

**SKRIPSI**

**SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN  
PENGONTROLAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE*  
(PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA**

**Disusun oleh:**

**MUTMAINNAH TULHADAWIAH**

**D041201092**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2024**

# LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

## SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN PENGONTROLAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA

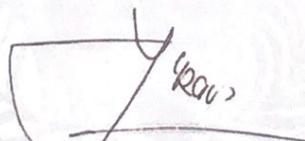
Disusun dan diajukan oleh

**Mutmainnah Tulhadawiah**

**D041201092**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka  
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 20 November 2024  
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.  
NIP. 197504042000121001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ing. Farzal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.  
NIP. 197506052002121004

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Mutmainnah Tulhadawiah

NIM : D041201092

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### **SIMULASI FILTER AKTIF TIGA FASA DENGAN PENGONTROLAN PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIVE (PID) UNTUK REDUKSI HARMONISA**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis, Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kasamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk klarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh dalam proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 November 2024

Yang Menyatakan



Mutmainnah Tulhadawiah

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur tiada henti penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmah dan karunia-Nya. Shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada baginda nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “Simulasi Filter Aktif Tiga Fasa Dengan Pengontrolan Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Reduksi Harmonisa”

Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini terwujud berkat bantuan arahan, bimbingan, dan doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Pua, Mama, saudara dan saudari, serta seluruh keluarga. Terimakasih untuk semua cinta dan kasih sayang yang tiada henti diberikan kepada penulis, untuk semua waktu dan tenaga dalam upaya memenuhi kebutuhan penulis, untuk doa yang tiada henti kiranya diberi kemudahan, untuk harapan yang selalu menjadi motivasi penulis, dan untuk dukungan yang tidak ada nilai tukarnya. Maaf untuk semua salah dan khilaf, untuk semua marah dan kecewa, untuk semua sedih dan khawatir, dan untuk harapan yang belum sesuai. Penulis akan selalu berusaha menjadi kebanggaan Pua dan Mama.
2. Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. selaku pembimbing yang telah meluangkan waktu dalam memberikan bimbingan, arahan, dan dukungan selama proses penelitian hingga proses penyusunan skripsi ini. Semoga ilmu yang telah Bapak berikan dapat menjadi bekal berharga bagi masa depan saya. Saya berharap Bapak selalu diberi kesehatan dan keberkahan setiap saat.
3. Ibu Dr. Ir. Zaenab, M.T. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T selaku dosen penguji atas waktu, perhatian, dan masukan yang sangat berharga selama proses ujian ini. Umpan balik dan masukan yang diberikan yang Ibu dan bapak berikan tidak hanya membantu saya dalam memperbaiki karya ini, tetapi juga memberikan wawasan yang lebih luas dan mendalam. Semoga ilmu yang telah

Ibu dan Bapak berikan senantiasa menjadi amal yang bermanfaat dan semoga segala kebaikan Ibu dan Bapak mendapat balasan yang berlimpah.

4. Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A. Samman, IPU, ACPE, APEC Eng. dan Ibu Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T, M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Univeritas Hasanuddin.
5. Seluruh dosen pengajar, tenaga didik, laboran serta seluruh staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, serta bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
6. Yayasan Beasiswa Karya Salemba Empa atas kesempatan luar biasa untuk menjadi bagian dari beasiswa ini. Dukungan finansial yang sangat membantu serta pengalaman luar biasa dan bertemu dengan orang-orang hebat selama menjadi beswan menjadi salah satu pelajaran berharga yang pastinya sangat bermanfaat dan menjadi motivasi dalam meningkatkan potensi penulis.
7. M. Fajar Taufik yang telah menjadi teman, sahabat, saudara, dan partner yang baik, yang selalu siap direpotkan.terimakasih telah menjadi pendengar yang baik, dan pemberi saran yang bijak. Terimakasih telah menemani dan menenangkan. Apapun yang terjadi kedepannya, semoga hubungan baik terus kebersamai.
8. Sindy, Rani, Fajjah, Isti dan Muli yang telah menjadi tempat adu nasib masalah skripsi, yang selalu memberi motivasi dan dorongan untuk mengerjakan skripsi. Semoga selalu bisa saling menguatkan dan kebersamai. Semoga kita semua sukses dunia dan akhirat.
9. Seluruh teman-teman pengurus PKSE-UNHAS periode 2023-2024 dan seluruh teman-teman beswan KSE Unhas batch 8. Terimakasih telah kebersamai selama menjadi beswan. Terimakasih untuk setiap dukungan dan motivasi yang sangat berarti. Terimakasih telah mewarnai masa perkuliahan.
10. Seluruh teman-teman PROCEZ20R yang telah menjadi teman seperjuangan, memberi banyak pengalaman dan pelajaran yang kemudian penulis jadikan motivasi. Terimakasih untuk suka dan dukanya, untuk setiap proses selama menjadi mahasiswa Teknik Unhas. Terimakasih telah mewarnai masa perkuliahan.

11. Yang terakhir, kepada diri ku sendiri, Mutmainnah Tulhadawiah. Terimakasih untuk tidak menyerah sampai saat ini. Terimakasih telah sabar dalam menghadapi proses dan tidak berhenti bermimpi. Terimakasih telah memilih maju, belajar dan berkembang. Terimakasih sudah melakukan yang terbaik, meski kadang hasilnya belum sesuai harapan. Teruslah percaya bahwa kamu bisa.

Semoga Allah SWT membalas semua pihak yang turut andil dalam penyelesaian skripsi ini. Penulis menyadari skripsi ini masih jauh dari kata sempurna sehingga penulis dengan sangat terbuka menerima kritik dan saran yang membangun untuk memperbaiki skripsi dan penelitian ini kedepannya.

## ABSTRAK

**MUTMAINNAH TULHADAWIAH.** *Simulasi Filter Aktif Tiga Fasa Dengan Pengontrolan Proportional Integral Derivative (PID) Untuk Reduksi Harmonisa (dibimbing oleh Yusran)*

Permintaan akan daya listrik yang efisien terus meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Namun, penggunaan peralatan non-linear seperti konverter daya, motor, dan lampu LED menyebabkan peningkatan harmonisa dalam jaringan listrik, yang dapat menurunkan efisiensi sistem serta merusak peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk membuat pemodelan rangkaian Listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengendali PID untuk reduksi harmonisa, mengetahui bagaimana menentukan parameter-parameter pengendali, serta mengetahui bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengendali PID. Filter aktif dengan topologi inverter sumber tegangan (VSI) digunakan sebagai solusi untuk mengeliminasi harmonisa dengan menghasilkan arus sinusoidal berlawanan fasa. Arus referensi ( $I_{abc-ref}$ ) diperoleh dari teori pq dan dibandingkan dengan arus sumber menggunakan regulator arus linier. Pengendali PID menjaga tegangan DC-link tetap stabil untuk mengkompensasi arus harmonik, dengan parameter tuning menggunakan metode Ziegler-Nichols. Penggunaan filter aktif 3 fasa mampu mereduksi harmonisa tegangan dan arus sumber hingga tidak lagi melewati batas standar juga mampu meningkatkan faktor daya pada sistem. Penggunaan Pengontrolan PID tidak menurunkan THD tegangan maupun arus sumber, hanya meningkatkan faktor daya pada sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa THD tegangan sebelum pemasangan filter aktif adalah 10,43%, 13,95%, dan 11,30%. Setelah pemasangan filter aktif adalah THD tegangan menjadi 4,30%, 2,15%, dan 2,37%. Sedangkan setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrol PID, THD tegangan menjadi 0,35%; 0,55%; dan 0,55%. THD arus sebelum filter aktif adalah 25,15%, 25,76%, dan 27,07%. Setelah pemasangan filter aktif, THD tegangan menjadi 4,67%, 2,19%, dan 2,50%. Sedangkan setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrol PID, THD tegangan menjadi 0,35%; 0,55%; dan 0,55%. Faktor daya sistem meningkat dari 0,866 menjadi 0,954 setelah pemasangan filter aktif.

**Kata Kunci:** Filter aktif, Harmonisa, Pengontrolan PID, THD, Faktor daya

## ABSTRACT

**MUTMAINNAH TULHADAWIAH.** *Simulation of a Three-Phase Active Filter with Proportional Integral Derivative (PID) Control for Harmonic Reduction (supervised by Yusran)*

*The demand for efficient electrical power has steadily increased over the past decades. However, the use of non-linear equipment such as power converters, motors, and LED lights has led to an increase in harmonics within the power grid, which can reduce system efficiency and damage equipment. This study aims to model a three-phase electrical circuit using a three-phase active filter with PID control for harmonic reduction, determine the parameters of the controller, and compare harmonics in systems without active filters, systems using active filters, and systems using active filters with PID controllers. An active filter with a voltage source inverter (VSI) topology is used as a solution to eliminate harmonics by generating sinusoidal currents in opposite phases. The reference current ( $I_{abc-ref}$ ) is obtained from the pq theory and compared with the source current using a linear current regulator. The PID controller stabilizes the DC-link voltage to compensate for harmonic currents, with parameter tuning performed using the Ziegler-Nichols method. The use of a three-phase active filter effectively reduces voltage and current harmonics to within standard limits and improves the system's power factor. However, the PID control does not reduce the Total Harmonic Distortion (THD) of voltage or current but only enhances the power factor. Simulation results indicate that the voltage THD before installing the active filter was 10.43%, 13.95%, and 11.30%. After installing the active filter, the voltage THD was reduced to 4.30%, 2.15%, and 2.37%. When the active filter was equipped with PID control, the voltage THD further decreased to 0.35%, 0.55%, and 0.55%. The current THD before the active filter was 25.15%, 25.76%, and 27.07%. After installing the active filter, the current THD was reduced to 4.67%, 2.19%, and 2.50%. When the active filter was equipped with PID control, the current THD reached 0.35%, 0.55%, and 0.55%. The system's power factor improved from 0.866 to 0.954 after installing the active filter.*

**Keywords:** *Active filter, Harmonics, PID Control, THD, Power factor*

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>VIII</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>X</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>XII</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Harmonisa Sistem Tenaga Listrik .....	6
2.2.1 Sumber-sumber harmonisa.....	7
2.2.2 Indeks harmonik umum.....	9
2.2.3 Standar harmonisa .....	11
2.2.4 Pengaruh harmonisa pada sistem .....	15
2.3 Filter Aktif Sebagai Filter Harmonisa .....	16
2.3.1 Teori PQ .....	20
2.4 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID).....	22
2.5 Matlab <i>Simulink</i> .....	29
2.6 Penelitian Terkait yang Terdahulu.....	30
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>34</b>
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	34
3.2 Alat dan Bahan .....	34
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.4 Teknik Pengumpulan Data .....	36
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Pemodelan Sistem Rangkaian 3 Fasa dengan Beban Non-Linear .....	37
4.2 Pemodelan Rangkaian Filter Aktif 3 Fasa.....	39
4.3 Pemodelan Pengontrolan PID .....	46
4.4 Parameter Penyusun Rangkaian Simulasi .....	49
4.5 Hasil Simulasi .....	49
4.5.1 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear .....	49
4.5.2 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa.....	58

4.5.3 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID.....	67
4.6 Perbandingan Hasil Simulasi .....	78
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>89</b>
5.1 Kesimpulan .....	89
5.2 Saran.....	90
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>91</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>93</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem 3 fasa.....	5
Gambar 2 Distorsi arus akibat beban nonlinear .....	7
Gambar 3 Filter aktif (a) seri, (b) paralel .....	16
Gambar 4 Rangkaian ekivalen sumber harmonik dan filter aktif .....	16
Gambar 5 Filter aktif <i>low-pass</i> .....	18
Gambar 6 Respon frekuensi filter <i>low-pass</i> .....	18
Gambar 7 Filter aktif <i>high-pass</i> .....	18
Gambar 8 Respon frekuensi filter <i>high-pass</i> .....	19
Gambar 9 Filter aktif <i>band-pass</i> .....	19
Gambar 10 Respon frekuensi filter <i>band-pass</i> .....	19
Gambar 11 Ilustrasi dari transformasi $abc$ to $\alpha\beta$ .....	21
Gambar 12 Respon proses sebagai akibat perubahan <i>setpoint</i> .....	24
Gambar 13 Diagram blok kontrol PID ideal .....	25
Gambar 14 Aksi kontrol PID.....	26
Gambar 15 Diagram blok alternatif kontrol PID .....	26
Gambar 16 Metode respons langkah dan frekuensi Ziegler–Nichols. ....	27
Gambar 17 Aplikasi matlab.....	29
Gambar 18 Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 19 Diagram pemodelan sistem di aplikasi matlab <i>simulink</i> .....	36
Gambar 20 Rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear.....	34
Gambar 21 Rangkaian 3 fasa beban non-linear dengan filter aktif 3 fasa .....	39
Gambar 22 Blok diagram algoritma teori pq .....	41
Gambar 23 <i>Transformasi clark abc to <math>\alpha\beta</math></i> menggunakan matlab <i>simulink</i> .....	42
Gambar 24 Gelombang output <i>transformasi clark abc to <math>\alpha\beta</math></i> menggunakan matlab <i>simulink</i> .....	42
Gambar 25 Perhitungan daya aktif (p) dan daya reaktif (q) menggunakan blok pada matlab <i>simulink</i> .....	44
Gambar 26 Perhitungan arus referensi daya aktif (p) dan daya reaktif (q) menggunakan blok pada matlab <i>simulink</i> .....	45
Gambar 27 <i>Inverse transformasi clark <math>\alpha\beta</math> to abc</i> menggunakan matlab <i>simulink</i> .....	46
Gambar 28 Rangkaian <i>Linier current regulator</i> .....	46
Gambar 29 Diagram blok algoritma pq dengan pengontrolan PID .....	47
Gambar 30 Rangkaian simulasi tuning pengontrolan PID.....	47
Gambar 31 Gelombang keluaran ketika nilai $K_p = 0,043$ .....	48
Gambar 32 Gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear .....	49
Gambar 33 Zoom gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear .....	50
Gambar 34 Spektrum THDv fasa R tanpa filter.....	50
Gambar 35 Spektrum THDv fasa S tanpa filter .....	51
Gambar 36 Spektrum THDv fasa T tanpa filter .....	51
Gambar 37 Spektrum THDi fasa R tanpa filter.....	54

Gambar 38 Spektrum THDi fasa S tanpa filter .....	55
Gambar 39 Spektrum THDi fasa T tanpa filter .....	55
Gambar 40 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	58
Gambar 41 <i>Zoom</i> gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	59
Gambar 42 Gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	59
Gambar 43 <i>Zoom</i> gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	59
Gambar 44 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	60
Gambar 45 Spektrum THDv fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	61
Gambar 46 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	61
Gambar 47 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	64
Gambar 48 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	64
Gambar 49 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa.....	65
Gambar 50 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	68
Gambar 51 <i>Zoom</i> gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	68
Gambar 52 Gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	69
Gambar 53 <i>Zoom</i> gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	69
Gambar 54 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	70
Gambar 55 Spektrum THDv Fasa S Setelah Pemasangan Filter Aktif 3 Fasa Dengan Pengontrolan Pid.....	70
Gambar 56 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	71
Gambar 57 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	74
Gambar 58 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	74
Gambar 59 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	75
Gambar 60 Grafik Perbandingan IHD tegangan (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T...85	
Gambar 61 Grafik Perbandingan IHD arus (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T.....88	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Batas distorsi tegangan harmonik dalam persen dari tegangan frekuensi fundamental nominal .....	11
Tabel 2 Batas arus harmonik .....	12
Tabel 3 Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individu dalam jaringan publik tegangan rendah menurut IEC 61000-2-2 .....	12
Tabel 4 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas A .....	14
Tabel 5 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas C .....	14
Tabel 6 Batas arus harmonik untuk peralatan kelas D .....	14
Tabel 7 Batasan arus harmonik menurut IEC 61000-3-4 .....	15
Tabel 8 Pengaruh tuning salah satu parameter PID terhadap unjuk kerja proses ..	24
Tabel 9 Aturan penyetelan Ziegler–Nichols .....	28
Tabel 10 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan .....	32
Tabel 11 Nilai $K_p$ , $T_i$ , dan $T_d$ dengan metode tuning Ziegler-Nichols .....	48
Tabel 12 Parameter penyusun rangkaian simulasi .....	49
Tabel 13 THD tegangan sumber tanpa filter aktif .....	52
Tabel 14 THD arus sumber tanpa filter aktif .....	56
Tabel 15 Hasil pengukuran rangkaian tanpa filter aktif .....	58
Tabel 16 THD tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	62
Tabel 17 THD arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	65
Tabel 18 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif 3 fasa .....	67
Tabel 19 THD tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	71
Tabel 20 THD arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID .....	75
Tabel 21 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrolan PID .....	77
Tabel 22 <i>Voltage distortion limits</i> .....	78
Tabel 23 <i>Current distortion limits for system 120 V through 69 kV</i> .....	78
Tabel 24 Perbandingan THD hasil simulasi .....	79
Tabel 25 Perbandingan IHD hasil simulasi .....	80

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kualitas sistem tenaga listrik merujuk pada kemampuan sistem untuk menyediakan daya yang andal, stabil, dan efisien kepada konsumen. Hal ini mencakup kestabilan frekuensi, tegangan, dan kualitas faktor daya. Namun, perkembangan teknologi dan meningkatnya penggunaan peralatan modern yang bersifat nonlinier seperti konverter daya, motor listrik, dan perangkat berbasis mikroprosesor telah menimbulkan masalah pada kualitas daya, terutama karena munculnya harmonisa.

Harmonisa mengakibatkan distorsi pada bentuk gelombang sinusoidal arus dan tegangan, yang disebabkan oleh beban-beban nonlinier. Dampak dari harmonisa ini meliputi penurunan efisiensi sistem, kerusakan peralatan, penurunan umur peralatan, hingga gangguan pada sistem elektronik sensitif. Distorsi gelombang sinusoidal ini dapat memicu resonansi dalam jaringan listrik, menurunkan efisiensi penyaluran energi, dan mengurangi umur isolasi serta peralatan listrik. Salah satu solusi untuk mengatasi harmonisa adalah dengan memasang filter harmonisa.

Filter harmonisa terbagi menjadi dua jenis, yaitu filter pasif dan filter aktif. Filter pasif biasanya digunakan karena harganya lebih murah, namun memiliki keterbatasan dalam mengatasi frekuensi harmonisa tertentu. Di sisi lain, filter aktif menggunakan teknologi yang lebih canggih dengan kontrol arus atau tegangan yang lebih fleksibel. Filter aktif juga tidak menimbulkan resonansi dan dapat meningkatkan faktor daya sistem.

Dalam konteks ini, metode kontrol PID (Proporsional-Integral-Derivatif) menjadi salah satu solusi yang banyak digunakan untuk mengoptimalkan kinerja filter aktif. Kontrol PID dikenal karena desainnya yang relatif sederhana dan tidak memerlukan banyak sensor. Salah satu kelebihan utama dari kontrol PID adalah kemampuan untuk menjaga modulasi frekuensi *switching* yang konstan, yang pada gilirannya membuat sistem kontrol lebih stabil dan mudah diterapkan. Dengan pengaturan yang tepat, kontrol PID dapat membantu filter aktif merespons

harmonisa yang fluktuatif dan mengurangi dampaknya terhadap sistem tenaga listrik.

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan filter aktif tiga fase yang dikendalikan dengan metode kontrol PID menggunakan MATLAB *Simulink*. Simulasi ini dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas filter aktif dalam mengatasi harmonisa yang disebabkan oleh beban nonlinier pada jaringan listrik. Dengan menggunakan kontrol PID, diharapkan filter aktif dapat berfungsi lebih optimal dalam mengurangi distorsi harmonisa, meningkatkan efisiensi sistem, serta memperpanjang umur peralatan listrik. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan efektif dalam menjaga kualitas daya pada sistem tenaga listrik, khususnya dalam menghadapi tantangan harmonisa yang semakin kompleks akibat perkembangan teknologi dan penggunaan peralatan modern yang lebih canggih.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Sesuai latar belakang yang telah diuraikan di atas, rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pemodelan rangkaian listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID untuk reduksi harmonisa?
2. Bagaimana menentukan parameter-parameter pengontrolan PID dengan metode tuning Zieger-Nichlos?
3. Bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengontrolan PID?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan di atas, tujuan penelitian ini adalah:

1. Membuat pemodelan rangkaian Listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengendali PID untuk reduksi harmonisa.
2. Mengetahui bagaimana menentukan parameter-parameter pengendali PID

3. Mengetahui bagaimana perbandingan harmonisa pada sistem tanpa filter aktif, sistem menggunakan filter aktif, dan sistem menggunakan filter aktif dengan pengendali PID.

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai bahan acuan dalam pengembangan filter aktif 3 fasa dengan sistem pengendali yang sederhana untuk mengatasi permasalahan harmonisa pada sistem tenaga listrik.

#### **1.5 Ruang Lingkup**

Pada penelitian ini melingkupi hal-hal sebagai berikut:

1. Data simulasi diperoleh dari data penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini.
2. Menggunakan konfigurasi parallel atau filter aktif *Shunt*.
3. Beban yang digunakan sebagai sumber arus harmonisa adalah *rectifier* 3 fasa.
4. Menggunakan *inverter* 3 fasa sebagai filter aktif 3 fasa
5. Hanya menggunakan pengontrolan PID.
6. Metode tuning kontrol PID yang digunakan adalah metode Zieger-Nichlos.
7. Pemodelan sistem filter aktif 3 fasa dengan kontrol PID dan simulasinya menggunakan *software* Matlab *Simulink*.

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

##### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini membahas tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup serta sistematika penulisan.

##### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini menguraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian meliputi Sistem tenaga Listrik, Harmonisa, filter aktif, pengontrolan PID serta *Software* Matlab *Simulink*.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini berisi tentang waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, diagram alir penelitian, rancangan sistem serta Teknik pengumpulan data.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini membahas mengenai hasil pemodelan sistem dan hasil simulasi sistem menggunakan Matlab *Simulink* serta Analisa perbandingan tiap simulasi yang dilakukan.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

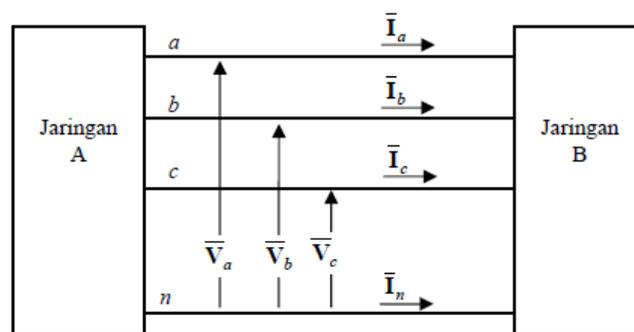
Bab ini memuat simpulan dari penelitian yang telah dilakukan dan saran-saran yang dapat digunakan sebagai acuan untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sebuah sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai berikut: Sebuah sistem tenaga listrik adalah jaringan dari komponen-komponen yang saling terhubung yang dirancang untuk secara kontinu mengubah energi non-elektrik menjadi bentuk listrik; mengangkut energi listrik melalui jarak yang mungkin jauh; mengubah energi listrik menjadi bentuk tertentu yang tunduk pada toleransi yang ketat; dan mengubah energi listrik menjadi bentuk non-elektrik yang dapat digunakan. (Sudirman, 2012)

Agar dapat diimplementasikan, sistem ini harus aman, dapat diandalkan, ekonomis, ramah lingkungan, dan secara sosial dapat diterima. Sistem tenaga dapat dipandang terdiri dari beberapa subsistem, yaitu: Pembangkit, Saluran Transmisi, Saluran Distribusi, dan Beban. Tujuan dibangunnya suatu sistem tenaga adalah untuk mencatu energi ke beban yang berupa peralatan-peralatan yang mengubah energi listrik menjadi bentuk energi yang sesuai dengan kebutuhan pengguna. Jenis peralatan sangat beragam, ada yang statis, ada yang berputar, ada pula yang merupakan gabungan statis dan berputar.



Gambar 1 Sistem 3 fasa  
Sumber: Sudirman, 2012

Sistem tiga-fasa adalah sistem multifasa yang paling sederhana dapat dilihat pada Gambar. 1. Dengan urutan positif abc, tegangan-tegangan fasa adalah:

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_{an} &= \bar{V}_a = V_f \angle 0^\circ \\
 \bar{V}_{bn} &= \bar{V}_b = V_f \angle -120^\circ \\
 \bar{V}_{cn} &= \bar{V}_c = V_f \angle -240^\circ = \bar{V}_{cn} = \bar{V}_c = V_f \angle +120^\circ
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Tegangan fasa-fasa adalah:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{ab} &= \bar{V}_a - \bar{V}_b = V_f \sqrt{3} \angle 30^\circ \\ \bar{V}_{bc} &= \bar{V}_b - \bar{V}_c = V_f \sqrt{3} \angle -90^\circ \\ \bar{V}_{ca} &= \bar{V}_c - \bar{V}_a = V_f \sqrt{3} \angle 150^\circ\end{aligned}\quad (2)$$

Dalam sistem tiga-fasa seimbang, besar tegangan adalah sama di semua fasa dan antar fasa yang berurutan terdapat beda fasa  $120^\circ$ . Demikian pula halnya dengan arus; keadaan ini membuat arus di penghantar netral bernilai nol. Tidak demikian dengan keadaan tak seimbang; tegangan dan arus setiap fasa tidak sama dan beda fasa antar tegangan fasa-netral tidak  $120^\circ$ . (Sudirman, 2012)

## 2.2 Harmonisa Sistem Tenaga Listrik

Istilah "harmonisa" berasal dari bidang akustik, di mana ia terkait dengan getaran sebuah senar atau kolom udara pada frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar. Komponen harmonik dalam sistem daya AC didefinisikan sebagai komponen sinusoidal dari gelombang periodik yang memiliki frekuensi sama dengan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar sistem. Harmonisa dalam gelombang tegangan atau arus kemudian dapat dipahami sebagai komponen sinusoidal yang sempurna dengan frekuensi yang merupakan kelipatan dari frekuensi dasar:

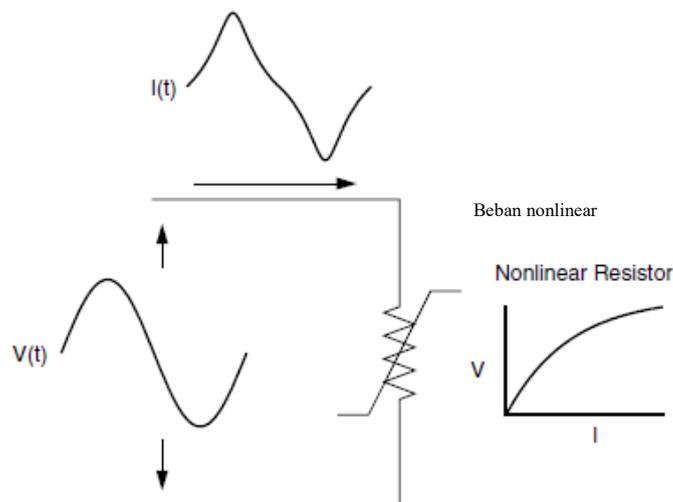
$$f_h = h \times \text{Frekuensi dasar (fundamental frequency)} \quad (3)$$

Dimana  $h$  adalah bilangan bulat. (Rosa, 2006)

Harmonisa dalam sistem tenaga didefinisikan sebagai tegangan dan arus sinusoidal pada frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi utama yang dihasilkan. Mereka merupakan komponen distorsi utama dari bentuk gelombang tegangan jaringan dan arus beban (Arrillaga & Watson, 2003). Sistem tenaga dirancang untuk beroperasi pada frekuensi 50 atau 60 Hz. Namun, jenis beban tertentu menghasilkan arus dan tegangan dengan frekuensi yang merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi fundamental 50 atau 60 Hz. Frekuensi yang lebih tinggi ini merupakan bentuk polusi listrik yang dikenal sebagai harmonisa sistem tenaga. (Grady, 2012)

### 2.2.1 Sumber-sumber harmonisa

Distorsi harmonik disebabkan oleh perangkat non-linear dalam sistem tenaga. Sebuah perangkat non-linear adalah salah satu di mana arus tidak berbanding lurus dengan tegangan yang diterapkan. Gambar 2 menggambarkan konsep ini dengan kasus tegangan sinusoidal yang diterapkan pada resistor non-linear sederhana di mana tegangan dan arus bervariasi sesuai dengan kurva yang ditunjukkan. Sementara tegangan yang diterapkan adalah sempurna sinusoidal, arus yang dihasilkan terdistorsi. Meningkatkan tegangan beberapa persen dapat menyebabkan arus menjadi dua kali lipat dan mengambil bentuk gelombang yang berbeda. Ini adalah sumber distorsi harmonik utama dalam sebuah sistem tenaga. (Dugan et al., 2002)



Gambar 2 Distorsi arus akibat beban nonlinear  
Sumber: Dugan et al

Beban non-linear adalah bentuk gelombang keluarannya tidak sebanding dengan tegangan dalam setengah siklus sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi). Hal ini disebabkan karena adanya komponen semikonduktor yang mana dalam proses kerjanya berlaku sebagai saklar yang bekerja pada setiap siklus gelombang dari sumber tegangan. Selain itu harmonisa dapat juga ditimbulkan oleh peralatan penyearah khususnya peralatan yang menggunakan penyearah dioda dan thyristor. Dalam pemakaian konverter sebagai sumber daya listrik dapat membawa suatu kerugian pada jaringan listrik yang merusak bentuk gelombang tegangan dan

arus bolak-balik sehingga tidak merupakan gelombang sinus murni. (Aini & Mar'i, 2021)

Beban non-linear adalah beban di mana gelombang arus tidak menyerupai gelombang tegangan yang diterapkan karena sejumlah alasan, misalnya, penggunaan sakelar elektronik yang menghantarkan arus beban hanya selama sebagian dari periode frekuensi daya. Oleh karena itu, kita dapat menganggap beban non-linear sebagai beban di mana Hukum Ohm tidak dapat menjelaskan hubungan antara  $V$  dan  $I$ . Di antara beban non-linear yang paling umum dalam sistem tenaga adalah semua jenis perangkat penyearah seperti yang ditemukan dalam konverter daya, sumber daya, unit pasokan daya tak terputus (UPS), dan perangkat busur seperti tungku listrik dan lampu neon. (Rosa, 2006). Sumber harmonik dalam sistem tenaga berbentuk. (Grady, 2012) (Scheidiger, 2013) (Dugan, 2002):

- a) Transformator, transformator daya dirancang untuk beroperasi pada atau sedikit melewati bagian bengkok kurva saturasi material inti. Arus magnetisasi yang dihasilkan sedikit berpuncak dan kaya akan harmonik.
- b) Mesin berputar (harmonisa gulungan), mesin beroperasi dengan kerapatan fluks puncak di luar bengkok saturasi. Kecuali diblokir oleh transformasi delta, sebuah generator sinkron tiga fasa akan menghasilkan arus harmonik ketiga sebesar 30%. Ada variasi yang signifikan di antara motor satu fasa dalam jumlah harmonik arus yang mereka hasilkan. Sebagian besar dari mereka memiliki I THD dalam kisaran 10%, didominasi oleh harmonik ke-3.
- c) Perangkat elektronik daya (topologi, modulasi), Peningkatan penggunaan perangkat elektronik daya untuk pengendalian peralatan dan sistem daya telah menjadi alasan meningkatnya kekhawatiran tentang distorsi gelombang belakangan ini. Sebuah konverter elektronik daya dapat dilihat sebagai matriks dari saklar statis yang menyediakan interkoneksi fleksibel antara simpul masukan dan keluaran dari sistem tenaga listrik.

Penggunaan yang semakin meningkat dari pengondisi daya (power conditioners), di mana parameter seperti tegangan dan frekuensi bervariasi untuk beradaptasi dengan proses industri dan komersial tertentu, telah membuat konverter daya menjadi sumber harmonik yang paling umum di sistem distribusi. Pengalihan elektronik membantu dalam proses penyearahan daya AC 50/60 Hz menjadi daya

DC. Dalam aplikasi DC, tegangan dapat diubah dengan menyesuaikan sudut penyalan perangkat switching elektronik. Pada dasarnya, dalam proses penyearahan, arus hanya diizinkan mengalir melalui perangkat semikonduktor selama sebagian kecil siklus frekuensi dasar, sehingga konverter daya sering dianggap sebagai perangkat hemat energi.

