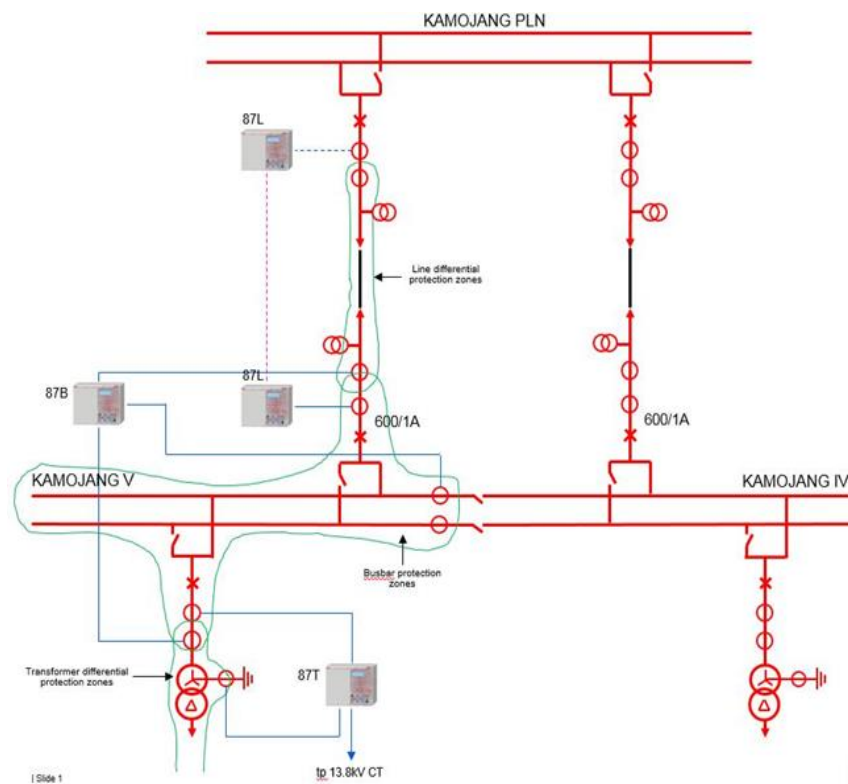


Gambar 4.3. *Single line diagram* Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V pada program ETAP 12.6

Generator pada single diagram ini menggunakan generator tipe GLTRI494/53-2 dengan daya 50,000 kVA, tegangan 13.8 kV, arus 2,092 A, faktor daya 0.8, frekuensi 50 Hz, dengan putaran generator 3,000r/min. Terdapat 2 Transformator utama yang digunakan yaitu transformator *step up* dan transformator *step down*, transformator *step up* berkapasitas daya 50 MVA, dengan tegangan 13.8 kV - 150 kV dan impedansi 13%, transformator *step down* berkapasitas daya 6 MVA, dengan tegangan 13.8 kV - 6.3 kV dan saturasi 6.6%

4.2. Gangguan yang Terjadi pada Relay Differensial (87GT) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Diketahui telah terjadi gangguan pada penjulung PLN 150kV di Wayang Windu bagian Bandung Selatan, pada saat yang bersamaan PLTP KMJ-5 mengalami trip akibat bekerjanya *Phase Differential Relay (87GT)*. Sambaran petir tersebut tidak mengenai jaringan PLTP KMJ-5, namun pada Relay Differensial (87GT) langsung bekerja ketika ada sambaran petir. Hal ini membuktikan bahwa tingkat ke sensitifitas relay sangat tinggi. Di sisi lain, hal ini menyebabkan terhambatnya suplai energi yang dikirimkan kepada gardu induk sehingga pihak perusahaan yang menjual energi mengalami beberapa kerugian. Sedangkan, pada prinsipnya Trafo Arus proteksi tidak mengutamakan tingkat sensitifitas yang tinggi, namun yang terjadi adalah Trafo Arus proteksi tingkat sensitifitas tinggi sehingga Trafo Arus proteksi tersebut mengirimkan data pada relay untuk bekerja.

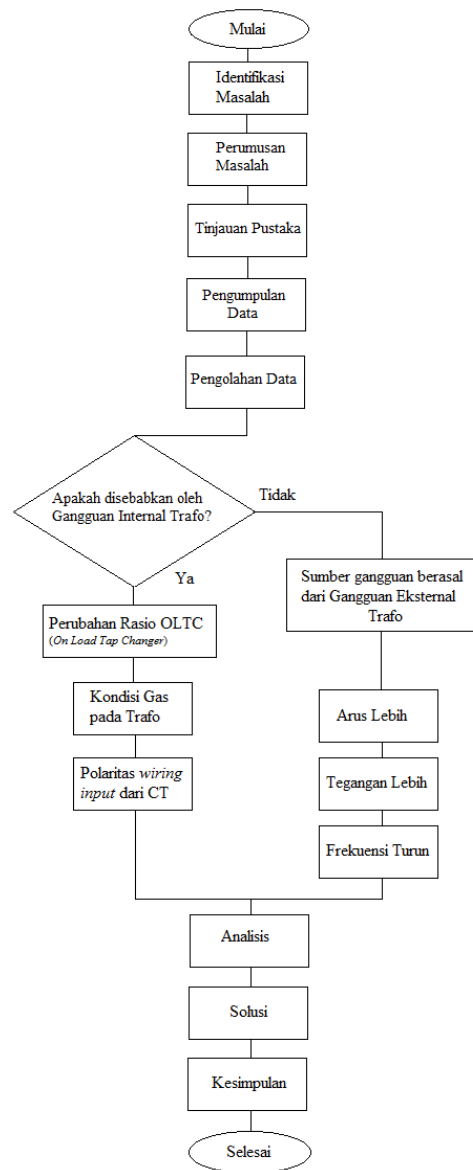


(sumber : PLN, 2016)

Gambar 4.4. *Single Line Diagram* gangguan yang terjadi pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

4.3. Sumber Gangguan yang Terjadi pada Relay Differensial (87GT) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Berikut ini adalah *Flow Chart* dan pembahasannya untuk menentukan sumber titik masalah dan gangguan yang terjadi pada relay differensial (87GT) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy guna keperluan analisis dan perbaikan gangguan tersebut.



Gambar 4.5. *Flow Chart* sumber gangguan pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

4.4. Pengecekan Terhadap Gangguan Internal Trafo

Gangguan internal trafo merupakan gangguan yang terjadi dikarenakan terdapat masalah (*error*) dalam trafo itu sendiri. Banyak faktor yang menyebabkan terjadinya gangguan internal tersebut. Berikut ini adalah pengecekan gangguan internal yang dilakukan pada trafo yang dilindungi oleh relay differensial (87GT) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy:

4.4.1. Pengecekan Terhadap Perubahan Rasio Akibat OLTC (*On Load Tap Changer*)

Perubahan *tap* tegangan (perubahan posisi *tap changer*) pada transformator tenaga oleh On Load Tap Changer (OLTC) yang menyebabkan CT mismatch juga ikut berubah. Arus sisi sekunder CT dapat dibuat match hanya pada satu titik dari rentang pengubahan tap. Pada posisi lain akan timbul arus tak seimbang.

Ketika transformator sedang melakukan proses tapping *On Load Tap Changer* pada ketiga fasa, di antara salah satu fasa tersebut terjadi keterlambatan penambahan atau pengurangan *wiring*. Hal ini menimbulkan adanya perbedaan arus di antara 3 fasa yang mengakibatkan relay differensial itu bekerja.

