



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN SIMULASI KOMPONEN TEGANGAN
TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR-X UNTUK
PERALATAN DIAGNOSTIK MEDIS**

**Addien Wahyu Wiranata
NRP 2211100071**

**Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND SIMULATION COMPONENT OF HIGH
VOLTAGE SOURCE AT X-RAY GENERATOR FOR
MEDICAL DIAGNOSTIC INSTRUMENTS**

Addien Wahyu Wiranata
NRP 2211100071

Advisor
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**DESAIN DAN SIMULASI KOMPONEN
TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT
SINAR-X UNTUK PERALATAN DIAGNOSTIK
MEDIS**

TUGAS AKHIR

**Ditujukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.

Nip. 19810905 200501 1 002



Feby Agung Pamuji ST., MT.

NIP. 19870206 201212 1 002

**SURABAYA
JULI, 2015**

Desain dan Simulasi Komponen Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis

Addien Wahyu Wiranata
2211 100 071

Dosen Pembimbing I :Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing II :Feby Agung Pamuji ST., MT.

ABSTRAK

Pembangkit sinar-x pada peralatan diagnostik medis membutuhkan tegangan kerja sebesar 50 kV- 150 kV berdasarkan kebutuhan daya tembus yang disesuaikan dengan intensitas volume tubuh pasien. Tegangan kerja tersebut dihasilkan dengan menggunakan transformator berdaya tinggi yang memiliki ukuran sangat besar. Sehingga transformator tersebut membutuhkan ruangan besar yang disertai mahalnya harga dari transformator berdaya tinggi dan sulitnya didapatkan di pasaran lokal. Untuk itu pada penulisan tugas akhir ini akan dilakukan penelitian dengan menggunakan rangkaian elektronika daya yang didesain untuk menghasilkan frekuensi maksimal 15 kHz sebagai faktor variabel yang membangkitkan tegangan kerja pada peralatan diagnostik medis. Rangkaian elektronika daya ini menggunakan *intermediet circuit* dan inverter satu fasa. *Intermediet circuit* digunakan untuk menaikkan tegangan yang sebelumnya telah disearahkan dari sumber PLN sebesar 220 volt. Namun dalam penelitian tugas akhir ini tidak dihilangkan komponen utama transformator yang akan dianalisa sebagai nilai histerisis dari *high frequency losses* transformator. Sehingga tegangan yang dihasilkan diharapkan mencapai nilai rentang 50 kV-150 kV dengan frekuensi maksimal 15 kHz.

Keyword : peralatan diagnostik medis, *intermediet circuit*, inverter satu fasa, *high frequency losses* transformator

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

Design and Simulation Component of High Voltage Source at X-Ray Generator for Medical Diagnostic Instruments

Addien Wahyu Wiranata
2211 100 071

Dosen Pembimbing I :Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing II :Feby Agung Pamuji ST., MT.

ABSTRACT

Generating X-Rays in medical diagnostic equipment requires a working voltage of 50 kV- 150 kV by penetrating power requirements adapted to the intensity of the volume of the patient's body. The working voltage is generated by using a high-power transformer which has a very large size. So that the transformer needs a large room with the high price of high-power transformer and the difficulty found in the local market. For it was on this thesis research will be conducted using power electronics circuits that are designed for a maximum frequency of 15 kHz produces a voltage variable factors that generate employment in medical diagnostic equipment. This power electronic circuit using the intermediate circuit and an one phase inverter. Intermediates used unuk boost circuit that previously had been rectified from PLN source of 220 volts. But in this research is not eliminated the transformer main components will be analyzed as hysteresis values of high frequency transformer losses. So that the voltage generated is expected to reach a value range of 50 kV-150 kV with a maximum frequency of 15 kHz.

Keyword : medical diagnostic equipment, intermediet circuit, one phase inverter, high frequency losses transformator

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur atas kehadiran Allah Subhanahu wa ta'ala yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya serta bantuan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyusun dan menyelesaikan penulisan buku Tugas Akhir ini sesuai dengan waktu yang telah diberikan.

Shalawat serta salam semoga selalu Allah curahkan kepada Ukhuwah dan Quduwah kita, Rasulullah Muhammad SAW beserta para sahabat, keluarga, dan semua umatnya yang selalu berusaha untuk istiqomah pada jalan-Nya.

Tugas Akhir merupakan salah satu syarat wajib kelulusan pada jenjang pendidikan S-1 di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Mahasiswa saat ini tidak hanya dituntut untuk ahli dalam keilmuan teoritis di dalam dunia idealita kampus, namun juga harus mampu membuat sebuah karya dalam bentuk penulisan ilmiah. Sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “DESAIN DAN SIMULASI KOMPONEN TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR-X UNTUK PERALATAN DIAGNOSTIK MEDIS”.

Untuk itu, dalam kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan rasa terimakasih sebanyak-banyaknya kepada :

1. Allah SWT. atas izin-Nya yang telah memberikan kekuatan dan kelancaran dalam proses untuk mencapai kerja praktek, hingga pelaksanaan kerja praktek sampai dengan selesai. Semoga kerja praktek ini mendapatkan Ridho-Mu ya Allah. Amin.
2. Bapak, Ibu, serta kakak adik tercinta dengan do'a, fasilitas dan segala sesuatu yang terbaik selalu diberikan kepada kami.
3. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, ST. MT dan Bapak Feby Agung Pamuji, ST. MT., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran dan masukan untuk dapat menyelesaikan penulisan Tugas Akhir ini.
4. Dr. Tri Arief sardjono, ST.,MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
5. Seluruh dosen pengajar Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menuntut ilmu di ITS.

6. Teman-teman satu angkatan 2011 dan adik-adik angkatan yang telah mendoakan penulis sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini tepat pada waktunya.

Serta seluruh pihak yang tidak dapat penulis sampaikan satu per satu yang telah banyak membantu. Terakhir, semoga Tugas Akhir bermanfaat dan dapat menjadi ilmu baru bagi siapapun yang membaca dan mempelajarinya. Penelitian ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, segala kritik, saran dan masukan yang membangun akan selalu terbuka demi perbaikan ke depan. Adanya kebenaran dan kebaikan dalam laporan ini datangnya dari Allah SWT dan segala kekurangan dan khilaf datangnya dari penulis pribadi. Akhirul Kalam.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Relevansi.....	4
1.7 Sistematika Pembahasan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sistem Pembangkit Tegangan Sinar-X	7
2.2 Proses Terjadinya Sinar-X	9
2.3 <i>Rectifier</i> Satu Fasa	10
2.4 <i>Boost Converter</i>	13
2.5 Inverter Satu Fasa.....	14
2.6 Harmonisa dan Filter Harmonisa	17
2.7 Transformator.....	17
2.8 Kurva Histerisi (B-H).....	19
BAB III DESAIN DAN PEMODELAN	
3.1 Pemodelan Sumber PLN 380V/50 Hz dan <i>Rectifier</i>	22
3.2 Pemodelan <i>Boost Converter</i>	25
3.3 Pemodelan Inverter Satu Fasa	29
3.4 Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa dan Filament Sinar-X.....	32
3.4.1 Kontrol Inverter tegangan dan Frekuensi	32

3.4.1 Kontrol Filament Sinar-X	35
3.5 Transformator dan Rectifier Tegangan Tinggi	38

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 Karakteristik Hasil Simulasi Rectifier 3 Fasa	44
4.2 Karakteristik Hasil Simulasi <i>Boost Converter</i>	47
4.3 Karakteristik Hasil Simulasi Inverter Satu Fasa dan Sistem Kontrol.....	52
4.3.1 Faktor Beban 200 mA.....	54
4.3.1 Faktor Beban 500 mA.....	59
4.3.1 Faktor Beban 800 mA.....	65
4.4 Karakteristik Hasil Simulasi Kontrol Filament	72
4.5 Karakteristik Kurva Histerisis B-H Material Inti Trafo	77

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran	88

DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN	91
RIWAYAT HIDUP PENULIS	97

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema Sederhana Pesawat Sinar-X.....	7
Gambar 2.2 Tabung Inseri Pesawat Sinar-X	9
Gambar 2.3 Rangkaian dan Sinyal Penyearah Jembatan	11
Gambar 2.4 Rangkaian dan Sinyal Penyearah Center Tap.....	12
Gambar 2.5 <i>Boost Converter</i>	13
Gambar 2.6 Rangkaian Inverter Satu Fasa <i>Full Bridge</i>	15
Gambar 2.7 Bentuk Sinyal Tegangan Keluaran Inverter	15
Gambar 2.8 <i>Pulse Widht Modulation</i>	16
Gambar 2.9 Kurva B-H.....	19
Gambar 3.1 Blok Diagram Pemodelan	21
Gambar 3.2 Pemodelan Rangkaian <i>Rectifier</i>	23
Gambar 3.3 Sinyal Tegangan <i>Output Rectifier</i>	23
Gambar 3.4 Simulink Rangkaian <i>Rectifier</i>	24
Gambar 3.5 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	26
Gambar 3.6 Kurva Karakteristik Daya <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.7 Kurva Karakteristik Tegangan <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.8 Kurva Karakteristik Arus <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.9 Pemodelan Matlab <i>Boost Converter</i>	28
Gambar 3.10 Diagram Blok Inverter Satu Fasa	29
Gambar 3.11 Pemodelan Inverter Satu Fasa	30
Gambar 3.12 Prinsip Intersective PWM	30
Gambar 3.13 Pengaturan Indeks Modulasi	31
Gambar 3.14 Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa	33
Gambar 3.15 Diagram Blok Sistem Kontrol Filament Sinar-X	35
Gambar 3.16 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 1.....	35
Gambar 3.17 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 2.....	36
Gambar 3.18 Sistem Kontrol PI pada Penghasil Arus Filament	37
Gambar 3.19 Pemodelan Rangkaian Transformator dan <i>Rectifier High Voltage</i>	39
Gambar 3.20 Simulink <i>Rectifier High Voltage</i>	40
Gambar 3.21 Pemodelan Secara utuh dengan sistem kontrol	41
Gambar 4.1 Konfigurasi Sistem	43
Gambar 4.2 Pemodelan Rangkaian <i>Rectifier</i> 3 Fasa	44
Gambar 4.3 Perubahan <i>Upper Saturation Limit</i>	46
Gambar 4.4 Tegangan <i>Output Rectifier</i> 3 Fasa	46
Gambar 4.5 Penghasil <i>Duty Cycle</i>	47

Gambar 4.6 Sinyal Segitiga	48
Gambar 4.7 <i>Duty Cycle</i> 0.42.....	48
Gambar 4.8 Pemodelan <i>Boost Converter</i>	49
Gambar 4.9 Kurva Karakteristik Tegangan <i>Output Boost</i>	51
Gambar 4.10 Kurva Karakteristik Arus <i>Output Boost</i>	51
Gambar 4.11 Pemodelan Sistem <i>Inverter</i> Satu Phasa	52
Gambar 4.12 Sistem Kontrol <i>Inverter</i> Satu Phasa	53
Gambar 4.13 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	55
Gambar 4.14 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	57
Gambar 4.15 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 12000 Hz	58
Gambar 4.16 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	58
Gambar 4.17 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	59
Gambar 4.18 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	61
Gambar 4.19 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	63
Gambar 4.20 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 5000 Hz	64
Gambar 4.21 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	65
Gambar 4.22 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	65
Gambar 4.23 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	67
Gambar 4.24 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	69
Gambar 4.25 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 3500 Hz	70
Gambar 4.26 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	71
Gambar 4.27 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	71
Gambar 4.28 Pemodelan Penghasil Arus Filament Kontrol	72
Gambar 4.29 Analisa Sistem Kontrol Arus Filament	73
Gambar 4.30 Hasil Simulasi Arus 200 mA	74
Gambar 4.31 Hasil Simulasi Arus 500 mA	74
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Arus 800 mA	75
Gambar 4.33 Kurva B-H Frekuensi 12000 Hz	80
Gambar 4.34 Kurva B-H Frekuensi 5000 Hz	81
Gambar 4.35 Kurva B-H Frekuensi 3500 Hz	81
Gambar 4.36 Pemodelan Trafo	82
Gambar 4.37 Distribusi Medan Magnet.....	83
Gambar 4.38 Distribusi Kerapatan Arus.....	83
Gambar 4.49 Kurva Distribusi Medan Magnet Sumbu X, Y, Z	84
Gambar 4.40 Kurva Distribusi Kerapatan Arus Sumbu X, Y, Z	84

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Rectifier 3 Fasa	45
Tabel 4.2 Waktu Steady State Boost Matlab.....	50
Tabel 4.3 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 200 mA.....	54
Tabel 4.4 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	56
Tabel 4.5 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 500 mA.....	60
Tabel 4.6 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	62
Tabel 4.7 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 800 mA.....	66
Tabel 4.8 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	68
Tabel 4.9 Karakteristik Besarnya Resistansi Kekuatan Sinar-X	76
Tabel 4.10 B Saturasi Inti Material Inti Trafo.....	77
Tabel 4.11 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=12$ kHz.....	78
Tabel 4.12 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=5$ kHz	79
Tabel 4.13 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=3,5$ kHz	80
Tabel 4.14 Hasil Simulasi Pemodelan Trafo untuk Frekuensi 12 kHz, 5 kHz, dan 3,5 kHz	85

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Rectifier 3 Fasa	45
Tabel 4.2 Waktu Steady State Boost Matlab.....	50
Tabel 4.3 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 200 mA.....	54
Tabel 4.4 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	56
Tabel 4.5 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 500 mA.....	60
Tabel 4.6 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	62
Tabel 4.7 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 800 mA.....	66
Tabel 4.8 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi	68
Tabel 4.9 Karakteristik Besarnya Resistansi Kekuatan Sinar-X	76
Tabel 4.10 B Saturasi Inti Material Inti Trafo.....	77
Tabel 4.11 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=12$ kHz.....	78
Tabel 4.12 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=5$ kHz	79
Tabel 4.13 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=3,5$ kHz	80
Tabel 4.14 Hasil Simulasi Pemodelan Trafo untuk Frekuensi 12 kHz, 5 kHz, dan 3,5 kHz	85

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Skema Sederhana Pesawat Sinar-X.....	7
Gambar 2.2 Tabung Inseri Pesawat Sinar-X	9
Gambar 2.3 Rangkaian dan Sinyal Penyearah Jembatan	11
Gambar 2.4 Rangkaian dan Sinyal Penyearah Center Tap.....	12
Gambar 2.5 <i>Boost Converter</i>	13
Gambar 2.6 Rangkaian Inverter Satu Fasa <i>Full Bridge</i>	15
Gambar 2.7 Bentuk Sinyal Tegangan Keluaran Inverter	15
Gambar 2.8 <i>Pulse Widht Modulation</i>	16
Gambar 2.9 Kurva B-H.....	19
Gambar 3.1 Blok Diagram Pemodelan	21
Gambar 3.2 Pemodelan Rangkaian <i>Rectifier</i>	23
Gambar 3.3 Sinyal Tegangan <i>Output Rectifier</i>	23
Gambar 3.4 Simulink Rangkaian <i>Rectifier</i>	24
Gambar 3.5 Rangkaian <i>Boost Converter</i>	26
Gambar 3.6 Kurva Karakteristik Daya <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.7 Kurva Karakteristik Tegangan <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.8 Kurva Karakteristik Arus <i>Boost Converter</i>	27
Gambar 3.9 Pemodelan Matlab <i>Boost Converter</i>	28
Gambar 3.10 Diagram Blok Inverter Satu Fasa	29
Gambar 3.11 Pemodelan Inverter Satu Fasa	30
Gambar 3.12 Prinsip Intersective PWM	30
Gambar 3.13 Pengaturan Indeks Modulasi	31
Gambar 3.14 Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa	33
Gambar 3.15 Diagram Blok Sistem Kontrol Filament Sinar-X	35
Gambar 3.16 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 1.....	35
Gambar 3.17 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 2.....	36
Gambar 3.18 Sistem Kontrol PI pada Penghasil Arus Filament	37
Gambar 3.19 Pemodelan Rangkaian Transformator dan <i>Rectifier High Voltage</i>	39
Gambar 3.20 Simulink <i>Rectifier High Voltage</i>	40
Gambar 3.21 Pemodelan Secara utuh dengan sistem kontrol	41
Gambar 4.1 Konfigurasi Sistem	43
Gambar 4.2 Pemodelan Rangkaian <i>Rectifier</i> 3 Fasa	44
Gambar 4.3 Perubahan <i>Upper Saturation Limit</i>	46
Gambar 4.4 Tegangan <i>Output Rectifier</i> 3 Fasa	46
Gambar 4.5 Penghasil <i>Duty Cycle</i>	47

Gambar 4.6 Sinyal Segitiga	48
Gambar 4.7 <i>Duty Cycle</i> 0.42.....	48
Gambar 4.8 Pemodelan <i>Boost Converter</i>	49
Gambar 4.9 Kurva Karakteristik Tegangan <i>Output Boost</i>	51
Gambar 4.10 Kurva Karakteristik Arus <i>Output Boost</i>	51
Gambar 4.11 Pemodelan Sistem <i>Inverter</i> Satu Phasa	52
Gambar 4.12 Sistem Kontrol <i>Inverter</i> Satu Phasa	53
Gambar 4.13 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	55
Gambar 4.14 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	57
Gambar 4.15 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 12000 Hz	58
Gambar 4.16 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	58
Gambar 4.17 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	59
Gambar 4.18 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	61
Gambar 4.19 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	63
Gambar 4.20 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 5000 Hz	64
Gambar 4.21 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	65
Gambar 4.22 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	65
Gambar 4.23 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan	67
Gambar 4.24 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan	69
Gambar 4.25 Tegangan Hasil <i>Inverter</i> Satu Phasa Frekuensi 3500 Hz	70
Gambar 4.26 Tegangan Hasil Keluaran Transformator	71
Gambar 4.27 Hasil <i>Output Rectifier High Voltage</i>	71
Gambar 4.28 Pemodelan Penghasil Arus Filament Kontrol	72
Gambar 4.29 Analisa Sistem Kontrol Arus Filament	73
Gambar 4.30 Hasil Simulasi Arus 200 mA	74
Gambar 4.31 Hasil Simulasi Arus 500 mA	74
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Arus 800 mA	75
Gambar 4.33 Kurva B-H Frekuensi 12000 Hz	80
Gambar 4.34 Kurva B-H Frekuensi 5000 Hz	81
Gambar 4.35 Kurva B-H Frekuensi 3500 Hz	81
Gambar 4.36 Pemodelan Trafo	82
Gambar 4.37 Distribusi Medan Magnet.....	83
Gambar 4.38 Distribusi Kerapatan Arus.....	83
Gambar 4.49 Kurva Distribusi Medan Magnet Sumbu X, Y, Z	84
Gambar 4.40 Kurva Distribusi Kerapatan Arus Sumbu X, Y, Z	84

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan teknologi di dunia kesehatan, saat ini sudah banyak alat-alat canggih yang digunakan dalam menunjang kebutuhan untuk membantu penyembuhan atau mendiagnosis penyakit dari seorang pasien. Sebuah rumah sakit dalam mendiagnosis seorang pasien menggunakan mesin sinar-x diagnostik. Kebutuhan akan alat tersebut semakin meningkat dengan semakin majunya zaman. Namun yang terjadi saat ini adalah akan kebutuhan penyediaan listrik untuk peralatan tabung sinar-x diagnostik membutuhkan tegangan kerja sebesar 50kV-150kV. Sumber utama dari generator pesawat sinar-x diagnostik berasal dari PLN yang mempunyai tegangan sebesar 220 volt/50 Hz. Pada umumnya generator pesawat sinar-x diagnostik menggunakan transformator atau autotransformator sebagai pengatur catu daya tegangan tinggi. Tegangan yang masuk ke dalam lilitan primer transformator High Voltage (HV) dan keluarannya dari hasil HV berupa tegangan tinggi yang siap dimasukkan ke dalam tabung. Pesawat sinar-x diagnostik berdaya besar memerlukan transformator berdaya besar yang memiliki ukuran fisik yang besar. Karena itu kontrol boks untuk menempatkan transformator tersebut berukuran besar pula. Selain itu harga dari transformator yang memiliki daya besar cukup mahal dan sulit didapatkan di pasaran lokal. Untuk menggantikan fungsi kerja transformator pada peralatan sinar-x diagnostik dibuatlah rangkaian elektronika daya yang nantinya memiliki fungsi kerja menyerupai transformator. Namun dalam hal ini penggunaan transformator masih diperlukan dengan ukuran yang semakin kecil sehingga lebih ekonomis dan mudah didapatkan dipasaran.

Rangkaian elektronika ini menggunakan *rectifier, boost converter* dan inverter satu fasa. Rangkaian *boost converter* terangkai dari rangkaian penyearah satu fasa dimana sumber PLN 380/50 Hz yang sebelumnya telah disearahkan. Sedangkan inverter satu fasa digunakan untuk menaikkan frekuensi dari tegangan sumber yang awalnya 50 Hz dari sumber PLN menjadi maksimal 15 kHz. Dengan menggunakan inverter satu fasa akan diperoleh frekuensi yang nilainya diatur sedemikian rupa untuk nantinya diperoleh tegangan yang diinginkan.

Kemudian tegangan keluaran inverter satu fasa dialirkan ke generator pesawat sinar-x diagnostik dengan melewati transformator. Dengan demikian besarnya tegangan tinggi dapat diatur dengan menggunakan inverter satu fasa bergantung dengan proporsional tubuh seorang pasien.

Rangkaian lainnya yang sangat penting adalah dengan memodelkan sistem kontrol pada inverter satu fasa untuk frekuensi tinggi dan kontrol pada filament. Kontrol filament ini bertujuan untuk menghasilkan arus yang diinginkan sebagai sumber dari pembangkit tegangan kerja pesawat sinar-x. Karena pada tugas akhir ini akan digunakan sistem kerja arus dengan besar 200mA, 500mA, dan 800mA.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana cara mengatur frekuensi dari sumber PLN 50 Hz sehingga mampu dihasilkan frekuensi tinggi maksimal 15 kHz untuk mendapatkan tegangan kerja generator pesawat sinar-x diagnostik sebesar 50kV-150kV.
2. Bagaimana membuat kontrol filament yang nantinya berfungsi sebagai penghasil arus untuk tegangan kerja pesawat sinar-x.
3. Bagaimana karakteristik output dari rangkaian elektronika yang digunakan sebagai sumber pembangkit tegangan tinggi peralatan sinar-x diagnostik.

1.3 Batasan Masalah

Dalam mengerjakan tugas akhir, permasalahan di atas dibatasi dengan asumsi sebagai berikut :

1. Sistem distribusi tiga fasa 380V/50 Hz, sinusoidal murni dengan asumsi mengabaikan adanya ripple.
2. Tidak membahas harmonisa pada keluaran inverter.
3. Tidak membahas besarnya material dan jenis inti trafo

1.4 Tujuan

Pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut ;

1. Mengetahui proses pengaturan frekuensi pada inverter satu fasa untuk memperoleh tegangan kerja generator pesawat sinar-x diagnostik yang dibutuhkan.

2. Mengetahui karakteristik tegangan, arus, dan frekuensi dari pembangkitan tegangan tinggi sinar-x.
3. Mengetahui rugi histerisis dan arus magnetisasi sebagai akibat dari pengaruh *high frequency transformer*.

1.5 Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut ;

1. Mempelajari prinsip kerja dari generator pesawat sinar-x diagnostik dan tegangan kerja yang dibutuhkan generator pesawat sinar-x diagnostik agar dapat beroperasi pada saat digunakan. Serta mempelajari susunan pembangkitan tegangan pada generator pesawat sinar-x diagnostik.
2. Menentukan parameter sistem konfigurasi. Penentuan sistem konfigurasi dengan cara memastikan suplai tegangan yang dihasilkan oleh PLN. Setelah itu ditentukan masing-masing besaran dan sistem komponen yang digunakan untuk catu daya pada generator pesawat sinar-x diagnostik.
3. Pemodelan rectifier satu fasa. Rectifier satu fasa digunakan untuk memperoleh tegangan DC yang sebelumnya berasal tegangan sumber PLN yang berupa tegangan AC.
4. Pemodelan *boost converter*. Setelah tegangan sumber disearahkan dengan menggunakan rectifier satu fasa selanjutnya rangkaian kapasitor disusun secara paralel untuk mengatur besarnya tegangan yang masuk ke inverter satu fasa.
5. Pemodelan inverter satu fasa. Setelah besarnya tegangan diatur dengan menggunakan boost konverter maka digunakanlah inverter satu fasa untuk merubah kembali tegangan DC output dari boost converter yang disertai dengan menaikkan nilai frekuensi.
6. Pemodelan sistem kontrol inverter satu fasa untuk mendapatkan frekuensi tinggi pada inverter. Sehingga diperoleh tegangan yang diinginkan sebagai penghasil spektrum sinar-x.
7. Pemodelan sistem kontrol pada filamen sebagai penghasil arus pada pesawat sinar-x.
8. Analisis Kegagalan. Menyesuaikan hasil yang diperoleh dari simulasi yang dijalankan dengan rujukan dasar teori yang digunakan sehingga terlihat bagian mana yang tidak sesuai

dengan konsep dasarnya. Kemudian juga melihat setiap komponennya apakah telah berjalan dengan baik sesuai konsep awal.

9. Menarik Kesimpulan dari hasil simulasi. Menentukan kesimpulan yang didapatkan dari hasil simulasi tersebut dengan sebelumnya telah mengecek kebenaran berjalan atau tidaknya setiap komponen yang digunakan.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir diharapkan dapat memberikan manfaat berikut :

1. Memberikan kontribusi terhadap sistem kelistrikan generator pesawat sinar-x diagnostik yang digunakan didunia kesehatan atau medis.
2. Mengurangi biaya yang dibutuhkan untuk transformator daya yang berukuran besar yang harganya cukup mahal dan tidak ada di pasaran Indonesia.
3. Menambah bahan referensi untuk membangkitkan catu daya pada generator pesawat sinar-x diagnostik.
4. Sebagai tambahan tugas akhir yang membahas mengenai perancangan dan pengaplikasian inverter satu fasa pada sistem pembangkitan catu daya pada generator pesawat sinar-x diagnostik.

1.7 Sistematika Pembahasan

Bab 1 Pendahuluan :

Membahas mengenai latar belakang, permasalahan yang diangkat, batasan masalah, tujuan tugas akhir, metodologi, relevansi pembahasan, serta sistematika penulisan.

Bab 2 Dasar Teori :

Prinsip kerja generator pesawat sinar-x diagnostik, rectifier satu fasa, boost dc-dc konverter, Inverter satu fasa, dan transformator

Bab 3 Desain dan Pemodelan sistem :

Pemodelan rectifier satu fasa, pemodelan *boost converter*, pemodelan inverter satu fasa, pemodelan kontrol inverter, pemodelan kontrol filament, pemodelan trafo dan rectifier tegangan tinggi, dan pemodelan secara keseluruhan

Bab 4 Analisa Hasil Simulasi Sistem :

Hasil simulasi rectifier satu fasa, hasil simulasi dc-dc konverter, hasil simulasi Inverter satu fasa dan hasil simulasi keseluruhan untuk mendapatkan tegangan kerja yang dibutuhkan generator pesawat sinar-x diagnostik.

Bab 5 Penutup :

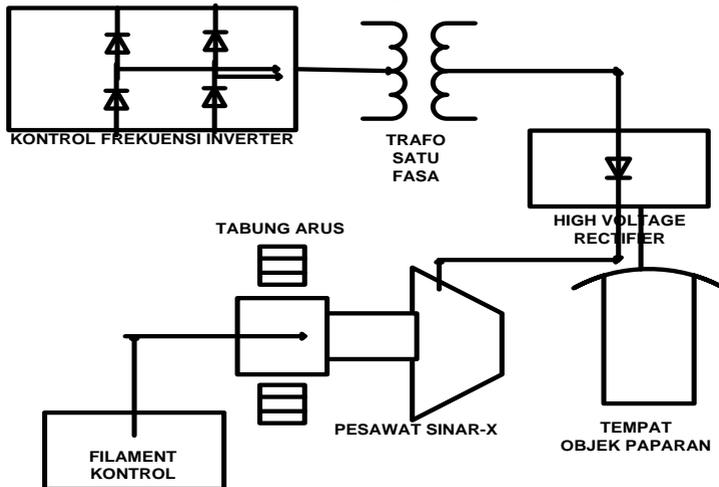
Kesimpulan dan saran.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Tegangan 50kV-150kV pada Pesawat Sinar-X Diagnostik

Pesawat sinar-X ditemukan oleh Wilhelm Conrad Roentgen yang berkebangsaan Jerman. Roentgen dilahirkan pada tanggal 27 Maret 1845 di Lennep di daerah sungai Ruhr Jerman. Gambar skematik suatu pesawat sinar x radiografi ditunjukkan pada gambar 2.1 [2].



Gambar 2.1. Skema Sederhana Pesawat Sinar-X

Pesawat sinar-X atau pesawat rontgen adalah suatu alat yang digunakan untuk melakukan diagnose medis dengan menggunakan sinar-X. sinar-X yang dipancarkan dari tabung insensi diarahkan pada bagian tubuh yang akan didiagnosa. Berkas sinar-X tersebut akan menembus dan melewati bagian tubuh kemudian akan ditangkap oleh film, sehingga terbentuk citra dari bagian tubuh yang disinari. Pesawat sinar-X terdiri dari sistem dan subsistem sinar-X atau komponen. Sistem sinar-X adalah seperangkat komponen untuk menghasilkan radiasi dengan cara terkendali. Sedangkan subsistem berarti setiap komponen kombinasi dari dua atau lebih komponen sinar-X [2].

Komponen utama pesawat sinar-X adalah :

1. Tabung insersi
2. Wadah tabung
3. Generator
4. Kolimator

Di dalam komponen tabung insersi dan wadah tabung terdapat perangkat-perangkat yaitu [2]:

1. Katoda/ elektroda negatif (sumber electron)
2. Anoda/ elektroda positif (acceleration potensial)
3. Focusing cup
4. Rotor atau stator (target device)
5. Glas metal envelope(vacuum tube)
6. Oil
7. Window

Pesawat sinar-X mempunyai sejumlah komponen yang menata kembali, mengendalikan, dan menyimpan energy listrik sebelum digunakan ke tabung sinar-X. Komponen-komponen tersebut secara kolektif dinyatakan sebagai catu daya atau pembangkit (generator). Fungsi utama dari generator adalah untuk menjadikan operator dapat mengendalikan 3 (tiga) parameter kuantifikasi yaitu tegangan tabung (kV), arus tabung (mA) dan waktu paparan (s). Generator memiliki fungsi sebagai berikut [2]:

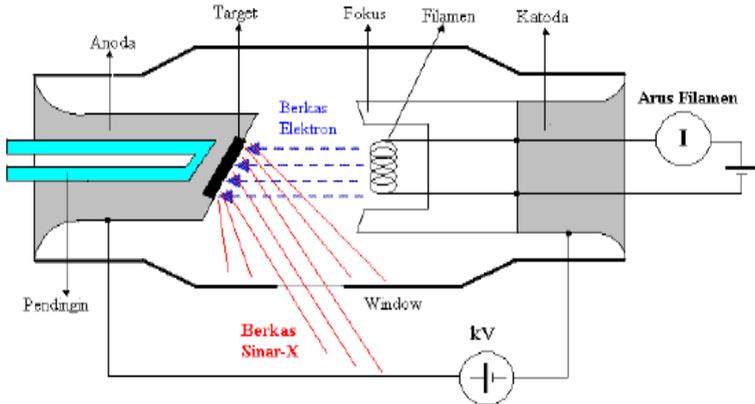
1. Menaikkan tegangan listrik (menghasilkan kV)
2. Mengkonversikan arus listrik bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC)
3. Mengubah bentuk gelombang filter
4. Menyimpan energy
5. Mengendalikan tegangan tabung (kilovoltage-kV)
6. Mengendalikan arus tabung (miliampere-mA)
7. Mengendalikan waktu paparan (Exposure time)

Saat ini ada empat jenis generator pesawat sinar-X yaitu :

1. Single phase
2. Three phase
3. High frequency
4. Constans potential

2.2 Proses Terjadinya Sinar-X

Bagian pesawat sinar-X yang menjadi sumber radiasi adalah tabung insersi yang terdapat di dalam wadah tabung sinar-X. Model tabung insersi beserta bagian-bagiannya dari suatu pesawat sinar-X ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Tabung Insersi Pesawat Sinar-X

Di dalam tabung insersi terdapat filament yang juga sebagai katoda dan target yang juga sebagai anoda. Tabung pesawat sinar-X dibuat hampa udara agar electron yang berasal dari filament tidak terhalang oleh molekul udara dalam perjalanannya menuju anoda. Sinar-X terjadi apabila pada filament menjadi berpijar sehingga electron terlepas dari atom filament dan membentuk kabut electron di sekitar filament. Jika antar katoda dan anoda diberi beda potensial yang tinggi maka electron dalam kabut electron tadi akan bergerak ke anoda dengan kecepatan tinggi. Arus electron ini disebut arus tabung. Apabila arus electron menumbuk target di anoda, pada pesawat sinar-X konvensional, electron tersebut sebagian besar akan berubah bentuk menjadi energy lain yaitu panas sedangkan sebagian kecil sekitar 1% akan berubah menjadi sinar-X [2].

Berdasarkan proses terjadinya sinar-X dibagi menjadi dua macam, yaitu :

1. Sinar-X Bremsstrahlung adalah istilah dalam bahasa Jerman yang berarti radiasi pengereman. Elektron sebagai partikel bermuatan listrik yang bergerak dengan kecepatan tinggi. Apabila melintas dekat ke inti suatu atom, maka gaya tarik elektrostatis inti atom yang kuat akan menyebabkan elektron membelok dengan tajam. Peristiwa itu menyebabkan elektron kehilangan energinya dengan memancarkan radiasi elektromagnetik yang dikenal sebagai sinar-X bremsstrahlung.
2. Sinar-X karakteristik, terjadi akibat tumbukan berkas elektron cepat dengan elektron orbit dari atom target, sehingga secara alamiah terjadi proses perpindahan elektron atom dari tingkat energi yang lebih tinggi menuju ke tingkat energi yang lebih rendah sembari melepaskan sinar-X karakteristik.

Sinar-X bremsstrahlung mempunyai spectrum energi kontinu yang lebar, sementara spectrum energi dari sinar-X karakteristik adalah diskrit.

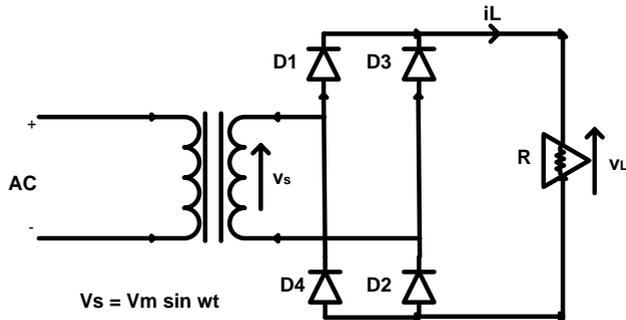
2.3 Rectifier Satu Fasa

Penyearah (rectifier) adalah suatu rangkaian elektronika daya yang dapat mengubah sumber tegangan bolak-balik (AC) menjadi sumber tegangan searah (DC) yang tetap.

Penyearah Gelombang penuh satu fasa ada dua jenis rangkaian :

1. Rangkaian penyearah jembatan (bridge)

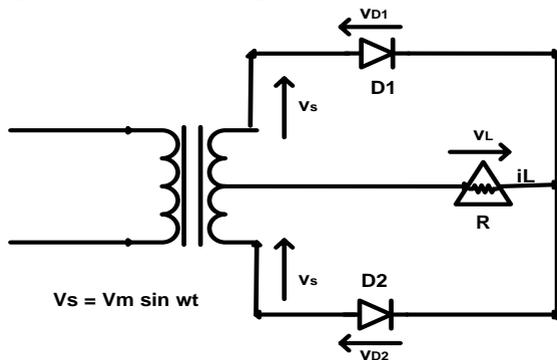
Ketika setengah periode pertama (polaritas +), diode D1 dan D2 ON sedangkan diode D3 dan D4 OFF. Selanjutnya setengah periode kedua (polaritas -), diode D3 dan D4 ON sedangkan diode D1 dan D2 OFF. Gambar rangkaian sinyal rectifier jembatan pada gambar 2.3 [6].



Gambar 2.3. Gambar rangkaian dan sinyal penyearah jembatan

2. Rangkaian penyearah Center Tap (Split)

Ketika setengah periode pertama (polaritas +), diode D1 ON dan OFF. Selanjutnya, setengah periode kedua (polaritas -), diode D2 ON sedangkan diode D1 OFF. Gambar rangkaian dan sinyal penyearah Center Tap pada gambar 2.4[6].

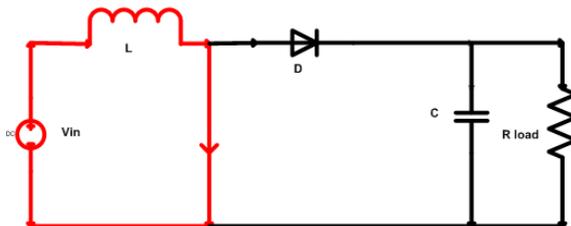


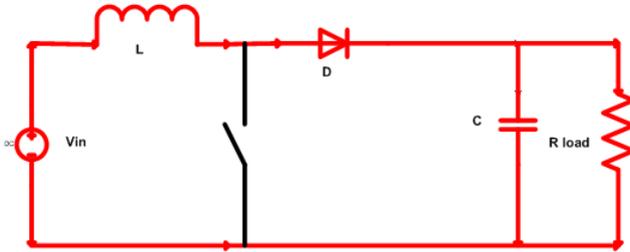
Gambar 2.4. Rangkaian dan sinyal penyearah center Tap

2.4 Boost Converter

Boost konverter adalah salah satu DC to DC converter yang berfungsi menaikkan tegangan DC. Boost converter mempunyai tegangan output yang selalu lebih besar daripada tegangan input. Polaritas tegangan output mempunyai nilai yang sama dengan input.

Pada gambar 2.5, mendeskripsikan pensaklaran dari boost converter. Duty cycle (D) atau juga dapat diasumsikan sebagai (k) digambarkan sebagai berikut [8]:





Gambar 2.5. Boost Converter

$$k = t_{on}/T$$

$$t_{on} = k \times T$$

$$T = t_{on} + t_{off}$$

$$t_{off} = (1-k) \times T$$

Dengan mengasumsikan perubahan arus yang melewati induktor konstan, maka saat t_{on} berlaku dan disajikan pada persamaan berikut ini [8]:

$$V_{in} = L \Delta i / \Delta t_{on} = L \Delta i = V_{in} \times t_{on} \quad 2.1$$

Saat t_{off} berlaku :

$$V_{in} = -L \Delta i / \Delta t_{off} + V_{out} \quad 2.2$$

$$V_{out} = V_{in} + \Delta i / \Delta t_{off} \quad 2.3$$

Sehingga :

$$V_{out} = V_{in} (1 - t_{on}/t_{off}) \quad 2.4$$

$$V_{out} = V_{in}/1 - k \quad 2.5$$

Dengan persamaan diatas kita dapat mengetahui persamaan tegangan keluaran boost converter :

$$V_{out} = V_{in}/1 - D \quad 2.6$$

Besarnya inductor yang menentukan batas antara CCM (Continuous Conduction Mode) dan DCM (Discontinuous Conduction Mode) dapat diperoleh pada persamaan berikut :

$$L_b = (1 - D)^2 D R / 2f \quad 2.7$$

Dimana :

L_b = Nilai Induktor Minimum

D = Besarnya duty cycle

f = Frekuensi Switching

R = Nilai tambahan pada sisi output
 Sedangkan untuk besarnya nilai kapasitor dapat menggunakan persamaan :
 $C_{min} = DV_o/V_r R_f$

Dimana :

C = Nilai kapasitor
 D = Besarnya Duty Cycle
 V_o = Besarnya Ripple tegangan pada sisi output
 R = Nilai tambahan
 F = Frekuensi Switching

Tegangan output dari konverter Buck-Boost dapat lebih besar atau lebih kecil daripada tegangan input. Apabila $D > 0.5$, maka output akan lebih besar, sedangkan ketika $D < 0.5$, output akan lebih kecil.

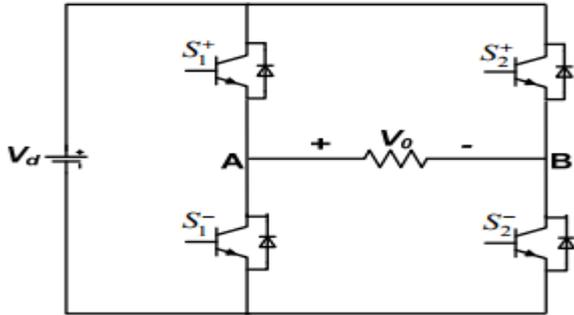
2.5 Inverter Satu Fasa

Konverter dc-ac atau bisa disebut inverter adalah suatu alat elektronika yang berfungsi untuk menghasilkan keluaran ac sinusoidal dari masukan dc dimana magnitudo dan frekuensinya dapat diatur. Dilihat dari jenisnya masukannya, inverter dibagi menjadi dua macam yaitu VSI (Voltage Source Inverter) dimana masukannya adalah sumber tegangan dc dan CSI (current Source Inverter) dimana masukannya adalah sumber arus dc. Namun pada prakteknya yang sering digunakan adalah VSI sedangkan CSI penggunaannya terbatas pada kontrol motor ac dengan daya yang sangat besar.

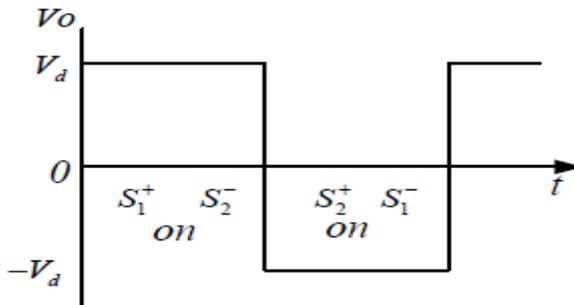
Salah satu topologi yang sering digunakan adalah topologi *full bridge* dengan sumber dc yang digunakan sebagai sumber tegangannya. Dasarnya, untuk mengatur masukan tegangannya dengan cara mengatur pensaklaran pada diode dari rangkaian pada gambar 2.6. Pengaturan pensaklaran dengan membuat diode S1+ on dan S1- off, begitu halnya dengan S2+ dan S2- [17].

Pada saat S1+ dan S2- on, maka akan membuat tegangan $V_o = V_d$ sedangkan pada saat S2+ dan S1- on maka akan membuat $V_o = -V_d$ seperti ilustrasi gambar 2.7 di bawah. Sehingga nilai keluaran $V_{out-rms}$ dapat dicari dengan persamaan 2.8 berikut ini [17].

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{\frac{T_o}{2}} V_d^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.8$$



Gambar 2.6 Rangkaian Inverter Satu Fasa *full bridge*



Gambar 2.7 Bentuk Sinyal Tegangan Keluaran Inverter

Penyaklaran dengan cara tersebut akan menghasilkan gelombang sinus dengan model kotak yang penuh akan harmonisa. Padahal yang diperlukan adalah gelombang sinus murni sehingga digunakanlah teknik *switching* PWM pada topologi VSI *full bridge*.

2.5.1 *Pulse Width Modulation*

PWM adalah salah satu teknik untuk mengatur penyaklaran transistor IGBT dalam inveter. Teknik ini pada dasarnya adalah membandingkan dua sinyal untuk mendapatkan pola penyaklaran transistor. Sinyal pertama adalah sinyal repetitif sebagai sinyal carier dan biasanya adalah sinyal segitiga VT. Sinyal kedua adalah sinyal yang

yang akan dimodulasi untuk mendapatkan bentuk keluaran yang diinginkan dan biasa disebut sinyal referensi V_r . Apabila sinyal referensi V_r lebih besar (kecil) dari sinyal carier VT maka lengan atas (T_i) akan menerima sinyal on (off) yang disajikan pada gambar 2.8 berikut ini [17].

Gambar 2.8 *Pulse Widht Modulation*

2.6 Harmonisa dan Filter Harmonisa

Harmonisa adalah distorsi periodik dari gelombang sinus tegangan, arus atau daya dengan bentuk gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan diluar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Nilai frekuensi dari gelombang harmonisa yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental dengan bilangan harmonisanya (f , $2f$, $3f$, dst). Bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa (h_1 , h_2 , dan seterusnya) pada frekuensi kelipatannya. Semakin banyak gelombang harmonisa yang diikutsertakan pada gelombang fundamentalnya, maka gelombang akan semakin mendekati gelombang persegi atau gelombang akan berbentuk non sinusoidal [8].

2.7 Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah dan menyalurkan energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan megnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan Pada dasarnya

transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dibelitkan pada inti ferromagnetik. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Transformator yang menjadi fokus bahasan disini adalah transformator daya. Konstruksi transformator daya ada dua tipe yaitu tipe inti (core type) dan tipe cangkang (shell type). Kedua tipe ini menggunakan inti berlaminasi yang terisolasi satu sama lainnya, dengan tujuan untuk mengurangi rugi-rugi arus eddy.

2.8 Kurva Histerisis (B-H)

Kurva histerisis adalah ketergantungan sebuah rangkaian terhadap bahan yang digunakan. Penggunaan bahan yang dapat menimbulkan terjadinya perbedaan nilai histerisis adalah bahan ferromagnetik. Untuk mencegah terjadinya perbedaan besar derajat kurva histerisis digunakanlah bahan yang berlaminasi. Timbulnya kurva histerisis diakibatkan oleh besarnya arus magnetisasi yang disebabkan oleh besarnya tegangan dan frekuensi. Arus magnetisasi timbul sebagai akibat dari kinerja transformator dengan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik [12].

Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan

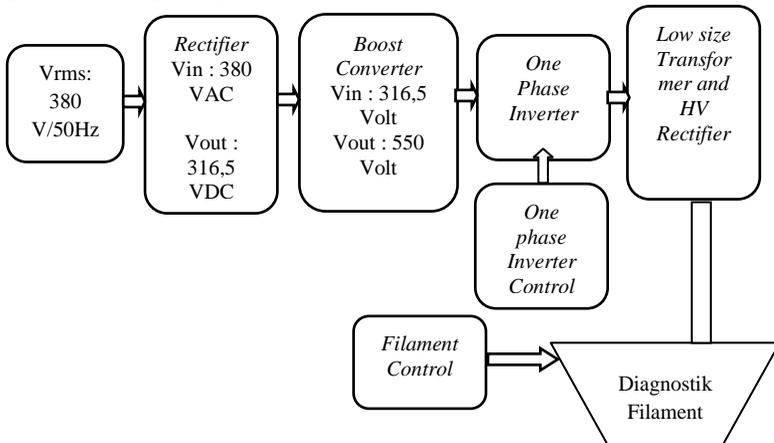
primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Jika didalam rangkaian magnet transformator tidak terjadi kejenuhan, maka arus magnetisasi akan berbanding langsung perubahan fluks, dan akan menghasilkan gelombang sinusoidal arus magnetisasi yang sefasa terhadap fluks. Dalam keadaan jenuh arus magnetisasi tidak lagi merupakan gelombang sinusoidal yang murni karena gelombang ini telah dipengaruhi oleh karakteristik kurva B-H dari rangkaian magnetik yang disajikan pada gambar 2.9 berikut ini [12].

Gambar 2.9 Kurva B-H

Seperti terlihat pada gambar kurva B-H diketahui bahwa fluks adalah gelombang sinus, namun gelombang arus terlihat mengandung komponen harmonik yang merupakan harmonik ketiga. Besarnya arus eksitasi sangat bergantung dari ukuran dan tingkat tegangan pada transformator.

BAB III DESAIN DAN PEMODELAN

Secara umum pembahasan Tugas Akhir ini akan mendesain pemodelan Komponen Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis. Tegangan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan Peralatan Diagnostik berkisar 50kV-150kV tergantung besar intensitas tubuh seorang pasien. Pembangkitan tegangan tinggi peralatan diagnostik medis akan memanfaatkan besar frekuensi yang dihasilkan oleh inverter satu fasa dari sistem tersebut sehingga pengaturan intensitas tegangan dapat disesuaikan dengan kebutuhan. Nantinya juga dihasilkan frekuensi tinggi sebesar maksimal 15kHz pada proses pembangkitan tegangan tinggi tersebut dan besarnya frekuensi disesuaikan dengan kebutuhan tegangan kerja dari Peralatan Diagnostik tersebut. Sistem pembangkit tegangan tinggi pada Peralatan Diagnostik ditunjukkan pada blok diagram gambar 3.1.



