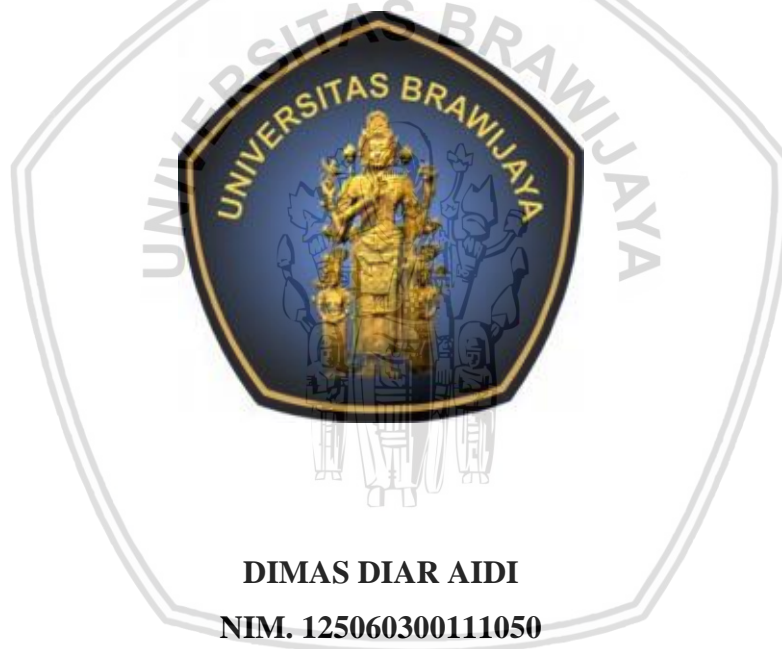


**ANALISIS PENGARUH BEBAN NON-LINIER TERHADAP RUGI  
TRANSFORMATOR SATU FASA MENGGUNAKAN PERANGKAT  
LUNAK BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DIMAS DIAR AIDI**  
**NIM. 125060300111050**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2018**



Lembar Pengesahan



JUDUL SKRIPSI :

ANALISIS PENGARUH BEBAN NON-LINIER TERHADAP RUGI TRANSFORMATOR SATU FASA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK BERBASIS METODE ELEMEN HINGGA

Nama Mahasiswa : Dimas Diar Aidi  
NIM : 125060300111050  
Program Studi : Teknik Elektro  
Konsentrasi : Teknik Energi Elektrik

KOMISI PEMBIMBING :

Dosen Pembimbing : Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. 

TIM DOSEN PENGUJI :

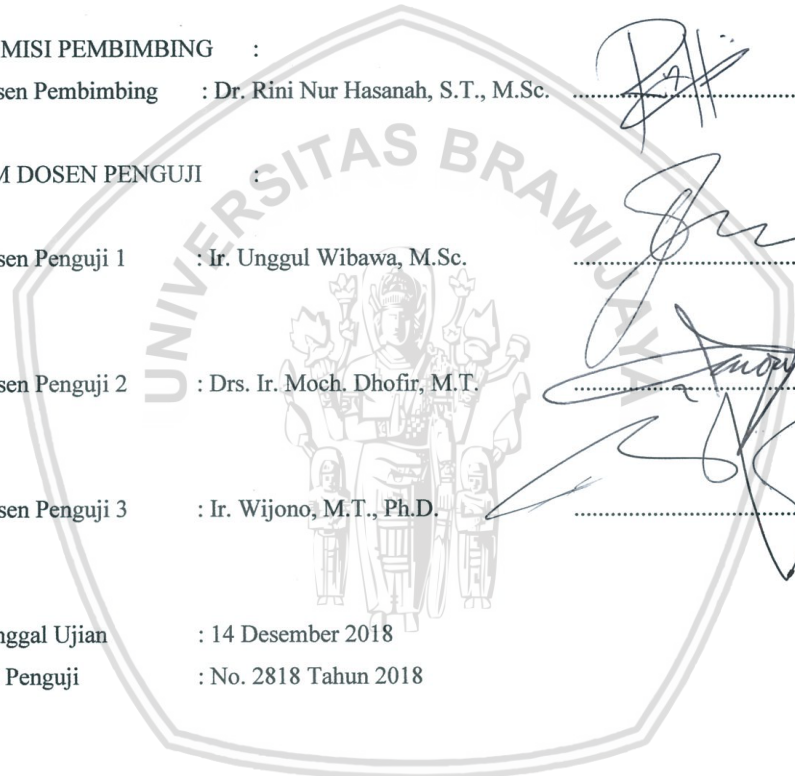
Dosen Penguji 1 : Ir. Unggul Wibawa, M.Sc. 

Dosen Penguji 2 : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. 

Dosen Penguji 3 : Ir. Wijono, M.T., Ph.D. 

Tanggal Ujian : 14 Desember 2018

SK Penguji : No. 2818 Tahun 2018



**PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan, dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam naskah skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

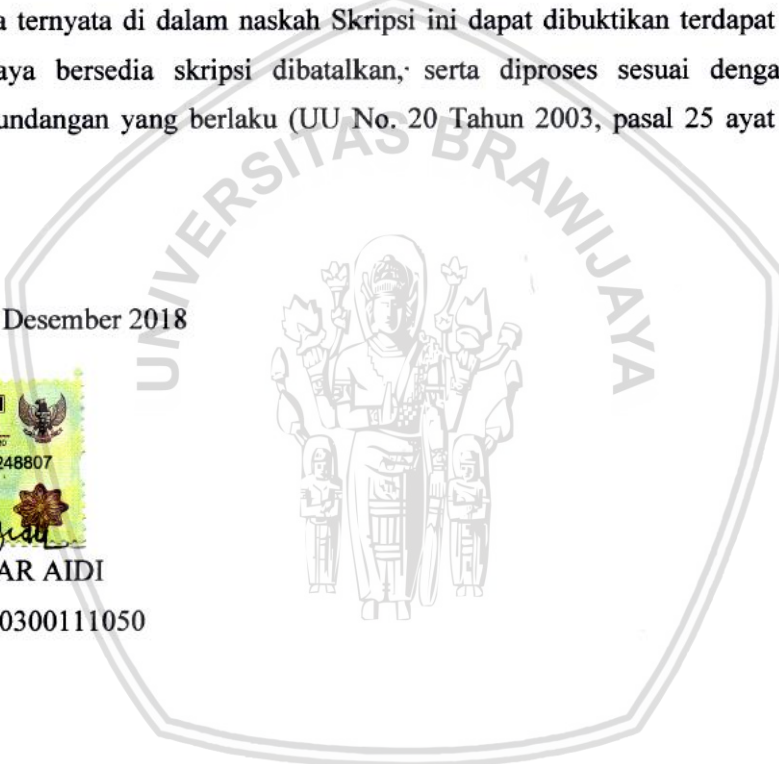
Malang, 21 Desember 2018

Mahasiswa.



**DIMAS DIAR AIDI**

NIM 125060300111050





*Teriring Ucapan Terima Kasih Kepada:  
Ayahanda dan Ibunda tercinta*



## RINGKASAN

**Dimas Diar Aidi**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2018, *Pengaruh Beban Non-Linier Terhadap Rugi Transformator Satu Fasa Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Terbatas*, Dosen Pembimbing: Dr. Rini Nur Hasanah, ST.,M.Sc.

Transformator adalah salah satu peralatan penting dalam system daya. Transformator berfungsi menyalurkan daya dari satu sisi (primer) kesisi lainnya (sekunder) sesuai dengan level tegangan yang dibutuhkan misalnya untuk menyuplai daya dari jaringan rendah beban. Jenis beban sangat mempengaruhi kinerja transformator. Pada zaman yang semakin maju ini, banyak bermunculan beban non linier yang menghasilkan harmonisa pada arusnya. Arus yang mengalir pada transformator yang dibebani non linier tidak berbanding lurus dengan penambahan atau penurunan nilai tegangan (nonlinier) atau dapat dikatakan bahwa bentuk gelombang masukan dan keluarannya tidak sama. Rugi ini perlu diketahui oleh perancang atau pemelihara transformator untuk evaluasi kinerja transformator tersebut sebelum dibuat transformator tersebut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana cara mencari rugi dan pengaruh distribusi medan magnet terhadap rugi terhadap efisiensi menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen terbatas. Perangkat lunak yang digunakan adalah *FEMM* seri 4.2. Perangkat lunak ini menggunakan prinsip metode elemen terbatas dalam menganalisis suatu benda yang akan dianalisis yaitu menggunakan elemen-elemen hingga yang banyaknya sesuai luas benda tersebut dan digunakan persamaan Maxwell dalam menganalisis permasalahan-permasalahan yang tersedia pada *FEMM*. Rugi transformator yang dianalisis menggunakan *FEMM* memiliki prinsip yang sama dengan persamaan rugi yang ada pada buku-buku mengenai mesin listrik dimana arus mengalir pada kumparan akan menghasilkan rugi berbeban sedangkan rugi inti dipengaruhi oleh besar kecilnya kerapatan medan magnet. Oleh karena itu untuk menghasilkan rugi dan medan magnet dibutuhkan masukan berupa arus pada kedua kumparan transformator. Arus yang mengalir pada kumparan primer dan arus yang mengalir pada kumparan sekunder dihitung berdasarkan analisis rangkaian transformator berbeban menggunakan Hukum Ohm dan Hukum Kirchoff. Arus yang diserap oleh beban nonlinier berbeda dengan arus yang diserap beban linier. Beban nonlinier menghasilkan harmonisa pada arusnya sedangkan beban linier tidak. Harmonisa pada arus tersebut menyebabkan adanya arus-arus dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar (100 Hz). Arus-arus tersebut dapat dianalisis menggunakan analisis *Fourier*. Hal inilah mengakibatkan rugi berlebih pada transformator berbeban nonlinier. Selain itu dengan adanya arus-arus tersebut dihasilkan kerapatan medan pada inti beragam pada tiap frekuensi harmonisnya yang mana dapat mempengaruhi efisiensi dari transformator berbeban nonlinier. Oleh karena itu rugi dan kerapatan medan magnet pada inti transformator berbeban nonlinier lebih besar daripada rugi dan kerapatan medan pada inti transformator berbeban linier. Selain itu untuk mendapatkan hasil rugi yang sesuai dengan yang sesungguhnya diperlukan penjelasan mengenai spesifikasi transformator yang lebih rinci mengenai inti dan ukuran-ukuran pada bagian-bagian transformator.