Arus beban penyearah gelombang persegi digambarkan oleh deret fourier sebagai himpunan arus harmonik. Dalam kasus penyearah tiga fasa, komponennya adalah harmonik fundamental, dan harmonik ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 (dan seterusnya). Triple-n dieliminasi. Setiap harmonisa arus dianalisis secara independen dalam analisis kualitas daya. Triple-n adalah harmonik dengan angka 3, 9, dan seterusnya. (Alexander & Marc, 2007)

Konverter dapat dikelompokkan ke dalam kategori berikut:

1. Konverter daya besar seperti yang digunakan di industri peleburan logam dan di sistem transmisi HVDC
2. Konverter daya ukuran sedang seperti yang digunakan di industri manufaktur untuk pengendalian kecepatan motor dan di industri perkeretaapian
3. Penyearah daya kecil yang digunakan pada perangkat hiburan rumah tangga, termasuk TV dan komputer pribadi. Pengisi daya baterai adalah contoh lain dari konverter daya kecil

### 2.2.2 Indeks harmonik umum

Dalam menganalisa harmonic terdapat beberapa parameter penting untuk menggambarkan efek harmonik pada komponen sistem tenaga, yaitu *Individual Harmonic Distortion* (IHD) dan *Total harmonic Distortion* (THD). IHD merupakan perbandingan antara nilai arus atau tegangan harmonik orde ke-h terhadap nilai arus atau tegangan fundamental. Nilai IHD untuk harmonik arus dan tegangan pada orde ke-h didefinisikan sebagai berikut:

$$IHD_i = \sqrt{\frac{I_h^2}{I_1^2}} \times 100\% \quad (4)$$

dan

$$IHD_v = \sqrt{\frac{V_h^2}{V_1^2}} \times 100\% \quad (5)$$

dengan:

- IHD = Distorsi harmonisa individu (%)
- $I_h$  = Arus harmonisa pada orde ke- $h$  (A)
- $V_h$  = Tegangan harmonisa pada orde ke- $h$  (V)
- $I_1$  = Arus fundamental (A)
- $V_1$  = Tegangan fundamental (V)

Indeks harmonik yang paling umum, yang berkaitan dengan bentuk gelombang tegangan, adalah Total Harmonic Distortion (THD) merupakan nilai total persentase arus atau tegangan, ini merupakan perbandingan nilai arus atau tegangan komponen harmonisa terhadap nilai arus dan tegangan pada frekuensi fundamental. THD (*Total Harmonic Distortion*), yang didefinisikan sebagai nilai *root mean square* (r.m.s.) dari harmonik yang dinyatakan sebagai persentase dari komponen fundamental, yaitu;

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1} \quad (6)$$

di mana  $V_n$  adalah tegangan r.m.s. tunggal pada frekuensi harmonik  $n$ ,  $N$  adalah urutan harmonik maksimum yang akan dipertimbangkan, dan  $V_1$  adalah tegangan r.m.s. fundamental dari garis ke netral. Untuk sebagian besar aplikasi, sudah cukup untuk mempertimbangkan rentang harmonik dari 2 hingga 25, tetapi kebanyakan standar menentukan hingga 50. (Arrillaga & Watson, 2003) (Aini & Mar'i, 2021)

Tingkat distorsi arus juga dapat dikarakteristikkan oleh nilai THD, tetapi ini bisa menyesatkan ketika arus beban fundamental rendah. Nilai THD yang tinggi untuk arus masukan mungkin tidak menjadi perhatian yang signifikan jika beban ringan, karena magnitudo arus harmoniknya rendah, meskipun distorsi relatifnya terhadap frekuensi fundamental tinggi. Untuk menghindari ambiguitas tersebut, faktor distorsi permintaan total (TDD) digunakan sebagai gantinya, yang didefinisikan sebagai:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_R} \quad (7)$$

Faktor ini mirip dengan THD kecuali bahwa distorsi diungkapkan sebagai persentase dari magnitudo arus beban tertentu yang dinilai atau maksimum, daripada sebagai persentase dari arus fundamental. Karena sistem pasokan listrik dirancang untuk menahan arus beban tertentu yang dinilai atau maksimum, dampak distorsi arus pada sistem akan lebih realistis jika penilaian didasarkan pada nilai-nilai yang dirancang, daripada pada referensi yang berfluktuasi dengan tingkat beban. (Arrillaga & Watson, 2003)

### 2.2.3 Standar harmonisa

Ada berbagai organisasi di tingkat nasional dan internasional yang bekerja sama dengan insinyur, produsen peralatan, dan Lembaga penelitian untuk mengembangkan standar yang mengatur pedoman, praktik yang direkomendasikan, dan batas harmonik. (Dugan et al., 2002)

#### 2.2.3.1 IEEE Standard 519-1992

Berdasarkan IEEE Standard 519-1992, batas standar harmonisa untuk tegangan dan arus dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2;

Tabel 1 Batas distorsi tegangan harmonik dalam persen dari tegangan frekuensi fundamental nominal

<b>Bus voltage at PCC, <math>V_n</math>(kV)</b>	<b>Individual harmonic voltage distortion (%)</b>	<b>Total voltage distortion, THDV<sub>n</sub>(%)</b>
$V_n \leq 69$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161$	1.5	2.5
$V_n > 161$	1.0	1.5

Sumber: Dugan et al., 2002

Tabel 2 Batas arus harmonik

Shor-circuit ratioat PCC	Maximum individual frequency voltage harmonic (%)	Related assumption
10	2.5-3.0	Sistem khusus
20	2.0-2.5	1-2 pelanggan besar
50	1.0-1.5	Beberapa pelanggan relatif besar
100	0.5-1.0	5-20 Pelanggan sedang
1000	0.05-0.10	Banyak pelanggan kecil

Sumber: Dugan et al., 2002

### 2.2.3.2 IEC 61000-2-2

IEC 61000-2-2 mendefinisikan tingkat kompatibilitas untuk gangguan yang dihantarkan dengan frekuensi rendah dan sinyal dalam sistem pasokan daya rendah tegangan masyarakat seperti sistem satu fasa dan tiga fasa dengan tegangan nominal hingga 240 dan 415 V, secara berturut-turut. Tingkat kompatibilitas didefinisikan secara empiris sehingga mengurangi jumlah keluhan terhadap pengoperasian yang salah menjadi tingkat yang dapat diterima. Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individual dalam jaringan tegangan rendah ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3 Tingkat kompatibilitas untuk tegangan harmonik individu dalam jaringan publik tegangan rendah menurut IEC 61000-2-2

Not multiple of 3		Multiple of 3		Even order $h$	Harmonic voltage (%)
Odd order $h$	Harmonic voltage (%)	Odd order $h$	Harmonic voltage (%)		
6	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.2
17	2	>21	0.2	10	0.2
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3 \times 25/h$				

\*Total Harmonic Distortion (THD) dari tegangan pasokan termasuk semua harmonik hingga urutan ke-40 harus kurang dari 8 persen.

Sumber: Dugan et al., 2002

### **2.2.3.3 IEC 61000-3-2 dan 61000-3-4**

IEC 61000-3-2 dan 61000-3-4 keduanya menetapkan batas untuk emisi arus harmonik dari peralatan yang menarik arus masukan hingga dan termasuk 16 A per fase dan lebih dari 16 A per fase, secara berturut-turut. Standar ini ditujukan untuk membatasi emisi harmonik dari peralatan yang terhubung ke jaringan publik tegangan rendah sehingga kepatuhan terhadap batas-batas tersebut memastikan bahwa tegangan dalam jaringan publik memenuhi batas kompatibilitas yang didefinisikan dalam IEC 61000-2-2. (Dugan et al., 2002)

IEC 61000-3-2 adalah hasil dari IEC 555-2 (EN 60555-2). Standar mengklasifikasikan peralatan menjadi empat kategori (Dugan et al., 2002)

- a) Kelas A: Peralatan tiga fasa seimbang dan semua peralatan lainnya yang tidak termasuk ke dalam kelas B, C, dan D.
- b) Kelas B: Alat-alat portabel
- c) Kelas C: Peralatan pencahayaan termasuk perangkat pengatur kecerahan
- d) Kelas D: Peralatan yang memiliki arus masukan dengan "bentuk gelombang khusus" dan daya masukan aktif kurang dari 600 W

Batasan arus harmonik maksimum untuk kelas A, B, C, dan D diberikan dalam amper aktual yang diukur pada arus masukan peralatan. Perlu diperhatikan bahwa batasan arus harmonik untuk peralatan kelas B adalah 150 persen dari yang ada di kelas A. Batasan arus harmonik sesuai dengan IEC 61000-3-2 ditunjukkan dalam Tabel 4 hingga 6. Perhatikan bahwa batasan arus harmonik untuk peralatan kelas D ditentukan dalam angka absolut dan dalam nilai relatif terhadap daya aktif. Batasan ini hanya berlaku untuk peralatan yang beroperasi pada daya masukan hingga 600 W. (Dugan et al., 2002)

Tabel 4 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas A

Odd order $h$	Max. permissible harmonic current order (A)	Even Order $h$	Max. permissible order (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.4	8-40	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
15-39	$0.15 \times 15/h$		

Tabel 5 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas C

Harmonic order $h$	Max. permissible harmonic current* (%)
2	2
3	$30 \times$ circuit power factor
5	10
7	7
9	5
11-39	3

\* Persentase dari arus input fundamental.

Sumber: Dugan et al., 2002

Tabel 6 Batas Arus Harmonik untuk Peralatan Kelas D

Harmonic order $h$	Max. permissible harmonic current	
	Per warr (mA/W)	(A)
2	3.4	2.3
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.50	0.40
13	0.35	0.33
11-39	$3.86/h$	$0.15 \times 15/h$

Sumber: Dugan et al., 2002

IEC 61000-3-4 membatasi emisi dari peralatan yang menarik arus masukan lebih besar dari 16 A dan hingga 75 A. Koneksi dari jenis peralatan ini tidak memerlukan persetujuan dari utilitas. Batasan arus harmonik berdasarkan standar ini ditunjukkan dalam Tabel 7;

Tabel 7 Batasan Arus Harmonik Menurut IEC 61000-3-4

Harmonic order <i>h</i>	Max. permissible harmonic current* (%)	Harmonic order <i>h</i>	Max. permissible harmonic current* (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

\* Persentase dari arus input fundamental.

Sumber: Dugan et al., 2002

#### 2.2.4 Pengaruh harmonisa pada sistem

Efek utama dari harmonik tegangan dan arus dalam sistem listrik adalah (Arrillaga & Watson, 2003):

1. Kemungkinan terjadinya peningkatan level harmonik akibat dari resonansi seri dan paralel.
2. Penurunan efisiensi dalam pembangkitan, transmisi, dan pemanfaatan energi listrik.
3. Penuaan isolasi komponen pembangkit listrik yang mengakibatkan pemendekan masa manfaatnya.
4. Tidak berfungsinya sistem atau komponen pabrik,

Di antara kemungkinan dampak eksternal dari harmonik adalah penurunan kinerja sistem komunikasi, kebisingan berlebihan, serta tegangan dan arus yang diinduksi oleh harmonik.

### 2.3 Filter Aktif Sebagai Filter Harmonisa

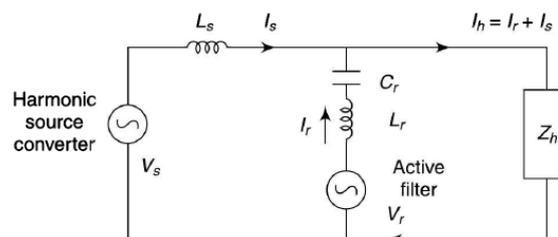
Filter aktif merupakan rangkaian elektronik yang memuat sebuah penguat dan beberapa devais lain seperti resistor dan kapasitor. Sebaliknya, filter pasif merupakan rangkaian yang hanya memuat beberapa devais pasif seperti resistor, kapasitor dan induktor. Penguat operasional sangat sering digunakan sebagai filter aktif. (Arrillaga & Watson, 2003)

Kompleksitas desain dan biaya tinggi serta keterbatasan kemampuan filter pasif konvensional dalam menghilangkan inter-harmonik dan harmonik non-karakteristik telah mendorong pengembangan kompensasi harmonisa dengan menggunakan perangkat elektronik daya, yang umumnya disebut sebagai filter aktif. Menurut koneksinya ke jaringan, filter aktif dapat berupa tipe seri, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a), untuk mencegah transfer arus harmonik, atau tipe *shunt*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(b), untuk mengurangi harmonik dalam jaringan. (Arrillaga & Watson, 2003)



Gambar 3 filter aktif (a) Seri, (b) Paralel  
Sumber: Arrillaga & Watson, 2003

Prinsip yang digunakan dalam filter aktif adalah bahwa filter tersebut menghasilkan arus harmonisa dan menyuntikkannya ke dalam sirkuit dalam arah yang berlawanan. Representasi rangkaian ekuivalen dari sumber harmonisa (konverter) bersama dengan filter aktif ditunjukkan dalam Gambar 4 (Kamakshaiah & Kamaraju, 2011):



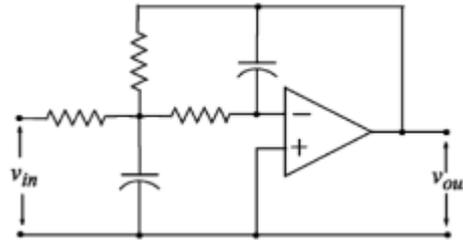
Gambar 4 Rangkaian ekuivalen sumber harmonik dan filter aktif  
Sumber: Kamakshaiah & Kamaraju, 2011

$V_S$  adalah sumber harmonisa yang menghasilkan tegangan dan menggerakkan arus  $I_S$ . Filter aktif melalui rangkaian yang disetel  $L_r, C_r$  menyuntikkan arus  $I_r$  ke arah yang berlawanan, sehingga arus harmonisa bersih dikurangi menjadi minimum di dalam jaringan  $Z_h$  (beban). Dengan demikian, filter aktif menekan arus harmonisa yang dihasilkan. Keunggulan dan Manfaat Filter Aktif AC dan DC (Kamakshaiah & Kamaraju, 2011):

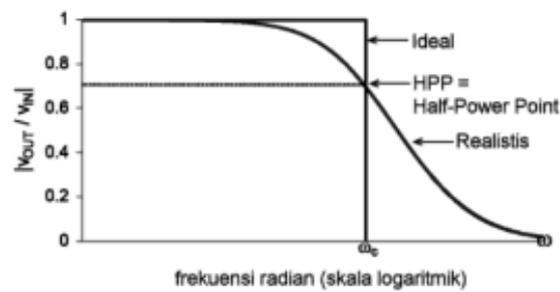
1. Kemampuan untuk melacak frekuensi sistem dan memfilter beberapa harmonisa secara bersamaan: Filter aktif dapat menyesuaikan diri dengan perubahan frekuensi sistem dan secara efektif menyaring beberapa harmonisa secara bersamaan, memberikan kemampuan mitigasi harmonik yang serbaguna.
2. Kinerja yang unggul meskipun detuning filter pasif: Filter aktif tetap mempertahankan kinerja tinggi bahkan jika filter pasif menjadi detuning, memastikan kompensasi harmonik yang konsisten terlepas dari variasi dalam sistem.
3. Adaptasi mudah ke filter pasif yang sudah ada: Filter aktif dapat diintegrasikan dengan filter pasif yang sudah ada, memungkinkan peningkatan dan perbaikan sistem mitigasi harmonik tanpa perlu modifikasi yang ekstensif.
4. Frekuensi resonansi yang lebih rendah: Filter aktif meminimalkan kemunculan frekuensi resonansi dengan mengurangi interaksi dengan impedansi jaringan, komponen filter lainnya seperti kapasitor dan reaktor, yang menghasilkan stabilitas dan keandalan sistem daya yang lebih baik.
5. Memenuhi persyaratan kinerja harmonik yang ketat: Filter aktif mampu mencapai tingkat kinerja harmonik tertinggi yang diperlukan untuk mengatasi masalah lingkungan di daerah padat seperti kota metropolitan dan mega, memastikan kepatuhan peraturan dan meminimalkan dampak negatif pada jaringan listrik dan infrastruktur sekitarnya.

Filter aktif merupakan rangkaian elektronik yang memuat sebuah penguat dan beberapa devais lain seperti resistor dan kapasitor, filter pasif merupakan rangkaian yang hanya memuat beberapa davais pasif seperti resistor, kapasitor dan induktor. Penguat operasional sangat sering digunakan sebagai filter. (Sianipar, 2015). Filter *low-pass* (pelewat rendah) melewatkan semua frekuensi di bawah frekuensi kritis

(*cut off*) yang ditandai sebagai  $\omega_c$  dan mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di atas frekuensi *cut off*. Sebuah filter *low-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 5 dan respon frekuensinya pada Gambar 6.



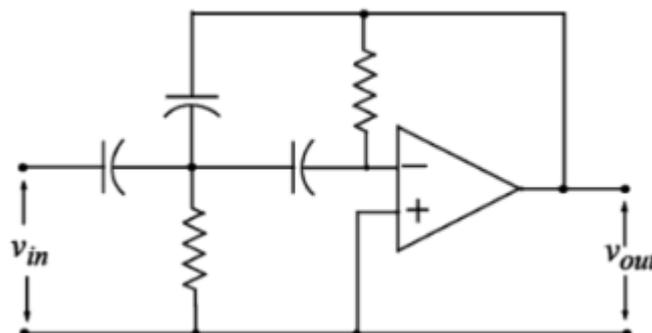
Gambar 5 Filter aktif *low-pass*



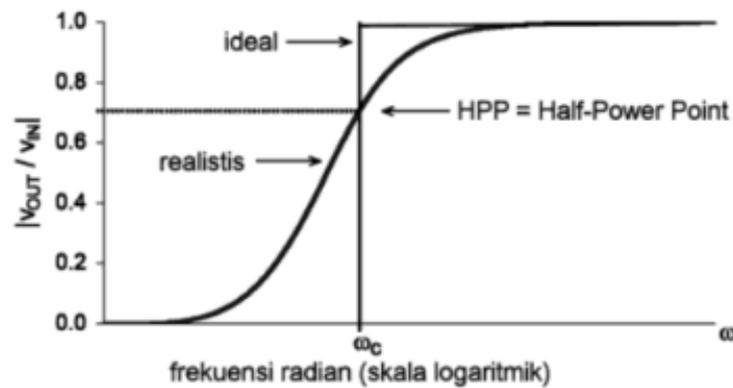
Gambar 6 Respon frekuensi filter *low-pass*

Sumber: Sianipar, 2015

Filter *high-pass* melewati semua frekuensi di atas frekuensi kritis (*cut off*) yang ditandai sebagai  $\omega_c$  dan mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di bawah frekuensi *cut off*. Sebuah filter *high-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 7 dan respon frekuensinya pada Gambar 8.

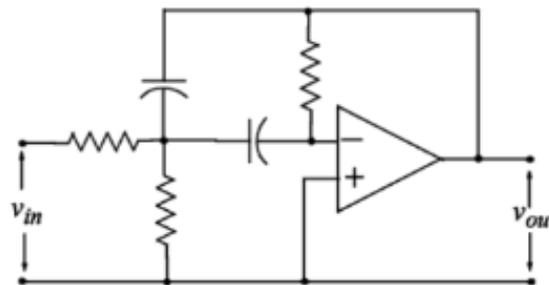


Gambar 7 Filter aktif *high-pass*

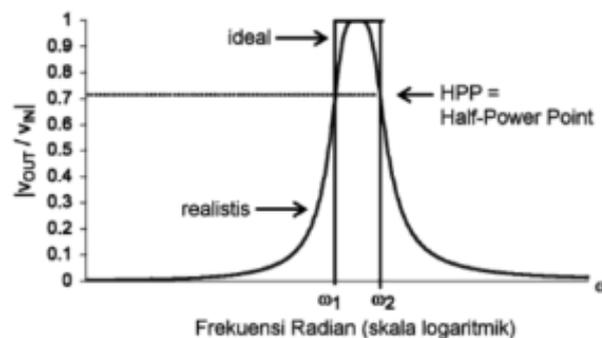


Gambar 8 Respon frekuensi filter *high-pass*  
Sumber: Sianipar, 2015

Filter *band-pass* melewati rentang frekuensi di antara frekuensi kritis (*cut off*) yang ditandai sebagai  $\omega_1$  dan  $\omega_2$ , Dimana nilai maksimum dari  $v_{out}/v_{in}$  bernilai satu, yang merupakan  $0,707 \times G_v$ . Filter ini mengattenuasi (memblokir) semua frekuensi di luar rentang ini. Sebuah filter *band-pass* op amp ditampilkan pada Gambar 9 dan respon frekuensinya pada Gambar 10.



Gambar 9 Filter aktif *band-pass*  
Sumber: Sianipar, 2015



Gambar 10 Respon frekuensi Filter *band-pass*  
Sumber: Sianipar, 2015

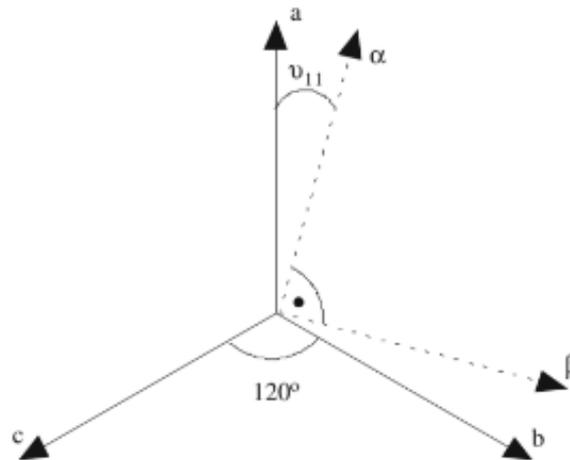
### 2.3.1 Teori PQ

Teori p-q didasarkan pada serangkaian daya instan yang didefinisikan dalam domain waktu. Tidak ada pembatasan yang diberlakukan pada bentuk gelombang tegangan atau arus, dan teori ini dapat diterapkan pada sistem tiga fase dengan atau tanpa kawat netral untuk bentuk gelombang tegangan dan arus tiga fase secara umum. Oleh karena itu, teori ini berlaku tidak hanya dalam kondisi tunak, tetapi juga dalam kondisi transien. (Akagi, 2007)

Konsep-konsep daya tradisional lainnya dicirikan dengan memperlakukan sistem tiga fase sebagai tiga sirkuit fase tunggal. Teori p-q pertama-tama mengubah tegangan dan arus dari koordinat abc menjadi koordinat  $\alpha\beta$ , kemudian mendefinisikan daya instan pada koordinat ini. Oleh karena itu, teori ini selalu mempertimbangkan sistem tiga fase sebagai satu kesatuan, bukan sebagai superposisi atau penjumlahan dari tiga sirkuit fase Tunggal. (Akagi, 2007)

Teori p-q sendiri merupakan teori yang berdasarkan perhitungan dari daya aktif dan reaktif dalam domain waktu. Teori ini menggunakan sistem tiga fase tanpa mempertimbangkan netral. Daya aktif dan reaktif diperoleh dengan cara mengukur nilai arus dan tegangan dari beban yang mengandung harmonisa yang dijadikan sebagai parameter dalam membangkitkan arus kompensasi. Besaran tegangan dan arus tiga fasa hasil pengukuran dalam koordinat abc akan ditransformasikan menjadi koordinat  $\alpha\beta$  menggunakan transformasi clarke. (Akagi, 2007)

Teori p-q menggunakan transformasi  $\alpha\beta$ , yang juga dikenal sebagai transformasi Clarke, yang terdiri dari matriks nyata yang mengubah tegangan dan arus tiga fase menjadi kerangka acuan stasioner  $\alpha\beta$ . Oleh karena itu, presentasi teori p-q akan dimulai dengan transformasi ini, diikuti oleh teori itu sendiri, makna fisik dan interpretasinya, serta perbandingannya dengan teori daya konvensional.



Gambar 11 Ilustrasi dari transformasi abc to  $\alpha\beta$   
 Sumber: (Benysek, 2012)

Transformasi  $\alpha\beta 0$ , atau transformasi Clarke, memetakan tegangan instan tiga fase pada fase abc, yaitu  $v_a$ ,  $v_b$ , dan  $v_c$ , menjadi tegangan instan pada sumbu  $\alpha\beta 0$ , yaitu  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ , dan  $v_0$ .

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Demikian pula, arus saluran tiga fase  $i_a$ ,  $i_b$  dan  $i_c$  dapat ditransformasikan ke sumbu  $\alpha\beta 0$  menggunakan *transformasi clarke* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

Salah satu keuntungan dari penerapan transformasi  $\alpha\beta 0$  adalah kemampuannya untuk memisahkan komponen urutan nol dari komponen fase abc. Sumbu  $\alpha$  dan  $\beta$  tidak memberikan kontribusi terhadap komponen urutan nol. Dalam sistem tiga fase, tiga kawat, tidak ada arus urutan nol yang muncul, sehingga  $i_0$  dapat dihilangkan dari persamaan di atas, yang menghasilkan penyederhanaan. Jika tegangan tiga fase seimbang dalam sistem empat kawat, tidak ada tegangan urutan

nol yang muncul, sehingga  $v_0$  juga dapat dihilangkan. Namun, ketika komponen tegangan dan arus urutan nol hadir, transformasi lengkap harus dipertimbangkan.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

Demikian pula, arus saluran tiga fase  $i_a$ ,  $i_b$  dan  $i_c$  dapat ditransformasikan ke sumbu  $\alpha\beta$  menggunakan *transformasi clarke* sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

## 2.4 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)

Lebih dari setengah abad, PID telah menjadi tulang punggung keberhasilan pengontrolan beragam variabel proses industri. Kontrol PID dapat dijumpai hampir pada setiap industri yang bergerak dalam bidang proses. Menurut sebuah survey dinyatakan bahwa 97% industri yang bergerak dalam bidang tersebut menggunakan PID dalam pengontrolannya. (Setiawan, 2008)

Luasnya penggunaan kontrol PID pada dasarnya dilatarbelakangi beberapa hal, diantaranya (Setiawan, 2008):

1. Kesederhanaan struktur kontrol: Selain hanya ada tiga parameter utama yang perlu diatur atau dilakukan usaha penalaan (tuning), pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap dinamika pengontrolan secara intuitive mudah dipahami oleh operator.
2. Kontrol PID memiliki sejarah yang panjang. Dalam hal ini PID telah digunakan jauh sebelum era digital berkembang (yaitu sekitar tahun 1930-an).
3. Kontrol PID dalam banyak kasus telah terbukti menghasilkan unjukkerja relative memuaskan, baik digunakan sebagai sistem Regulator (sistem kontrol dengan *Setpoint* konstan dan beban cenderung berubah-ubah) maupun sebagai sistem Servo (sistem kontrol dengan *Setpoint* yang berubah dan beban cenderung konstan).

Struktur control PID idela dikenal juga dengan nama sturktur PID Tipe A atau struktur PID Paralel atau struktur PID non-interacting. Struktur ini adalah struktur PID yang umum ditemukan pada Sebagian besar buku-buku teks kontrol. Persamaan (12) dan (13) berikut memperlihatkan bentuk umum PID ideal:

$$CO(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (12)$$

atau

$$CO(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^1 e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (13)$$

dengan  $CO(t)$  : output kontroler

$e(t)$  : selisih antara SetPoint dengan nilai output proses (dengan menganggap proses yang di control bersifat direct maka  $e = SP - PV$ )

$K_p$  : gain proporsional

$T_i$  : time integral

$T_D$  : time derivative

$K_i$  : gain integral ( $K_p/T_i$ )

$K_D$  : gain gerivative ( $K_p \cdot T_D$ )

Walaupun secara teoritis nilai-nilai parameter kontrol PID besarnya dapat diatur secara independen, tetapi secara praktis (terutama terkait dengan model proses yang dikontrol), pengaturan atau tuning yang dilakukan terhadap salah satu parameter kontrol, umumnya memerlukan pengaturan ulang pada parameter yang lain. Sebagai contoh, untuk sebuah model proses tertentu, pengubahan nilai KP (diperbesar atau diperkecil) umumnya akan memerlukan setting ulang pada besaran parameter kontrol KI (atau TI) dan KD (atau TD). Tabel 8 memperlihatkan pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap unjuk kerja pengontrolan proses secara umum. (Setiawan, 2008)

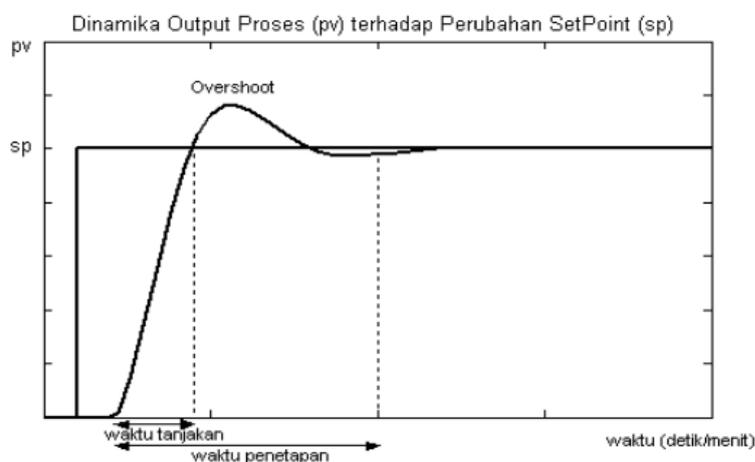
Tabel 8 Pengaruh tuning salah satu Parameter PID terhadap unjuk kerja proses

	<b>Waktu Tanjakan</b>	<b>Overshoot</b>	<b>Waktu Penetapan</b>	<b>Kestabilan</b>
<b>Pembesaran <math>K_p</math></b>	Berkurang	Bertambah	Sedikit bertambah	menurun
<b>Pembesaran <math>K_I</math> (Pengecilan <math>T_I</math>)</b>	Sedikit berkurang	Bertambah	Bertambah	Menurun
<b>Pembesaran <math>K_D</math> (Pengecilan <math>T_D</math>)</b>	Sedikit berkurang	Berkurang	berkurang	Meningkat

Sumber: Setiawan, 2008

Dalam bentuknya yang ideal, parameter unjuk kerja yang nampak pada Tabel 8 diatas dapat dijelaskan sebagai berikut:

- **Waktu tanjakan:** Waktu yang diperlukan respon (deviasi output variable proses) untuk naik dari 0 sampai 100% harga akhirnya.
- **Overshoot:** Lonjakan maksimum yang dialami oleh respon proses.
- **Waktu penetapan:** Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai dan menetap disekitar 95%-98% dari harga akhirnya.

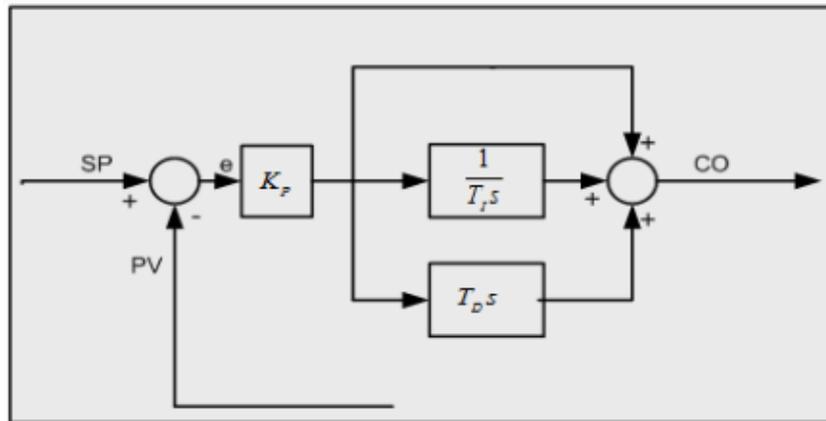


Gambar 12 Respon proses sebagai akibat perubahan SetPoint  
Sumber: Setiawan, 2008

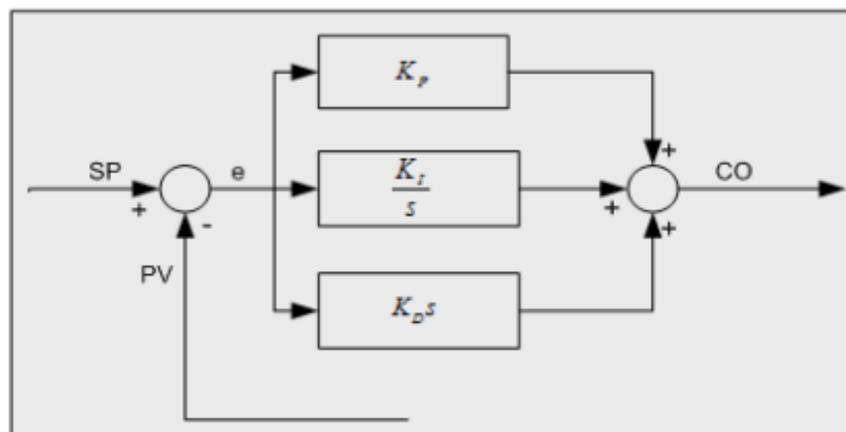
Aksi kontrol PID pada dasarnya bertujuan untuk menggabungkan kelebihan komponen komponen dasar kontrol PID:

1. Kontrol Proporsional: berfungsi untuk mempercepat respon
2. Kontrol Integral: berfungsi untuk menghilangkan error steady
3. Kontrol Derivative: berfungsi untuk memperbaiki sekaligus mempercepat respon transien.