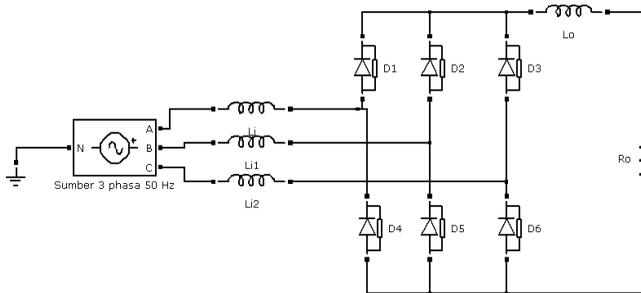
Gambar 3.1 Blok diagram Pemodelan Komponen Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis

Sesuai pada gambar 3.1 dapat dilihat beberapa komponen utama yang digunakan dalam pemodelan sistem, diantaranya *rectifier*, *boost converter*, *one phase inverter*, *one phase inverter control*, *transformer and rectifier*, dan *filament control*. Pembangkit

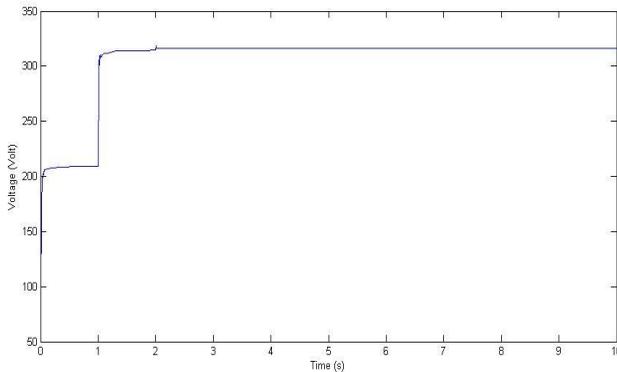
Sinar-X bersumber dari tegangan PLN sebesar 380 RMSline toline dengan frekuensi 50Hz. Tegangan selanjutnya disearahkan dengan *rectifier* dan diperoleh tegangan *rectifier* sebesar 316,5 VDC. Selanjutnya tegangan tersebut dinaikkan dengan menggunakan rangkaian *boost converter* menjadi 550 VDC. Pengaplikasian *one phase inverter* yang digunakan untuk mengubah tegangan DC menjadi AC dan memiliki frekuensi tinggi sebagai faktor kali untuk mendapatkan tegangan tinggi pada peralatan diagnostik. *One phase inverter* agar dapat menghasilkan frekuensi tinggi maka diberikan sistem kontrol pada rangkaian tersebut. Setelah tegangan kerja yang diinginkan dihasilkan dari frekuensi tinggi maka selanjutnya akan dinaikkan tegangan dengan sebuah transformer ukuran lebih kecil sesuai dengan perhitungan perbandingan lilitan pada Bab 4. Transformer dilengkapi dengan *high voltage rectifier* yang bertujuan untuk mengubah tegangan tinggi AC yang telah dilipatgandakan pada transformer menjadi tegangan tinggi DC. Tegangan tinggi DC akan masuk ke dalam filament diagnostik untuk menghasilkan sinar-x. Tegangan tinggi DC yang dihasilkan juga dipengaruhi oleh besar arus filament yang bekerja pada peralatan diagnostik sehingga diperlukan sistem kontrol untuk mengatur arus tersebut yang besarnya *mili amper*. Pada akhir sistem ini peralatan diagnostik medis dapat bekerja sesuai dengan tegangan kerja dan arus yang dibutuhkan.

3.1 Pemodelan Sumber PLN 380V/50Hz dan Rectifier

Tahap awal dalam pemodelan sistem yaitu dengan menyearahkan sumber PLN 380 V/ 50Hz agar nantinya diperoleh tegangan 316,5 VDC. Untuk membuat sumber tegangan menyerupai seperti aslinya maka diberikan rangkaian resistor dan induktor sehingga diperoleh gambar tegangan pada gambar 3.2. penggunaan rangkaian resistor dan induktor dibuat sebagai hambatan pada nilai kabel. Penggunaan kabel dengan mengibaratkan rangkaian induktor pada sisi sebelum memasuki sebuah diode dengan besaran yang sama yaitu L_i . Sedangkan pada sisi keluaran diode menggunakan hambatan dan inductor juga dengan masing-masing direpresentasikan dengan R_o dan L_o . Pada rangkaian yang dibuat nilai R_o yang dipergunakan bernilai 100 ohm untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan yaitu 316,5 VDC. Nantinya rangkaian yang dibuat akan direpresentasikan dalam pemodelan Simulink.



Gambar 3.2 Pemodelan Rangkaian *Rectifier* pada Sumber 3 Phasa



Gambar 3.3 Sinyal Tegangan Output Rangkaian *Rectifier* pada Sumber 3 Phasa

Penggunaan keenam diode pada rangkaian penyearah dibuat seperti aslinya dimana mempunyai parameter sebagai berikut untuk masing-masing diode yang digunakan :

Resistance Ronh	: 0,0001 ohms
Inductace Lon	: 0 H
Forward Voltage (Vf)	: 0,8 Volt
Initial Current (Ic)	: 0 A
Snubber Resistance (Rs)	: 4,85 Ohms
Snubber Capacitance (Cs)	: 0,005 F

Dari pengisian parameter tersebut sehingga diperoleh besar tegangan yang diinginkan dari keluaran rangkaian penyearah yaitu sebesar 316,5 VDC dengan kestabilan yang terjadi pada $T = 0,42$ s.

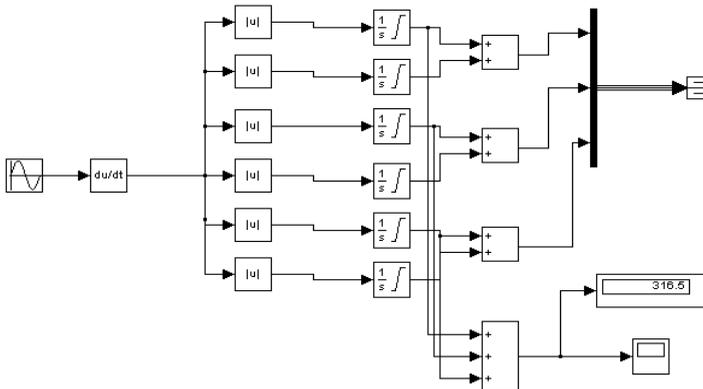
Rangkaian diatas akan direpresentasikan kedalam bentuk simulink matlab dengan menggunakan karakteristik dari pengaruh induktor dan keadaan *on/off* diode. Sehingga pengaruhnya merupakan fungsi *derivative* dari arus yang terjadi pada saat mengalir pada diode. Hasilnya ditunjukkan dengan persamaan 3.1-3.3 berikut ini [18].

$$\frac{dir}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(\frac{Li+Lo}{Li} uts - \frac{2Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \quad 3.1$$

$$\frac{dis}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(-\frac{2Li+Lo}{Li} uts + \frac{Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \quad 3.2$$

$$\frac{dit}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} (uts + utr + 2vo) \quad 3.3$$

Sehingga persamaan diatas digunakan sebagai mempermudah dalam membuat pemodelan kedalam bentuk simulink matlab yang disajikan pada gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.4 Simulink Rangkaian *Rectifier* 3 Fasa

3.2 Pemodelan *Boost Converter*

Penentuan nilai keluaran *boost converter* sebesar 550 VDC dengan input tegangan 316,5 VDC. Dengan adanya dua parameter ini maka kita dapat menentukan *duty cycle* pada input IGBT sehingga diperoleh tegangan yang diinginkan. Selain itu ada dua komponen penting yang harus digunakan pada rangkaian *boost converter* yaitu sebuah induktor dan sebuah kapasitor, agar *boost*

converter bekerja secara *continuous conduction mode* (CCM) maka besar induktansi yang digunakan disesuaikan dengan perhitungan pada persamaan 3.4 di bawah ini.

$$L = \frac{V_i \times D}{\Delta i_L \times f_s} \quad 3.4$$

Dari persamaan tersebut maka ditentukan besar ripple arus yaitu dua persen (0,02) dan besar frekuensi 100kHz. Untuk nilai D yaitu *duty cycle* diperoleh dari persamaan 3.5 berikut ini,

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad 3.5$$

$$D = 1 - \frac{316,5}{550}$$

$$D = 0,42$$

Maka *duty cycle* (D) yang digunakan sebesar 0.42, sehingga diperoleh besar induktor pada rangkaian yaitu,

$$L = \frac{316,5 \times 0,42}{0,02 \times 100000}$$

$$L = 0,0665 \text{ H} = 66,5 \text{ mH}$$

Parameter ke dua yaitu kapasitor (C) digunakan sebagai filter. Untuk mendapatkan nilai kapasitor diperoleh dari persamaan 3.6 berikut ini,

$$C = \frac{D}{R \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times f} \quad 3.6$$

Jika nilai resistor (R) yang digunakan adalah 100 ohm dan ripple tegangan maksimum 55 volt maka diperoleh nilai kapasitor pada rangkaian yaitu,

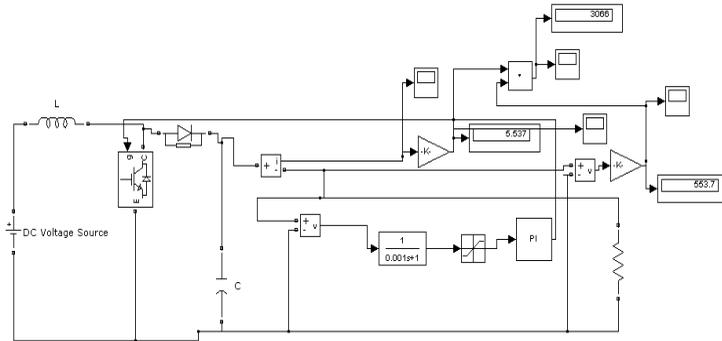
$$C = \frac{0,42}{100 \times 0,1 \times 100000}$$

$$C = 0,42 \times 10^{-6} = 0,42 \text{ } \mu\text{F}$$

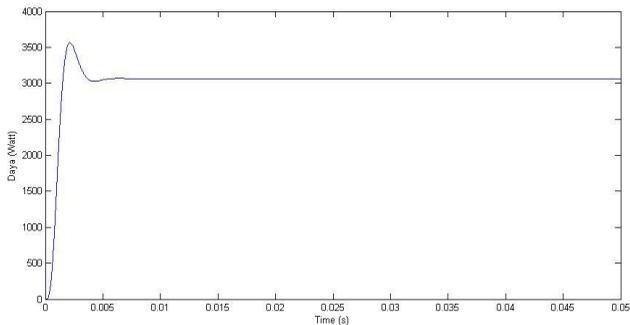
Setelah didapatkan nilai induktor dan kapasitor sebesar 66,5 mH dan 0,42 μF maka dibuatlah rangkaian pada gambar 3.5. Dan untuk menjaga nilai kestabilan tegangan keluaran *boost converter* diterapkan sebuah sistem kontrol PI. Pengontrolan tersebut menggunakan nilai keluaran yang dibatasi dengan nilai saturasi agar tidak melebihi nilai tegangan yang diinginkan yaitu sebesar 550 Volt. Pada pengisian PI (*proportional integral*), dilakukan sistem pengisian secara “random” dengan keberhasilan parameter dari tegangan keluaran *boost converter* dapat steady state pada titik 550 Volt. Dikarenakan pengontrolan PI dapat mempercepat kinerja dari sistem, maka sistem pengisian harus disesuaikan dengan kurva karakteristik dari tegangan, arus, dan daya *boost converter* yang disajikan pada gambar 3.6, gambar 3.7, dan gambar 3.8. Sehingga

nilai parameter dan *transfer function* diperoleh sebesar $K_p = 0,000001$, $K_i = 0,000003$, *sample time* = 0,001, *denominator coefficient* = [0,0001 1], *numerator coefficient* = 1, dan $K = 2,48$.

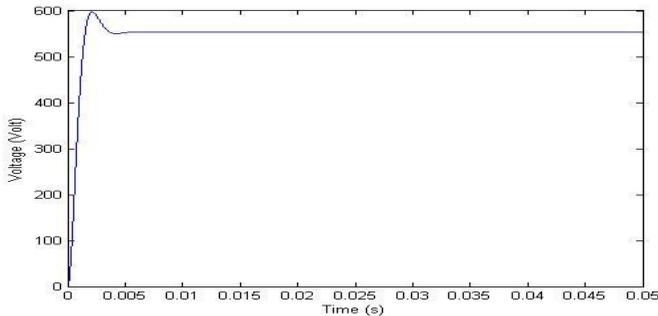
Hasil dari pemodelan *boost converter* pada gambar 3.5, maka didapatkan nilai tegangan sebesar 550 VDC yang mencapai stabil pada titik $T = 0,42$ s, penjelasan tersebut dapat dilihat pada gambar 3.7. daya keluaran memiliki besar 1211 Watt, kurva karakteristiknya dapat dilihat pada gambar 3.6. Dan terakhir adalah nilai arus sebesar 2.21 A dengan kurva karakteristik yang dapat dilihat pada gambar 3.8 sebagai referensi dalam pemodelan *boost converter* secara matlab.



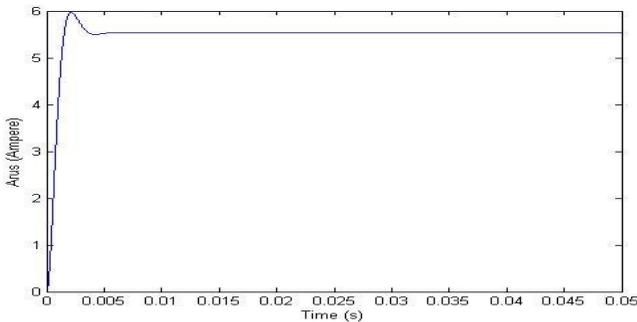
Gambar 3.5 Rangkaian *Boost Converter*



Gambar 3.6 Kurva Karakteristik Daya *Boost Converter*



Gambar 3.7 Kurva Karakteristik Tegangan *Boost Converter*



Gambar 3.8 Kurva Karakteristik Arus *Boost Converter*

Dari ilustrasi rangkaian *boost converter* pada gambar 3.5 maka dapat diambil kesimpulan bahwa pengaruh saklar transistor dan dioda sangat berpengaruh pada tegangan output ketika on atau off. Jika pada saat transistor on diilustrasikan dengan simbol F dan transistor off diilustrasikan dengan F' maka dapat diambil turunan persamaan rumusnya sebagai berikut [18].

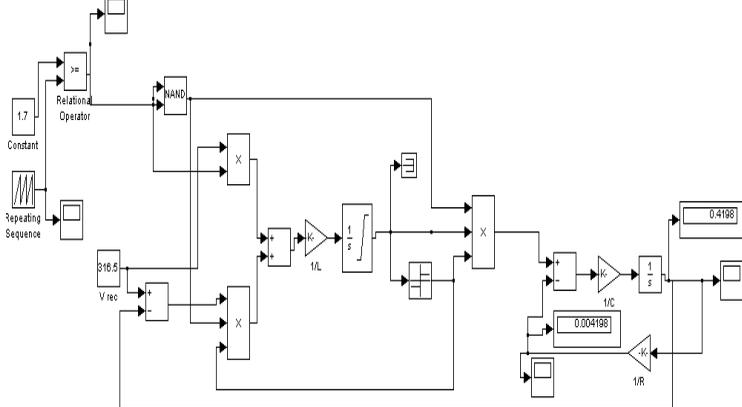
$$V_L(t) = V_i(t) \cdot F + (V_i(t) - V_o(t)) \cdot F' \cdot i_L \quad 3.7$$

$$i_C(t) = -i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L = C \frac{dV_o}{dt} \quad 3.8$$

$$V_o = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L) dt \quad 3.9$$

Persamaan 3.7-3.9 digunakan sebagai parameter untuk menentukan pemodelan Matlab sekaligus mempermudah mendapatkan signal tegangan dan arus yang memiliki sinyal baik dan stabil. Selain itu persamaan tersebut juga berfungsi untuk menentukan nilai dari *duty cycle* yang nantinya akan digunakan.

Reperesentasi sederhana dari *boost converter* pada matlab akan disajikan pada gambar 3.9 berikut ini.



Gambar 3.9 Pemodelan Matlab Boost Converter

Parameter yang digunakan :

V rectifier : 316,5 Volt

L : 66,5 mH

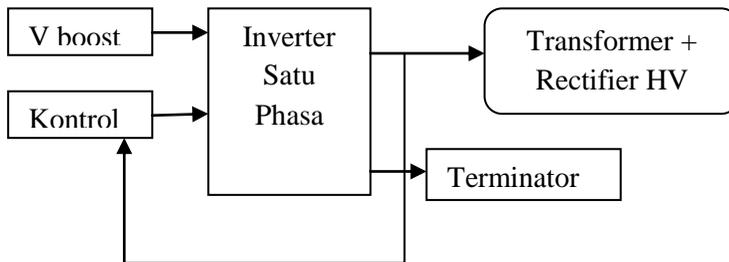
C : 0,42 μ F

R : 100 Ohm

Dari nilai tersebut maka didapatkan nilai tegangan *boost converter* sebesar 550.2 Volt sebagai tegangan input pada inverter satu fasa.

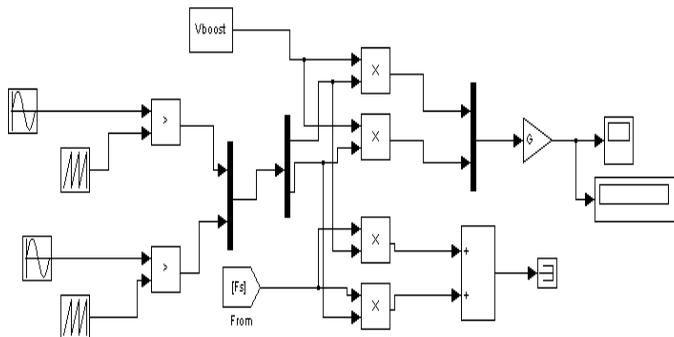
3.3 Pemodelan Inverter Satu Fasa

Tegangan dari *boost converter* yang bernilai 550 VDC selanjutnya diubah menjadi tegangan AC yang memiliki frekuensi tinggi maksimal 15 kHz. Perubahan tegangan searah menjadi bolak-balik menggunakan inverter satu fasa. Selanjutnya setelah didapatkan frekuensi tinggi maka tegangan dinaikkan sebesar kebutuhan untuk mendapatkan nilai tegangan yang diinginkan sebagai tegangan kerja sinar-x sebelum masuk ke transformer. Blok diagram inverter satu fasa disajikan pada gambar 3.10 berikut ini.



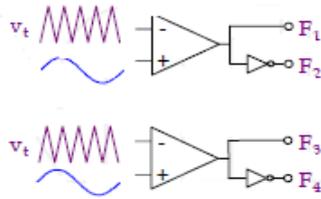
Gambar 3.10 Diagram Blok Inverter Satu phasa

Diagram blok pada gambar 3.10 menggambarkan jalan kerja yang dibuat pada simulink sebagai inovasi rangkaian inverter satu phasa yang diinginkan. Sehingga pemodelan yang bertegangan dan berfrekuensi tinggi pada peralatan sinar-x diagnostik medis dapat dimodelkan pada gambar 3.11 berikut yang diterapkan pada pembuatan Tugas Akhir ini. Keterangan terminator pada diagram blok gambar 3.10 menjelaskan jumlah arus beban yang nantinya akan mengalir pada rangkaian.



Gambar 3.11 Pemodelan Inverter Satu Phasa Frekuensi Tinggi

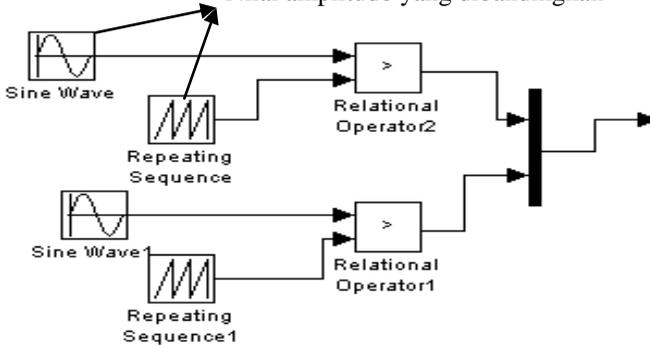
Kontrol di atas menggunakan intersektive PWM (*Pulse Widht Modulation*). Prinsip kerja yang digunakan pada kontrol inverter di atas dengan menggunakan perbandingan antara dua tegangan sinusoidal yang mana phasa digunakan sebesar 120 derajat perbedaan dengan gelombang tegangan segitiga. Prinsip kerja dari intersektive PWM dijelaskan pada gambar 3.12 di bawah ini.



Gambar 3.12 Prinsip Intersective PWM

Gambar 3.12 menunjukkan prinsip kerja dari *switching* inverter satu fasa dengan menggunakan tegangan sinusoidal dan tegangan segitiga. Secara sederhana prinsip di atas akan aktif apabila tegangan sinusoidal lebih besar daripada tegangan segitiga akan membuat F1 dan F3 aktif. Sedangkan apabila tegangan sinusoidal kurang dari tegangan segitiga maka akan membuat F2 dan F4 aktif. Untuk mendapatkan frekuensi yang diinginkan maka pengaturan indeks modulasi dapat dilakukan secara manual. Proses pengaturan indeks modulasi pada tegangan sinusoidal dan tegangan segitiga pada *pulse width modulation* dapat dilihat pada gambar 3.13 di bawah ini.

Nilai amplitudo yang dibandingkan



Gambar 3.13 Pengaturan Indeks Modulasi

Penentuan besar indeks modulasi dengan cara membandingkan nilai amplitudo dari kedua tegangan tersebut yaitu sinusoidal dan segitiga. Pengaturan nilainya dapat dilihat pada persamaan 3.10 berikut ini.

$$V_{rms-inv} = \frac{M \times \sqrt{3}}{2\sqrt{2}} \times V_{out-boost} \quad 3.10$$

Dari persamaan di atas dapat ditentukan nilai dari indeks modulasi yang diinginkan untuk mendapatkan frekuensi tinggi. Sebelumnya pada perhitungan nilai $V_{out-boost}$ telah ditentukan dan akan dianalisa sebagai input tegangan pada inverter satu fasa untuk mendapatkan tegangan kerja dari sinar-x berfrekuensi tinggi. Setelah nilai yang diinginkan didapat akan masuk kedalam sebuah kontrol yang berfungsi untuk menaikkan tegangan inverter dan mengubah frekuensi yang sebelumnya 50 Hz menjadi maksimal 15 kHz. Jadi dengan membandingkan sinyal referensi dan sinyal carrier tegangan segitiga seperti persamaan 3.11 berikut merupakan nilai dari indeks modulasi.

$$M = \frac{V_r}{V_T} \quad 3.11$$

3.4 Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa Dan Filament Sinar-X

Sinar-X mempunyai sistem pembangkitan tegangan dan arus pada kawat filamennya sehingga dibutuhkan sebuah sistem yang mampu mengontrol dari kinerja pesawat sinar-x. Kontrol tegangan diatur pada inverter berdasarkan nilai frekuensi yang dihasilkan, jadi semakin besar nilai frekuensi akan mendapatkan nilai tegangan yang besar pula. Sedangkan kontrol filament berfungsi untuk mendapatkan nilai arus yang diinginkan karena kontrol filament ini bersifat sebagai beban pada pesawat sinar-x diagnostik. Kedua kontrol tersebut dimodelkan pada subbab berikut ini.

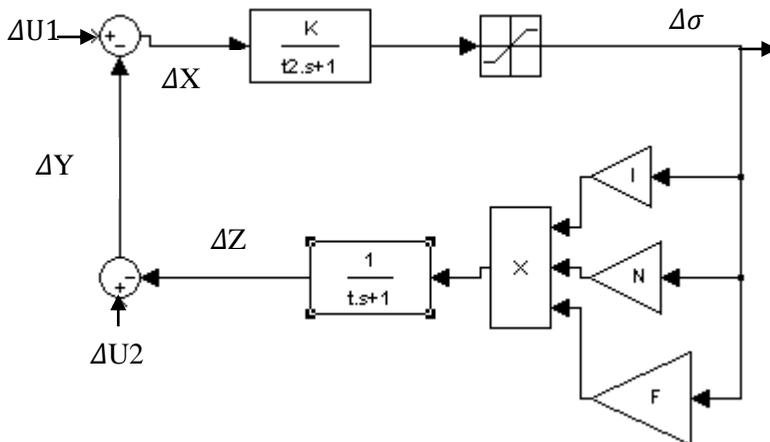
3.4.1 Kontrol Inverter Tegangan dan Frekuensi

Kontrol inverter dimaksudkan untuk mengontrol nilai frekuensi dan tegangan yang dihasilkan dengan memungkinkan memiliki tegangan tinggi sebagai input dari transformator nantinya. Berdasarkan persamaan 3.69 pada generator sinar-x dimana nilai tegangan sebanding dengan nilai frekuensi yang dihasilkan.

$$\frac{U}{f_{xixn}} = 1 \quad 3.12$$

Sehingga dari persamaan tersebut kita dapat mengatur nilai tegangan berdasarkan besarnya frekuensi yang mencapai maksimal 15 kHz. Persamaan pada 3.12 selanjutnya

direpresentasikan sebagai sistem kontrol yang dibuat untuk mengatur tegangan dan frekuensi tinggi sebagai input pada transformator dan penyearah tegangan tinggi. Sistem kontrol pada penyearah satu fasa disajikan pada gambar 3.14 berikut ini.



Gambar 3.14 Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa Tegangan dan Frekuensi Tinggi

Sistem kontrol yang telah dibuat diatas dianalisa untuk mendapatkan nilai kestabilan pada saat bekerja pada sistem inverter satu fasa. Sehingga diperoleh beberapa persamaan 3.13-3.17 dari sistem kontrol yang telah dibuat untuk selanjutnya diplot sebagai hasil dari analisa tegangan dan frekuensi sistem.

$$\Delta\sigma' = \frac{\Delta X K - \Delta\sigma}{t2} \quad 3.13$$

$$\Delta Z' = \frac{\Delta\sigma * I * N * F - \Delta Z}{t} \quad 3.14$$

$$\Delta Y' = \frac{-\Delta Y - \Delta\sigma * I * N * F - \Delta U2}{t} \quad 3.15$$

$$\Delta X' = \frac{-\Delta X + \Delta\sigma * I * N * F + \Delta U1 - \Delta U2}{t} \quad 3.16$$

Sehingga dari persamaan tersebut didapat sebuah sistem yang dipresentasikan ke dalam bentuk matriks untuk mempermudah dalam mencari kontrol pada saat diplot pada

matlab. Persamaan matriks dari sistem kontrol pada gambar 3.14 disajikan pada persamaan 3.17 berikut ini.

$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma' \\ \Delta Z' \\ \Delta Y' \\ \Delta X' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/t2 & 0 & 0 & K/t2 \\ i*n*f/t & -1/t & 0 & 0 \\ -i*n*f/t & 0 & -1/t & 0 \\ i*n*f/t & 0 & 0 & -1/t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma \\ \Delta Z \\ \Delta Y \\ \Delta X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/t \\ 1/t & -1/t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U1 \\ \Delta U2 \end{bmatrix} \quad 3.17$$

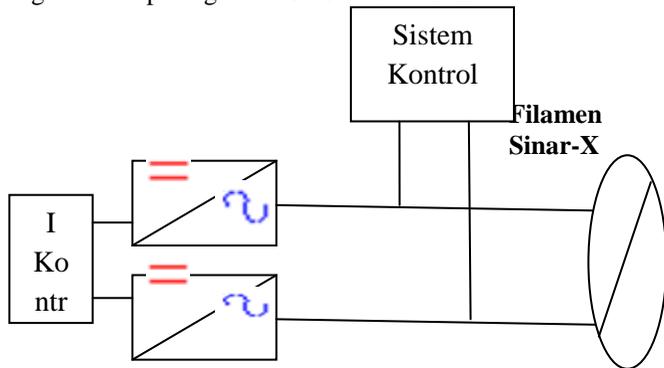
Persamaan kontrol di atas selanjutnya diplot ke Matlab untuk mendapatkan nilai kestabilan yang diinginkan sebagai hasil dari tegangan dan frekuensi tinggi. Dari parameter diatas dapat ditentukan nilai frekuensi, arus filament, dan banyaknya lilitan pada trafo. Sedangkan nilai K, t2, dan t diisi dengan nilai yang random sebagai penentuan untuk mendapatkan nilai yang stabil. K adalah konstanta sedangkan t2 dan t adalah domain waktu pada transfer function. Nilai akan baik apabila nilai kestabilan untuk K memiliki nilai lebih dari nol.

$\Delta U1$ dan $\Delta U2$ adalah parameter kontrol untuk membandingkan nilai yang keluar pada $\Delta\sigma$ agar mendapatkan nilai yang diinginkan. Untuk nilai $\Delta U1$ dan $\Delta U2$ menggunakan parameter bentuk *sinwave* sebagai pembanding dengan pengaturan nilai yang telah ditentukan. Setelah hasil yang diinginkan diperoleh pada output $\Delta\sigma$, selanjutnya keluaran pada $\Delta\sigma$ akan mengatur besarnya tegangan output pada *rectifier* satu phasa. Setelah kontrol telah ditentukan nilainya maka dapat diperoleh hasil keluaran inverter satu phasa yang nilainya sebagai inputan transformator tegangan tinggi.

3.4.2 Kontrol Filament Sinar-X

Sistem kontrol selanjutnya adalah kontrol filament sinar-X yang mengalir kefilament tube. Kontrol ini berfungsi untuk suplai arus pemanasan filamen, sebagai regulasi dari arus yang mengalir, menghasilkan emisi

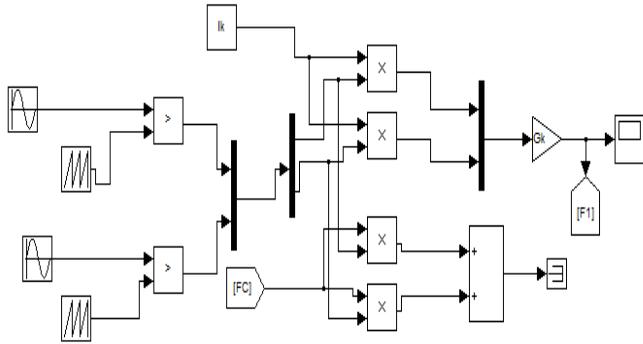
elektron untuk menentukan dosis dari sinar-x dan sebagai eksposure supaya sinar-x dapat memberikan intensitas pemanasan yang diinginkan. Kontrol filament akan membangkitkan arus tabung sebagai akibat dari pelepasan elektron dari filamen ke target. Karena diketahui bahwa pesawat sinar-x tidak dibebani sehingga diperlukan sistem kontrol filament yang seolah-olah ada arus yang mengalir. Pada sistem kontrol ini akan digunakan sistem pembangkit arus tabung sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Ketiga besar arus yang berbeda merepresentasikan intensitas tubuh pasien dengan volume tubuh berbeda. Karena kalau kita tahu bahwa orang kurus, sedang, dan gemuk memiliki waktu pemanasan yang berbeda pada penyinaran sinar-x. Oleh karena itu sistem kontrol filament dibuat berdasarkan diagram blok pada gambar 3.15 di bawah ini.



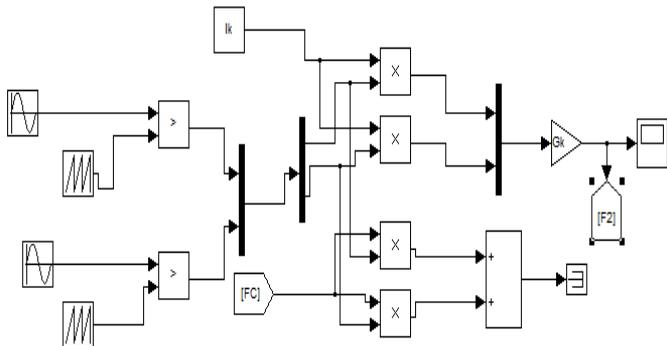
Gambar 3.15 Diagram Blok Sistem Kontrol Filamen Sinar-X

Dari gambar diagram blok di atas menunjukkan sistem kontrol filament dengan memanfaatkan arus kontrol untuk menghasilkan sebuah arus filamen. Arus kontrol yang masuk berupa arus DC dan selanjutnya dirubah menjadi arus yang memiliki frekuensi. Nilai arus DC yang masuk melalui rangkaian *double inverter* arus akan merubah besaran arus tersebut menjadi arus AC. Kedua diagram blok yang menunjukkan perubahan dari arus kontrol DC menjadi arus kontrol AC ditunjukkan pada

gambar 3.16 dan 3.17 berikut ini pada pemodelan matlab untuk diterapkan pada tugas akhir ini.



Gambar 3.16 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 1



Gambar 3.17 Pemodelan Arus Filament Sinar-X 2

Sedangkan fungsi kontrol diberikan untuk mengatur arus keluaran sebagai input dari tabung sinar-x agar dapat menghasilkan arus sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Setelah tabung sinar-x dapat mengalir arus maka akan dihasilkan elektron-elektron sebagai fungsi untuk menghasilkan emisi dosis dari sinar-x. Pemodelan sistem penghasil arus filament berasal dari arus kontrol dengan nilai konstan yang selanjutnya dikontrol agar didapat arus dengan nilai potensial berbeda atau dalam hal ini arus AC didapat sistem pemodelan tersebut. Untuk

ditanggung pada transformator untuk menghasilkan tegangan tinggi sebagai sistem kerja sinar-x untuk perbedaan ukuran massa intensitas tubuh pasien. Sistem kontrol ini dibuat seakan-akan ada arus yang mengalir pada pesawat sinar-x. Selain itu kontrol ini akan berfungsi sebagai penghasil elektron yang diperlukan pada sistem kerja pesawat sinar-x.

3.5 Transformator dan Rectifier Tegangan Tinggi

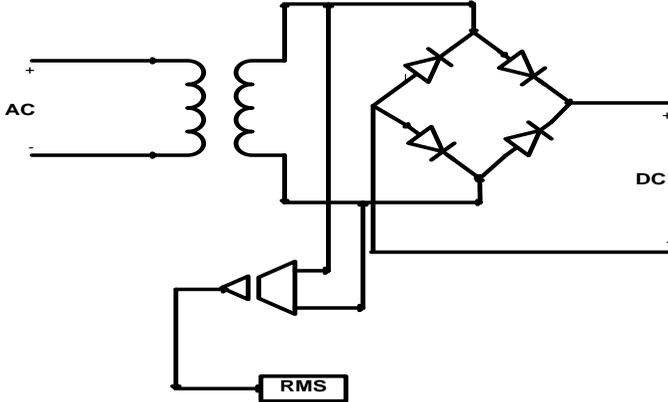
Rangkaian terakhir pada sistem kerja pesawat sinar-x adalah transformator dan rectifier tegangan tinggi. Transformator berfungsi untuk melipatgandakan tegangan tinggi yang diperoleh dari hasil pengontrolan frekuensi tinggi pada inverter. Selain itu, pemodelan transformator ini berfungsi untuk mendapatkan kurva histerisis dari *high frekuensi* sebagai input dari tranformator. Analisa histerisis dari pemodelan ini, nantinya akan menentukan penggunaan bahan yang baik pada penggunaan transformator. Dilain sisi, tegangan input transformator yang nilainya telah tinggi akan menyebabkan pengaruh dari ukuran transformator dengan ukuran lebih kecil dari penggunaan transformator sebelumnya. Sehingga hal ini juga akan berpengaruh pada *cost* pembelian dari transformator pesawat sinar-x.

Rangkaian rectifier tegangan tinggi berfungsi untuk menyearahkan tegangan tinggi AC output dari transformator menjadi tegangan tinggi DC. Analisa rangkaian transformator dan rectifier tegangan tinggi akan digunakan untuk mengetahui rugi-rugi yang diakibatkan oleh frekuensi tinggi. Sehingga dari pemodelan ini akan diperoleh kurva B-H atau histerisis yang diakibatkan oleh pengaruh tegangan tinggi dan frekuensi. Adanya kurva B-H akan memudahkan dalam pemilihan bahan yang digunakan dalam pembuatan trafo. Selain itu, kita dapat mengetahui arus magnetisasi yang ditimbulkan oleh tegangan dan frekuensi tinggi. Hubungan tegangan dan frekuensi pada transformator agar didapat arus magnetisasi disajikan pada persamaan 3.18-3.19 berikut ini.

$$\Phi(t) = \frac{VM}{\omega Np} \cos \omega t \quad 3.17$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad 3.18$$

Sehingga pemodelan rangkaian Sistem pembangkit tegangan tinggi peralatan diagnostik pada sistem kerja transformator dan *rectifier* tegangan tinggi disajikan pada gambar 3.19 berikut ini.



Gambar 3.19 Pemodelan Rangkaian Transformator dan *Rectifier* Tegangan Tinggi

Rangkaian gambar 3.19 adalah pemodelan transformator untuk mendapatkan tegangan tinggi dan rangkaian rectifier untuk menyearahkan output AC dari keluaran transformator menjadi tegangan DC sebagai sumber pembangkit tegangan tinggi pada pesawat sinar-x. Untuk mendapatkan tegangan tinggi dibutuhkan analisa perhitungan pada transformator agar diperoleh tegangan kerja yang diinginkan. Perhitungan transformator sebagai penaik tegangan perlu memperhatikan besarnya daya trafo beserta efisiensinya dan direpresentasikan pada persamaan 3.19-3.21 berikut ini.

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \quad 3.19$$

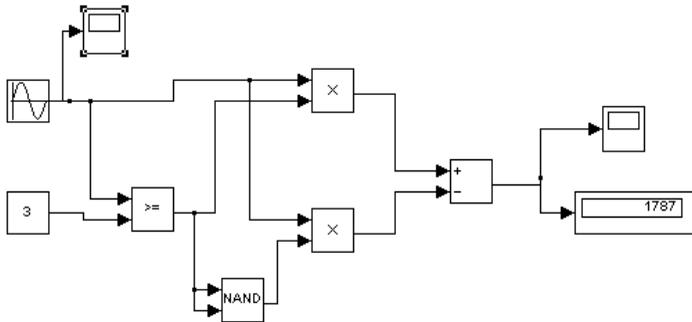
$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad 3.20$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{P_{out}}{V_{out}} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \quad 3.21$$

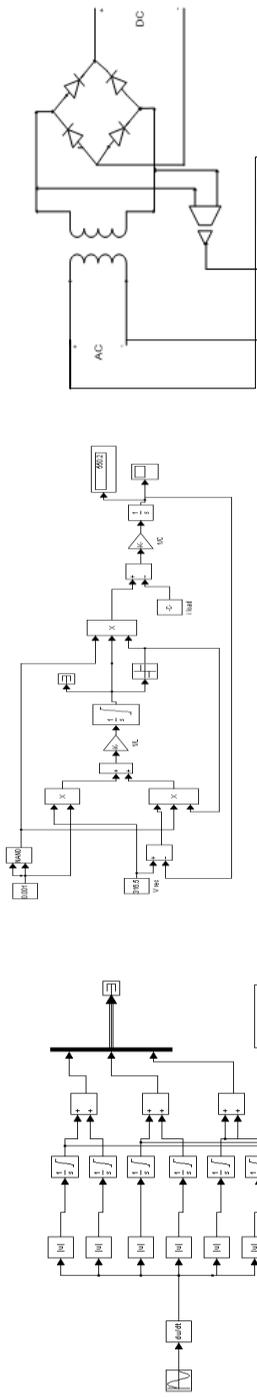
Dari persamaan di atas akan diperoleh besar perbandingan lilitan antara sisi primer dan sekunder dengan besarnya dapat diatur sekecil mungkin dari lilitan sebelumnya pada penggunaan metode lama.

Setelah didapatkan nilai tegangan kerja keluaran transformator maka selanjutnya adalah dengan menyearahkan

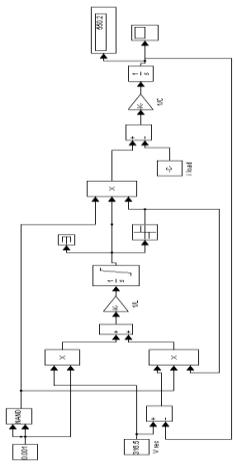
tegangan tersebut ke dalam sebuah *rectifier high voltage* dan akan dibuat dengan pemodelan simulink Matlab yang disajikan pada gambar 3.20 berikut ini.



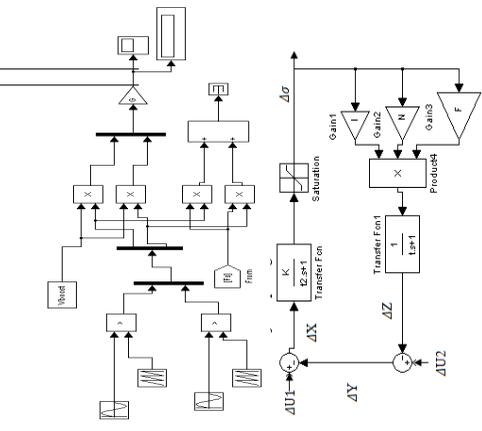
Gambar 3.20 Simulink *Rectifier High Voltage*



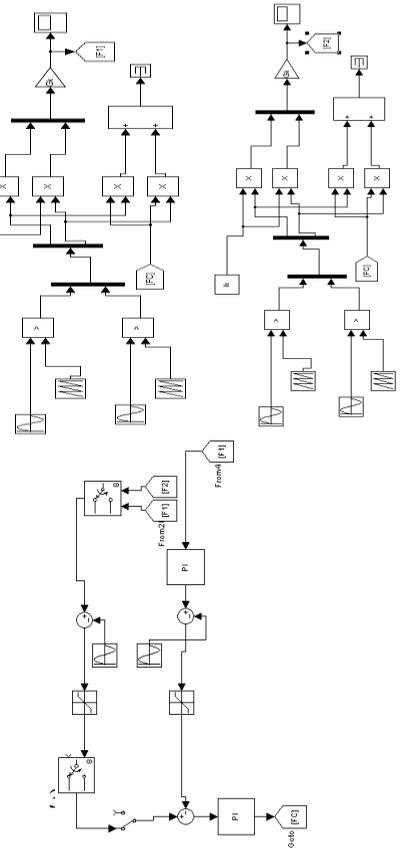
Rectifier 3 Phase



Boost Converter



Rectifier 3 Phase



Filament Control dan Pengatur Arus Filament

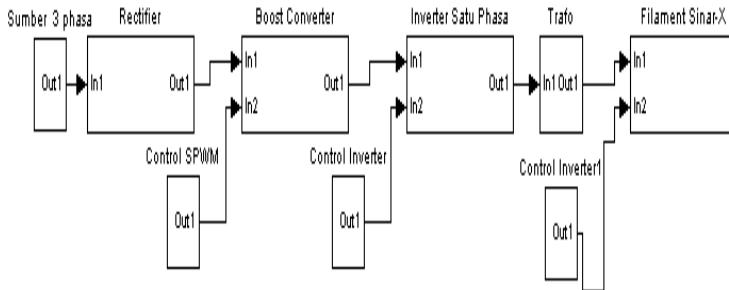
Inverter Satu Phasa dan Kontrol

Gambar 3.21 Rangkaian dan Pemodelan sistem secara utuh dengan Sistem Kontrol inverter dan Filamen

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Sistem Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis terdiri atas *rectifier* tiga fase, *boost converter*, inverter satu fase, kontrol tegangan dan frekuensi inverter, kontrol filament, dan *trafo high voltage low size* serta *rectifier* tegangan tinggi yang dirangkai sedemikian rupa sehingga antara komponen satu dengan lainnya dapat terhubung dengan baik sesuai kaedah rangkaian listrik untuk menghasilkan tegangan kerja pada peralatan diagnostik medis. Konfigurasi rangkaian secara menyeluruh ditampilkan pada gambar 4.1 berikut ini.



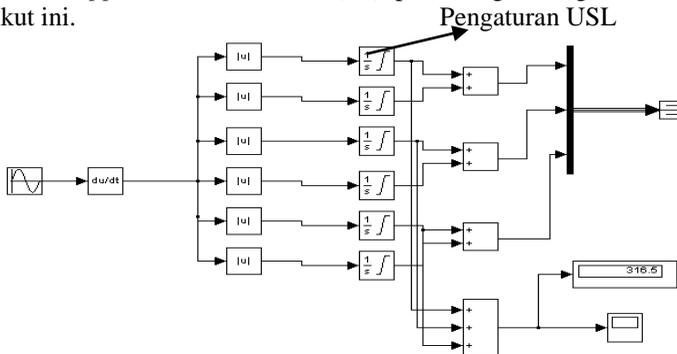
Gambar 4.1 Konfigurasi Sistem Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis

Berdasarkan penyusunan rangkaian konfigurasi di atas, perlu diketahui bahwa karakteristik *rectifier* 3 fase yang digunakan adalah sebesar 316,5 VDC. Tegangan dari *rectifier*, selanjutnya nilainya akan diperbesar dengan menggunakan *boost converter* sebesar 550 VDC. Setelah semua nilai tegangan dipersiapkan, analisa akan dilakukan pada inverter satu fase yang dikontrol untuk memperoleh tegangan dan frekuensi pada sistem kerja peralatan diagnostik sinar-x. Analisa lainnya dilakukan pada kontrol filament sebagai sistem kontrol arus pada peralatan diagnostik sinar-x yang dalam hal ini dianggap sebagai nilai beban dengan besaran 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Tidak ketinggalan pula, analisa nilai histerisis dan arus magnetisasi diperhitungkan pada transformator yang digunakan sebagai akibat dari nilai tegangan dan frekuensi tinggi

pada rangkaian Sistem Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis. Semua analisa ini akan dikaji lebih dalam pada pembahasan Bab 4 mengenai hasil simulasi dan analisis dari sistem yang telah dirangkai pada gambar 4.1.

4.1 Karakteristik Hasil Simulasi Rectifier 3 Phase

Penggunaan rectifier 3 phase untuk mengubah tegangan sumber 380 VAC menjadi tegangan VDC dengan 316,5 sesuai dengan kebutuhan yang diminta oleh sistem kerja dari generator sinar-x. Untuk mendapatkan nilai tegangan sebesar 316,5 VDC kita dapat mengatur *upper saturation limit* (usl) pada rangkaian matlab dari rectifier 3 phase dengan berdasarkan persamaan rumus 3.1-3.3 yang kita dapatkan dari karakteristik kerja dioda pada rangkaian gambar 3.2. Besarnya nilai output dari rectifier dengan menganalisa parameter *upper saturation limit* (usl) pada rangkaian gambar 4.2 berikut ini.



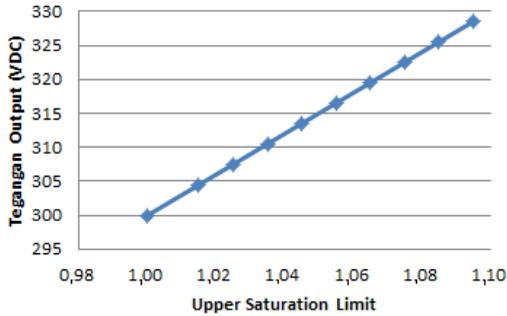
Gambar 4.2 Pemodelan Rangkaian Rectifier 3 Phase

Berdasarkan gambar 4.2 bahwa tegangan 3 phase sebesar 380 VDC yang merupakan sumber PLN selanjutnya akan diubah menjadi tegangan VDC. Besarnya nilai ouput VDC berdasarkan USL pada rangkaian integrator pemodelan rangkaian rectifier. Pengisian USL dilakukan secara random sebanyak 10 kali perubahan dengan mengacu pada rumus yang telah diturunkan pada persamaan 3.1-3.3 sehingga diperoleh tegangan kerja yang diinginkan. Hasil dari simulasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut ini.

Tabel 4.1 Hasil Simulasi Pemodelan Rangkaian Rectifier 3 Fasa

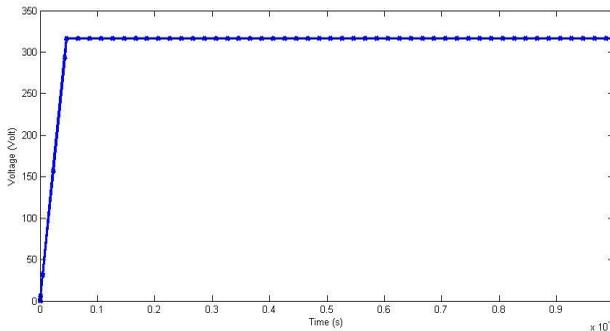
<i>Upper Saturation Limit</i>	<i>I_{rst}</i> (A)	<i>Resistansi</i> (Ohm)	Tegangan Output (VDC)
1	3	100	300
1,015	3,045	100	304,5
1,025	3,075	100	307,5
1,035	3,105	100	310,5
1,045	3,135	100	313,5
1,055	3,165	100	316,5
1,065	3,195	100	319,5
1,075	3,225	100	322,5
1,085	3,255	100	325,5
1,095	3,285	100	328,5

Dari tabel 4.1 kita dapat mengetahui besarnya USL untuk mendapatkan tegangan output dari rectifier yang diinginkan sesuai kebutuhan. Penentuan *upper saturation limit* berdasarkan rumus yang telah didapatkan dari persamaan 3.1-3.3. Sesuai dengan kebutuhan tegangan output rectifier maka nilai yang diblok merah merupakan nilai tegangan yang akan digunakan pada sistem kerja selanjutnya. Dari tabel 4.1 ditunjukkan pengaruh pengisian USL dengan perubahan kenaikan konstan akan berpengaruh terhadap nilai tegangan output yang dihasilkan juga mengalami kenaikan konstan. Karakteristik hubungan USL dengan tegangan output rectifier ditunjukkan pada gambar 4.3 berikut ini. Nilai USL akan berpengaruh terhadap tegangan output yang akan dihasilkan.