Pada pembuktiannya, gangguan relay differensial bekerja dengan baik dalam melakukan *tapping*, namun gangguan itu terjadi pada saat adanya gangguan sambaran petir pada saluran transmisi yang terdapat pada PLN Wayang Windu bagian Bandung Selatan bukan pada saat proses *tapping* terjadi. Berikut adalah tabel data *tapping On Load Tap Changer Main Transformer KMJ Unit 5*

Tabel 4.5. Data *tapping On Load Tap Changer (OLTC) Main Transformer Kamojang*
Unit V

Position of OLTC	High Voltage			Low Voltage		Rated Power (MVA)	
	Tapping Voltage (kV)	Tapping Current (A)		Rated Voltage (kV)	Rated Current (A)		
		ONAN	ONAF		ONAN		ONAF
17	161.250	178	214.6	13.8	2091.8	2510.2	50/60
16	159.375	181.1	217.4				
15	157.500	183.3	219.9				
14	153.625	185.5	222.6				
13	153.750	187.5	225.3				
12	151.875	190.1	228.1				
11	150.000	192.5	230.9				
10	148.125	194.9	233.9				
9	146.250	197.4	236.9				
8	144.375	199.9	239.9				
7	142.500	202.6	243.1				
6	140.625	205.3	246.3				
5	138.750	208.1	249.7				
4	136.875	210.9	253.1				
3	136.000	213.8	256.6				
2	133.125	216.8	260.2				
1	131.250	219.9	263.9				

4.4.2. Pengecekan Terhadap Perubahan Kondisi Gas Pada Trafo.

Pengecekan terhadap internal trafo menjadi konsentrasi utama akibat bekerjanya relay differensial (87GT), diantaranya adalah dengan melakukan pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*) dan BDV (*Breakdown Voltage*) terhadap *Main Transformer 50 MVA (T21)* dan *Auxiliary Transformer 6 MVA (T23)*. Pengujian DGA dapat memberikan informasi tentang kondisi transformator sebab pengujian DGA dilakukan pengujian gas-gas terlarut (*fault gas*). Dengan demikian DGA dapat diartikan sebagai analisis kondisi transformator berdasarkan jumlah gas terlarut (*fault gas*) pada transformator, sedangkan pengujian BDV atau yang sering disebut dengan pengujian dielektrik adalah pengujian dengan pemberian tegangan tinggi terhadap minyak transformator dengan perubahan suhu yang dihasilkan akan nampak kondisi trafo tersebut masih layak digunakan atau tidak .

Secara garis besar dari hasil DGA dan BDV menunjukkan kondisi internal trafo yang masih baik dan aman dan direkomendasikan dapat beroperasi secara normal. Berikut adalah tabel kondisi gas pada trafo T21 dan T23.

Tabel 4.6. Data *Dissolved Gas Analysis* T21 Kamojang Unit V

No	Gas	Nama Senyawa	Rating
1	<i>Hydrogen</i>	H ₂	101
2	<i>Water</i>	H ₂ O	33
3	<i>CarboneDioxide</i>	CO ₂	552
4	<i>CarbonMonoxide</i>	CO	19
5	<i>Ethylene</i>	C ₂ H ₄	2
6	<i>Ethane</i>	C ₂ H ₆	7
7	<i>Methane</i>	CH ₄	1
8	<i>Achetylene</i>	C ₂ H ₂	0.5
<i>TDCG</i>			130.5

**Result GOOD *TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)*

Tabel 4.7. Data *Dissolved Gas Analysis* T23 Kamojang Unit V

No	Gas	Nama Senyawa	Rating
1	<i>Hydrogen</i>	H ₂	33
2	<i>Water</i>	H ₂ O	20
3	<i>CarboneDioxide</i>	CO ₂	410
4	<i>CarbonMonoxide</i>	CO	42
5	<i>Ethylene</i>	C ₂ H ₄	2
6	<i>Ethane</i>	C ₂ H ₆	13
7	<i>Methane</i>	CH ₄	7
8	<i>Achetylene</i>	C ₂ H ₂	0.5
<i>TDCG</i>			97.5

**Result GOOD *TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)*

Berikut ini adalah tabel standard gas IEE C57104 dan Standard IEC 60599 yang digunakan pada trafo 21 (T21) dan trafo 23 (T23) untuk menentukan kriteria gas yang berada dalam trafo tersebut dalam batas taraf aman (normal).

Tabel 4.8. Data *Standard IEE C 57104* dan *Standard IEE C 60599*

No	Gas	Nama Senyawa	<i>Standard IEE C 57104</i>	<i>Standard IEE C 60599</i>
1	<i>Hydrogen</i>	H ₂	<100	<60
2	<i>Water</i>	H ₂ O	-	-
3	<i>CarboneDioxide</i>	CO ₂	<2500	<5100
4	<i>CarbonMonoxide</i>	CO	<350	<540
5	<i>Ethylene</i>	C ₂ H ₄	<50	<60
6	<i>Ethane</i>	C ₂ H ₆	<65	<50
7	<i>Methane</i>	CH ₄	<120	<40
8	<i>Achetylene</i>	C ₂ H ₂	<35	<3
<i>TDCG</i>			720	-

***TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)**

Menurut standar IEC 156, tegangan tembus minyak trafo pada suhu 30°C adalah 30 kV pada pengujian dengan jarak sela 2,5 mm dan titik didih minyak trafo menurut standar SPLN 49-1 dengan metode uji IEC 296 adalah 130°C. Pada pengujian yang dilakukan, akan diteliti karakteristik tegangan tembus (*breakdownvoltage*) yang timbul pada dielektrik minyak trafo terhadap pengaruh perubahan suhu antara 30°C sampai dengan 130°C dengan cara pengujian menggunakan elektroda uji yang diterapkan tegangan uji berupa tegangan tinggi bolak-balik (AC) frekuensi 50 Hz. Jenis pengujian yang dilakukan berupa pengujian merusak sampai terjadi tembus dielektrik (*breakdown*). Pengujian dilakukan melalui pengamatan terhadap bahan uji dengan selang waktu tertentu sampai terjadi peristiwa tembus isolasi.

Berikut adalah hasil dari *Breakdown Voltage Test* (BDV Test):

T21 Average Voltage : 78.3kV (IEC 156 1995), dimana Standard Deviation (SD) s= 2.63 dan s/x= 0.03

T23 Average Voltage : 80.0kV (IEC 156 1995), dimana Standard Deviation (SD) s= 2.63 dan s/x= 0.03

4.4.3. Pengecekan Terhadap Polaritas Wiring Input CT (*Current Transformer*) dan Relay Differensial (87GT)

Kesalahan polaritas *wiring* seharusnya dapat diketahui lebih awal pada saat komisioning atau uji coba operasi. Kesalahan polaritas *wiring* adalah kesalahan yang dilakukan pada saat pemasangan koneksi kabel pada instrument. Kesalahan polaritas *wiring* koneksi dimulai dari kesalahan pada saat *wiring* di terminal sampai relay. Kesalahan polaritas *wiring* terjadi akibat kurangnya ketelitian pekerja dalam melakukan prosedur pemasangan kabel atau biasa disebut dengan *human error*. Kesalahan polaritas *wiring* menyebabkan terjadinya hubung singkat dan gagalnya suatu sistem untuk beroperasi. Kesalahan fatal yang terjadi adalah rusaknya *instrument* bahkan dapat menyebabkan kebakaran jika tidak dengan cepat ditasi. Kesalahan polaritas *wiring* CT (*Current Transformer*) atau PT (*Potensial Transformer*) biasanya terjadi pada:

- a. Terminal atau sambungan pada terminal CT (*Current Transformer*), terminal panel trafo , panel kontrol, atau panel proteksi.
- b. Sistem *grounding* yang kurang baik.
- c. Kesalahan pada waktu pemeliharaan, bisa melepas *short* setelah pemeliharaan.

Berikut adalah solusi untuk meminimal kesalahan polaritas *wiring* dalah :

- a. Pengecekan secara rutin pengencangan baut terminal CT
- b. Setiap ada perubahan *wiring* harus dilakukan dengan pemasangan yang benar.
- c. Pengecekan terminal *Grounding*
- d. Pengujian stabilitas sebelum instalasi dioperasikan.

Berikut adalah gambar *Main Transformer* 50 MVA (T21) yang terdapat di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V



Gambar 4.6. *Main Transformer* 50 MVA (T21) pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Kesalahan polaritas arus atau tegangan pada rele differensial harus dihindari karena akan mempengaruhi besaran arus antar fasa. Hal ini menyebabkan rele Differensial akan bekerja.