Gambar 13 berikut berturut-turut memperlihatkan blok diagram kontrol PID ideal bentuk dependent dan bentuk independent;



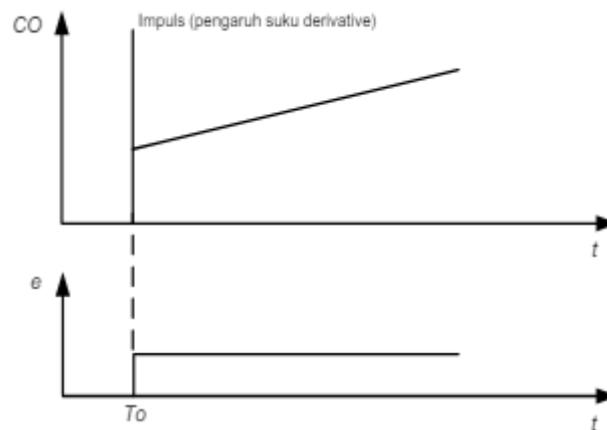
(a)



(b)

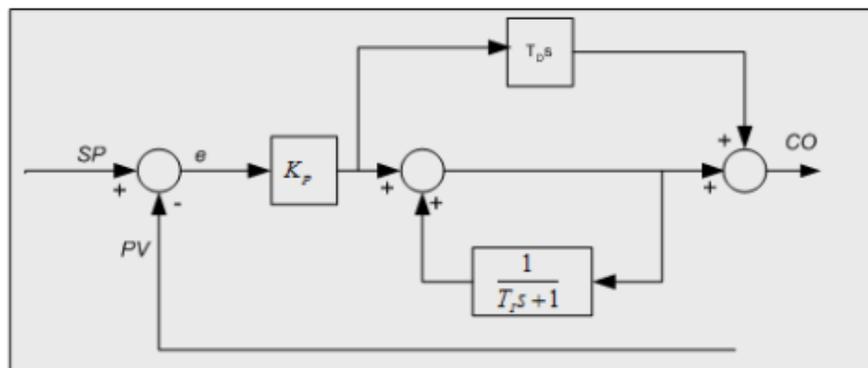
Gambar 13 Diagram blok kontrol PID ideal  
(a) bentuk dependent, (b) bentuk independent  
Sumber: Setiawan, 2008

Seperti yang terlihat pada Gambar 12 diatas diatas, semua komponen pada kontroler PID jenis ideal ini bekerja pada masukan error penggerak. Hubungan antara masukan error penggerak dengan output kontroler PID tersebut dapat dilihat pada Gambar 14:



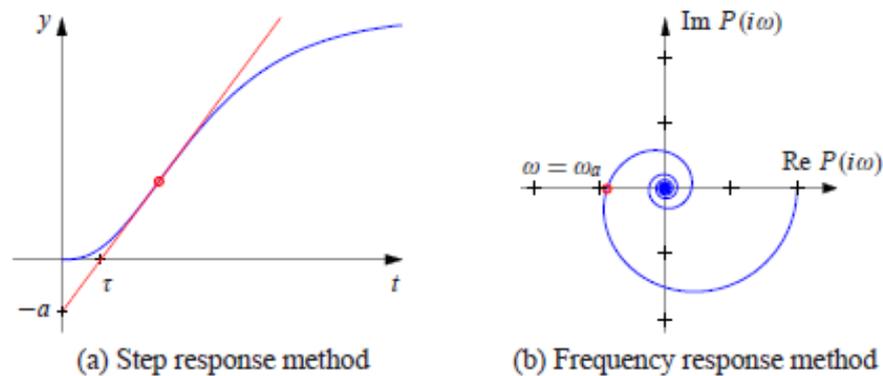
Gambar 14 Aksi kontrol PID  
Sumber: Setiawan, 2008

kontrol PID ideal juga dapat direalisasikan dengan mengacu pada Gambar 15;



Gambar 15 Diagram blok alternatif kontrol PID  
Sumber: Setiawan, 2008

Untuk menghasilkan sistem kendali yang diinginkan maka perlu ditentukan besar parameter-parameter dari pengendali PID yang dapat dilakukan dengan tuning PID. Terdapat beberapa jenis metode tuning yaitu metode trial and error, metode Ziegler-Nichols dan metode Cohen-coon. Pada penelitian ini digunakan metode Ziegler-Nichols. Metode ini dikembangkan oleh John G. Ziegler dan Nathaniel B. Nichols pada tahun 1942. Ziegler dan Nichols mengembangkan dua metode penyetelan pengendali berdasarkan karakterisasi sederhana dari dinamika proses dalam domain waktu dan frekuensi. (Astrom & Murry, 2009)



Gambar 16 Metode respons langkah dan frekuensi Ziegler–Nichols.  
Sumber: Astrom & Murry, 2009

Proses pemilihan parameter pengontrol untuk memenuhi spesifikasi kinerja yang diberikan dikenal sebagai penyetelan pengontrol. Ziegler dan Nichols menyarankan aturan penyetelan pengendali PID (artinya menetapkan nilai  $K_p$ ,  $T_i$  dan  $T_d$ ) berdasarkan langkah percobaan tanggapan atau berdasarkan nilai  $K_p$  yang menghasilkan stabilitas marginal bila hanya proporsional tindakan kontrol digunakan. (Ogata, 2010)

Salah satu metode penyetelan yang dikemukakan oleh Ziegler dan Nichols didasarkan pada suatu proses informasi dalam bentuk *open loop* langkah respon yang diperoleh dari a tes mendadak. Metode ini dapat dipandang sebagai metode tradisional berdasarkan pemodelan dan kontrol di mana model proses yang sangat sederhana digunakan (Astrom, 2002). Metode domain waktu didasarkan pada pengukuran sebagian dari tanggapan langkah unit *loop* terbuka proses, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 16 (a). Tanggapan langkah diukur dengan memberikan masukan langkah unit ke proses dan merekam tanggapannya. Tanggapan ini ditandai dengan parameter  $a$  dan  $\tau$ , yang merupakan intersep dari tangen tercuram dari tanggapan langkah dengan sumbu koordinat. Parameter  $\tau$  adalah perkiraan dari tunda waktu sistem dan  $a/\tau$  adalah kemiringan tercuram dari tanggapan langkah. Perhatikan bahwa tidak perlu menunggu hingga mencapai steady state untuk menemukan parameter, cukup menunggu sampai tanggapan telah mencapai titik infleksi. Parameter pengendali diberikan dalam Tabel 9. Parameter-parameter tersebut diperoleh dengan simulasi ekstensif dari berbagai proses representatif. Sebuah pengendali disesuaikan secara manual untuk setiap proses, dan kemudian

upaya dilakukan untuk mengkorelasikan parameter pengendali dengan  $a$  dan  $\tau$ . (Astrom & Murry, 2009)

Tabel 9 Aturan penyetelan Ziegler–Nichols.

(a) Metode respons langkah memberikan parameter dalam istilah intersepsi  $a$  dan tundaan waktu tampak  $\tau$ . (b) Metode respons frekuensi memberikan parameter kontroler dalam istilah gain kritis  $K_c$  dan periode kritis  $T_c$ .

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$	Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$1/a$			P	$0.5K_c$		
PI	$0.9/a$	$3\tau$		PI	$0.4K_c$	$0.8T_c$	
PID	$1.2/a$	$2\tau$	$0.5\tau$	PID	$0.6K_c$	$0.5T_c$	$0.125T_c$
<i>(a) Step response method</i>				<i>(b) Frequency response method</i>			

Sumber: Astrom & Murry, 2009

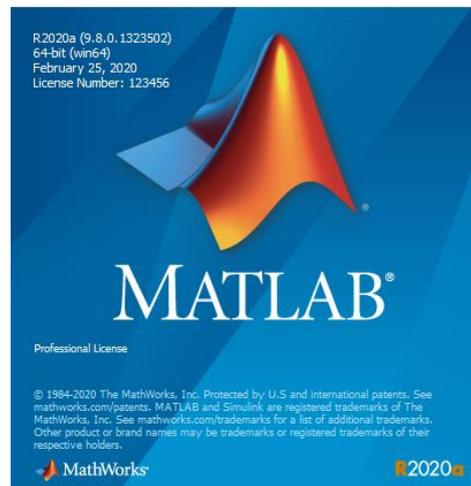
Dalam metode domain frekuensi, seorang kontroler terhubung ke proses, gain integral dan turunan diatur menjadi nol, dan gain proporsional ditingkatkan hingga sistem mulai berayun. Nilai kritis dari gain proporsional  $K_c$  diamati bersama dengan periode osilasi  $T_c$ . Berdasarkan kriteria kestabilan Nyquist, fungsi transfer loop  $L = K_c P(s)$  berpotongan dengan titik kritis pada frekuensi  $\omega c = 2\pi/T_c$ . Dengan demikian, eksperimen memberikan titik pada kurva Nyquist dari fungsi transfer proses di mana lag fasa adalah  $180^\circ$ , seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 15 (b). (Astrom & Murry, 2009)

Metode respons frekuensi dapat dipandang sebagai penyetelan empiris prosedur dimana parameter pengontrol diperoleh dengan eksperimen langsung pada proses dikombinasikan dengan beberapa aturan sederhana. Untuk yang proporsional pengontrol aturannya hanyalah meningkatkan penguatan hingga proses berosilasi lalu kurangi 50%. (Astrom, 2002)

Salah satu metode PID tuning yang terkenal adalah metode ZN (Ziegler-Nichols). Namun, metode tersebut memiliki kekurangan, di mana metode ini memakan waktu dalam mencari nilai  $K_c$  yang ideal, karena harus dicari secara manual, dan tidak memungkinkan untuk men-tuning-nya secara otomatis. Hal ini memungkinkan penentuan nilai  $K_c$  yang kurang akurat. Selain itu metode ZN juga hanya memberikan pengaturan awal, sehingga hasil tuning dengan metode ZN seringkali tidak optimal. (Reza, 2021)

## 2.5 Matlab *Simulink*

MATLAB merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang cukup populer pada kalangan ilmuwan dan praktisi. Dalam Matlab sudah terintegrasi kaitan komputasi, visualisasi dan pemrograman yang mudah digunakan dengan masalah dan solusi dapat diwujudkan dengan model matematika yang sudah umum digunakan. Secara mendasar Matlab telah banyak digunakan untuk berbagai bidang, seperti membentuk algoritma matematika dan komputasi, Pemodelan akuisisi data, simulasi, dan analisis prototif data, eksplorasi, dan pembuatan visualisasi grafis ilmu pengetahuan dan teknologi, termasuk untuk membuat sistem antar muka dengan perangkat lain.



Gambar 17 Aplikasi Matlab

Sumber: Penulis

*Toolbox* yang terdapat pada Matlab antara lain: *Signal Processing*, *Control System*, *System Identification*, *optimization*, *fuzzy*, *neural network* dan sebagainya. Selain *toolbox*, Matlab juga menawarkan produk yaitu *SIMULINK* suatu sistem untuk simulasi dinamika proses atau plant. *Simulink* adalah perangkat lunak yang interaksinya dalam lingkungan block diagram untuk simulasi multi domain dan *model-based design*. *Simulink* dapat mensupport *system level design*, Simulasi, *Automatic code generation*, dan *continuous test and verification embedded systems*. *Simulink* menyajikan tampilan editor dalam bentuk grafik. (Ningrum, 2020).

*Simulink* adalah perluasan grafis untuk MATLAB untuk pemodelan dan simulasi sistem. Dalam *Simulink*, sistem digambarkan di layar sebagai diagram blok. Banyak elemen dari diagram blok tersedia, seperti fungsi transfer, simpul

penjumlahan, dll., serta perangkat masukan dan keluaran virtual seperti generator fungsi dan osiloskop. Perangkat virtual ini akan memungkinkan Anda melakukan simulasi dari model yang akan Anda bangun. *Simulink* terintegrasi dengan MATLAB dan data dapat dengan mudah ditransfer antara program-program tersebut. Dalam tutorial ini, kami akan menerapkan *Simulink* pada contoh-contoh sistem yang dimodelkan, kemudian membangun pengendali, dan mensimulasikan sistem-sistem tersebut. (Ningrum, 2020).

## 2.6 Penelitian Terkait yang Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terkait yang terdahulu yang relevan dengan penelitian ini. Meskipun terdapat keterkaitan dalam pembahasan, penelitian yang diajukan ini masih sangat berbeda dengan penelitian terdahulu. Adapun beberapa penelitian terdahulu tersebut adalah:

1. “Perencanaan Filter Aktif Tiga Fasa Menggunakan Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID) untuk Mereduksi Harmonusa Pada Sistem Tenaga Listrik” (2013). Penelitian ini membahas filter aktif tiga fasa menggunakan kontrol PID (Proportional Integral Derivative) sebagai kontrol yang sederhana untuk mengatasi permasalahan harmonisa pada sistem tenaga listrik. Filter aktif saat beroperasi, menginjeksikan arus kompensasi ke sistem tenaga listrik. Arus beban yang terdistorsi diinputkan pada kontrol filter dan menghasilkan arus trigger untuk inverter, dimana arus trigger ini menentukan besarnya arus kompensasi. Setelah dilakukan simulasi untuk membandingkan kondisi sistem sebelum pemasangan filter aktif, diperoleh THD (Total Harmonic Distortion) arus sebesar 34,91%, setelah pemasangan filter aktif dengan menggunakan kontrol PID, THD arus mengalami penurunan menjadi 11,157%.
2. “Pengaruh Filter Aktif Dengan Pengaturan Daya Reaktif Terhadap Efisiensi Trafo Berbasis *Simulink*” (2021). Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaturan daya reaktif pada filter aktif untuk mengetahui nilai efisiensi yang didapatkan dengan mengikuti nilai standar THDi IEEE 519 – 2014 sebesar 8 % untuk setiap phasanya. Hasil analisis pengaturan daya reaktif terkecil tetapi melebihi nilai efisiensi trafo pada saat kondisi eksisting dengan memenuhi standar IEEE 519 – 2014 adalah sebesar 30 % dengan nilai THDi untuk phasa R

= 7,54 %, S = 7,74 %, dan T = 7,37 % didapatkan nilai efisiensi sebesar 96,31 %

3. “Studi Analisis Pengaruh Filter Aktif Berbasis Fuzzy Logic Controller Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Beban Non-Linier” (2019). Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh filter aktif berbasis *fuzzy logic* untuk mengurangi overshooting. Hasil simulasi THDi saat kondisi eksisting pada fasa R, S, T; adalah sebesar 14%, 17%, 14%. Saat kondisi filter aktif tanpa kontrol, presentase THDi pada fasa R sebesar 6%, fasa S sebesar 6%, fasa T sebesar 4%. Pada kondisi filter aktif berbasis fuzzy logic controller presentase THDi pada fasa R, S, T; adalah 0,9%, 0,9, 1%. Berdasarkan hasil simulasi diketahui bahwa filter aktif berbasis fuzzy logic controller mampu mereduksi distorsi harmonisa hingga nilai terendah, sehingga penggunaan fuzzy logic pada filter aktif dapat digunakan dalam proses filterisasi harmonisa pada sistem kelistrikan. hingga pada inverter sehingga mencapai nilai THDi terendah.
4. “Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) Dengan Penambahan Filter Aktif Menggunakan Matlab” (2021). Penelitian tersebut berfokus pada pengaruh harmonisa terhadap unjuk kerja motor induksi 3 fasa mencakup putaran dan torsi menggunakan filter aktif untuk menekan harmonisa. Adapun hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah menurunnya THDi tiap fasa setelah dipasang filter aktif, namun pemasangan filter aktif terhadap unjuk kerja motor.
5. “Simulasi Penggunaan Filter Aktif Shunt Dengan Kontrol PI Untuk Meredam Total Harmonic Distortion (THD) Pada Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana” (2023). Penelitian tersebut berfokus pada penggunaan filter aktif untuk meredam THD pada lokasi penelitian. Filter aktif yang digunakan adalah filter aktif *shunt* dengan kontrol PI yang terdiri dari rangkaian sumber tegangan inverter dan rangkaian kontrol. Adapun hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah penggunaan filter aktif *shunt* dengan kontrol PI menyebabkan penurunan THDi tiap fasa yaitu pada fasa R= 3,29%; S= 3,01%; dan T=4,53%.

Tabel 10 Perbandingan penelitian terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terdahulu	Persamaan	Perbedaan
1	Perencanaan Filter Aktif Tiga Fasa Menggunakan Kontrol Proporsional Integral Derivative (PID) untuk Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik (Odinanto, T., dkk. 2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa</li> <li>- Penggunaan kontrol Proporsional Integral Drivative (PID)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aplikasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan PSIM sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan Matlab</li> <li>- Metode tuning PID pada penelitian ini menggunakan metode coba-coba atau <i>try and error</i> sedangkan pada penelitian ini menggunakan metode tuning Ziegler–Nichols.</li> </ul>
2	Pengaruh Filter Aktif Dengan Pengaturan Daya Reaktif Terhadap Efisiensi Trafo Berbasis <i>Simulink</i> (Dhinata, dkk. 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa</li> <li>- Penggunaan aplikasi Matlab</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penelitian ini melakukan pengaturan daya reaktif pada filter yang digunakan untuk mereduksi harmonisa dan pengaruhnya terhadap efisiensi trafo, sedangkan untuk penelitian yang di ajukan tidak mengatur daya reaktif.</li> </ul>

3	Studi Analisis Pengaruh Filter Aktif Berbasis <i>Fuzzy Logic Controller</i> Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Beban <i>Non-Linear</i> (Saputra, dkk. 2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa</li> <li>- Penggunaan aplikasi Matlab</li> </ul>	- Penelitian ini menggunakan pengontrolan berbasis <i>fuzzy logic controller</i> ; sedangkan penelitian yang diajukan menggunakan kontrol PID
4	Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Fasa Terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) Dengan Penambahan Filter Aktif Menggunakan Matlab (Duarsuana, dkk. 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa</li> <li>- Penggunaan aplikasi Matlab</li> </ul>	- Penelitian ini menggunakan beban motor induksi 3 fasa sebagai beban non-linier serta menganalisa kinerja dari motor induksi 3 fasa tersebut, sedangkan pada penelitian yang di ajukan tidak menggunakan beban motor 3 fasa sebagai beban non linier.
5	Simulasi Penggunaan Filter Aktif Shunt Dengan Kontrol PI Untuk Meredam Total Harmonic Distortion (THD) Pada Gedung DH Teknik Elektro Universitas Udayana (Yudha, dkk. 2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Berfokus pada penggunaan filter aktif untuk mereduksi harmonisa</li> <li>- Penggunaan aplikasi Matlab</li> </ul>	- Pada penelitian ini hanya menggunakan kontrol PI sedangkan pada penelitian yang diajukan menggunakan kontrol PID

## **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

### **3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian**

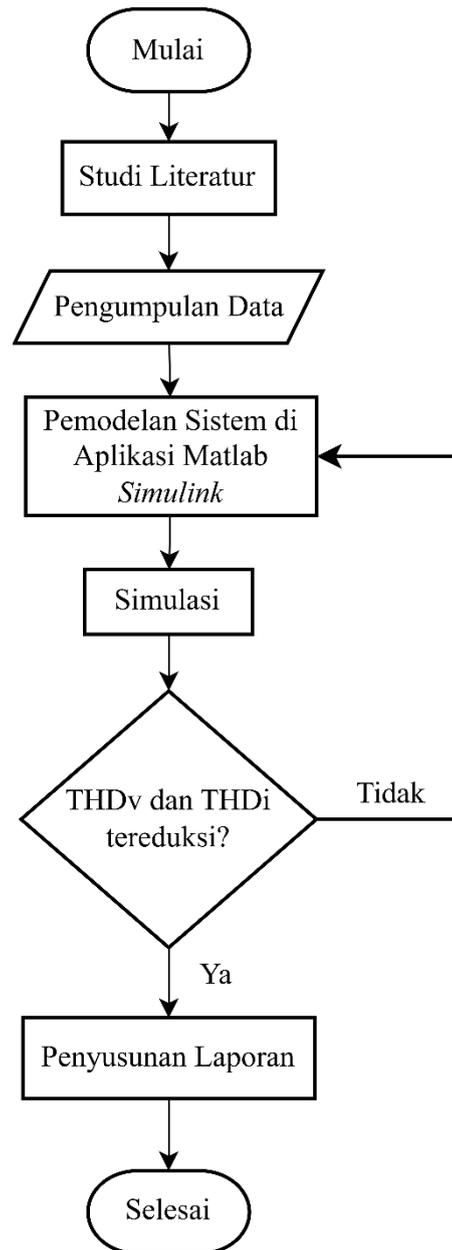
Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Elektronika Daya Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Pelaksanaan penelitian ini dimulai dari Mei 2024 sampai Oktober 2024.

### **3.2 Alat dan Bahan**

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah satu unit laptop dengan *software* MATLAB 2021a untuk pemodelan sistem dan simulasi filter aktif 3 fasa dengan Kontrol PID.

### **3.3 Diagram Alir Penelitian**

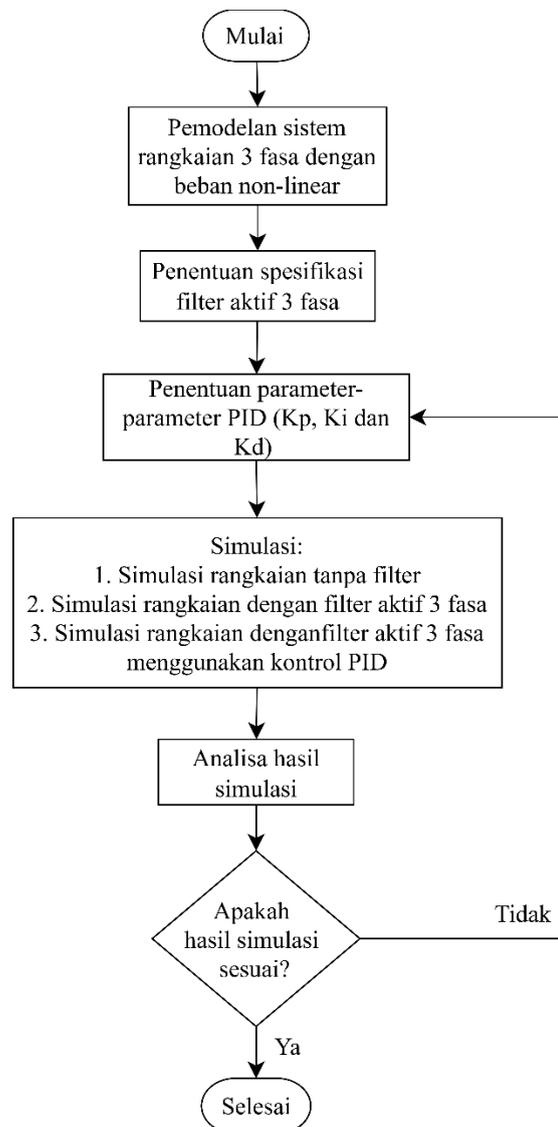
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan solusi yang efektif dan efisien untuk masalah harmonisa dalam jaringan listrik yang disebabkan oleh penggunaan beban non-linier. Pemodelannya dibuat dalam blok-blok yang kemudian disimulasikan dalam program Matlab *Simulink*. Penelitian ini dimulai dengan mencari referensi yang relevan, selanjutnya melakukan pengumpulan data mengenai sumber beban non-linier sebagai sumber distorsi harmonisa pada penelitian ini. Kemudian dilanjutkan dengan pemodelan sistem dengan aplikasi matlab *Simulink*. Apabila hasil simulasi program sesuai maka penelitian telah selesai, tetapi apabila hasilnya tidak sesuai maka akan dilakukan evaluasi program. Tahapan-tahapan penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 18;



Gambar 18 Diagram alir penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui Matlab *Simulink* yang dimulai dengan pemodelan sistem 3 fasa dengan beban non-linier. Kemudian menentukan spesifikasi filter aktif 3 fasa dan penentuan parameter PID. Adapun parameter PID adalah  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Pada penelitian ini, penentuan parameter PID dilakukan dengan metode tuning Ziegler-Nichols. Blok-blok yang telah dibuat diintegrasikan satu sama lain dan dilakukan simulasi. Simulasi dilakukan sebanyak 3 kali, yaitu simulasi sistem tanpa filter, simulasi sistem dengan filter dan simulasi sistem dengan filter dengan kontrol PID. Hasil simulasi dianggap sesuai apabila THD

tegangan dan THD arus dapat direduksi atau tidak melewati batas standar standar IEEE 519-2014. Apabila hasil simulasi belum sesuai dengan yang diharapkan maka dilakukan evaluasi program, dan apabila hasil simulasi sudah sesuai maka penelitian selesai. Tahapan dalam pembuatan program Matlab *Simulink* ini dapat dilihat pada Gambar 19;



Gambar 19 Diagram pemodelan sistem di aplikasi Matlab *Simulink*

### 3.4 Teknik Pengumpulan Data

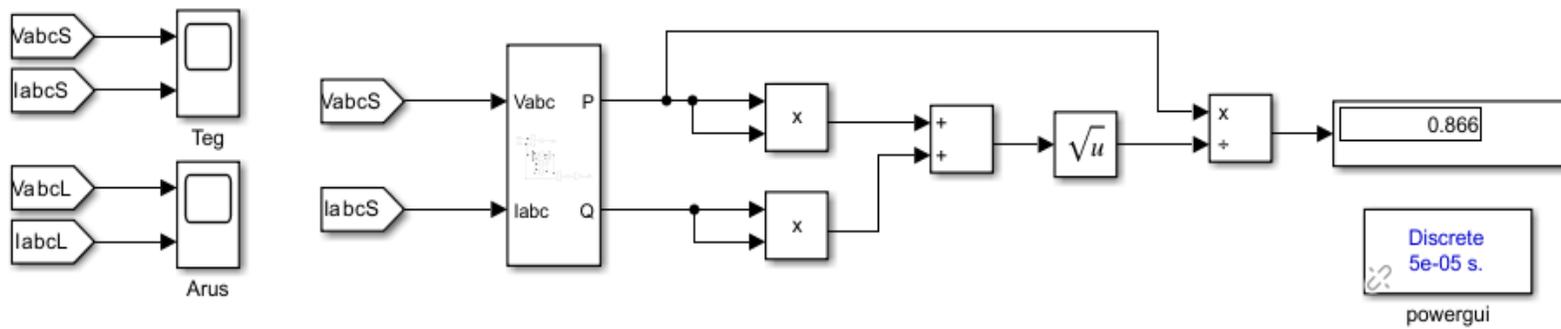
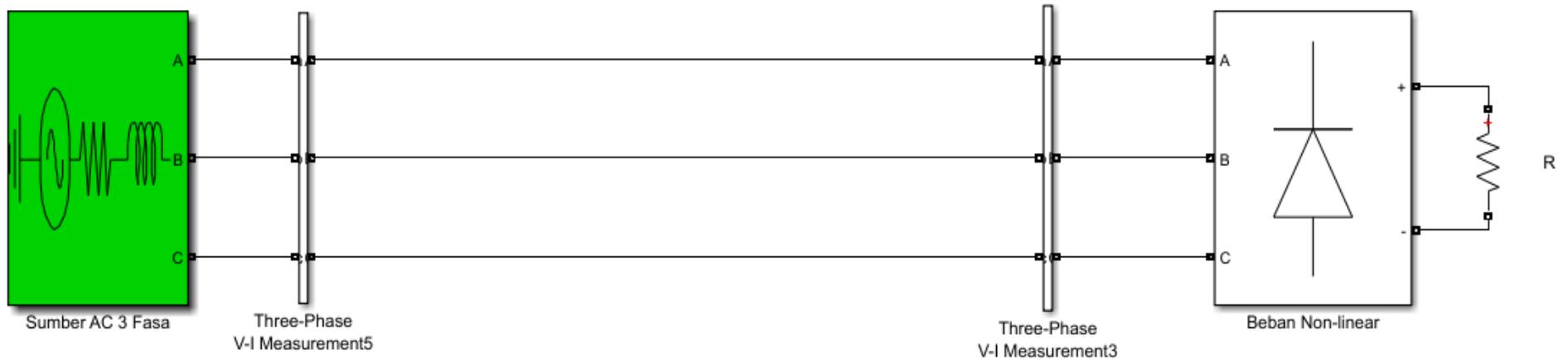
Pada penelitian ini, data yang digunakan adalah data sekunder yang didapatkan dari studi literatur pada jurnal yang mengujikan beberapa variable yang relevan dengan penelitian ini. Selain itu untuk data primer di peroleh dari hasil simulasi rangkaian menggunakan *software* Matlab *Simulink*.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Sistem Rangkaian 3 Fasa dengan Beban Non-Linear

Pemodelan sistem rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear untuk memperoleh arus harmonisa dapat dilihat pada Gambar 20. Pada penelitian ini sumber tegangan yang digunakan adalah sumber yang seimbang dengan besar tegangan yang pada umumnya digunakan pada industri yaitu 380V yang terhubung ke ground dengan frekuensi 50Hz. Beban non-linear yang digunakan sebagai sumber harmonisa adalah *universal bridge rectifier 3 phase*, yang saat terhubung dengan jaringan dan akan mengubah bentuk gelombang sinusoidal menjadi cacat akibat distorsi harmonisa. Penyearah atau rectifier ini berfungsi untuk mengubah sumber 3 fasa AC menjadi DC menggunakan dioda.

Dalam kasus penyearah tiga fasa, komponennya adalah harmonik fundamental, dan harmonik ke-5, ke-7, ke-11, ke-13 (dan seterusnya). Triple-n dieliminasi. Setiap harmonisa arus dianalisis secara independen dalam analisis kualitas daya. Triple-n adalah harmonik dengan angka 3, 9, dan seterusnya. (Alexander & Marc, 2007)

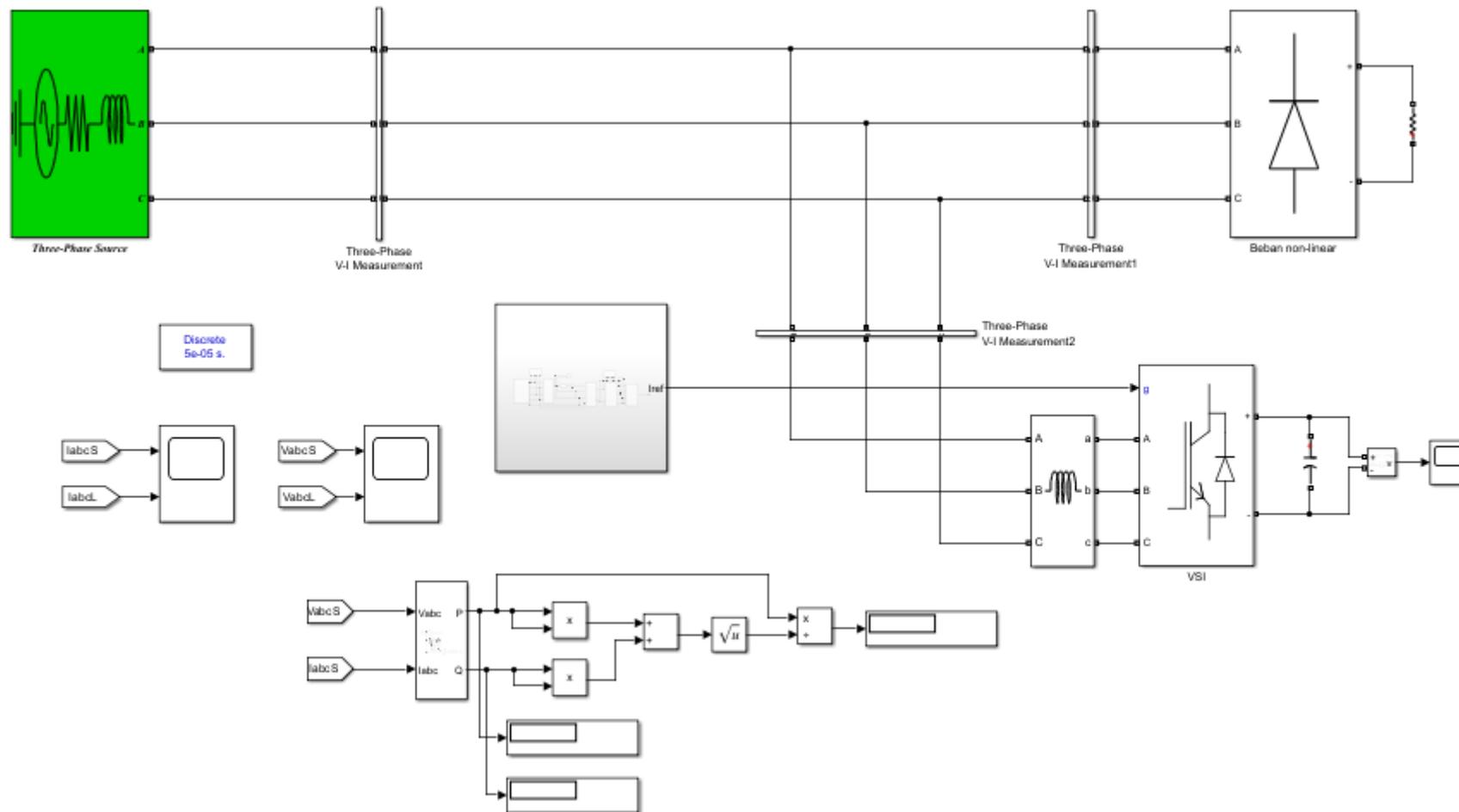


Gambar 20 Rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear

## 4.2 Pemodelan Rangkaian Filter Aktif 3 Fasa

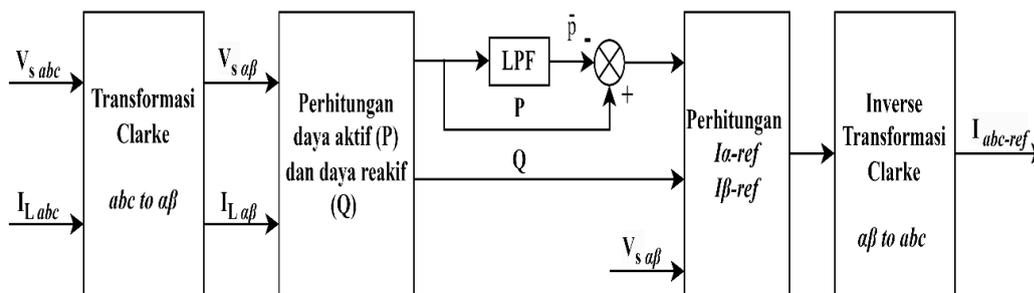
Pemodelan rangkaian filter aktif 3 fasa yang terhubung parallel dengan beban non-linear dapat dilihat pada Gambar 21. Pada penelitian ini digunakan *universal bridge inverter* sebagai filter aktif. *Inverter* sendiri adalah sebuah perangkat elektronika yang dapat mengkonversi sumber DC menjadi AC dengan pengaturan *switching* pada rangkaian pensaklaran. *Inverter* dipilih sebagai filter aktif karena *output*-nya yang bisa diatur untuk mengeliminasi arus harmonisa yang dihasilkan oleh beban non-linear dengan cara membangkitkan arus sinusoidal dengan fasa yang berlawanan. *Inverter* yang digunakan pada penelitian ini adalah *inverter* jenis VSI (*Voltage Source Inverter*) dengan kapasitor sebagai penyedia sumber tegangannya dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) sebagai *switching*.