Gambar 4.3 Perubahan *Upper Saturation Limit* Terhadap Tegangan *Output Rectifier*

Perubahan nilai USL akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik nilai tegangan output. Karena dalam pembuatan pemodelan sumber pembangkit tegangan tinggi sinar-x tegangan yang digunakan sebesar 316,5 VDC maka nilai tersebut dipertahankan sebagai tegangan kerja sistem input pada *boost converter* nantinya. Kurva karakteristik dari pemodelan sistem kerja dengan output sebesar 316,5 VDC disajikan pada gambar 4.4 berikut ini.

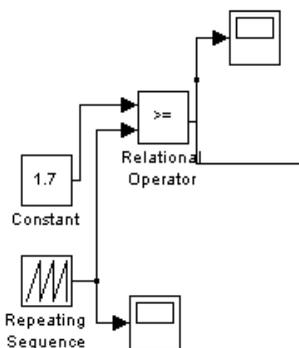


Gambar 4.4 Tegangan *Output Rectifier* 3 Fase

Terlihat pada gambar 4.4 nilai tegangan yang dihasilkan sebesar 316,5 VDC dan steady state pada 0,005 s. Selanjutnya nilai tegangan yang telah dihasilkan akan digunakan sebagai input pada pemodelan *boost converter*.

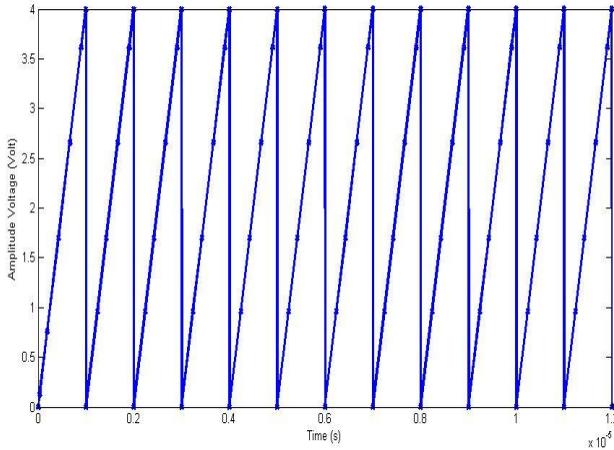
4.2 Karakteristik Hasil Simulasi *Boost Converter*

Nilai tegangan keluaran *boost converter* sebesar 550 VDC yang bersumber dari keluaran *rectifier* sebesar 316,5 VDC memiliki *duty cycle* 0,42. Nilai *duty cycle* pada rangkaian simulink Matlab akan menggunakan perbandingan antara tegangan DC dan Tegangan segitiga yang memiliki frekuensi sebesar 100kHz sebagai trigger pada saklar transistor. Dengan adanya nilai *duty cycle* dan frekuensi pada tegangan segitiga, komponen lainnya seperti kapasitor dan induktor dapat kita tentukan yang telah dihitung pada bab 3. Pemodelan untuk mendapatkan *duty cycle* pada pengubah polaritas transistor ditunjukkan pada gambar 4.5 berikut ini.

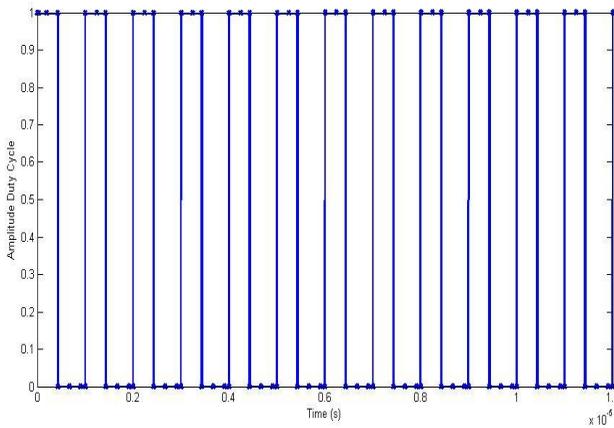


Gambar 4.5 Penghasil *Duty Cycle* Pada Pemodelan *Boost Converter*

Tegangan konstan pada gambar 4.5 dengan nilai 1.7 diperoleh dari perbandingan perhitungan segitiga sejenis pada saat tegangan tersebut memotong tegangan segitiga. Sedangkan pengisian pada *dialog block* tegangan segitiga berisi [0 4] untuk output values dan [0 0,000001] untuk time values. Nilai time values merupakan frekuensi yang digunakan pada saat perhitungan mencari nilai kapasitor dan induktor. Dari gambar 4.5 maka dapat diperoleh hasil simulasi grafik sinyal segitiga dan trigger yang memiliki *duty cycle* 0,42 pada gambar 4.6 dan 4.7 berikut ini.



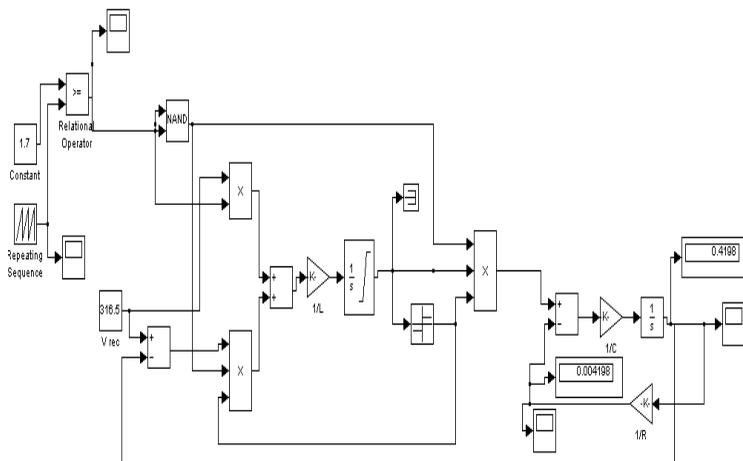
Gambar 4.6 Sinyal Segitiga



Gambar 4.7 Duty Cycle 0,42

Dengan adanya *duty cycle* dan frekuensi sebesar 100 kHz pada sinyal segitiga maka diketahui nilai induktor dan kapasitor yang akan digunakan. Nilai resistansi dalam rangkaian boost converter ini ditentukan nilainya sebesar 100 ohm. Besar nilai induktor dan kapasitor yang telah ditentukan pada bab 3 memiliki nilai 66,5 mH dan 0,42 uF. Besarnya nilai tersebut merupakan batas minimal yang

harus digunakan untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Namun dalam pengujian pemodelan ini akan dilakukan perubahan pada nilai induktor sebanyak lima kali percobaan untuk mendapatkan steady state waktu yang paling cepat. Karena lamanya *boost converter* mencapai *steady state* bergantung pada nilai induktor yang digunakan. Nilai induktansi yang digunakan mempengaruhi waktu pengisian induktor untuk mencapai arus *steady state*. Semakin tinggi nilai induktansi, maka semakin lama waktu menuju *steady state*. Penentuan nilai induktansi harus disesuaikan dengan nilai batas ripple arus yang diinginkan. Penentuan nilai induktansi dengan batas minimal 66,5 mH disesuaikan pada gambar 4.8 rangkaian pemodelan *boost converter* berikut ini.



Gambar 4.8 Pemodelan *Boost Converter*

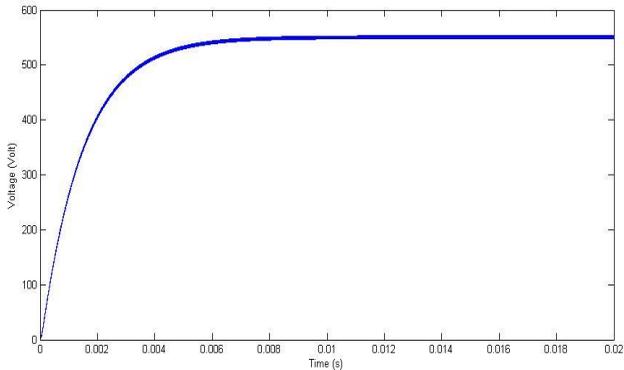
Dari rangkaian di atas, pengisian untuk gain induktor, kapasitor, dan resistansi harus bernilai kebalikan dari nilai komponennya. Sehingga diperoleh nilai secara urut untuk induktor, kapasitor, dan resistansi sebesar 15,038; 2380952,38; dan 0,01. Karena waktu *steady state* bergantung pada nilai induktor maka akan dilakukan pengisian induktor sebanyak lima kali untuk mendapatkan nilai yang terbaik dengan batas minimal 15,038. Sedangkan untuk nilai kapasitor dan resistif nilainya dibuat tetap. Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Waktu Steady State Boost Matlab

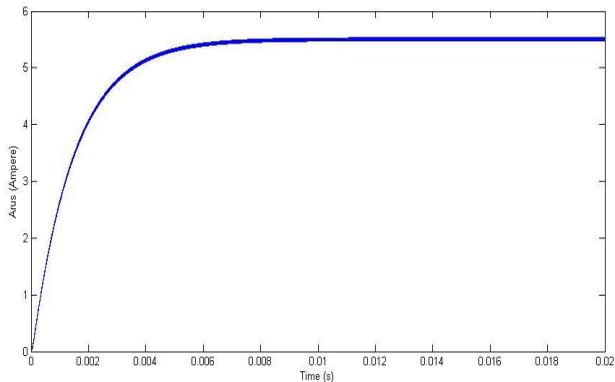
Induktor (1/L)	Kapasitor (1/C)	resistansi (1/R)	steady state (s)	Voltage (Volt)
16,028	2380952,38	0,01	0,01	460,7
17,028	2380952,38	0,01	0,01	493,5
18,028	2380952,38	0,01	0,008	406,9
20,028	2380952,38	0,01	0,008	553,2
21,028	2380952,38	0,01	0,008	553,2

Perubahan nilai induktor pada tabel 4.2 akan menentukan *steady state* tegangan output yang dikeluarkan pada rangkaian *boost converter*. Dapat dilihat nilai induktor dengan nilai 20,028 (1/H) memiliki waktu *steady state* sebesar 0,008 (s) dengan tegangan sebesar 553,2 VDC. Perubahan selanjutnya memiliki nilai yang tetap dengan kenaikan induktor. Sehingga nilai induktor yang diambil adalah nilai pertama pada saat tegangan mengalami stabil untuk perubahan nilai induktor selanjutnya. Penggunaan nilai output dari *boost converter* dengan besar 553,2 VDC akan digunakan sebagai input inverter karena sesuai dengan batas toleransi ripple tegangan atau arus yang digunakan yaitu sebesar 10 Volt dan 0,02 Ampere.

Pada gambar 4.9 diperlihatkan kurva karakteristik nilai tegangan yang dihasilkan pada simulasi rangkaian *boost converter* dengan penggunaan nilai induktor sebesar 20,028 (1/H). Tegangannya berada pada kisaran 553,2 VDC dengan waktu *steady state* 0,008 (s). Sedangkan pada gambar 4.10 diperlihatkan kurva karakteristik nilai arus dari penggunaan nilai induktor yang sama dengan kisaran besaran arus sebesar 5,532 Ampere. Dari kurva karakteristik tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan induktor akan mempengaruhi waktu *steady state* nilai tegangan dan arus *boost converter*.



Gambar 4.9 Kurva Karakteristik Tegangan *Output Boost Converter*

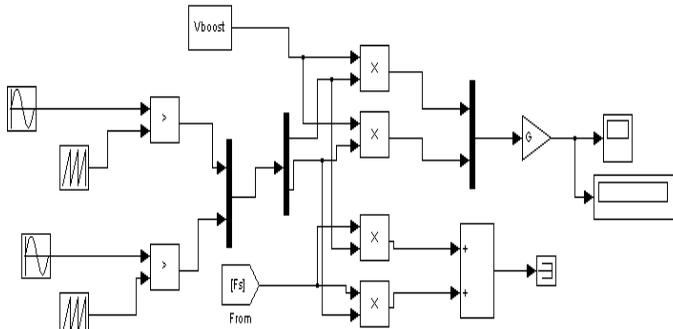


Gambar 4.10 Kurva Karakteristik Arus *Output Boost Converter*

4.3 Karakteristik Hasil Simulasi Inverter Satu Fasa dan Sistem Kontrol

Pemodelan selanjutnya adalah dengan menggunakan *ouput* dari *boost converter* sebagai input dari inverter satu fasa. Pada *inverter* satu fasa digunakan sebuah sistem kontrol untuk dapat mengatur tegangan dan frekuensi yang dihasilkan agar didapat nilai tegangan dan frekuensi kerja dari sistem tegangan tinggi sinar-x. Pengontrolan dilakukan berdasarkan karakteristik nilai tegangan dan frekuensi yang diinginkan. Parameter yang digunakan pada sistem inverter satu fasa disesuaikan dari keinginan tegangan dan frekuensi tinggi

sebagai sistem kerja pesawat sinar-x. Representasi dari pemodelan inverter satu fase ditunjukkan dengan gambar 4.11 berikut ini.



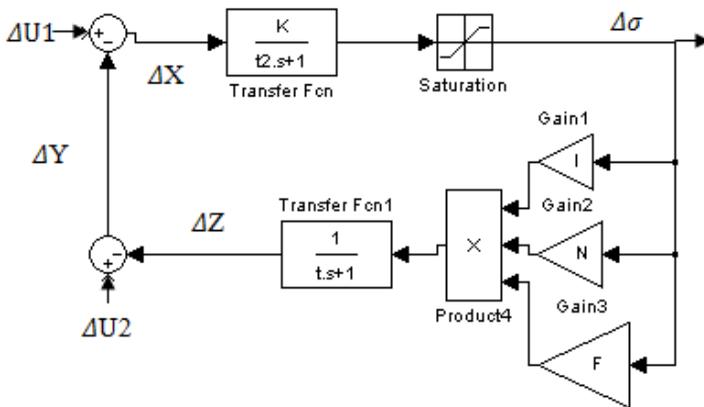
Gambar 4.11 Pemodelan Sistem *Inverter* Satu Fasa

Sistem tersebut bekerja berdasarkan sinyal kontrol segitiga dan sinusoidal yang dibuat sedemikian rupa untuk mendapatkan tegangan dan frekuensi yang diinginkan. Namun dalam fungsi kerjanya sistem inverter satu fasa dikontrol dengan pengatur frekuensi agar mendapatkan tegangan yang diinginkan. Sistem kontrol inverter satu fasa ini dibuat dengan berdasarkan sistem kerja dari pesawat sinar-x yang direpresentasikan ke dalam rumus 4.1 berikut ini.

$$V = f \times i \times N$$

4.1

Dari persamaan rumus tersebut akan dikontrol secara manual untuk nilai frekuensinya agar mendapatkan tegangan tinggi yang diinginkan. Sedangkan nilai arus yang akan diuji pada tugas akhir ini adalah 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Faktor lainnya berupa lilitan akan ditentukan nilainya untuk sisi primer (N_p) dan sisi sekunder (N_s) sebesar 1:50. Sehingga sistem kontrol yang telah dibuat disajikan pada gambar 4.12 berikut ini.



Gambar 4.12 Sistem Kontrol *Inverter* Satu Fasa

Pengujian tersebut akhirnya mendapatkan nilai untuk *transfer function* kontrol satu pada nilai t sebesar 0,3. Sedangkan *transfer function* kontrol dua pada nilai K dan t2 masing-masing sebesar 0,3 dan 0,01. Pengujian selanjutnya akan dilakukan terhadap faktor beban sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Selain itu akan diberikan juga hasil output dari transformator satu fasa dan rectifier tegangan tinggi. Nilai dari pemodelan sistem pembangkit ini akan memiliki selisih yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan. Analisa untuk ketiga beban tersebut akan dilakukan untuk mendapatkan nilai yang terbaik dari simulasi. Nantinya hasil ini akan menjadi pedoman dalam melakukan perancangan ataupun pembuatan rangkaian secara nyata dalam *study* penelitian selanjutnya. Berikut analisa ketiga faktor beban.

4.3.1 Faktor Beban 200 mA

Beban 200 mA yang dihasilkan oleh filamen kontrol akan mengatur semua waktu paparan sekaligus mengatur jumlah tegangan yang dihasilkan. Selain itu besarnya frekuensi yang dihasilkan akan mempengaruhi besarnya tegangan tinggi pula pada *output* inverter dan transformator. Dalam penggunaannya kita mengetahui bahwa transformator dalam kesehariannya digunakan pada pesawat sinar-x memiliki ukuran yang sangat besar. Hal ini karena dipengaruhi oleh jumlah lilitan yang sangat banyak untuk mengubah tegangan sebesar 380 volt menjadi 50kV-150kV. Analisa sederhana

untuk pemodelan ini akan diberikan pada tabel 4.3 yang diperoleh dari pihak terkait dalam penggunaan Pesawat Sinar-x untuk arus filamen sebesar 200 mA.

Tabel 4.3 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 200 mA

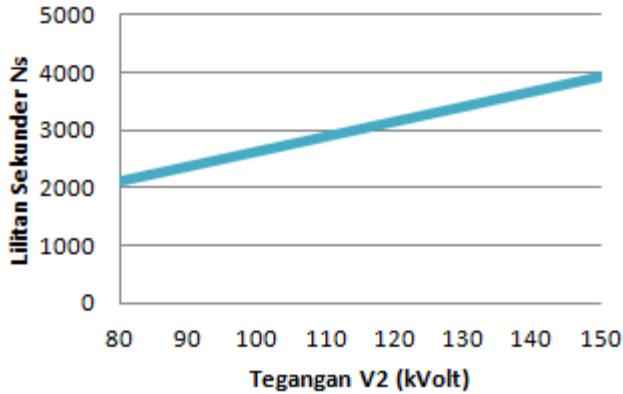
Tegangan 3 Phasa (Volt)	Tegangan V2 (Volt)	Arus (I2) (A)	KVA	Arus (I1) (A)	Np = 10	Ns
380	80000	0,2	16000	42,11	10	2105,26
380	100000	0,2	20000	52,63	10	2631,58
380	120000	0,2	24000	63,16	10	3157,89
380	140000	0,2	28000	73,68	10	3684,21
380	150000	0,2	30000	78,95	10	3947,37

Jika dilihat tabel 4.3 ada lima tegangan yang sering digunakan untuk paparan sinar-x. Dengan tegangan sebesar 380 volt, maka kita membutuhkan tegangan kisaran 80000 Volts-150000Volt. Daya yang dihasilkan pada saat kontrol filament sebesar 200 mA berkisar antara 16000 VA-30000 VA. Dari nilai tersebut kita dapat menentukan pula atau memprediksi besarnya transformator yang akan digunakan. Jika dimisalkan banyaknya lilitan pada sisi primer sebesar 10 maka kita dapat menentukan banyaknya lilitan pada sisi sekunder dengan menggunakan persamaan 4.2-4.3 berikut ini.

$$I1 = P1/VI \quad 4.2$$

$$N2 = (N1 \times I1)/I2 \quad 4.3$$

Sehingga nilainya sudah direpresentasikan pada tabel 4.3. selain itu nilai tersebut juga digambarkan dengan grafik yang merupakan fungsi hubungan karakteristik antara tegangan dan banyaknya lilitan pada sisi sekunder.



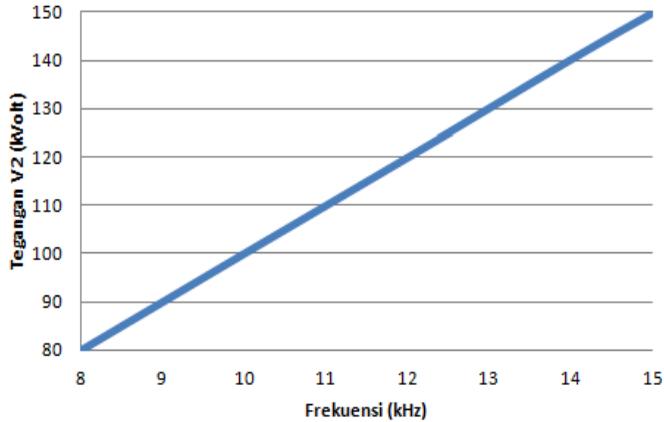
Gambar 4.13 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan Sisi Sekunder

Kurva karakteristik tersebut menunjukkan dengan besar tegangan sebesar 380 Volt ketika akan ditransformasikan menjadi tegangan yang lebih tinggi membutuhkan banyak lilitan untuk setiap kenaikan tegangan. Sehingga dalam hal ini dapat dibayangkan, penggunaan trafo dengan ukuran yang semakin besar dan tentunya dengan harga yang sangat mahal. Oleh karena itu, pemodelan ini bertujuan untuk memberikan sebuah *study* analisa dengan mengubah besaran frekuensi yang merupakan keluaran inverter satu fasa menjadi semakin tinggi. Tentunya hal ini juga dapat mempengaruhi besaran tegangan yang semakin tinggi pula setelah dibuat sistem kontrol pada rangkaian tersebut. Pengujian ini akan menggunakan lima frekuensi yang berbeda dari data yang didapatkan dan nantinya akan digunakan satu nilai exposure dari tegangan paparan sebagai referensi seringnya penggunaannya. Hasil *study* analisa dan karakteristik yang didapatkan dari pemodelan ini dapat dilihat pada tabel 4.4 berikut ini.

Tabel 4.4 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi

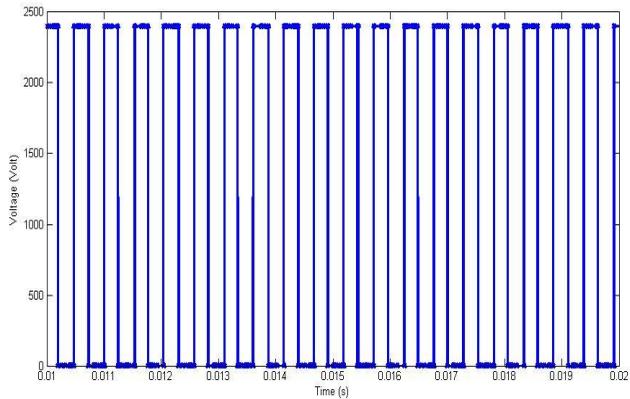
Frekuensi (Hz)	Arus (I2) (A)	Lilitan (Ns)	Tegangan (V1) Trafo	Tegangan (V2) (Volt) perhitungan	tegangan (V2) (Volt) Hasil Simulasi
8000	0,2	50	1601,6	80000	80080
1000					
0	0,2	50	2002,55	100000	100127,5
1200					
0	0,2	50	2400,2	120000	120010
1400					
0	0,2	50	2800,6	140000	140030
1500					
0	0,2	50	2993,1	150000	149655

Jika dilihat pada tabel di atas dengan menggunakan frekuensi yang berbeda akan menghasilkan nilai tegangan dengan besar paparan berbeda. Semakin tinggi penggunaan frekuensi maka tegangan yang dihasilkan semakin tinggi pula. Namun pada saat arus filamen mengalir sebesar 200 mA ada beberapa tegangan paparan yang digunakan dengan kisaran *range* 80000 Volt-150000Volt. Pengujian ini akan memisalkan perbandingan trafo dengan sisi primer dan sisi sekunder 10:50. Dari batas nilai tegangan yang telah ditentukan, dapat ditambah kesimpulan lima parameter besaran tegangan hasil simulasi dengan memanfaatkan frekuensi tinggi. Kurva karakteristik hasil pemodelan frekuensi dan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.14 berikut ini.

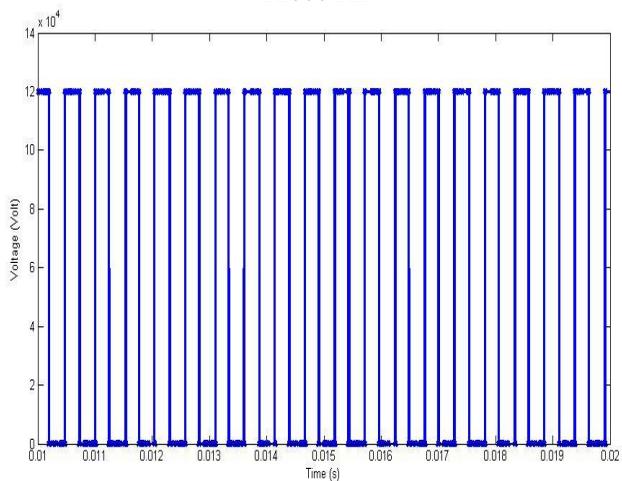


Gambar 4.14 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan

Kurva tersebut menunjukkan besarnya frekuensi yang digunakan pada saat arus filamen mengalir sebesar 200 mA. Dimana besar tegangan yang dihasilkan nilainya juga semakin besar untuk frekuensi yang tinggi. Namun pada saat waktu paparan peralatan tegangan tinggi digunakan, ada besaran tegangan yang sangat baik untuk digunakan sebagai sistem kerja paparan sinar-x. Dengan memanfaatkan frekuensi 12000 Hz akan dihasilkan tegangan input trafo sebesar 2400,2 Volt. Tegangan dan frekuensi yang telah dikontrol sedemikian rupa sebagai input trafo nantinya besarnya akan dilipatgandakan bergantung banyaknya lilitan pada penggunaan trafonya. Hasil pemodelan karakteristik pada saat frekuensi 12000 Hz dan menghasilkan tegangan tinggi yang disajikan gambar 4.15. Setelah semua nilai tegangan yang diinginkan tersedia, selanjutnya nilainya dilipatgandakan menggunakan transformator dengan perbandingan belitan 10:50. Hasil transformasi tegangan dengan menggunakan trafo direpresentasikan pada gambar 4.16 berikut ini.

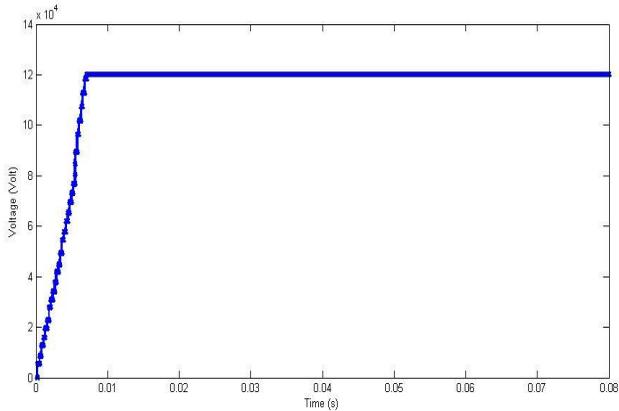


Gambar 4.15 Tegangan Hasil Inverter Satu fasa Frekuensi 12000 Hz



Gambar 4.16 Tegangan Hasil Keluaran Transformator

Keluaran transformator selanjutnya akan disearahkan dengan menggunakan *rectifier high voltage* untuk benar-benar mendapatkan nilai tegangan VDC yang stabil dengan direpresentasikan pada gambar 4.17 berikut ini.



Gambar 4.17 Hasil *Output Rectifier High Voltage*

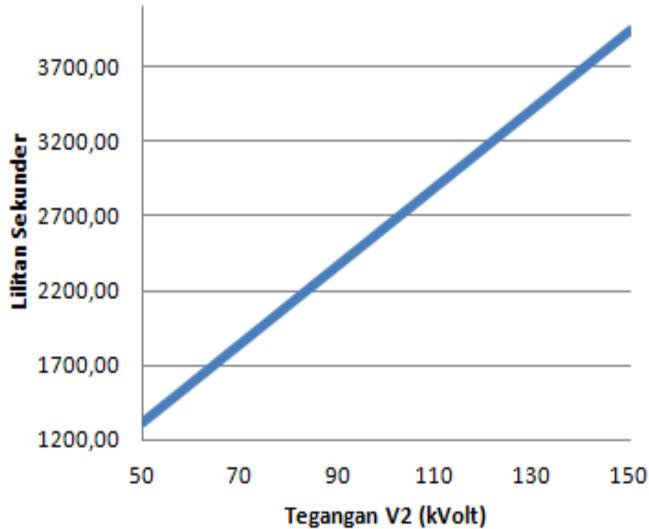
4.3.2 Faktor Beban 500 mA

Arus filament yang selanjutnya akan diuji seperti pada penjelasan faktor beban 200 mA yaitu 500 mA. Sebenarnya penggunaan arus ini menunjukkan kapasistas tubuh setiap orang yang memiliki perbedaan. Hal ini ditentukan dengan mengatur jumlah arus yang nantinya juga dapat mengatur besar tegangan paparan. Seperti pada analisa sebelumnya dengan arus filament sebesar 200 mA, maka analisa sederhana selanjutnya yaitu dengan menggunakan besar arus filament 500 mA. Untuk analisa pemodelan ini akan diberikan pada tabel 4.5 yang datanya juga diperoleh dari pihak terkait dalam penggunaan Pesawat Sinar-x untuk arus filamen sebesar 500 mA. Ditabel 4.5 akan terlihat besar tegangan dan jumlah lilitan yang digunakan. Dalam pengujian yang sama akan digunakan lima parameter yang berbeda seperti pada 200 mA. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil penelitian yang objektif sebagai bahan *study* analisa lanjutan dari penerapan pemodelan pada tugas akhir ini.

Tabel 4.5 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik Lama 500 mA

Tegangan 3 Phasa (Volt)	Tegangan (V2) (Volt)	Arus (I2) (A)	KVA	Arus (I1) (A)	Np = 10	Ns
380	50000	0,5	25000	65,79	10	1315,79
380	62500	0,5	31250	82,24	10	1644,74
380	100000	0,5	50000	131,58	10	2631,58
380	125000	0,5	62500	164,47	10	3289,47
380	150000	0,5	75000	197,37	10	3947,37

Jika dilihat tabel 4.5 ada lima tegangan yang sering digunakan untuk paparan sinar-x. Dengan tegangan sebesar 380 volt, maka kita membutuhkan tegangan kisaran range 50000 Volts-150000Volt. Daya yang dihasilkan pada saat kontrol filament sebesar 500 mA berkisar antara 25000 VA-75000 VA. Dari nilai tersebut kita dapat menentukan pula atau memprediksi besarnya transformator yang akan digunakan. Jika dimisalkan banyaknya lilitan pada sisi primer sebesar 10 maka kita dapat menentukan banyaknya lilitan pada sisi sekunder dengan menggunakan persamaan 4.2-4.3 yang telah diberikan pada pada subbab 4.3.1. Sehingga nilainya sudah dapat direpresentasikan pada tabel 4.5. Selain itu nilai tersebut juga digambarkan dengan grafik yang merupakan fungsi hubungan karakteristik antara tegangan dan banyaknya lilitan pada sisi sekunder. Sehingga dapat ditentukan besarnya ukuran trafo yang dimungkinkan dalam kegunaannya pada implementasi pembangkitan tegangan tinggi sinar-x.



Gambar 4.18 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan Sisi Sekunder

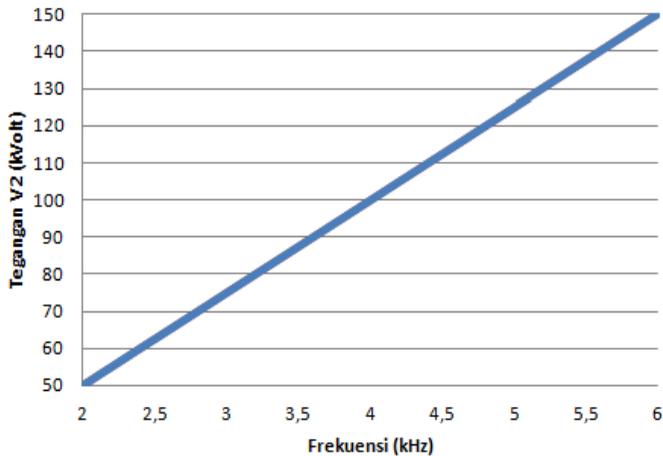
Kurva karakteristik tersebut menunjukkan dengan besar tegangan sebesar 380 Volt ketika akan ditransformasikan menjadi tegangan yang lebih tinggi membutuhkan banyak lilitan untuk setiap kenaikan tegangan. Sehingga dalam hal ini dapat dibayangkan, penggunaan trafo dengan ukuran yang semakin besar dan tentunya dengan harga yang sangat mahal. Oleh karena itu, pemodelan ini bertujuan untuk memberikan sebuah *study* analisa dengan mengubah besaran frekuensi yang merupakan keluaran inverter satu fasa menjadi semakin tinggi. Tentunya hal ini juga dapat mempengaruhi besaran tegangan yang semakin tinggi pula setelah dibuat sistem kontrol pada rangkaian tersebut. Pengujian ini akan menggunakan lima frekuensi yang berbeda dari data yang didapatkan dan nantinya akan digunakan satu nilai exposure dari tegangan paparan sebagai referensi seringnya penggunaannya. Hasil *study* analisa dan karakteristik yang didapatkan dari pemodelan ini dapat dilihat pada tabel 4.6

berikut ini dari pengujian yang sama pada arus filament 200 mA.

Tabel 4.6 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi

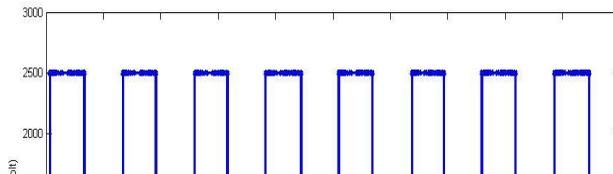
Frekuensi (Hz)	Arus (I ₂) (A)	Lilitan (Ns)	Tegangan (V ₁)	Tegangan (Volt) perhitungan	tegangan V ₂ (Volt) Hasil Simulasi
2000	0,5	50	1001	50000	50050
2500	0,5	50	1251,8	62500	62590
4000	0,5	50	2000,9	100000	100045
5000	0,5	50	2501,4	125000	125070
6000	0,5	50	2999,7	150000	149985

Jika dilihat pada tabel di atas dengan menggunakan frekuensi yang berbeda akan menghasilkan nilai tegangan dengan besar paparan berbeda. Semakin tinggi penggunaan frekuensi maka tegangan yang dihasilkan semakin tinggi pula. Namun pada saat arus filamen mengalir sebesar 500 mA ada beberapa tegangan paparan yang digunakan dengan kisaran *range* 50000 Volt-150000Volt. Pengujian ini akan menggunakan pemisalan yang sama dengan pengujian sebelumnya untuk perbandingan trafo antara sisi primer dan sisi sekunder 10:50. Dari batas nilai tegangan yang telah ditentukan, dapat diambil kesimpulan lima parameter besaran tegangan hasil simulasi dengan memanfaatkan frekuensi tinggi. Jika dilihat dari tabel 4.6, dapat diketahui bahwa nilai frekuensi yang digunakan berada pada range 2000 Hz-6000 Hz. Hal ini memiliki perbedaan dengan besar arus filament 200 mA dikarenakan tegangan kerja paparan sinar-x harus berada pada range 50 kV-150 kV. Sehingga frekuensinya juga diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan tegangan kerja paparan sinar-x yang diinginkan. Kurva karakteristik hasil pemodelan frekuensi dan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.19 berikut ini.

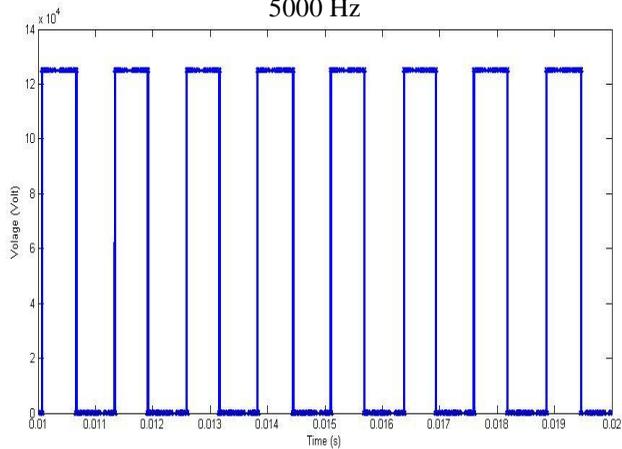


Gambar 4.19 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan

Kurva tersebut menunjukkan besarnya frekuensi yang digunakan pada saat arus filamen mengalir sebesar 500 mA. Dimana besar tegangan yang dihasilkan nilainya juga semakin besar untuk frekuensi yang tinggi. Namun pada saat waktu paparan peralatan tegangan tinggi digunakan, ada besaran tegangan yang sangat baik untuk digunakan sebagai sistem kerja paparan sinar-x. Dengan memanfaatkan frekuensi 5000 Hz akan dihasilkan tegangan input trafo sebesar 2501,4 Volt. Tegangan dan frekuensi yang telah dikontrol sedemikian rupa akan digunakan sebagai input trafo yang nantinya besarnya akan dilipatgandakan bergantung banyaknya lilitan pada penggunaan trafonya. Hasil pemodelan karakteristik pada saat frekuensi 5000 Hz dan menghasilkan tegangan tinggi yang disajikan gambar 4.20. Setelah semua nilai tegangan yang diinginkan tersedia, selanjutnya nilainya dilipatgandakan menggunakan transformator dengan perbandingan belitan 10:50. Hasil transformasi tegangan dengan menggunakan trafo direpresentasikan pada gambar 4.21 berikut ini.

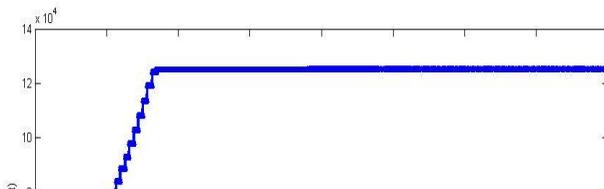


Gambar 4.20 Tegangan Hasil Inverter Satu fasa Frekuensi 5000 Hz



Gambar 4.21 Tegangan Hasil Keluaran Transformator

Keluaran transformator selanjutnya akan disearahkan dengan menggunakan *rectifier high voltage* untuk benar-benar mendapatkan nilai tegangan VDC yang stabil dengan direpresentasikan pada gambar 4.22 berikut ini dengan pengujian yang sama pada saat arus filament 200 mA.



Gambar 4.22 Hasil *Output Rectifier High Voltage*

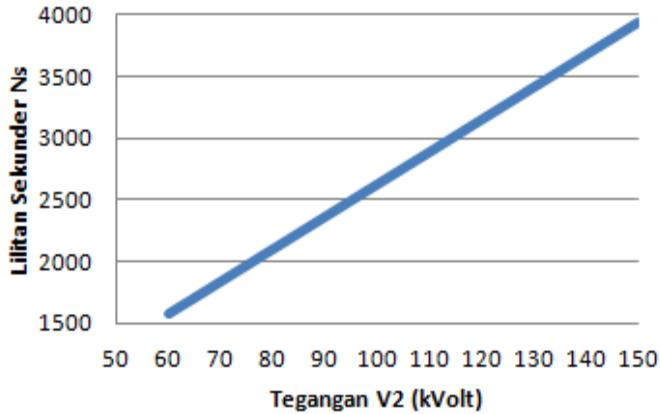
4.3.3 Faktor Beban 800 mA

Arus filament yang terakhir akan diuji seperti pada penjelasan faktor beban 200 mA dan 500 mA yaitu sebesar 800 mA. Penggunaan arus ini menunjukkan kapasitas tubuh setiap orang yang memiliki ukuran paling besar. Hal ini ditentukan dengan mengatur jumlah arus sebesar 800 mA untuk menghasilkan besar tegangan paparan. Seperti pada analisa sebelumnya dengan arus filament sebesar 200 mA dan 500 mA, maka analisa arus filament 800 mA akan diuji pada subbab ini. Untuk analisa pemodelan ini akan diberikan pada tabel 4.7 yang datanya juga diperoleh dari pihak terkait dalam penggunaan Pesawat Sinar-x untuk arus filamen sebesar 800 mA. Ditabel 4.7 akan terlihat besar tegangan dan jumlah lilitan yang digunakan. Dalam pengujian yang sama akan digunakan lima parameter yang berbeda seperti pada 800 mA. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan hasil penelitian yang objektif sebagai bahan *study* analisa lanjutan dari penerapan pemodelan pada tugas akhir ini dari referensi data 200 mA dan 500 mA.

Tabel 4.7 Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik Lama 800 mA

Tegangan 3 Phasa (Volt)	Tegangan V ₂ (Volt)	Arus (I ₂) (A)	KVA	Arus (I ₁) (A)	N _p = 10	N _s
380	60000	0,8	48000	126,32	10	1578,95
380	80000	0,8	64000	168,42	10	2105,26
380	120000	0,8	96000	252,63	10	3157,89
380	140000	0,8	112000	294,74	10	3684,21
380	150000	0,8	120000	315,79	10	3947,37

Jika dilihat tabel 4.7 ada lima tegangan yang sering digunakan untuk paparan sinar-x seperti halnya arus filament 200 mA dan 500 mA untuk penggunaan keseharian. Dengan tegangan sebesar 380 volt, maka kita membutuhkan tegangan kisaran range 60000 Volts-150000Volt. Daya yang dihasilkan pada saat kontrol filament sebesar 800 mA berkisar antara 48000 VA-12 120000 VA. Dari nilai tersebut kita dapat menentukan pula atau memprediksi besarnya transformator yang akan digunakan seperti yang telah diterapkan pada pengujian sebelumnya yaitu 200 mA dan 500 mA. Jika dimisalkan banyaknya lilitan pada sisi primer sebesar 10 maka kita dapat menentukan banyaknya lilitan pada sisi sekunder dengan menggunakan persamaan 4.2-4.3 yang telah diberikan pada pada subbab 4.3.1. Sehingga nilainya sudah dapat direpresentasikan pada tabel 4.7. Selain itu nilai tersebut juga digambarkan dengan grafik yang merupakan fungsi hubungan karakteristik antara tegangan dan banyaknya lilitan pada sisi sekunder.



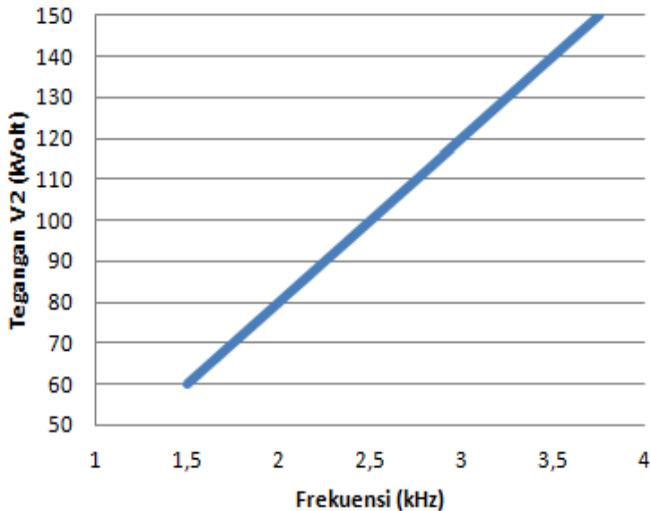
Gambar 4.23 Kurva Karakteristik Tegangan dan Lilitan Sisi Sekunder

Kurva karakteristik tersebut menunjukkan dengan besar tegangan sebesar 380 Volt ketika akan ditransformasikan menjadi tegangan yang lebih tinggi membutuhkan banyak lilitan untuk setiap kenaikan tegangan. Sehingga dalam hal ini dapat dibayangkan, penggunaan trafo dengan ukuran yang semakin besar dan tentunya dengan harga yang sangat mahal pula. Oleh karena itu, pemodelan ini bertujuan untuk memberikan sebuah *study* analisa dengan mengubah besaran frekuensi yang merupakan keluaran inverter satu phasa menjadi semakin tinggi. Tentunya hal ini juga dapat mempengaruhi besaran tegangan yang semakin tinggi pula setelah dibuat sistem kontrol pada rangkaian tersebut. Pengujian ini akan menggunakan lima frekuensi yang berbeda dari data yang didapatkan dan nantinya akan digunakan satu nilai eksposure dari tegangan paparan sebagai referensi seringnya penggunaannya dari pengujian sebelumnya yaitu pada arus filament 200mA-500mA. Hasil *study* analisa dan karakteristik yang didapatkan dari pemodelan ini dapat dilihat pada tabel 4.8 berikut ini dari pengujian yang sama pada arus filament 800 mA.

Tabel 4.8 Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi

Frekuensi (Hz)	Arus (I ₂) (A)	Lilitan (N _s)	Tegangan (V ₁)	Tegangan (V ₂) (Volt) perhitungan	tegangan V ₂ (Volt) Hasil Simulasi
1500	0,8	50	1201,2	60000	60060
2000	0,8	50	1601,6	80000	80080
3000	0,8	50	2401,3	120000	120065
3500	0,8	50	2800,6	140000	140030
3750	0,8	50	2998,6	150000	149930

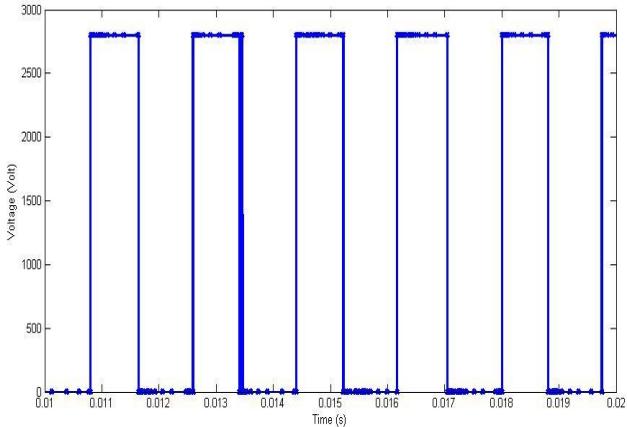
Jika dilihat pada tabel di atas dengan menggunakan frekuensi yang berbeda akan menghasilkan nilai tegangan dengan besar paparan berbeda yang sama dengan pengujian sebelumnya yaitu 200 mA dan 500 mA. Semakin tinggi penggunaan frekuensi maka tegangan yang dihasilkan semakin tinggi pula. Namun pada saat arus filamen mengalir sebesar 800 mA ada beberapa tegangan paparan yang digunakan dengan kisaran *range* 60000Volt-150000Volt. Pengujian ini akan menggunakan pemisalan yang sama dengan pengujian sebelumnya untuk perbandingan trafo antara sisi primer dan sisi sekunder 10:50. Dari batas nilai tegangan yang telah ditentukan, dapat diambil kesimpulan lima parameter besaran tegangan hasil simulasi dengan memanfaatkan frekuensi tinggi. Jika dilihat dari tabel 4.8, dapat diketahui bahwa nilai frekuensi yang digunakan berada pada range 1500 Hz-3750 Hz. Hal ini memiliki perbedaan dengan besar arus filament 200 mA dan 500 mA dikarenakan tegangan kerja paparan sinar-x harus berada pada range 50 kV-150 kV. Sehingga frekuensinya juga diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan tegangan kerja paparan sinar-x yang diinginkan. Kurva karakteristik hasil pemodelan frekuensi dan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.24 berikut ini.



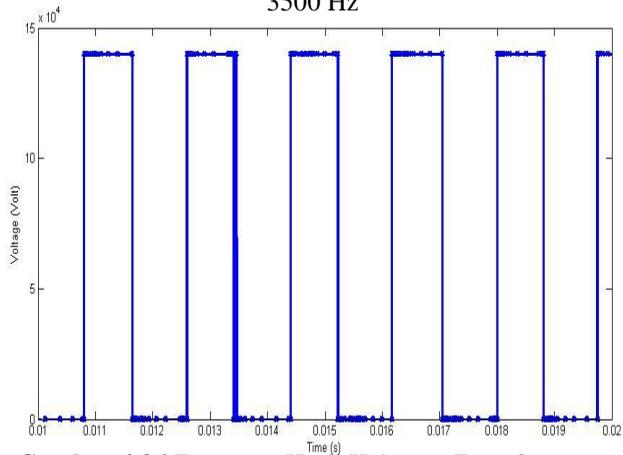
Gambar 4.24 Kurva Karakteristik Hasil Pemodelan Frekuensi dan Tegangan

Kurva tersebut menunjukkan besarnya frekuensi yang digunakan pada saat arus filamen mengalir sebesar 500 mA. Dimana besar tegangan yang dihasilkan nilainya juga semakin besar untuk frekuensi yang tinggi. Namun pada saat waktu paparan peralatan tegangan tinggi digunakan, ada besaran tegangan yang sangat baik untuk digunakan sebagai sistem kerja paparan sinar-x. Dengan memanfaatkan frekuensi 3500 Hz akan dihasilkan tegangan input trafo sebesar 2800,4 Volt. Tegangan dan frekuensi yang telah dikontrol sedemikian rupa akan digunakan sebagai input trafo yang nantinya besarnya akan dilipatgandakan bergantung banyaknya lilitan pada penggunaan trafonya. Hasil pemodelan karakteristik pada saat frekuensi 3500 Hz dan menghasilkan tegangan tinggi yang disajikan gambar 4.25. Setelah semua nilai tegangan yang diinginkan tersedia, selanjutnya nilainya dilipatgandakan menggunakan transformator dengan perbandingan belitan 10:50. Hasil transformasi tegangan dengan menggunakan trafo direpresentasikan pada gambar 4.26 berikut ini. Kalau dilihat dari pengujian ini, maka semakin besar kebutuhan kapasitas

tubuh manusia maka arus yang dihasilkan akan semakin besar setelah dilakukannya pengujian terhadap dua arus filament sebelumnya yaitu 200 mA dan 500 mA. Sehingga hal ini juga akan mempengaruhi besarnya frekuensi pada sistem inverter dan kontrolnya. Karena tegangan kerja pada paparan sinar-x harus selalu berada pada range 50 kV- 150 kV.