Solusi untuk meminimal kesalahan ini adalah :

- a. Pengecekan polaritas sebelum dioperasikan.
- b. Pengecekan arah (*directional test*), baik dengan beban maupun dengan simulasi.

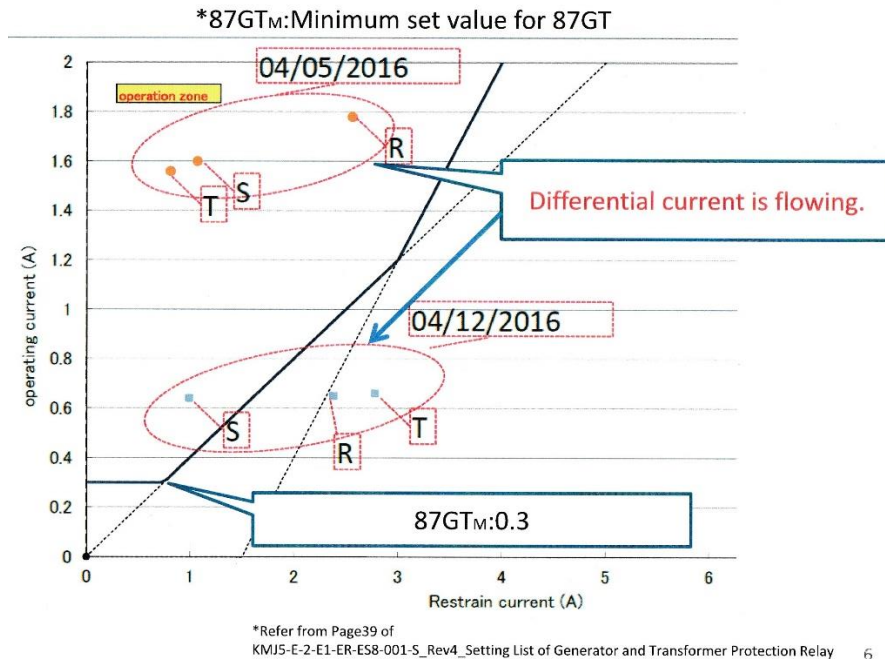
Namun dalam pembuktiannya, Relay Differensial Main Transformer (T 21) bukan disebabkan oleh terbaliknya polaritas wiring CT. Ini dikarenakan gangguan yang terjadi pada rele tersebut akibat adanya gangguan sambaran petir di sekitar jaringan dan berjalan normal jika tidak ada samabran petir di sekitar. Ini membuktikan bahwa rele sudah berjalan dengan baik dan tidak ada polaritas wiring CT yang terbalik. Berikut adalah Gambar relay differensial (87GT) yang terdapat di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V



Gambar 4.7. Relay differensial (87GT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

4.5. Pengecekan Terhadap Gangguan Eksternal Trafo

Gangguan eksternal trafo merupakan gangguan pada trafo yang sumber gangguannya berasal dari luar pemangana trafo, namun dampaknya terasa pada trafo tersebut. Pengecekan gangguan eksternal trafo dilakukan dengan mengamati rekaman tegangan, arus, dan frekuensi yang masuk ke relay differensial (87GT). Berikut ini adalah pengecekan gangguan internal yang dilakukan pada trafo yang dilindungi oleh relay differensial (87GT) di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy.

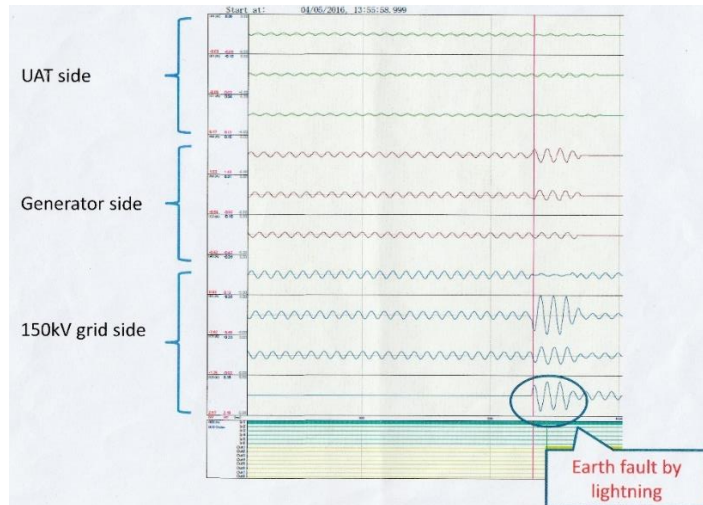


(sumber :Tomita, 2016)

Gambar 4.8. Grafik kerja gangguan pada relay diferensial (87GT) Kamojang Unit V

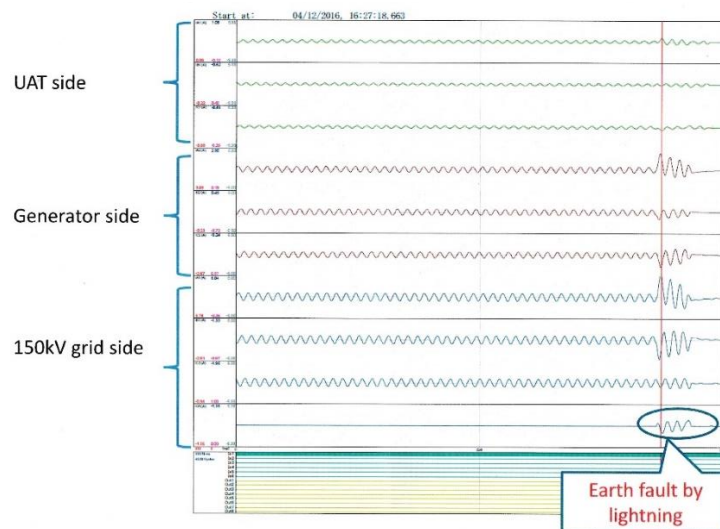
Dari Gambar tersebut bahwa pada tanggal 5 April 2016 terdapat arus yang masuk ke saluran 3 *phase* sehingga terbaca oleh relay differensial, dimana arus masing-masing saluran (R= 1.7 A, S= 1.6 A , T= 1.5 A) melebihi ketahanan arus kerja relay sehingga relay differensial tersebut bekerja dan melakukan *trip* pada pembangkit. Kejadian yang sama terulang kembali pada tanggal 12 April 2016, namun hanya pada saluran S (S= 0.615 A) yang melebihi ketahanan arus relay yaitu dengan *minimum pick up* 0.3 A.

Berikut ini adalah gambar rekaman gangguan yang terjadi pada tanggal 5 April dan 12 April 2016. Rekaman Gangguan diambil untuk menentukan lokasi dimana terjadinya pusat gangguan dengan menggunakan alat *GX-20-W Yokogawa* yang terkoneksi dengan sistem kontrol pada Ruang kontrol Kamojang Unit V.



(sumber :Tomita, 2016]

Gambar 4.9. Rekaman gangguan pada tanggal 5 April 2016 di Kamojang Unit V



(sumber :Tomita, 2016]