Filter aktif berfungsi untuk mengeliminasi harmonisa di sisi sumber berdasarkan sistem kontrol yang digunakan. Selain itu, filter aktif juga berfungsi untuk mengkompensasi daya reaktif ke beban. Gambar 21 Menunjukkan konfigurasi dari filter aktif paralel yang terhubung dengan beban non-linier. Filter aktif terhubung dengan jaringan distribusi melalui Point of Common Coupling (PCC) melalui induktor LF. Induktor LF bukan sebagai induktor filter (filter pasif) melainkan sebagai induktor kopel atau induktor Alternating Current (AC) yang berfungsi sebagai tapis pesaklaran VSI.



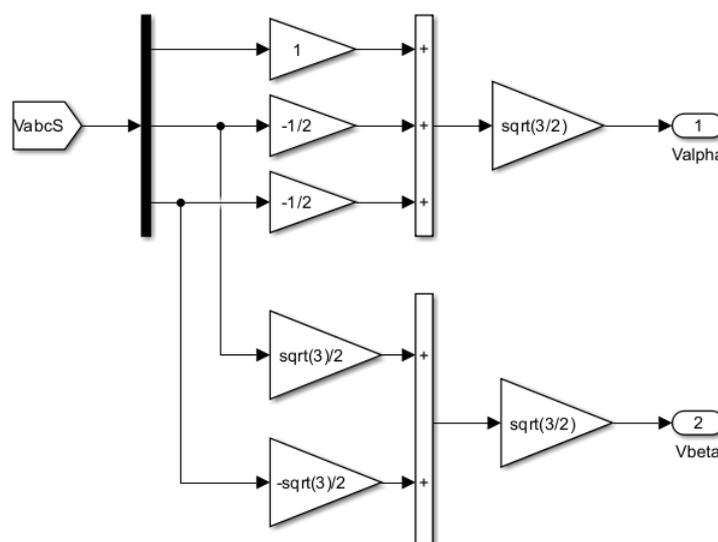
Gambar 21 Rangkaian 3 fasa beban non-linear dengan filter aktif 3 fasa

Pengaturan pensaklaran pada gate VSI sebagai filter aktif ditentukan oleh arus referensi ( $I_{abc-ref}$ ). arus referensi dibandingkan dengan arus sumber yang diinjeksikan menggunakan *Linier current regulator*.  $I_{abc-ref}$  diperoleh menggunakan algoritma teori pq. Reduksi harmonisa berdasarkan teori pq dilakukan melalui serangkaian perhitungan matematis daya sesaat dalam sistem 3 fasa yang seimbang. Teori ini menggunakan sistem 3 fasa tanpa mempertimbangkan netral. Blok diagram algoritma pq dapat dilihat pada Gambar 22. Daya aktif dan daya reaktif sesaat diperoleh dengan cara mentransformasikan tegangan sumber ( $V_{Sabc}$ ) dan arus beban ( $I_{Labc}$ ) dengan koordinat abc menjadi kordinat  $\alpha\beta$  menggunakan transformasi Clarke.

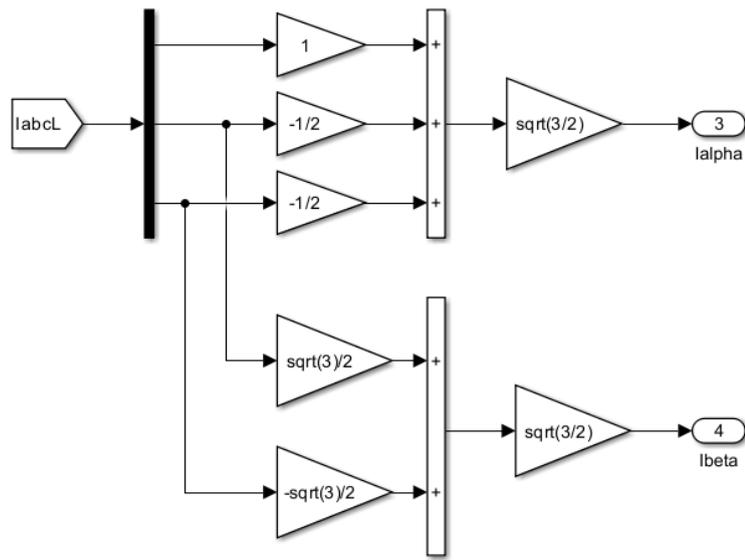


Gambar 22 Blok diagram algoritma teori pq

Persamaan 8 dan 9 masing-masing merupakan matrik transformasi tegangan dan arus dari koordinat abc menjadi  $\alpha\beta$ . Untuk pemodelan sistem menggunakan Matlab *Simulink* dapat dilihat pada Gambar 23;



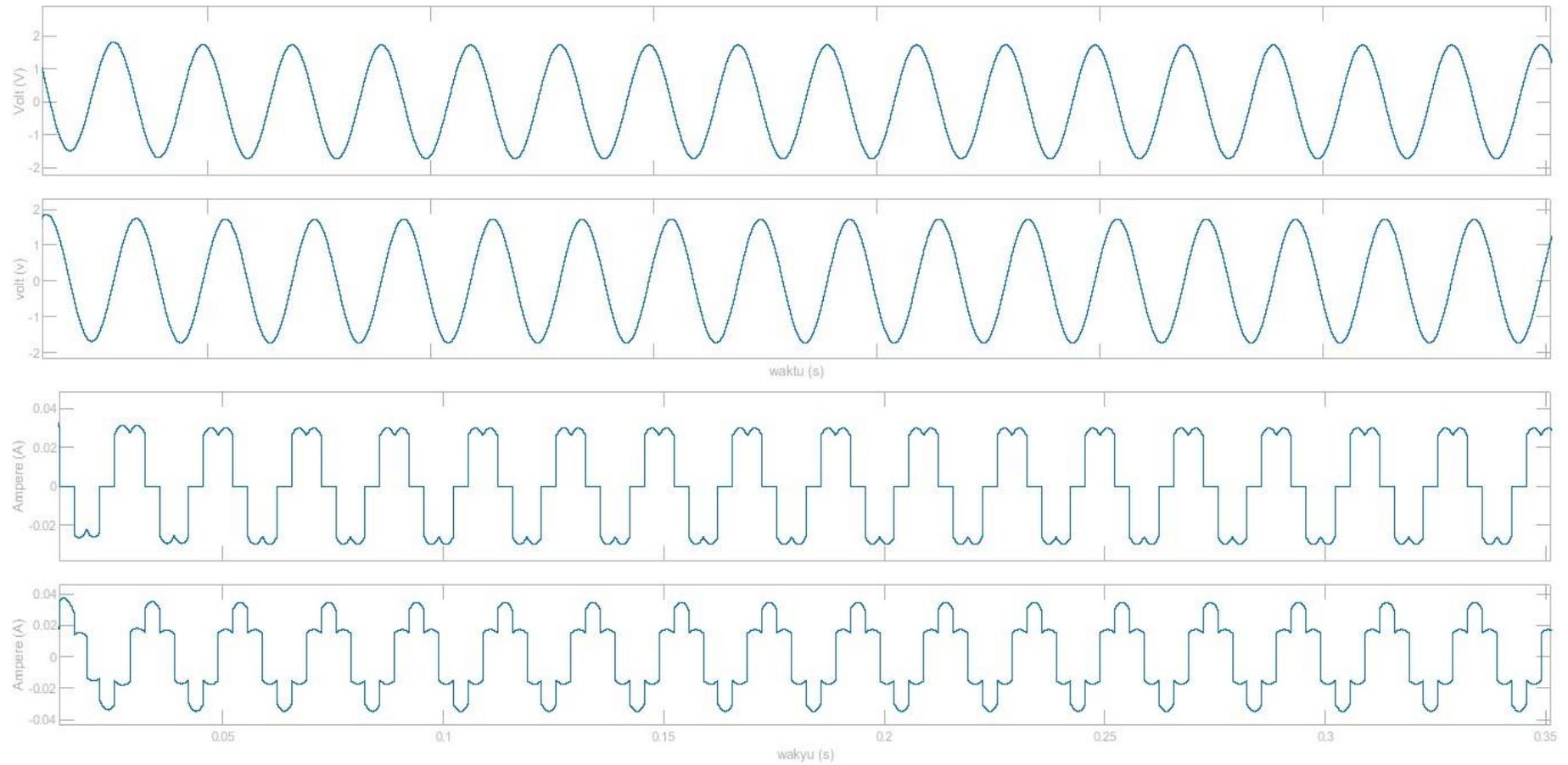
(a)



(b)

Gambar 23 Transformasi Clark  $abc$  to  $\alpha\beta$  menggunakan matlab Simulink  
 (a) Tegangan (b) Arus

Untuk gelombang hasil keluaran *transformasi clark abc to  $\alpha\beta$*  menggunakan matlab *Simulink* dapat dilihat pada Gambar 24;

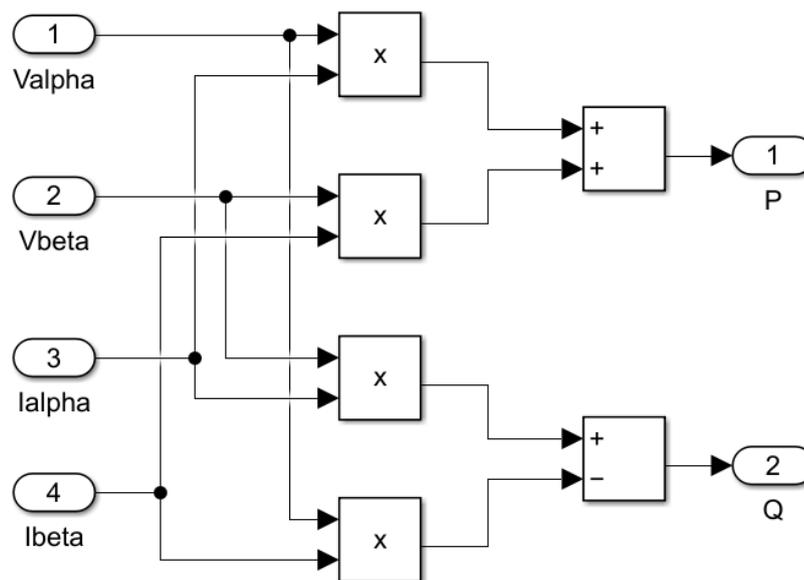


Gambar 24 Gelombang output transformasi Clark abc to  $\alpha\beta$  menggunakan matlab *Simulink*

Dalam koordinat  $\alpha\beta$ , daya aktif sesaat (P) dan daya reaktif sesaat (Q) dapat direpresentasikan dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

Untuk pemodelan sistem menggunakan Matlab *Simulink* dapat dilihat pada Gambar 25;



Gambar 25 Perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) menggunakan blok pada matlab *Simulink*

Dari persamaan 12 diatas, daya aktif sesaat (P) dan daya reaktif sesaat (Q) terdiri dari komponen dc ( $\bar{p}$  dan  $\bar{q}$ ) dan komponen ac ( $\tilde{p}$  dan  $\tilde{q}$ ) yang diartikan sebagai komponen harmonisa sehingga:

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & \tilde{p} \\ \bar{q} & \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Besar arus sumber sebagai fungsi daya aktif sesaat (P) dan daya reaktif (Q) adalah:

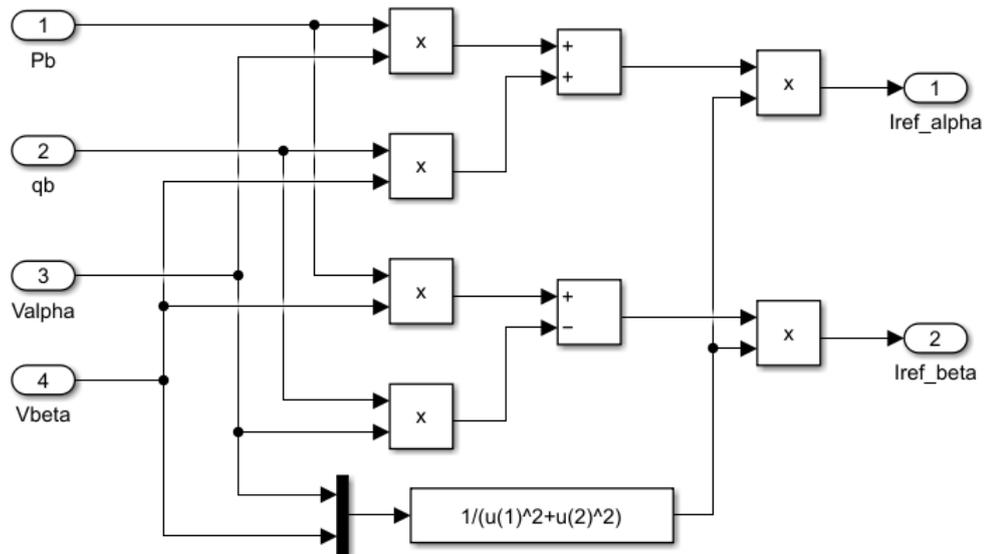
$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (16)$$

Untuk memisahkan komponen harmonisa arus sumber, daya P hanya menggunakan komponen ac  $\tilde{p}$ . kemudian ditambahkan dengan besarnya rugi daya dari VSI yang direpresentasikan sebagai Ploss. Sehingga arus referensi yang dibangkitkan adalah:

$$\tilde{p} = P - \bar{p} + P_{loss} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha-ref} \\ I_{\beta-ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ Q \end{bmatrix} \quad (18)$$

Untuk pemodelan sistem menggunakan Matlab *Simulink* dapat dilihat pada Gambar 26;

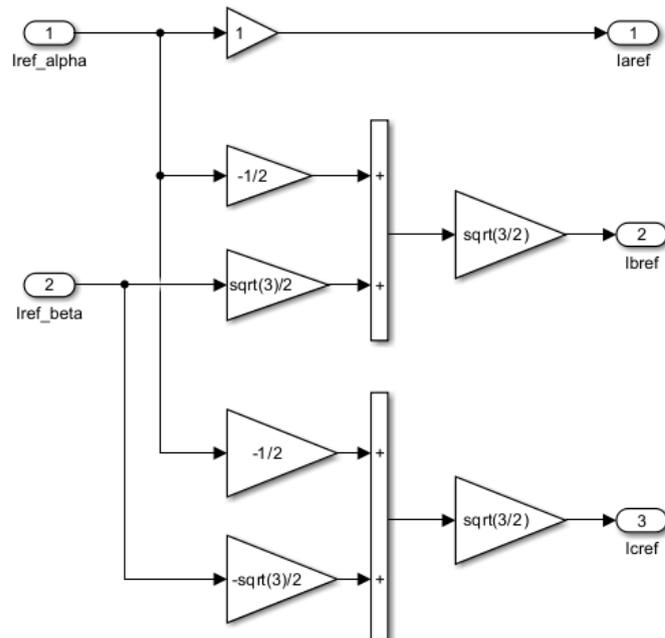


Gambar 26 Perhitungan arus referensi daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) menggunakan blok pada matlab *Simulink*

Arus referensi pada persamaan diatas kemudian ditransformasikan kembali dari koordinat  $\alpha\beta$  menjadi koordinat  $abc$  dengan persamaan:

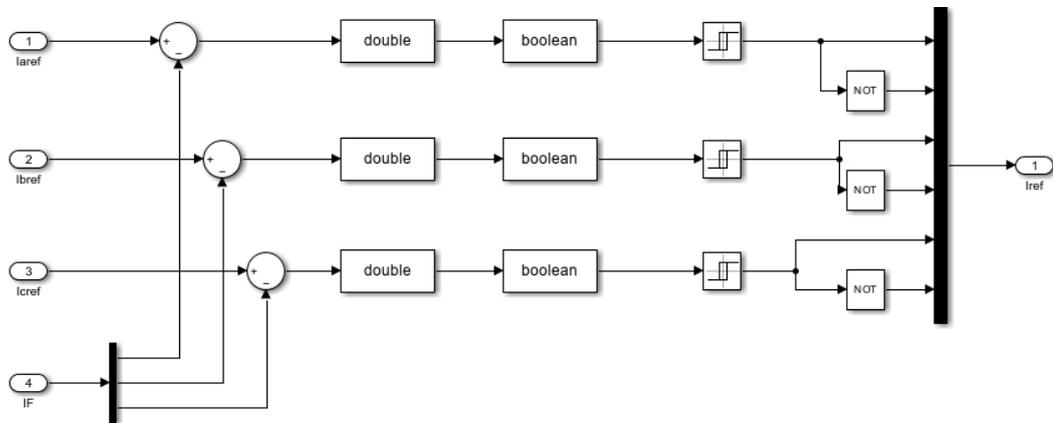
$$\begin{bmatrix} I_{a-ref} \\ I_{b-ref} \\ I_{c-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha-ref} \\ I_{\beta-ref} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Untuk pemodelan sistem menggunakan Matlab *Simulink* dapat dilihat pada Gambar 27;



Gambar 27 Inverse Transformasi Clark  $\alpha\beta$  to  $abc$  menggunakan matlab Simulink

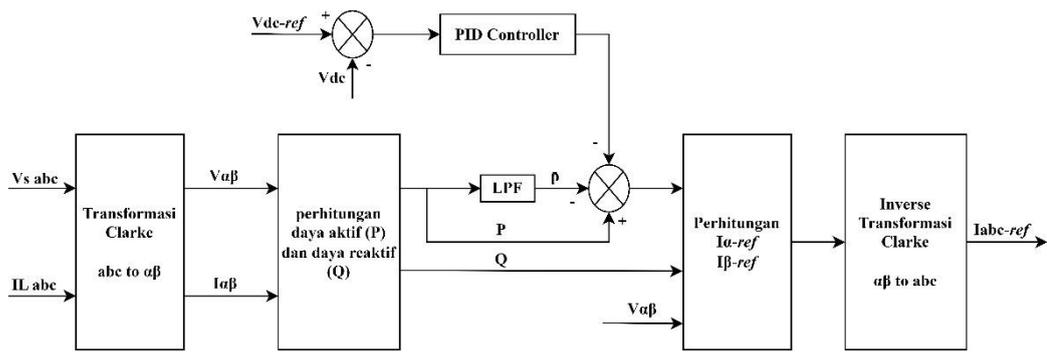
Selanjutnya arus referensi yang diperoleh menggunakan perhitungan teori pq dibandingkan dengan arus sumber yang diinjeksikan menggunakan *Linier current regulator*. Adapun rangkaian *Linier current regulator* dapat dilihat pada gambar 28;



Gambar 28 Rangkaian *Linier current regulator*

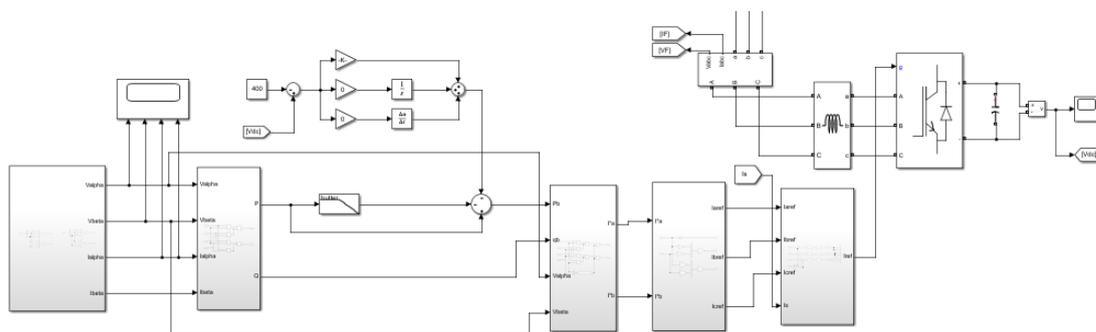
### 4.3 Pemodelan Pengontrolan PID

Diagram blok algoritma teori pq dengan pegontrolan PID dapat dilihat pada Gambar 29:



Gambar 29 Diagram blok algoritma pq dengan pengontrolan PID

Salah satu fase kontrol penting dari filter daya aktif shunt adalah untuk menjaga level tegangan DC yang stabil dengan cara mengatur tegangan DC-link. Secara umum, filter daya yang menggunakan inverter sumber tegangan untuk menghasilkan arus referensi harmonik terdiri dari kapasitor DC-link untuk penyimpanan energi. Secara hipotetis, tegangan kapasitor harus tetap konstan tanpa adanya pertukaran daya nyata antara filter dan jaringan AC. Secara praktis, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, inverter sumber tegangan mengkonsumsi sejumlah kecil daya nyata untuk operasi switching-nya. Oleh karena itu, untuk menjaga tegangan DC-link tetap konstan dan secara efektif mengkompensasi arus harmonik, pengendali *proportional-integral-derivative* digunakan dalam loop kontrol tegangan DC-link. Tegangan kapasitor DC-link ( $V_{dc}$ ) dibandingkan dengan tegangan DC referensi ( $V_{dc\_ref}$ ) dan error ( $V_{dc} - V_{dc\_ref}$ ) digunakan sebagai input ke pengendali PID, di mana error keadaan tunak dalam pelacakan sinyal arus referensi dihilangkan. Untuk penentuan parameter pengontrolan PID, dapat dilihat pada Gambar 30;

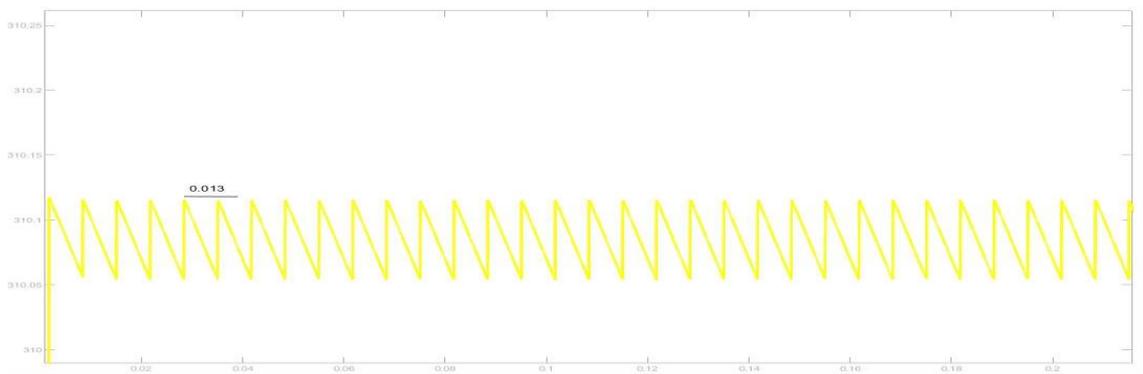


Gambar 30 Rangkaian simulasi tuning pengontrolan PID

Dalam menentukan parameter-parameter PID dapat dilakukan *tuning* PID yaitu untuk mencari nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Metode *tuning* PID yang digunakan pada

penelitian ini adalah metode Ziegler-Nichols. Dengan menggunakan matlab *Simulink* dapat ditentukan nilai  $K_c$  dan  $T_c$  yang nantinya akan disubstitusikan dalam persamaan Ziegler-Nichols seperti pada Tabel 9(b). Adapun Langkah-langkah dalam mencari nilai parameter PID adalah sebagai berikut:

1. Membuat rangkaian seperti pada Gambar 30;
2. Mengatur nilai waktu integral dengan nol ( $T_i = 0$ ) dan waktu derivative ( $T_d = 0$ ), dan atur nilai parameter proporsional  $K_p$  hingga mendapatkan osilasi yang stabil.



Gambar 31 Gelombang keluaran ketika nilai  $K_p = 0,043$

Pada simulasi ini, osilasi stabil ketika  $K_p$  bernilai 0,043 seperti yang dapat dilihat pada Gambar 31. Nilai  $K_p$  akan menjadi nilai  $K_c$ , sedangkan jarak satu gelombang saat osilasi stabil akan menjadi nilai  $T_c$ . nilai  $T_c$  yang didapatkan adalah 0,013 s. Nilai  $K_c$  dan  $T_c$  ini kemudian disubstitusikan pada Tabel 9(b) sehingga diperoleh nilai-nilai berikut:

Tabel 11 Nilai  $K_p, T_i$ , dan  $T_d$  dengan metode tuning Ziegler-Nichols

Pengendali	$K_p$	$T_i$	$T_d$
PID	$0,6(0,043) =$	$0,5(0,013) =$	$0,125(0,013) =$
	0,0258	0,0065	0,001625

Sehingga diperoleh nilai  $K_p, K_i$  dan  $K_d$  sebagai berikut:

1.  $K_p = 0.0258$
2.  $K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0,0258}{0,0065} = 3,97$
3.  $K_d = K_p \times T_d = 0,0258 \times 0,001625 = 4,192 \times 10^{-5}$

Setelah diperoleh nilai  $K_p, K_i$  dan  $K_d$  diatas, selanjutnya dimasukkan kedalam blok pengendali PID pada *software* Matlab *Simulink* lalu disimulasikan.

#### 4.4 Parameter Penyusun Rangkaian Simulasi

Pada simulasi ini, digunakan beberapa parameter-parameter dan pemodelan yang saling terhubung satu sama lain. Adapun parameter-parameter yang dimaksud dapat dilihat pada Tabel;

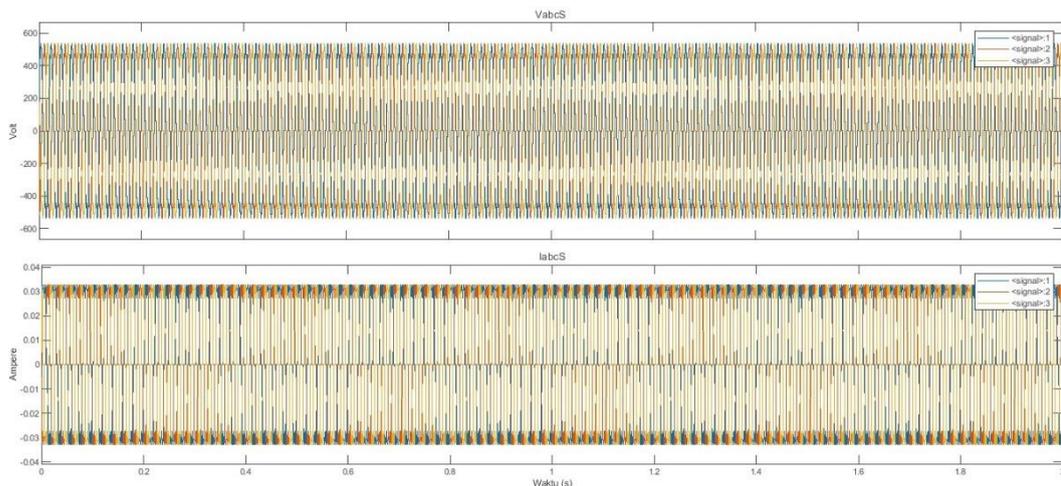
Tabel 12 Parameter penyusun rangkaian simulasi

Parameter	Nilai
Sumber tegangan AC 3 fasa	380V
Frekuensi	50Hz
Impedansi sumber	$R_s = 0,1\Omega$ ; $L_s = 10\text{mH}$
Impedansi filter	$L_f = 1.0\text{mH}$
DC-link Kapasitor	$1000\mu\text{F}$ ; 400V
$K_p$	0,0258
$K_i$	3,97
$K_d$	$4,192 \times 10^{-5}$

#### 4.5 Hasil Simulasi

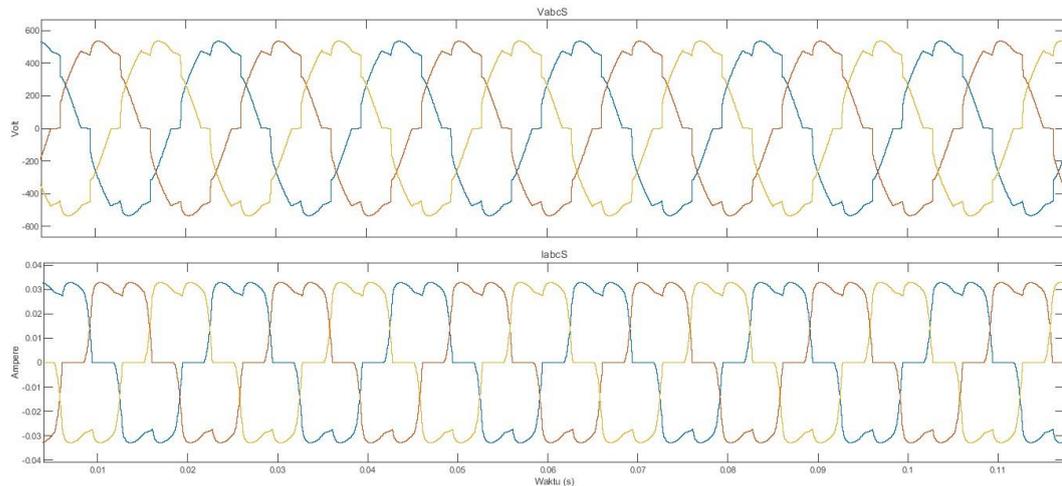
##### 4.5.1 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear

Hasil simulasi rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear menggunakan parameter-parameter penyusun rangkaian diatas dengan waktu simulasi 2 detik dapat dilihat pada Gambar 32;



Gambar 32 Gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear

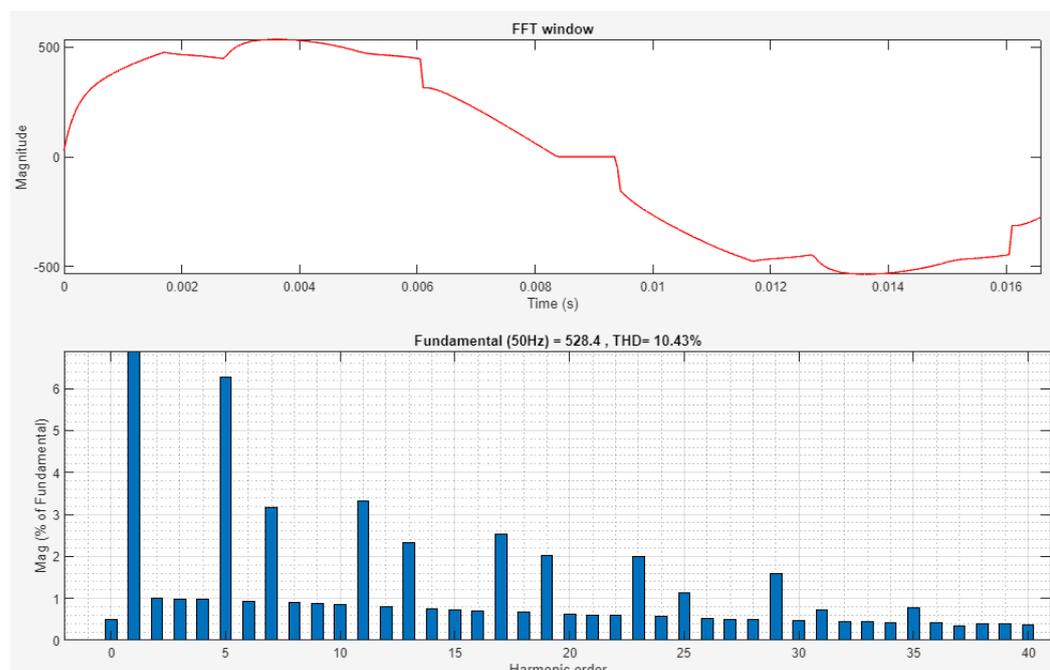
Tegangan dan arus AC pada sisi sumber dasarnya memiliki bentuk gelombang yang sinusoidal murni. Namun dengan adanya penggunaan beban non-linear yang terhubung dengan sistem menyebabkan gelombang sinusoidal murni pada sisi sumber terdistorsi. Gelombang terdistorsi diatas yang telah di *zoom* dapat dilihat pada Gambar 33;



Gambar 33 *Zoom* gelombang tegangan dan arus pada sisi sumber yang terdistorsi akibat beban non-linear