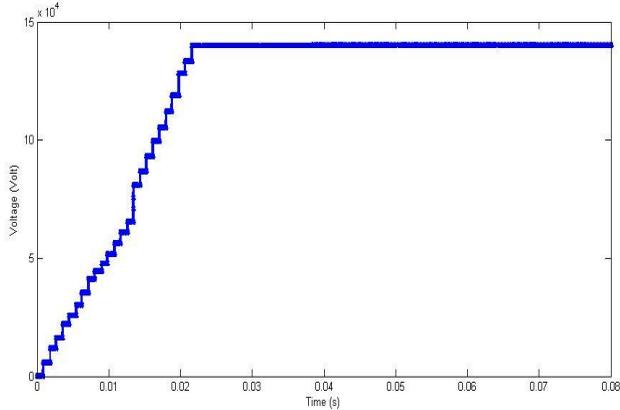


Gambar 4.25 Tegangan Hasil Inverter Satu fasa Frekuensi 3500 Hz



Gambar 4.26 Tegangan Hasil Keluaran Transformator

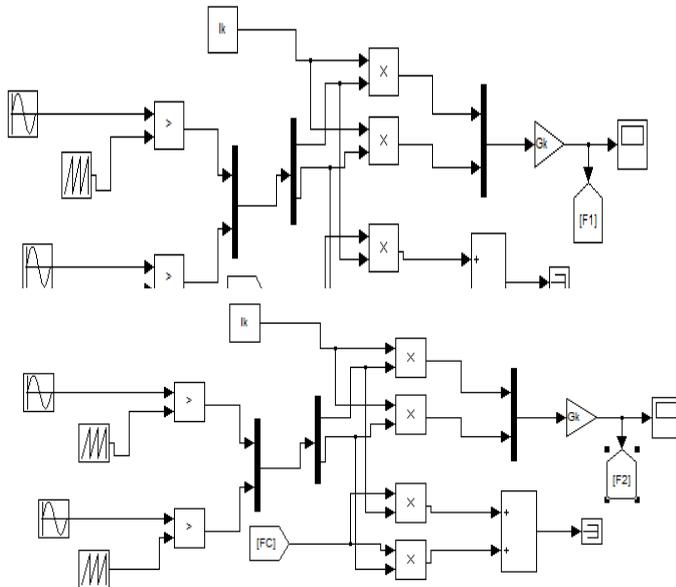
Keluaran transformator selanjutnya akan disearahkan dengan menggunakan *rectifier high voltage* untuk benar-benar mendapatkan nilai tegangan VDC yang stabil dengan direpresentasikan pada gambar 4.27 berikut ini dengan pengujian yang sama pada saat arus filament 800 mA.



Gambar 4.27 Hasil *Output Rectifier High Voltage*

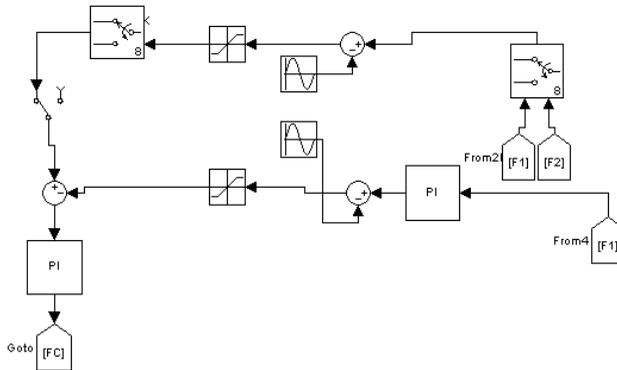
4.4 Karakteristik Hasil Simulasi Kontrol Filament

Analisa sistem kontrol selanjutnya yaitu pada pemodelan kontrol filament. Inilah salah satu bagian yang juga memiliki peranan penting pada peralatan sinar-x diagnostik. Kontrol filament berfungsi untuk mengalirkan arus dalam sistem sirkuit peralatan sinar-x. Karena sesungguhnya peralatan diagnostik akan memancarkan sinar-x nya berdasarkan arus filament sehingga sistem inilah yang dianggap sebagai arus beban. Pada sistem kontrol filament akan diuji tiga parameter arus yang digunakan untuk merepresentasikan kapasitas tubuh seorang pasien. Arus yang digunakan pada pemodelan ini memiliki besaran 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Pemodelan sistem untuk bagian yang menghasilkan arus ditunjukkan pada gambar 4.28 berikut ini.



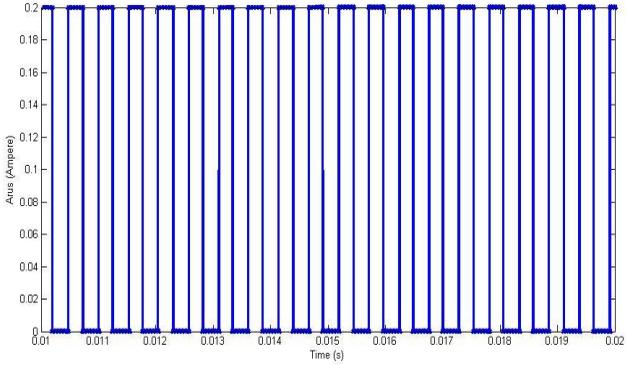
Gambar 4.28 Pemodelan Penghasil Arus Pada Filament Kontrol

Pengujian yang dilakukan pada gambar 4.28 adalah dengan menggunakan perbandingan sinyal kontrol antara tegangan sinusoidal dan gelombang segitiga. Tujuannya adalah untuk menghasilkan arus yang frekuensinya disamakan dengan output pada trafo. Rangkaian di atas menggunakan arus kontrol sebesar 10 Ampere DC yang nantinya arus tersebut dikombinasikan dengan hasil dari perbandingan kedua sinyal penghasil frekuensi. Akan tetapi untuk mendapatkan arus output yang diinginkan, dibutuhkan sebuah sistem kontrol sederhana agar didapat besar arus 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Sistem kontrol yang diterapkan dalam penghasil pemodelan arus direpresentasikan pada gambar 4.29 berikut ini.

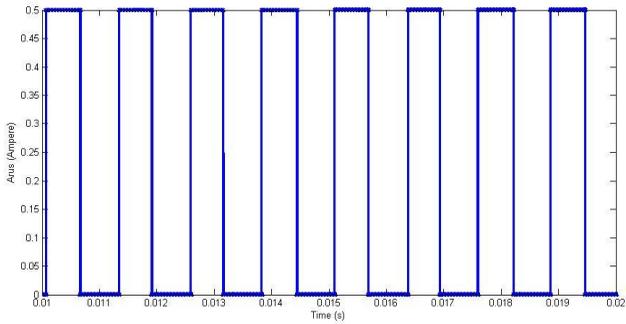


Gambar 4.29 Analisa Sistem Kontrol Arus Filament

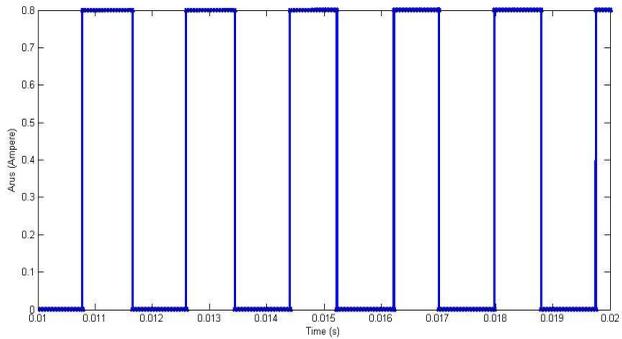
Sistem kontrol di atas dibuat dengan membandingkan setiap outputan yang dihasilkan. Penggunaan PI pada sistem kontrol inilah yang berfungsi untuk mempercepat sekaligus menghasilkan arus yang diinginkan. Pengisian untuk kedua PI dibuat sama pada kontrol bloknya dengan menggunakan 0.1 *proportional gain*, 1 *integral gain*, $1e6-1e6$ *output limits*, dan $50e-6$ *sample time*. Pengisian tersebut dilakukan secara random agar mendapatkan arus output pada kontrol filament sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Fungsi kontrol blok switching pada sistem kontrol filament adalah untuk mengatur jumlah arus yang diinginkan. Selain itu, kontrol filament juga berfungsi mengatur banyaknya jumlah emisi elektron yang dihasilkan. Namun dalam pemodelan ini tidak akan digunakan analisa pada tugas akhir ini. Hasil pemodelan pada sistem penghasil arus dan kontrol filament berdasarkan besar frekuensi yang sering digunakan pada hasil analisa bab 4.3 ditunjukkan dengan gambar 4.31, 4.32, dan 4.33 berikut ini.



Gambar 4.30 Hasil Simulasi Arus 200 mA frekuensi 12000 Hz



Gambar 4.31 Hasil Simulasi Arus 500 mA Frekuensi 5000 Hz



Gambar 4.32 Hasil Simulasi Arus 800 mA Frekuensi 3500 Hz

Dari ketiga gambar di atas dapat disimpulkan bahwa arus filamen yang mengalir pada peralatan diagnostik akan mempengaruhi besaran frekuensi, daya, dan tegangan kerja sistem. Dengan semakin besarnya nilai arus filamen maka frekuensi yang dibutuhkan semakin kecil. Namun dalam hal ini, penggunaan arus filamen pesawat sinar-x menggunakan ukuran kapasitas tubuh pasien sebagai bahan referensinya. Dari hasil pengujian yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa arus 200 mA membutuhkan besar frekuensi 12000 Hz untuk mendapatkan tegangan kerja peralatan sinar-x. Arus 500 mA membutuhkan besar frekuensi 5000 Hz untuk dapat bekerja pada pesawat sinar-x. Sedangkan dengan penggunaan arus sebesar 800 mA membutuhkan besar frekuensi yang relatif kecil yaitu sebesar 3500 Hz. Dengan tegangan yang dihasilkan untuk masing-masingnya yaitu sebesar 120010 Volt, 125070 Volt, dan 140030 Volt. Ketiga tegangan tersebut diperoleh dari hasil simulasi dengan model yang telah dibuat. Nilai tegangan yang diambil sebagai parameter merupakan tegangan pada sistem kerja pesawat sinar-x dengan penggunaan paling sering. Namun untuk nilai parameter yang lainnya masih tetap dipergunakan pada pasien yang menggunakan kapasitas arus sama, dikarenakan kebutuhan tegangan kerja yang dibutuhkan berbeda. Dimana ukuran arus sama untuk orang yang berbeda, dibutuhkan besar tegangan berbeda tergantung kebutuhan waktu paparan. Yang terpenting dalam penggunaan peralatan sinar-x diagnostik berada pada kisaran kebutuhan tegangan kerja yaitu 50 kV-150 kV.

Sehingga dari pemodelan arus filament dapat ditentukan besarnya kekuatan sinar-x yang direpresentasikan ke dalam hambatan resistansi. Resistansi yang dihasilkan dari sinar-x tersebut memiliki perbedaan untuk setiap frekuensi dan tegangan tinggi yang dibangkitkan. Besarnya resistansi direpresentasikan di tabel 4.9 berikut.

Tabel 4.9 Karakteristik Besarnya Resistansi Kekuatan Sinar-X

Frekuensi (Hz)	Arus (I ₂) (A)	tegangan (V ₂) (Volt) Hasil Simulasi	R (Ohm)
8000	0,2	80080	400400
10000	0,2	100127,5	500637,5

12000	0,2	120010	600050
14000	0,2	140030	700150
15000	0,2	149655	748275
2000	0,5	50050	100100
2500	0,5	62590	125180
4000	0,5	100045	200090
5000	0,5	125070	250140
6000	0,5	149985	299970
1500	0,8	60060	75075
2000	0,8	80080	100100
3000	0,8	120065	150081,3
3500	0,8	140030	175037,5
3750	0,8	149930	187412,5

4.5 Karakteristik Kurva Histerisis B-H Material Inti Trafo

Karakteristik kurva B-H didasarkan pada material inti trafo yang digunakan. Karakteristik tersebut akan menunjukkan kecepatan saturasi bahan ketika adanya tegangan dan frekuensi tinggi yang mengalir pada inti material trafo. Besar-kecilnya kurva B-H menunjukkan rugi-rugi yang terjadi pada inti trafo. Sehingga dalam penelitian ini, kecepatan saturasi dari inti material trafo juga dipengaruhi oleh besarnya B saturasi atau kuat medan inti trafo. Sehingga dapat ditentukan material trafo yang cocok untuk implementasi nantinya. Pemilihan material inti trafo berdasarkan data B_{sat} yang diperoleh dari jurnal dan paper. B_{sat} diberikan pada tabel 4.10 berikut ini berdasarkan inti material trafo dan frekuensi yang digunakan.

Tabel 4.10 B saturasi Inti Material Inti Trafo

Tipe Inti	B-sat (T)	Relatif Rugi Inti	Aplikasi Frekuensi
Powderes Cores, powdered iron, molypermalloy	0,6	Medium	12000 Hz
	0,7		12000 Hz
	0,8		12000 Hz

Ferrite Manganese-zinc, nickel-zinc	0,25	Low	12000 Hz
	0,3		12000 Hz
	0,35		12000 Hz
	0,4		12000 Hz
	0,45		12000 Hz
	0,5		12000 Hz
Powderes Cores, powdered iron, molypermalloy	0,6	Medium	5000 Hz
	0,7		5000 Hz
	0,8		5000 Hz
Ferrite Manganese-zinc, nickel-zinc	0,25	Low	5000 Hz
	0,3		5000 Hz
	0,35		5000 Hz
	0,4		5000 Hz
	0,45		5000 Hz
	0,5		5000 Hz
Powderes Cores, powdered iron, molypermalloy	0,6	Medium	3500 Hz
	0,7		3500 Hz
	0,8		3500 Hz
Ferrite Manganese-zinc, nickel-zinc	0,25	Low	3500 Hz
	0,3		3500 Hz
	0,35		3500 Hz
	0,4		3500 Hz
	0,45		3500 Hz
	0,5		3500 Hz

Data tabel 4.10 dipergunakan untuk mengisi kotak dialog simulasi kurva B-H pada *power simulator* yang nilainya ditunjukkan pada table 4.11 berikut ini untuk masing-masing frekuensi yaitu 12 kHz, 5 kHz, dan 3,5 kHz.

Tabel 4.11 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=12$ kHz

Explanation	Frekuensi		
	12 kHz		
Core Parameter			
Inductance Faktor AL	8,5e-6	8,5e-6	8,5e-6
Cros Cross Section Area Ac	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²
Core Length	0,057 m	0,057 m	0,057 m
Model Parameters			
Resistance for Core Losses	1 Ohm	0,6 Ohm	0,06 Ohm
B Saturation	0,4 T	0,4 T	0,4 T
coefficient K1	0,82	0,82	0,82
Coefficient Kexp1	6	6	6
Coefficient K2	0,95	0,95	0,95
Coefficient Kexp2	40	40	40
Operating Conditions			
Maximum Flux Density	0,372 T	0,372 T	0,372 T

Tabel 4.12 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan f=5 kHz

Explanation	Frekuensi		
	5 kHz		
Core Parameter			
Inductance Faktor AL	8,5e-6	8,5e-6	8,5e-6
Cros Cross Section Area Ac	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²
Core Length	0,057 m	0,057 m	0,057 m
Model Parameters			
Resistance for Core Losses	1 Ohm	0,6 Ohm	0,06 Ohm
B Saturation	0,4 T	0,4 T	0,4 T

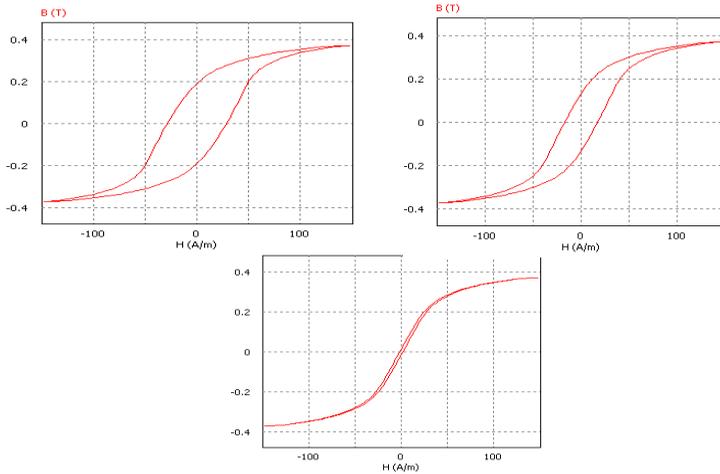
coefficient K1	0,82	0,82	0,82
Coefficient Kexp1	6	6	6
Coefficient K2	0,95	0,95	0,95
Coefficient Kexp2	40	40	40
Operating Conditions			
Maximum Flux Density	0,372 T	0,372 T	0,372 T

Tabel 4.13 Data Simulasi kurva B-H berdasarkan $f=3,5$ kHz

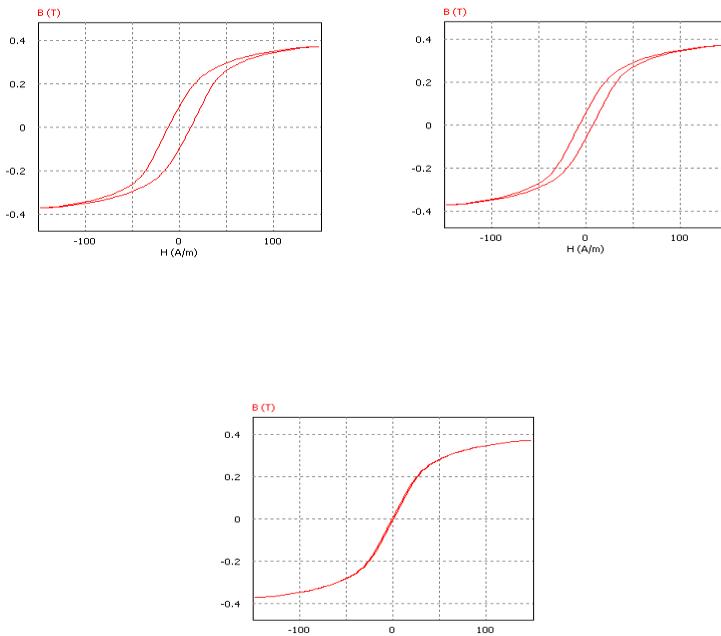
Explanation	Frekuensi		
	3,5 kHz		
Core Parameter			
Inductance Faktor AL	8,5e-6	8,5e-6	8,5e-6
Cros Cross Section Area Ac	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²	5,8e-5 m ²
Core Length	0,057 m	0,057 m	0,057 m
Model Parameters			
Resistance for Core Losses	1 Ohm	0,6 Ohm	0,06 Ohm
B Saturation	0,4 T	0,4 T	0,4 T
coefficient K1	0,82	0,82	0,82
Coefficient Kexp1	6	6	6
Coefficient K2	0,95	0,95	0,95
Coefficient Kexp2	40	40	40
Operating Conditions			
Maximum Flux Density	0,372 T	0,372 T	0,372 T

Simulasi tersebut akan menentukan material inti trafo yang cocok untuk memperkecil rugi-rugi pada inti. Data yang dipergunakan untuk nilai selain B saturasi dan frekuensi mengikuti template yang telah disediakan. Sehingga dari hasil simulasi

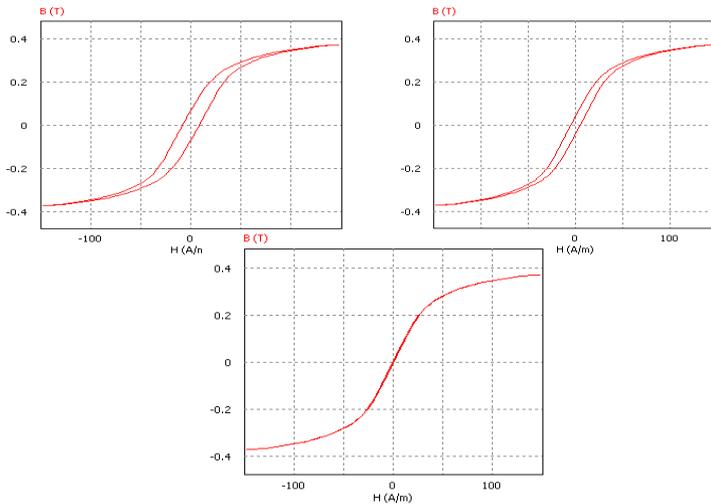
diperoleh bahan inti yang terbuat dari campuran *Ferrite*, *Manganese-zinc*, and *nickel-zinc* dengan besar B saturasi 0,4 T yang baik untuk ketiga frekuensi yang digunakan yaitu 12000, 5000, dan 3500. Gambar untuk kurva B-H ketiga frekuensi tersebut ditunjukkan pada gambar 4.35, 4.36, dan 4.37 berikut ini dengan membandingkan besar kurva yang berbeda akibat rugi-rugi inti dengan parameter 1; 0,6; dan 0,06 Ohm. Dari gambar berikut dapat diketahui diprediksi rugi-rugi inti dari bahan yang nantinya akan digunakan.



Gambar 4.33 Kurva B-H Frekuensi 12000Hz

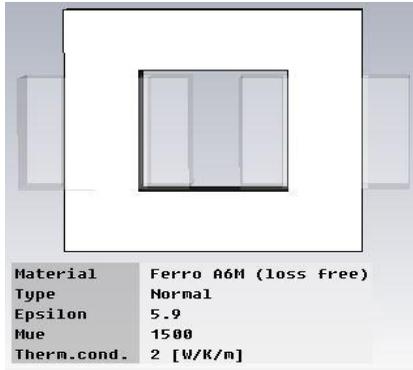


Gambar 4.34 Kurva B-H Frekuensi 5000 Hz

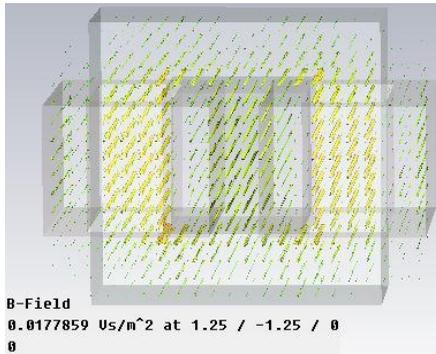


Gambar 4.35 Kurva B-H Frekuensi 3500 Hz

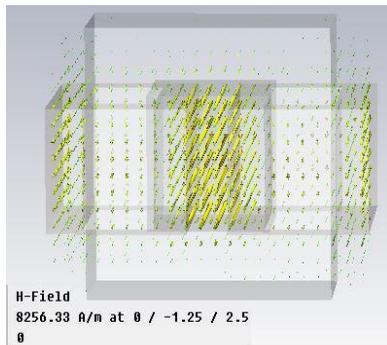
Karakteristik kurva B-H bahan material yang ditunjukkan pada gambar 4.34-4.36 akan digunakan sebagai bahan material pendesainan trafo. Desain pembuatan trafo dan karakteristik distribusi kuat medan magnet serta kuat kerapatan arus ditunjukkan pada gambar 4.36-4.38 berikut ini.



Gambar 4.36 Pemodelan Trafo

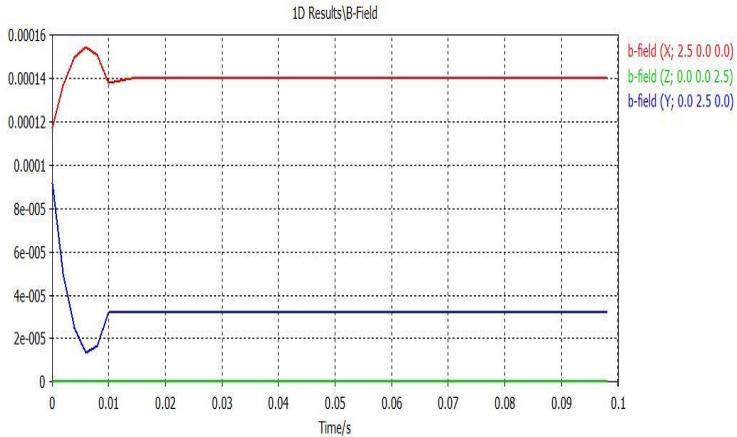


Gambar 4.37 Distribusi Medan Magnet

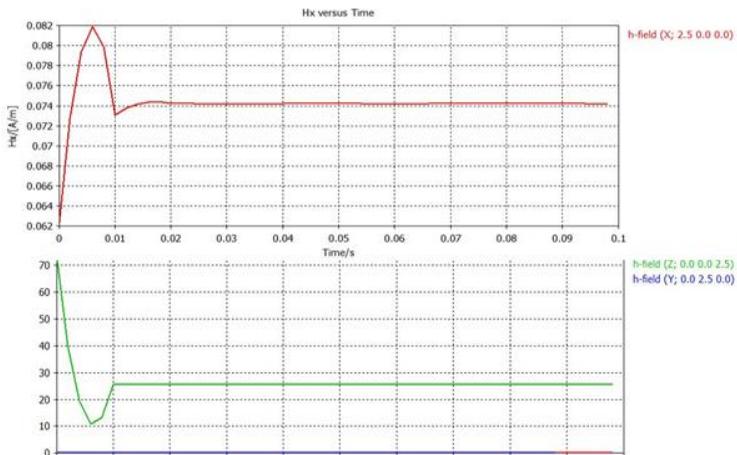


Gambar 4.38 Distribusi Kerapatan Arus

Gambar 4.38-4.39 menunjukkan distribusi kuat medan dan kerapatan arus dari bahan yang telah digunakan. Sehingga dapat diketahui nilai kecepatan saturasi pada inti. Oleh karena itu, karakteristik kurva bahan untuk nilai besar medan dan intensitas arus dapat ditunjukkan dengan mengacu pada gambar kurva karakteristik 4.40-4.41 berikut ini.



Gambar 4.39 Kurva Distribusi Medan Sumbu X, Y, dan Z



Gambar 4.40 Distribusi Kerapatan Arus Sumbu X, Y, dan Z

Pemodelan trafo yang telah dilakukan nantinya dapat digunakan sebagai bahan penelitian selanjutnya. Hasil pemodelan trafo didapat hasil parameter-parameter sebagai berikut dan ditunjukkan pada tabel 4.14 untuk masing-masing frekuensi yaitu 12 kHz, 5 kHz, dan 3,5 kHz.

Inductance Matrix:

	Primer	Sekunder
Primer	4,58e-004 H	-2,28e-002 H
Sekunder	-2,28e-002 H	1,15e+000 H

Magnetic energy in component1:ferrite : 4,31e-007 J

Magnetic energy in Primer : 5,67e-005 J

Magnetic energy in background : 1,02e-004 J

Magnetic energy in Sekunder : 5,58e-005 J

Total magnetic energy : 2,15e-004 J

Flux Linkages

Primer : 2,15e-005 Vs

Sekunder : 1,08e-003 Vs

Tabel 4.14 Hasil Simulasi Pemodelan Trafo untuk Frekuensi 12 kHz, 5 kHz, dan 3,5 kHz.

Explanation	12 kHz (rms)	5 kHz (rms)	3,5 kHz (rms)
Magnetic field energy in component1:ferrite	8,63e-012 J	5,01e-011 J	1,05e-010 J
Electric field energy in component1:ferrite	1,69e-029 J	9,79e-029 J	2,02e-028 J
Magnetic field energy in Primer	8,24e-009 J	4,26e-008 J	8,06e-008 J
Electric field energy in Primer	2,50e-030 J	1,43e-029 J	2,89e-029 J
Magnetic field energy in background	6,35e-009 J	3,22e-008 J	6,09e-008 J
Electric field energy in background	3,80e-030 J	2,16e-029 J	4,39e-029 J
Magnetic field energy in Sekunder	9,96e-009 J	5,06e-008 J	9,50e-008 J
Electric field energy in Sekunder	2,56e-030 J	1,46e-029 J	2,96e-029 J

Total magnetic field energy	2,46e-008 J	1,25e-007 J	2,37e-007 J
Total electric field energy	2,57e-029 J	1,48e-028 J	3,05e-028 J
Total field energy	2,46e-008 J	1,25e-007 J	2,37e-007 J
Coil parameters at frequency			
Primer Voltage	9,30e-003 + i 1,70e-004 V	9,23e-003 + i 3,64e-004 V	9,17e-003 + i 4,83e-004 V
Sekunder Voltage	4,77e-001 + i 1,00e-002 V	4,724e-001 + i 2,12e-002 V	4,69e-001 + i 2,79e-002 V
Ohmic losses at frequency			
Volume losses in Primer	9,30e-002 W	9,23e-002 W	9,17e-002 W
Volume losses in Sekunder	9,53e-002 W	9,44e-002 W	9,37e-002 W
Total Ohmic volume losses	1,88e-001 W	1,87e-001 W	1,85e-001 W

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Untuk mendapatkan nilai tegangan sebesar 316,5 VDC *output rectifier* menggunakan hambatan 100 ohm dan *upper saturation limit* pada sistem kontrol sebesar 1,055.
2. Tegangan *output* dari *boost converter* sebesar 550 VDC sebagai *supply* dari inverter satu fasa dengan menggunakan resistansi 100 ohm, induktor 66,5 mH, kapasitor 0,42 uF, dan frekuensi *switching* pada control SPWM (*single pulse width modulation*) sebesar 100 kHz.
3. Pengaturan kontrol *switching* pada inverter satu fasa menggunakan pengaruh dari frekuensi, arus filamen, dan jumlah lilitan trafo pada bagian sekunder.
4. Untuk menghasilkan frekuensi tinggi, *switching* inverter satu fasa diatur dengan saklar SPWM (*sinusoidal pulse width modulation*).
5. Hasil *output* inverter satu fasa disesuaikan dengan kebutuhan tegangan kerja yang digunakan pada pesawat sinar-x yaitu 2400,2 VDC/12kHz, 2501,4VDC/5kHz, 2800,6VDC/3,5kHz.
6. Hasil simulasi tegangan *output* inverter satu fasa dinaikkan tegangannya menggunakan transformator satu fasa dengan perbandingan belitan primer sekunder sebesar 10:50 sebagai bahan penelitian. Sehingga diperoleh nilai 120010 VAC, 125070 VAC, dan 140030 VAC.
7. Pengaturan kontrol arus filamen menggunakan besar arus 200 mA, 500 mA, dan 800 mA yang disesuaikan dengan kapasitas beban dari tubuh seorang pasien.
8. Dari hasil tegangan *output* transformator dan arus filamen kontrol didapat besar kekuatan sinar-x yang direpresentasikan ke dalam besaran resistansi (ohm) dengan besaran berbeda untuk variasi kebutuhan tegangan kerja.
9. Untuk meminimalkan rugi-rugi inti transformator akibat frekuensi dan tegangan tinggi, digunakanlah transformator

berbahan ferromagnetic yaitu *ferrite*, *manganese-zinc*, *nickel-zinc* dengan B (kuat medan) saturasi sebesar 0.4 T serta permibialitas bahan sebesar 1500.

5.2 Saran

Sebagai upaya untuk memenuhi kebutuhan sumber komponen tegangan tinggi pesawat sinar-x digunakanlah komponen pendukung sebelum memasuki nilai trafo yaitu *rectifier*, *boost converter*, *inverter one phase*, *filament control*, dan trafo. Penelitian ini menggunakan frekuensi maksimal 15 kHz dan dapat ditingkatkan nilainya tergantung kebutuhan ketika nantinya benar-benar diimplementasikan. Untuk mengurangi rugi-rugi inti trafo digunakanlah bahan yang terbaik yaitu *ferrite*, *manganese-zinc*, *nickel-zinc* dan diperbolehkan menggunakan bahan lainnya tergantung kebutuhan. Pada zaman dengan perkembangan teknologi saat ini sudah selayaknya berpindah pada teknologi yang semakin baik dan lebih ekonomis dalam penerapannya.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisis hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa :

1. Untuk mendapatkan nilai tegangan sebesar 316,5 VDC *output rectifier* menggunakan hambatan 100 ohm dan *upper saturation limit* pada sistem kontrol sebesar 1,055.
2. Tegangan *output* dari *boost converter* sebesar 550 VDC sebagai *supply* dari inverter satu fasa dengan menggunakan resistansi 100 ohm, induktor 66,5 mH, kapasitor 0,42 uF, dan frekuensi *switching* pada control SPWM (*single pulse width modulation*) sebesar 100 kHz.
3. Pengaturan kontrol *switching* pada inverter satu fasa menggunakan pengaruh dari frekuensi, arus filamen, dan jumlah lilitan trafo pada bagian sekunder.
4. Untuk menghasilkan frekuensi tinggi, *switching* inverter satu fasa diatur dengan saklar SPWM (*sinusoidal pulse width modulation*).
5. Hasil *output* inverter satu fasa disesuaikan dengan kebutuhan tegangan kerja yang digunakan pada pesawat sinar-x yaitu 2400,2 VDC/12kHz, 2501,4VDC/5kHz, 2800,6VDC/3,5kHz.
6. Hasil simulasi tegangan *output* inverter satu fasa dinaikkan tegangannya menggunakan transformator satu fasa dengan perbandingan belitan primer sekunder sebesar 10:50 sebagai bahan penelitian. Sehingga diperoleh nilai 120010 VAC, 125070 VAC, dan 140030 VAC.
7. Pengaturan kontrol arus filamen menggunakan besar arus 200 mA, 500 mA, dan 800 mA yang disesuaikan dengan kapasitas beban dari tubuh seorang pasien.
8. Dari hasil tegangan *output* transformator dan arus filamen kontrol didapat besar kekuatan sinar-x yang direpresentasikan ke dalam besaran resistansi (ohm) dengan besaran berbeda untuk variasi kebutuhan tegangan kerja.
9. Untuk meminimalkan rugi-rugi inti transformator akibat frekuensi dan tegangan tinggi, digunakanlah transformator

berbahan ferromagnetic yaitu *ferrite*, *manganese-zinc*, *nickel-zinc* dengan B (kuat medan) saturasi sebesar 0.4 T serta permialitas bahan sebesar 1500.

5.2 Saran

Sebagai upaya untuk memenuhi kebutuhan sumber komponen tegangan tinggi pesawat sinar-x digunakanlah komponen pendukung sebelum memasuki nilai trafo yaitu *rectifier*, *boost converter*, *inverter one phase*, *filament control*, dan trafo. Penelitian ini menggunakan frekuensi maksimal 15 kHz dan dapat ditingkatkan nilainya tergantung kebutuhan ketika nantinya benar-benar diimplementasikan. Untuk mengurangi rugi-rugi inti trafo digunakanlah bahan yang terbaik yaitu *ferrite*, *manganese-zinc*, *nickel-zinc* dan diperbolehkan menggunakan bahan lainnya tergantung kebutuhan. Pada zaman dengan perkembangan teknologi saat ini sudah selayaknya berpindah pada teknologi yang semakin baik dan lebih ekonomis dalam penerapannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Siemens X Ray Generator., “ Kontrol Inverter Satu Fasa”, Jerman, 1998.
- [2] Drajat, Adi.,” Cara Kerja Pesawat Sinar-X”, BATAN, Jakarta, April, 2013.
- [3] Tiwik Ari I, Veronika., “ Boost Rectifier Satu Fasa”, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2003.
- [4] Suyatno, Ferry., “ Rekayasa Sistem Pengatur Parameter Pesawat Sinar-X Diagnostik Berbasis Mikrokontroler Keluarga MCS 51:”, BATAN, Tangerang, November, 2007.
- [5] Ashari, Mohammad, dan Effendi, Moh. Zaenal., “ Sistem Penyearah Satu Fasa Dengan Dua Konverter Flyback Paralel Untuk Meningkatkan Kualitas Arus Input”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Juni, 2007.
- [6] Asnil., “ AC to DC Converter (Rectifier)”, Elektro FT-UNP, April, 2010.
- [7] Stefan, Partyka., “ DC Link Voltage Control”, Aalborg University, Denmark, April, 2008.
- [8] Eko H. W, Septian., “ Desain Dan Simulasi Pengontrolan Daya Aktif dan Reaktif Inverter 3 Fasa Menggunakan PQ Controller Pada Sistem Pembangkit Tersebar Multiple Proton Exchangen Membrane Fuel Cell (PEMFC)”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Agustus, 2012.
- [9] Shangzuan, Nie Ling., “ *The Application and Practice of frequency Converter with One Transducer and multi Electric Pumps*”. Chongqing University of Science and Technology, januari 2011.
- [10] M. Khafalah dkk., “ *A Simplified SVM Control Scheme for Reduced Switching Losses in Converter-Fed Drives*”. IEEE, 2004.
- [11] No name., “ *Designing with Magnetic Cores at High Temperatures*”, Pitsburg, 2014.
- [12] Mardiansya, Riki., Potensi Medan Elektromagnetic sebagai Sumber Pembangkit Listrik”. Universitas Indonesia, Maret, 2012.
- [13] *Fundamental Of Power Electronic handbook*.
- [14] H. Mohamed, Khalid dkk., “*Boost Converter Design with Stable Output Voltage for Wave Energy Conversion System*”, ITEE Journal, Februari, 2012.

- [15] Fatah, Abdul., “*Design Boost Converter*”, *National Institute of Technology Rourkela*, Juni 2013.
- [16] Robandi, Imam., “*Modern Power System Control*”, Yogyakarta, 2009.
- [17] Gunawan, Erik., “*Analisa Rangkaian Inverter Satu Fasa*”, Jakarta, 2007.
- [18] Batarh, Cristophe. dkk, “*Simulation of Power Converter*” INTECH, 2012.

LAMPIRAN

Script Plot Kontrol Inverter Satu Phasa

```
t = ditentukan; t2 = ditentukan;
K = ditentukan; i = ditentukan;
f = ditentukan n = ditentukan;
% membuat Matrik
A = [ -1/t2  0  0  K/t2
      i*n*f/t  -1/t  0  0
      -i*n*f/t  0  -1/t  0
      i*n*f/t  0  0  -1/t];
B = [ 0  0
      0  0
      0  1/t
      1/t  -1/t];
C = [0 0 0 1];
D = [0 0];
sys=ss(A,B,C,D);
% mencari kontrolabilitas
P=[B,A*B,A^2*B,A^3*B];
rank_matriks = rank(P);
% mencari eigenvalue
Ei = eig(A);
% plotting kurva
t0 = 0:1:100;
t1 = [0;4;0;3;];
x1= initial(sys,t1,t0);
% plotting biasa
plot(t0,x1,'b')
xlabel('Time (sec.)')
ylabel('delta')
title('Step response')
```

Script Arus Magnetisasi

```
%M-file: mag_current.m
%M-file to calculate and plot the magnetization
%current of a V1/V2 transformer operating at
```

```

%V1 volts and F1 Hz. This program also
%calculates the rms value of the mag. current.

%Load the magnetization curve. It is in two
%columns, with the first column being mmf and
%the second column being flux.
load mag_curve_1.dat ;
mmf_data = mag_curve_1(:,1);

flux_data = mag_curve_1(:,2);

%Initialize values
VM = ditentukan;           % Maximum voltage (V)
NP = ditentukan;         % Primary turns

%Calculate angular velocity for highfrekuensi Hz
freq = 60;               % Freq (Hz )
w = 2 * pi * freq;

%Calculate flux versus time
time = 0:1/3000:1/30;    % 0 to 1/30 sec
flux = -VM/(w*NP) * cos(w.*time ) ;

%Calculate the mmf corresponding to a given flux
%using the flux's interpolation function.
mmf = interp1(flux_data,mmf_data,flux) ;

%Calculate the magnetization current
im = mmf/NP ;

%Calculate the rms value of the current
imms = sqrt ( sum ( im.^2 )/ length( im ) ) ;
disp( ['The rms current at 60 Hz is', num2str( inms) ] ) ;

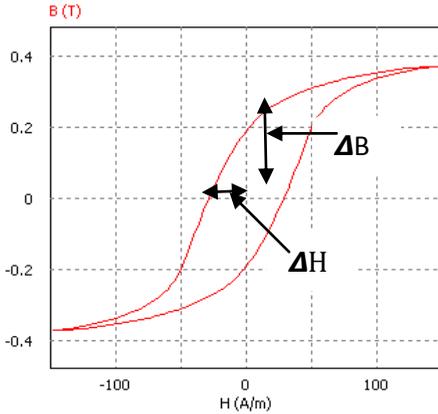
%Plot the magnetization current.
figure ( 1 )
subplot ( 2, 1 , 1 );
plot ( time, im );
title ( '\bfMagnetization Current at 60 Hz');
xlabel ( '\bfTime (s)' );

```

```
ylabel ('\bf\itI_(m) \rm(A)');  
axis( [0 0.04 - 2 2]);  
grid on;
```

Rugi Histerisis dan Rugi Inti

- Frekuensi 12 kHz, 120 kV



Rugi Histerisis :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = \frac{V_s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W}{m^3}$$

Maka jika diketahui :

$$B = 0,4 \text{ T}$$

$$H = \frac{5}{8} \times 50 = 31,25 \frac{A}{m}$$

Sehingga :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = 0,4 \text{ T} \times 31,25 = 12,5 \frac{W}{m^3}$$

Pemodelan memiliki volume = 125 m^3

Maka :

$$P_{\text{mag}} = 12,5 \frac{W}{m^3} \times 125 \text{ m}^3 = 1562,5 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{fer}} = I_{\text{core}} \times R_{\text{core}}$$

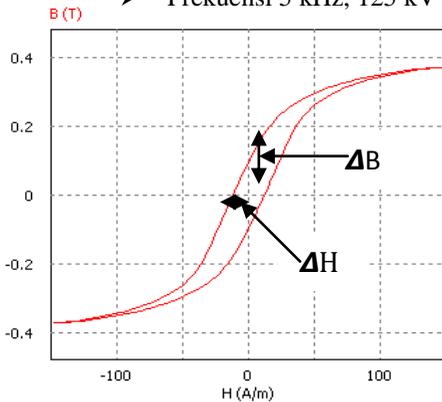
$$P_{\text{fer}} = \left(\frac{31,25 \times 2}{50} \right)^2 \times 1 = 1,56 \text{ Watt}$$

Jadi Rugi Inti :

$$P_{\text{core}} = P_{\text{mag}} + P_{\text{fer}}$$

$$P_{\text{core}} = 1562,5 + 1,56 = 1564,06 \text{ Watt}$$

- Frekuensi 5 kHz, 125 kV



Rugi Histerisis :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = \frac{V_s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W}{m^3}$$

Maka jika diketahui :

$$B = 0,4 \text{ T}$$

$$H = \frac{3}{8} \times 50 = 18,75 \frac{A}{m}$$

Sehingga :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = 0,4 \text{ T} \times 18,75 = 7,5 \frac{W}{m^3}$$

Pemodelan memiliki volume = 125 m^3

Maka :

$$P_{\text{mag}} = 7,5 \frac{W}{m^3} \times 125 m^3 = 937,5 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{fer}} = I_{\text{core}} \times R_{\text{core}}$$

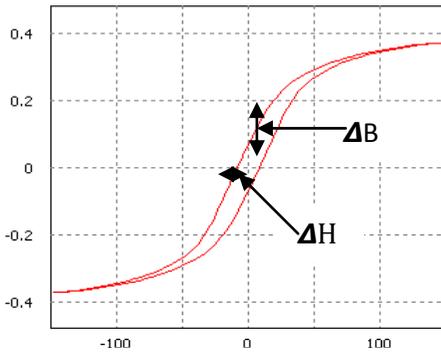
$$P_{\text{fer}} = \left(\frac{18,75 \times 2}{50}\right)^2 \times 1 = 0,56 \text{ Watt}$$

Jadi Rugi Inti :

$$P_{\text{core}} = P_{\text{mag}} + P_{\text{fer}}$$

$$P_{\text{core}} = 937,5 + 0,56 = 938,06 \text{ Watt}$$

➤ Frekuensi 3,5 kHz, 140 kV



Rugi Histerisis :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = \frac{V_s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W}{m^3}$$

Maka jika diketahui :

$$B = 0,4 \text{ T}$$

$$H = \frac{2}{8} \times 50 = 12,5 \frac{A}{m}$$

Sehingga :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = 0,4 \text{ T} \times 12,5 = 5 \frac{W}{m^3}$$

Pemodelan memiliki volume = $125 m^3$

Maka :

$$P_{\text{mag}} = 5 \frac{W}{m^3} \times 125 m^3 = 625 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{fer}} = I_{\text{core}} \times R_{\text{core}}$$

$$P_{\text{fer}} = \left(\frac{12,5 \times 2}{50}\right)^2 \times 1 = 0,25 \text{ Watt}$$

Jadi Rugi Inti :

$$P_{\text{core}} = P_{\text{mag}} + P_{\text{fer}}$$

$$P_{\text{core}} = 625 + 0,25 = 625,25 \text{ Watt}$$

➤ Frekuensi 15 kHz, 150 kV

Rugi Histerisis :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = \frac{V_s}{m^2} \cdot \frac{A}{m} = \frac{W}{m^3}$$

Maka jika diketahui :

$$B = 0,4 \text{ T}$$

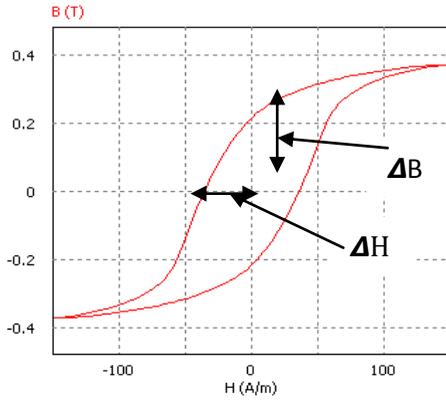
$$H = \frac{6}{8} \times 50 = 37,5 \frac{A}{m}$$

Sehingga :

$$[\Delta B \cdot \Delta H] = 0,4 \text{ T} \times 37,5 = 15 \frac{W}{m^3}$$

Pemodelan memiliki volume = $125 m^3$

Maka :



$$P_{\text{mag}} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \times 125 \text{ m}^3 = 1875 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{fer}} = I_{\text{core}} \times R_{\text{core}}$$

$$P_{\text{fer}} = \left(\frac{37,5 \times 2}{50} \right)^2 \times 1 = 1,5 \text{ Watt}$$

Jadi Rugi Inti :

$$P_{\text{core}} = P_{\text{mag}} + P_{\text{fer}}$$

$$P_{\text{core}} = 1875 + 1,5 = 1876,5 \text{ Watt}$$

RIWAYAT HIDUP PENULIS



Penulis adalah Addien Wahyu Wiranata kelahiran Situbondo, 05 September 1992. Penulis adalah anak kedua dari tiga bersaudara dengan ayah bernama Sunoto dan Ibu bernama Ririn Yunaini Arsitin. Pendidikan Penulis dari SD, SMP, sampai dengan SMA dihabiskan di Kota Situbondo. Saat ini penulis beraktivitas sebagai Menteri Aplikasi Teknologi BEM

ITS 2014-2015. Prestasi yang pernah didapatkan selama menempuh kuliah S1 adalah medali perak pada PIMNAS 26 Mataram 2013 dan finalis dikejuaraan Bridge intr ABCC Kuala Lumpur, November 2014. Selama menjadi seorang mahasiswa, penulis telah menjadi Asisten Dosen pada mata kuliah Wawasan Teknoogi dan Komunikasi Ilmiah pada tahun 2014-2015. Selain itu juga menjadi reviewer untuk kalangan mahasiswa dipenulisan PATEN dibawah naungan LPPM ITS bidang HKI. Penulis juga menjadi salah satu seorang Trainer Keilmiahan ITS pada masa 2014-2015.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

Desain dan Simulasi Komponen Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis

Addien Wahyu Wiranata, Dimas Anton Asfani, dan Feby Agung Pamuji

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: addien11@mhs.ee.its.ac.id, anton@ee.its.ac.id

Abstrak—Pembangkit sinar-x pada peralatan diagnostik medis membutuhkan tegangan kerja sebesar 50 kV- 150 kV berdasarkan kebutuhan daya tembus yang disesuaikan dengan intensitas volume tubuh pasien. Tegangan kerja tersebut dihasilkan dengan menggunakan transformator berdaya tinggi yang memiliki ukuran sangat besar. Sehingga transformator tersebut membutuhkan ruangan besar yang disertai mahalnya harga dari transformator berdaya tinggidan sulitnya didapatkan di pasaran lokal. Untuk itu pada penulisan tugas akhir ini akan dilakukan penelitian dengan menggunakan rangkaian elektronika daya yang didesain untuk menghasilkan frekuensi maksimal 15 kHz sebagai faktor variabel yang membangkitkan tegangan kerja pada peralatan diagnostik medis. Rangkaian elektronika daya ini menggunakan *intermediet circuitry* yang terdiri dari *Rectifier 3 Fasa* dan *boost converters*serta inverter satu fasa. *Intermediet circuit* digunakan unuk menaikkan tegangan yang sebelumnya telah disearahkan dari sumber PLN sebesar 220/380 volt 50 Hz. Sedangkan inverter satu fasa digunakan untuk menaikkan frekuensi dari tegangan sumber sebesar 50 Hz menjadi maksimal 15 kHz bergantung pada kebutuhan tegangan kerja sebagai daya tembus peralatan diagnostik medis. Namun dalam penelitian tugas akhir ini tidak dihilangkan komponen utama transformator yang akan dianalisa sebagai nilai histerisis dari *high frequency losses* transformator. Sehingga tegangan yang dihasilkan diharapkan mencapai nilai rentang 50 kV-150 kV dengan frekuensi maksimal 15 kHz..