Gambar 4.10. Rekaman gangguan pada tanggal 12 April 2016 di Kamojang Unit V

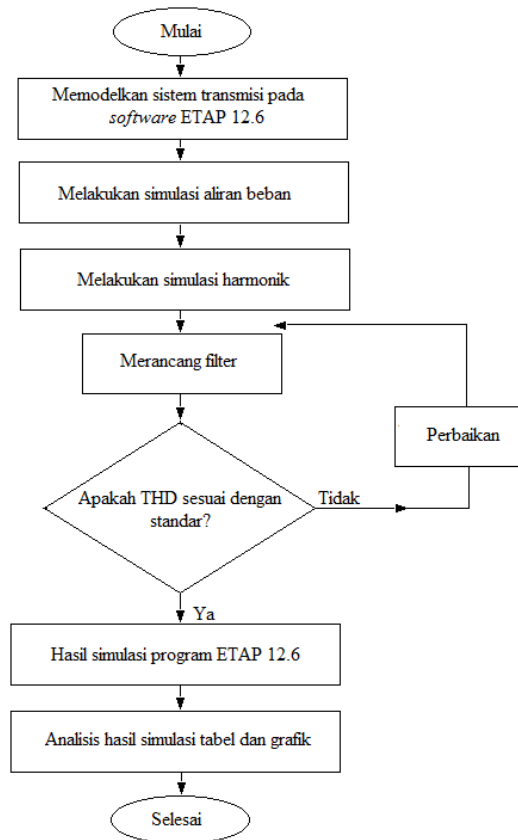
Dari gambar tersebut diketahui bahwa telah terjadi distorsi gelombang arus dan tegangan yang terjadi pada sisi saluran transmisi 150 kV. Gangguan tersebut bersumber dari akibat sambaran petir yang terjadi di Gardu Induk Wayang Windu bagian Bandung Selatan. Harmonik ini merupakan kejadian alam yang disebabkan oleh adanya sambaran petir. Sambaran petir tersebut membentuk distorsi gelombang arus dan tegangan pada grounding Gardu Induk Wayang Windu, sehingga efek harmonisa tersebut terasa sampai

di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V. Efek harmonik yang ada pada relay differensial *main transformer* (87 GT) merupakan harmonik tipe *12-pulse Rectifier*. *12-pulse Rectifier* adalah harmonik yang memiliki dua belas distorsi dalam satu gelombang. *12-pulse Rectifier* berada pada trafo yang memiliki hubungan Y - Δ (*Star-Delta*) yaitu trafo *step up*. Berdasarkan nilai *standard typical IEE 12 pulse-1* pada ETAP 12.6 deret harmonik *12-pulse Rectifier* yaitu 1, 11, 13, 23, 25, 35, 37, 47, 49, dan seterusnya.

4.6. Simulasi Desain Filter Pasif Menggunakan Program ETAP 12.6

Simulasi pada tugas akhir ini dimaksudkan untuk membuat suatu kondisi yang dapat mewakili kondisi yang sesungguhnya dan tentunya dengan batasan-batasan tertentu melalui perangkat lunak ETAP 12.6. Kondisinya dibuat sedekat mungkin agar benar-benar dapat mewakili sistem yang sesungguhnya tanpa adanya gangguan.

Diagram alir diperuntukan sebagai acuan dalam melakukan simulasi. Berikut adalah diagram alir dari simulasi yang dilakukan pada skripsi ini dalam mendesain filter:

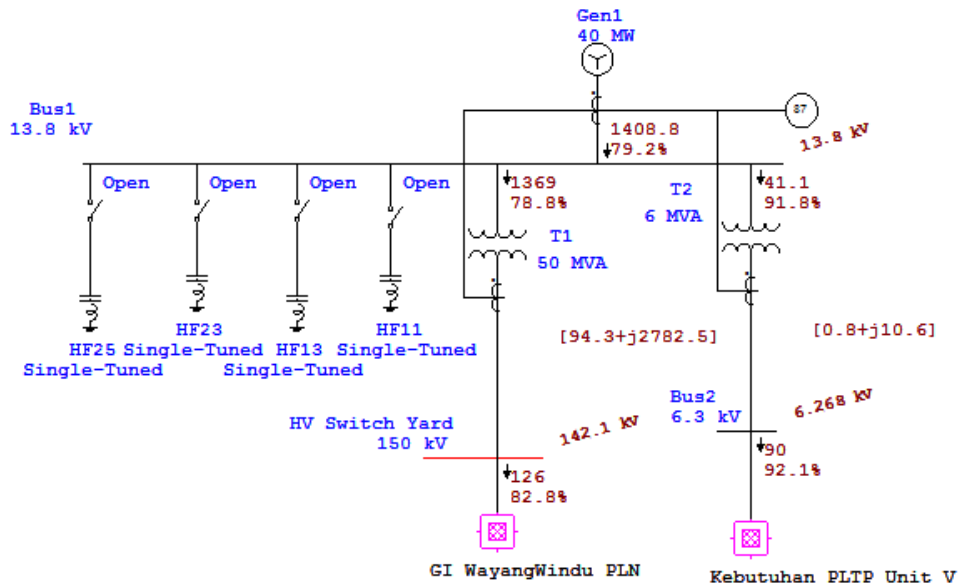


(sumber :Ardian, 2007)

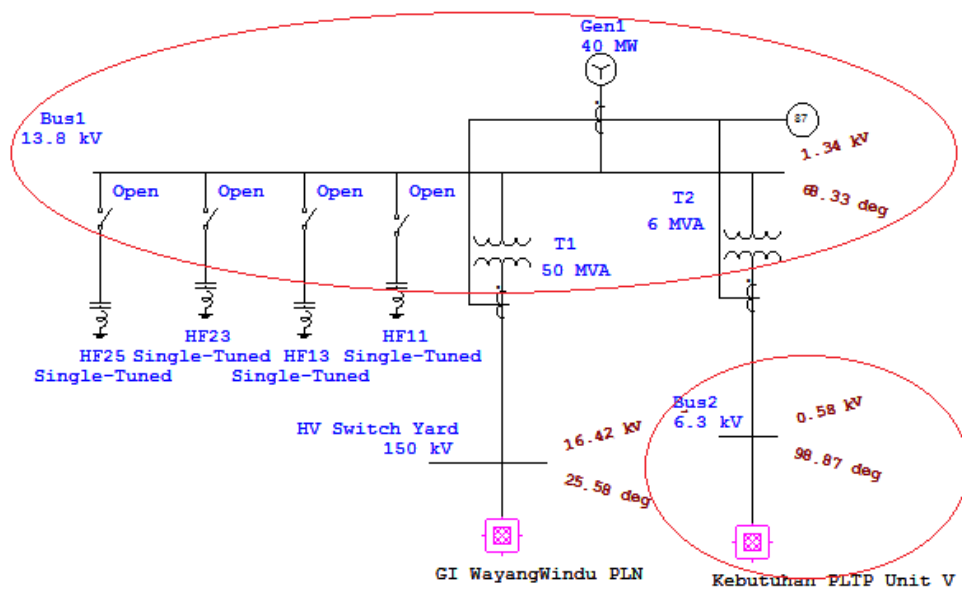
Gambar 4.11. *Flow Chart* simulasi desain filter

4.6.1. Simulasi Analisis Harmonik Pada Saluran Transmisi 150 kV di Pembangkit Tenaga Listrik Panas Bumi (PLTP) Kamojang V pada Software ETAP 12.6.

Berikut ini adalah gambar simulasi *single line diagram* Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V setelah adanya gangguan harmonik.



Gambar 4.12. *Single line diagram* Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V



Gambar 4.13. *Single line diagram* simulasi harmonik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V

Gangguan harmonik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V terjadi pada *Main Transformer* 50 MVA saluran transmisi 150 kV. Bus 1 dan Bus 2 merupakan ruang lingkup dari Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V, sedangkan Bus 3 (HV Switch Yard 150 kV) merupakan ruang lingkup dari Gardu Induk Wayang Windu, Bandung Selatan, PT. PLN (Persero). Pada bus 1 dan bus 2 terlihat pada gambar 4.10. terdapat lingkaran merah yang menandakan adanya nilai tegangan harmonik yang masuk sebesar 1.34 kV dan 0.58 kV. Nilai tegangan tersebut masuk dan terbaca oleh relay differensial (87GT), kemudian relay bekerja untuk memerintahkan *trip* pada CB (*Circuit Breaker*) sehingga Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V berhenti beroperasi. Berhentinya pengoperasian Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V menyebabkan beberapa kerugian pada perusahaan. Berikut ini adalah tabel *losses*, nilai tegangan, arus, faktor daya, THDi dan THDv ketika adanya harmonik.