Kata kunci: Beban Non-Linier, Rugi Transformator, Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Terbatas, Medan Magnet.

## SUMMARY

**Dimas Diar Aidi**, Department Of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University Of Brawijaya, December 2018, *Effect of Non-linear Load on Loss of Single-Phase Transformers Using Finite Element Method-Based Software*, Supervisor :Dr. Rini Nur Hasanah, ST.,M.Sc.

*Transformer is one of the important equipment in the power system. The transformer functions to channel power from one side (primary) to the other side (secondary) according to the required voltage level for example to supply power from a low-voltage network. The type of load greatly affects the performance of the transformer. In this increasingly advanced era, many non-linear loads emerge which produce harmonics in the current. The current flowing in a transformer that supply nonlinear load is not directly proportional to the addition or decrease in the value of the voltage (nonlinear) or it can be said that the waveforms of the input and output are not the same. This loss needs to be known by the designer or maintainer of the transformer to evaluate the performance of the transformer before the transformer is made. This study aims to find out how to find losses and the effect of magnetic field distribution on losses on efficiency using limited element method based software. The software used is FEMM 4.2 series. This software uses the principle of a finite element method in analyzing an object to be analyzed, namely using elements up to the number according to the area of the object and using Maxwell's equation in analyzing the problems available on FEMM. The loss of the transformer analyzed using FEMM has the same principle as the loss equation in the books regarding the electric engine where the current flowing in the coil will result in a weighted loss while the core loss is affected by the size of the magnetic field density. Therefore to produce a loss and a magnetic field input is needed in the form of current in both transformer coils. The current flowing in the primary coil and the current flowing in the secondary coil are calculated based on the analysis of the load transformer circuit using Ohm's Law and Kirchoff's Law. The current absorbed by the nonlinear load is different from the current absorbed by the linear load. Nonlinear loads produce harmonics in the current while linear loads do not. Harmonics in these currents cause currents with multiples of the base frequency (100 Hz). These currents can be analyzed using Fourier analysis. This results in excessive loss of the transformer that supply nonlinear load. In addition, with the presence of these currents the resulting core density at the core varies at each harmonic frequency which can affect the efficiency of the transformer that supply nonlinear load. Therefore the loss and density of the magnetic field in the core of transformer that supply nonlinear load is greater than the loss and field density in core of the transformer that supply linear load. In addition, to obtain a loss that is in accordance with the actual explanation of the transformer specifications is needed, which is more detailed about the core and the sizes of the transformer parts*

**Keywords:** Non-linear Load, Loss of Transformer, Finite Element Method-Based Software, Magnetic Field Distribution





## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Analisis Pengaruh Beban Non Linier Terhadap Rugi Transformator Satu Fasa Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Terbatas” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Keluarga tercinta Ayahanda Suaidi dan Ibunda Minarni yang selalu memberikan kasih sayang dan do'anya yang tiada akhir, serta Adik Alawy, Tante Tutik, Bude Lilik dan Bude Ermala atas segala macam dukungan yang telah diberikan
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. dan Ibu Nurussa'adah selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
3. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini nur Hasanah, ST., M.Sc. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
5. Ibu Rahmadwati ST., MT., Ph.D selaku dosen pembimbing akademik yang telah membimbing dan memotivasi penulis
6. Kawan-kawan Asisten Lab. Mesin Elektrik dan Lab. Elektronika Daya yang telah membantu kelancaran pengerjaan skripsi ini.
7. Seluruh kawan-kawan angkatan 2012 (Voltage), terutama teman-teman konsentrasi Teknik Energi Elektrik (Power 2012) yang telah memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi ini.
8. Kawan-kawan Klinik Nikah Indonesia yang telah mewarnai hari-hari saya.

Disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dan diharapkan agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, 10 Desember 2018

Penulis



## DAFTAR ISI

<b><u>KATA PENGANTAR</u></b> .....	i
<b><u>DAFTAR ISI</u></b> .....	iii
<b><u>DAFTAR GAMBAR</u></b> .....	vii
<b><u>DAFTAR TABEL</u></b> .....	ix
<b><u>DAFTAR LAMPIRAN</u></b> .....	xiii
<b><u>BAB I PENDAHULUAN</u></b> .....	1
1.1. <u>Latar Belakang</u> .....	1
1.2. <u>Rumusan Masalah</u> .....	2
1.3. <u>Batasan Masalah</u> .....	2
1.4. <u>Tujuan</u> .....	3
1.5. <u>Manfaat</u> .....	3
1.6. <u>Sistematika Pembahasan</u> .....	3
<b><u>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</u></b> .....	5
2.1. <u>Jenis beban</u> .....	5
2.1.1. <u>Beban Linier</u> .....	5
2.1.2. <u>Beban Non Linier</u> .....	6
2.2. <u>Analisis Fourier Bentuk Gelombang</u> .....	10
2.3. <u>Perhitungan Daya Beban</u> .....	11
2.4. <u>Efek Beban Non Linier terhadap Transformator</u> .....	12
2.5. <u>Gambaran Umum Medan Elektromagnetik</u> .....	13
2.5.1. <u>Analisis Vektor</u> .....	13
2.5.2. <u>Medan Elektromagnetik</u> .....	14
2.5.3. <u>Teorema Poynting</u> .....	17
2.6. <u>Metode Elemen Hingga</u> .....	17
2.7. <u>Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga</u> .....	21



2.7.1. <u>Persamaan Differensial Parsial yang Digunakan dalam FEMM</u> .....	21
2.7.2. <u>Tampilan Interaktif</u> .....	22
2.8. <u>Transformator Satu Fasa</u> .....	26
2.8.1. <u>Prinsip Kerja Transformator</u> .....	27
2.8.2. <u>Transformator Ideal</u> .....	28
2.8.3. <u>Transformator Praktik dan Rangkaian Pengganti Transformator</u> .....	29
2.8.4. <u>Pengujian Transformator</u> .....	32
2.9. <u>Analisis Rugi Transformator Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga</u> .....	33
2.10. <u>Rugi Transformator</u> .....	37
2.10.1. <u>Rugi Berbeban</u> .....	37
2.10.1.1. <u>Rugi <math>I^2R</math> /Rugi Resistif</u> .....	38
2.10.1.2. <u>Rugi <i>stray</i></u> .....	38
2.11. <u>Efisiensi Transformator</u> .....	38
<b><u>BAB III METODE PENELITIAN</u></b> .....	41
3.1. <u>Studi Literatur</u> .....	43
3.2. <u>Perencanaan Simulasi</u> .....	43
3.2.1. <u>Perencanaan Simulasi I</u> .....	43
3.2.2. <u>Perencanaan Simulasi II</u> .....	48
3.3. <u>Simulasi</u> .....	48
3.3.1. <u>Simulasi I</u> .....	49
3.3.2. <u>Simulasi II</u> .....	49
3.4. <u>Analisis Data</u> .....	50
3.5. <u>Kesimpulan dan Saran</u> .....	50
<b><u>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</u></b> .....	49
4.1. <u>Data Hasil Percobaan</u> .....	49
4.1.1. <u>Data Hasil Percobaan Transformator Tanpa Beban</u> .....	49

4.1.2	<u>Data Hasil Percobaan Transformator Berbeban Penuh</u> .....	50
4.2.	<u>Perhitungan Parameter Transformator dan Pembentukan Rangkaian Pengganti Transformator</u> .....	50
4.3.	<u>Perhitungan Amplitudo Arus Beban Linier dan Nonlinier</u> .....	52
4.3.1.	<u>Perhitungan Amplitudo Arus Transformator Berbeban Linier</u> .....	53
4.3.2.	<u>Perhitungan Amplitudo Arus Transformator Berbeban Nonlinier</u> .....	55
4.4.	<u>Analisis Rugi Transformator Berbeban Hasil Simulasi</u> .....	60
4.4.1.	<u>Analisis Rugi Transformator Berbeban Linier Hasil Simulasi</u> .....	60
4.4.2.	<u>Analisis Rugi Transformator Berbeban Nonlinier Hasil Simulasi</u> .....	61
4.5.	<u>Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator dan Efisiensi</u> .....	63
4.5.1.	<u>Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator Berbeban Linier dan Efisiensi</u> .....	64
4.5.2.	<u>Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator Berbeban Linier dan Efisiensi</u> .....	68
<b><u>BAB V PENUTUP</u></b> .....		89
5.1.	<u>Kesimpulan</u> .....	89
5.2.	<u>Saran</u> .....	89
<b><u>DAFTAR PUSTAKA</u></b> .....		91
<b><u>LAMPIRAN</u></b> .....		93