Kata Kunci—peralatan diagnostik medis,*intermediet circuit*, inverter satu fasa, *high frequency losses* transformator

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan teknologi didunia kesehatan, saat ini sudah banyak alat-alat canggih yang digunakan dalam menunjang kebutuhan untuk membantu penyembuhan atau mendiagnosis penyakit dari seorang pasien. Sebuah rumah sakit dalam mendiagnosis seorang pasien menggunakan mesin sinar-x diagnostik. Kebutuhan akan alat tersebut semakin meningkat dengan semakin majunya zaman. Namun yang terjadi saat ini adalah akan kebutuhan penyediaan listrik untuk peralatan tabung sinar-x diagnostik membutuhkan tegangan kerja sebesar 50kV-150kV. Sumber utama dari generator pesawat sinar-x diagnostik berasal dari PLN yang mempunyai tegangan sebesar 220 volt/50 Hz. Pada umumnya generator pesawat sinar-x diagnostik menggunakan transformator atau autotransformator sebagai pengatur catu daya tegangan tinggi. Tegangan yang masuk ke dalam lilitan primer transformator High Voltage (HV) dan keluarannya dari hasil HV berupa tegangan tinggi yang siap dimasukkan ke dalam tabung. Pesawat sinar-x diagnostik berdaya besar memerlukan transformator berdaya besar yang memiliki ukuran fisik yang besar. Karena itu kontrol boks untuk menempatkan transformator tersebut berukuran besar pula. Selain itu harga dari transformator yang memiliki daya besar

cukup mahal dan sulit didapatkan di pasaran lokal. Untuk menggantikan fungsi kerja transformator pada peralatan sinar-x diagnostik dibuatlah rangkaian elektronika daya yang nantinya memiliki fungsi kerja menyerupai transformator. Namun dalam hal ini penggunaan transformator masih diperlukan dengan ukuran yang semakin kecil sehingga lebih ekonomis dan mudah didapatkan dipasaran.

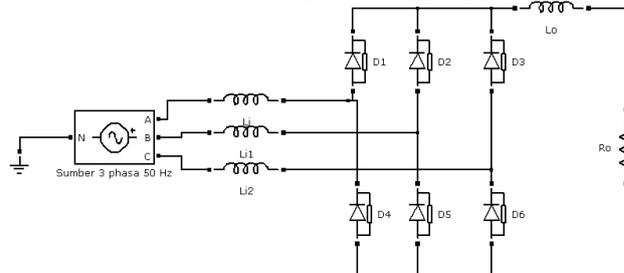
Rangkaian elektronika ini menggunakan *rectifier, boost converter* dan inverter satu fasa. Rangkaian *boost converter* terangkai dari rangkaian penyearah satu fasa dimana sumber PLN 220/380 Volt 50 Hz yang sebelumnya telah disearahkan. Sedangkan inverter satu fasa digunakan untuk menaikkan frekuensi dari tegangan sumber yang awalnya 50 Hz dari sumber PLN menjadi maksimal 15 kHz. Dengan menggunakan inverter satu fasa akan diperoleh frekuensi yang nilainya diatur sedemikian rupa untuk nantinya diperoleh tegangan yang diinginkan. Kemudian tegangan keluaran inverter satu fasa dialirkan ke generator pesawat sinar-x diagnostik dengan melewati transformator. Dengan demikian besarnya tegangan tinggi dapat diatur dengan menggunakan inverter satu fasa bergantung dengan proporsional tubuh seorang pasien.

Rangkaian lainnya yang sangat penting adalah dengan memodelkan sistem kontrol pada inverter satu fasa untuk frekuensi tinggi dan kontrol pada filament. Kontrol filament ini bertujuan untuk menghasilkan arus yang diinginkan sebagai sumber dari pembangkit tegangan kerja pesawat sinar-x. Karena pada tugas akhir ini akan digunakan sistem kerja arus dengan besar 200mA, 500mA, dan 800mA.

II. KOMPONEN PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR-X

A. Rectifier 3 Fasa

Penyearah (rectifier) adalah suatu rankaian elektronika daya yang dapat mengubah sumber tegangan bolak-balik (AC) menjadi sumber tegangan searah (DC) yang tetap.



Gambar 1. Pemodelan Rangkaian *Rectifier* pada Sumber 3 Fasa

$$\frac{dir}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(\frac{Li+Lo}{Li} uts - \frac{2Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \quad (1)$$

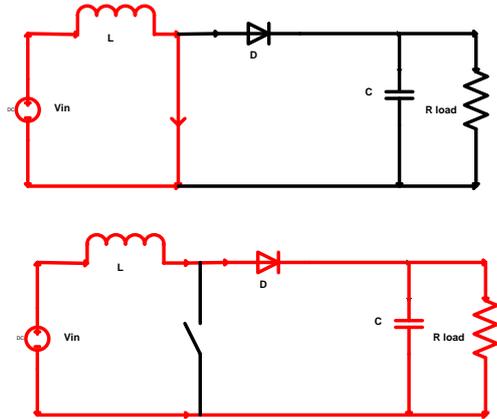
$$\frac{dis}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(-\frac{2Li+Lo}{Li} uts + \frac{Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \quad (2)$$

$$\frac{dit}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} (uts + utr + 2vo) \quad (3)$$

B. DC-DC Boost Converter

Boost konverter adalah salah satu DC to DC converter yang berfungsi menaikkan tegangan DC. Boost converter mempunyai tegangan output yang selalu lebih besar daripada tegangan input. Polaritas tegangan output mempunyai nilai yang sama dengan input.

Pada gambar 2, mendeskripsikan pensaklaran dari boost converter. Duty cycle (D) atau juga dapat diasumsikan sebagai (k) digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2. Boost Converter

Rangkaian *boost converter* pada gambar 2 diperoleh hasil dengan persamaan waktu (t) on yaitu *duty cycle* (k) dikalikan dengan waktu (T) pada saat sinyal pada nilai positif. Waktu (t) off yaitu selisih antara satu dan *duty cycle* (k) dibagi dengan waktu (T) pada saat sinyal pada nilai negatif. Sehingga dapat diasumsikan perubahan arus yang melewati inductor adalah konstan akan mendapatkan persamaan tegangan output (V_o) dengan nilainya sebanding tegangan input (V_{in}) dan berbanding terbalik dengan hasil selisih satu terhadap *duty cycle* (k).

Dari penentuan waktu (t) on dan off, diperolehlah besarnya inductor dengan batas antara CCM (*Continuous Conduction Mode*) dan DCM (*Discontinuous Conduction Mode*) pada persamaan $L_b = ((1-D) \times 2 \times D \times R) / 2f$. Dimana L_b adalah nilai inductor minimum, D besarnya *duty cycle*, F frekuensi *switching*, dan R nilai resistansi pada sisi keluaran *boost converter*. Penentuan nilai kapasitor dapat ditentukan pada persamaan $C_{min} = D V_o / V_r R f$, dimana C adalah nilai kapasitor minimum, D *duty cycle*, V_o besarnya ripple tegangan pada sisi tegangan keluaran *boost converter*, R nilai resistansi pada sisi keluaran *boost converter*, dan F, F frekuensi *switching*.

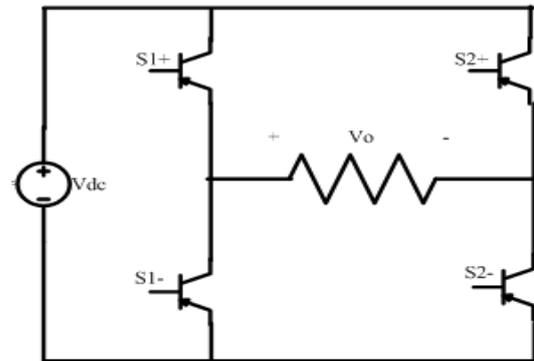
Tegangan output dari *Boost Converter* dapat lebih besar atau lebih kecil daripada tegangan input. Apabila $D > 0.5$, maka output akan lebih besar, sedangkan ketika $D < 0.5$, output akan lebih kecil.

C. Inverter Satu Fasa

Konverter dc-ac atau bisa disebut inverter adalah suatu alat elektronika yang berfungsi untuk menghasilkan keluaran ac sinusoidal dari masukan dc dimana magnitudo dan frekuensinya dapat diatur. Dilihat dari jenisnya masukannya, inverter dibagi menjadi dua macam yaitu VSI (*Voltage Source Inverter*) dimana masukannya adalah sumber tegangan dc dan CSI (*Current Source Inverter*) dimana masukannya adalah sumber arus dc. Namun pada

prakteknya yang sering digunakan adalah VSI sedangkan CSI penggunaannya terbatas pada kontrol motor ac dengan daya yang sangat besar.

Salah satu topologi yang sering digunakan adalah topologi *full bridge* dengan sumber dc yang digunakan sebagai sumber tegangannya. Dasarnya, untuk mengatur masukan tegangannya dengan cara mengatur pensaklaran pada diode dari rangkaian pada gambar 3. Pengaturan pensaklaran dengan membuat diode S1+ on dan S1- off, begitu halnya dengan S2+ dan S2-.



Gambar 3. Rangkaian Inverter Satu Fasa *full bridge*

Pada saat S1+ dan S2- on, maka akan membuat tegangan $V_o = V_d$ sedangkan pada saat S2+ dan S1- on maka akan membuat $V_o = -V_d$ seperti ilustrasi gambar 3 di atas. Sehingga nilai keluaran $V_{out-rms}$ dapat dicari dengan persamaan berikut ini.

$$V_o = \left(\frac{2}{T_o} \int_0^{T_o} V_d^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Penyaklaran dengan cara tersebut akan menghasilkan gelombang sinus dengan model kotak yang penuh akan harmonisa. Padahal yang diperlukan adalah gelombang sinus murni sehingga digunakanlah teknik *switching* PWM pada topologi VSI *full bridge*. PWM adalah salah satu teknik untuk mengatur penyaklaran transistor IGBT dalam inverter. Teknik ini pada dasarnya adalah membandingkan dua sinyal untuk mendapatkan pola penyaklaran transistor. Sinyal pertama adalah sinyal repetitif sebagai sinyal carier dan biasanya adalah sinyal segitiga (V_t). Sinyal kedua adalah sinyal yang akan dimodulasi untuk mendapatkan bentuk keluaran yang diinginkan dan biasa disebut sinyal referensi V_r . Apabila sinyal referensi V_r lebih besar (kecil) dari sinyal carier V_t maka lengan atas (T_i) akan menerima sinyal on dan off.

D. Filament Kontrol

Kontrol Filament ini berfungsi untuk suplai arus pemanasan filamen, sebagai regulasi dari arus yang mengalir, menghasilkan emisi elektron untuk menentukan dosis dari sinar-x dan sebagai exposure supaya sinar-x dapat memberikan intensitas pemanasan yang diinginkan. Kontrol filament akan membangkitkan arus tabung sebagai akibat dari pelepasan elektron dari filamen ke target. Karena diketahui bahwa pesawat sinar-x tidak dibebani sehingga diperlukan sistem kontrol filament yang seolah-olah ada arus yang mengalir.

E. Transformator Tegangan Tinggi

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat mengubah dan menyalurkan energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian ke rangkaian listrik yang

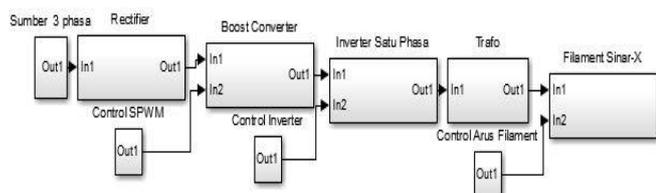
lain melalu suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan transformator dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan pada dasarnya transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dibelitkan pada inti ferromagnetik. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. Transformator yang menjadi fokus bahasan disini adalah transformator daya. Konstruksi transformator daya ada dua tipe yaitu tipe inti (core type) dan tipe cangkang (shell type). Perhitungan transformator sebagai penaik tegangan perlu memperhatikan besarnya daya trafo beserta efisiensinya dan direpresentasikan pada persamaan berikut ini.

$$I_{out} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \tag{5}$$

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} \tag{6}$$

$$\frac{N_s}{N_p} = \frac{P_{out}}{V_{out}} \frac{V_{in}}{P_{in}} \tag{7}$$

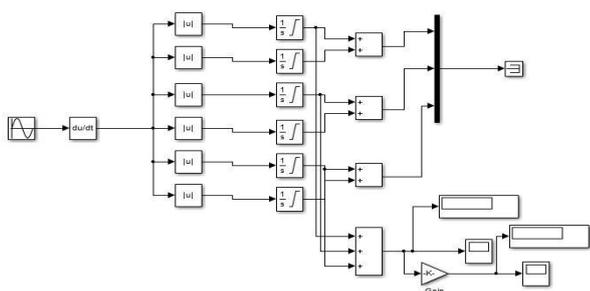
III. PEMODELAN KOMPONEN PEMBANGKIT TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR-X



Gambar 5. Konfigurasi Sistem Sumber Tegangan Tinggi pada Pembangkit Sinar-X untuk Peralatan Diagnostik Medis

Gambar 5 menunjukkan konfigurasi pemodelan secara keseluruhan dimana input sumber 380 volt/50 Hz diserahkan dengan Rectifier 3 fasa. Keluaran rectifier 3 fasa tegangannya akan dinaikkan dengan menggunakan *boost converter* sampai dengan tegangan yang dibutuhkan pada sistem kerja inverter satu fasa. Pada rangkaian inverter satu fasa nilainya akan diatur yang berupa tegangan dan frekuensi. Dimana pada rangkain inverter satu fasa akan berpengaruh terhadap control yang dibuat dengan berdasarkan besarnya lilitan, arus filament, dan frekuensi sampling pada inverter. Sehingga secara lengkap penjelasan untuk masing-masing bagian dijelaskan berikut ini.

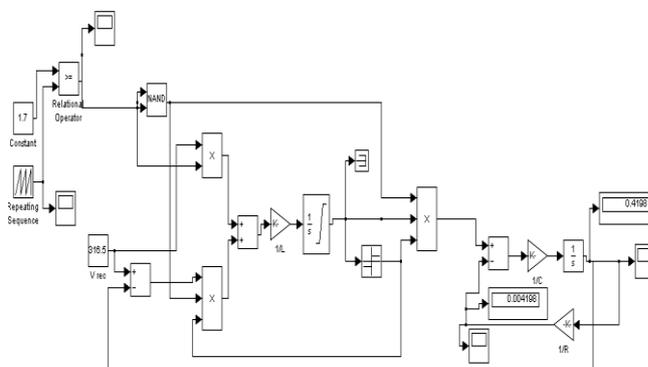
A. Pemodelan Rectifier 3 Fasa



Gambar 6. Pemodelan Rangkaian Rectifier 3 Fasa

Pengaturan kontrol pada pemodelan rectifier Simulink dengan memberikan nilai pada Upper saturation limit sebagai fungsi integral yang telah diturunkan pada persamaan (1)-(3). Pemberian nilai resistansi sebagai bebannya yaitu bernilai 100 ohm. Pengisian kontrol diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan tegangan keluar sebesar 316,5 VDC.

B. Pemodelan Boost Converter



Gambar 7. Pemodelan Boost Converter

Pengaruh saklar transistor dan dioda sangat berpengaruh pada tegangan output ketika on atau off. Jika pada saat transistor on diilustrasikan dengan simbol F dan transistor off diilustrasikan dengan F' maka dapat diambil turunan persamaan rumusnya sebagai berikut [18].

$$V_L(t) = V_i(t) \cdot F + (V_i(t) - V_o(t)) \cdot F' \cdot i_L \tag{8}$$

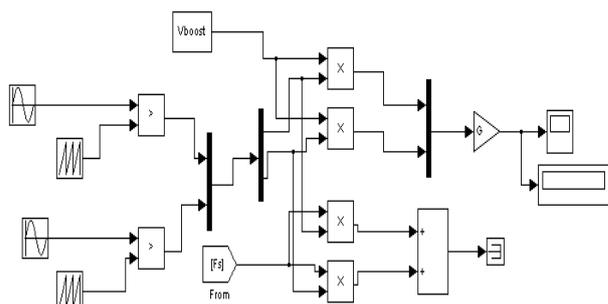
$$i_C(t) = -i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L = C \frac{dV_o}{dt} \tag{9}$$

$$V_o = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L) dt \tag{10}$$

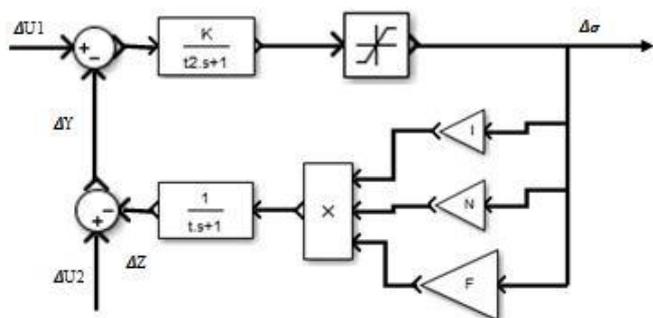
Persamaan 3.7-3.9 digunakan sebagai parameter untuk menentukan pemodelan Matlab sekaligus mempermudah mendapatkan signal tegangan dan arus yang memiliki sinyal baik dan stabil. Selain itu persamaan tersebut juga berfungsi untuk menentukan nilai dari *duty cycle* yang nantinya akan digunakan.

C. Pemodelan Inverter Satu Fasa dan Kontrol Inverter

Tegangan dari *boost converter* yang bernilai 550 VDC selanjutnya diubah menjadi tegangan AC yang memiliki frekuensi tinggi maksimal 15 kHz. Pengubahan tegangan searah menjadi bolak-balik menggunakan inverter satu fasa. Selanjutnya setelah didapatkan frekuensi tinggi maka tegangan dinaikkan sebesar kebutuhan untuk mendapatkan nilai tegangan yang diinginkan sebagai tegangan kerja sinar-x sebelum masuk ke transformer. Pengaturan frekuensi dan tegangan direpresentasikan pada pemodelan frekuensi switching dan pengaturan besarnya tegangan kerja pada keluaran inverter satu fasa berikut ini.



Gambar 8. Pemodelan Sistem Inverter Satu Fasa



Gambar 9. Sistem Kontrol Inverter Satu Fasa

Gambar 8 dan 9 menunjukkan pemodelan rangkaian inverter dan system kontrolnya. Output frekuensi ditentukan dari frekuensi sampling pada gambar 8. Sedangkan nilai tegangan output inverter ditentukan berdasarkan pengaruh banyaknya lilitan trafo, arus filament, dan frekuensi pada inverter. Sehingga diturunkanlah persamaan (11)-(15) sebagai berikut ini.

$$\Delta\sigma' = \frac{\Delta X K - \Delta\sigma}{t2} \tag{11}$$

$$\Delta Z' = \frac{\Delta\sigma * I * N * F - \Delta Z}{t} \tag{12}$$

$$\Delta Y' = \frac{-\Delta Y - \Delta\sigma * I * N * F - \Delta U2}{t} \tag{13}$$

$$\Delta X' = \frac{-\Delta X + \Delta\sigma * I * N * F + \Delta U1 - \Delta U2}{t} \tag{14}$$

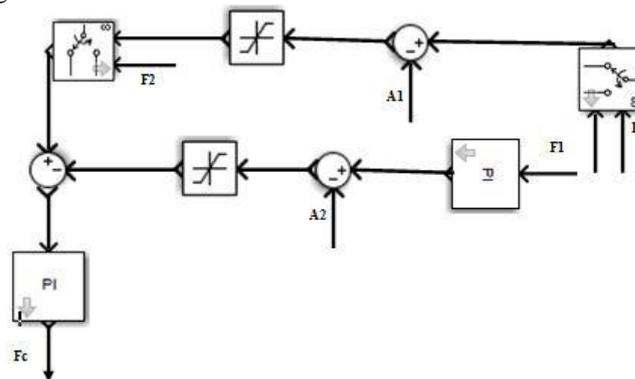
$$\begin{bmatrix} \Delta\sigma' \\ \Delta Z' \\ \Delta Y' \\ \Delta X' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/t2 & 0 & 0 & K/t2 \\ i*n*f/t & -1/t & 0 & 0 \\ -i*n*f/t & 0 & -1/t & 0 \\ i*n*f/t & 0 & 0 & -1/t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\sigma \\ \Delta Z \\ \Delta Y \\ \Delta X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1/t \\ 1/t & -1/t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U1 \\ \Delta U2 \end{bmatrix} \tag{15}$$

Dari parameter diatas dapat ditentukan nilai frekuensi, arus filament, dan banyaknya lilitan pada trafo. Sedangkan nilai K, t2, dan t diisi dengan nilai yang random sebagai penentuan untuk mendapatkan nilai yang stabil. K adalah konstanta sedangkan t2 dan t adalah domain waktu pada transfer function. ΔU1 dan ΔU2 adalah parameter kontrol untuk membandingkan nilai yang keluar pada Δσ agar mendapatkan nilai yang diinginkan. Untuk nilai ΔU1 dan ΔU2 menggunakan parameter bentuk *sinwave* sebagai pembanding dengan pengaturan nilai yang telah ditentukan. Setelah hasil yang diinginkan diperoleh pada output Δσ, selanjutnya keluaran pada Δσ akan mengatur besarnya tegangan output pada *rectifier* satu fasa. Setelah kontrol telah ditentukan nilainya maka dapat diperoleh hasil keluaran inverter satu fasa yang nilainya sebagai inputan transformator tegangan tinggi.

D. Pemodelan Filament Kontrol

Pemodelan filament kontrol menggunakan dua buah rangkaian penyearah dengan mengacu pada rangkaian simulink inverter dengan input kontrolnya berupa arus DC sebesar 10 AVD. Selanjutnya nilai tersebut dikontrol dengan sistem kontrol yang menggunakan PI (*Proportional Integrator*) untuk mendapatkan arus filament sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA. Filament ini digunakan untuk mengatur jumlah pemanasan pada pesawat sinar-x yaitu penghasil intensitas elektron. Besarnya arus yang dikontrol berdasarkan intensitas tubuh manusia yang memiliki

perbedaan ukuran. Sistem kontrol filament ditunjukkan pada gambar 10 berikut ini.

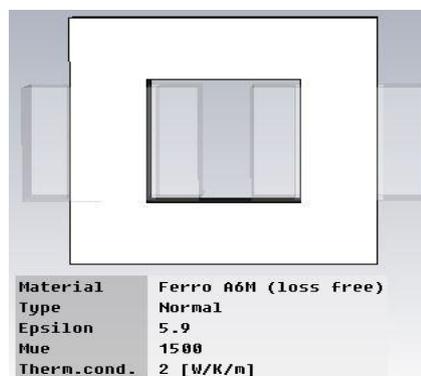


Gambar 10. Sistem Kontrol Arus Filament

Gambar 10 menunjukkan sistem control dengan menggunakan pengisian PI secara random untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Nilai Kp yang digunakan sebesar 0,1, Ki bernilai 1, *upper limit* atau batas atasnya bernilai 0,000001, dan *Saturation time* menggunakan 0,00005. Input referensi A1 dan A2 menggunakan gelombang sinus dengan besar amplitude 12 dan frekuensi samplinya 1. Sedangkan nilai F1 dan F2 didasarkan dari keluaran sistem inverter penghasil arus apakah sudah sesuai dengan kebutuhan dari filament. Fc digunakan untuk mengontrol hasil PI yang telah diperoleh pada rangkaian inverter arus filament. Pada pengujian ini akan dihasilkan arus filament sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA.

E. Pemodelan Trafo Satu Fasa

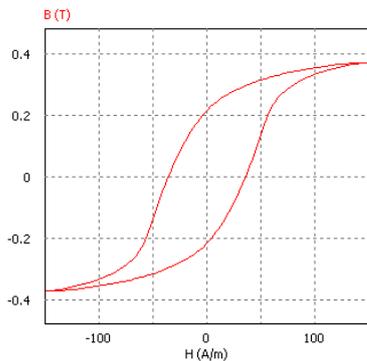
Pemodelan selanjutnya adalah pemodelan trafo dengan mempertimbangkan keluaran inverter yang berupa tegangan tinggi dan frekuensi tinggi. Input trafo menggunakan frekuensi maksimal 15 kHz dan tegangan output sebesar 50 kV-150 kV, sehingga dipilihlah penggunaan bahan material inti trafo yang terbuat dari Ferrite Manganese-zinc, nickel-zinc dengan B (kuat medan) saturasinya sebesar 0,4 Tesla. Permibialitas bahan sebesar 1500. Pemodelan trafo menggunakan dimensi 5x5x5 m³ dan penggunaan lilitan sisi primer sekunder sebesar 10:50. Pemodelan ini bertujuan untuk mendapatkan nilai rugi-rugi histerisis dan bahan sehingga diperoleh besarnya rugi-rugi bahan. Pemodelan trafo dilakukan pada software CST pada gambar 11 berikut ini.



Gambar 12. Pemodelan Trafo

Dari pemodelan trafo gambar 12, selanjutnya dibuatlah analisa kurva histerisis dengan menggunakan software power simulator. Kurva histerisis ini digunakan untuk

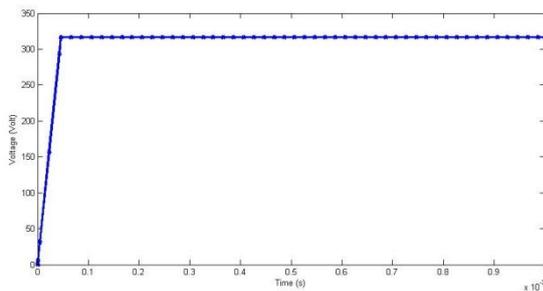
menganalisa besarnya rugi-rugi inti. Kurva histerisis dari spesifikasi bahan yang telah dijelaskan pada pembahasan pemodelan trafo direpresentasikan pada gambar 13 berikut ini. Kurva histerisis yang akan dianalisa menggunakan frekuensi maksimum sebesar 15 kHz.



Gambar 12. Kurva Histerisi frekuensi 15 kHz

IV. HASIL SIMULASI DAN ANALISA DATA

Analisa penelitian Tugas Akhir ini akan menggunakan beban sebesar 200 mA. Dimana hasil pemodelan rectifier 3 fasa yang bersumber tegangan 380 VAC/50 Hz disearahkan dan menghasilkan tegangan output sebesar 316,5 VDC dengan penggunaan kontrol integrator sebesar 1,055 dengan beban resistansi sebesar 100 ohm. Gambar karakteristik tegangan keluaran rectifier 3 fasa ditunjukkan pada gambar 13 berikut ini.



Gambar 13. Tegangan Keluaran Rectifier 3 fasa

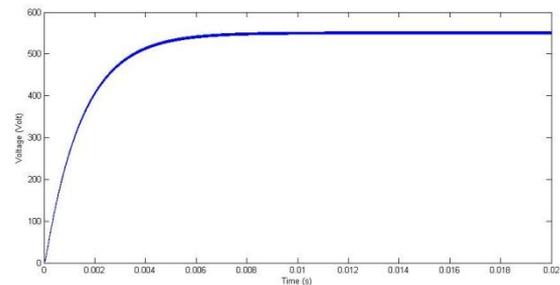
Tegangan keluaran rectifier 3 fasa yang bernilai 316,5 VDC akan digunakan sebagai input dari boost converter pada langkah penaikan tegangan selanjutnya. Tegangan akan dinaikkan sebesar 550 VDC dengan toleransi ±3 VDC. Pemodelan dan pengisian komponen kapasitor, inductor resistansi, dan waktu steady state yang dibutuhkan ditunjukkan pada table 1 berikut ini.

Tabel 1. Waktu Steady State Boost Converter pada MATLAB

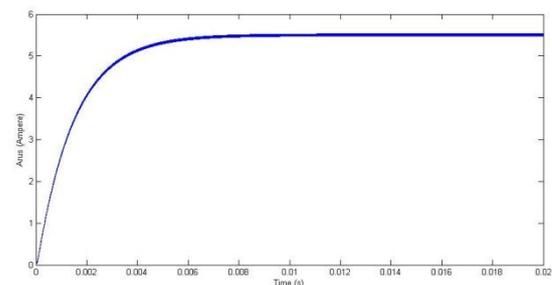
Induktor (1/L)	Kapasitor (1/C)	resistansi (1/R)	steady state (s)	Voltage (Volt)
16,028	2380952,38	0,01	0,01	460,7
17,028	2380952,38	0,01	0,01	493,5
18,028	2380952,38	0,01	0,008	406,9
20,028	2380952,38	0,01	0,008	553,2
21,028	2380952,38	0,01	0,008	553,2

Nilai steady state dari keluaran tegangan boost converter ditentukan berdasarkan nilai dari inductor (1/L) pada Simulink sebesar 20,028 dengan waktu 0,008 s. plot dari besarnya tegangan dan arus keluaran boost converter ditunjukkan pada gambar 14 dan 15 berikut ini dengan nilai

untuk masing-masing sebesar 553,2 VDC dan 5,532 ADC dengan besar resistansi (1/R) pada simulink menggunakan 100 ohm.



Gambar 14. Tegangan Keluaran Boost Converter



Gambar 15. Arus Keluaran Boost Converter

Setelah diperoleh tegangan sebesar 550 VDC selanjutnya besarnya diatur sedemikian rupa untuk mendapatkan nilai tegangan kerja pada pesawat sinar-x sebesar 50 kV-150 kV dengan frekuensi maksimal 15 kHz. Sebelum hasil plot diperoleh akan disajikan perbandingan antara pesawat sinar-x model lama dengan pesawat sinar-x yang menggunakan frekuensi tinggi pada tabel 2 dan 3 pada arus 200 mA.

Tabel 2. Analisa Jumlah Arus, Tegangan, dan Banyaknya Lilitan Pada Peralatan Sinar-X Diagnostik lama 200 mA

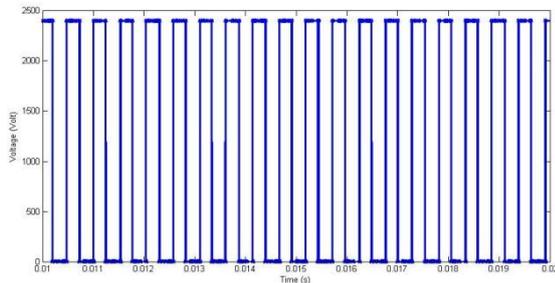
Tegangan 3 Phasa (Volt)	Tegangan V2 (Volt)	Arus (I2) (A)	KVA	Arus (I1) (A)	Np = 10	Ns
380	80000	0,2	16000	42,11	10	2105,26
380	100000	0,2	20000	52,63	10	2631,58
380	120000	0,2	24000	63,16	10	3157,89
380	140000	0,2	28000	73,68	10	3684,21
380	150000	0,2	30000	78,95	10	3947,37

Tabel 3. Hasil Study Analisa Pemodelan Inverter Tegangan dan Frekuensi Tinggi

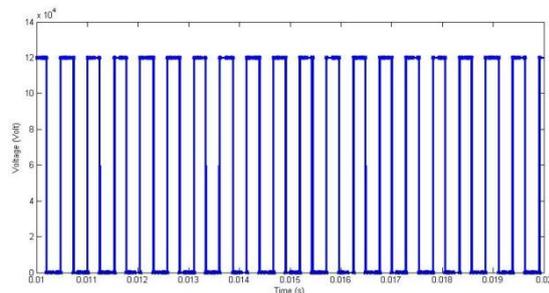
Frekuensi (Hz)	Arus (I2) (A)	Lilitan (Ns)	Tegangan (V1) Trafo	Tegangan (V2) (Volt) perhitungan	tegangan (V2) (Volt) Hasil Simulasi
8000	0,2	50	1601,6	80000	80080
10000	0,2	50	2002,55	100000	100127,5
12000	0,2	50	2400,2	120000	120010
14000	0,2	50	2800,6	140000	140030
15000	0,2	50	2993,1	150000	149655

Pesawat sinar-x model lama menggunakan jumlah lilitan pada transformator dalam menaikkan tegangan

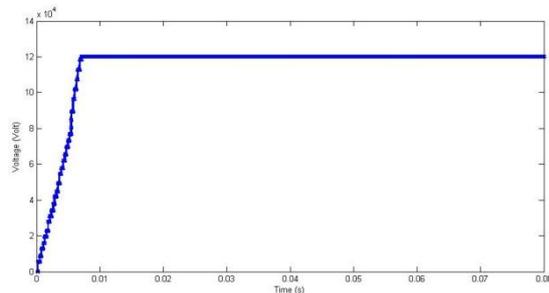
sehingga semakin besar tegangan maka jumlah lilitan pada transformator akan semakin banyak. Namun dengan pemodelan yang dibuat jumlah lilitan pada sisi primer dan sekunder 10:50 untuk tegangan yang sama pada pesawat sinar-x. Plot tegangan keluaran inverter satu fasa, trafo tegangan tinggi, penyearah tegangan tinggi, dan arus filament pada gambar 16,17,18, dan 19 berikut ini.



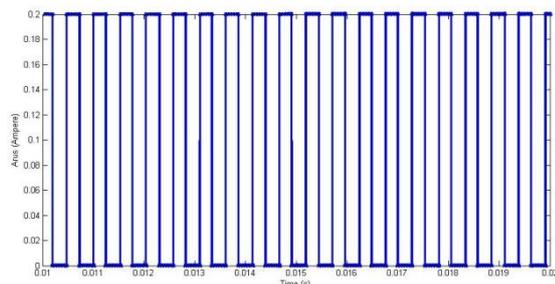
Gambar 16. Tegangan Hasil Inverter Satu fasa Frekuensi 12000 Hz



Gambar 17. Tegangan Hasil Keluaran Transformator



Gambar 18. Hasil Output Rectifier High Voltage



Gambar 19. Hasil Simulasi Arus 200 mA frekuensi 12000 Hz

Besarnya rugi inti diperoleh pada perhitungan berikut ini,
 $[\Delta B \cdot \Delta H] = 0,4 \text{ T} \times 37,5 = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$
 Pemodelan memiliki volume = 125 m^3
 Maka : $P_{\text{mag}} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^3} \times 125 \text{ m}^3 = 1875 \text{ Watt}$
 $P_{\text{fer}} = I_{\text{core}} \times R_{\text{core}}$
 $P_{\text{fer}} = \left(\frac{37,5 \times 2}{50}\right)^2 \times 1 = 1,5 \text{ Watt}$
 Jadi Rugi Inti : $P_{\text{core}} = P_{\text{mag}} + P_{\text{fer}}$
 $P_{\text{core}} = 1875 + 1,5 = 1876,5 \text{ Watt}$

V. KESIMULAN

Dari analisis hasil simulasi dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan nilai tegangan sebesar 316,5 VDC digunakan R 100 ohm dan control USL 1,055. Penggunaan induktor 66,5 mH, kapasitor 0,42 uF, dan *duty cycle* 0,42. Hasil *output* inverter satu Fasa disesuaikan dengan kebutuhan tegangan kerja yang digunakan pada pesawat sinar-x yaitu 2400,2 VDC/12kHz, 2501,4VDC/5kHz, 2800,6VDC/3,5kHz. Nilai tegangan kerja sebesar 120010 VAC, 125070 VAC, dan 140030 VAC. Untuk meminimalkan rugi-rugi inti transformator akibat frekuensi dan tegangan tinggi, digunakanlah transformator berbahan ferromagnetic yaitu *ferrite, manganese-zinc, nickel-zinc* dengan B (kuat medan) saturasi sebesar 0.4 T serta permialitas bahan sebesar 1500.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis yang bernama Addien Wahyu Wiranata mengucapkan syukur kepada Allah SWT atas nikmat dan karunia yang telah dilimpahkan sehingga penelitian ini dapat terselesaikan. Ucapan terima kasih atas do'a dan nasihat dari ayah dan ibu yang menyertai perjalanan *study* penulis selama di Jurusan Teknik Elektro ITS. Ucapan terima kasih juga untuk Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak Feby Agung Pamuji atas bimbingan dan arahnya selama penulis mengerjakan penelitian Tugas Akhir ini. Rasa terima kasih juga saya haturkan keteman-teman satu angkatan 2011 yang telah berjuang bersama untuk menempuh Tugas Akhir ini.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Siemens X Ray Generator., “ Kontrol Inverter Satu Fasa”, Jerman, 1998.
- [2] Drajat, Adi.,” Cara Kerja Pesawat Sinar-X”, BATAN, Jakarta, April, 2013.
- [3] Tiwik Ari I, Veronika., “ Boost Rectifier Satu Fasa”, Universitas Katolik Soegijapranata, Semarang, 2003.
- [4] Suyatno, Ferry., “ Rekayasa Sistem Pengatur Parameter Pesawat Sinar-X Diagnostik Berbasis Mikrokontroler Keluarga MCS 51:”, BATAN, Tangerang, November, 2007.
- [5] Ashari, Mohammad, dan Effendi, Moh. Zaenal., “ Sistem Penyearah Satu Fasa Dengan Dua Konverter Flyback Paralel Untuk Meningkatkan Kualitas Arus Input”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Juni, 2007.
- [6] Asnil., “ AC to DC Converter (Rectifier)”, Elektro FT-UNP, April, 2010.
- [7] Stefan, Partyka., “ DC Link Voltage Control”, Aalborg University, Denmark, April, 2008.
- [8] Eko H. W, Septian., “ Desain Dan Simulasi Pengontrolan Daya Aktif dan Reaktif Inverter 3 Fasa Menggunakan PQ Controller Pada Sistem Pembangkit Tersebar Multiple Proton Exchanging Membrane Fuel Cell (PEMFC)”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Agustus, 2012.
- [9] Shangzuan, Nie Ling., “ *The Application and Practice of frequency Converter with One Tranducer and multi Electric Pumps*”. Chongqing University of Science and Technology, januari 2011.
- [10] M. Khafalah dkk., “ *A Simplified SVM Control Scheme for Reduced Switching Losses in Converter-Fed Drives*”. IEEE, 2004.
- [11] No name., “ *Designing with Magnetic Cores at High Temperatures*”, Pitsburg, 2014.
- [12] Mardiansya, Riki., Potensi Medan Elektromagnetic sebagai Sumber Pembangkit Listrik”. Universitas Indonesia, Maret, 2012.
- [13] *Fundamental Of Power Electronic handbook*.
- [14] H. Mohamed, Khalid dkk., “*Boost Converter Design with Stable Output Voltage for Wave Energy Conversion System*”, ITEE Journal, Februari, 2012.
- [15] Fatah, Abdul., “*Design Boost Converter*”, National Institute of Technology Rourkela, Juni 2013.
- [16] Robandi, Imam., “*Modern Power System Control*”, Yogyakarta, 2009.
- [17] Gunawan, Erik., “*Analisa Rangkaian Inverter Satu Fasa*”, Jakarta, 2007.
- [18] Batarh, Cristophe. dkk, “*Simulation of Power Converter*” INTECH, 2012.

**BISMILLAH...
SIDANG TUGAS AKHIR**

18 Juni 2015

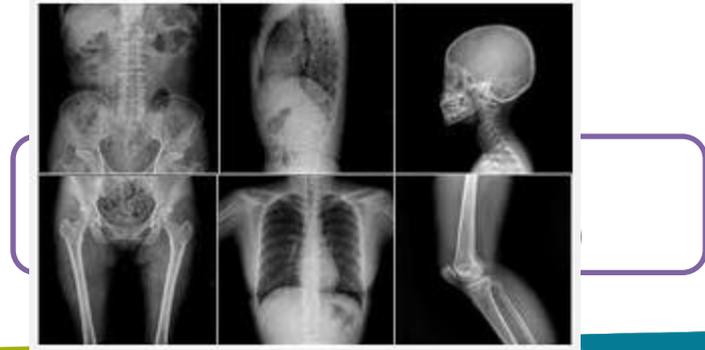
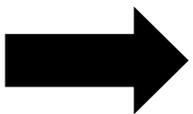


KESEHATAN
(sumber : google.com)

- SINGLE PHASA**
- THREE PHASA**

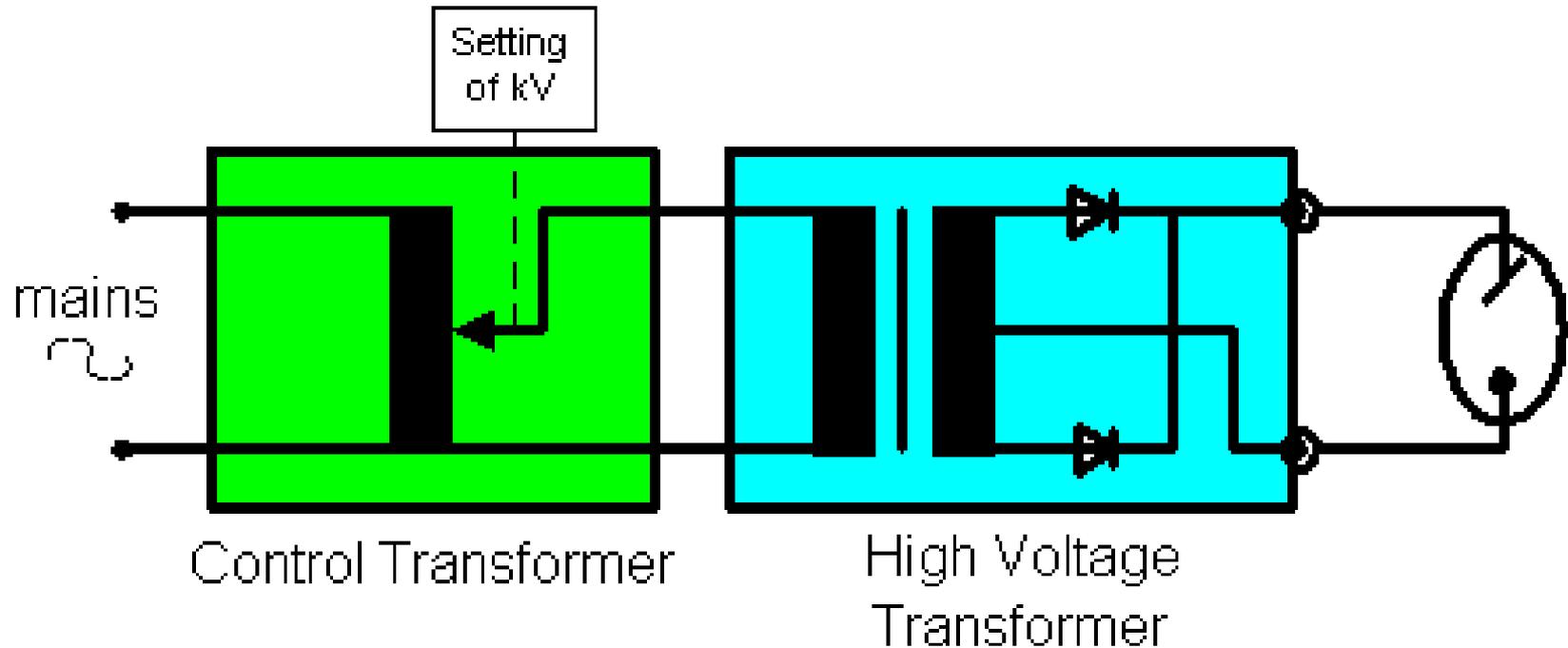
HIGH FREQUENCY

INDUSTRI
RONTGEN
(sumber : google.com)



OLD GENERATOR

Model Blok Generator Pembangkit X Ray tipe lama

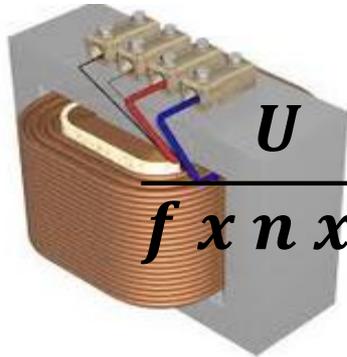


...perhitungan generator sederhana...

- ❖ Pengaturan HV dengan cara mengatur jumlah lilitan trafo power.

f : frekuensi (Hz) (Di perbesar)

- ❖ Perhitung:

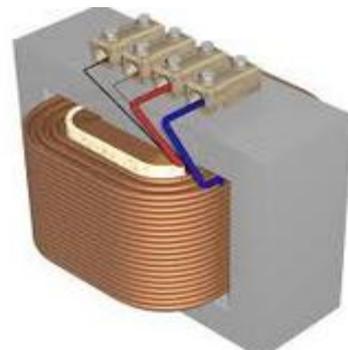


$$\frac{U}{f \times n \times A} = \text{Constant}$$

- u : tegangan tinggi (kV)
- **Ukuran trafo**
- f : frekuensi (Hz)

- Harga jumlah lilitan trafo
- A : arus tabung (mA)

(Sumber : Siemens Modul)



BESAR

- PLN : 220/380 f = 50 Hz
- Tegangan Kerja Sinar-X 50 kV – 150 kV

JUDUL PENELITIAN TUGAS AKHIR SAYA

DESAIN DAN SIMULASI KOMPONEN TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR- X UNTUK PERALATAN DIAGNOSTIK MEDIS

Nama : Addien Wahyu Wiranata
NRP : 2211 100 071



Dosen Pembimbing :

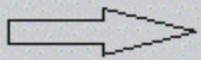
1. Dr. Dimas Anton Asfani ST. MT.
2. Feby Agung Pamuji ST. MT.



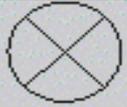
ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



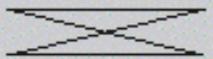
OUTLINE



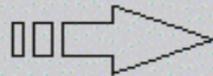
TUJUAN



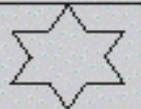
BATASAN
MASALAH



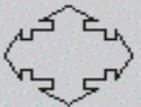
TINJAUAN
PUSTAKA



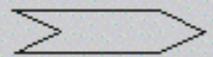
METODELOGI



HASIL
ANALISIS



KESIMPULAN



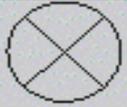
DAFTAR
PUSTAKA

- TUJUAN
- BATASAN MASALAH
- TINJAUAN PUSTAKA DAN
PENELITIAN SEBELUMNYA
- METODELOGI
- HASIL SIMULASI DAN ANALISIS
- KESIMPULAN
- DAFTAR PUSTAKA

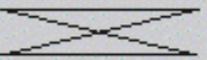


TUJUAN

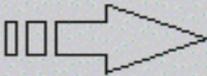
TUJUAN



BATASAN
MASALAH



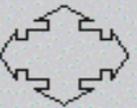
TINJAUAN
PUSTAKA



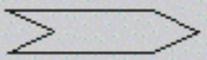
METODELOGI



HASIL
ANALISIS



KESIMPULAN

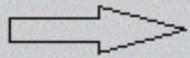


DAFTAR
PUSTAKA

- Mengetahui proses pengaturan frekuensi pada inverter satu fasa untuk memperoleh tegangan kerja generator pesawat sinar-x diagnostik yang dibutuhkan.
- Mengetahui karakteristik tegangan, arus, dan frekuensi dari pembangkitan tegangan tinggi sinar-x.
- Mengetahui rugi histerisis dari pengaruh *high frequency transformer*.

BATASAN MASALAH

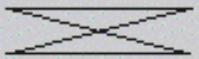
- Sistem distribusi tiga phase 380V/50 Hz, sinusoidal murni dengan asumsi mengabaikan adanya ripple.
- Tidak membahas harmonisa pada keluaran inverter.
- Tidak membahas besarnya material



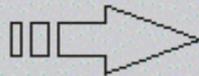
TUJUAN



BATASAN
MASALAH



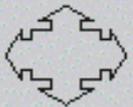
TINJAUAN
PUSTAKA



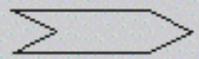
METODELOGI



HASIL
ANALISIS



KESIMPULAN



DAFTAR
PUSTAKA

TINJAUAN PUSTAKA DAN PENELITIAN SEBELUMNYA

TUJUAN
BATASAN MASALAH
TINJAUAN PUSTAKA
METODELOGI
HASIL ANALISIS
KESIMPULAN
DAFTAR PUSTAKA

kerja dan sebelumnya

Modul, 2013

gunaan Sinar-X prinsip

Ferry, 2007

sa Sistem r Sinar-X

Rectifier dan Boost Converter

Tiwik dkk, 2003

- Boost Rectifier Satu Fasa

M. Ashari dkk, 2007

- Sistem Penyearah Satu Fasa

Inverter Satu Fasa

INTECH, 2012

- Konsep Power Konverter

Book

Fundamental Of Power Electronic handbook.