Tabel 4.9. Data *losses* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang

Unit V

CKT / Branch	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in Vmag
	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From	To	
T1	25.778	20.156	-25.684	-17.374	94.3	2782.5	100.0	94.8	5.24
T2	0.901	0.391	-0.901	-0.380	0.8	10.6	100.0	99.5	0.50
					95.1	2793.1			

(*T 1 = T 21 pada PLTP Kamojang Unit V *T 2 = T 23 pada PLTP Kamojang Unit V)

Tabel 4.10. Data Nilai Tegangan, Arus, Faktor Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Bus	Directly Connected Load										Total Bus Load				
	ID	kV	Rated Amp	Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic		MVA	% PF	Amp	Percent Loading
				MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar				
Bus1		13.800		0	0	0	0	0	0	0	0	33.675	79.2	1408.8	
Bus2		6.300		0	0	0	0	0	0	0	0	0.977	92.1	90.0	
Bus3		150.000		1.305	0.544	24.379	16.830	0	0	0	0	31.008	82.8	126.0	
Bus4		6.300		0.901	0.380	0	0	0	0	0	0	0.977	92.1	90.0	
HV Switch Yard		150.000		0	0	0	0	0	0	0	0	31.008	82.8	126.0	

* Indicates operating load of a bus exceeds the bus critical limit (100.0% of the Continuous Ampere rating).

Indicates operating load of a bus exceeds the bus marginal limit (95.0% of the Continuous Ampere rating).

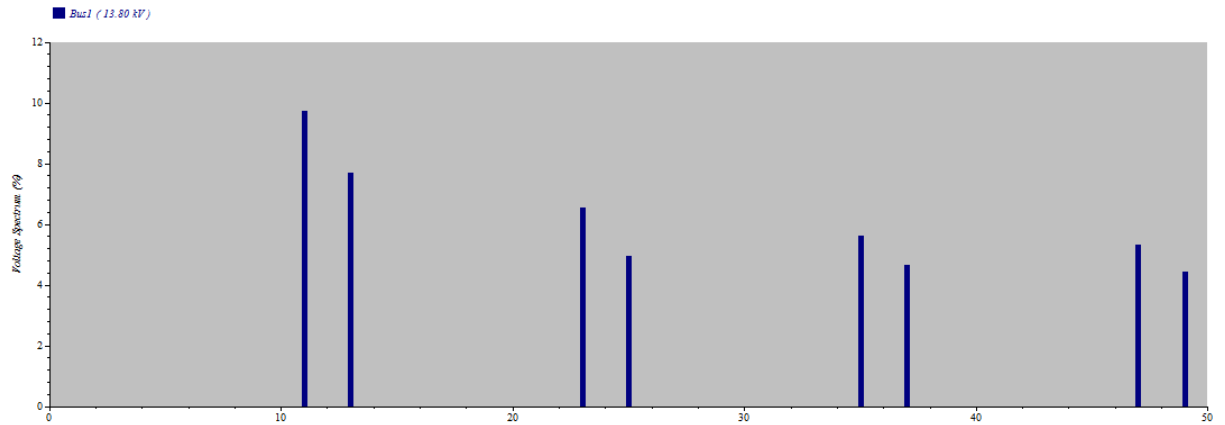
Tabel 4.11. Data THDi pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Bus	Voltage Distortion				
	ID	kV	Fund. %	VIHD %	Order
Bus2		6.300	99.50	9.25	11.00
Bus3		150.000	94.76	11.55	11.00
Bus4		6.300	99.50	9.25	11.00
HV Switch Yard		150.000	94.76	11.55	11.00
Bus1		13.800	100.00	9.74	11.00
Bus2		6.300	99.50	7.31	13.00
Bus3		150.000	94.76	10.51	13.00
Bus4		6.300	99.50	7.31	13.00
HV Switch Yard		150.000	94.76	10.51	13.00
Bus1		13.800	100.00	7.70	13.00
Bus2		6.300	99.50	6.23	23.00
Bus3		150.000	94.76	6.28	23.00
Bus4		6.300	99.50	6.23	23.00
HV Switch Yard		150.000	94.76	6.28	23.00
Bus1		13.800	100.00	6.56	23.00
Bus2		6.300	99.50	4.70	25.00
Bus3		150.000	94.76	5.49	25.00
Bus4		6.300	99.50	4.70	25.00
HV Switch Yard		150.000	94.76	5.49	25.00
Bus1		13.800	100.00	4.95	25.00

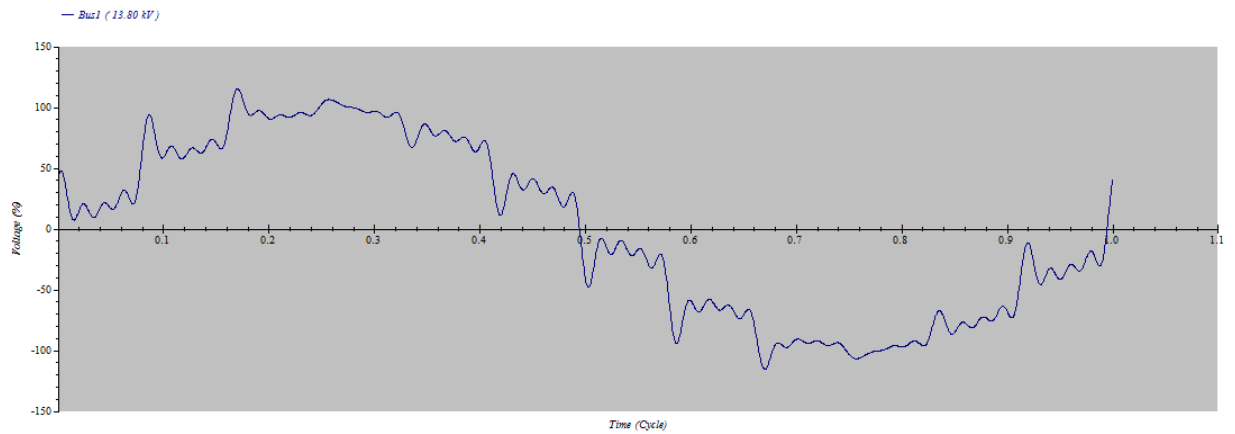
Tabel 4.12. Data THDv pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang
Unit V

Bus	Voltage Distortion			
	ID	kV	Fund. %	VTHD %
Bus1		13.800	100.00	17.95
Bus2		6.300	99.50	17.05
Bus3		150.000	94.76	19.02
Bus4		6.300	99.50	17.05
HV Switch Yard		150.000	94.76	19.02

Indicates buses with THD (Total Harmonic Distortion) exceeding the limit



Gambar 4.14. Spektrum harmonik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V



Gambar 4.15. Gelombang harmonik pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V

Dari data tabel di atas diketahui sumber harmonik terdapat pada bus 1 yaitu pada *Main Transformer* T 21 dengan daya = 33,675 kW, arus = 1408.8 A, faktor daya = 0.788, THD_v = 17.95%, THD_i = 9.74% dan harmonik pada orde = 11. Hasil gambar spectrum dan gambar gelombang diketahui bahwa *Main Transformer* T 21 terdapat *triplen harmonic*. *Triplen harmonic* merupakan kelipatan ganjil dari harmonik ketiga ($h = 3, 9, 11, 15, 21, \dots$). *Triplen harmonic* biasanya terdapat pada trafo hubungan Y- Δ (*Star – Delta*).

4.6.2. Perancangan *Single Tuned Filter* pada Saluran Transmisi 150 kV di Pembangkit Tenaga Listrik Panas Bumi (PLTP) Kamojang V pada *Software* ETAP 12.6.

Single tuned filter bertujuan untuk meredam harmonik dan digunakan untuk memperbaiki faktor daya karena adanya komponen kapasitor. Pada perancangan *single tuned filter* diperlukan identifikasi terhadap orde harmonik yang akan direduksi. Nilai harmonik dengan tegangan terbesar digunakan untuk menentukan harmonik dari orde berapa yang akan difilter. Fungsi filter pasif secara sederhana dapat dikatakan sebagai jalan yang harus dilewati harmonisa sehingga harmonisa tidak sampai lewat pada sistem dan beban lain yang mengganggu sistem. Sedangkan filter aktif dibentuk dari peralatan elektronika daya yang lebih mahal daripada filter pasif. Filter pasif dibentuk dari kapasitor, inductor dan resistor. *Single tuned filter* digunakan untuk mereduksi tegangan yang masuk pada sistem jaringan 150 kV yang disebabkan oleh *triplen harmonic* pada *Main Transformer* 21.