## DAFTAR GAMBAR

No	Judul	Halaman
<u>Gambar 2. 1</u>	<u>Gelombang tegangan dan arus beban linier</u>	5
<u>Gambar 2. 2</u>	<u>Rangkaian listrik dengan sumber bolak-balik dan beban linier</u>	6
<u>Gambar 2. 3</u>	<u>Rangkaian penyearah satu fasa gelombang penuh beban R-L</u>	7
<u>Gambar 2. 4</u>	<u>Gelombang tegangan masukan <math>v_s</math>, tegangan pada sisi R-L <math>v_o</math> dan arus beban <math>i_o</math> beban nonlinier</u>	7
<u>Gambar 2. 5</u>	<u>Dasar, Harmonisa kedua, dan Harmonisa ketiga</u>	9
<u>Gambar 2. 6</u>	<u>Hasil penjumlahan gelombang fundamental dengan harmonik Ketiga</u>	9
<u>Gambar 2. 7</u>	<u>Simetri Planar (a) dan Simetri Axial (b)</u>	18
<u>Gambar 2. 8</u>	<u>Contoh penerapan kondisi Neumann dalam menyederhanakan daerah analisis (a)sebelum disederhanakan (b)setelah disederhanakan</u>	19
<u>Gambar 2. 9</u>	<u>(a) Integral luasan pada bidang 2D dan (b) Integral garis</u>	20
<u>Gambar 2.10</u>	<u>Toolbar untuk menggambar dan plot subdaerah analisis</u>	23
<u>Gambar 2.11</u>	<u>Kotak pendefinisian properti</u>	23
<u>Gambar 2.12</u>	<u>Toolbar Button mode analisis</u>	24
<u>Gambar 2.13</u>	<u>Toolbar Button mode grafis</u>	24
<u>Gambar 2.14</u>	<u>Toolbar button untuk plot grafik, integral, dan keterangan rangkaiannya</u>	25
<u>Gambar 2.15</u>	<u>Pembentukan jala-jala pada FEMM</u>	25
<u>Gambar 2.16</u>	<u>a. Transformator tipe inti dan b. Transformator tipe cangkang</u>	26
<u>Gambar 2.17</u>	<u>Transformator ideal yang tersambung dengan saklar dan beban</u>	27
<u>Gambar 2.18</u>	<u>Transformator satu fasa</u>	29



<u>Gambar 2.19</u>	Rangkaian pengganti transformator dengan referensi primer transformator.....	29
<u>Gambar 2.20</u>	Rangkaian pengganti transformator dengan referensi primer transformator .....	31
<u>Gambar 2.21</u>	Rangkaian pengganti transformator tanpa beban.....	31
<u>Gambar 2.22</u>	Rangkaian pengganti transformator berbeban penuh.....	32
<u>Gambar 2.23</u>	Penyederhanaan bentuk transformator yang akan dianalisis berdasarkan simetri. (a) 2D transformator, (b) Setengah bagian dari gambar (a), (c) Seperempat bagian dari gambar (a) .....	33
<u>Gambar 3. 1</u>	Diagram alir penelitian.....	40
<u>Gambar 3. 2</u>	Bentuk dan ukuran transformator yang akan dianalisis dan Bagian-bagian transformator.....	42
<u>Gambar 3. 3</u>	Diagram alir percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh.....	44
<u>Gambar 3. 4</u>	Diagram percobaan tanpa beban.....	45
<u>Gambar 3. 5</u>	Diagram percobaan transformator beban penuh.....	46
<u>Gambar 3. 6</u>	Diagram alir aimulasi FEMM.....	47
<u>Gambar 4. 1</u>	Rangkaian pengganti transformator dengan primer sebagai referensi.....	52
<u>Gambar 4.2</u>	Rangkaian transformator berbeban linier dengan primer sebagai referensi.....	55
<u>Gambar 4. 3.</u>	Rangkaian transformator berbeban nonlinier dengan primer sebagai referensi.....	57
<u>Gambar 4.4</u>	Grafik rugi transformator berbeban linier.....	60
<u>Gambar 4.5</u>	Grafik rugi transformator berbeban nonlinier.....	63
<u>Gambar 4.6</u>	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Linier 1</i> .....	64
<u>Gambar 4.7</u>	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Linier 2</i> .....	65
<u>Gambar 4.8</u>	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Linier 3</i> .....	66
<u>Gambar 4.9</u>	Grafik rugi inti pada tiap jenis pembebanan linier transformator...67	
<u>Gambar 4.10</u>	Grafik efisiensi pada transformator berbeban linier.....	68
<u>Gambar 4.11</u>	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i> pada harmonisa orde ke-0.....	69
<u>Gambar 4.12</u>	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i>	



	pada harmonisa orde pertama.....	69
Gambar 4.13	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i> pada harmonisa orde kedua. ....	70
Gambar 4.14	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i> pada harmonisa orde keempat.....	70
Gambar 4.15	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i> pada harmonisa orde keenam.....	71
Gambar 4.16	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 1</i> pada harmonisa orde kedelapan.....	72
Gambar 4.17	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada orde ke-0.....	72
Gambar 4.18	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada orde pertama.....	73
Gambar 4.19	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada harmonisa orde kedua.....	74
Gambar 4.20	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada harmonisa orde keempat.....	74
Gambar 4.21	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada harmonisa orde keenam.....	75
Gambar 4.22	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 2</i> pada orde harmonisa orde kedelapan.....	75
Gambar 4.23	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada orde ke-0.....	76
Gambar 4.24	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada orde pertama.....	77
Gambar 4.25	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada orde kedua.....	77
Gambar 4.26	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada harmonisa orde keempat.....	78
Gambar 4.27	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada harmonisa orde keenam.....	78
Gambar 4.28	Distribusi medan magnet transformator berbeban <i>Nonlinier 3</i> pada harmonisa orde kedelapan.....	79
Gambar 4.29	Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada	



	harmonisa orde pertama.....	81
Gambar 4.30	Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada harmonisa orde kedua .....	81
Gambar 4.31	Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada harmonisa orde keempat.....	82
Gambar 4.32	Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada harmonisa orde keenam.....	83
Gambar 4.33	Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada harmonisa orde kedelapan.....	84
Gambar 4.34	Grafik efisiensi transformator pada tiap jenis pembebanan nonlinier transformator.....	87



## DAFTAR TABEL

No	Judul	Halaman
<u>Tabel 4. 1</u>	Data Hasil Percobaan Transformator Tanpa Beban.....	49
<u>Tabel 4. 2</u>	Data Hasil Percobaan Transformator Berbeban Penuh.....	50
<u>Tabel 4. 3</u>	Amplitudo Arus Primer dan Arus Sekunder.....	54
<u>Tabel 4. 4</u>	Hasil Analisis Fourier Transformator Berbeban Nonlinier .....	56
<u>Tabel 4. 5</u>	Amplitudo arus primer dan arus sekunder Transformator Berbeban Nonlinier.....	59
<u>Tabel 4. 6</u>	Rugi transformator berbeban linier.....	60
<u>Tabel 4. 7</u>	Rugi transformator berbeban nonlinier.....	61
<u>Tabel 4. 8</u>	Efisiensi transformator berbeban linier.....	66
<u>Tabel 4. 9</u>	Kerapatan medan magnet maksimum $B_M$ pada tiap jenis pembebanan nonlinier transformator pada tiap jenis orde harmonisa $m$ .....	79
<u>Tabel 4. 10</u>	Efisiensi transformator berbeban nonlinier.....	85



## DAFTAR LAMPIRAN

No	Judul	Halaman
	Lampiran .....	91
	<u>Lampiran 1</u> .....	92
	<u>Lampiran 2</u> .....	94







## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Penggunaan peralatan elektronik sangat pesat saat ini seperti penyearah, pengendali sudut fasa, pengatur *PWM (Pulse Width Modulation)*, *Adjustable Speed Driver*, komputer, *cycloconverter* dan peralatan elektronik lainnya (Pierce, 1996). Peralatan tersebut terkandung komponen seperti dioda, SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), transistor daya dan komponen elektronika lain-lain (Elmoudi, 2006). Ketika peralatan-peralatan tersebut tersambung dengan sumber listrik, peralatan-peralatan tersebut akan menarik arus nonsinusoidal dari sumber tegangan bolak balik yang menyebabkan distorsi pada gelombang arus maupun tegangannya yang disebut sebagai harmonisa (Biricik & Özerdem, 2011). Gelombang yang terdistorsi mengandung unsur gelombang dengan frekuensi dasar dan gelombang dengan frekuensi harmonisa. Gelombang dengan frekuensi dasar adalah gelombang yang sesuai dengan gelombang sumber yaitu 50 atau 60 Hz sedangkan gelombang dengan frekuensi harmonisa ini memiliki frekuensi yang memiliki frekuensi kelipatan dari frekuensi dasar (Cahyani, 2014). Gelombang arus yang mengandung harmonisa ini akan mengakibatkan rugi berlebih pada kumparan transformator (Asrami, Mirzaie, & Akmal, 2010).