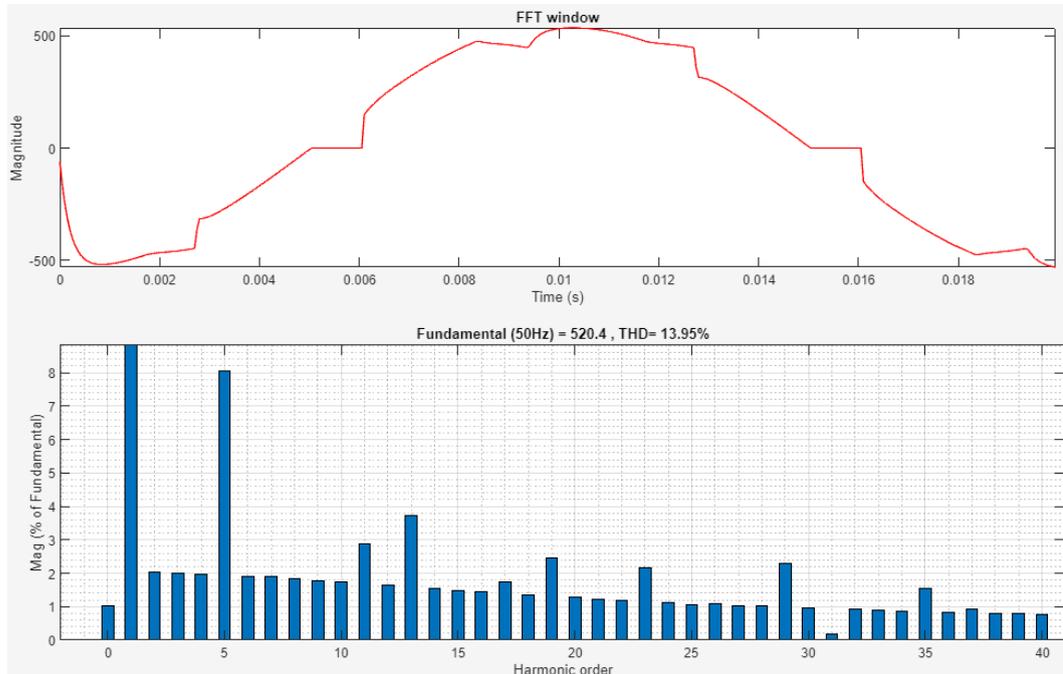
#### a) THD tegangan tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD tegangan untuk fasa R sebesar 10,43% dapat dilihat pada Gambar 34;



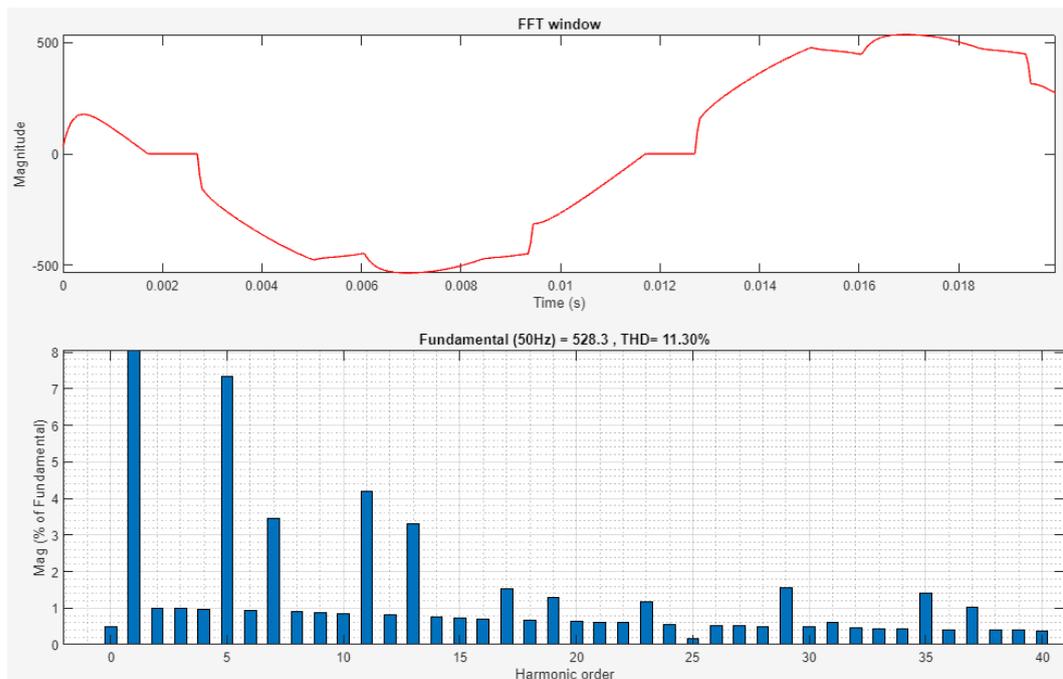
Gambar 34 Spektrum THDv fasa R tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD tegangan untuk fasa S sebesar 13,95% dapat dilihat pada Gambar 35;



Gambar 35 Spektrum THDv fasa S tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD tegangan untuk fasa T sebesar 11,30% dapat dilihat pada Gambar 36;



Gambar 36 Spektrum THDv fasa T tanpa filter

Berdasarkan Gambar 34, Gambar 35, dan Gambar 36 dapat diketahui pada tegangan sumber harmonisa tertinggi dan melebihi standar IEEE 519-2014 berada di orde ke 5 yang masing-masing fasa sebesar 6,27% untuk fasa R; 8,04% untuk fasa S; dan 7,33% untuk fasa T. untuk leboh jelasnya dapat dilihat pada Tabel 13;

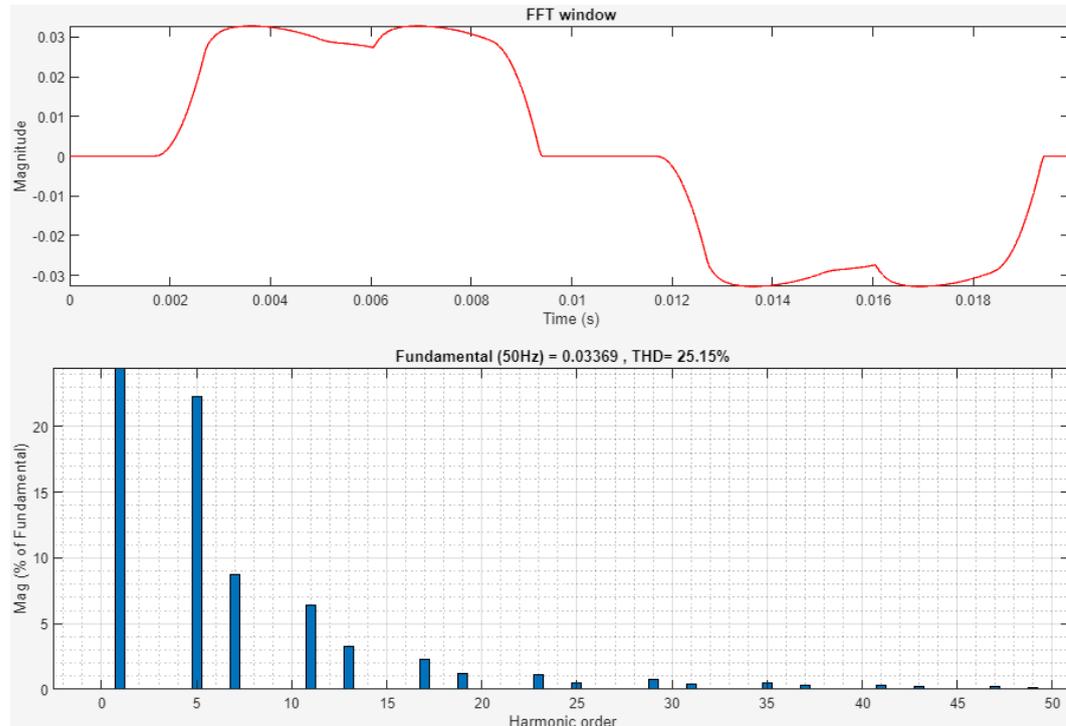
Tabel 13 THD tegangan sumber tanpa filter aktif

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	fundamental	100%	100%	100%
100	2	1,00%	2,02%	1,00%
150	3	0,98%	2,00%	0,99%
200	4	0,97%	1,98%	0,97%
250	5	6,27%	8,04%	7,33%
300	6	0,94%	1,91%	0,94%
350	7	3,17%	1,92%	3,45%
400	8	0,90%	1,82%	0,90%
450	9	0,88%	1,78%	0,88%
500	10	0,85%	1,73%	0,85%
550	11	3,32%	2,87%	4,18%
600	12	0,80%	1,63%	0,80%
650	13	2,33%	3,73%	3,30%
700	14	0,76%	1,54%	0,76%
750	15	0,73%	1,49%	0,73%
800	16	0,71%	1,44%	0,71%
850	17	2,52%	1,73%	1,52%
900	18	0,67%	1,36%	0,67%
950	19	2,01%	2,46%	1,30%
1000	20	0,63%	1,28%	0,63%
1050	21	0,60%	1,23%	0,61%
1100	22	0,59%	1,20%	0,59%
1150	23	2,01%	2,17%	1,16%
1200	24	0,56%	1,14%	0,56%
1250	25	1,12%	1,05%	0,18%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1300	26	0,53%	1,07%	0,53%
1350	27	0,51%	1,04%	0,51%
1400	28	0,50%	1,02%	0,50%
1450	29	1,59%	2,29%	1,56%
1500	30	0,48%	0,97%	0,48%
1550	31	0,72%	0,19%	0,60%
1600	32	0,45%	0,92%	0,45%
1650	33	0,45%	0,91%	0,44%
1700	34	0,43%	0,88%	0,43%
1750	35	0,79%	1,53%	1,39%
1800	36	0,41%	0,84%	0,41%
1850	37	0,35%	0,93%	1,03%
1900	38	0,39%	0,80%	0,39%
1950	39	0,40%	0,80%	0,39%
2000	40	0,38%	0,77%	0,38%
2050	41	0,39%	0,65%	0,94%
2100	42	0,36%	0,74%	0,36%
2150	43	0,60%	1,19%	0,84%
2200	44	0,35%	0,71%	0,35%
2250	45	0,35%	0,71%	0,35%
2300	46	0,34%	0,68%	0,34%
2350	47	0,67%	0,15%	0,54%
2400	48	0,32%	0,66%	0,32%
2450	49	0,74%	1,12%	0,61%
2500	50	0,31%	0,64%	0,31%
<b>THD<sub>v</sub></b>		<b>10,43%</b>	<b>13,95%</b>	<b>11,30%</b>

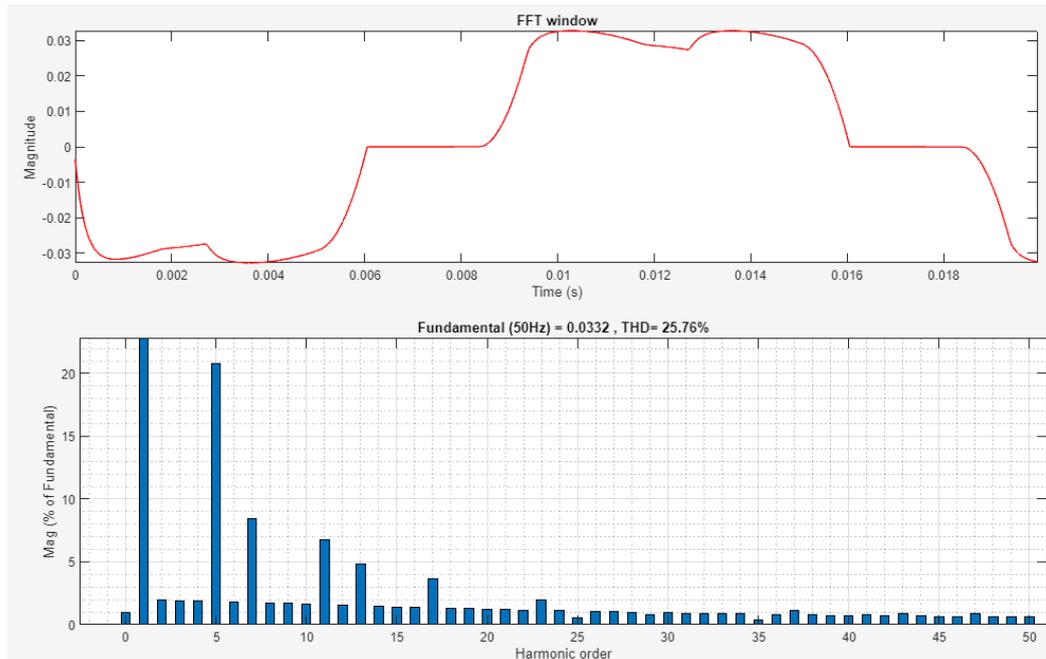
b) THD arus tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD arus untuk fasa R sebesar 25,15% dapat dilihat pada Gambar 37;



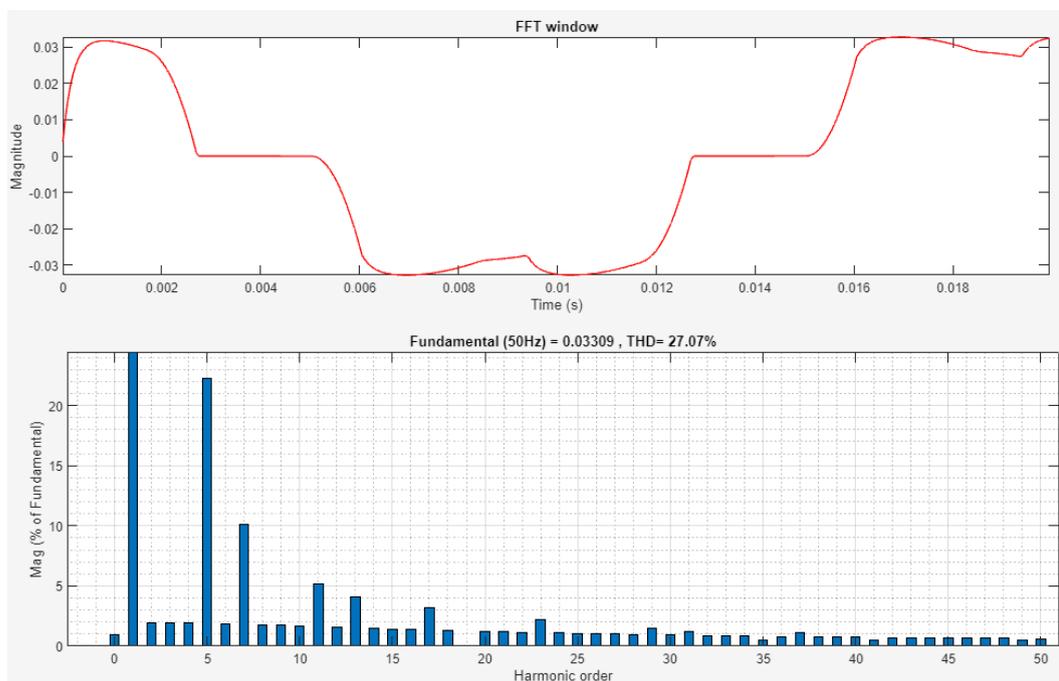
Gambar 37 Spektrum THDi fasa R tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD arus untuk fasa S sebesar 25,76% dapat dilihat pada Gambar 38;



Gambar 38 Spektrum THDi fasa S tanpa filter

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear tanpa menggunakan filter aktif memperoleh nilai THD arus untuk fasa T sebesar 27,07% dapat dilihat pada Gambar 39;



Gambar 39 Spektrum THDi fasa T tanpa filter

Berdasarkan Gambar 37, Gambar 38, dan Gambar 39 dapat diketahui pada harmonisa arus sumber tertinggi berada di orde ke 5 yang masing-masing fasa sebesar 22,24% untuk fasa R; 20,78% untuk fasa S; dan 22,24% untuk fasa T juga

pada orde ke 7 yang masing-masing fasa sebesar 8,72% untuk fasa R; 8,41% untuk fasa S; dan 10,14% untuk fasa T. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 14;

Tabel 14 THD arus sumber tanpa filter aktif

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	fundamental	100%	100%	100%
100	2	0,00%	1,94%	1,95%
150	3	0,00%	1,93%	1,94%
200	4	0,00%	1,90%	1,91%
250	5	22,24%	20,78%	22,24%
300	6	0,00%	1,84%	1,84%
350	7	8,72%	8,41%	10,14%
400	8	0,00%	1,75%	1,76%
450	9	0,00%	1,71%	1,71%
500	10	0,00%	1,66%	1,67%
550	11	6,45%	6,72%	5,21%
600	12	0,00%	1,57%	1,57%
650	13	3,23%	4,79%	4,08%
700	14	0,00%	1,48%	1,48%
750	15	0,00%	1,42%	1,43%
800	16	0,00%	1,39%	1,39%
850	17	2,31%	3,69%	3,19%
900	18	0,00%	1,31%	1,31%
950	19	1,23%	1,29%	0,04%
1000	20	0,00%	1,23%	1,23%
1050	21	0,00%	1,19%	1,20%
1100	22	0,00%	1,16%	1,16%
1150	23	1,09%	1,94%	2,24%
1200	24	0,00%	1,09%	1,10%
Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1250	25	0,48 %	0,59%	1,02%

1300	26	0,00%	1,03%	1,04%
1350	27	0,00%	1,01%	1,01%
1400	28	0,00%	0,98%	0,98%
1450	29	0,76%	0,78%	1,44%
1500	30	0,00%	0,93%	0,93%
1550	31	0,39%	0,86%	1,20%
1600	32	0,00%	0,89%	0,89%
1650	33	0,00%	0,87%	0,87%
1700	34	0,00%	0,84%	0,85%
1750	35	0,50%	0,39%	0,53%
1800	36	0,00%	0,81%	0,81%
1850	37	0,33%	1,10%	1,10%
1900	38	0,00%	0,77%	0,77%
1950	39	0,00%	0,75%	0,76%
2000	40	0,00%	0,74%	0,74%
2050	41	0,32%	0,78%	0,46%
2100	42	0,00%	0,71%	0,71%
2150	43	0,22%	0,87%	0,67%
2200	44	0,00%	0,68%	0,69%
2250	45	0,00%	0,66%	0,67%
2300	46	0,00%	0,66%	0,66%
2350	47	0,26%	0,89%	0,70%
2400	48	0,00%	0,63%	0,64%
2450	49	0,16%	0,60%	0,47%
2500	50	0,00%	0,61%	0,61%
<b>THDi</b>		<b>25,15%</b>	<b>25,76%</b>	<b>27,07%</b>

Untuk beberapa konfigurasi *rectifier* dan jenis beban, fase R dapat mengalami pembatalan harmonik pada orde tertentu akibat efek penjumlahan vektor atau fase yang saling meniadakan. Rectifier tiga fasa biasanya menghasilkan distorsi harmonik pada arus yang signifikan karena bentuk arusnya sangat bergantung pada sifat beban dan karakteristik penyearah. Pada umumnya, harmonik arus utama yang

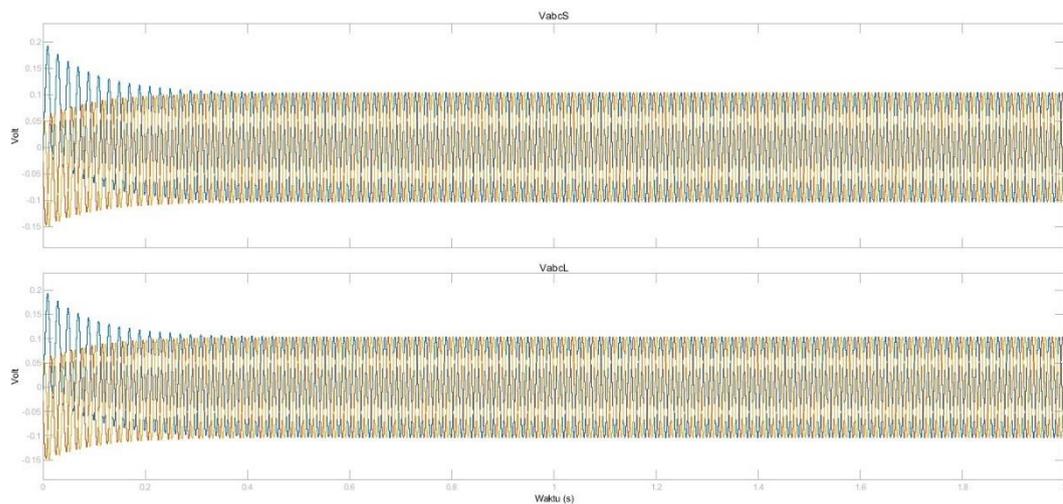
muncul adalah harmonik urutan ganjil yang berlipat tiga, seperti harmonik ke-5, ke-7, ke-11, dan seterusnya. Hasil pengukuran parameter lain pada simulasi rangkaian tanpa filter dapat dilihat pada Tabel 15;

Tabel 15 Hasil pengukuran rangkaian tanpa filter aktif

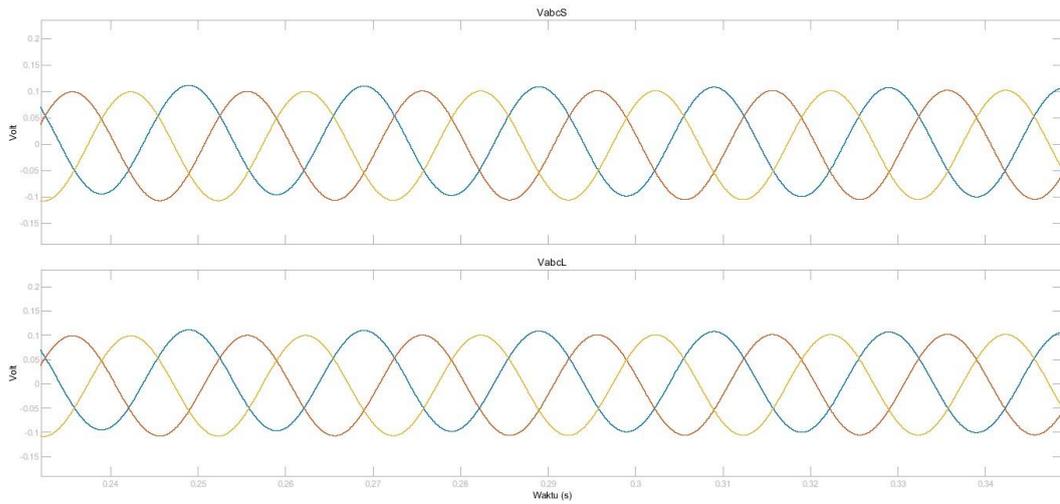
Parameter Terukur	Nilai Terukur		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<b>THD<sub>v</sub></b>	10,43%	13,95%	11,30%
<b>THD<sub>i</sub></b>	25,15%	25,76%	27,07%
<b>P</b>	25,95 Watt		
<b>Q</b>	14,98 VAr		
<b>S</b>	29,96 VA		
<b>Faktor Daya</b>	0,866		

#### 4.5.2 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa

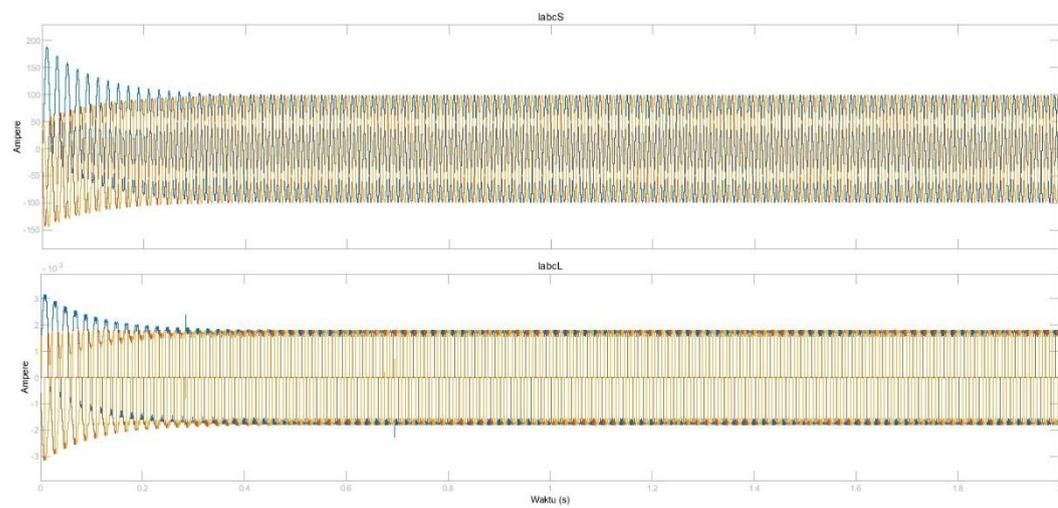
Hasil simulasi rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan menggunakan parameter-parameter penyusun rangkaian sesuai dengan Tabel 12 diatas dengan waktu simulasi 2 detik dapat dilihat pada gambar 40 dan 42;



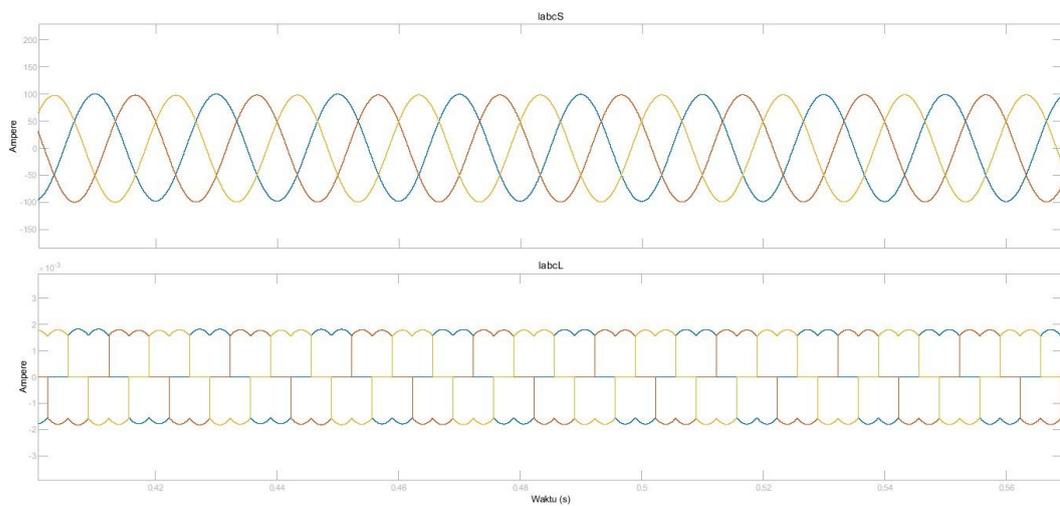
Gambar 40 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa



Gambar 41 *Zoom* gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa



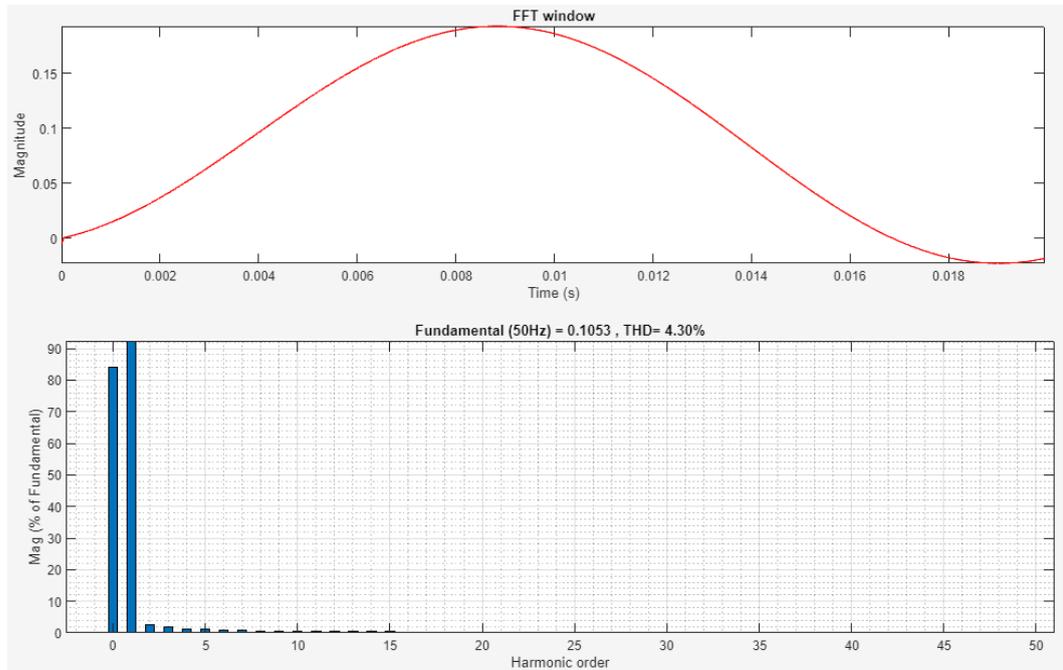
Gambar 42 Gelombang Arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa



Gambar 43 *Zoom* gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

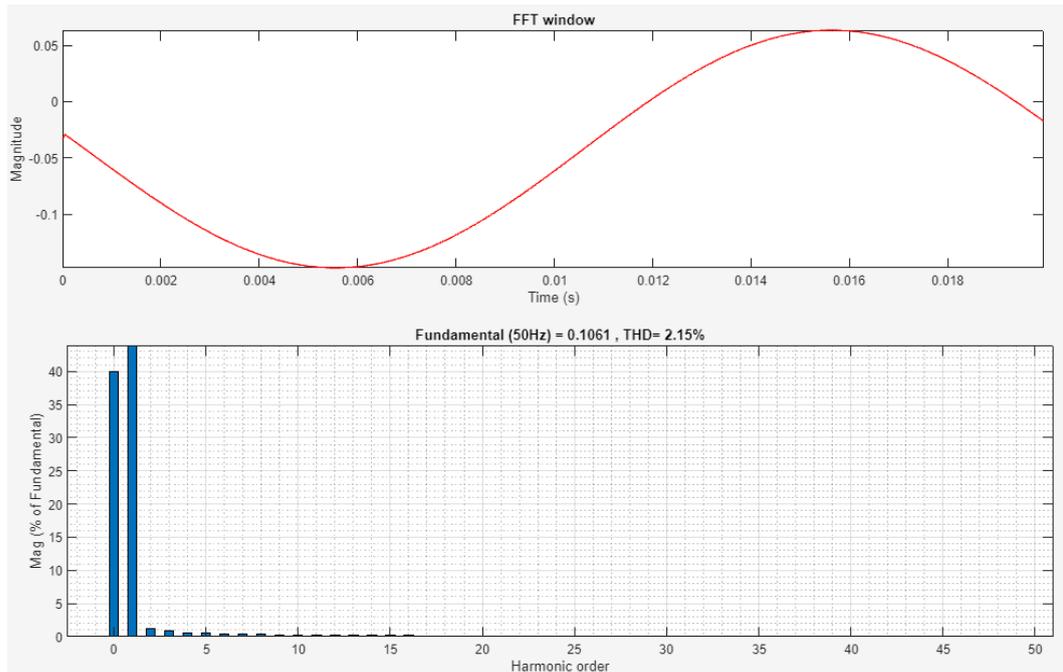
a) THD tegangan setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter 3 fasa aktif diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa R sebesar 4,30% dapat dilihat pada Gambar 44;



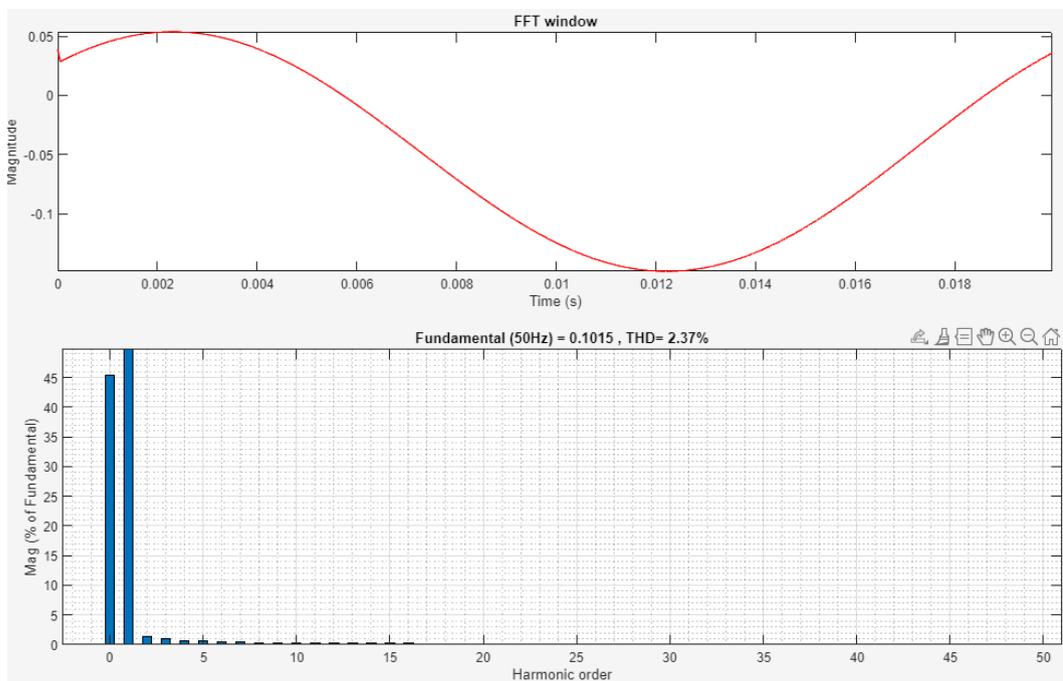
Gambar 44 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa R sebesar 2,15% dapat dilihat pada Gambar 45;



Gambar 45 Spektrum THDv fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa T sebesar 2,37% dapat dilihat pada Gambar 46;



Gambar 46 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Berdasarkan Gambar 44, Gambar 45, dan Gambar 46 dapat diketahui pada harmonisa tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk fasa R, S,