Setelah melakukan identifikasi maka langkah selanjutnya adalah menentukan nilai daya reaktif yang dibutuhkan untuk memperbaiki faktor daya, menentukan nilai kapasitansi kapasitor, menentukan raktor filter dan menentukan nilai resistor. Berikut ini adalah contoh perhitungan nilai komponen *single tuned filter* pada bus 1 (*Main Transfomer* 21) orde 11, 13, 23, 25.

a. Daya reaktif untuk memperbaiki faktor daya :

$$P = 33,675 \text{ kW}$$

$$\theta_1 = \text{Arc cos } 0.79$$

$$= 37.81^\circ$$

$$\theta_2 = \text{Arc cos } 0.98$$

$$= 11.47^\circ$$

$$Q_c = P (\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$= 33,675 \text{ kW} (\tan 37.81^\circ - \tan 11.47^\circ)$$

$$= 16,837.5 \text{ kVAr}$$

b. Nilai Kapasitor :

Frekuensi dasar yang digunakan disesuaikan dengan frekuensi orde harmonik.

$$Q_c = \frac{V^2}{X_c}$$

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c}$$

$$= \frac{13.8 \text{ kV}^2}{16837.5 \text{ kVAr}}$$

$$= 11.31 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{\omega c}$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c}$$

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

Orde 11 :

$$C = \frac{1}{(2)(3.14)(550)(11.31)}$$

$$= 2.56 \times 10^{-5} \text{ F}$$

Orde 13 :

$$C = \frac{1}{(2)(3.14)(650)(11.31)}$$

$$= 2.16 \times 10^{-5} \text{ F}$$

Orde 23 :

$$C = \frac{1}{(2)(3.14)(1150)(11.31)}$$

$$= 1.22 \times 10^{-5} \text{ F}$$

Orde 25 :

$$C = \frac{1}{(2)(3.14)(1250)(11.31)}$$

$$= 1.12 \times 10^{-5} \text{ F}$$

c. Nilai Induktor :

Orde yang akan diredam adalah orde 11, 13, 23, 25 sehingga dipilih frekuensi *tuning* sebesar 50 Hz .

$$L = \frac{1}{(c)(\omega n)^2}$$

$$L = \frac{1}{(c)(2\pi f n)^2}$$

Orde 11 :

$$L_{11} = \frac{1}{(2.56 \times 10^{-5})(2 \times 3.14 \times 550 \times 11)^2}$$

$$L_{11} = 2.7 \times 10^{-5} \text{ H}$$

$$X_{L11} = 2\pi f L$$

$$= (2)(3.14)(550)(2.7 \times 10^{-5})$$

$$= 0.093 \Omega$$

Orde 13 :

$$L_{13} = \frac{1}{(2.16 \times 10^{-5})(2 \times 3.14 \times 650 \times 13)^2}$$

$$L_{13} = 2.3 \times 10^{-5} \text{ H}$$

$$X_{L13} = 2\pi f L$$

$$= (2)(3.14)(650)(2.3 \times 10^{-5})$$

$$= 0.093 \Omega$$

Orde 23 :

$$L_{23} = \frac{1}{(1.22 \times 10^{-5})(2 \times 3.14 \times 1150 \times 23)^2}$$

$$L_{23} = 1.3 \times 10^{-5} \text{ H}$$

$$X_{L23} = 2\pi f L$$

$$= (2)(3.14)(1150)(1.3 \times 10^{-5})$$

$$= 0.093 \Omega$$

Orde 25 :

$$L_{25} = \frac{1}{(1.12 \times 10^{-5})(2 \times 3.14 \times 1250 \times 25)^2}$$

$$L_{25} = 1.19 \times 10^{-5} \text{ H}$$

$$X_{L25} = 2\pi fL$$

$$= (2)(3.14)(50)(1.19 \times 10^{-5})$$

$$= 0.093 \Omega$$

d. Nilai Resistor :

Faktor kualitas filter (Q) jenis *single tuned filter* mempunyai nilai diantara 30 sampai 60 dan dipilih Q = 40

$$Q = \frac{n \cdot X_L}{R}$$

$$R = \frac{n \cdot X_L}{Q}$$

Orde 11 :

$$R_{11} = \frac{11 \times 0.093 \Omega}{40}$$

$$= 0.0255 \Omega$$

Orde 13 :

$$R_{13} = \frac{13 \times 0.093 \Omega}{40}$$

$$= 0.03 \Omega$$

Orde 23 :

$$R_{23} = \frac{23 \times 0.093 \Omega}{40}$$

$$= 0.053 \Omega$$

Orde 25 :

$$R_{25} = \frac{25 \times 0.093 \Omega}{40}$$

$$= 0.058 \Omega$$

Dari perhitungan rangkaian *single tuned filter* (R, L, C) di atas hanya mencapai harmonik orde 25, ini dikarenakan orde tinggi (sekitar orde 25-50) harmoniknya sangat kecil dan hanya dapat menginterferensi peralatan elektronik berdaya rendah sehingga kehadirannya dapat diabaikan dalam sistem tenaga listrik.

Tabel 4.13. Data *input* filter Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V pada *software* ETAP 12.6

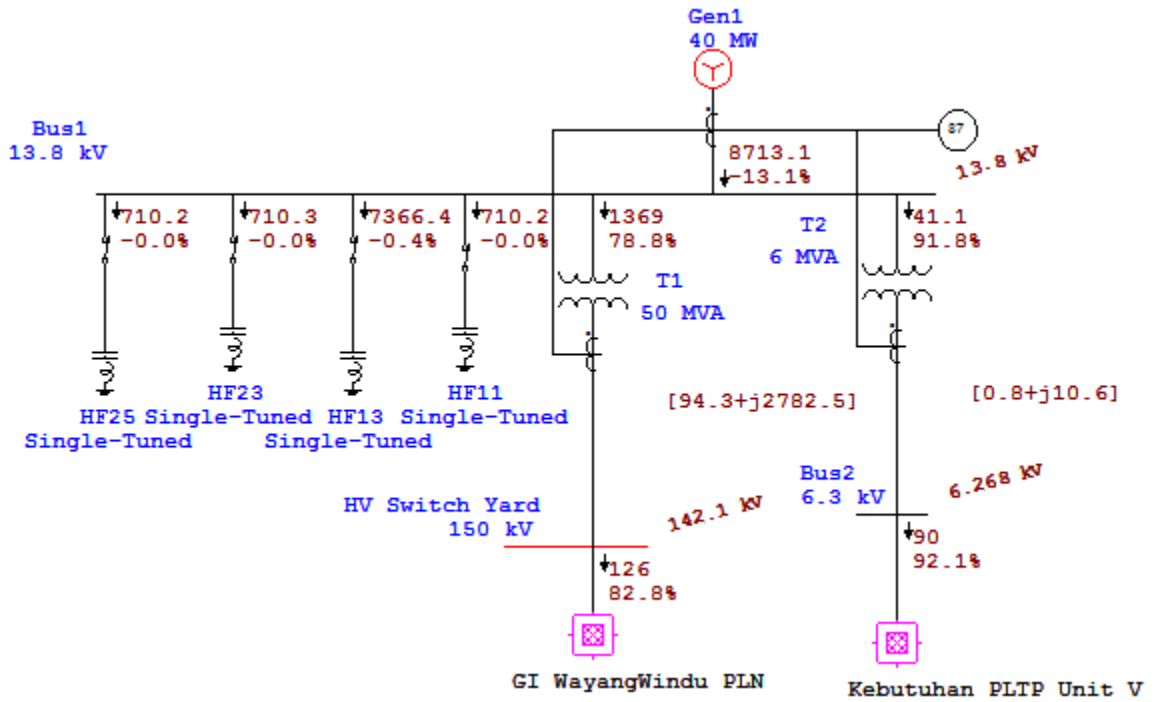
Filter Type: Single-Tuned

Filter ID	Connected Bus ID	Capacitor C1			Inductor L1			R
		kV	Max kV	kvar	Xl	Q Fact.	Max I	Ohm
HF25	Bus1	13.800	0.000	16837.0	0.093	40.00	0.0	0.0005
HF23	Bus1	13.800	0.000	16838.0	0.093	40.00	0.0	0.0006
HF13	Bus1	13.800	0.000	168375.00	0.0495000	40.00	0.0	0.0030
HF11	Bus1	13.800	0.000	16837.0	0.093	40.00	0.0	0.0025