Transformator adalah komponen paling penting dalam sistem daya namun seiring pesatnya penggunaan beban nonlinier atau elektronik pada sistem, distorsi harmonik semakin meningkat. Meningkatnya distorsi harmonik ini menyebabkan bertambahnya rugi pada transformator. Produsen transformator tentunya telah mengembangkan transformatornya untuk memperkirakan rugi tersebut dalam tujuan keandalan. Namun hal ini sangat eksklusif dan tidak dapat diakses oleh pihak luar manapun. Ini sangat menarik untuk mengembangkan desain transformator untuk kepentingan akademik (Dursun & Rahmanov, 2013). Dengan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga rugi daya dan kenaikan suhu transformator dapat dihitung (Tekletsadik & Saravolac, 1996).

Metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik dalam dunia keteknikan dengan membagi suatu bentuk atau daerah yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen yang terhingga. Metode ini dapat digunakan dalam menganalisis magnetostatik, elektromagnetik dan karakteristik panas (Dawood, *et al*). Penggunaan metode ini telah digunakan dalam berbagai perangkat lunak seperti COMSOL, ANSYS, MagNet, FEMM 4.2 dan lain-lain.

Kebutuhan akan keakuratan dalam proses desain dan analisis mesin listrik memajukan penyebaran model numerik yang cocok dalam perhitungan medan magnet dan listrik. Metode numerik ini pada dasarnya berdasarkan pada penentuan distribusi medan listrik dan magnet pada struktur yang akan diteliti sesuai persamaan Maxwell (Bianchi, 2005). Walaupun telah ada rumus-rumus yang dapat digunakan untuk memperkirakan seberapa besar rugi transformator ini, metode elemen hingga memiliki ketepatan perhitungan yang lebih baik (Dursun & Rahmanov, 2013). Metode ini memberikan solusi medan yang berlaku. Misal seperti permasalahan medan yang dipengaruhi waktu, dan dengan bahan yang *non-homogenous, anisotropic*, atau nonlinier (Bianchi, 2005). Oleh karena itu, pada skripsi ini akan dibahas mengenai pengaruh beban non linier terhadap rugi transformator satu fasa menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dimana untuk mengetahui prinsip perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEMM 4.2) dalam menghitung rugi transformator satu fasa dan distribusi medan magnet bocor terhadap rugi transformator serta efisiensi transformator tersebut. Sebagai pembanding beban non linier adalah beban linier untuk pembebanan pada transformator

### **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan masalah yang telah dijelaskan pada latar belakang, dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dapat digunakan untuk menganalisis rugi-rugi transformator satu fasa.
2. Bagaimana membedakan rugi transformator satu fasa dengan beban linier dan non linier
3. Bagaimana pengaruh distribusi medan magnet terhadap rugi-rugi dan efisiensi transformator berbeban linier dan non linier.

### **1.3 Batasan Masalah**

Untuk menghindari pembahasan yang meluas maka penulis akan membatasi pembahasan tugas akhir ini dengan hal-hal sebagai berikut :

1. Aplikasi yang digunakan simulasi adalah FEMM 4.2.
2. Beban non linier yang digunakan adalah resistor-induktor yang dirangkai seri dengan dioda sebagai penyearah gelombang penuh satu fasa sedangkan beban linier adalah beban resistif. Ada tiga nilai beban linier dan tiga nilai beban nonlinier yang digunakan pada perhitungan arus pada rangkaian listrik. Penamaan *Linier 1*, *Linier 2*, dan *Linier 3* serta *Nonlinier 1*, *Nonlinier 2*, dan *Nonlinier 3* berfungsi untuk memudahkan pengejaan dan penulisan.
3. Pembebanan pada transformator hanya dilakukan berdasarkan perhitungan arus dan tegangan pada rangkaian transformator berbeban.
3. Tidak membahas lebih spesifik proses timbulnya harmonisa yang disebabkan oleh beban non linier.
4. Sumber tegangan AC 220V frekuensi 50 Hz.
5. Transformator yang digunakan adalah transformator satu fasa 120/120 V.
6. Masukan simulasi transformator tanpa beban dan berbeban adalah arus maksimum/amplitudo arus hasil perhitungan rangkaian listrik.
7. Rugi *Stray* diabaikan.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah hal yang akan dicapai oleh penulis dalam penelitian ini. Adapun tujuan penelitian ini adalah

1. Untuk mengetahui penggunaan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga
- 2 Untuk mengetahui perbedaan rugi transformator yang ditimbulkan oleh beban linier dan beban nonlinier
3. Untuk mengetahui pengaruh distribusi medan magnet terhadap rugi-rugi dan efisiensi transformator berbeban linier dan non linier.

#### 1.5 Manfaat

Terdapat beberapa manfaat dalam penelitian ini bagi penulis dan pembaca, yaitu :

1. Memahami lebih tentang FEMM 4.2.
2. Sumber pengetahuan tambahan.
3. Referensi tambahan untuk penelitian lanjut

#### 1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut :

**BAB I** : Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan hasil penelitian.

**BAB II** : Berisi tujuan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.

**BAB III** : Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data.

**BAB IV** : Berisi pembahasan dan analisis terhadap hasil evaluasi.

**BAB V** : Berisi penutup yang terdiri dari kesimpulan dan saran



## BAB II

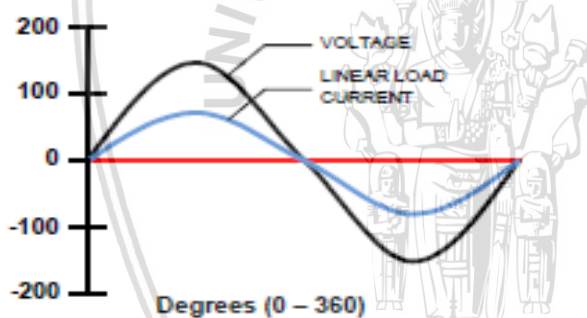
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Jenis Beban

Ada dua jenis beban apabila digolongkan menurut karakteristik arus dan tegangan yang dihasilkannya (Cahyani, 2014:p.23), yaitu:

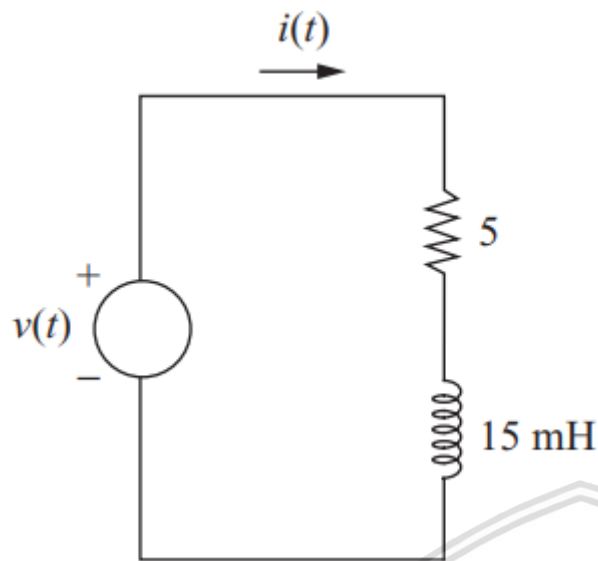
##### 2.1.1 Beban Linier

Beban linier adalah beban yang menghasilkan tegangan dan arus keluaran (beban) yang sebanding atau proporsional dengan tegangan dan arus masukan (sumber) sehingga bentuk gelombang tegangan dan arus masukan akan sama dengan gelombang tegangan dan arus keluaran seperti yang terlihat pada gambar 2.1. Lampu pijar, setrika listrik, rice cooker, beban resistif, dan lainnya adalah beberapa contoh beban linier. Gambar 2.2 adalah contoh rangkaian listrik dengan beban linier berupa beban resistor ( $R_L$ ).



Gambar 2.1. Gelombang arus beban dan tegangan masukan beban linier

Sumber: Rinas (2012.p.24)

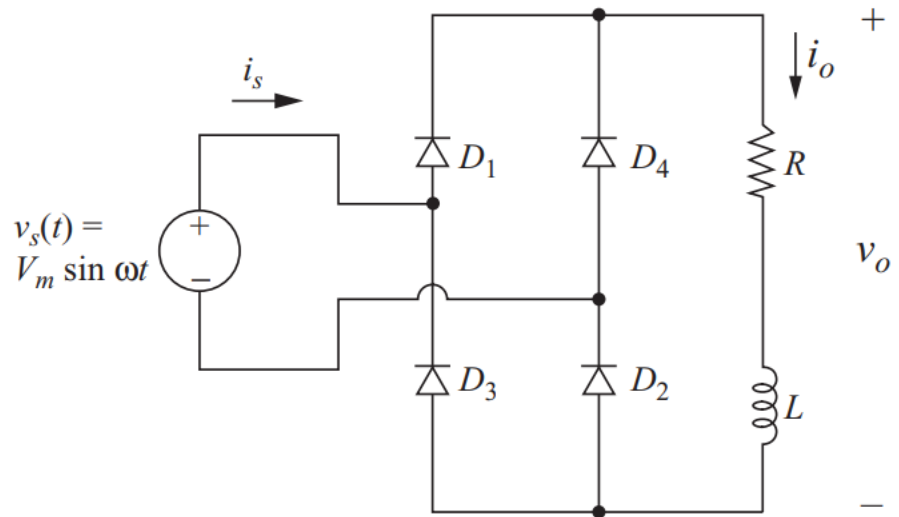


Gambar 2.2. Rangkaian listrik dengan sumber bolak balik dan beban linier

Sumber: Hart (2011, p.47)