SISTEM KONTROL

Imam Robandi, 2009

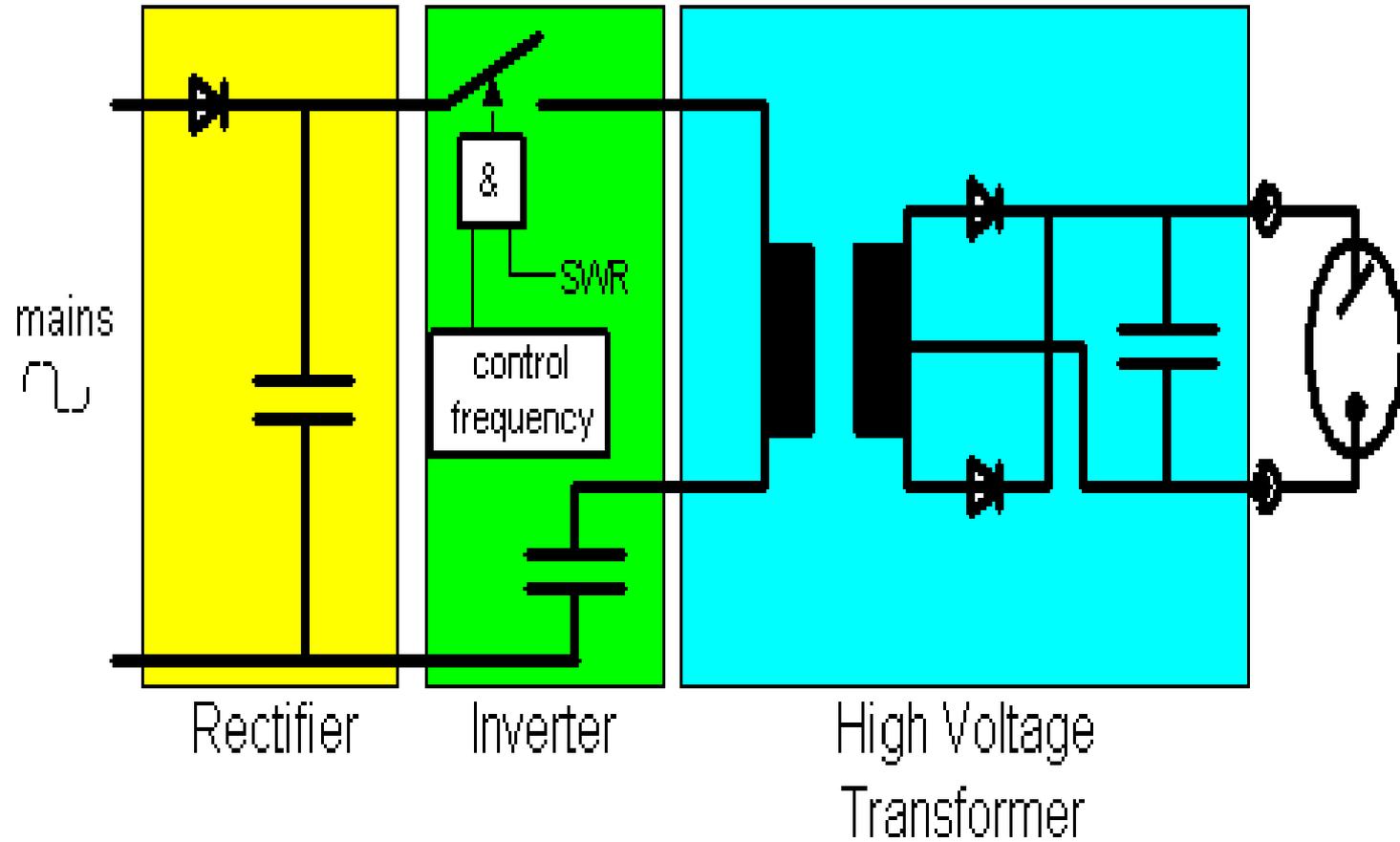
- Prinsip Kerja Dari Sistem Kontrol

MEDAN TRANSFORMATOR

Book

Electric Machinery Fundamentals

BLOK SEDERHANA MODERN SINAR-X



Modern Sinar-X

- Tegangan dari power transformer disearahkan.
- Inverter mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak balik dengan frekuensi tinggi (Maksimal 15 kHz)
- HTT (High Tension Trafo) melipatgandakan tegangan frekuensi tinggi dari inverter

PEMODELAN RANGKAIAN

TUJUAN



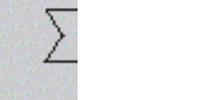
BATAS MAS



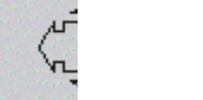
TINDUK PUS



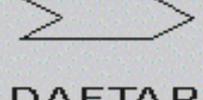
MET



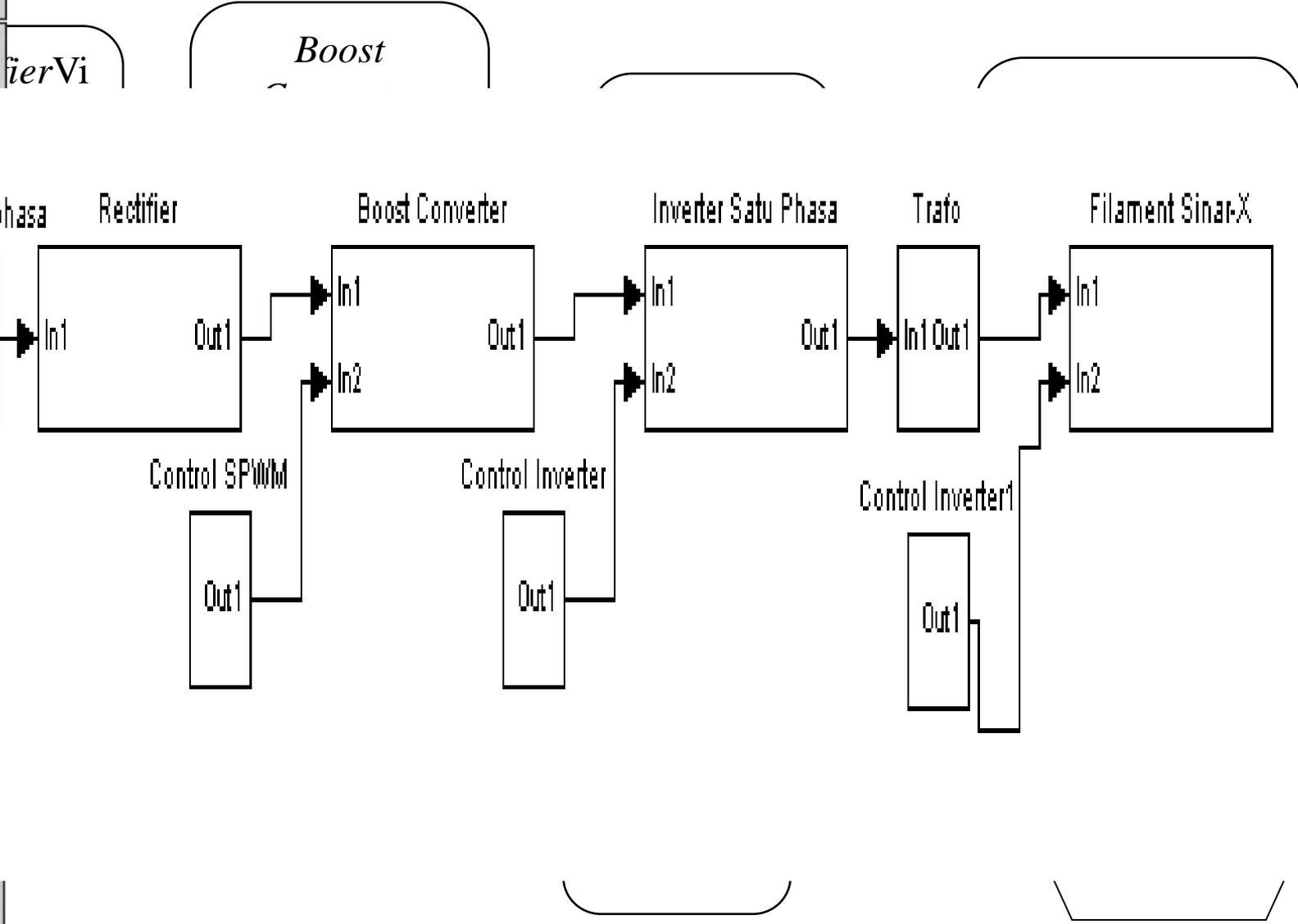
HAANA



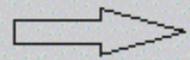
KESI



DAFTAR PUSTAKA



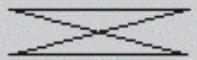
Desain Komponen



TUJUAN



BATASAN
MASALAH



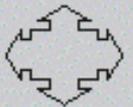
TINJAUAN
PUSTAKA



METODELOGI

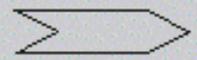


HASIL
ANALISIS



KESIMPULAN

- *Rectifier 3 Phasa*
- *Boost Converter*
- *Inverter satu phasa*
- **Sistem Kontrol Inverter**
- **Kontrol Filament**
- **Trafo dan *rectifier high voltage***



DAFTAR
PUSTAKA

Rectifier
3 phasa

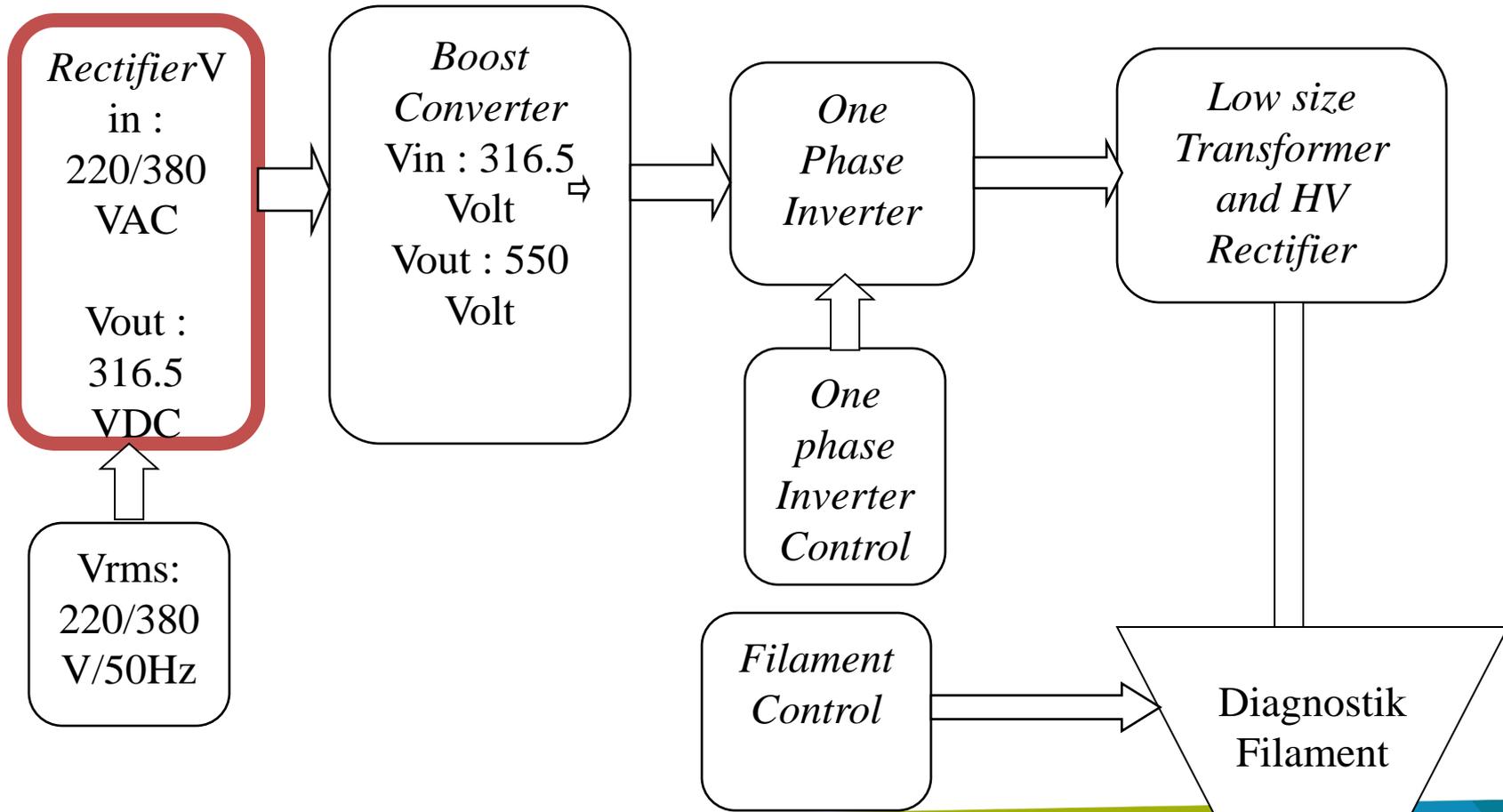
Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

PENDESAINAN 1



**Rectifier
3 phasa**

**Boost
Converter**

**Inverter
dan
Kontrol**

**Filamenet
Kontrol**

**Trafo
dan
Rectifier**

Rectifier 3 Phasa

Diturunkan persamaan dari Rangkaian Tersebut [18]:

$$\frac{di_r}{dt} = \frac{1}{3L_i + 2L_o} \left(\frac{L_i + L_o}{L_i} uts - \frac{2L_i + L_o}{L_i} utr - v_o \right)$$

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{3L_i + 2L_o} \left(-\frac{2L_i + L_o}{L_i} uts + \frac{L_i + L_o}{L_i} utr - v_o \right)$$

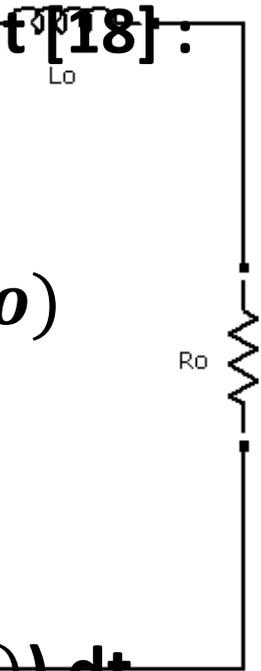
$$\frac{di_t}{dt} = \frac{1}{3L_i + 2L_o} (uts + utr + 2v_o)$$

Persamaan Integral :

$$i_r = \int \left(\frac{1}{3L_i + 2L_o} \left(\frac{L_i + L_o}{L_i} uts - \frac{2L_i + L_o}{L_i} utr - v_o \right) \right) dt$$

$$i_s = \int \left(\frac{1}{3L_i + 2L_o} \left(-\frac{2L_i + L_o}{L_i} uts + \frac{L_i + L_o}{L_i} utr - v_o \right) \right) dt$$

$$i_t = \int \left(\frac{1}{3L_i + 2L_o} (uts + utr + 2v_o) \right) dt$$

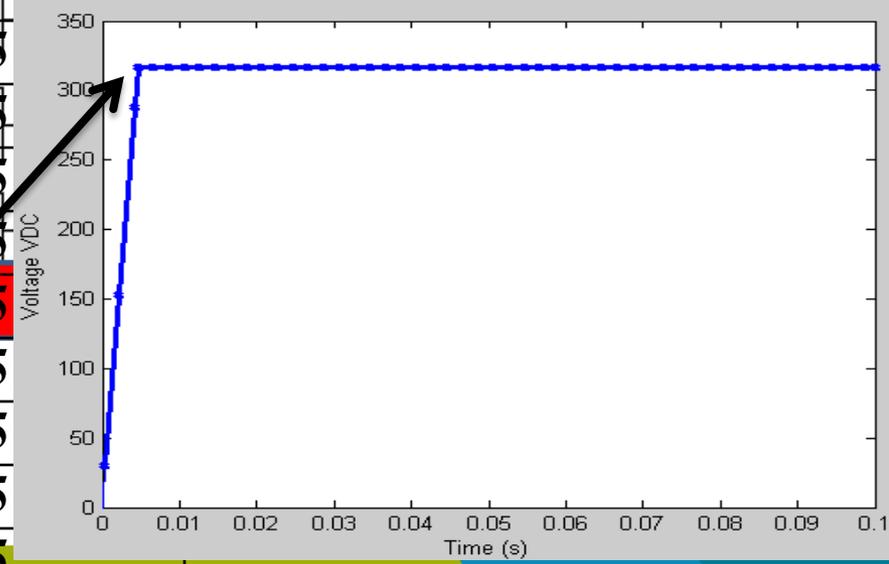


Rectifier 3 phasa	Boost Converter	Inverter dan Kontrol	Filamenet Kontrol	Trafo dan Rectifier
-------------------	-----------------	----------------------	-------------------	---------------------

Rectifier 3 Phasa

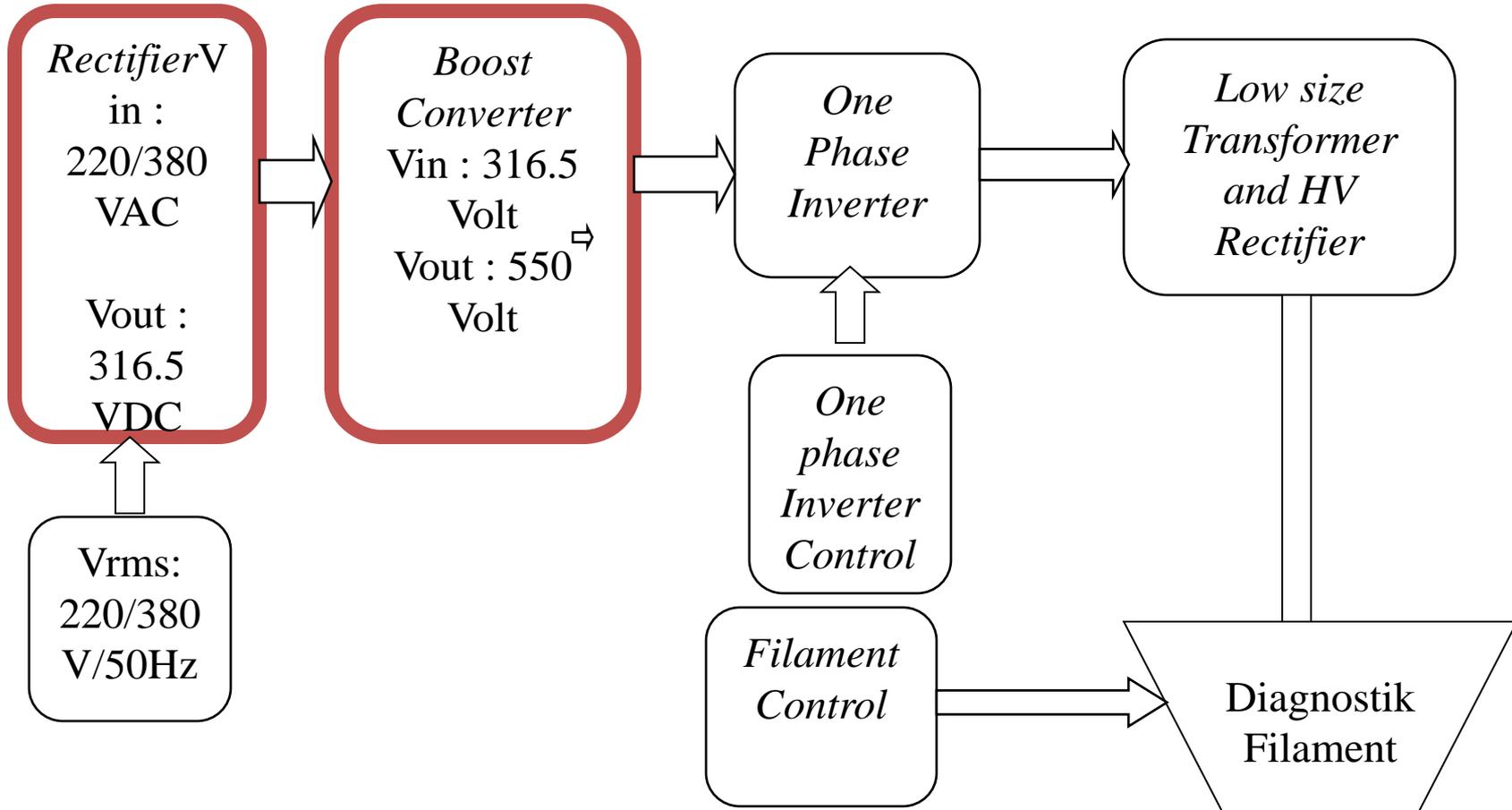
USL : Sistem Kontrol batas Integrator untuk mendapatkan nilai yang diinginkan dengan nilai random dengan 10 kali pengujian

Upper Saturation Limit	I_{rst} (A)	Resistansi (Ohm)	Tegangan Output (VDC)
1	3,045	100	304,5
1,015	3,075	100	307,5
1,025	3,105	100	310,5
1,035	3,135	100	313,5
1,045	3,165	100	316,5
1,065	3,195	100	319,5
1,075	3,225	100	322,5
1,085	3,255	100	325,5
1,095	3,285	100	328,5



Rectifier 3 phasa	Boost Converter	Inverter dan Kontrol	Filamenet Kontrol	Trafo dan Rectifier
-------------------	-----------------	----------------------	-------------------	---------------------

PENDESAINAN 2



Rectifier
3 phasa

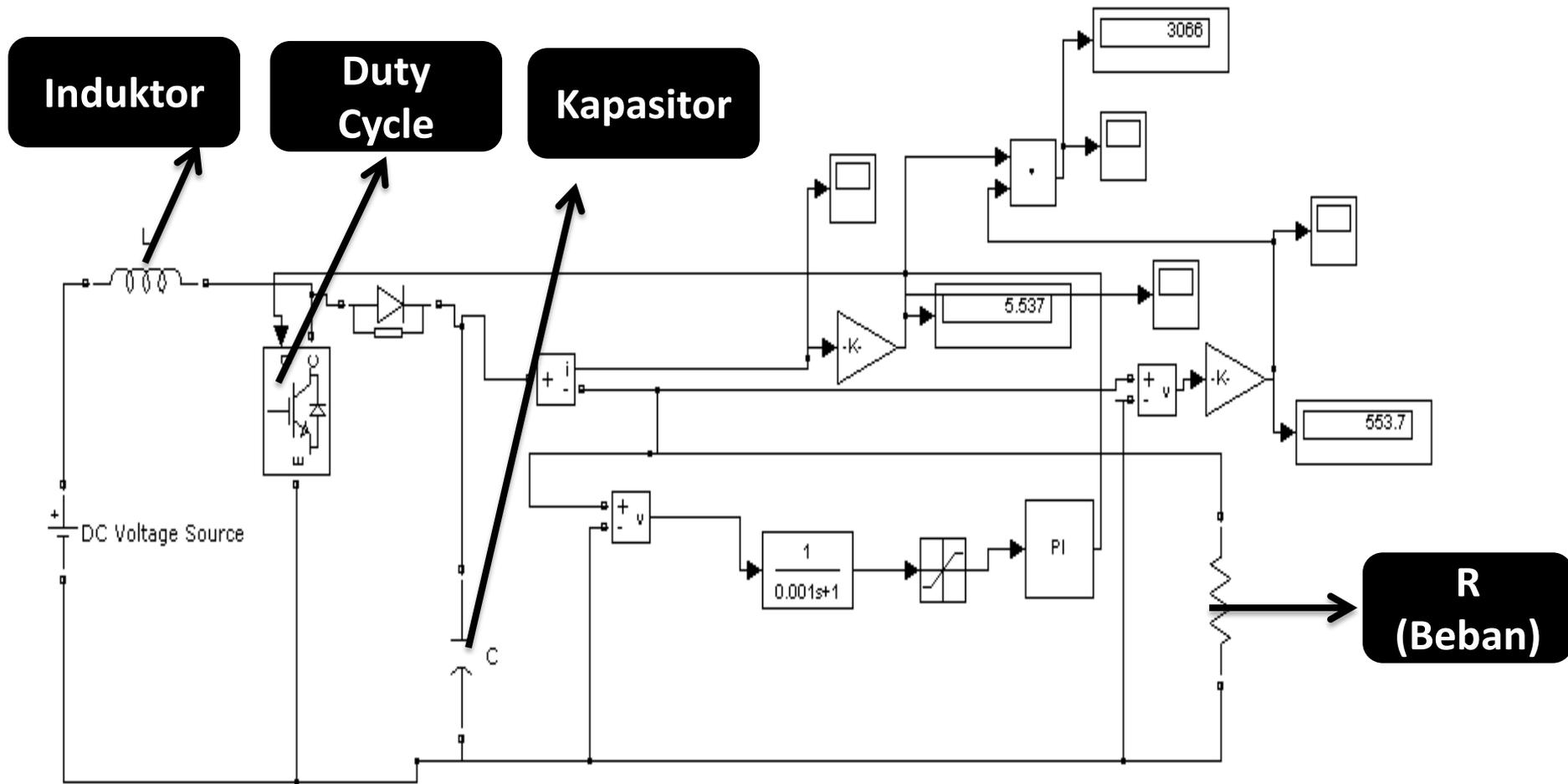
Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

Boost Converter



Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

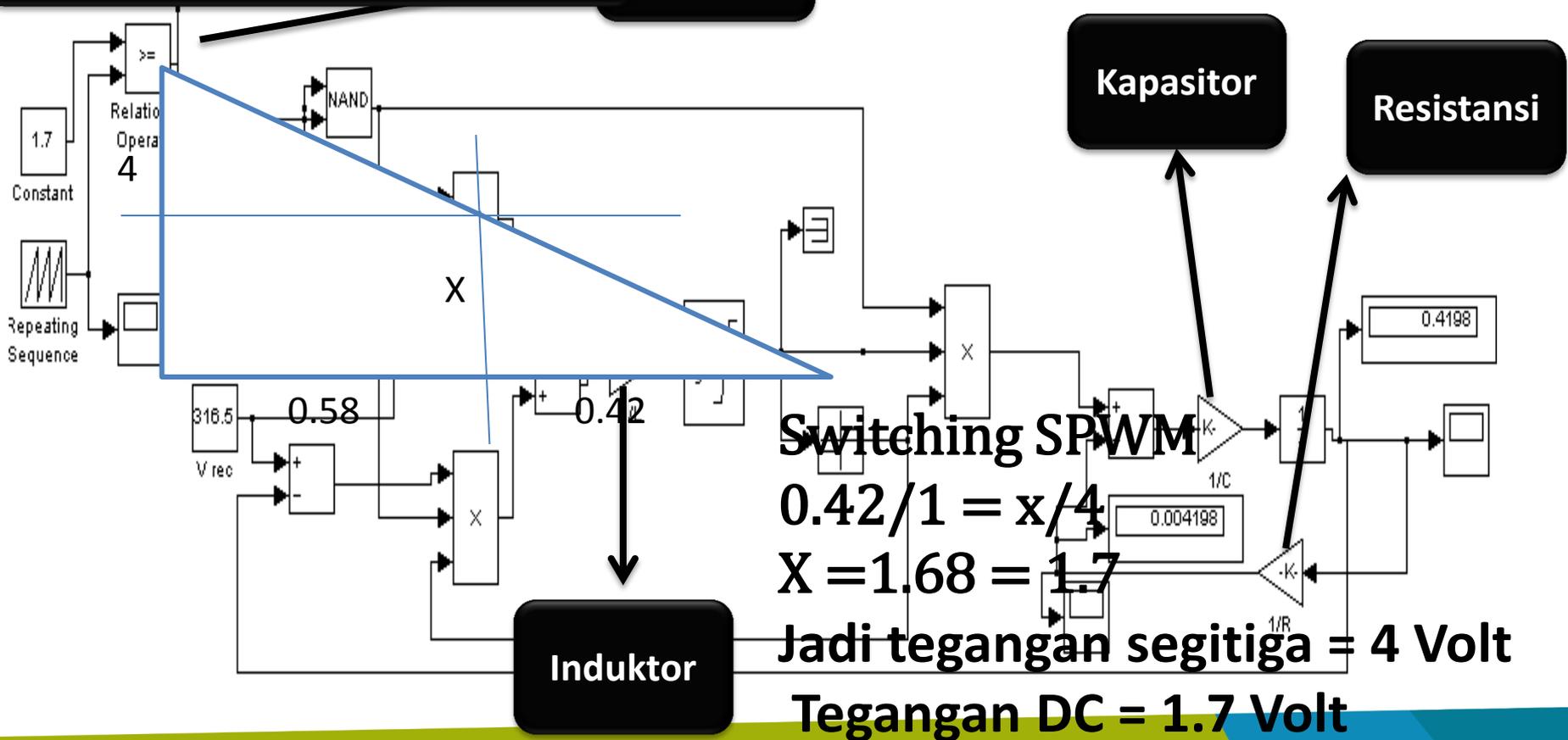
Trafo
dan
Rectifier

Boost Converter

SPWM : Single Pulse Width Modulation

SPWM

PEMODELAN SIMULINK :



Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

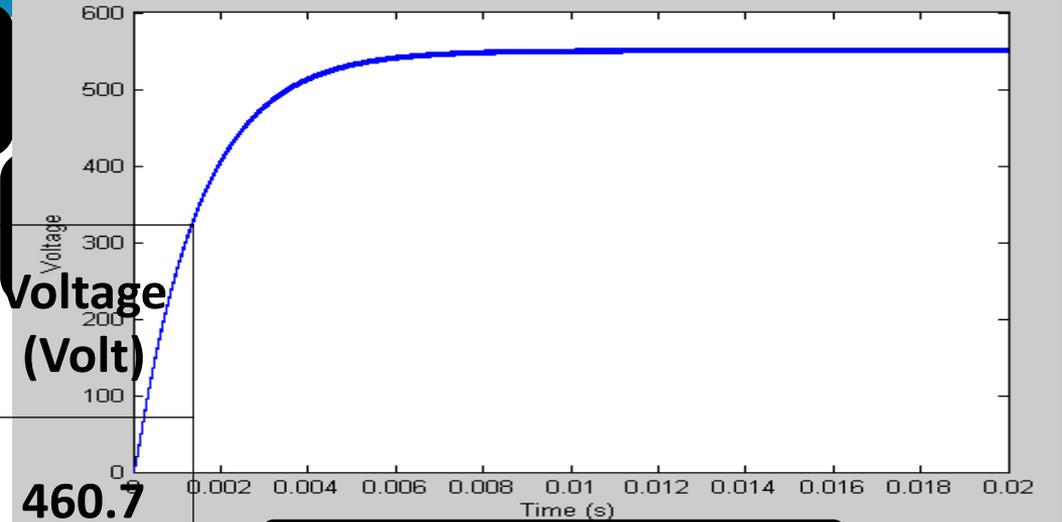
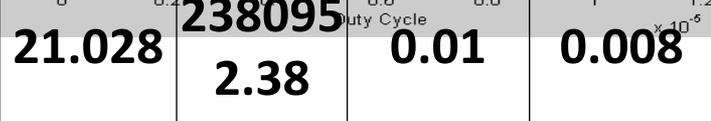
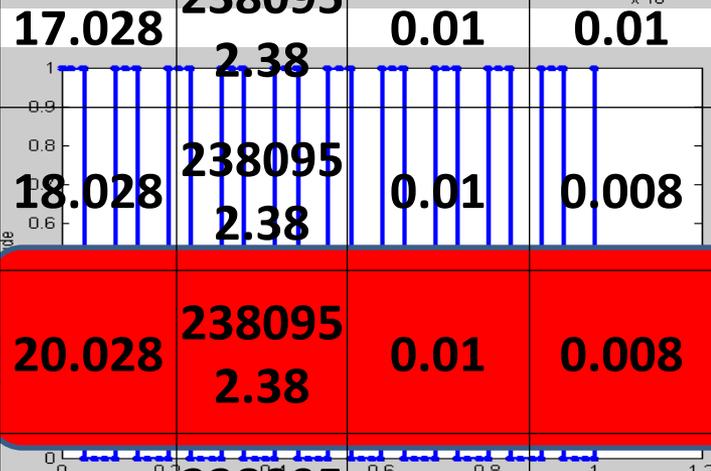
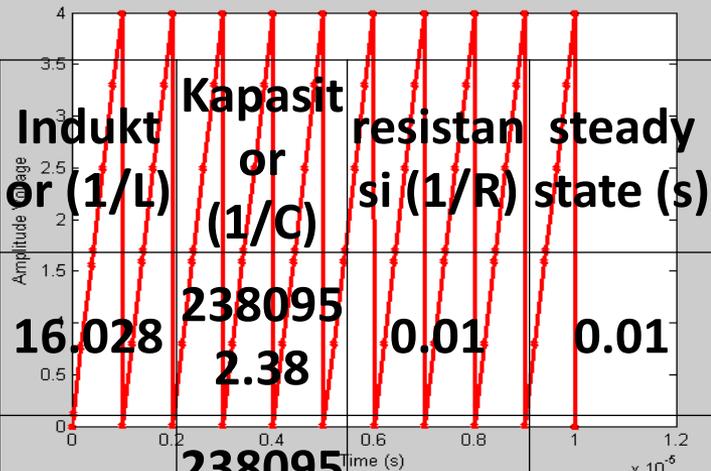
Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

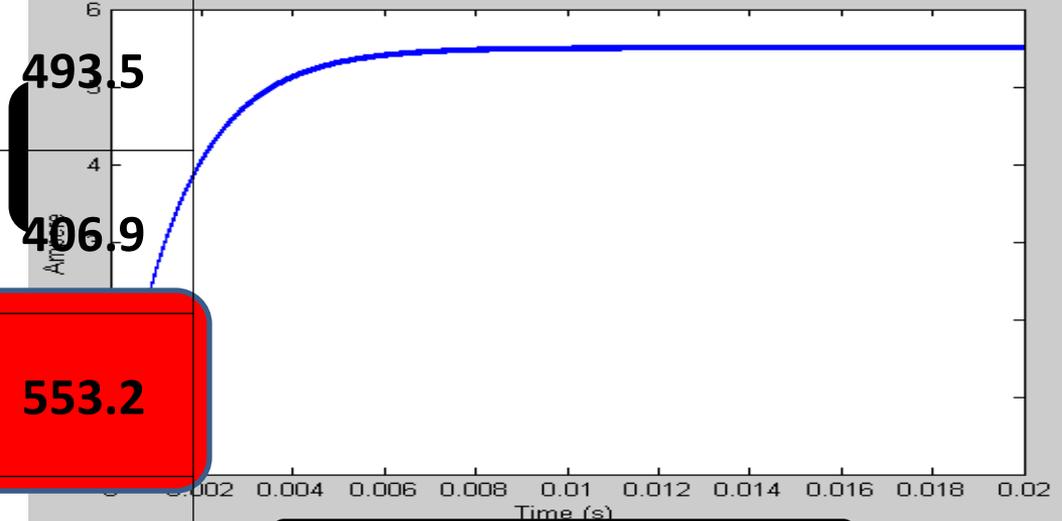
Trafo
dan
Rectifier

Boost Converter

TEGANGAN OUTPUT



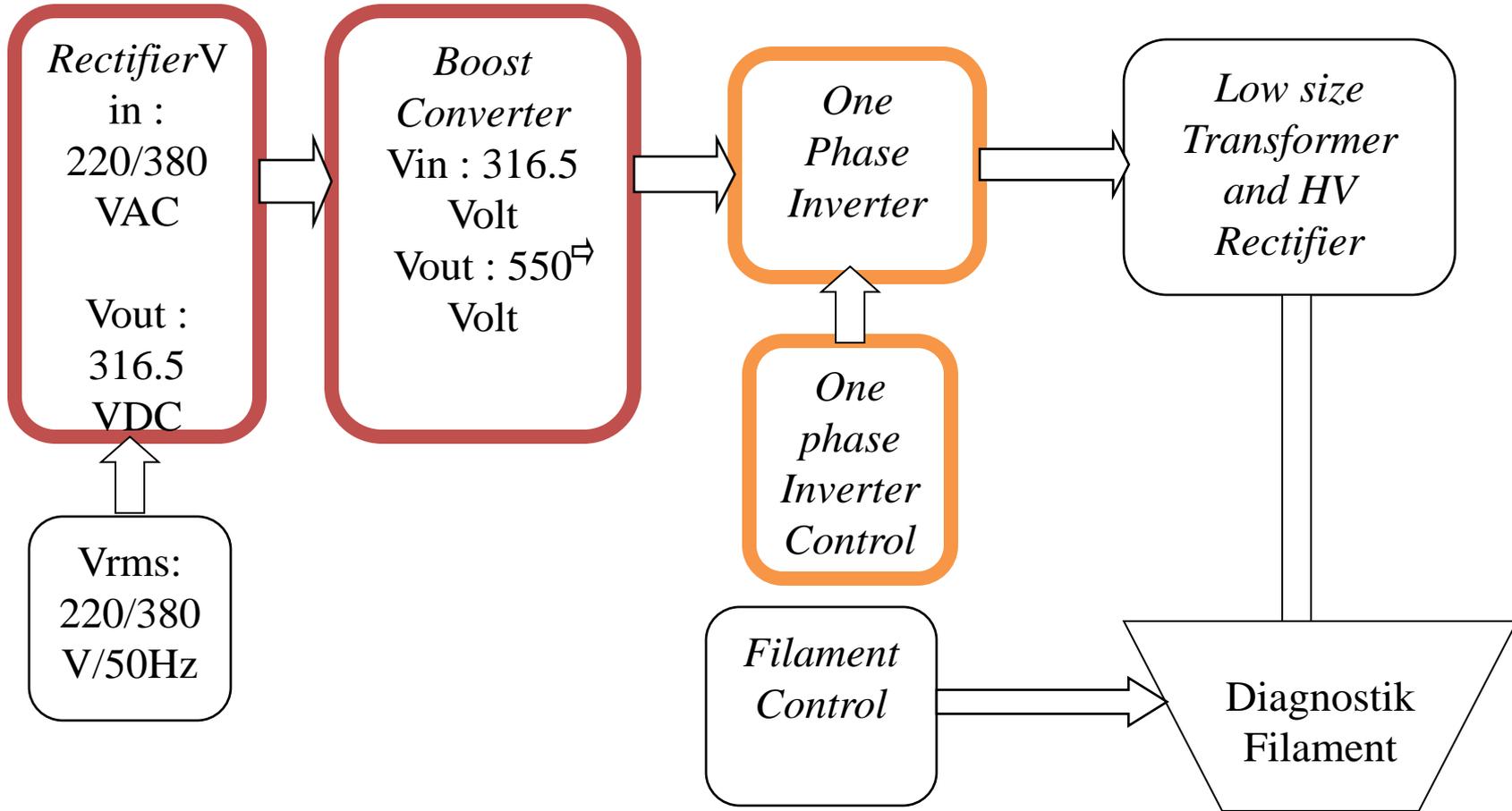
OUTPUT TEGANGAN



OUTPUT ARUS

20.028 238095 0.01 0.008 553.2

PENDESAINAN 3



Rectifier
3 phasa

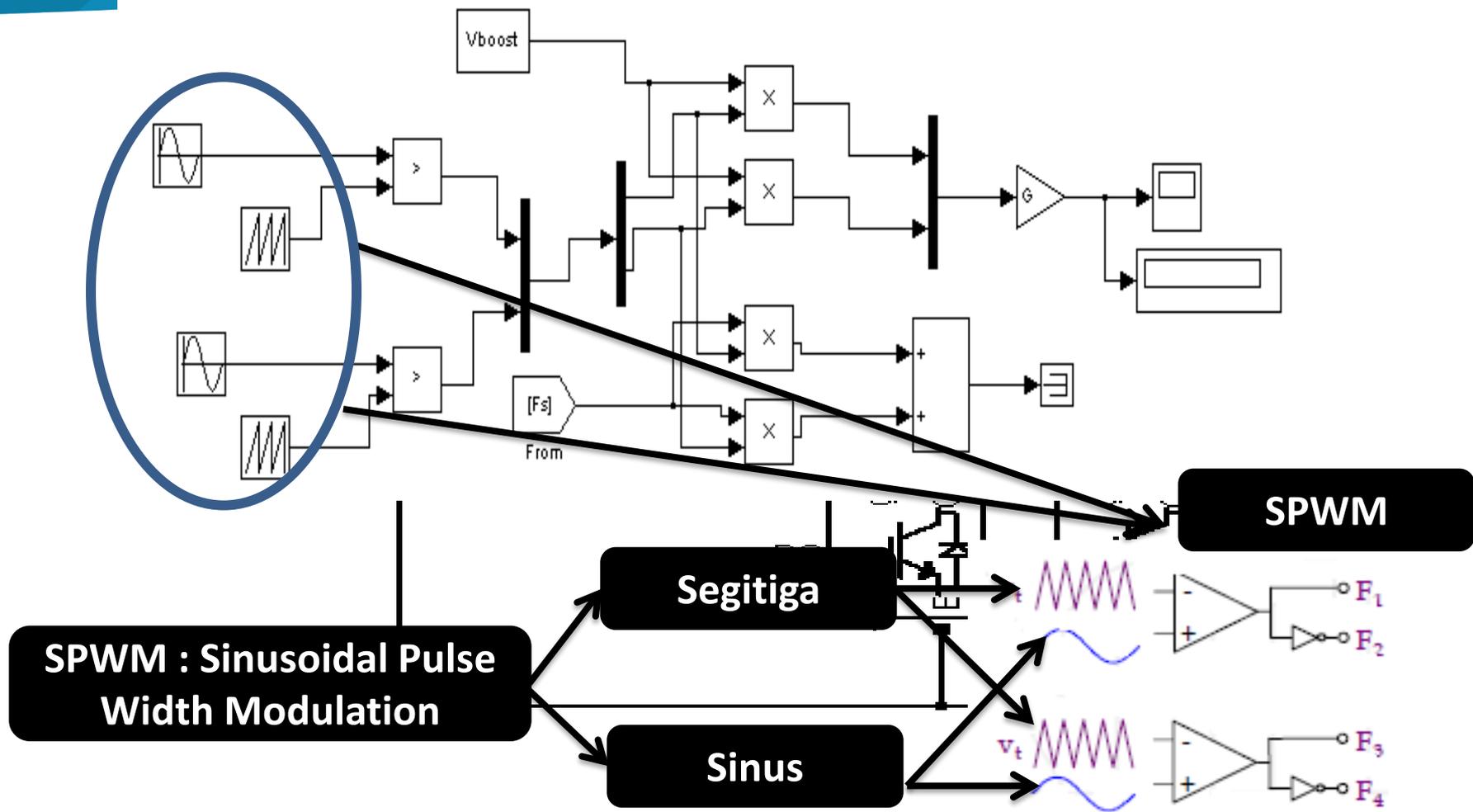
Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

Inverter Satu Phasa



Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

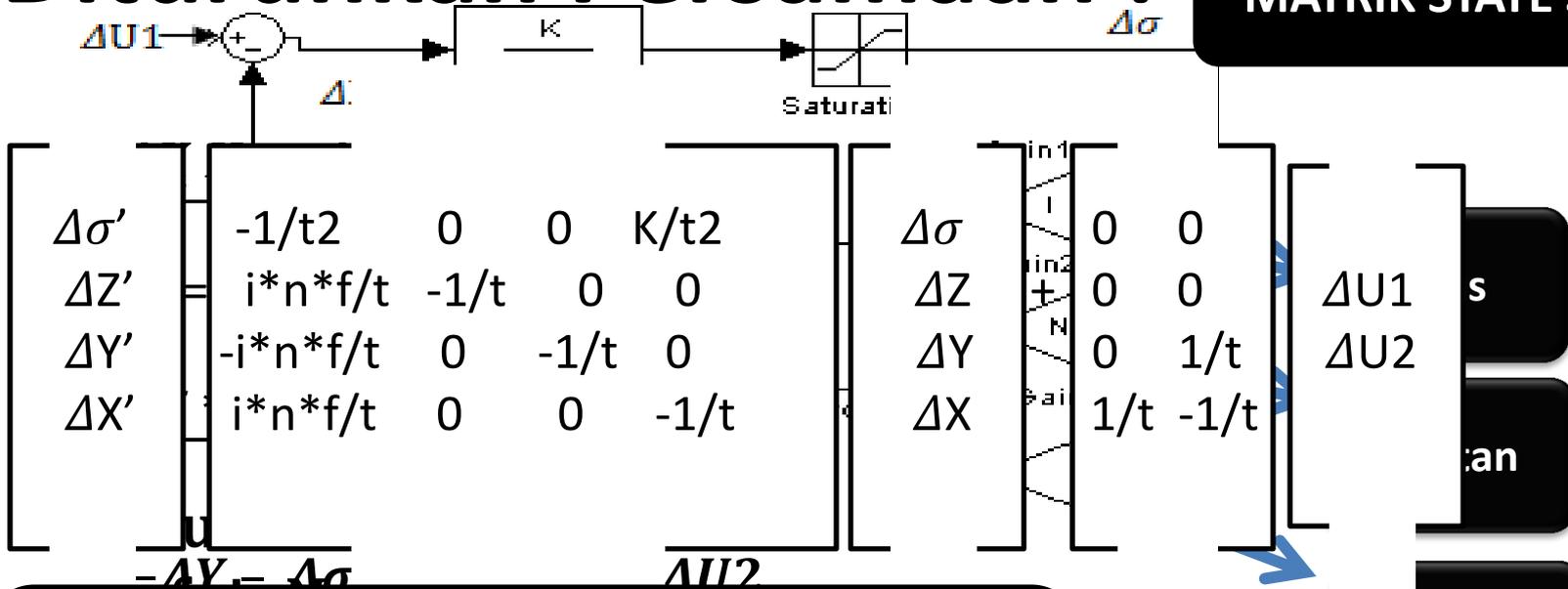
Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

Kontrol Inverter

Diturunkan Persamaan :

MATRIK STATE SPACE



$K = 0.3$ $I = 200 \text{ mA}, 500 \text{ mA}, 800 \text{ mA}$
 $t = 0.3$ $n = 50$
 $t_1 = 0.01$

Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

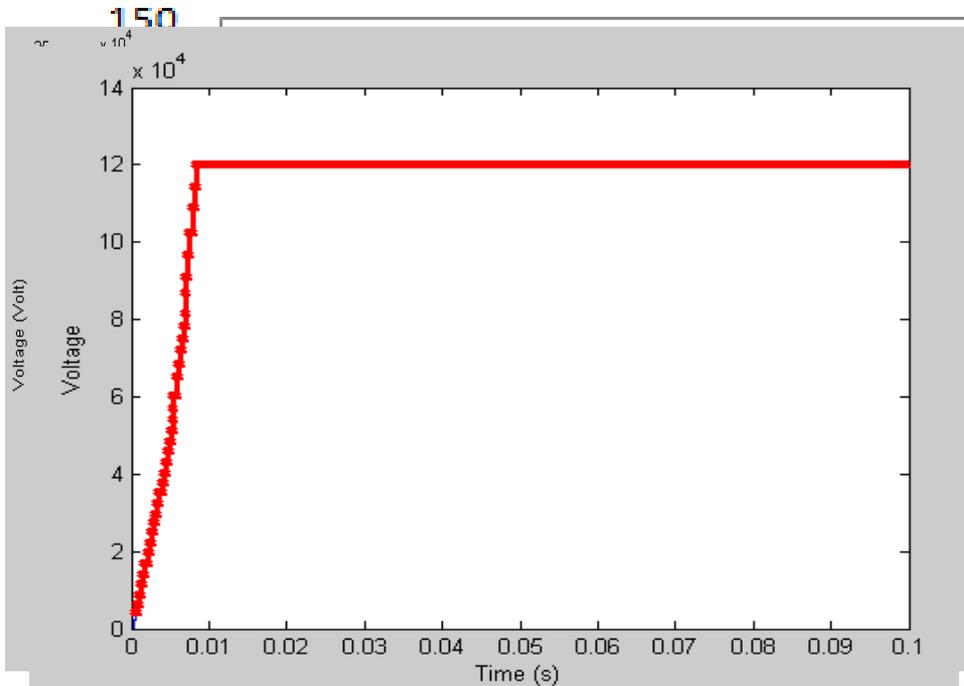
Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

Inverter Satu Phasa

200 mA

**GENERATOR MODERN
(FREKUENSI TINGGI)**



**TEGANGAN KELUARAN
RECTIFIER HIGH VOLTAGE**

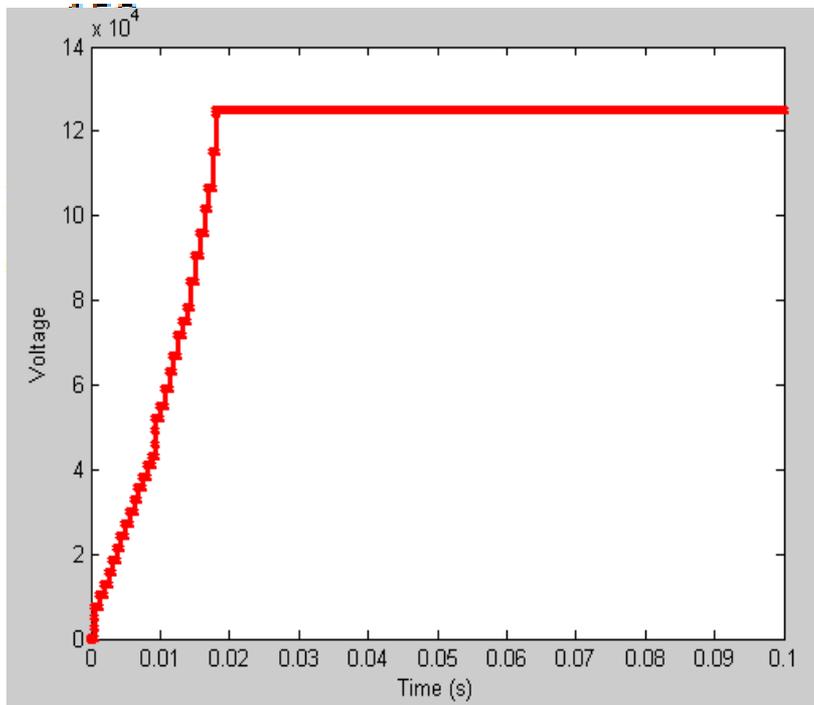
Frekuensi (kHz)

**5 Parameter :
8 kHz – 15 kHz / 50 kV-150 kV**

Inverter Satu Phasa

500 mA

**GENERATOR MODERN
(FREKUENSI TINGGI)**



**TEGANGAN KELUARAN
TRANSFORMATOR**

Frekuensi (kHz)