T masing-masing adalah 4,30%; 2,15% dan 2,37%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 16;

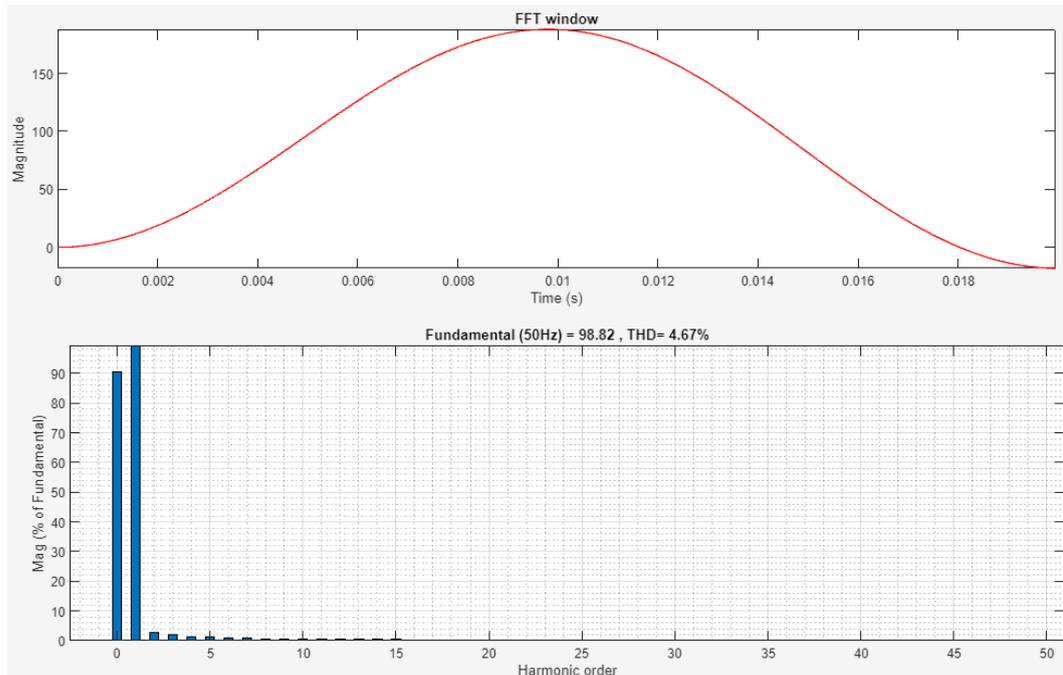
Tabel 16 THD Tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	fundamental	100%	100%	100%
100	2	2,91%	1,36%	1,56%
150	3	1,94%	0,91%	1,04%
200	4	1,45%	0,68%	0,78%
250	5	1,16%	0,54%	0,62%
300	6	0,97%	0,45%	0,52%
350	7	0,83%	0,39%	0,44%
400	8	0,73%	0,34%	0,39%
450	9	0,65%	0,30%	0,35%
500	10	0,58%	0,27%	0,31%
550	11	0,53%	0,25%	0,28%
600	12	0,49%	0,23%	0,26%
650	13	0,45%	0,21%	0,24%
700	14	0,42%	0,19%	0,22%
750	15	0,39%	0,18%	0,21%
800	16	0,36%	0,17%	0,20%
850	17	0,34%	0,16%	0,18%
900	18	0,32%	0,15%	0,17%
950	19	0,31%	0,14%	0,16%
1000	20	0,29%	0,14%	0,16%
1050	21	0,28%	0,13%	0,15%
1100	22	0,27%	0,12%	0,14%
1150	23	0,25%	0,12%	0,13%
1200	24	0,24%	0,11%	0,13%
1250	25	0,23%	0,11%	0,12%
1300	26	0,23%	0,11%	0,12%
1350	27	0,22%	0,10%	0,12%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1400	28	0,21%	0,10%	0,11%
1450	29	0,20%	0,09%	0,11%
1500	30	0,20%	0,09%	0,10%
1550	31	0,19%	0,09%	0,10%
1600	32	0,18%	0,09%	0,10%
1650	33	0,18%	0,08%	0,09%
1700	34	0,17%	0,08%	0,09%
1750	35	0,17%	0,08%	0,09%
1800	36	0,16%	0,08%	0,09%
1850	37	0,16%	0,07%	0,09%
1900	38	0,15%	0,07%	0,08%
1950	39	0,15%	0,07%	0,08%
2000	40	0,15%	0,07%	0,08%
2050	41	0,14%	0,07%	0,08%
2100	42	0,14%	0,07%	0,08%
2150	43	0,14%	0,06%	0,07%
2200	44	0,13%	0,06%	0,07%
2250	45	0,13%	0,06%	0,07%
2300	46	0,13%	0,06%	0,07%
2350	47	0,13%	0,06%	0,07%
2400	48	0,12%	0,06%	0,07%
2450	49	0,12%	0,06%	0,07%
2500	50	0,12%	0,06%	0,06%
<b>THD<sub>v</sub></b>		<b>4,30%</b>	<b>2,15%</b>	<b>2,37%</b>

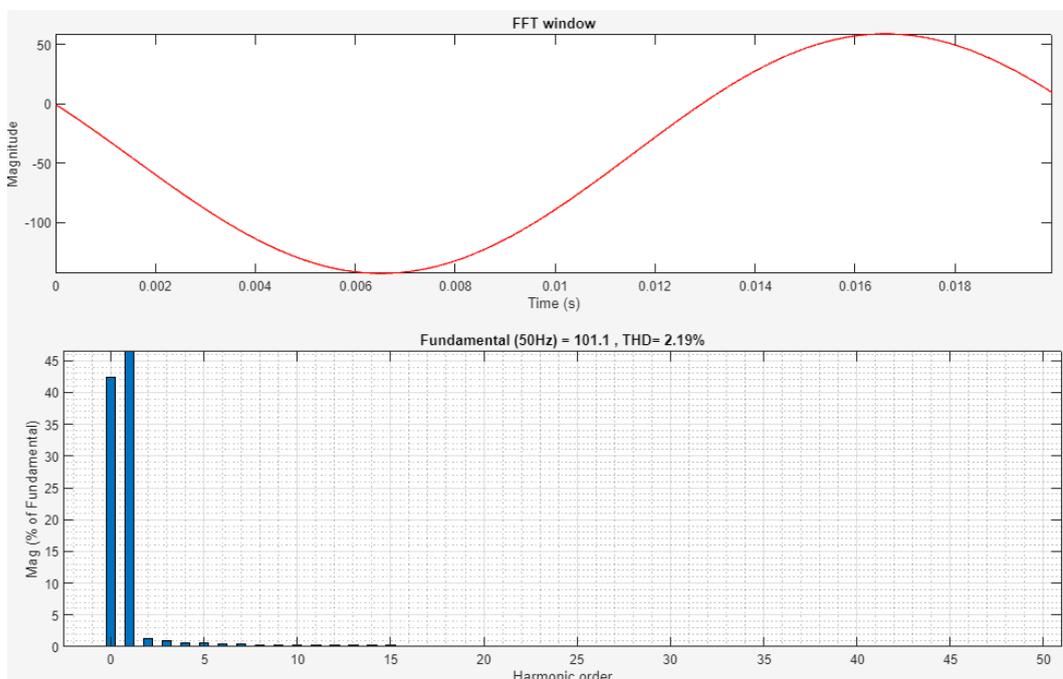
b) THD arus setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa diperoleh nilai THD arus untuk fasa R sebesar 4,67% dapat dilihat pada Gambar 47;



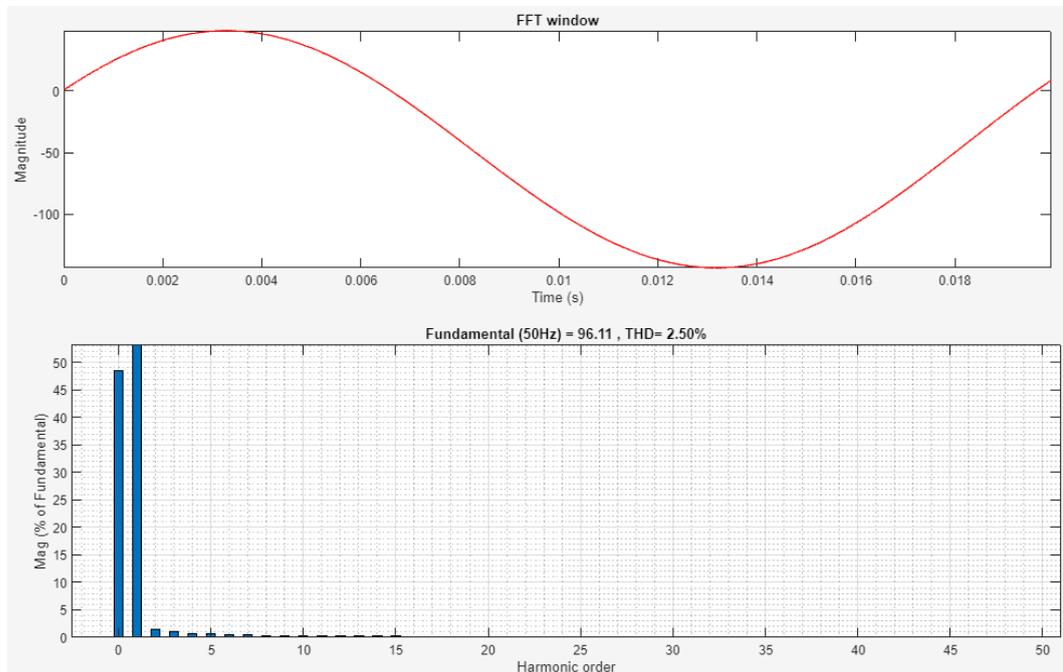
Gambar 47 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa diperoleh nilai THD arus untuk fasa R sebesar 2,19% dapat dilihat pada Gambar 48;



Gambar 48 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa diperoleh nilai THD arus untuk fasa T sebesar 2,50% dapat dilihat pada Gambar 49;



Gambar 49 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Berdasarkan Gambar 47, Gambar 48, dan Gambar 49 dapat diketahui pada harmonisa arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk fasa R, S, T masing-masing adalah 4,67%; 2,19% dan 2,50%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 17;

Tabel 17 THD Arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	fundamental	100%	100%	100%
100	2	2,91%	1,36%	1,56%
150	3	1,94%	0,91%	1,04%
200	4	1,45%	0,68%	0,78%
250	5	1,16%	0,54%	0,62%
300	6	0,97%	0,45%	0,52%
350	7	0,83%	0,39%	0,44%
400	8	0,73%	0,34%	0,39%

Frekuensi	Orde	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
450	9	0,65%	0,30%	0,35%
500	10	0,58%	0,27%	0,31%
550	11	0,53%	0,25%	0,28%
600	12	0,49%	0,23%	0,26%
650	13	0,45%	0,21%	0,24%
700	14	0,42%	0,19%	0,22%
750	15	0,39%	0,18%	0,21%
800	16	0,36%	0,17%	0,20%
850	17	0,34%	0,16%	0,18%
900	18	0,32%	0,15%	0,17%
950	19	0,31%	0,14%	0,16%
1000	20	0,29%	0,14%	0,16%
1050	21	0,28%	0,13%	0,15%
1100	22	0,27%	0,12%	0,14%
1150	23	0,25%	0,12%	0,14%
1200	24	0,24%	0,11%	0,13%
1250	25	0,23%	0,11%	0,13%
1300	26	0,23%	0,11%	0,12%
1350	27	0,22%	0,10%	0,12%
1400	28	0,21%	0,10%	0,11%
1450	29	0,20%	0,09%	0,11%
1500	30	0,20%	0,09%	0,10%
1550	31	0,19%	0,09%	0,10%
1600	32	0,18%	0,09%	0,10%
1650	33	0,18%	0,08%	0,10%
1700	34	0,17%	0,08%	0,09%
1750	35	0,17%	0,08%	0,09%
1800	36	0,16%	0,08%	0,09%
1850	37	0,16%	0,07%	0,09%

Frekuensi	Orde	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1900	38	0,16%	0,07%	0,08%
1950	39	0,15%	0,07%	0,08%
2000	40	0,15%	0,07%	0,08%
2050	41	0,14%	0,07%	0,08%
2100	42	0,14%	0,07%	0,08%
2150	43	0,14%	0,06%	0,07%
2200	44	0,13%	0,06%	0,07%
2250	45	0,13%	0,06%	0,07%
2300	46	0,13%	0,06%	0,07%
2350	47	0,13%	0,06%	0,07%
2400	48	0,12%	0,06%	0,07%
2450	49	0,12%	0,06%	0,07%
2500	50	0,12%	0,06%	0,06%
<b>THDi</b>		<b>4,67%</b>	<b>2,19%</b>	<b>2,50%</b>

Hasil pengukuran parameter lain pada simulasi rangkaian tanpa filter dapat dilihat pada Tabel 18;

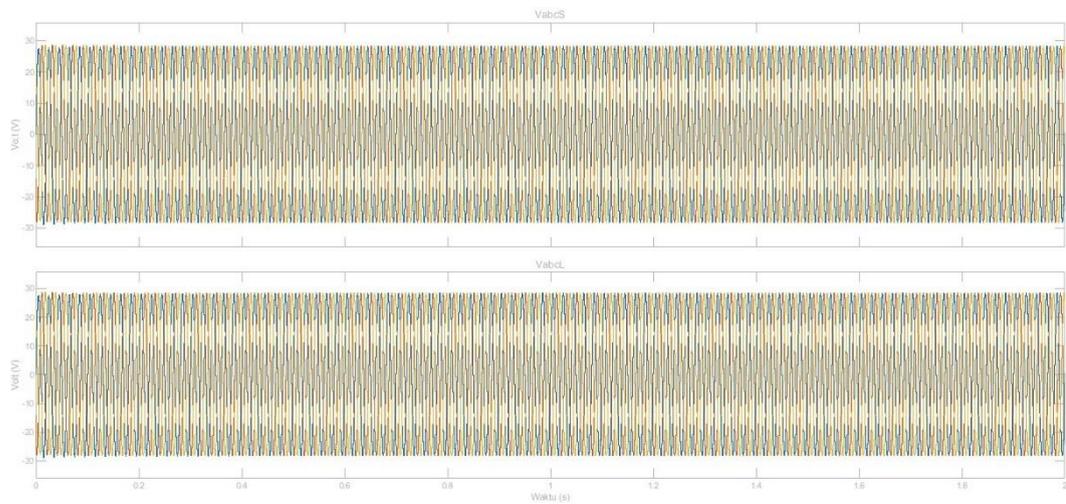
Tabel 18 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif 3 fasa

Parameter Terukur	Nilai Terukur		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<b>THDv</b>	4,30%	2,15%	2,37%
<b>THDi</b>	4,67%	2,19%	2,50%
<b>P</b>	14,61 Watt		
<b>Q</b>	4,59 Var		
<b>S</b>	15,31 VA		
<b>Faktor Daya</b>	0,954		

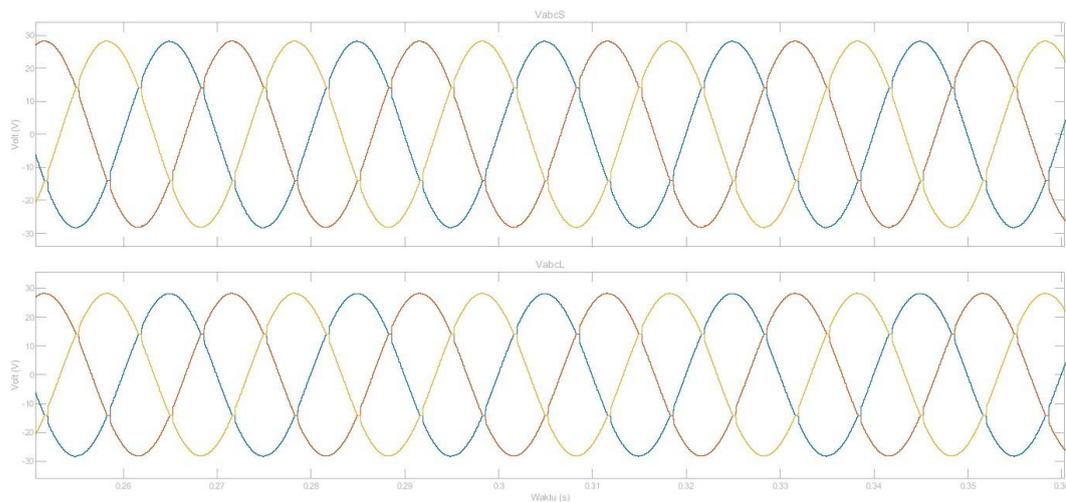
#### 4.5.3 Simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Hasil simulasi rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID menggunakan parameter-parameter penyusun

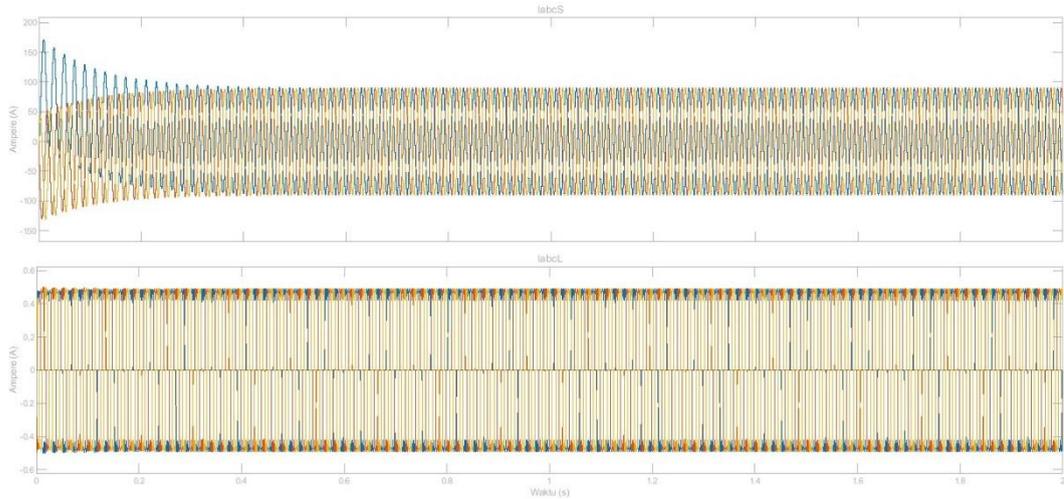
rangkaian sesuai dengan Tabel 12 diatas dengan waktu simulasi 2 detik dapat dilihat pada gambar 50 dan gambar 52;



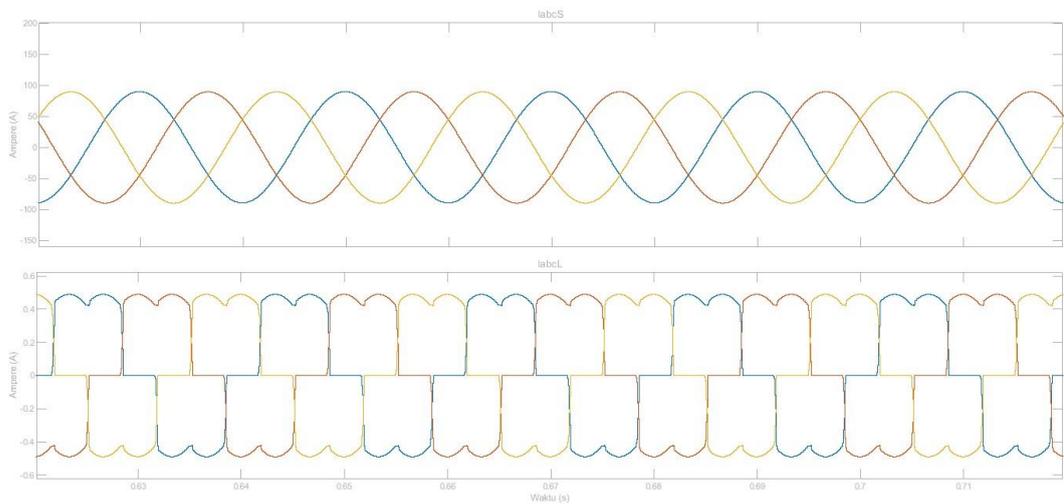
Gambar 50 Gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID



Gambar 51 *Zoom* gelombang tegangan sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

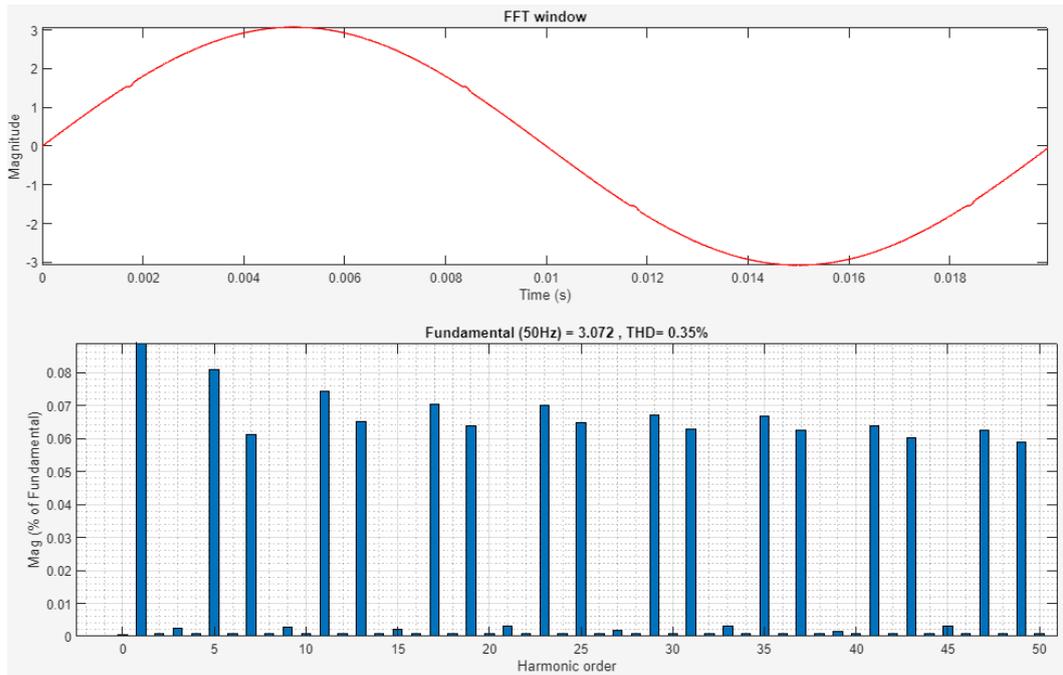


Gambar 52 Gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID



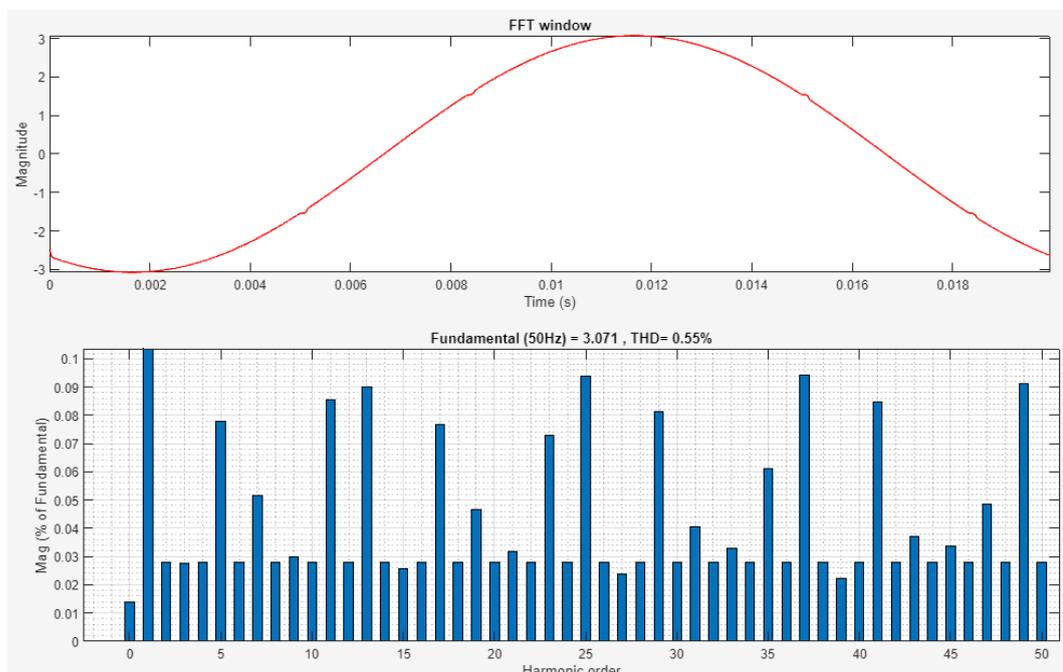
Gambar 53 Zoom gelombang arus sumber dan beban setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

- a) THD tegangan setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID
- Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa R sebesar 0,35% dapat dilihat pada Gambar 54;



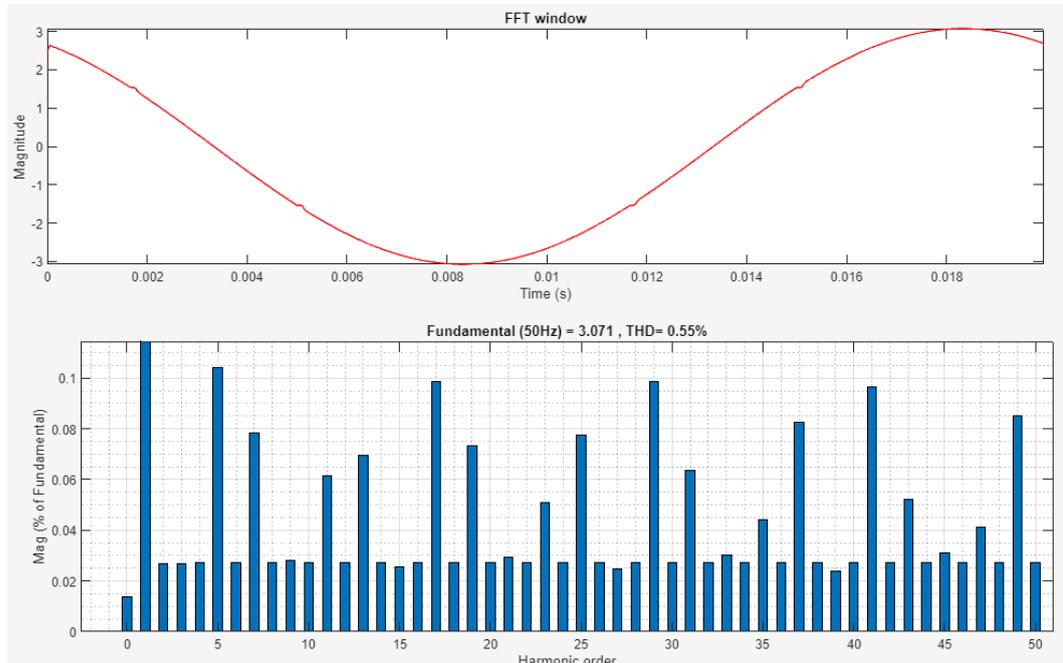
Gambar 54 Spektrum THDv fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa S sebesar 0,55% dapat dilihat pada Gambar 55;



Gambar 55 Spektrum THDv fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD tegangan untuk fasa T sebesar 0,55% dapat dilihat pada Gambar 56;



Gambar 56 Spektrum THDv fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Berdasarkan Gambar 54, Gambar 55, dan Gambar 56 dapat diketahui pada harmonisa tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID untuk fasa R, S, T masing-masing adalah 0,35%; 0,55% dan 0,55%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 19;

Tabel 19 THD Tegangan sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

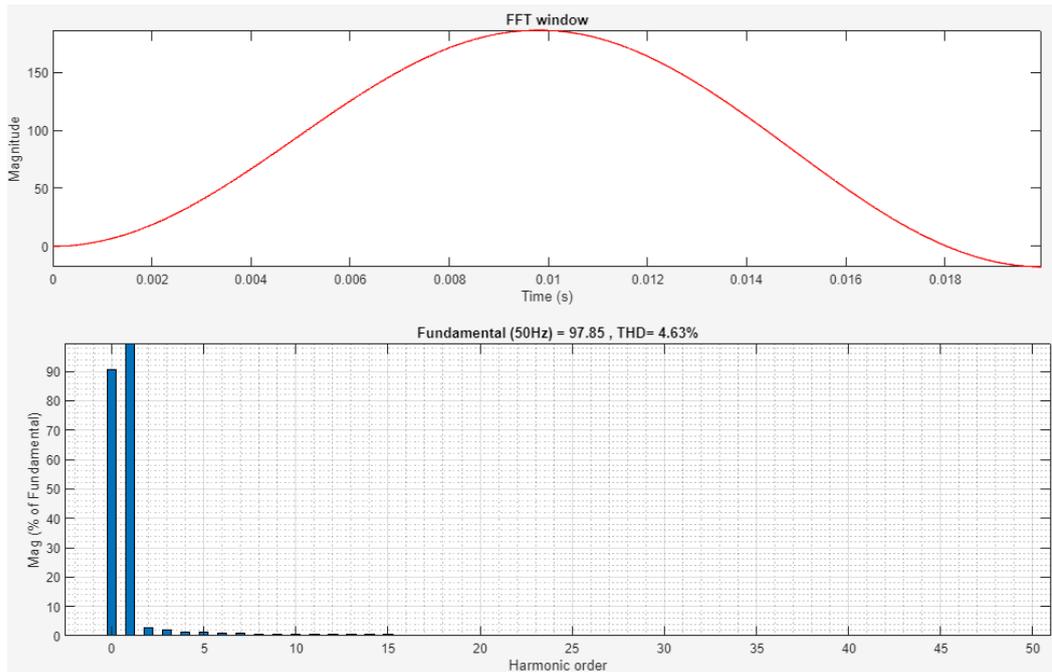
Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	Fundamental	100%	100%	100%
100	2	0,00%	0,03%	0,03%
150	3	0,00%	0,03%	0,03%
200	4	0,00%	0,03%	0,03%
250	5	0,08%	0,08%	0,10%
300	6	0,00%	0,03%	0,03%
350	7	0,06%	0,05%	0,08%
400	8	0,00%	0,03%	0,03%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
450	9	0,00%	0,03%	0,03%
500	10	0,00%	0,03%	0,03%
550	11	0,07%	0,09%	0,06%
600	12	0,00%	0,03%	0,03%
650	13	0,07%	0,09%	0,07%
700	14	0,00%	0,03%	0,03%
750	15	0,00%	0,03%	0,03%
800	16	0,00%	0,03%	0,03%
850	17	0,07%	0,08%	0,10%
900	18	0,00%	0,03%	0,03%
950	19	0,06%	0,05%	0,07%
1000	20	0,00%	0,03%	0,03%
1050	21	0,00%	0,03%	0,03%
1100	22	0,00%	0,03%	0,03%
1150	23	0,07%	0,07%	0,05%
1200	24	0,00%	0,03%	0,03%
1250	25	0,06%	0,09%	0,08%
1300	26	0,00%	0,03%	0,03%
1350	27	0,00%	0,02%	0,02%
1400	28	0,00%	0,03%	0,03%
1450	29	0,07%	0,08%	0,10%
1500	30	0,00%	0,03%	0,03%
1550	31	0,06%	0,04%	0,06%
1600	32	0,00%	0,03%	0,03%
1650	33	0,00%	0,03%	0,03%
1700	34	0,00%	0,03%	0,03%
1750	35	0,07%	0,06%	0,04%
1800	36	0,00%	0,03%	0,03%
1850	37	0,06%	0,09%	0,08%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Tegangan Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1900	38	0,00%	0,03%	0,03%
1950	39	0,00%	0,02%	0,02%
2000	40	0,00%	0,03%	0,03%
2050	41	0,06%	0,08%	0,10%
2100	42	0,00%	0,03%	0,03%
2150	43	0,06%	0,04%	0,05%
2200	44	0,00%	0,03%	0,03%
2250	45	0,00%	0,03%	0,03%
2300	46	0,00%	0,03%	0,03%
2350	47	0,06%	0,05%	0,04%
2400	48	0,00%	0,03%	0,03%
2450	49	0,06%	0,09%	0,08%
2500	50	0,00%	0,03%	0,03%
<b>THD<sub>v</sub></b>		<b>0,35%</b>	<b>0,55%</b>	<b>0,55%</b>