### 2.1.2 Beban Non Linier

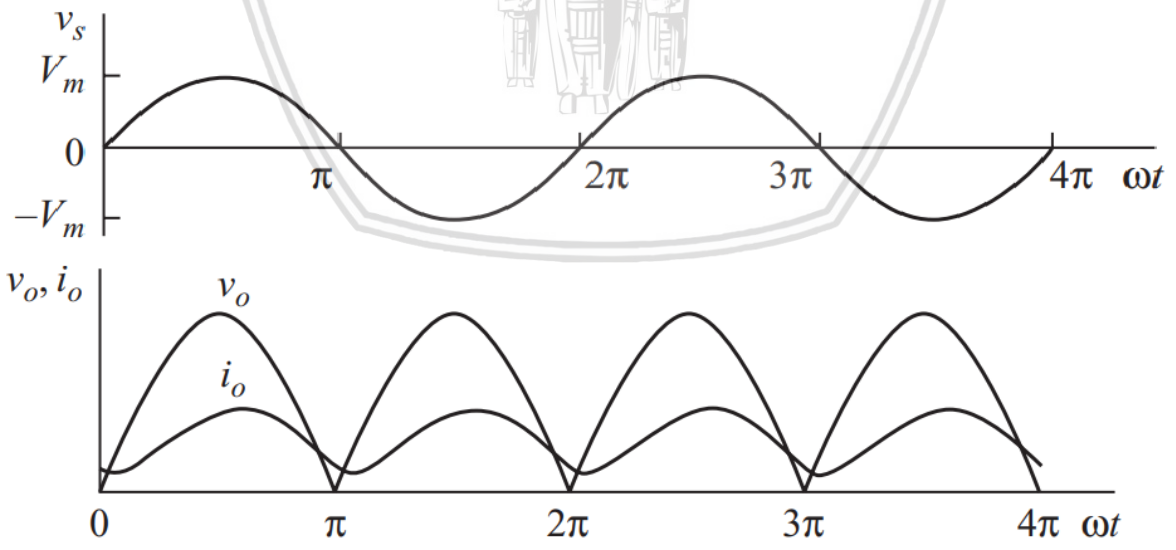
Beban Non-Linier adalah beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran tidak sebanding dengan tegangan dalam tiap setengah siklus, sehingga bentuk gelombang arus maupun tegangan keluarannya tidak sama dengan gelombang masukannya (mengalami distorsi atau non sinusoidal). Sisi negatif yang timbul dari perkembangan teknologi bahan semikonduktor seperti dioda disebabkan oleh jenis beban non linier yang menyebabkan timbulnya harmonisa sehingga gelombang arus dan tegangan menjadi cacat dan tidak sinusoidal lagi akibat interaksi antara bentuk gelombang sinus sistem dengan gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan bulat dari frekuensi *fundamental*-nya (Sankaran, 2002). Contoh beban non-linier adalah seperti rangkaian penyearah satu fasa, laptop, *air conditioner* dan lain sebagainya. Pada penelitian ini digunakan rangkaian penyearah berbeban resistif dan berbeban resistif induktif.



Gambar 2.3. Rangkaian penyearah satu fasa gelombang penuh beban R-L

Sumber: Hart (2011,p.68)

Gambar 2.3. menunjukkan adanya sumber yang dirangkai seri dengan empat buah dioda sebagai penyearah (*rectifier*) dan beban resistor. Dioda inilah yang mengakibatkan ketidaklinieran pada gelombang arus dan tegangan keluaran ( $v_o$ ). Pada siklus positif sumber,  $D_1$  dan  $D_2$  akan mengalami konduksi (mengalirkan arus) menuju beban sedangkan pada siklus negatif sumber,  $D_3$  dan  $D_4$  konduksi sehingga arus dapat mengalir dari sumber menuju beban sehingga tegangan  $v_o$  akan selalu positif (Hart,2011).



Gambar 2.4. Gelombang tegangan masukan  $v_s$ , tegangan pada sisi R-L  $v_o$  dan arus beban  $i_o$  beban nonlinier

Sumber: Hart (2011,p.68)



Gambar 2.4.. berturut-turut adalah gambar gelombang tegangan masukan pada terminal R-L, tegangan pada sisi R-L dan arus beban. Terlihat bahwa arus beban  $i_o$  masih bernilai positif pada siklus negatif sumber. Hal ini disebabkan oleh penyearahan oleh empat dioda yang berfungsi sebagai penyearah gelombang penuh.

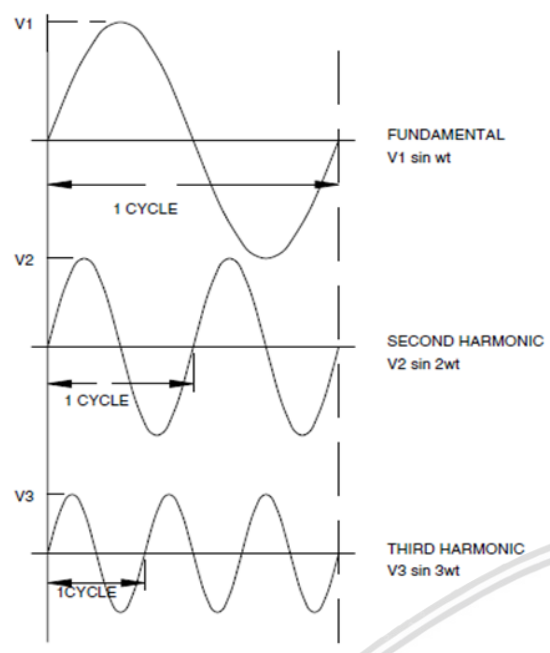
Gelombang keluaran beban non linier tampak tidak lagi sinusoidal. Namun menurut ahli matematika dari Prancis, Jean Baptiste Fourier mengatakan bahwa sebenarnya gelombang non sinusoidal periodik adalah gabungan dari beberapa gelombang sinusoidal dengan frekuensi berkelipatan dari frekuensi dasarnya. Gabungan gelombang ini dapat dibentuk menjadi persamaan berikut ini (Sankaran, 2002:p.79):

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) + V_{n+1} \sin((n+1)\omega t) + \dots \dots \dots (2-1)$$

Terlihat  $V_0$  sebagai komponen *DC* dari suatu gelombang non sinusoidal. Sedangkan  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  dimana  $V_n$  ini adalah nilai puncak dari tiap gelombang pada periode tertentu. Terlihat pada persamaan 2.1 bahwa gelombang non-sinusoidal tersebut adalah penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal dimana terdapat gelombang dengan frekuensi dasar dengan gelombang-gelombang dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi gelombang dasarnya. Apabila frekuensi dasar bernilai  $f$  maka frekuensi harmoniknya akan bernilai  $2f, 3f, 4f$  dan seterusnya dimana ditunjukkan pada persamaan 2.1 yang ditandai dengan  $2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$  dimana  $\omega = 2\pi f$ . Dengan dapat diketahuinya komponen gelombang sinusoidal dalam gelombang non sinusoidal dengan salah satunya persamaan *fourier* pada persamaan 2.1 dapat membantu kita menganalisis sistem daya termasuk pengaruh tegangan atau arus non sinusoidal terhadap peralatan yang tersambung dengan beban non linier pada sistem daya. Gambar 2.5 menunjukkan bagaimana gelombang non sinusoidal terdiri dari penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal Persamaan 2.1 tersebut berasal dari persamaan 2.2 sehingga (Sankaran, 2002:p.81)

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \dots \dots \dots (2-2)$$





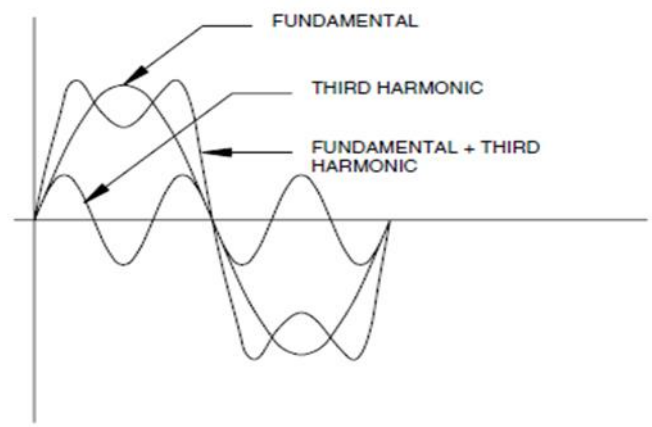
Gambar 2.5 Dasar, Harmonisa kedua, dan Harmonisa ketiga  
 Sumber : Sankaran (2002, p.80)

dimana  $a_k$  dan  $b_k$  adalah koefisien dari tiap komponen harmonisa yang mana dapat dijabarkan seperti persamaan 2-3 dan 2-4 (Sankaran, 2002):

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos ktdt, (k = 1,2,3, \dots, n) \dots\dots\dots (2-3)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \sin ktdt, (k = 1,2,3, \dots, n) \dots\dots\dots (2-4)$$

Gambar tersebut dibagi menjadi tiga bagian, gambar paling atas menunjukkan gelombang dasar, gelombang harmonik kedua, dan harmonik ketiga. Gelombang harmonik kedua menyelesaikan dua siklus sekaligus dalam satu siklus gelombang dasarnya sedangkan gelombang harmonik ketiga menyelesaikan gelombang harmonik ketiga dalam tiga siklus sekaligus (Sankaran, 2002).