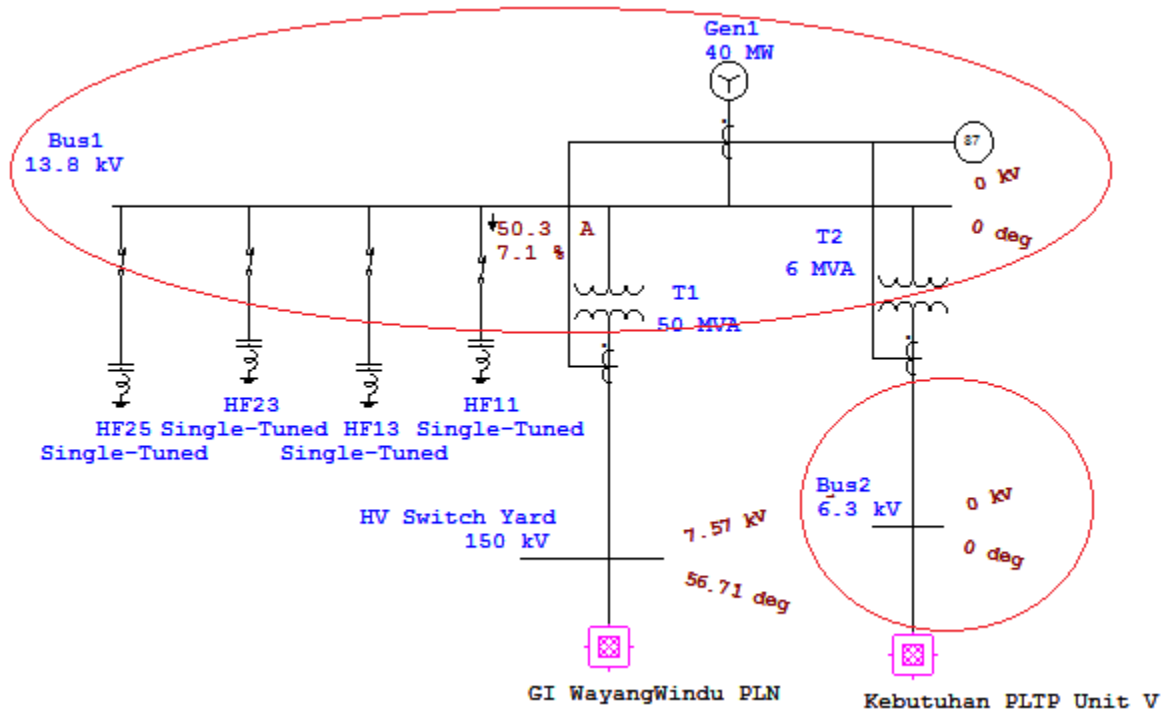
Pemasangan *single tuned filter* dipasang dekat dengan sumber harmonik yaitu pada bus 1 (*Main Transformer 21*) atau pada bus yang memiliki nilai distorsi harmonik THD_v paling tinggi, hal ini diharapkan agar mampu meredam harmonik yang timbul, sehingga nilai distorsi harmonik berada pada standarnya. THD (*Total Harmonic Distortion*) merupakan parameter harmonisa yang didefinisikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya (komponen dapat berupa tegangan atau arus) secara umum digunakan indeks harmonisanya yaitu :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_{h^2}}}{V_1} \text{ atau } THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h^2}}}{I_1}$$

Berikut ini adalah hasil pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V.



Gambar 4.16. *Single line diagram* setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V



Gambar 4.17. *Single line diagram* simulasi harmonik setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V

Pada bus 1 dan bus 2 terlihat pada gambar 4.11. terdapat lingkaran merah yang menandakan adanya nilai tegangan harmonik yang masuk sebesar 1.34 kV dan 0.58 kV (sebelum pemasangan *single tuned filter*). Setelah adanya pemasangan *single tuned filter* pada bus 1, maka tegangan bus 1 (1.34 kV) dan bus 2 (0.58 kV) berubah menjadi 0 kV. Hilangnya kedua nilai tegangan pada bus 1 dan bus 2 tersebut membawa dampak positif, ini membuktikan bahwa *single tuned filter* berhasil mereduksi tegangan harmonik. Relay differensial (87 GT) tidak perlu bekerja untuk memerintahkan *trip* pada CB (*Circuit Breaker*) dikarenakan kondisi pada bus 1 dan bus 2 normal ketika terdapat *triplen harmonic* sehingga Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V dapat beroperasi dengan baik. . Berikut ini adalah tabel *losses*, nilai tegangan, arus, faktor daya, THDi dan THDv setelah pemasangan *single tuned filter*.

Tabel 4.14. Data *losses* setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

CKT / Branch	From-To Bus Flow		To-From Bus Flow		Losses		% Bus Voltage		Vd % Drop in V mag	
	ID	MW	Mvar	MW	Mvar	kW	kvar	From		To
T1		25.778	20.156	-25.684	-17.374	94.3	2782.5	100.0	94.8	5.24
T2		0.901	0.391	-0.901	-0.380	0.8	10.6	100.0	99.5	0.50
						95.1	2793.1			

(*T 1 = T 21 pada PLTP Kamojang Unit V *T 2 = T 23 pada PLTP Kamojang Unit V)

Tabel 4.15. Data Nilai Tegangan, Arus, Faktor Daya setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Bus	ID	kV	Rated Amp	Directly Connected Load						Total Bus Load			Percent Loading	
				Constant kVA		Constant Z		Constant I		Generic		MVA		% PF
Bus1		13.800		0	0	0.706	-227.003	0	0	0	0	228.649	12.0	9566.0
Bus2		6.300		0	0	0	0	0	0	0	0	0.977	92.1	90.0
Bus3		150.000		1.305	0.544	24.379	16.830	0	0	0	0	31.008	82.8	126.0
Bus4		6.300		0.901	0.380	0	0	0	0	0	0	0.977	92.1	90.0
HV Switch Yard		150.000		0	0	0	0	0	0	0	0	31.008	82.8	126.0

* Indicates operating load of a bus exceeds the bus critical limit (100.0% of the Continuous Ampere rating).

Indicates operating load of a bus exceeds the bus marginal limit (95.0% of the Continuous Ampere rating).

Tabel 4.16. Data THDi setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Bus		Voltage Distortion		
ID	kV	Fund. %	VIHD %	Order
Bus3	150.000	94.76	5.33	11.00
HV Switch Yard	150.000	94.76	5.33	11.00
Bus3	150.000	94.76	5.21	13.00
HV Switch Yard	150.000	94.76	5.21	13.00
Bus3	150.000	94.76	3.57	23.00
HV Switch Yard	150.000	94.76	3.57	23.00
Bus3	150.000	94.76	3.24	25.00
HV Switch Yard	150.000	94.76	3.24	25.00