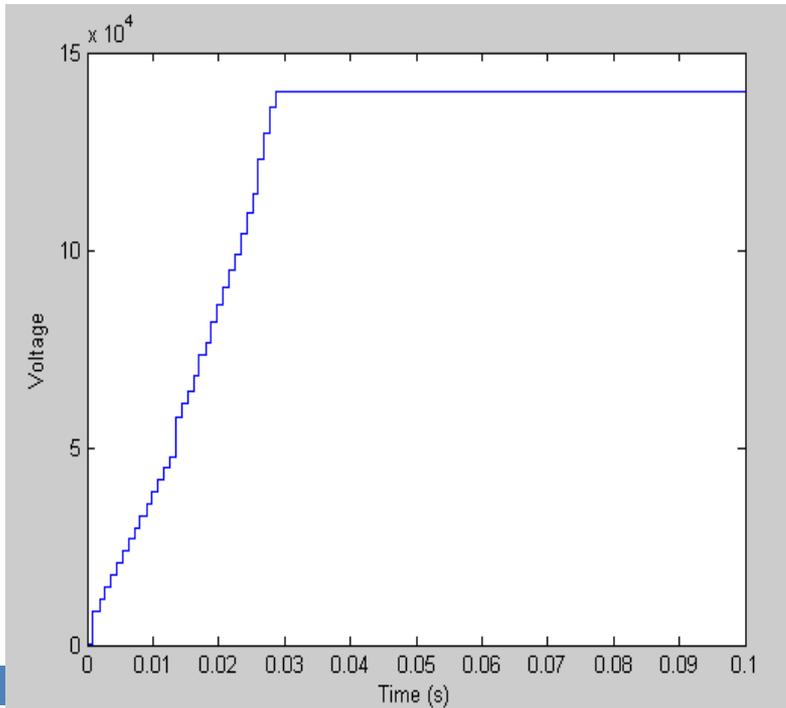
5 Parameter :

2 kHz – 6 kHz / 50 kV-150 kV

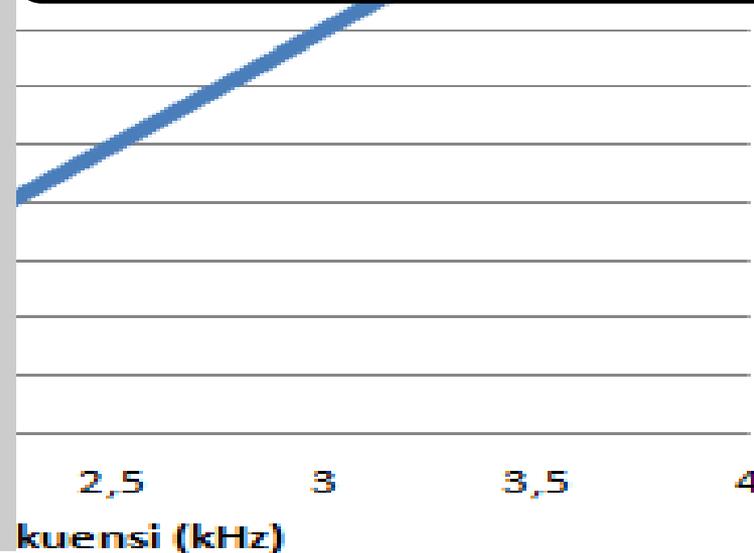
Inverter Satu Phasa

800 mA

GENERATOR MODERN (FREKUENSI TINGGI)



TEGANGAN KELUARAN RECTIFIER HIGH VOLTAGE

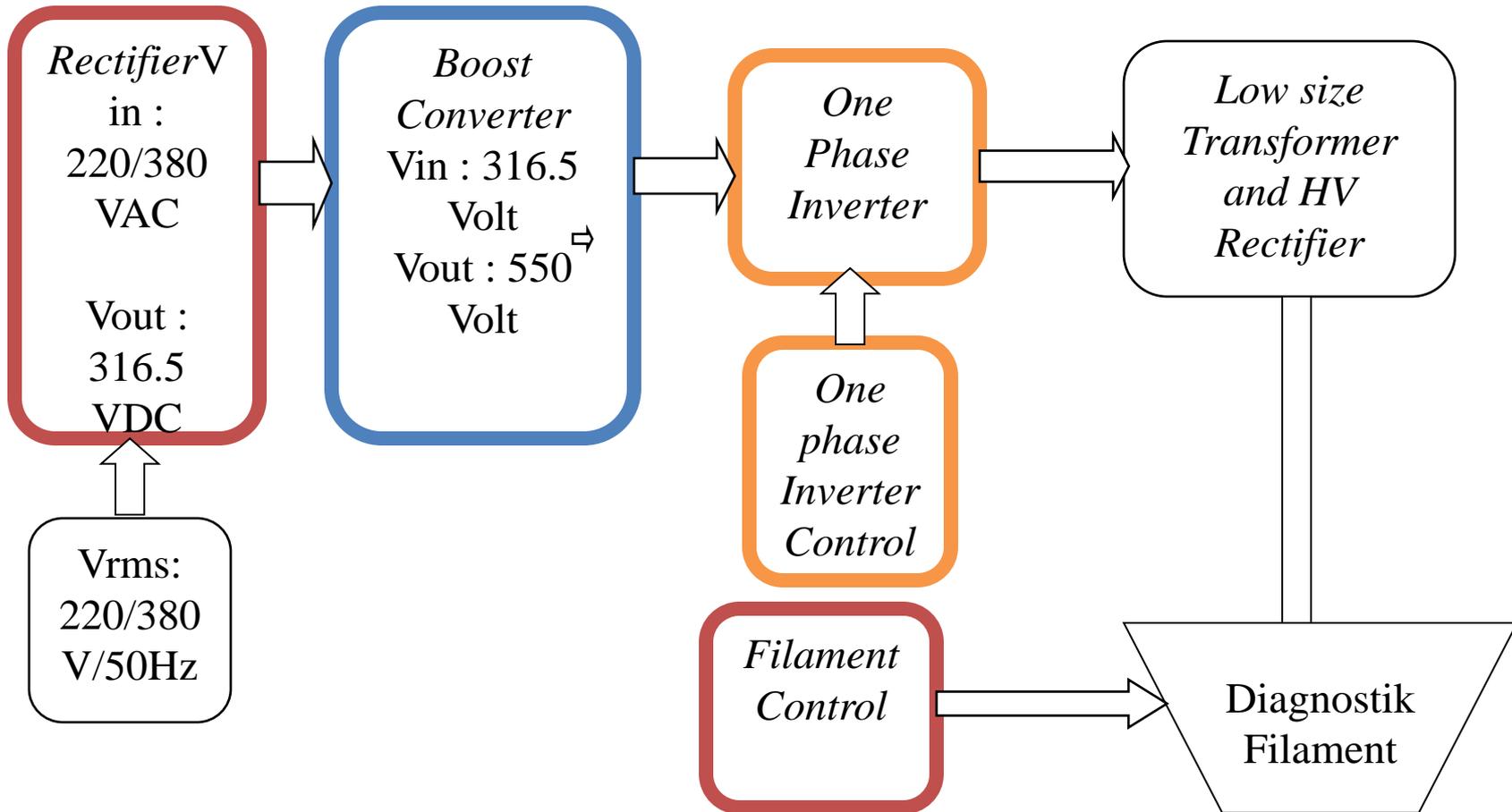


$$I_1 = \frac{V_2 I_2}{V_1}$$

5 Parameter :

1.5 kHz – 3.75 kHz/ 50 kV-150 kV

PENDESAINAN 4



Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

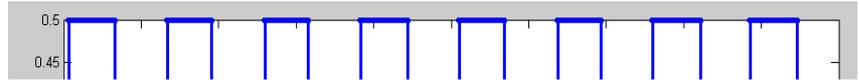
Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

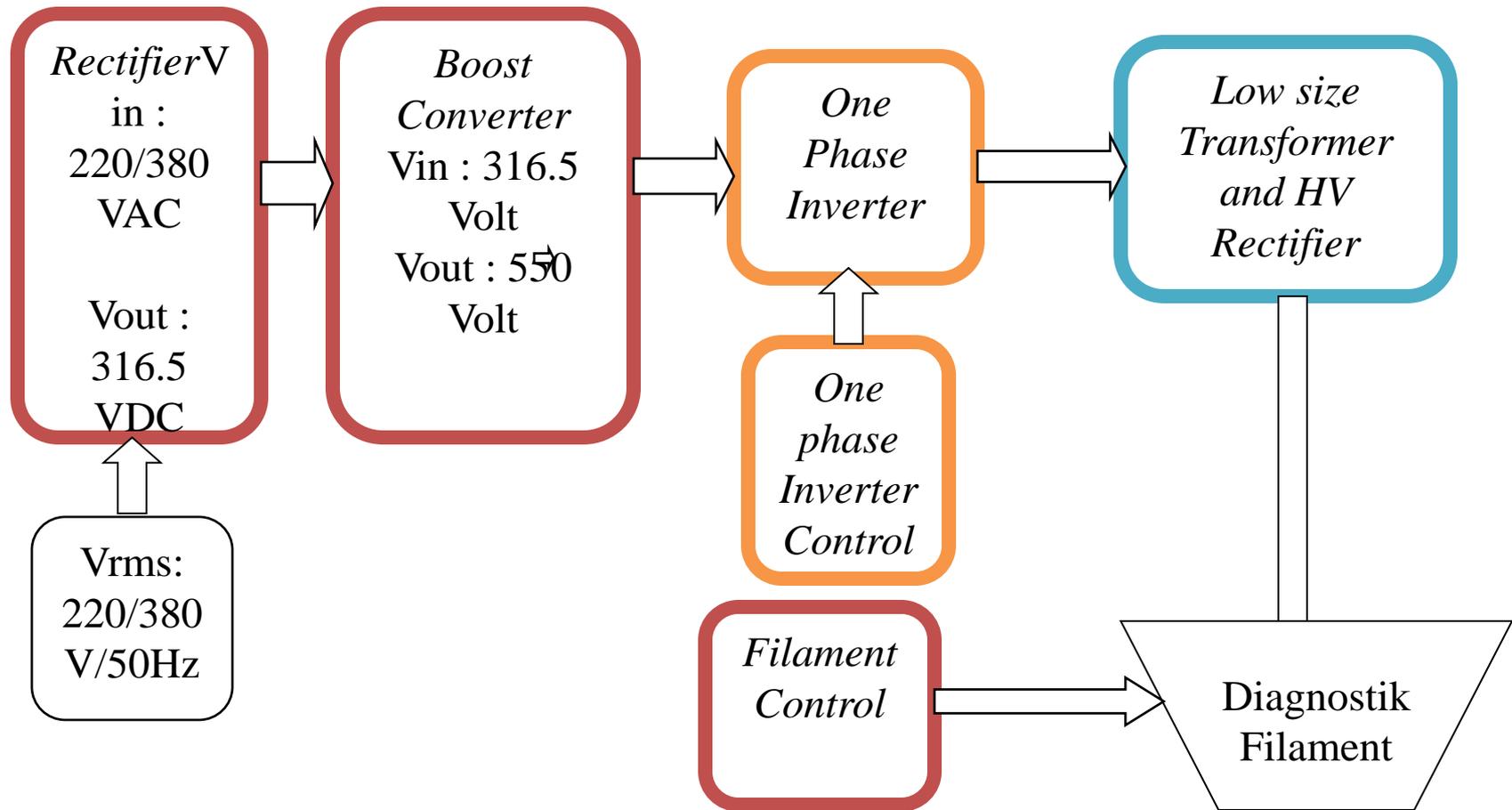
Kontrol Filament Sinar-X

KEKUATAN PENYINARAN SINAR-X



Frekuensi (Hz)	Arus (I2) (A)	tegangan (V2) (Volt) Hasil Simulasi	R (Ohm)
8000	0,2	80080	400400
10000	0,2	100127,5	500637,5
12000	0,2	120010	600050
14000	0,2	140030	700150
15000	0,2	149655	748275
2000	0,5	50050	100100
2500	0,5	62590	125180
4000	0,5	100045	200090
5000	0,5	125070	250140
6000	0,5	149985	299970
1500	0,8	60060	75075
2000	0,8	80080	100100
3000	0,8	120065	150081,3
3500	0,8	140030	175037,5
3750	0,8	149930	187412,5

PENDESAINAN 5



Rectifier
3 phasa

Boost
Converter

Inverter
dan
Kontrol

Filamenet
Kontrol

Trafo
dan
Rectifier

PEMODELAN TRAF0

PEMODELAN CST

1D Results\B-Field

B (T)

Explanation	12 kHz (rms)	5 kHz (rms)	3,5 kHz (rms)
Magnetic field energy in component1:ferrite	8.633021e-012 J	5.010456e-011 J	1.036804e-010 J
Electric field energy in component1:ferrite	1.685413e-029 J	9.787816e-029 J	2.025222e-028 J
Magnetic field energy in Primer	8.237090e-009 J	4.255939e-008 J	8.059981e-008 J
Electric field energy in Primer	2.496454e-030 J	1.427272e-029 J	2.894305e-029 J
Magnetic field energy in background	6.345475e-009 J	3.215822e-008 J	6.089784e-008 J
Electric field energy in background	3.799153e-030 J	2.158481e-029 J	4.386822e-029 J
Magnetic field energy in Sekunder	9.962127e-009 J	5.064475e-008 J	9.495907e-008 J
Electric field energy in Sekunder	2.560416e-030 J	1.460886e-029 J	2.957758e-029 J
Total magnetic field energy	2.455332e-008 J	1.254125e-007 J	2.365604e-007 J
Total electric field energy	2.571015e-029 J	1.483445e-028 J	3.049110e-028 J
Total field energy	2.455332e-008 J	1.254125e-007 J	2.365604e-007 J
Coil parameters at frequency			
Primer Voltage	9.296593e-003 + i 1.695870e-004 V	9.227281e-003 + i 3.637378e-004 V	9.168496e-003 + i 4.829979e-004 V
Sekunder Voltage	4.767418e-001 + i 1.003341e-002 V	4.722554e-001 + i 2.121260e-002 V	4.685205e-001 + i 2.787245e-002 V
Ohmic losses at frequency			
Volume losses in Primer	9.296620e-002 W	9.227535e-002 W	9.168946e-002 W
Volume losses in Sekunder	9.534810e-002 W	9.444854e-002 W	9.369959e-002 W
Total Ohmic volume losses	1.883143e-001 W	1.867239e-001 W	1.853891e-001 W

rad(A/m)



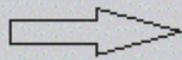
Kerapatan Arus

1/2 T

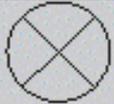
0,45

3500 Hz

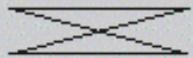
KESIMPULAN



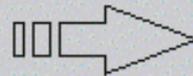
TUJUAN



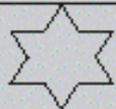
BATASAN
MASALAH



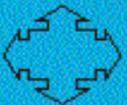
TINJAUAN
PUSTAKA



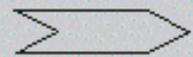
METODELOGI



HASIL
ANALISIS



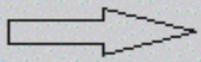
KESIMPULAN



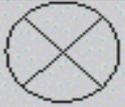
DAFTAR
PUSTAKA

- Hasil *output* inverter satu fasa disesuaikan dengan kebutuhan tegangan kerja yang digunakan pada pesawat frekuensi dan tegangan tinggi menggunakan transformator berjenis *rectifier* menggunakan hambatan 100 ohm dan sinar-x yaitu 2400,2 VPR /12kHz, 2501,4VDC /5kHz, transformator berjenis ferronagnetic yaitu ferrite, *upper saturation limit* pada sistem kontrol sebesar 2800,6VDC /3,5kHz, *manganese-zinc, nickel-zinc* dengan B (kuat medan) 1000.
- Hasil simulasi tegangan *output* inverter satu fasa satu fasa sebesar 550 VDC sebagai *supply* dari inverter satu fasa dengan perbandingan belitan primer sekunder sebesar menggunakan resistansi 100 ohm, induktor 66,5 mH, 10:50 sebagai bahan penelitian. Sehingga diperoleh nilai kapasitor 0,42 uF, dan frekuensi *switching* pada control 120010 VAC, 125070 VAC, dan 140030 VAC. SPWM (*single pulse width modulation*) sebesar 100 kHz.
- Pengaturan kontrol arus filamen menggunakan besar arus 200 mA, 500 mA, dan 800 mA yang disesuaikan dengan pengaturan kontrol *switching* pada inverter satu fasa menggunakan pengaruh dari frekuensi, arus filamen, dan jumlah lilitan trafo pada bagian sekunder.
- Dari hasil tegangan *output* transformator dan arus filamen kontrol didapat besar kekuatan sinar-x yang direpresentasikan ke dalam besaran resistansi (ohm) inverter satu fasa diatur dengan saklar SPWM dengan besaran berbeda untuk variasi kebutuhan tegangan (*sinusoidal pulse width modulation*).
- Untuk menghasilkan frekuensi tinggi, *switching* dengan besaran berbeda untuk variasi kebutuhan tegangan (*sinusoidal pulse width modulation*).

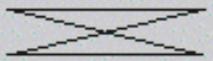
DAFTAR PUSTAKA



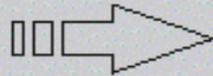
TUJUAN



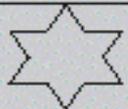
BATASAN
MASALAH



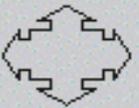
TINJAUAN
PUSTAKA



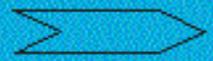
METODELOGI



HASIL
ANALISIS



KESIMPULAN



DAFTAR
PUSTAKA

- [1] Siemens X Ray Generator., "Kontrol Inverter Satu Fasa", Jerman, 1998.
- [10] M. Khafalah dkk., "A Simplified SVM Control Scheme for Reduced Switching Losses in Converter-Fed Drives", *IEEE*, 2004.
- [2] Drajat, Adi., "Cara Kerja Pesawat Sinar-X", BATAN, Jakarta, April, 2013.
- [3] Tiwik-Ari I, Veronika., "Boost Rectifier Satu Fasa", Universitas Katolik, Soegijapranata, Semarang, 2003.
- [11] No name., "Designing with Magnetic Cores at High Temperatures", Pitsburg, 2014.
- [4] Suyatno, Ferry., "Rekayasa Sistem Pengatur Parameter Pesawat Sinar-X
- [12] Mardiansya, Riki., "Potensi Medan Elektromagnetik sebagai Sumber Diagnostik Berbasis Mikrokontroler Keluarga MCS 51", BATAN, Tangerang, Pembangkit Listrik", Universitas Indonesia, Maret, 2012.
- [13] *Fundamental Of Power Electronic handbook*.
- [5] Ashari, Mohammad, dan Effendi, Moh. Zaenal., "Sistem Penyearah Satu Fasa Dengan Dua Konverter Flyback Paralel Untuk Meningkatkan Kualitas Arus Voltage for Wave Energy Conversion System", *JTEE Journal*, Februari, 2012.
- [14] H. Mohamed, Khalid dkk., "Boost Converter Design with Stable Output Input", *Teknik Elektro ITS*, Surabaya, Juni, 2007.
- [15] Fatah, Abdul., "Design Boost Converter", *National Institute of Technology Rourkela*, Juni 2013.
- [6] Asnil., "AC to DC Converter (Rectifier)", *Elektro FT-UNP*, April, 2010.
- [7] Stefan, Partyka., "DC Link Voltage Control", Aalborg University, Denmark, April, 2008.
- [16] Robandi, Imam., "Modern Power System Control", Yogyakarta, 2009.
- [17] Gunawan, Erik., "Analisa Rangkaian Inverter Satu Phasa", Jakarta, 2007.
- [8] Eko H. W, Septian., "Desain Dan Simulasi Pengontrolan Daya Aktif dan Reaktif Inverter 3 Fasa Menggunakan PQ Controller Pada Sistem Pembangkit Tersebar Multiple Proton Exchangen Membrane Fuel Cell (PEMFC)", *Teknik Elektro ITS*, Surabaya, Agustus, 2012.
- [18] Batard, Christophe. dkk., "Simulation of Power Converter", INTECH, 2012.
- [9] Shangzuan, Nie Ling., "The Application and Practice of frequency Converter with One Transducer and multi Electric Pumps". Chongqing University of Science and Technology, januari 2011.

TERIMA KASIH

DESAIN DAN SIMULASI KOMPONEN TEGANGAN TINGGI PADA PEMBANGKIT SINAR- X UNTUK PERALATAN DIAGNOSTIK MEDIS

Nama : Addien Wahyu Wiranata
NRP : 2211 100 071



Dosen Pembimbing :

1. Dr. Dimas Anton Asfani ST. MT.
2. Feby Agung Pamuji ST. MT.



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember



REFERENSI JAWABAN

FUNGSI KERJA UTAMA PADA PESAWAT SINAR-X [1]

Untuk mengatur parameter exposure, yaitu Tegangan tinggi (kV); arus tabung (mA) dan waktu exposure (ms).

- kV : menentukan energi atau kuantita dari X-ray, sehingga menentukan daya tembus X-ray
- mA: menentukan densitas dari kuantita x-ray, sehingga menentukan dosis x-ray

Inverter Satu Phasa [1]

- ❖ Berfungsi untuk mengubah sinyal DC dari intermediate circuit menjadi sinyal AC frekuensi tinggi (Max 15 kHz)
- ❖ Sinyal drive “enable” Inverter berasal sinusoidal Pulse Width Modulation “
- ❖ IGBT berfungsi sebagai rangkaian switching sehingga arus DC yang masuk rangkaian dikonversi menjadi frekuensi tinggi.
- ❖ Dibuatnya kontrol sebagai konversi dari frekuensi dan tegangan tinggi

Filament Sinar-X [1]

- ❖ **Berfungsi untuk suplai arus pemanasan filamen (I_h)**
- ❖ **Regulasi mA yaitu sebesar 200 mA, 500 mA, dan 800 mA**
 - Menentukan Perbedaan kapasitas tubuh manusia**

FILAMENT CURRENT (I_h) [1]

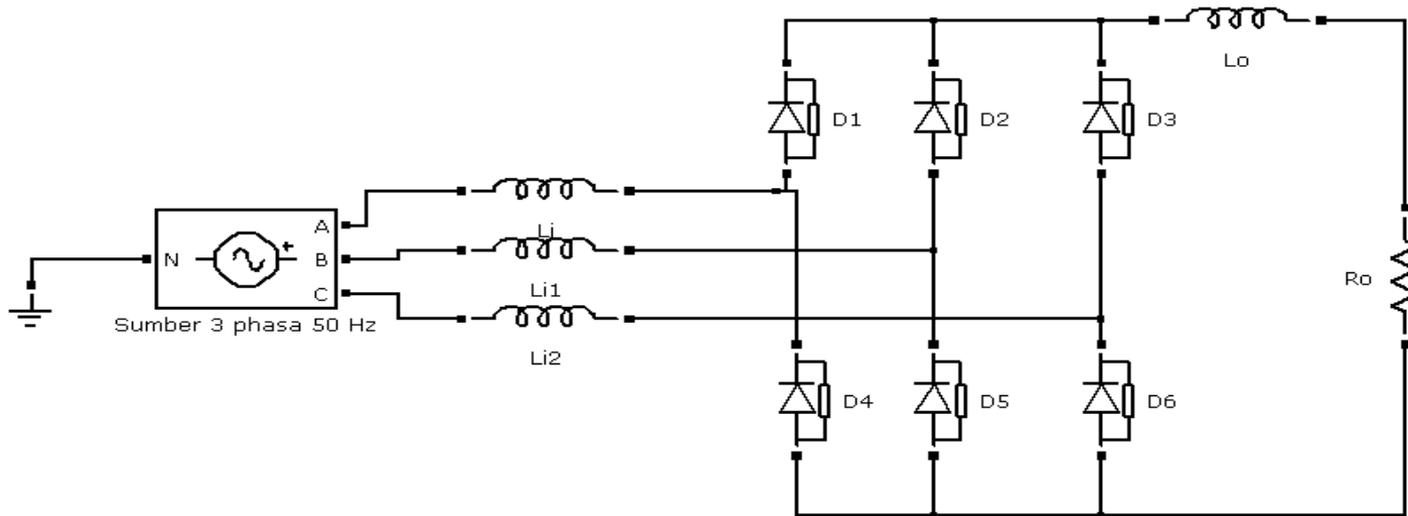
Filament current / arus filamen adalah arus (I) yang mengalir ke filamen tube.

Pemanasan filamen menghasilkan emisi elektron yang menentukan dosis dari x-ray

Tube current / arus tabung adalah arus yang mengalir saat pelepasan elektron dari filamen (katoda) ke target (anoda)

Arus tabung linear dengan dosis x ray yang dihasilkan.

Analisa Rectifier 3 Phasa [18]



- 6 kondisi 2 dioda on

P1 : D1 dan D5

P2 : D1 dan D6

P3 : D2 dan D6

P4 : D2 dan D4

P5 : D3 dan D4

P6 : D3 dan D5

- 6 kondisi 3 dioda on

O1 : D1, D5 dan D6

O2 : D1, D2 dan D6

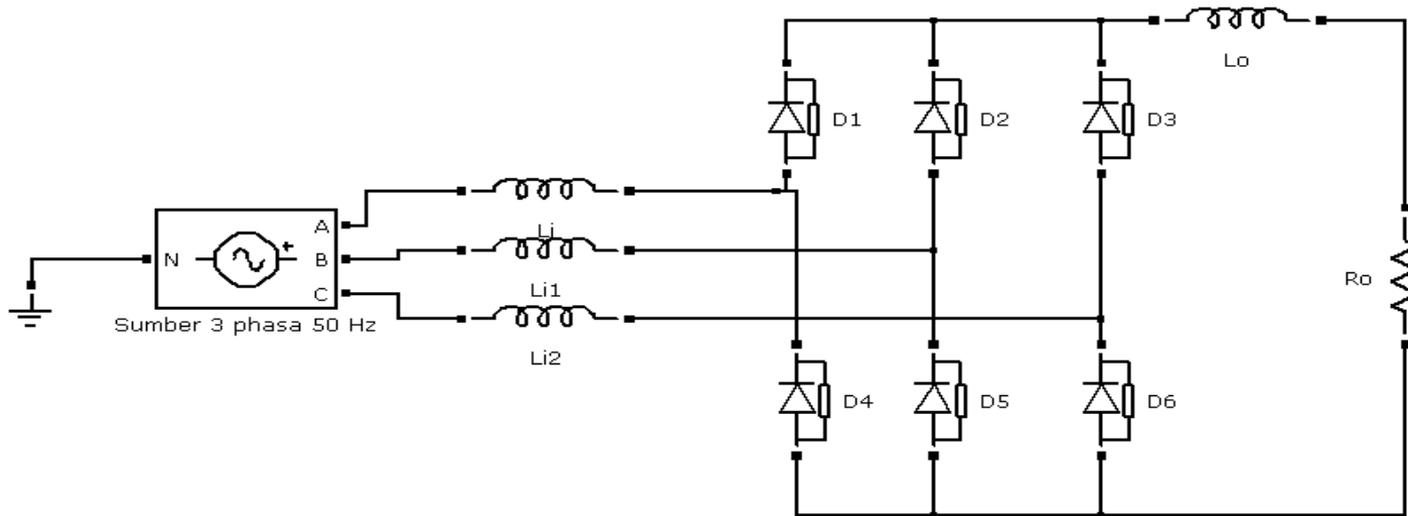
O3 : D2, D4 dan D6

O4 : D2, D3 dan D4

O5 : D3, D4 dan D5

O6 : D1, D3 dan D5

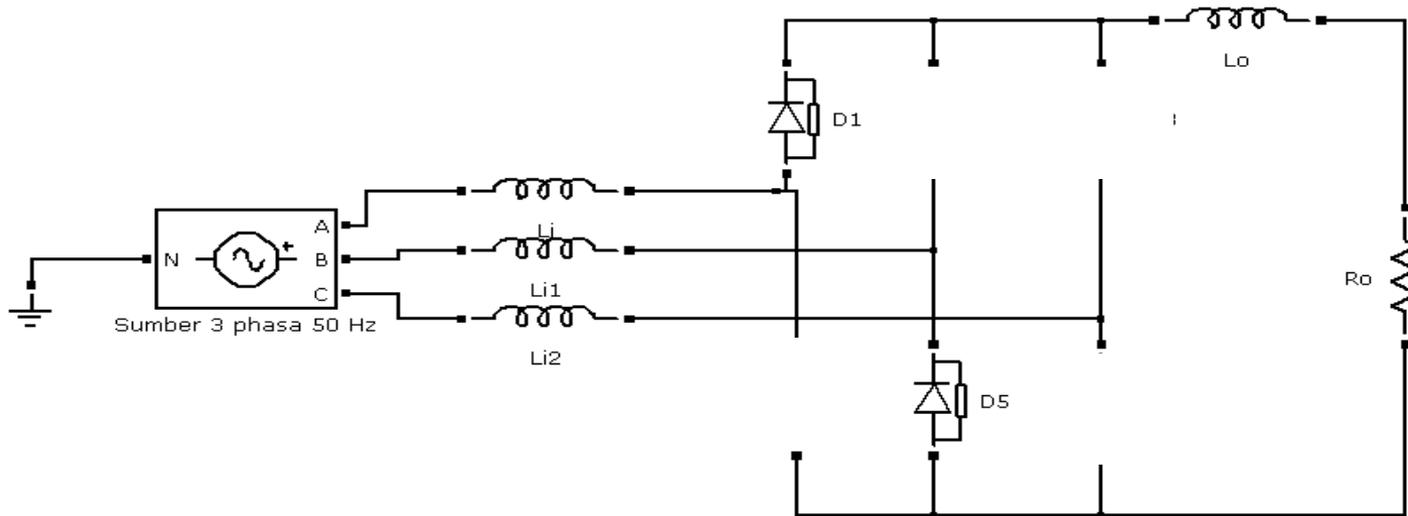
Analisa Rectifier 3 Phasa [18]



Jika : $I_o = 0$, maka

$$\frac{dir}{dt} = \frac{dis}{dt} = \frac{dit}{dt}$$

Analisa Rectifier 3 Phasa [18]



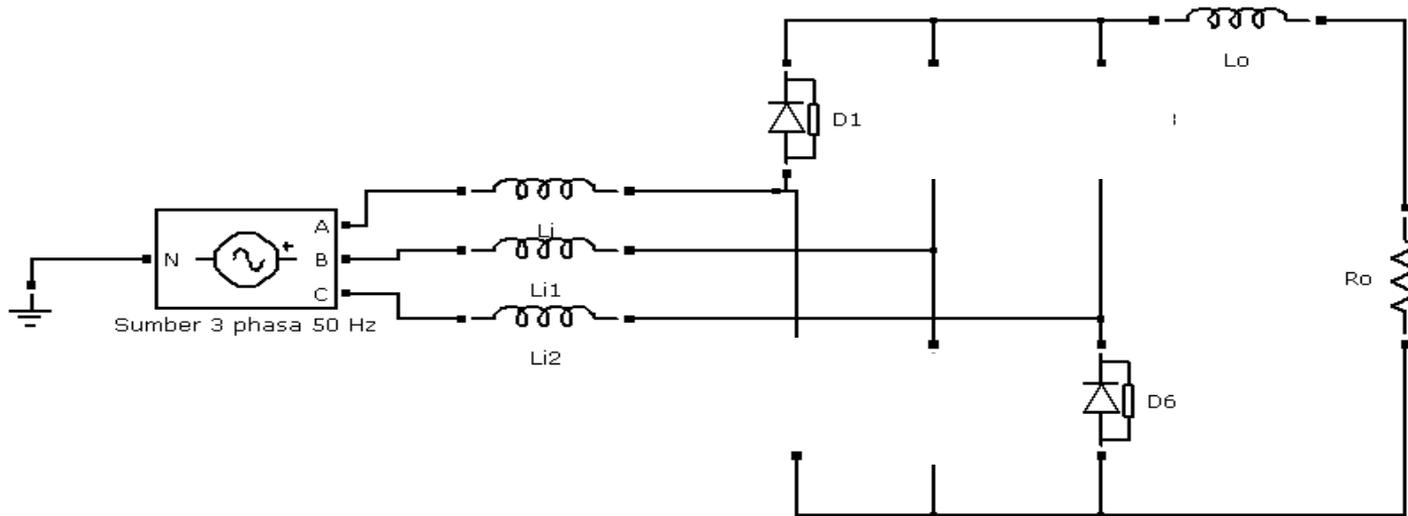
P1 : D1 dan D5

$$\frac{dir}{dt} = -\frac{dis}{dt} = \frac{dio}{dt} = \frac{urs - vo}{2Li + Lo}$$

$$\frac{dit}{dt} = 0$$

$$VD6 = \text{ust} \frac{Li}{2Li + Lo} (urs - vo)$$

Analisa Rectifier 3 Phasa [18]

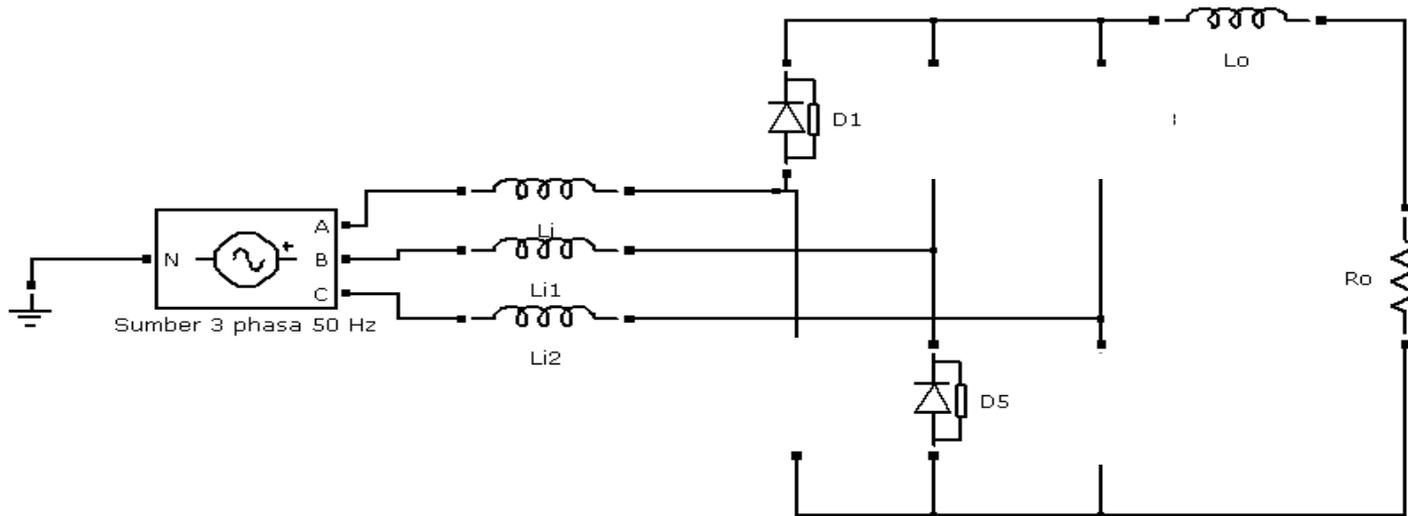


P1 : D1, D5 dan D6

$$\frac{dir}{dt} = \frac{dio}{dt}$$

$$I_s + I_t = - I_o \text{ sehingga } -\frac{dis}{dt} - \frac{dit}{dt} = \frac{dio}{dt}$$

Analisa Rectifier 3 Phasa [18]



O1 : D1 dan D5

$$\frac{dir}{dt} = -\frac{dis}{dt} = \frac{dio}{dt} = \frac{urs - vo}{2Li + Lo}$$

$$\frac{dit}{dt} = 0$$

$$VD6 = \text{ust} \frac{Li}{2Li + Lo} (urs - vo)$$

Analisa Rectifier 3 Phasa [18]

Sehingga :

$$\frac{dir}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(\frac{Li+Lo}{Li} uts - \frac{2Li+Lo}{Li} utr - vo \right)$$

$$\frac{dis}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} \left(-\frac{2Li+Lo}{Li} uts + \frac{Li+Lo}{Li} utr - vo \right)$$

$$\frac{dit}{dt} = \frac{1}{3Li+2Lo} (uts + utr + 2vo)$$

$$ir = \int \left(\frac{1}{3Li+2Lo} \left(\frac{Li+Lo}{Li} uts - \frac{2Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \right) dt$$

$$is = \int \left(\frac{1}{3Li+2Lo} \left(-\frac{2Li+Lo}{Li} uts + \frac{Li+Lo}{Li} utr - vo \right) \right) dt$$

$$it = \int \left(\frac{1}{3Li+2Lo} (uts + utr + 2vo) \right) dt$$

Boost Converter

Duty Cycle :

$$D = 1 - V_i/V_o$$

$$D = 1 - 316.5/550$$

$$D = 0.42$$

Induktor : $\Delta i_L = 0.02 \text{ A}$ $f_c = 100 \text{ kHz}$

$$L = (V_i \times D) / (\Delta i_L \times f_c)$$

$$L = (316.5 \times 0.42) / (0.02 \times 100 \text{ kHz})$$

$$L = 66.5 \text{ mH}$$

Jadi penggunaan Induktor harus minimal 66.5 mH

Boost Converter

Kapasitor : $\Delta V_o = 55$ Volt $R = 100$ Ohm

$$C = D / (R \times (\Delta V_o / V_o) \times f_c)$$

$$C = D / (100 \times (55 / 550) \times 100 \text{ kHz})$$

$$C = 0.42 \text{ } \mu\text{F}$$

Jadi penggunaan Kapasitor harus minimal $0.42 \text{ } \mu\text{F}$

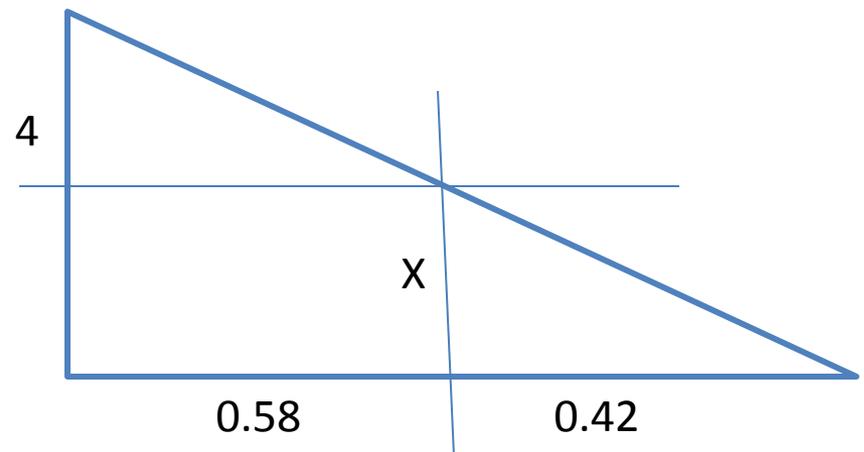
Switching SPWM

$$0.42 / 1 = x / 4$$

$$X = 1.68 = 1.7$$

Jadi tegangan segitiga = 4 Volt

Tegangan DC = 1.7 Volt



Teknik Pemilihan Switching

- Square Wave
- Single PWM
- Multiple PWM
- Sinusoidal PWM
- Modified SPWM

Single PWM

Prof. Ashari

- Fourier Series :

$$V_o = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_{n=1,3,5} \dots \left(\frac{\sin \frac{n\delta}{2}}{n} \right) \sin n\omega t$$

$$V_{1-rms} = \frac{4V_{dc} \sin \frac{\delta}{2}}{\pi\sqrt{2}}$$

$$V_{o-rms} = V_{dc} \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$$

$$THD = \sqrt{\frac{n\delta}{8\sin^2 \frac{\delta}{2}}} - 1$$

Sinusoidal PWM

- Referensi Signal :

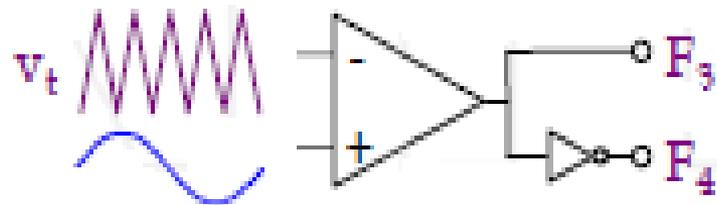
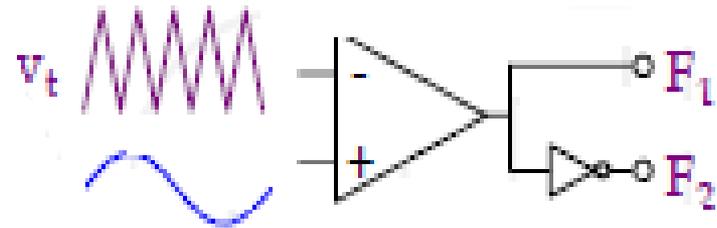
Amplitudo A_o , f_o

- Signal Carrier :

Amplitudo A_c , f_c

- $M = A_o/A_c$

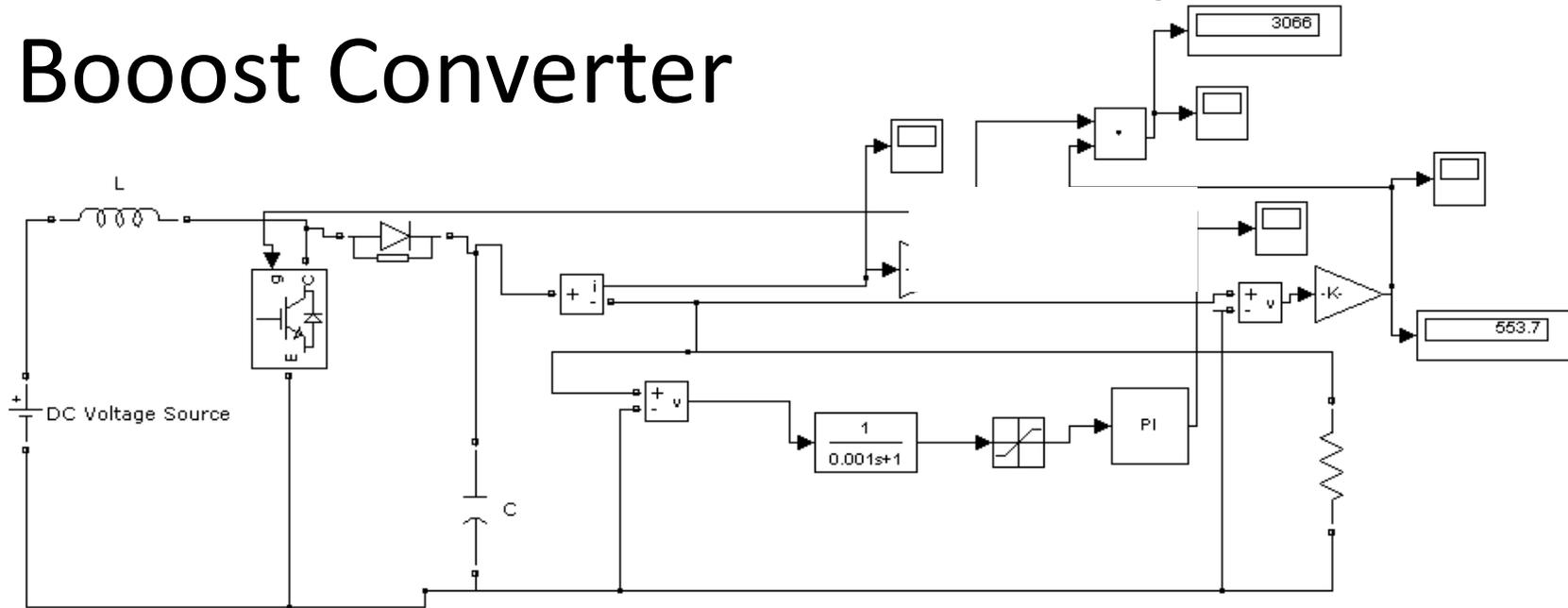
- $M_f = f_c/f_o$



Apabila sinusoidal lebih besar maka F_1 dan F_2 akan on, sedangkan segitiga lebih besar maka F_2 dan F_4 akan on.