Gambar 2.6 Hasil penjumlahan gelombang fundamental dengan harmonik ketiga

Sumber : Sankaran (2002, p.80)

## 2.2 Analisis Fourier Bentuk Gelombang

Setiap bentuk gelombang periodik, yaitu yang memiliki bentuk  $f(t)=f(t+T)$  dapat dinyatakan oleh sebuah deret Fourier bila memenuhi persyaratan *Dirichlet* (Cahyani, 2014:p.26):

1. Bila gelombang diskontinyu, hanya terdapat jumlah diskontinuitas yang terbatas dalam perioda T
2. Gelombang memiliki nilai rata-rata yang terbatas dalam perioda T
3. Gelombang memiliki jumlah maksimum dan minimum yang terbatas dalam perioda T

Bila syarat-syarat tersebut dipenuhi, deret Fourier dapat dinyatakan dalam bentuk (Budiono, 1997):

$$f(t) = a_{n0} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{nm} \cos m\omega t + b_{nm} \sin m\omega t) \dots\dots\dots (2-5)$$

dimana

$$a_{n0} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \dots\dots\dots (2-6)$$

$$a_{nm} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos m\omega t dt \dots\dots\dots (2-7)$$

$$b_{nm} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin m\omega t dt \dots\dots\dots (2-8)$$

Sinus dan cosinus memiliki frekuensi yang sama dan dapat disatukan menjadi satu persamaan sehingga (Hart, 2011)

$$f(t) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (C_{nm} \cos (m\omega_0 t + \theta_{nm})) \dots\dots\dots (2-9)$$

$$C_{nm} = \sqrt{a_{nm}^2 + b_{nm}^2} \dots\dots\dots (2-10)$$

dan

$$\theta_{nm} = \tan^{-1} \left( \frac{-b_{nm}}{a_{nm}} \right) \dots\dots\dots (2-11)$$

$a_0$  adalah sebuah konstanta yang mana adalah nilai rata-rata dari  $f(t)$  dan menggambarkan tegangan atau arus searah. Koefisien  $C_1$  adalah nilai maksimum saat frekuensi dasar  $\omega_0$ . Koefisien-koefisien  $C_2, C_3, \dots$  adalah amplitudo harmonisa yang memiliki frekuensi  $2\omega_0, 3\omega_0, \dots$ , dan seterusnya. Nilai rms dari  $f(t)$  dapat dihitung dari deret fourier (Hart, 2011):

$$F_{rms} = \sqrt{\sum_{m=0}^{\infty} F_{nm,rms}^2} = \sqrt{a_{n0} + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{C_{nm}}{\sqrt{2}} \right)^2} \dots\dots\dots (2-12)$$

Secara umum, tegangan dan arus pada sisi beban akibat harmonisa dapat dinyatakan dalam deret Fourier sebagai berikut (Budiono,1997):

$$v(t) = V_{n0} + \sum_{m=1}^{\infty} V_{nm} \cos(m\omega_0 + \phi_n) \dots\dots\dots (2-13)$$

$$i(t) = I_{n0} + \sum_{m=1}^{\infty} I_n \cos(m\omega_o + \theta_n) \dots\dots\dots(2-14)$$

Suatu tegangan sinusoidal keluaran transformator adalah  $V = V_{max} \sin \omega t$  mencatu beban nonlinier berupa rangkaian penyearah gelombang penuh sehingga tegangan pada sisi  $v_o$  diperoleh persamaan tegangan sebagai berikut (Hart, 2011):

$$V_o(t) = V_{n0} + \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} V_{nm} \cos(m\omega_o t + \pi) \dots\dots\dots(2-15)$$

dimana

$$V_{n0} = \frac{2V_2}{\pi} \dots\dots\dots(2-16)$$

$$V_{nm} = \frac{2V_2}{\pi} \left( \frac{1}{m-1} - \frac{1}{m+1} \right) \dots\dots\dots(2-17)$$

sehingga nilai arus searah  $I_{n0}$  dan amplitudo arus harmonisa  $I_{nm}$  berdasarkan persamaan (2-18) dan (2-19) adalah sebagai berikut (Hart, 2011)

$$I_{n0} = \frac{V_{n0}}{Z} \dots\dots\dots(2-18)$$

$$I_{nm} = \frac{V_{nm}}{Z} \dots\dots\dots(2-19)$$

dimana  $Z$  adalah resistor yang diseri dengan inductor (Hart, 2011)

$$Z_{nm} = |R + j\omega mL| \dots\dots\dots(2-20)$$

namun apabila  $Z$  yang digunakan berupa resistor maka nilai  $Z$  adalah nilai  $R$  saja.

### 2.3 Perhitungan Daya Beban

Ada dua macam perhitungan daya berdasarkan jenis rangkaian. Pertama perhitungan daya untuk rangkaian sinusoidal bolak-balik atau rangkaian linier dan kedua, perhitungan daya nonsinusoidal bolak-balik ada dua yaitu (Hart,2011)

#### 1. Perhitungan Daya Beban Linier

$$P = \left( \frac{V_{max} I_{max}}{2} \right) \cos(\theta - \varphi) \dots\dots\dots(2-21)$$

dimana  $V_m$  adalah nilai amplitudo tegangan,  $I_m$  adalah nilai amplitudo arus dan  $\theta - \varphi$  adalah fasa antara tegangan dan arus. Fasa tegangan ditunjukkan oleh  $\theta$  dan  $\varphi$  adalah fasa arus.

#### 2. Perhitungan Daya Beban Nonlinier

Apabila sumber tegangan sinusoidal mencatu beban nonlinier, gelombang arus tidak akan sinusoidal sehingga daya rata-rata yang diserap beban adalah

$$P = \left( \frac{V_{n1} I_{n1}}{2} \right) \cos(\theta - \varphi) \dots\dots\dots(2-22)$$

dimana  $V_{n1}$  adalah nilai amplitudo tegangan pada frekuensi dasar,  $I_{n1}$  adalah nilai amplitudo arus pada frekuensi dasar dan  $\theta - \varphi$  adalah fasa antara tegangan dan arus.

Selain itu perhitungan faktor daya adalah perbandingan daya rata-rata  $P$  dengan daya semu  $S$  (Hart, 2011):

$$pf = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2-23)$$

$$pf = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} \dots\dots\dots(2-24)$$

dimana  $V_{rms} = V_{max}/\sqrt{2}$  dan  $I_{rms} = I_{max}/\sqrt{2}$

Arus yang diserap oleh beban nonlinier mengandung komponen harmonisa arus sehingga persamaan arus rms terkandung komponen harmonisa arus (Hart, 2011)

$$I_{rms} = \sum_{x=0}^{\infty} I_{nm} = \sqrt{I_{n0}^2 + \frac{I_{n1}^2 + I_{n2}^2 + I_{n3}^2 + I_{n4}^2 + \dots}{2}} \dots\dots\dots(2-25)$$

dimana nilai  $I_{n0}$ ,  $I_{n1}$ ,  $I_{n2}$ ,  $I_{n3}$ ,  $I_{n4}$ ,... secara berturut-turut adalah arus searah, arus harmonisa pertama, harmonisa kedua, harmonisa ketiga dan harmonisa keempat dan seterusnya.

## 2.4. Efek Beban Non Linier terhadap Transformator

Telah disebutkan pada bab I bahwa keberadaan beban non linier yang tersambung dengan transformator dapat menyebabkan rugi berlebih pada transformator. Hal ini disebabkan adanya harmonisa yang besar pada arus. Dengan adanya harmonisa pada arus mengakibatkan arus yang mengalir semakin besar sehingga rugi yang timbul semakin besar terutama pada rugi berbeban ( $P_L$ ) sedangkan rugi inti besi  $P_C$  tidak berpengaruh secara signifikan karena rugi inti besi terpengaruh oleh frekuensi dan dan kerapatan medan maksimum saja dan standard IEEE C57.110 tidak menetapkan rugi inti besi ini meningkat akibat beban non linier serta telah berasumsi bahwa rugi ini bernilai tetap dibawah pengaruh beban non linier (Asrami *et al*, 2010). Selanjutnya akan dibahas lebih detail rugi-rugi pada transformator beserta persamaannya.