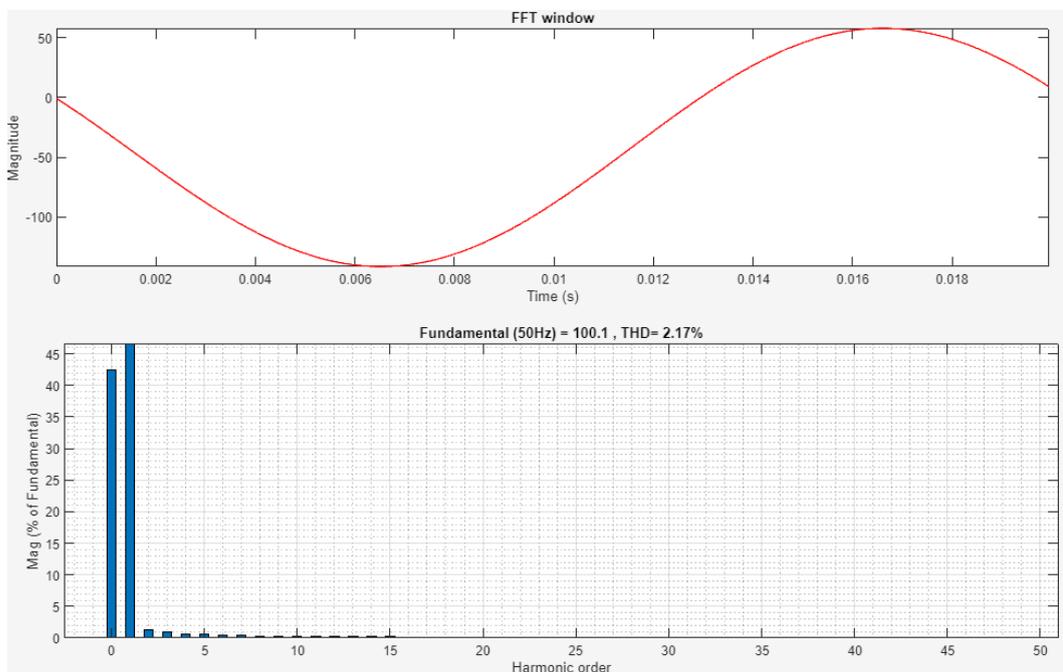
b) THD arus setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrolan PID

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD arus untuk fasa R sebesar 4,63% dapat dilihat pada Gambar 57;



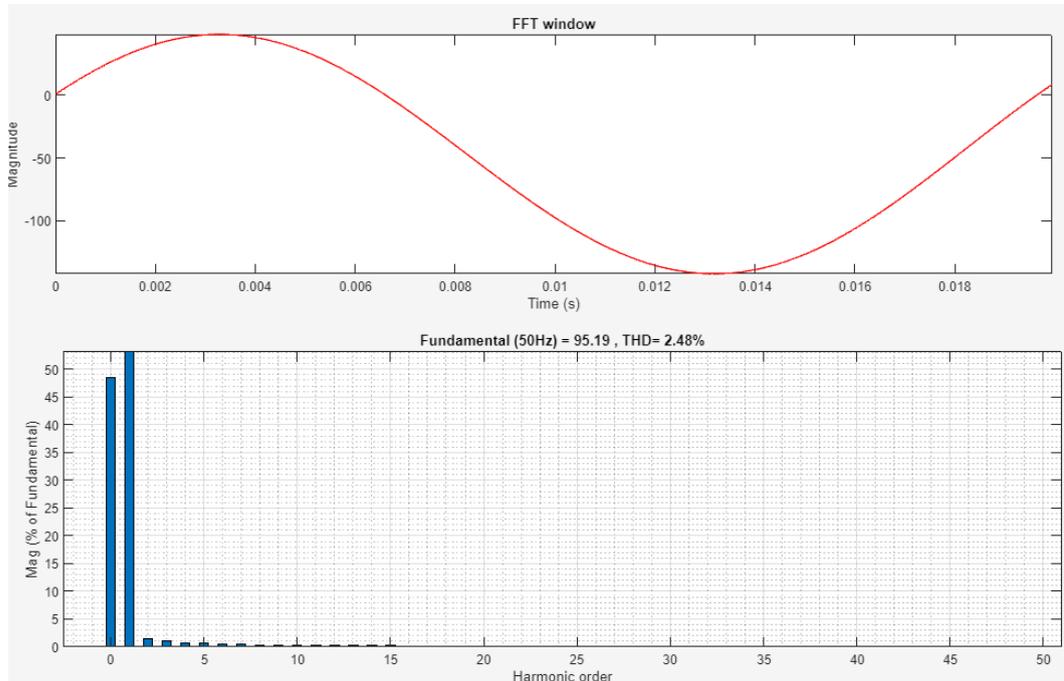
Gambar 57 Spektrum THDi fasa R setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD arus untuk fasa S sebesar 2,17% dapat dilihat pada Gambar 58;



Gambar 58 Spektrum THDi fasa S setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Pada rangkaian 3 fasa dengan beban non-linear setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID diperoleh nilai THD arus untuk fasa T sebesar 2,48% dapat dilihat pada Gambar 59;



Gambar 59 Spektrum THDi fasa T setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Berdasarkan Gambar 57, Gambar 58, dan Gambar 59 dapat diketahui harmonisa arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID untuk fasa R, S, T masing-masing adalah 4,63%; 2,17% dan 2,48%. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 20;

Tabel 20 THD Arus sumber setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
50	Fundamental	100%	100%	100%
100	2	2,88%	1,35%	1,54%
150	3	1,92%	0,90%	1,03%
200	4	1,44%	0,68%	0,77%
250	5	1,15%	0,54%	0,62%
300	6	0,96%	0,45%	0,51%
350	7	0,82%	0,39%	0,44%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
400	8	0,72%	0,34%	0,39%
450	9	0,64%	0,30%	0,34%
500	10	0,58%	0,27%	0,31%
550	11	0,52%	0,25%	0,28%
600	12	0,48%	0,23%	0,26%
650	13	0,44%	0,21%	0,24%
700	14	0,41%	0,19%	0,22%
750	15	0,38%	0,18%	0,21%
800	16	0,36%	0,17%	0,19%
850	17	0,34%	0,16%	0,18%
900	18	0,32%	0,15%	0,17%
950	19	0,30%	0,14%	0,16%
1000	20	0,29%	0,14%	0,15%
1050	21	0,28%	0,13%	0,15%
1100	22	0,26%	0,12%	0,14%
1150	23	0,25%	0,12%	0,13%
1200	24	0,24%	0,11%	0,13%
1250	25	0,23%	0,11%	0,12%
1300	26	0,22%	0,10%	0,12%
1350	27	0,22%	0,10%	0,12%
1400	28	0,21%	0,10%	0,11%
1450	29	0,20%	0,09%	0,11%
1500	30	0,19%	0,09%	0,10%
1550	31	0,19%	0,09%	0,10%
1600	32	0,18%	0,09%	0,10%
1650	33	0,18%	0,08%	0,09%
1700	34	0,17%	0,08%	0,09%
1750	35	0,17%	0,08%	0,09%
1800	36	0,16%	0,08%	0,09%

Frekuensi	Orde (h)	Persen Terhadap Arus Fundamental		
		Fasa R	Fasa S	Fasa T
1850	37	0,16%	0,07%	0,09%
1900	38	0,15%	0,07%	0,08%
1950	39	0,15%	0,07%	0,08%
2000	40	0,15%	0,07%	0,08%
2050	41	0,14%	0,07%	0,08%
2100	42	0,14%	0,07%	0,07%
2150	43	0,14%	0,06%	0,07%
2200	44	0,13%	0,06%	0,07%
2250	45	0,13%	0,06%	0,07%
2300	46	0,13%	0,06%	0,07%
2350	47	0,13%	0,06%	0,07%
2400	48	0,12%	0,06%	0,07%
2450	49	0,12%	0,06%	0,06%
2500	50	0,12%	0,06%	0,06%
<b>THDi</b>		<b>4,63%</b>	<b>2,17%</b>	<b>2,48%</b>

Hasil pengukuran parameter lain pada simulasi rangkaian tanpa filter dapat dilihat pada Tabel 21;

Tabel 21 Hasil pengukuran rangkaian setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrolan PID

Parameter Terukur	Nilai Terukur		
	Fasa R	Fasa S	Fasa T
<b>THDv</b>	0,35%	0,55%	0,55%
<b>THDi</b>	4,63%	2,17%	2,48%
<b>P</b>	14,61 Watt		
<b>Q</b>	4,59 Var		
<b>S</b>	15,31 VA		
<b>Faktor Daya</b>	0,954		

#### 4.6 Perbandingan Hasil Simulasi

Berdasarkan hasil simulasi diatas, dapat dilihat bahwa hasil simulasi sebelum pemasangan filter aktif melebihi standar IEEE 519-2014 arus maupun tegangan. Namun setelah pemasangan filter aktif, hasil simulasi menunjukkan THD tegangan dan arus tidak melebihi batas standar IEEE 519-2014. Adapun standar IEEE 519-2014 yang dimaksud dapat dilihat pada Tabel 22 dan Tabel 23;

Tabel 22 *Voltage distortion limits*

<i>Bus Voltage V at PCC</i>	<i>Individual Limits (%)</i>	<i>Total Harmonic Distortion (%)</i>
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5

Sumber: IEEE 519-2024

Tabel 23 *Current distortion limits for system 120 V through 69 kV*

<i>I<sub>sc</sub>/I<sub>L</sub></i> <i>(A)</i>	<i>Individual Limits Order (%)</i>					<i>THDi (%)</i>
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	
< 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 519-2024

Sebelum pemasangan filter aktif, THD<sub>v</sub> untuk masing-masing fasa sebesar 10,43%; 13,95%; dan 11,30%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk tegangan dibawah 1.0 kV batas THD<sub>v</sub> adalah 8,0%. Sedangkan untuk THD<sub>i</sub> untuk masing-masing fasa sebesar 25,15%; 25,76%; dan 27,07%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk arus beban dibawah 20 A batas THD<sub>i</sub> adalah 5.0%. Hasil simulasi sebelum pemasangan filter untuk THD<sub>v</sub> dan THD<sub>i</sub> melebihi standar IEEE 512-2014.

Setelah pemasangan filter aktif 3 fasa, THDv untuk masing-masing fasa sebesar 4,30%; 2,15%; dan 2,37%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk tegangan dibawah 1.0 kV batas THDv adalah 8,0%. Sedangkan untuk THDi untuk masing-masing fasa sebesar 4,67%; 2,19%; dan 2,50%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk arus beban dibawah 20 A batas THDi adalah 5.0%. Hasil simulasi setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk THDv dan THDi tidak melebihi standar IEEE 512-2014.

Setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID, THDv untuk masing-masing fasa sebesar 0,35%; 0,55%; dan 0,55%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk tegangan dibawah 1.0 kV batas THDv adalah 8,0%. Sedangkan untuk THDi untuk masing-masing fasa sebesar 4,63%; 2,17%; dan 2,48%. Berdasarkan standar dapat dilihat bahwa untuk arus beban dibawah 20 A batas THDi adalah 5.0%. Hasil simulasi setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk THDv dan THDi tidak melebihi standar IEEE 512-2014.

Adapun perbandingan hasil simulasi antara simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear, simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa, dan simulasi rangkaian 3 fasa beban non-linear menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID dapat dilihat pada Tabel 24 dan tabel 25;

Tabel 24 Perbandingan THD hasil simulasi

Perbandingan		Sebelum Pemasangan filter aktif 3 fasa	Setelah pemasangan filter aktif 3 fasa	Setelah Pemasangan Filter Aktif 3 Fasa Dengan Pengontrolan PID
THDv	R	10,43%	4,30%	0,35%
	S	13,95%	2,15%	0,55%
	T	11,30%	2,37%	0,55%
THDi	R	25,15%	4,67%	4,63%
	S	25,76%	2,19%	2,17%
	T	27,07%	2,50%	2,48%
PF		0,866	0,954	0,954

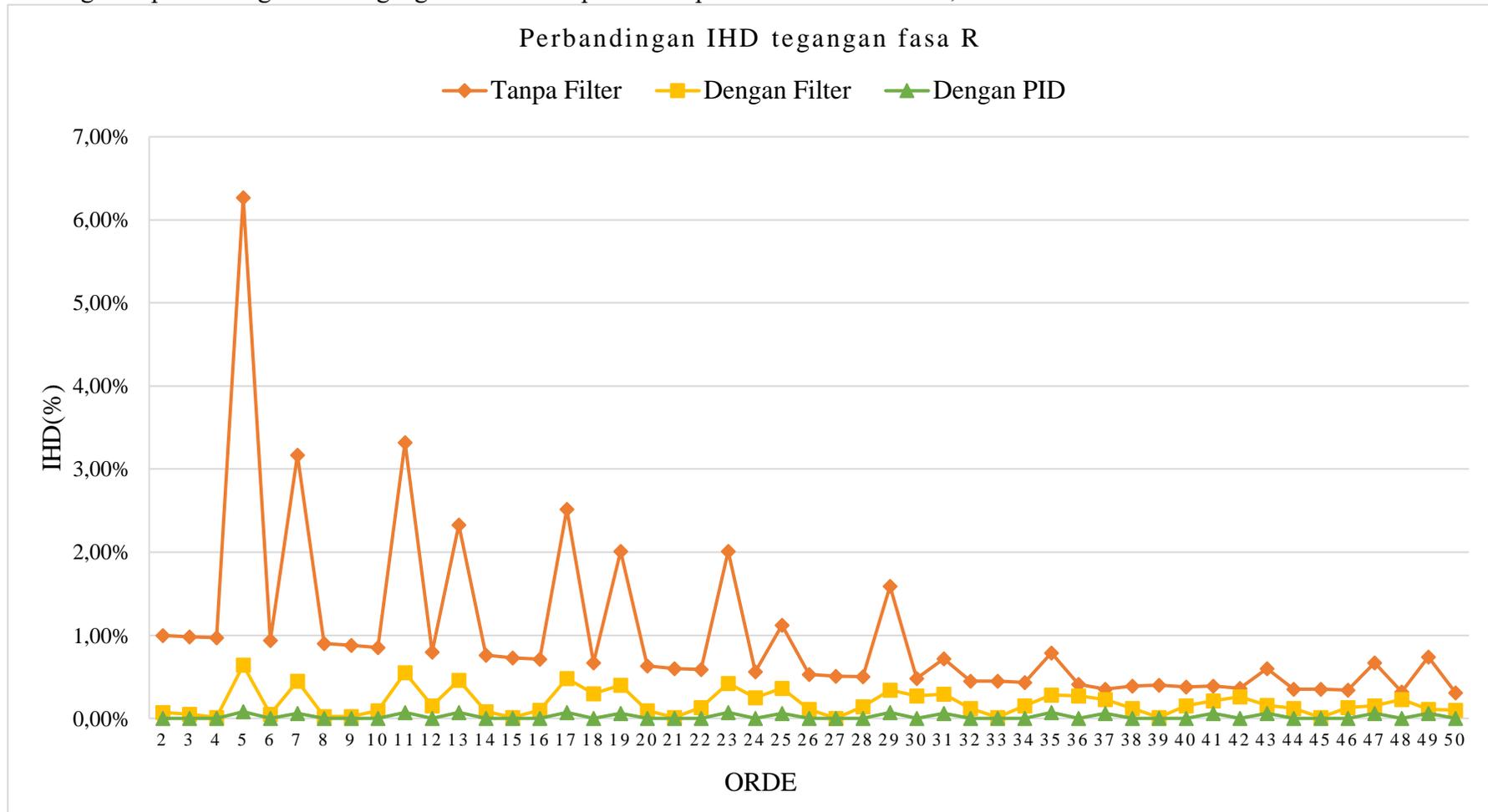
Table 25 Perbandingan IHD hasil simulasi

Orde ke-h	THD Tegangan (%)									IHD Arus (%)								
	Fasa R			Fasa S			Fasa T			Fasa R			Fasa S			Fasa T		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID
2	0,00%	2,91%	2,88%	1,94%	1,36%	1,35%	1,95%	1,56%	1,54%	1,00%	0,07%	0,00%	2,02%	0,21%	0,03%	1,00%	0,21%	0,03%
3	0,00%	1,94%	1,92%	1,93%	0,91%	0,90%	1,94%	1,04%	1,03%	0,98%	0,05%	0,00%	2,00%	0,21%	0,03%	0,99%	0,21%	0,03%
4	0,00%	1,45%	1,44%	1,90%	0,68%	0,68%	1,91%	0,78%	0,77%	0,97%	0,01%	0,00%	1,98%	0,24%	0,03%	0,97%	0,24%	0,03%
5	22,24%	1,16%	1,15%	20,78%	0,54%	0,54%	22,24%	0,62%	0,62%	6,27%	0,64%	0,08%	8,04%	0,59%	0,08%	7,33%	0,80%	0,10%
6	0,00%	0,97%	0,96%	1,84%	0,45%	0,45%	1,84%	0,52%	0,51%	0,94%	0,05%	0,00%	1,91%	0,22%	0,03%	0,94%	0,20%	0,03%
7	8,72%	0,83%	0,82%	8,41%	0,39%	0,39%	10,14%	0,44%	0,44%	3,17%	0,45%	0,06%	1,92%	0,34%	0,05%	3,45%	0,53%	0,08%
8	0,00%	0,73%	0,72%	1,75%	0,34%	0,34%	1,76%	0,39%	0,39%	0,90%	0,02%	0,00%	1,82%	0,19%	0,03%	0,90%	0,17%	0,03%
9	0,00%	0,65%	0,64%	1,71%	0,30%	0,30%	1,71%	0,35%	0,34%	0,88%	0,02%	0,00%	1,78%	0,21%	0,03%	0,88%	0,21%	0,03%
10	0,00%	0,58%	0,58%	1,66%	0,27%	0,27%	1,67%	0,31%	0,31%	0,85%	0,09%	0,00%	1,73%	0,14%	0,03%	0,85%	0,18%	0,03%
11	6,45%	0,53%	0,52%	6,72%	0,25%	0,25%	5,21%	0,28%	0,28%	3,32%	0,55%	0,07%	2,87%	0,61%	0,09%	4,18%	0,39%	0,06%
12	0,00%	0,49%	0,48%	1,57%	0,23%	0,23%	1,57%	0,26%	0,26%	0,80%	0,15%	0,00%	1,63%	0,19%	0,03%	0,80%	0,25%	0,03%
13	3,23%	0,45%	0,44%	4,79%	0,21%	0,21%	4,08%	0,24%	0,24%	2,33%	0,46%	0,07%	3,73%	0,66%	0,09%	3,30%	0,53%	0,07%
14	0,00%	0,42%	0,41%	1,48%	0,19%	0,19%	1,48%	0,22%	0,22%	0,76%	0,08%	0,00%	1,54%	0,25%	0,03%	0,76%	0,28%	0,03%
15	0,00%	0,39%	0,38%	1,42%	0,18%	0,18%	1,43%	0,21%	0,21%	0,73%	0,01%	0,00%	1,49%	0,20%	0,03%	0,73%	0,20%	0,03%
16	0,00%	0,36%	0,36%	1,39%	0,17%	0,17%	1,39%	0,20%	0,19%	0,71%	0,10%	0,00%	1,44%	0,31%	0,03%	0,71%	0,26%	0,03%
17	2,31%	0,34%	0,34%	3,69%	0,16%	0,16%	3,19%	0,18%	0,18%	2,52%	0,48%	0,07%	1,73%	0,57%	0,08%	1,52%	0,69%	0,10%
18	0,00%	0,32%	0,32%	1,31%	0,15%	0,15%	1,31%	0,17%	0,17%	0,67%	0,30%	0,00%	1,36%	0,29%	0,03%	0,67%	0,15%	0,03%
19	1,23%	0,31%	0,30%	1,29%	0,14%	0,14%	0,04%	0,16%	0,16%	2,01%	0,40%	0,06%	2,46%	0,24%	0,05%	1,30%	0,40%	0,07%
20	0,00%	0,29%	0,29%	1,23%	0,14%	0,14%	1,23%	0,16%	0,15%	0,63%	0,09%	0,00%	1,28%	0,21%	0,03%	0,63%	0,12%	0,03%

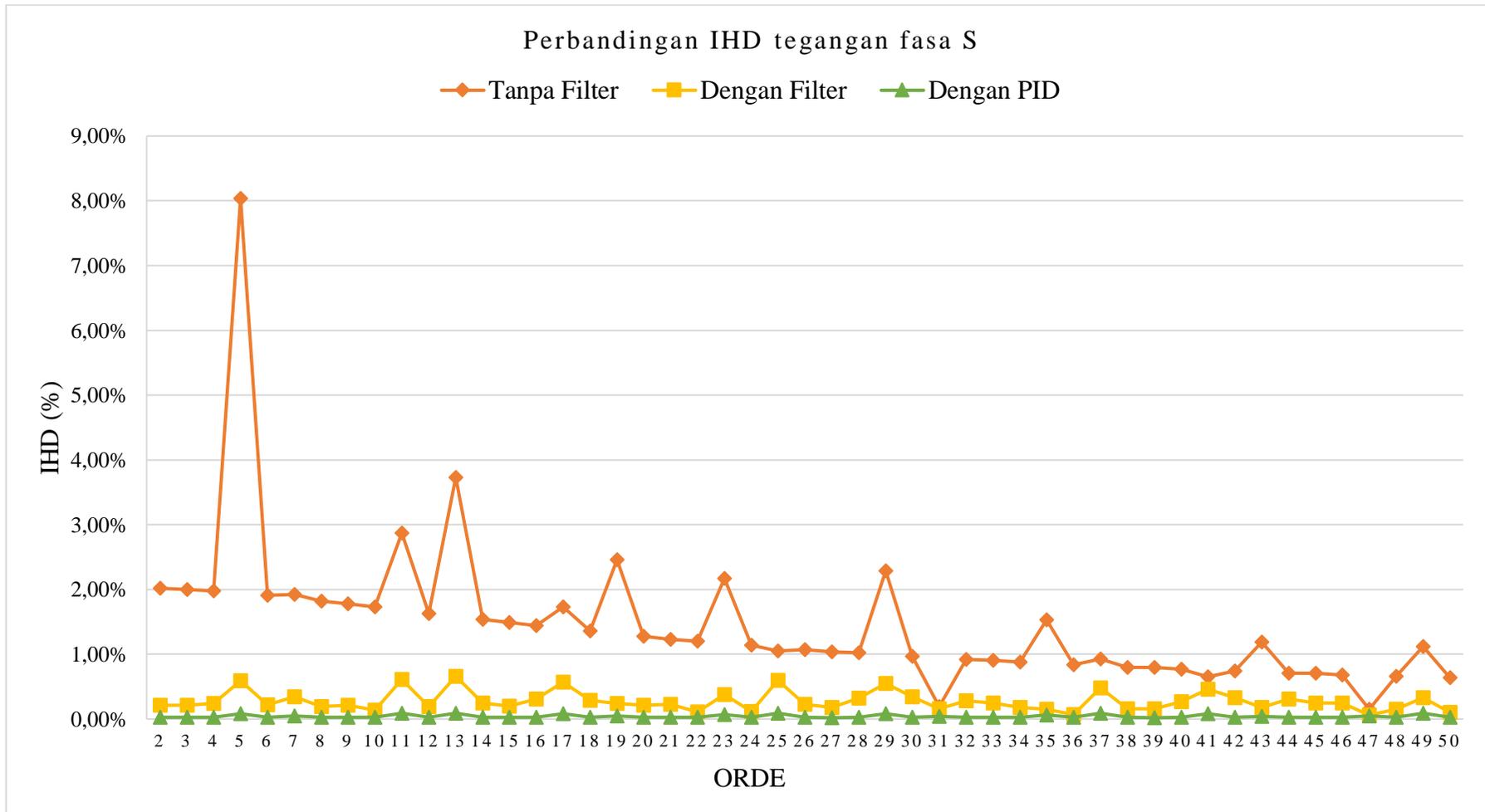
Orde ke-h	THD Tegangan (%)									IHD Arus (%)								
	Fasa R			Fasa S			Fasa T			Fasa R			Fasa S			Fasa T		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID
21	0,00%	0,28%	0,28%	1,19%	0,13%	0,13%	1,20%	0,15%	0,15%	0,60%	0,01%	0,00%	1,23%	0,23%	0,03%	0,61%	0,23%	0,03%
22	0,00%	0,27%	0,26%	1,16%	0,12%	0,12%	1,16%	0,14%	0,14%	0,59%	0,13%	0,00%	1,20%	0,11%	0,03%	0,59%	0,24%	0,03%
23	1,09%	0,25%	0,25%	1,94%	0,12%	0,12%	2,24%	0,14%	0,13%	2,01%	0,42%	0,07%	2,17%	0,38%	0,07%	1,16%	0,23%	0,05%
24	0,00%	0,24%	0,24%	1,09%	0,11%	0,11%	1,10%	0,13%	0,13%	0,56%	0,25%	0,00%	1,14%	0,12%	0,03%	0,56%	0,32%	0,03%
25	0,48%	0,23%	0,23%	0,59%	0,11%	0,11%	1,02%	0,13%	0,12%	1,12%	0,36%	0,06%	1,05%	0,60%	0,09%	0,18%	0,55%	0,08%
26	0,00%	0,23%	0,22%	1,03%	0,11%	0,10%	1,04%	0,12%	0,12%	0,53%	0,11%	0,00%	1,07%	0,23%	0,03%	0,53%	0,31%	0,03%
27	0,00%	0,22%	0,22%	1,01%	0,10%	0,10%	1,01%	0,12%	0,12%	0,51%	0,00%	0,00%	1,04%	0,18%	0,02%	0,51%	0,17%	0,02%
28	0,00%	0,21%	0,21%	0,98%	0,10%	0,10%	0,98%	0,11%	0,11%	0,50%	0,14%	0,00%	1,02%	0,32%	0,03%	0,50%	0,22%	0,03%
29	0,76%	0,20%	0,20%	0,78%	0,09%	0,09%	1,44%	0,11%	0,11%	1,59%	0,34%	0,07%	2,29%	0,55%	0,08%	1,56%	0,58%	0,10%
30	0,00%	0,20%	0,19%	0,93%	0,09%	0,09%	0,93%	0,10%	0,10%	0,48%	0,27%	0,00%	0,97%	0,34%	0,03%	0,48%	0,08%	0,03%
31	0,39%	0,19%	0,19%	0,86%	0,09%	0,09%	1,20%	0,10%	0,10%	0,72%	0,29%	0,06%	0,19%	0,16%	0,04%	0,60%	0,20%	0,06%
32	0,00%	0,18%	0,18%	0,89%	0,09%	0,09%	0,89%	0,10%	0,10%	0,45%	0,12%	0,00%	0,92%	0,28%	0,03%	0,45%	0,17%	0,03%
33	0,00%	0,18%	0,18%	0,87%	0,08%	0,08%	0,87%	0,10%	0,09%	0,45%	0,01%	0,00%	0,91%	0,25%	0,03%	0,44%	0,26%	0,03%
34	0,00%	0,17%	0,17%	0,84%	0,08%	0,08%	0,85%	0,09%	0,09%	0,43%	0,15%	0,00%	0,88%	0,18%	0,03%	0,43%	0,31%	0,03%
35	0,50%	0,17%	0,17%	0,39%	0,08%	0,08%	0,53%	0,09%	0,09%	0,79%	0,28%	0,07%	1,53%	0,15%	0,06%	1,39%	0,17%	0,04%
36	0,00%	0,16%	0,16%	0,81%	0,08%	0,08%	0,81%	0,09%	0,09%	0,41%	0,27%	0,00%	0,84%	0,07%	0,03%	0,41%	0,34%	0,03%
37	0,33%	0,16%	0,16%	1,10%	0,07%	0,07%	1,10%	0,09%	0,09%	0,35%	0,23%	0,06%	0,93%	0,48%	0,09%	1,03%	0,49%	0,08%
38	0,00%	0,16%	0,15%	0,77%	0,07%	0,07%	0,77%	0,08%	0,08%	0,39%	0,12%	0,00%	0,80%	0,16%	0,03%	0,39%	0,27%	0,03%
39	0,00%	0,15%	0,15%	0,75%	0,07%	0,07%	0,76%	0,08%	0,08%	0,40%	0,01%	0,00%	0,80%	0,16%	0,02%	0,39%	0,15%	0,02%
40	0,00%	0,15%	0,15%	0,74%	0,07%	0,07%	0,74%	0,08%	0,08%	0,38%	0,15%	0,00%	0,77%	0,27%	0,03%	0,38%	0,13%	0,03%

Orde ke-h	THD Tegangan (%)									IHD Arus (%)								
	Fasa R			Fasa S			Fasa T			Fasa R			Fasa S			Fasa T		
	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID	Tanpa Filter	Dengan Filter	Dengan Filter & PID
41	0,32%	0,14%	0,14%	0,78%	0,07%	0,07%	0,46%	0,08%	0,08%	0,39%	0,21%	0,06%	0,65%	0,46%	0,08%	0,94%	0,42%	0,10%
42	0,00%	0,14%	0,14%	0,71%	0,07%	0,07%	0,71%	0,08%	0,07%	0,36%	0,26%	0,00%	0,74%	0,33%	0,03%	0,36%	0,10%	0,03%
43	0,22%	0,14%	0,14%	0,87%	0,06%	0,06%	0,67%	0,07%	0,07%	0,60%	0,16%	0,06%	1,19%	0,18%	0,04%	0,84%	0,03%	0,05%
44	0,00%	0,13%	0,13%	0,68%	0,06%	0,06%	0,69%	0,07%	0,07%	0,35%	0,12%	0,00%	0,71%	0,31%	0,03%	0,35%	0,20%	0,03%
45	0,00%	0,13%	0,13%	0,66%	0,06%	0,06%	0,67%	0,07%	0,07%	0,35%	0,01%	0,00%	0,71%	0,25%	0,03%	0,35%	0,26%	0,03%
46	0,00%	0,13%	0,13%	0,66%	0,06%	0,06%	0,66%	0,07%	0,07%	0,34%	0,13%	0,00%	0,68%	0,25%	0,03%	0,34%	0,33%	0,03%
47	0,26%	0,13%	0,13%	0,89%	0,06%	0,06%	0,70%	0,07%	0,07%	0,67%	0,15%	0,06%	0,15%	0,06%	0,05%	0,54%	0,21%	0,04%
48	0,00%	0,12%	0,12%	0,63%	0,06%	0,06%	0,64%	0,07%	0,07%	0,32%	0,23%	0,00%	0,66%	0,15%	0,03%	0,32%	0,30%	0,03%
49	0,16%	0,12%	0,12%	0,60%	0,06%	0,06%	0,47%	0,07%	0,06%	0,74%	0,11%	0,06%	1,12%	0,33%	0,09%	0,61%	0,37%	0,08%
50	0,00%	0,12%	0,12%	0,61%	0,06%	0,06%	0,61%	0,06%	0,06%	0,31%	0,10%	0,00%	0,64%	0,10%	0,03%	0,31%	0,19%	0,03%

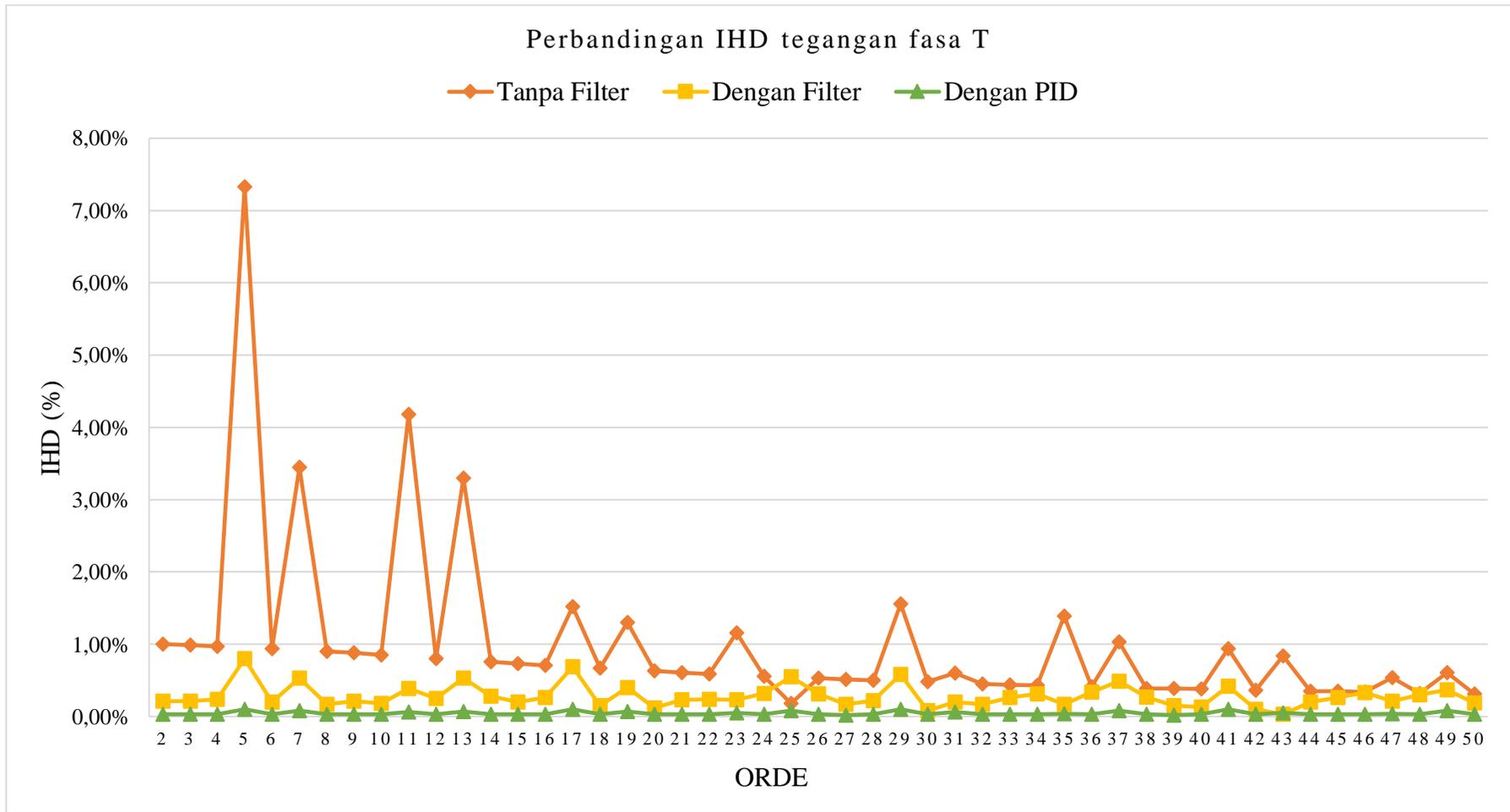
Untuk grafik perbandingan IHD tegangan dan arus dapat dilihat pada Gambar 60 dan 61;