Analisa Transient dan Steady State

Boost Converter



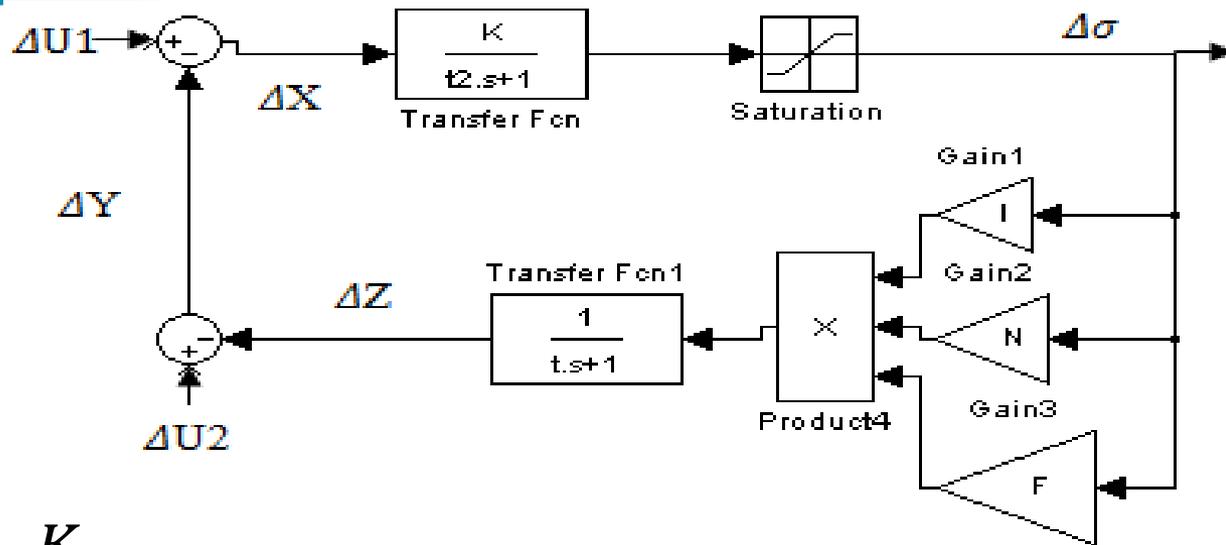
Transient : $t = 0$

$$V_L(t) = V_i(t) \cdot F + (V_i(t) - V_o(t)) \cdot F' \cdot i_L$$

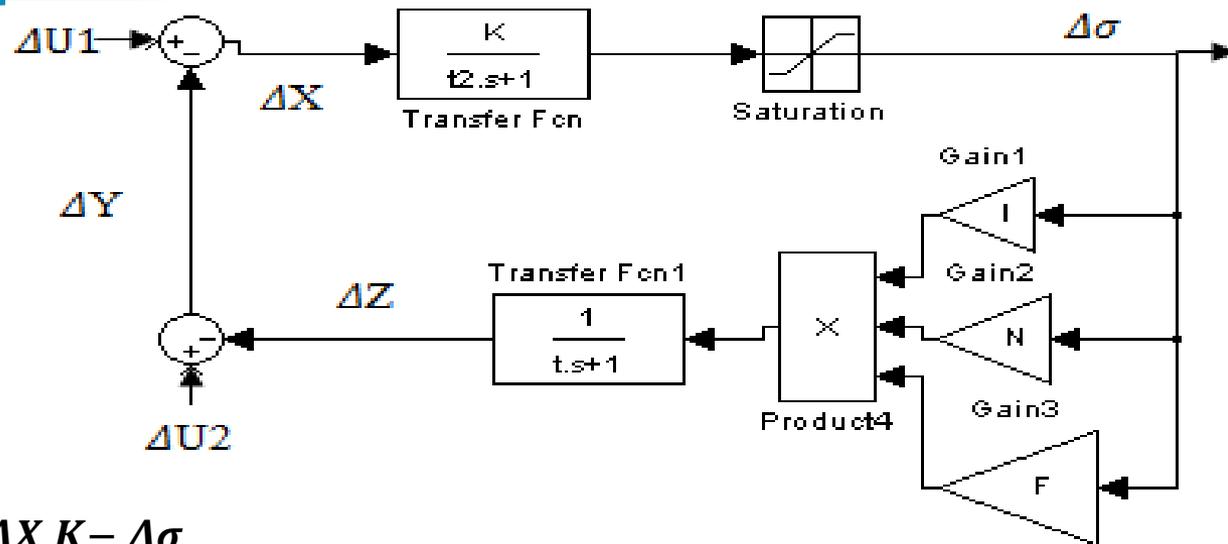
Steady State : $t > 0$

$$i_C(t) = -i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L = C \frac{dV_o}{dt}$$

$$V_o = \frac{1}{C} \int (-i_o(t) \cdot F + i_L(t) \cdot F' \cdot i_L) dt$$



- $\Delta X \left[\frac{K}{t2s+1} \right] = \Delta\sigma$
- $\Delta\sigma(\text{fin}) \left[\frac{1}{ts+1} \right] = \Delta Z$
- $\Delta U2 - \Delta Z = \Delta Y$
- $\Delta U1 - \Delta Y = \Delta X$



- $$\Delta\sigma' = \frac{\Delta X K - \Delta\sigma}{t2}$$
- $$\Delta Z' = \frac{\Delta\sigma * I * N * F - \Delta Z}{t}$$
- $$\Delta Y' = \frac{-\Delta Y - \Delta\sigma * I * N * F - \Delta U2}{t}$$
- $$\Delta X' = \frac{-\Delta X + \Delta\sigma * I * N * F + \Delta U1 - \Delta U2}{t}$$

RIPPLE DAN HARMONISA

- Ripple :

$$RF = \sqrt{\left(\frac{V_{rms}}{V_{ave}}\right)^2 - 1}$$

- Harmonisa :

$$WL = WC$$

$$2 \pi f x (orde) L = \frac{1}{2 \pi f x (orde) C}$$

Kestabilan Kontrol

- $G(s) = \frac{A}{s+K}$

Sistem Stabil apabila nilai pole > 0

$$s+K = 0$$

$$s = -K$$

$$p = -K$$

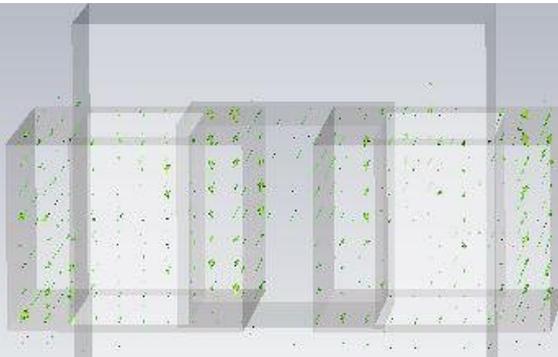
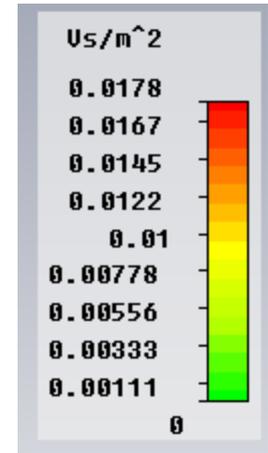
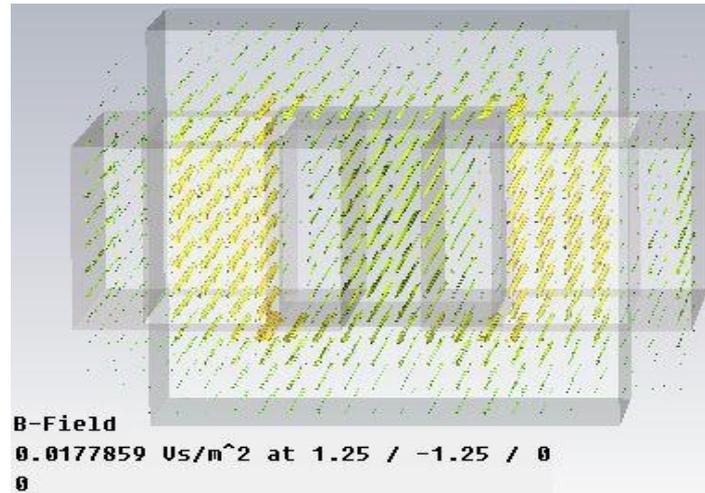
Sehingga stabil jika $k > 0$

$$\tau = -\frac{1}{p}$$

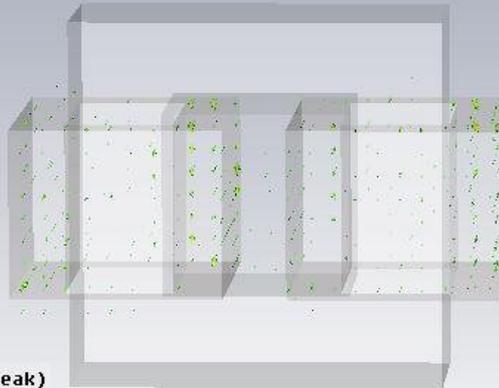
$0 < p < 1$, lebih cepat nilai transienya

Simulasi Trafo Distribusi Kuat Medan

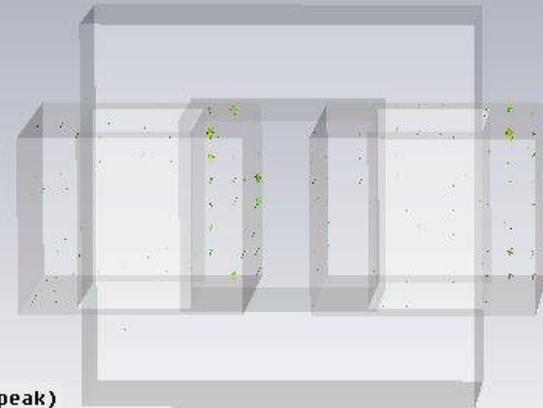
X = 5
Y = 5
Z = 5



B-Field (peak)
0.00130456 Vs/m² at 2.95 / -0.395 / 0
3500
0 degrees



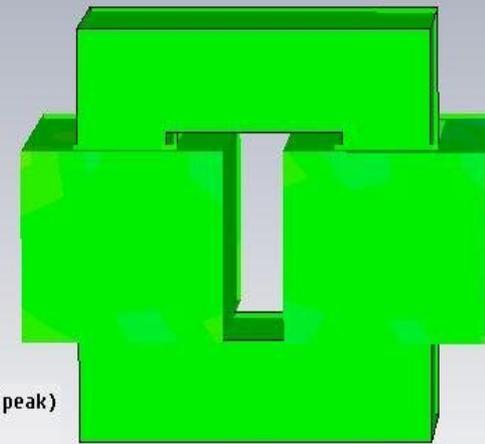
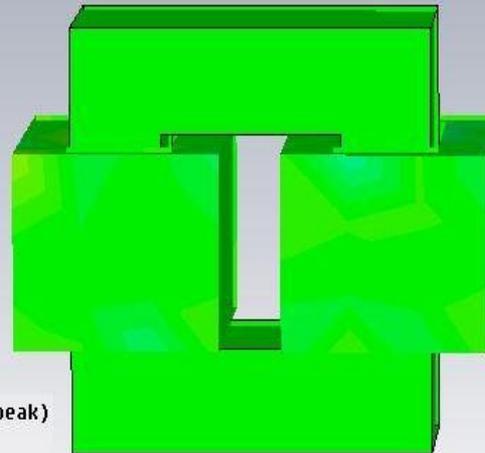
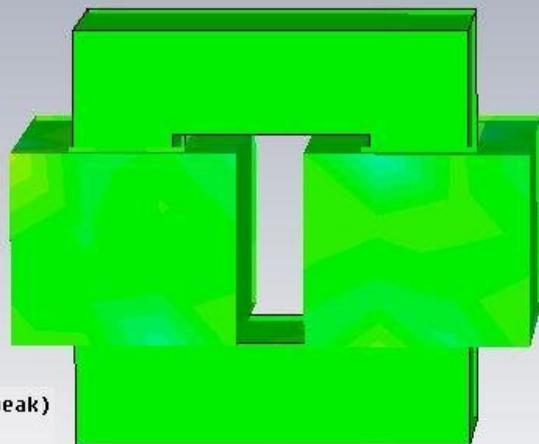
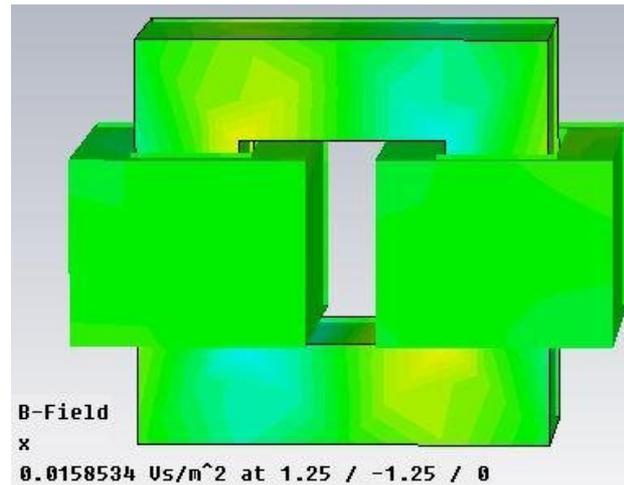
B-Field (peak)
0.00107382 Vs/m² at 2.95 / -0.395 / 0
5000
0 degrees



B-Field (peak)
1.00057416 Vs/m² at 2.95 / -0.395 / 0
2000
0 degrees

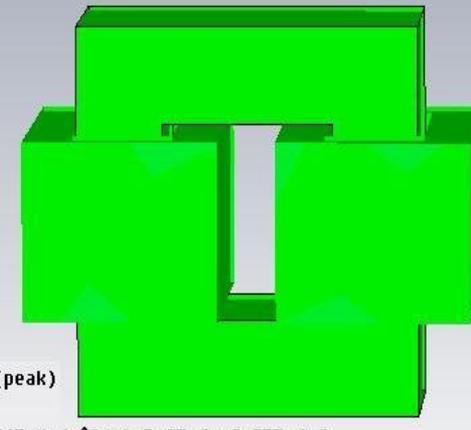
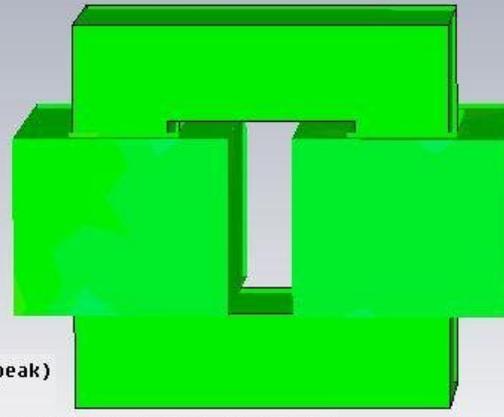
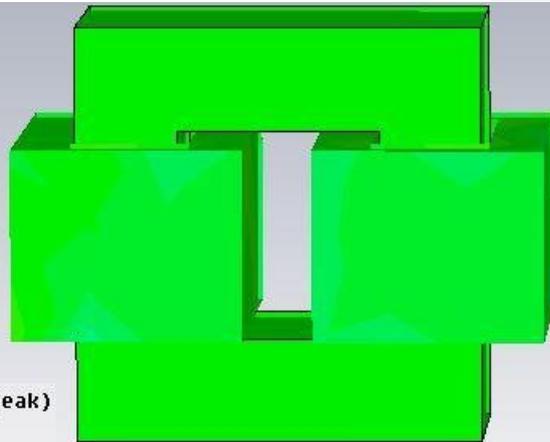
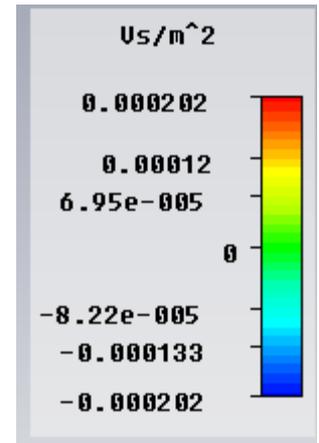
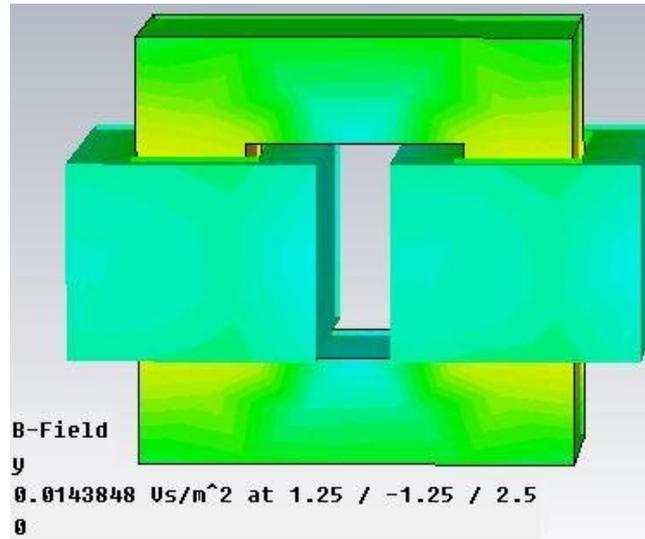
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Medan

Sumbu X

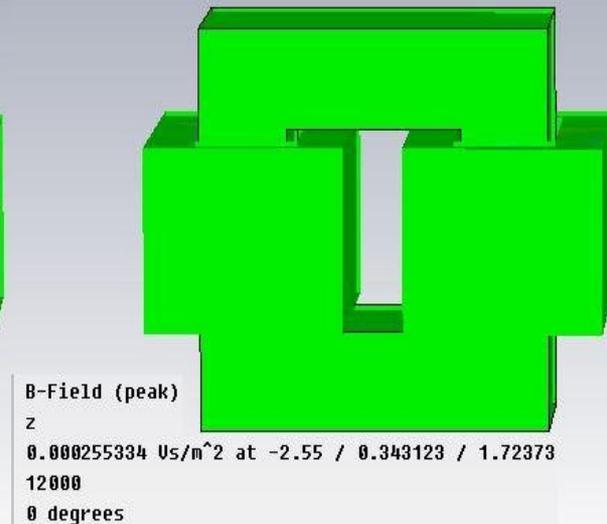
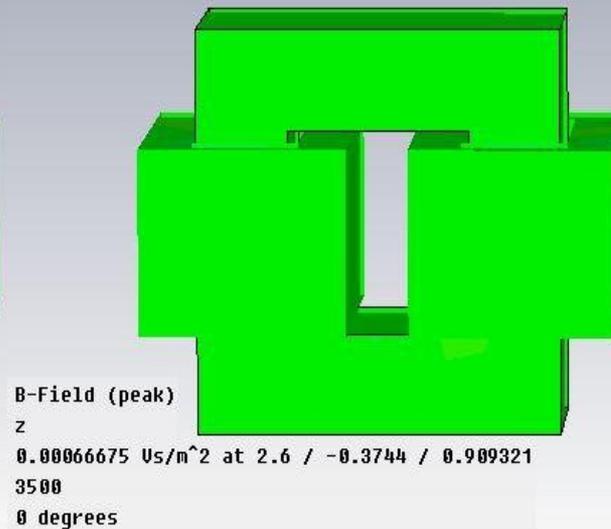
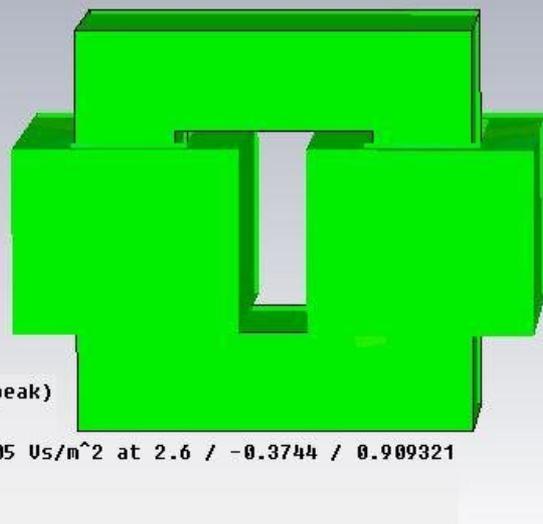
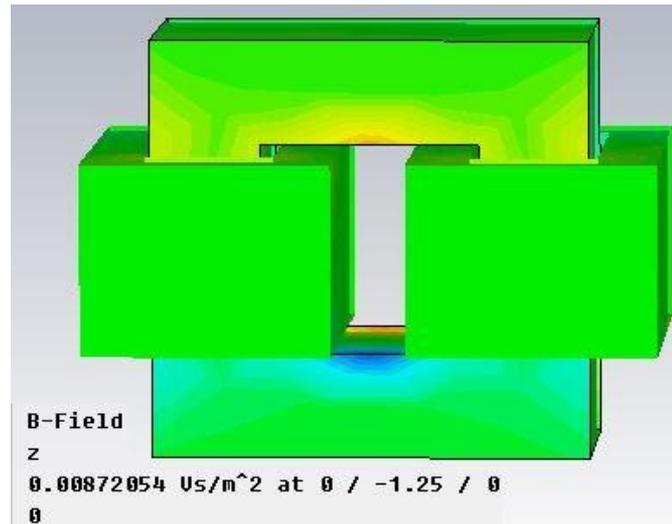


Simulasi Trafo Distribusi Kuat Medan

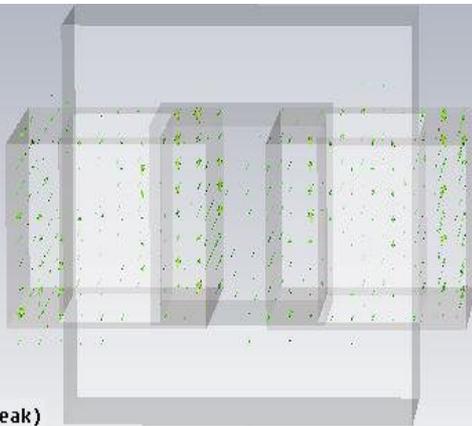
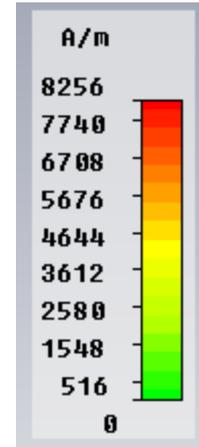
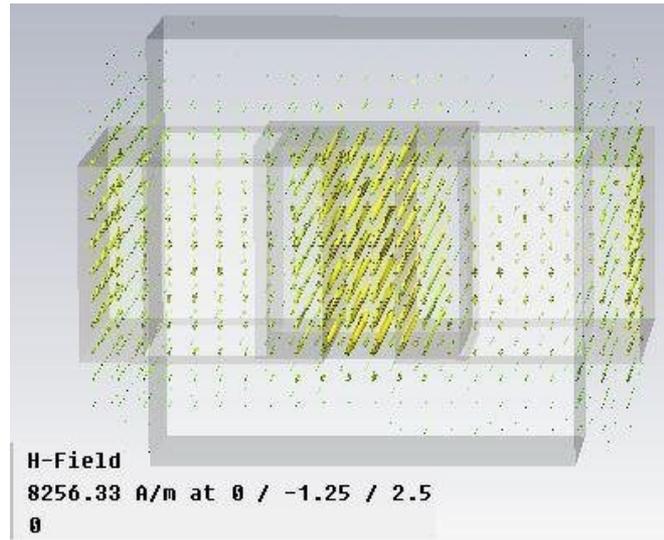
Sumbu Y



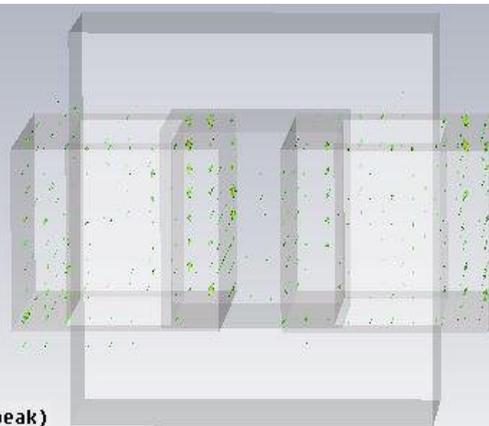
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Medan Sumbu Z



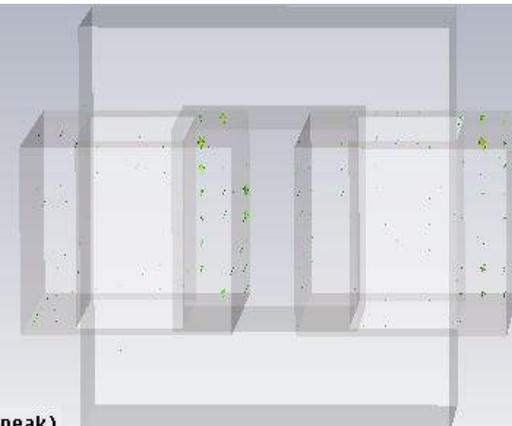
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Kerapatan Arus Medan



H-Field (peak)
1038.13 A/m at 2.95 / -0.395 / 0
3500
0 degrees

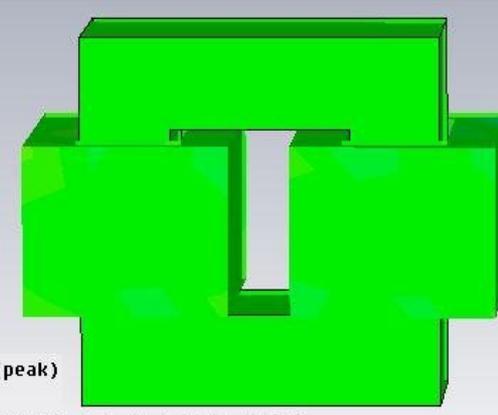
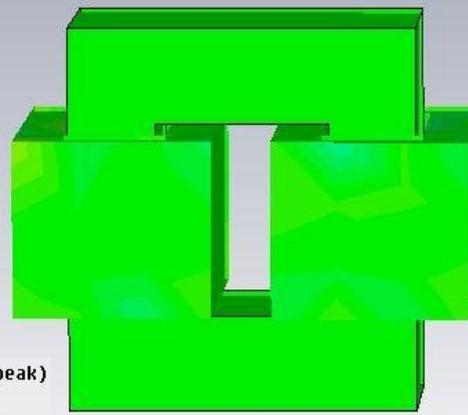
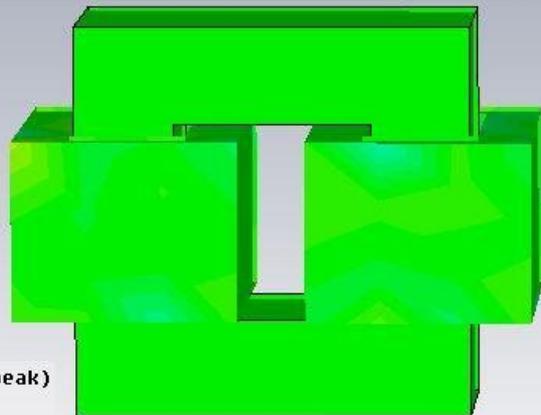
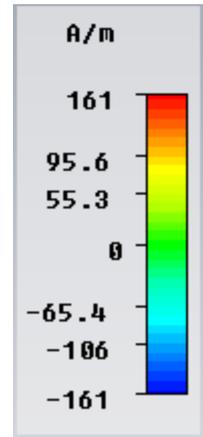
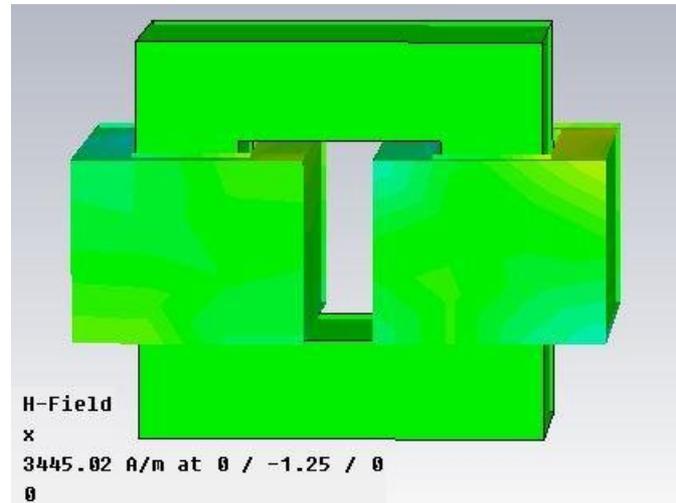


H-Field (peak)
854.52 A/m at 2.95 / -0.395 / 0
5000
0 degrees

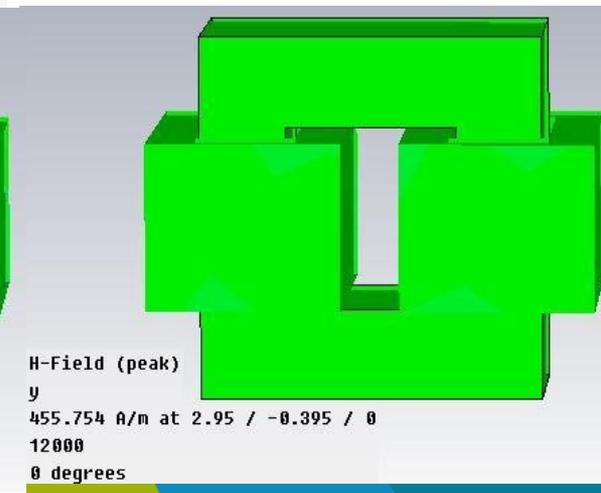
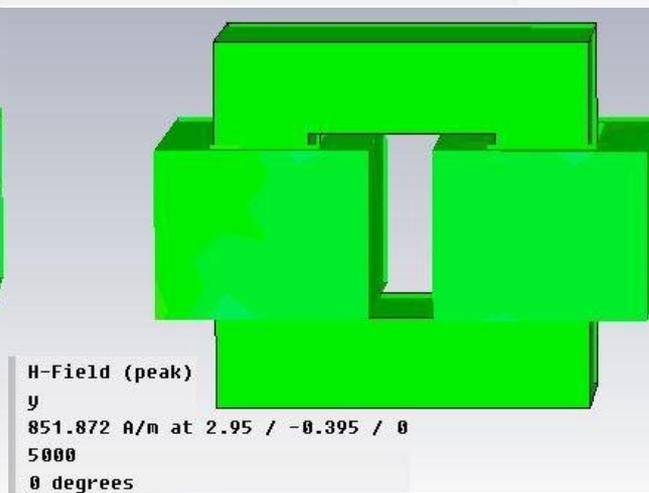
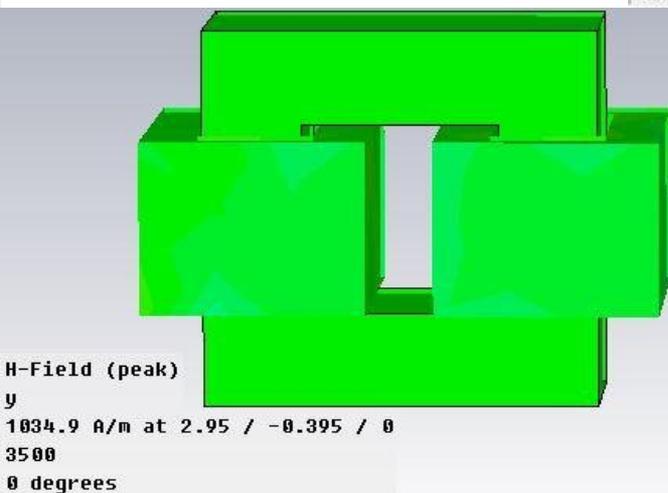
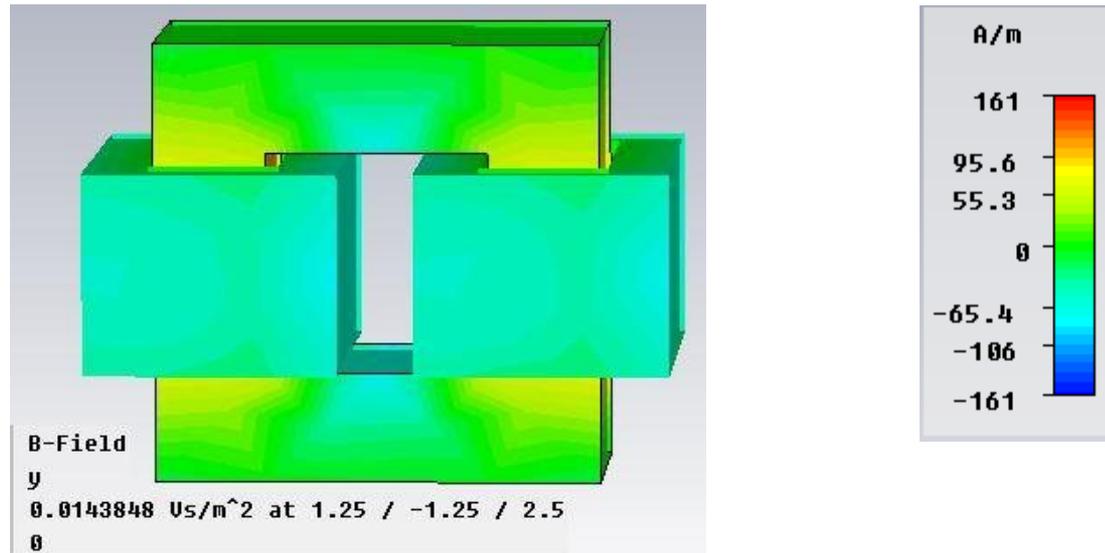


H-Field (peak)
456.902 A/m at 2.95 / -0.395 / 0
12000
0 degrees

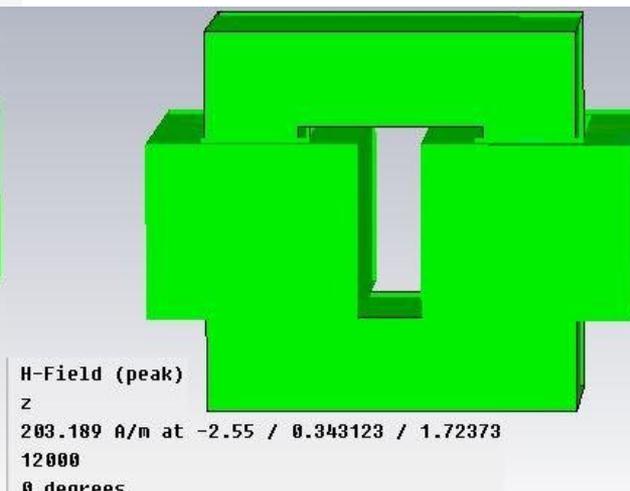
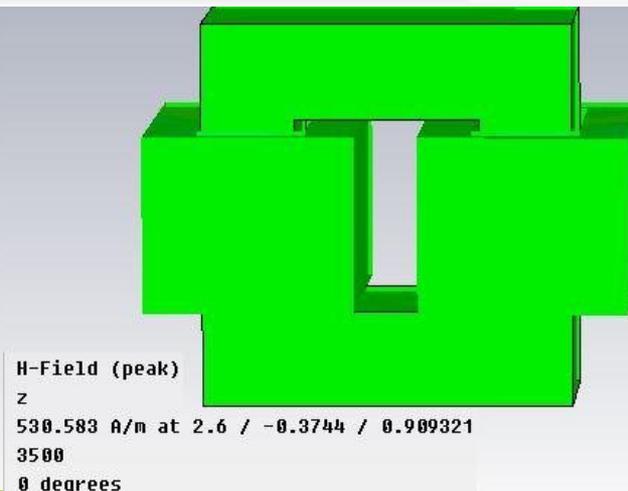
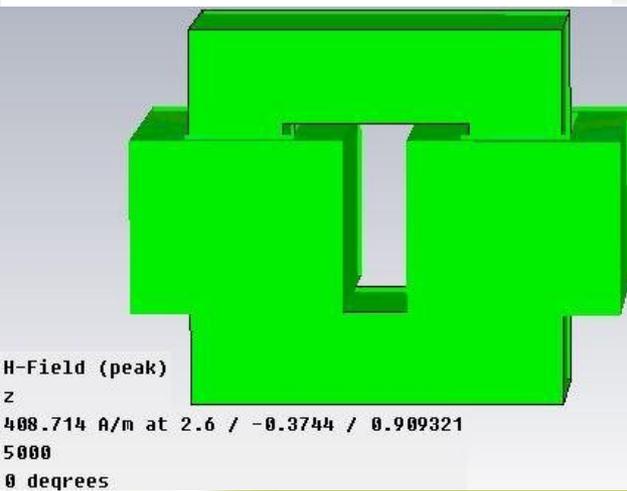
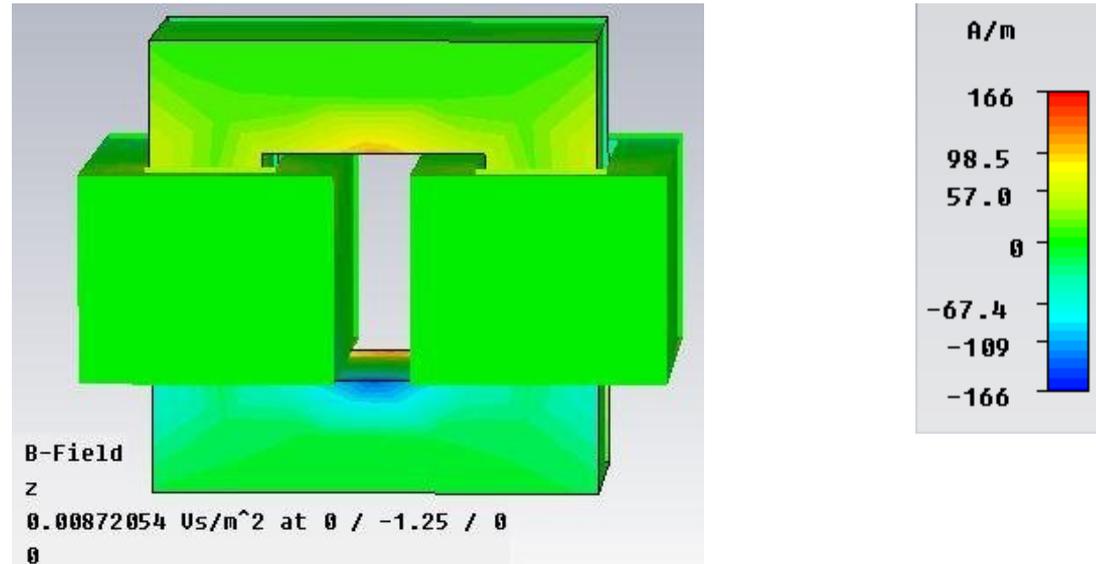
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Kerapatan Arus Medan Sumbu X



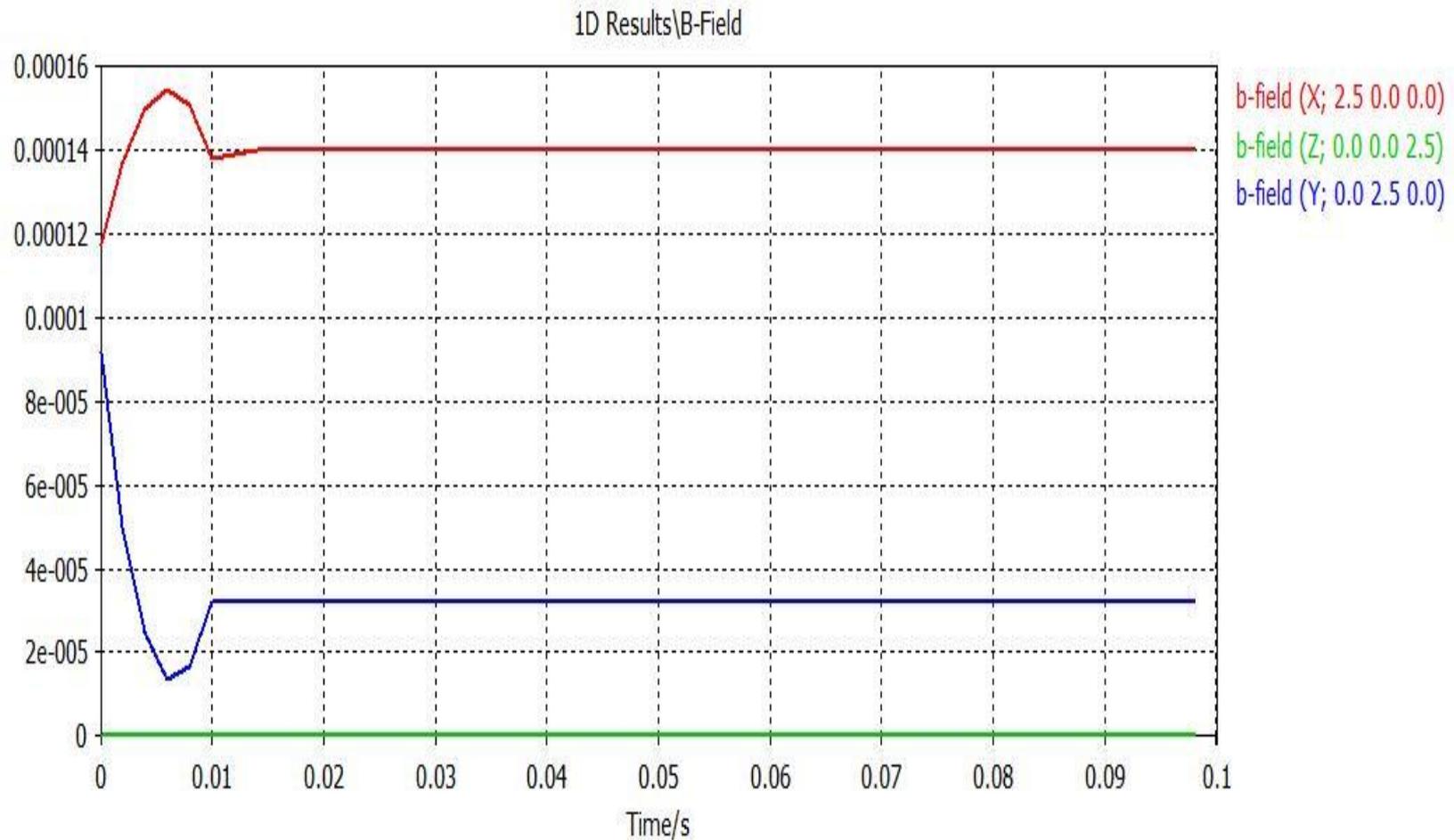
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Kerapatan Arus Medan Sumbu Y



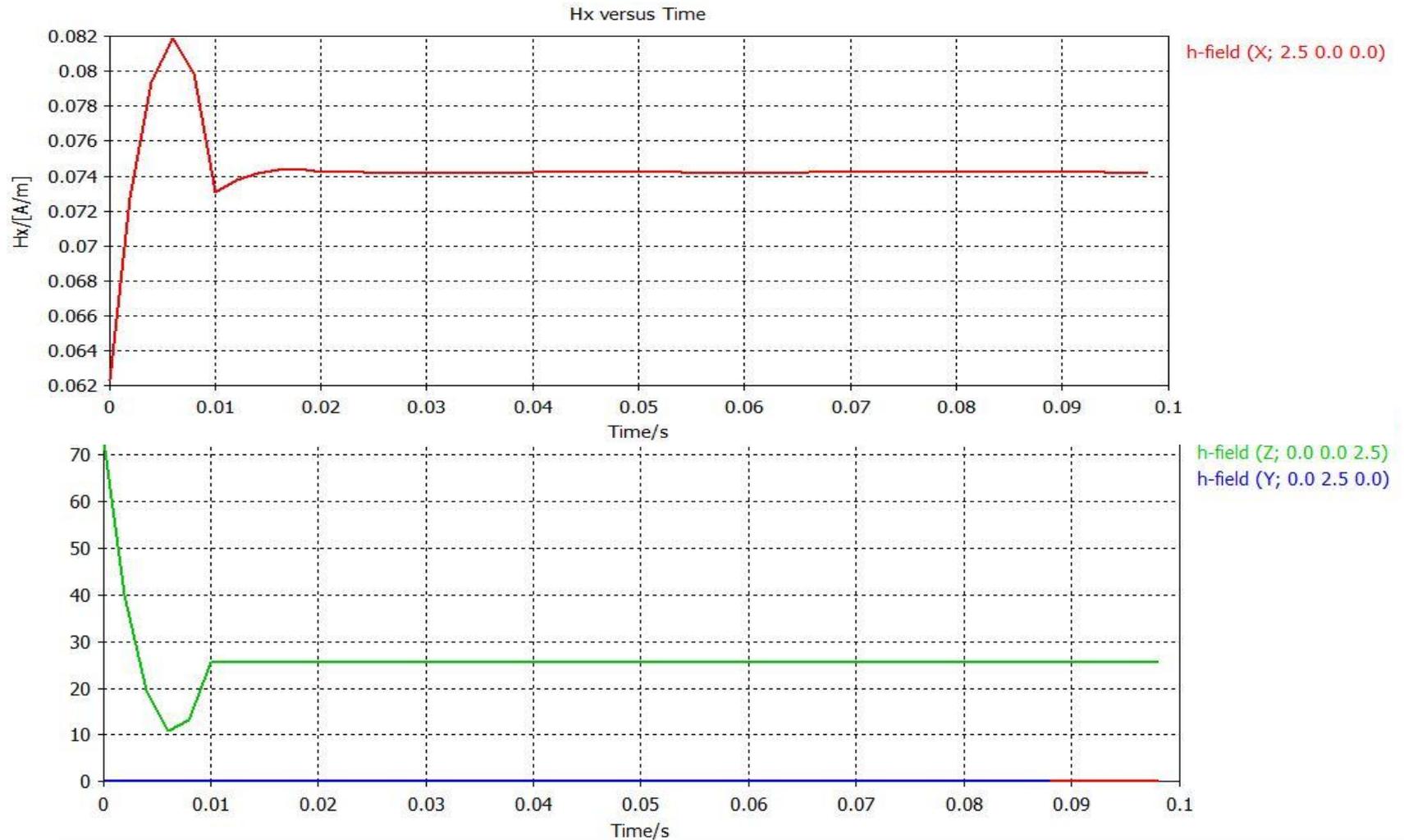
Simulasi Trafo Distribusi Kuat Kerapatan Arus Medan Sumbu Z



Kurva Karakteristik Kuat Medan Hasil Simulasi



Kurva Karakteristik Kuat Arus Medan Hasil Simulasi



Transformator

Faraday's law :

$$e_{\text{ind}} = \frac{d\lambda}{dt}, \text{ flux linkage}$$

$$\lambda = N\phi$$

$$e_{\text{ind}} = \frac{dN\phi}{dt}$$

Voltage ratio :

$$\phi = \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt$$

Transformator

Voltage ratio :

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\phi} &= \frac{1}{N_p} \int v_p(t) dt, v_p(t) = V_m \cos \omega t \\ &= \frac{1}{N_p} \int V_m \cos \omega t dt\end{aligned}$$

Steady state : $V_m \sin \omega t$

$$\boldsymbol{\phi} = \frac{1}{N_p} \int V_m \sin \omega t dt$$

Transformator

$$I = \frac{\mathcal{F}}{Np}$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int i^2 dt}$$

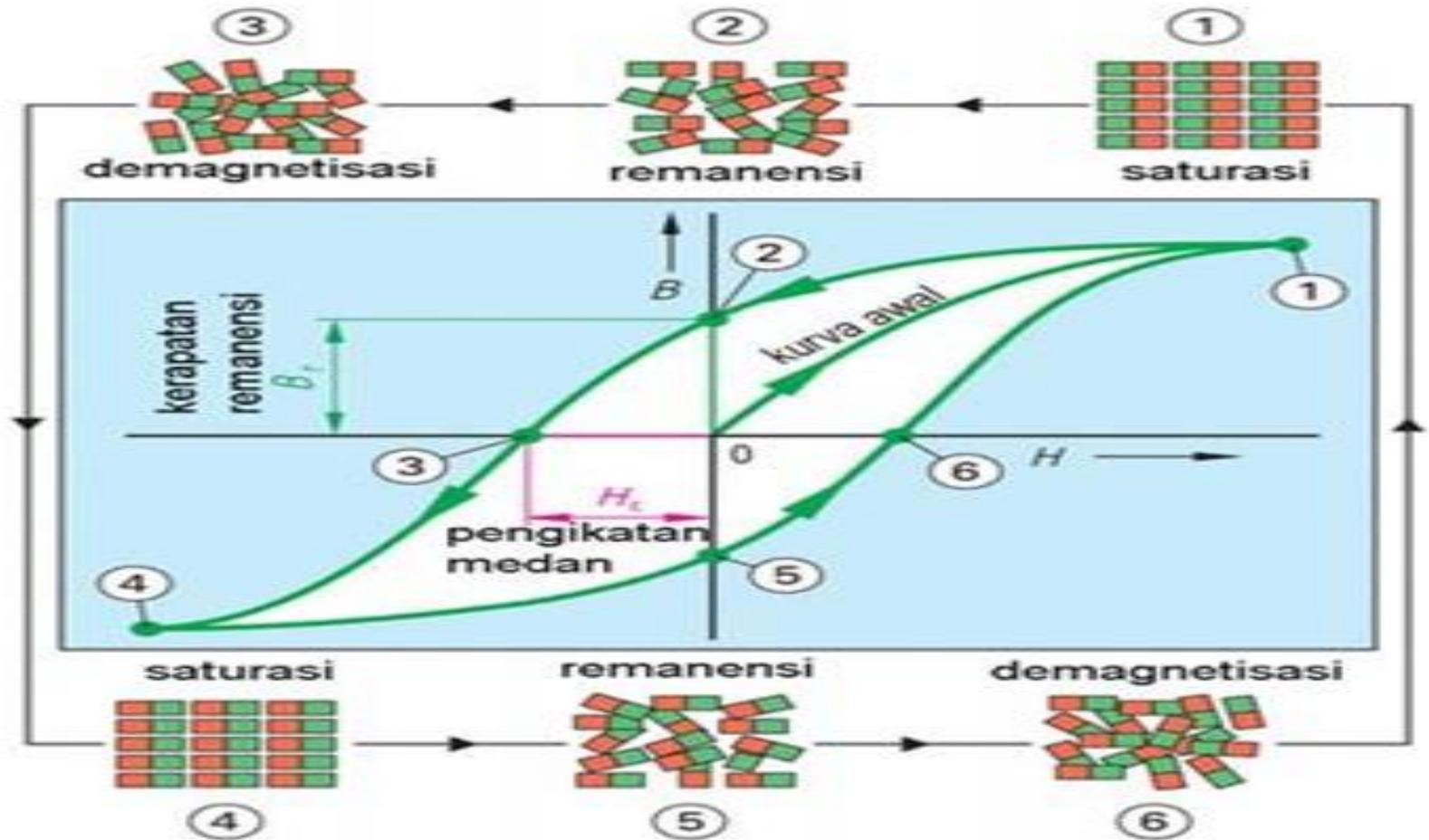
Hubungan Kuat Medan dan Kerapatan Arus :

$$\boldsymbol{\phi} = B A$$

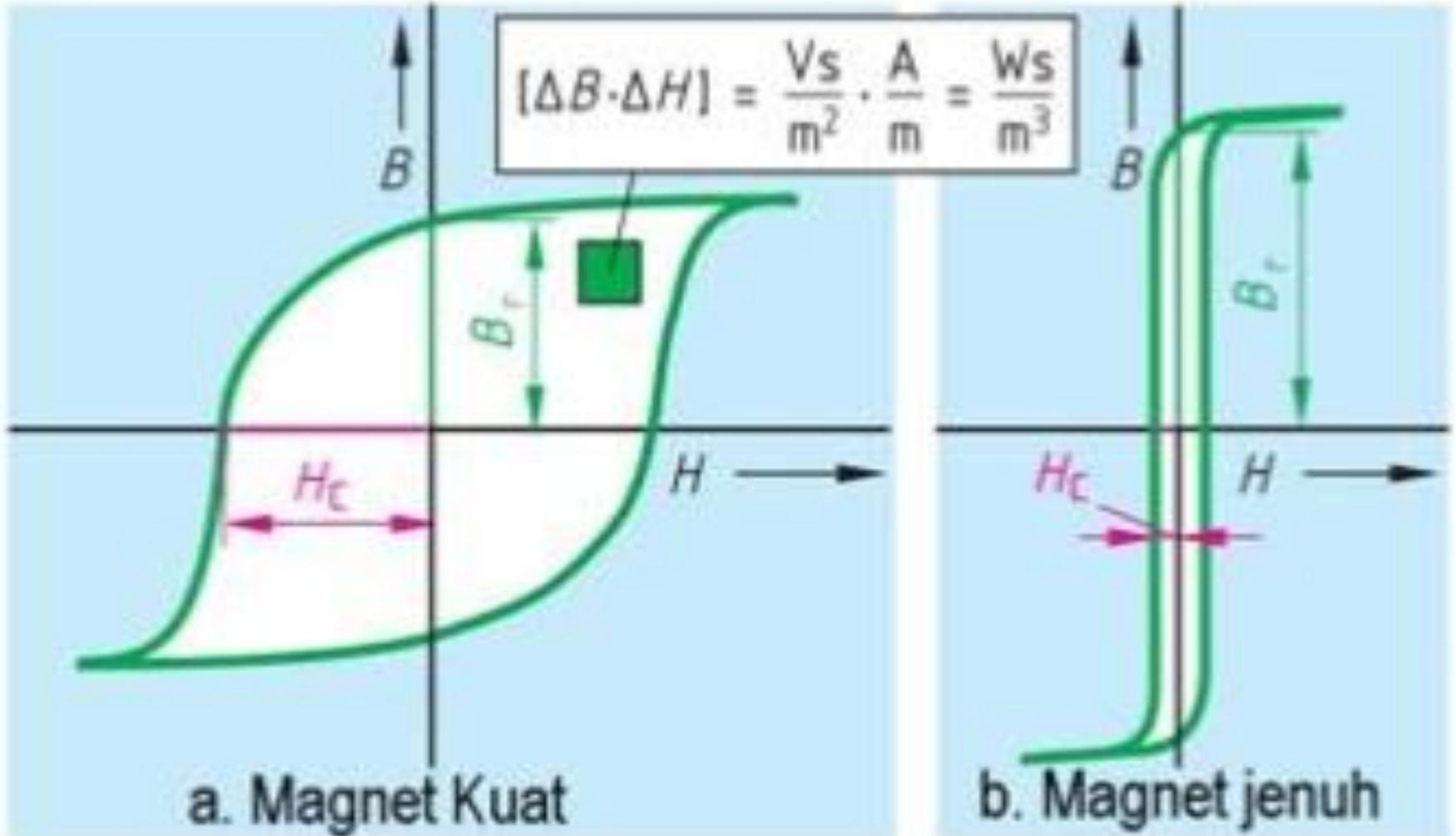
$$B = \boldsymbol{\mu} H$$

$$H = N I$$

Transformator



Transformator



Transformator