## 2.5 Gambaran Umum Medan Elektromagnetik

### 2.5.1 Analisis Vektor

Interaksi antar besaran medan elektromagnetik dibutuhkan analisis vektor. Termasuk menurunkan persamaan medan elektromagnetik, analisis vektor sangat penting dalam medan elektromagnetik. Misalnya pada bidang tiga dimensi terdapat besaran skalar  $V(P)$  dan vektor  $\mathbf{A}=\mathbf{A}(P)$  dimana  $P(x,y,z)$  adalah posisi dari  $V$  dan  $\mathbf{A}$  sedangkan vektor  $\mathbf{u}$  adalah vektor satuan. Berikut operasi-operasi dalam medan elektromagnetik (Bianchi,2005):

#### 1. Operasi antar vektor

Misalnya ada dua buah vektor  $\mathbf{A}$  dan  $\mathbf{B}$  dengan  $|\mathbf{A}|$  dan  $|\mathbf{B}|$  adalah besar vektor dan  $\gamma$  adalah sudut antara kedua vektor sehingga produk skalar dari kedua vektor tersebut

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}||\mathbf{B}| \cos \gamma \dots\dots\dots(2-26)$$

sedangkan produk vektornya

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (|\mathbf{A}||\mathbf{B}| \sin \gamma) \mathbf{n}_{AB} \dots\dots\dots(2-27)$$

dimana  $\mathbf{n}_{AB}$  adalah vektor normal satuan.

Apabila digunakan dalam koordinat Cartesien produk skalar dan vektornya adalah sebagai berikut

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \dots\dots\dots(2-28)$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (A_y B_z - A_z B_y) \mathbf{u}_x + (A_z B_x - A_x B_z) \mathbf{u}_y + (A_x B_y - A_y B_x) \mathbf{u}_z \dots\dots\dots(2-29)$$

## 2. Operasi Differensial

*Gradient* dari besaran skalar medan  $V$  adalah fungsi vektor di setiap titik  $P$  dengan arah berdasarkan turunan maksimal dari  $V$

$$\text{grad}V = \max \left[ \frac{\partial V}{\partial t} \right] u_{max} \dots\dots\dots(2-30)$$

apabila diekspresikan dalam bidang *Cartesian*

$$\text{grad}V = \frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{u}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{u}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{u}_z \dots\dots\dots(2-31)$$

*Divergensi* dari vektor  $\mathbf{A}$  adalah fungsi skalar yang didefinisikan pada tiap titik  $P$  oleh rasio antara fluksi  $\mathbf{A}$  yang keluar dari luasan tertutup  $S$

$$\text{div} \mathbf{A} = \lim_t \frac{\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{s}}{\tau} \dots\dots\dots(2-32)$$

apabila diekspresikan dalam bidang *Cartesian*

$$\text{div} \mathbf{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z} \dots\dots\dots(2-33)$$

sedangkan *curl* dari vektor medan  $\mathbf{A}$  adalah fungsi vektor yang terdapat pada setiap titik  $P$

$$\text{curl} \mathbf{A} = \lim_t \frac{\oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}}{S} \dots\dots\dots(2-34)$$

apabila diekspresikan dalam bidang *Cartesian*

$$\text{curl} \mathbf{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \mathbf{u}_x + \left( \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \mathbf{u}_y + \left( \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \mathbf{u}_z \dots\dots\dots(2-35)$$

*Laplace* Skalar dari  $U$  adalah divergensi dari vektor *gradient* dari fungsi skalar  $U$

$$\nabla^2 U = \text{div grad}U \dots\dots\dots(2-36)$$

apabila diekspresikan dalam bidang *Cartesian*

$$\text{div grad}U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \dots\dots\dots(2-37)$$

sedangkan *Laplace* vektor  $\mathbf{A}$  adalah

$$\nabla^2 \mathbf{A} = \text{grad div} \mathbf{A} - \text{curl curl} \mathbf{A} \dots\dots\dots(2-38)$$

apabila diekspresikan dalam bidang *Cartesian*

$$\begin{aligned}\nabla^2 \mathbf{A} &= \nabla^2 A_x \mathbf{u}_x + \nabla^2 A_y \mathbf{u}_y + \nabla^2 A_z \mathbf{u}_z \\ &= \left( \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_x + \left( \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_y + \left( \frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} \right) \mathbf{u}_z \dots\dots\dots(2-39)\end{aligned}$$

### 3. Pengaruh Waktu

Apabila medan skalar  $U$  dan medan vektor  $\mathbf{A}$  dipengaruhi waktu maka operasi vektor medan skalar dan vektor tersebut adalah

$$\text{grad} \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \text{grad} V \dots\dots\dots(2-40)$$

$$\text{div} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \text{div} \mathbf{A} \dots\dots\dots(2-41)$$

$$\text{curl} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \text{curl} \mathbf{A} \dots\dots\dots(2-42)$$

$$\nabla^2 \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \mathbf{A} \dots\dots\dots(2-43)$$

### 2.5.2 Medan Elektromagnetik

Munculnya medan elektromagnetik diawali dengan adanya muatan bebas pada suatu titik. Apabila muatan bebas  $\partial q$  pada titik tersebut yang mana adalah bagian terkecil dari volume  $\partial \tau$ , memungkinkan untuk didefinisikan sebagai kerapatan muatan dalam volume. Berikut adalah penurunan rumus timbulnya medan elektromagnetik (Bianchi, 2005: p.11-14):

$$\rho = \lim_{\partial \tau \rightarrow 0} \left( \frac{\partial q}{\partial \tau} \right) \dots\dots\dots(2-44)$$

apabila elemen dimana muatan tersebut terdistribusi pada sebuah luasan disebut sebagai kerapatan muatan dalam luas  $\rho_s$

$$\rho_s = \lim_{\partial S \rightarrow 0} \left( \frac{\partial q}{\partial S} \right) \dots\dots\dots(2-45)$$

Efek dari muatan bebas pada daerah yang terbatas oleh vektor medan  $\mathbf{D}$  disebut fluks medan listrik sehingga turunan parsial dari  $\mathbf{D}$  adalah  $\rho$

$$\text{div} \mathbf{D} = \rho \dots\dots\dots(2-46)$$

kemudian apabila muatan tersebut bergerak dengan kecepatan  $\mathbf{v}$  maka diperoleh kerapatan arus listrik  $\mathbf{J}$

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \dots\dots\dots(2-47)$$

yang mana bergerak ke arah positif oleh muatan positif. Satuan yang digunakan adalah ( $\text{A}/\text{m}^2$ ). Apabila  $S$  adalah luasan terbuka, dengan vektor normal satuan  $\mathbf{n}$ , diperoleh persamaan arus yang diukur dalam satuan (A).

$$i = \int_S \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} dS \dots\dots\dots(2-48)$$

Persamaan arus (2-47) tersebut dapat diturunkan menjadi

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \dots\dots\dots(2-49)$$

Pada bentuk integral,  $S_c$  dibuat menjadi luasan tertutup dengan vektor normal  $\mathbf{n}$  memungkinkan adanya arus yang meninggalkan luasan  $S_c$  pada rentang waktu  $\partial t$  berdasarkan jumlah muatan listrik  $\partial q$  pada volume tertutup  $S_c$  yang mana

$$i_{out} = \oint_{S_c} \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} \, dS = \frac{\partial q}{\partial t} \dots\dots\dots(2-50)$$

Sehingga dapat didefinisikan sebagai vektor total kerapatan arus  $\mathbf{J}_{tot}$

$$\mathbf{J}_{tot} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \dots\dots\dots(2-51)$$

Pergerakan dari muatan listrik di sekitar titik pada ruang mengakibatkan timbulnya kerapatan fluks magnet  $\mathbf{B}$ . Integral dan turunan nilai  $\mathbf{B}$  pada luasan tertutup  $S_c$  adalah nol sehingga

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \dots\dots\dots(2-52)$$

$$\oint_{S_c} \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 \dots\dots\dots(2-53)$$

Kerapatan fluks magnet  $\mathbf{B}$  juga diperoleh dengan menurunkan vektor potensial magnetik  $\mathbf{B}$  yang terukur dalam (Tm) yaitu

$$\mathbf{B} = \operatorname{curl} \mathbf{A} \dots\dots\dots(2-54)$$

Berdasarkan *Coulomb's Position*, nilai turunan dari  $\mathbf{A}$  tersebut adalah nol

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0 \dots\dots\dots(2-55)$$

Bersamaan dengan vektor kerapatan fluksi  $\mathbf{B}$ , vektor kuat medan magnet  $\mathbf{H}$  muncul sehingga diperoleh hubungan antara keduanya

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \dots\dots\dots(2-56)$$

Menurut hukum Ampere, properti dasar dari medan  $\mathbf{H}$  adalah turunan parsial dari  $\mathbf{H}$  itu sendiri sehingga

$$\operatorname{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\delta \mathbf{D}}{\delta t} \dots\dots\dots(2-57)$$

Pada kasus medan magnet tetap, kerapatan arus bocor dapat dihilangkan sehingga

$$\operatorname{curl} \mathbf{H} = \mathbf{J} \dots\dots\dots(2-58)$$

Pada bentuk integral, hukum Ampere menjelaskan mengenai integral dari medan magnet  $\mathbf{H}$  yang membentuk garis tertutup sepanjang  $dl$  adalah total arus yang mengalir melewati luasan yang dibentuk oleh garis tertutup tersebut. Sehingga

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot t \, dl = i \dots\dots\dots(2-59)$$

Persamaan (2-56) apabila dibentuk menjadi  $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu}$  dan dilakukan penurunan terhadap  $\mathbf{H}$  diperoleh

$$\operatorname{div}\mathbf{H} = -\frac{H}{\mu}\operatorname{grad}\mu \dots\dots\dots(2-60)$$

Apabila ada muatan uji positif senilai  $\partial q$  dikenakan gaya listrik sebesar  $\partial \mathbf{F}_k$  maka diperoleh besar medan listrik pada muatan tersebut

$$\mathbf{E}_k = \lim_{\partial q \rightarrow 0} \frac{\partial \mathbf{F}_k}{\partial q} \dots\dots\dots(2-61)$$

Medan listrik spesifik adalah medan yang dihasilkan oleh muatan pada konduktor tersebut. Berikut persamaan medan listrik spesifik

$$\mathbf{E}_c = -\operatorname{grad}V \dots\dots\dots(2-62)$$

sedangkan medan listrik induksi dihasilkan oleh medan magnet dari luar konduktor dimana ada perubahan kerapatan fluks magnetik  $\mathbf{B}$  dalam satu satuan waktu sehingga apabila medan listrik  $\mathbf{E}$  diturunkan menjadi

$$\mathbf{E}_i = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \dots\dots\dots(2-63)$$

Sehingga medan listrik  $\mathbf{E}$  yang dapat disebut sebagai Medan Listrik Maxwell adalah total medan listrik *Coulomb* dan medan listrik induksi

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_c + \mathbf{E}_i \dots\dots\dots(2-64)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad}V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \dots\dots\dots(2-65)$$

Pada media yang dapat menghantarkan arus, vektor medan listrik  $\mathbf{E}$  memiliki keterkaitan dengan vektor kerapatan arus  $\mathbf{J}$  yaitu

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \dots\dots\dots(2-66)$$

dimana  $\sigma$  konduktivitas media yang terukur dalam satuan (mho/m) atau (S/m).