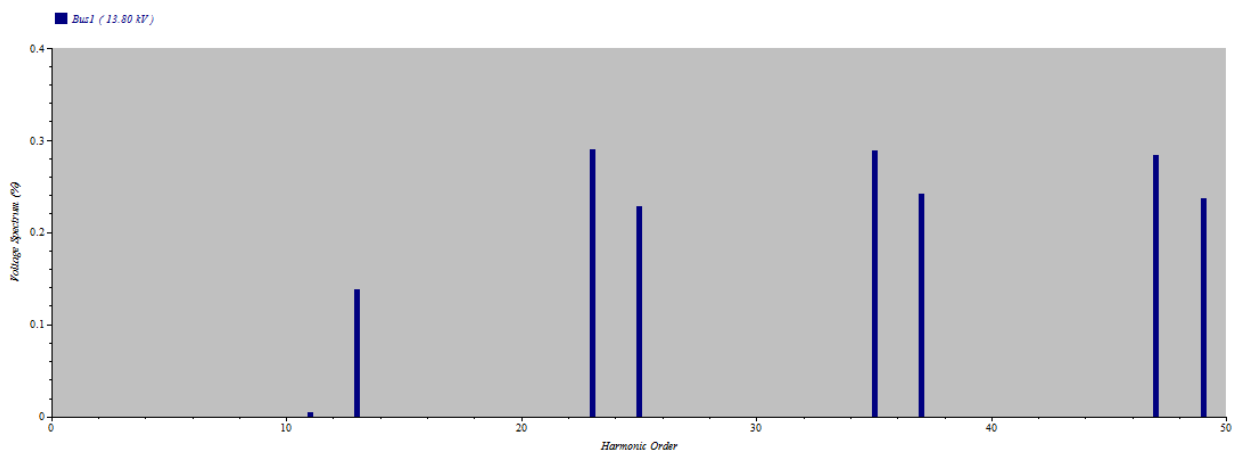
Tabel 4.17. Data THDv setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V

Bus		Voltage Distortion	
ID	kV	Fund. %	VTHD %
Bus3	150.000	94.76	9.83
HV Switch Yard	150.000	94.76	9.83

Indicates buses with THD (Total Harmonic Distortion) exceeding the limit

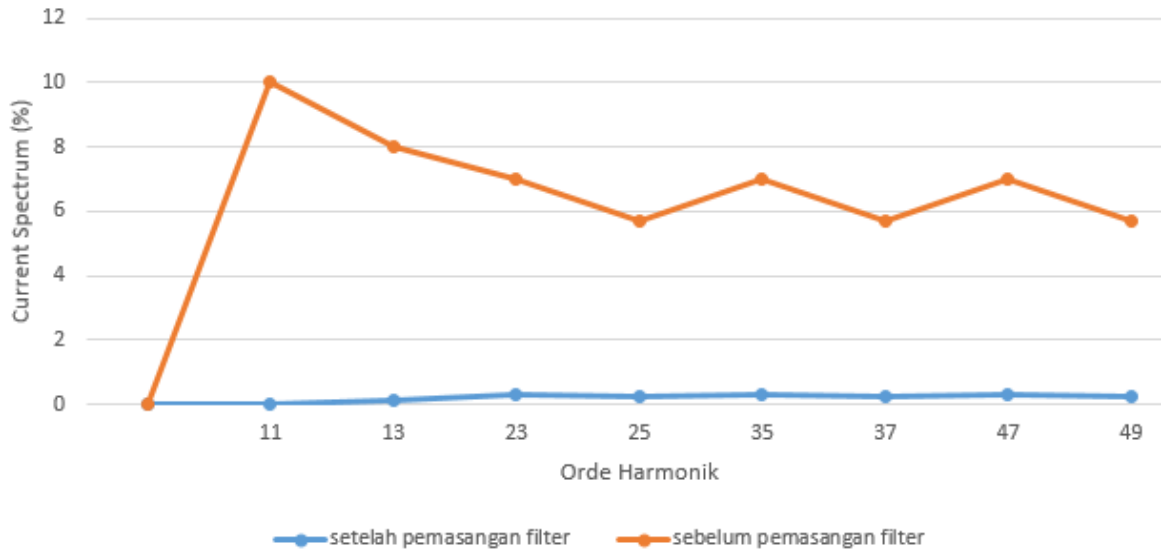
Batasan standar harmonik pada sistem tenaga listrik berdasarkan IEC 61000-3-4 dan IEC 61000-3-6. Bahwa harmonik pada orde 11, 13, 23, 25 memiliki batasan THDi sebesar 3.1 %, 2%, 0.9%, 0.8% dan THDv 3.5%, 3%, 1.5%, 1.5%. Nilai THDi dan THDv yang diperoleh setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V sebesar 0% Nilai THDi dan THDv sebesar 0% menandakan bahwa nilai arus harmonik pada sistem tenaga listrik sudah hilang sedangkan nilai THDi dan THDv pada bus 3 dan HV switch yard masih tergolong besar, ini dikarenakan pada bus 3 dan HV switch yard sudah berada di luar area Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang Unit V PT. Pertamina Geothermal Energy. Bus 3

dan HV switch yard merupakan area yang dimiliki oleh GI Wayang Windu, Bandung Selatan PT. PLN (Persero).. Untuk nilai *losses* dan faktor daya yang tidak berubah setelah pemasangan *single tuned filter* ini dikarenakan faktor nilai kapasitor yang terdapat pada filter tergolong kecil, sehingga tidak mempengaruhi dalam perbaikan *losses* dan faktor daya.



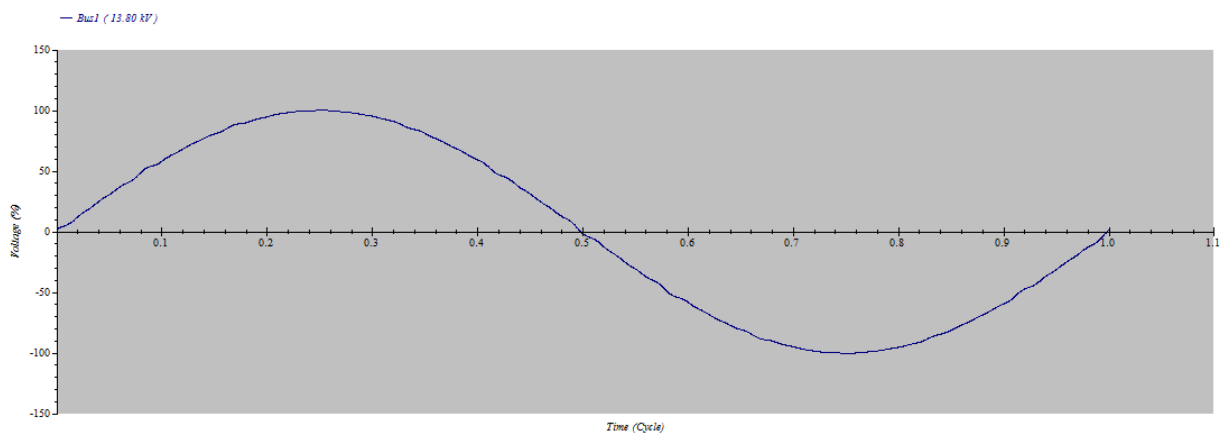
Gambar 4.18. Spektrum harmonik setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V

Spektrum harmonik pada gambar 4.18. pada titik orde 11 masih tergolong kecil dikarenakan pada jaringan GI Wayang Windu, Bandung Selatan masih terdapat harmonik, ini mempengaruhi jaringan sistem transmisi 150 kV di PLTP Kamojang Unit V ketika sambaran petir tersebut terjadi di wilayah GI Wayang Windu. Namun, Sambaran Petir tersebut sudah tidak terpengaruh terhadap sistem jaringan 150 kV di PLTP Kamojang Unit V dikarenakan sudah terpasang *single tuned filter*. Berikut ini adalah gambar grafik perbandingan spektrum harmonik sebelum dan setelah pemasangan filter untuk mengetahui keefektifan dari *single tuned filter*.



Gambar 4.19. Grafik perbandingan spektrum harmonik sebelum dan setelah pemasangan filter

Gambar gelombang yang terdapat pada gambar 4.20 menunjukkan bahwa harmonik tidak sepenuhnya tereduksi hingga kembali kebentuk mendekati gelombang sinus normal. *Single tuned filter* hanya mampu mereduksi sebagian harmonik hingga harmonik tersebut berada pada standar harmonisa berdasarkan nilai standar yang dimasukan yang sudah ditetapkan oleh IEEE (Insititute of Electrical and Electronics Engineer), ANSI (American National Satdard Institute) atau IEC (Internasional Electronical Commission).



Gambar 4.20. Gelombang harmonik setelah pemasangan *single tuned filter* pada Pembangkit Listrik Tenga Panas Bumi (PLTP) Kamojang V