(a)

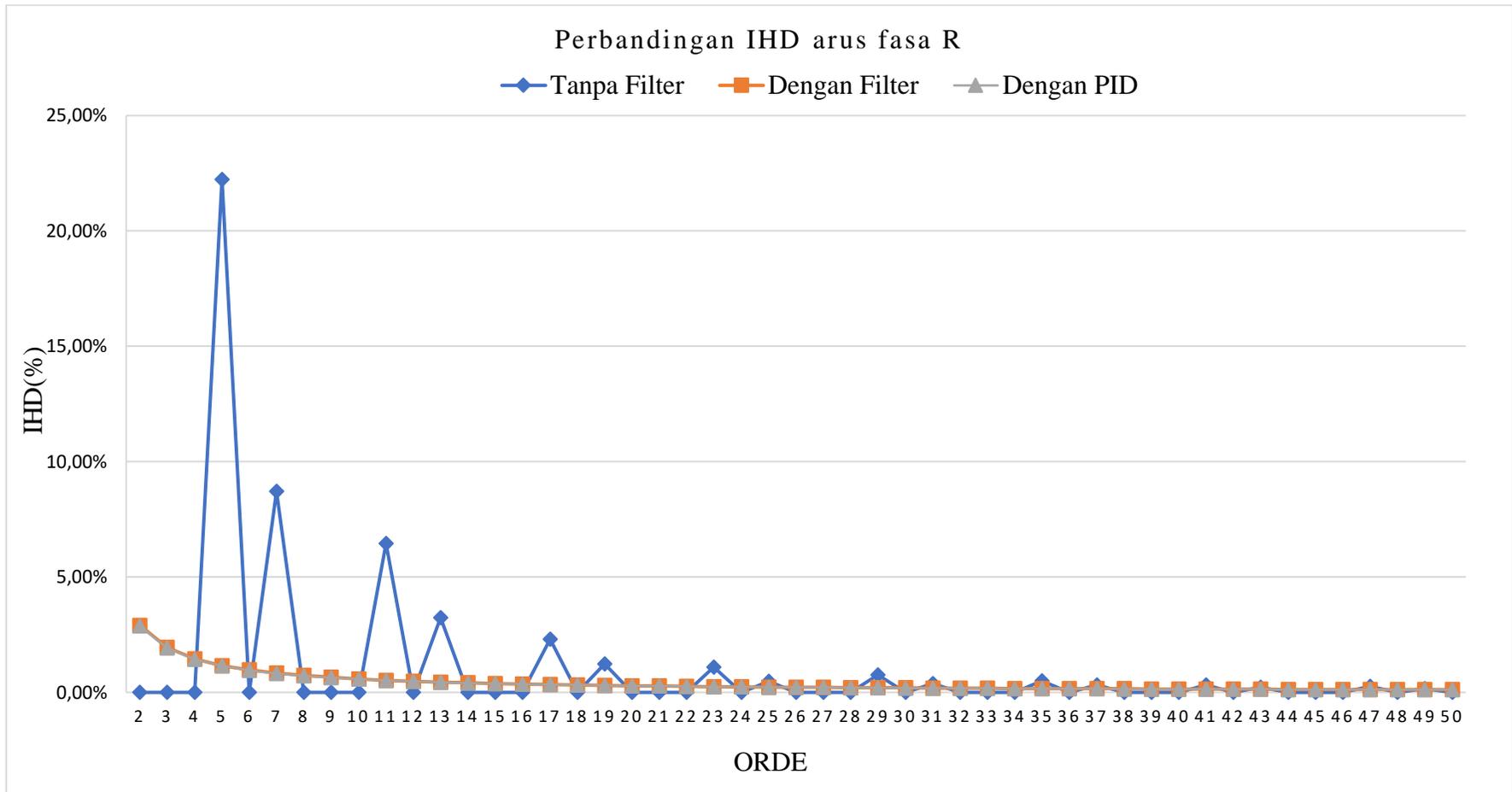


(b)

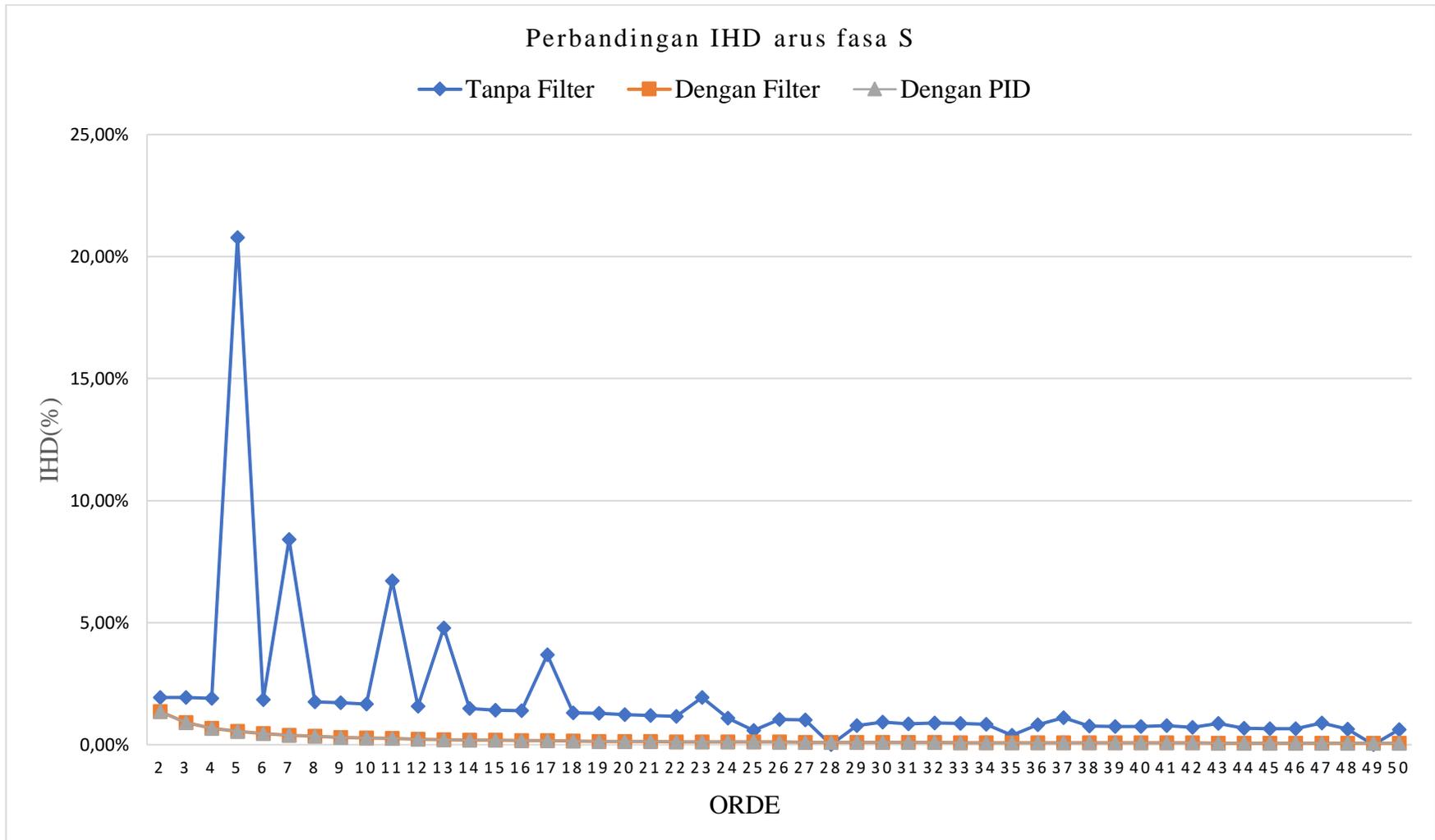


(c)

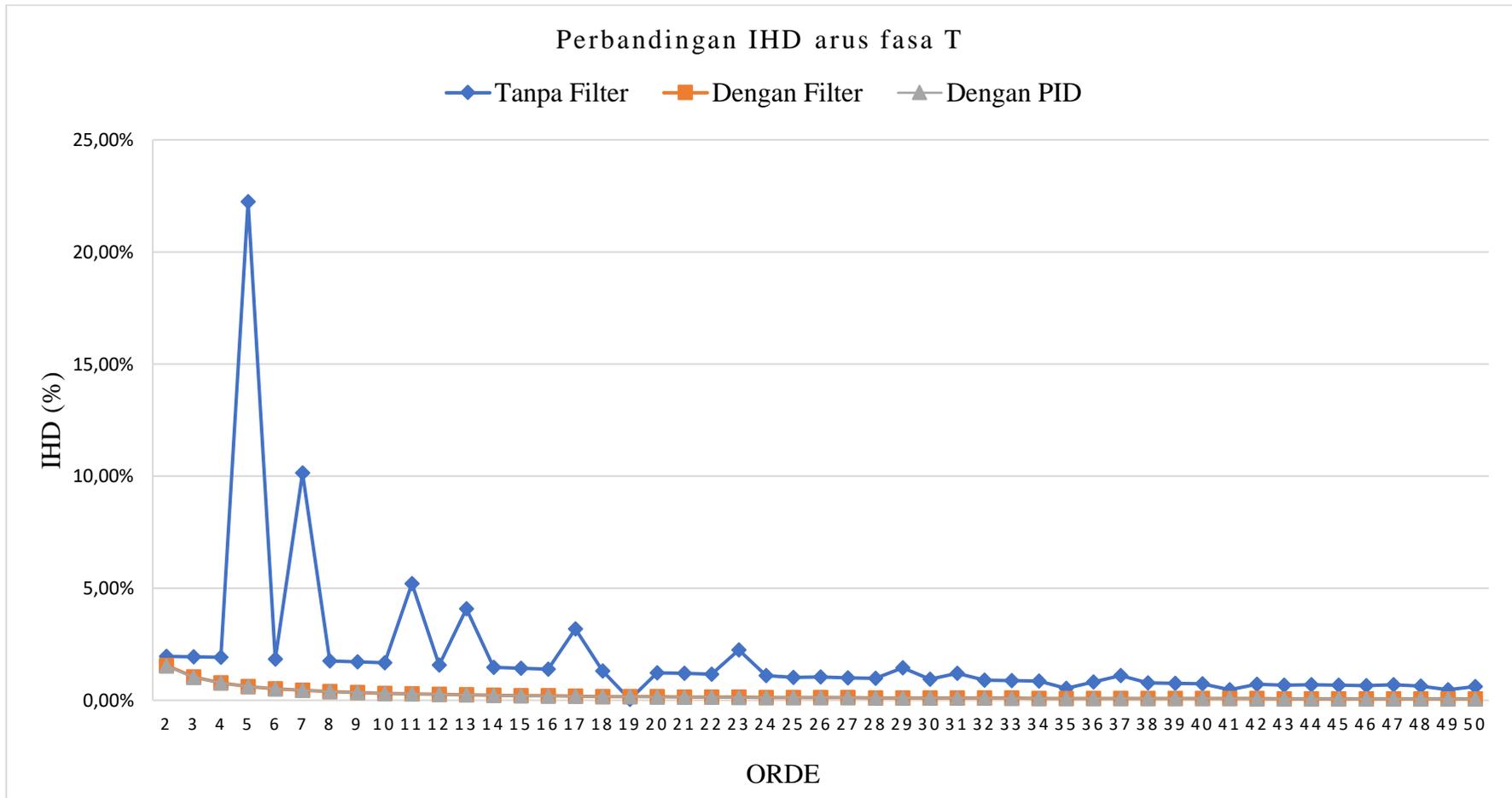
Gambar 60 Grafik Perbandingan IHD Tegangan (a) Fasa R (b) fasa S (c) Fasa T



(a)



(b)



(c)

Gambar 61 Grafik Perbandingan IHD Arus (a) fasa R (b) fasa S (c) fasa T

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, diperoleh Kesimpulan sebagai berikut;

1. Pemodelan rangkaian listrik 3 fasa menggunakan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID dibuat menggunakan *software* Matlab *Simulink*. Beban non-linear berupa rectifier 3 fasa digunakan sebagai sumber harmonisa. Inverter 3 fasa tipe VSI dengan kapasitor sebagai sumber tegangan dan IGBT sebagai *switching* digunakan untuk mengeliminasi harmonisa dengan menghasilkan arus sinusoidal berlawanan fasa. Arus referensi ( $I_{abc-ref}$ ) diperoleh dari algoritma teori pq dan dibandingkan dengan arus sumber menggunakan regulator arus linier. Pengendali PID menjaga tegangan DC-link tetap stabil untuk mengkompensasi arus harmonik secara efektif.
2. Dalam menentukan parameter-parameter pengontrolan PID, pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode tuning Ziegler-Nichols. Langkah pertama yang dilakukan adalah dengan mengatur nilai  $T_i$  dan  $T_d$  menjadi 0 (nol) sedangkan untuk nilai  $K_p$  terus dinaikkan hingga sistem mulai stabil dengan amplitudo yang konstan. Nilai  $K_p$  ini disebut  $K_p$  kritis ( $K_c$ ) sedangkan jarak satu gelombang saat osilasi stabil akan menjadi nilai periode kritis ( $T_c$ ). Setelah itu substitusi nilai yang diperoleh ke dalam Tabel Ziegler-Nichols metode respon frekuensi.
3. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh THD tegangan sumber pada kondisi sebelum pemasangan filter aktif 3 fasa untuk masing-masing fasa sebesar 10,43%, 13,95% dan 11,30%; THD tegangan sumber pada kondisi setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk masing-masing fasa sebesar 4,30%, 2,15% dan 2,37%; serta THD tegangan sumber pada kondisi setelah pemasangan filter aktif dengan pengontrolan PID masing-masing fasa sebesar 0,35%, 0,55% dan 0,55%. Sedangkan untuk THD arus sumber pada kondisi sebelum pemasangan filter aktif 3 untuk masing-masing fasa sebesar 25,15%, 25,76% dan 27,07%; THD arus sumber pada kondisi setelah pemasangan filter aktif 3 fasa untuk

masing-masing fasa sebesar 4,67%; 2,19%; dan 2,50%, serta kondisi setelah pemasangan filter aktif 3 fasa dengan pengontrolan PID untuk masing-masing fasa sebesar 4,63%; 2,17%; dan 2,48%. Faktor daya sistem pada kondisi sebelum pemasangan filter aktif 3 fasa sebesar 0,866; setelah pemasangan filter aktif 3 fasa tanpa dan dengan pengontrolan PID sebesar 0,954.

## **5.2 Saran**

1. Menggunakan metode kontroler lain, seperti kontroler fuzzy logic atau kontroler sliding mode sebagai perbandingan efektivitas kontrol PID, dalam mereduksi harmonisa pada filter aktif tiga fasa.
2. Mengkombinasikan filter aktif dan filter pasif untuk menciptakan filter hibrid yang lebih efisien dalam mereduksi harmonisa pada jaringan listrik dengan menggunakan kontrol PID.

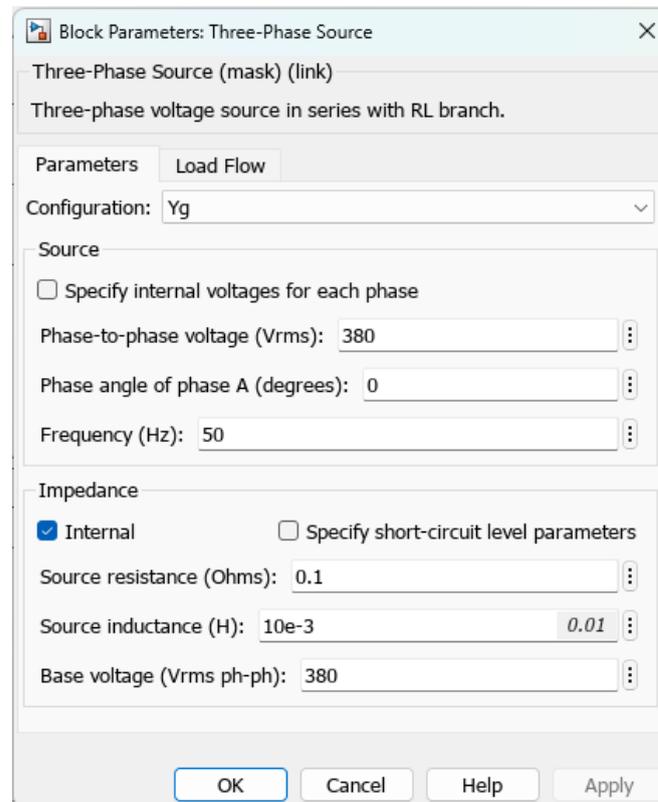
## DAFTAR PUSTAKA

- Aini, Zulfatr, & Mar'i, Aqil, 2021, *Desain Single Tuned Filter Terhadap Harmonisa Pada Transformator Distribusi*. Al-Mujahadah Press, Riau.
- Akagi, Hirofumi., Watanabe, E. H., & Aredes. M., 2007, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE Press, New York.
- Arrillaga, J., & Watson, N. R., 2003. *Power System Harmonics*. John Wiley & Sons, Inggris.
- Astrom, K. J., 2002. *Control System Design*. Departement of Mechanical & Environmental Engineering Eniversity of California, Santa Barbara.
- Astrom, K. J. & Marry, R. M., 2009. *Feedback System: Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton Univercity Press, Oxford.
- Benysek, Grzegor., 2012, *Power Theories for Improved Power Quality*. Springer, London.
- Dhinata, I. S., Pemayun, A. M., & Manuaba. I. G., 2021. Pengaruh Filter Aktif Dengan Pengaturan Daya Reaktif Terhadap Efisiensi Trafo Berbasis *Simulink*. *Jurnal SPEKRUM*. 8(4), 147-153
- Duarsana, I. N., Rinas, I. W., & Wijaya, I. W. A., 2021 Analisa Unjuk Kerja Motor Induksi 3 Phasa Terhadap Pengaruh Harmonisa (THD) Dengan Penambahan Filter Aktif Menggunakan Matlab. *Jurnal SPEKRUM*. 8(1), 123-128
- Dugan, R. C., et al., 2002. *Electrical Power System Quality*. 2<sup>nd</sup> ed. McGrow Hill Professional, New York.
- Grady, Mack., 2012. *Understanding Power System Harmonics*. Dept. of Electrical & Computer Engineering University of Texas, Amerika serikat.
- IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. (2014). IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>.
- Kamakshaiah, S., & Kamaraju, V., 2011. *HVDC Transmission*. McGrow Hill, New Delhi.
- Kusko, A., & Thompson, M. T., 2007. *Power Quality in Electrical Systems*. McGrow Hill, New York.

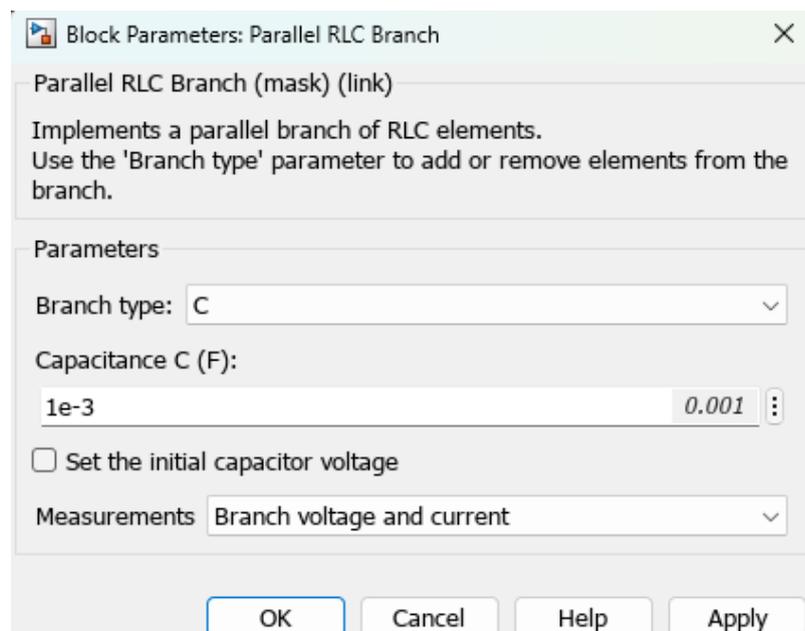
- Martana, I. K., Wijaya, I. W., & Suartika, I. M., 2023. Pengaruh Fikter Katif Terhadap Losses Transformator di Fakultas Teknik Udayana Bukit Jimbaran Dengan Fuzzy Logic Controller Menggunakan *Simulink*. *Jurnal SPEKRUM*. 10(1), 87-96.
- Medium.com. (2021, 15 Februari). Mendesain Teknik “Relay-Feedback PID Auto-Tuning” di Python. Diakses pada 7 November 2024, dari <https://utomorezadwi.medium.com/mendesain-teknik-relay-feedback-pid-auto-tuning-di-python-dedcd99af2d9>.
- Odinanto, T., Winardi, S., & Saputra, K. H., 2013. Perancangan Filter Aktif 3 Fasa Menggunakan Kontrol Propotional Integral Derivative (PID) untuk Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Tenaga Listrik. *Jurnal ITATS*
- Ogata, Katsuhiko., 2010. *Modern Control Engineering*. 5<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, London.
- Rosa, Francisco, C. D. L., 2006. *Harmonic and Power System*. 1<sup>st</sup> ed. CRC Press Boca Raton, Amerika Serikat.
- Saputra, G. A., Rinas, I. W., & Suartika, I. M., 2019. Studi Analisis Pengaruh Filter Aktif Berbasis Fuzzy Logic Controller Untuk Mereduksi Harmonisa Akibat Beban Non-Linier. *Jurnal SPEKTRU*. 6(2), 24-31.
- Scheidiger, Michael., 2013. *Power System Harmonic Analysis of High Power Variable Speed Drives*. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Setiawan, Iwan., 2008. *Kontrol PID untuk Proses Industri*. PT Elex Media Komputindo, Surabaya.
- Sianipar, R. H., 2015. *Rangkaian Listrik*. Rekayasa Sains, Bandung.
- Sudirman, S., 2012. *Analisis Rangkaian Listrik. Jilid 2*. Depublik, Bandung.
- Yudha, A. A., Partha, C. G., & Sukerayasa, I. W., 2023. Simulasi Penggunaan Filter Aktif Shunt dengan Kontrol PI untuk Meredam Total Harmonic Distrotion (THD) Pada Gedung DH Teknik Elektri Universitas Udayana. *Jurnal SPEKRUM*. 10(4), 143-151

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Setting parameter sumber 3 fasa



### Lampiran 2 Setting parameter DC link kapasitor



## Lampiran 3 Setting parameter alat ukur

Block Parameters: Three-Phase V-I Measurement

Three-Phase VI Measurement (mask) (link)

Ideal three-phase voltage and current measurements.

The block can output the voltages and currents in per unit values or in volts and amperes.

Parameters

Voltage measurement

Use a label

Signal label (use a From block to collect this signal)

Voltages in pu, based on peak value of nominal phase-to-ground voltage

Current measurement

Use a label

Signal label (use a From block to collect this signal)

Currents in pu

OK Cancel Help Apply

Lampiran 4 Setting parameter *universal bridge rectifier 3 phase*

Block Parameters: Beban non-linear

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance  $L_{on}$  of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms:

Snubber resistance  $R_s$  (Ohms)

Snubber capacitance  $C_s$  (F)

Power Electronic device

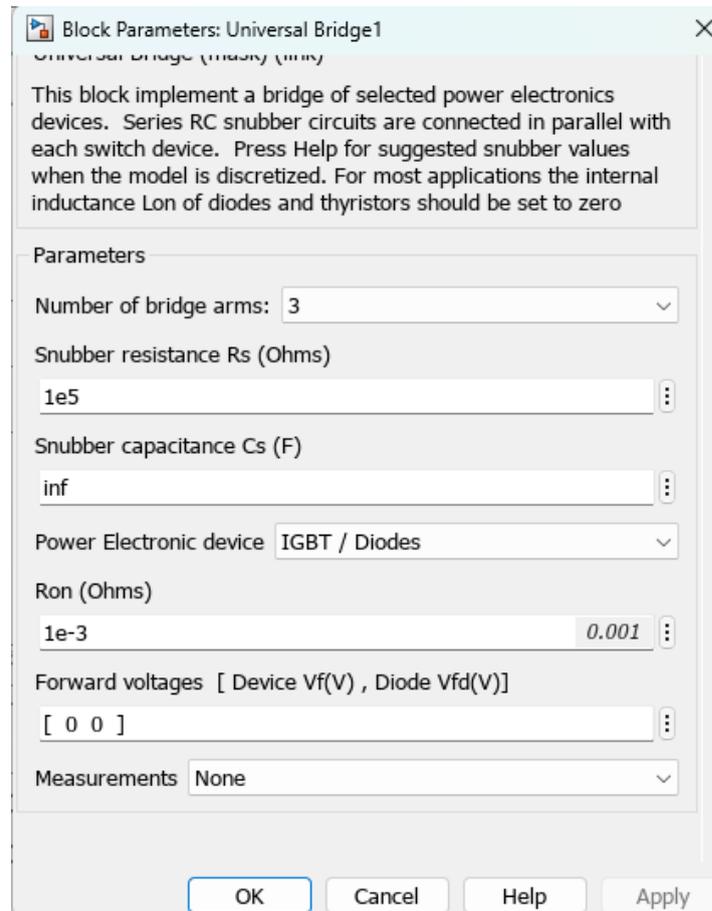
Ron (Ohms)

Lon (H)

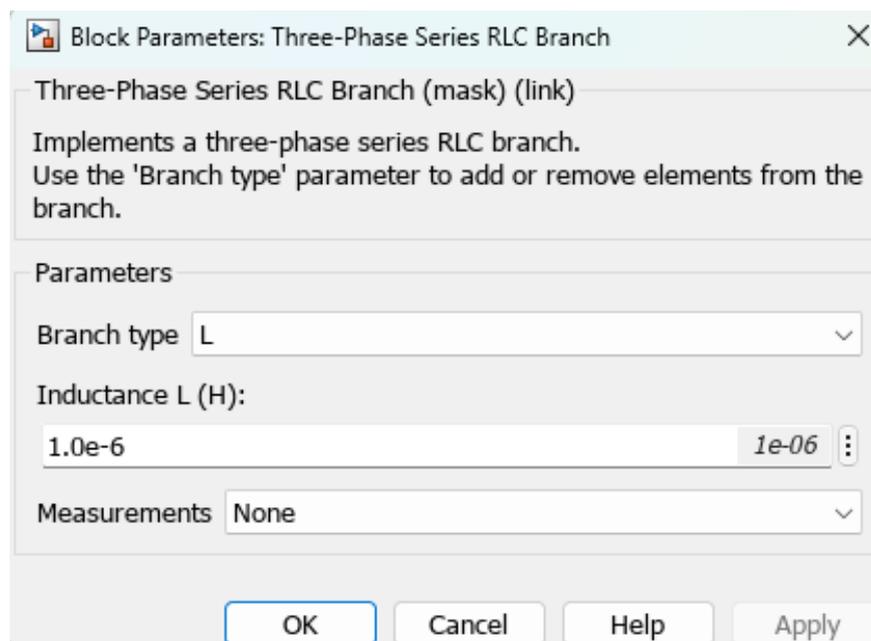
Forward voltage  $V_f$  (V)

OK Cancel Help Apply

## Lampiran 5 setting parameter VSI



## Lampiran 6 setting parameter LF



## Lampiran 7 Setting parameter PID

Block Parameters: PID Controller

PID 1dof (mask) (link)

This block implements continuous- and discrete-time PID control algorithms and includes advanced features such as anti-windup, external reset, and signal tracking. You can tune the PID gains automatically using the 'Tune...' button (requires Simulink Control Design).

Controller: PID Form: Parallel

Time domain:

Continuous-time  
 Discrete-time

Discrete-time settings

Sample time (-1 for inherited): -1

Compensator formula

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Main Initialization Saturation Data Types State Attributes

Controller parameters

Source: internal

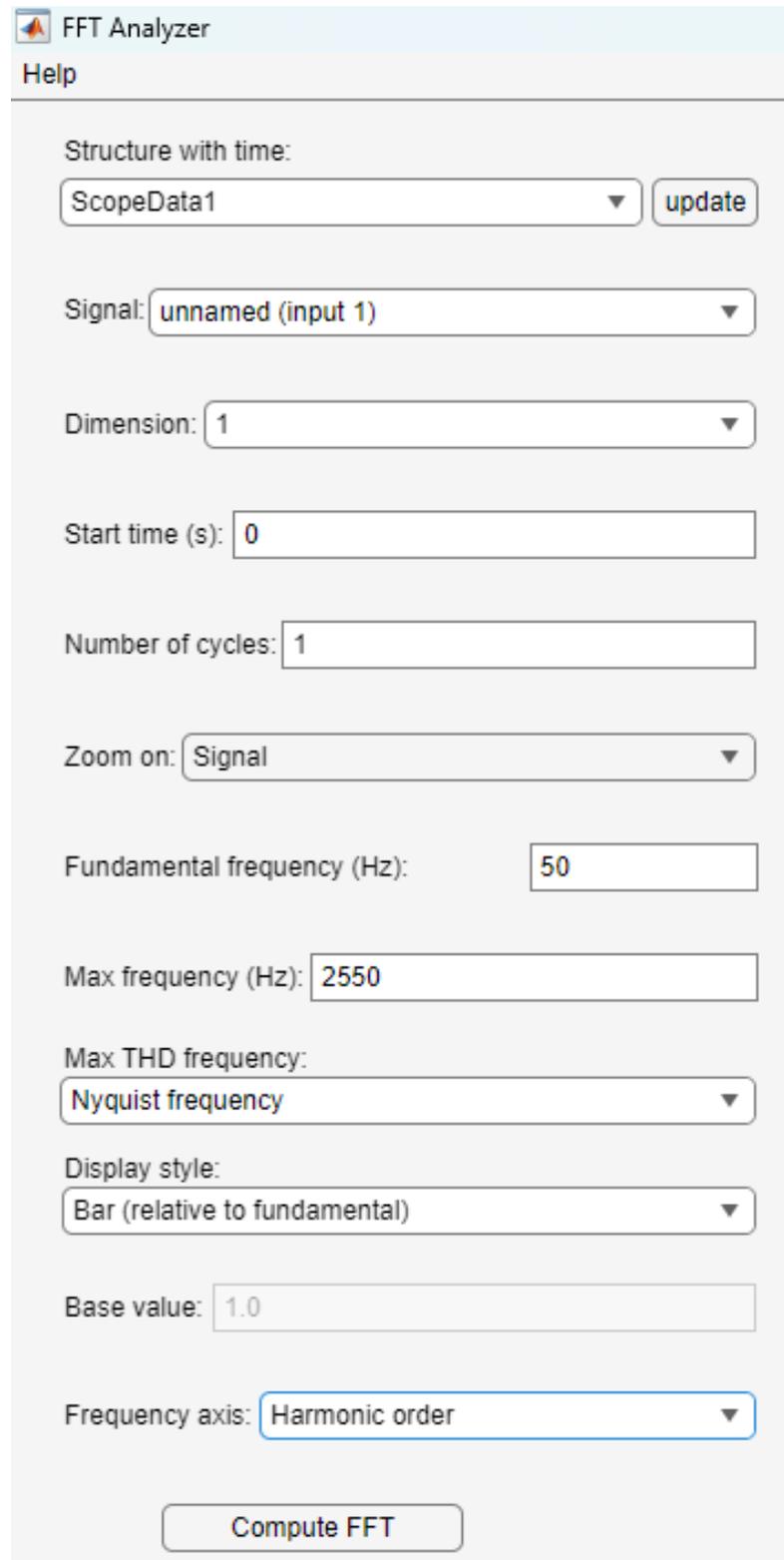
Proportional (P): 0.0258

Integral (I): 3.97  Use I\*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D): 4.192e-5 4.192e-05

OK Cancel Help Apply

## Lampiran 8 Setting Parameter FFT



The image shows the 'FFT Analyzer' software interface. At the top, there is a title bar with a small icon and the text 'FFT Analyzer', and a 'Help' button below it. The main area contains several configuration options:

- Structure with time:** A dropdown menu set to 'ScopeData1' and an 'update' button.
- Signal:** A dropdown menu set to 'unnamed (input 1)'.
- Dimension:** A dropdown menu set to '1'.
- Start time (s):** A text input field containing '0'.
- Number of cycles:** A text input field containing '1'.
- Zoom on:** A dropdown menu set to 'Signal'.
- Fundamental frequency (Hz):** A text input field containing '50'.
- Max frequency (Hz):** A text input field containing '2550'.
- Max THD frequency:** A dropdown menu set to 'Nyquist frequency'.
- Display style:** A dropdown menu set to 'Bar (relative to fundamental)'.
- Base value:** A text input field containing '1.0'.
- Frequency axis:** A dropdown menu set to 'Harmonic order'.

At the bottom center, there is a 'Compute FFT' button.