### 2.5.3 Teorema Poynting

Arus eddy menyebabkan panas. Rugi arus eddy ini disebabkan oleh medan elektromagnetik. Oleh karena itu, dibutuhkan penjelasan mengenai energi dan daya Teorema Poynting dapat menjelaskan hukum konservasi energi ini yang disebabkan oleh medan elektromagnetik (Stoll,1974).

Teorema Poynting didefinisikan oleh (Bianchi,2005)

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \dots\dots\dots(2-67)$$

Divergensi dari  $\mathbf{P}$  adalah kerapatan daya yang keluar dari suatu luasan

$$\operatorname{div}\mathbf{P} = \operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \dots\dots\dots(2-68)$$

$$= \mathbf{H} \cdot (\operatorname{curl}\mathbf{E}) - \mathbf{E} \cdot (\operatorname{curl}\mathbf{H}) \dots\dots\dots(2-69)$$



$$= \mathbf{H} \cdot \left( -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right) - \mathbf{E} \cdot \left( \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \dots \dots \dots (2-70)$$

$$= -\mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \dots \dots \dots (2-71)$$

kemudian integral dari divergensi vektor  $\mathbf{P}$  dalam volume

$$P = \int_{\tau} \text{div} \mathbf{P} \, d\tau \dots \dots \dots (2-72)$$

$$= \oint_{\tau} \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \, d\tau \dots \dots \dots (2-73)$$

$$= - \int_{\tau} \left( \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\tau - \int_{\tau} \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} \, d\tau \dots \dots \dots (2-74)$$

Apabila persamaan (2-66) disubstitusi ke dalam persamaan (2-74)

$$P = - \int_{\tau} \left( \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\tau - \int_{\tau} \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} \, d\tau \dots \dots \dots (2-75)$$

Apabila persamaan (2-75) dikembalikan ke persamaan (2-73) dan persamaan di sisi kanan dijadikan persamaan dengan tanda positif maka

$$\int_{\tau} \left( \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) d\tau + \int_{\tau} \frac{|\mathbf{J}|^2}{\sigma} \, d\tau = - \oint_{\tau} \mathbf{P} \cdot \mathbf{n} \, d\tau \dots \dots \dots (2-76)$$

Terlihat pada persamaan (2-76) terdapat rugi yang menyebabkan panas.

## 2.6. Metode Elemen Hingga

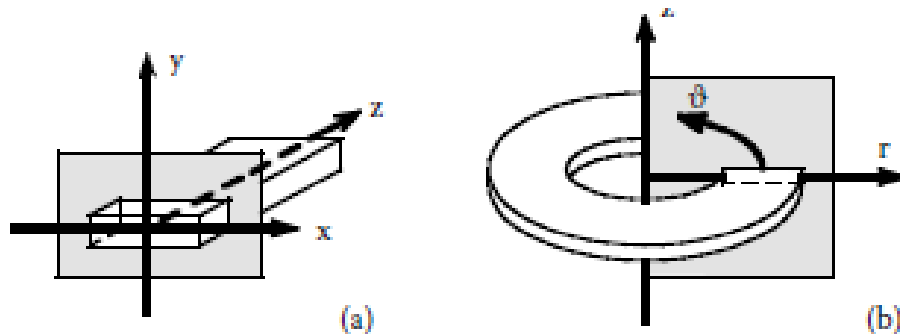
Metode elemen hingga banyak digunakan untuk berbagai kebutuhan salah satunya dalam bidang elektromagnetik. Dalam bidang elektromagnetik, metode ini berdasarkan distribusi listrik dan medan magnet pada struktur sesuai dengan Persamaan Maxwell. Dengan menggunakan metode elemen hingga, sebesar apapun daerah yang dianalisis akan dibagi menjadi elemen-elemen dasar dan persamaan medan diaplikasikan pada tiap elemen-elemen tersebut. Analisis metode elemen hingga diatur dalam beberapa langkah yaitu (Bianchi, 2005):

1. Membagi daerah analisis menjadi beberapa subdaerah
2. Memilih persamaan interpolasi
3. Membentuk persamaan sistem dalam masalah medan
4. Pemecahan masalah

Ada beberapa prosedur analisis metode elemen hingga ada tiga langkah yaitu (Bianchi, 2005:p.61-69):

1. Menyederhanakan permasalahan medan magnet ke dalam ranah dua dimensi

Untuk melakukan analisis metode elemen hingga dilakukan penyederhanaan dari bentuk asal (3D) menjadi (2D). Hal ini dilakukan untuk menyederhanakan proses analisis pada suatu benda magnetik. Penyederhanaan bentuk ini menggunakan sifat simetri. Ada dua jenis simetri yaitu:



Gambar 2.7 Simetri Planar (a) dan Simetri Axial (b)

Sumber: Bianchi (2005, p.62)

- Simetri planar (atau simetri pada bidang  $xy$ ): fenomena magnetik diasumsikan sama di setiap bidang  $(x,y)$  yang normal terhadap sumbu- $z$ .
- Simetri axial (atau simetri pada bidang  $rz$ ): diasumsikan fenomena magnetik sama pada setiap semi-bidang  $(r,z)$  terlihat seperti putaran terhadap poros sumbu  $z$ .

Untuk permasalahan magnetostatik dengan simetri planar, ada beberapa hal yang disederhanakan seperti sebagai berikut (Bianchi,2005):

- Kerapatan arus  $\mathbf{J}$  hanya ada pada sumbu- $z$  saja yang mana  $\mathbf{J} = [0,0,J_z]$
- Vektor potensial magnetik  $\mathbf{A}$  adalah paralel dengan vektor  $\mathbf{J}$  sehingga  $\mathbf{A} = [0,0,A_z]$ . Apabila nilai  $\mathbf{A}$  diturunkan akan memiliki nilai nol
- Vektor kerapatan fluksi magnet  $\mathbf{B}$  memiliki komponen pada bidang  $(x,y)$
- Dengan permeabilitas konstan  $\mu$ , masalah medan dapat dijelaskan dengan persamaan Poisson yang mana

$$\frac{\delta^2 A_z}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 A_z}{\delta y^2} = \mu J_z \dots\dots\dots(2-77)$$

## 2. Menentukan kondisi batas

Vektor potensial  $A_z$  dapat ditentukan dari persamaan Poisson (2-77) di daerah analisis selama kerapatan arus  $J$  ditentukan dan nilai  $A_z$  tersebut diketahui sebagai batas  $\Gamma$ . Macam jenis kondisi batas ada tiga yaitu (Bianchi, 2005:p.63-65):

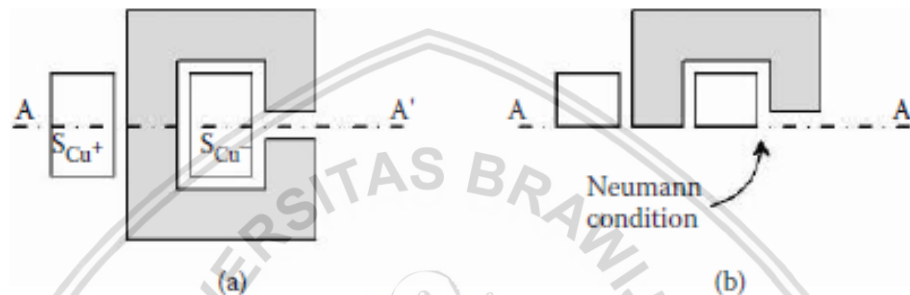
### a. Kondisi Dirichlet

Kondisi ini menyesuaikan nilai potensial medan magnet  $\mathbf{A}$  pada batas yang telah ditentukan.. Pada umumnya tetap, jadi dapat diasumsikan nilai batas tersebut adalah sama nilainya dengan nilai potensial medan magnet  $\mathbf{A}$ . Ini mengikuti bahwa garis fluksi adalah tangensial terhadap batas itu sendiri yaitu tidak adanya garis

fluksi yang melewati batas tersebut sehingga nilai vektor medan magnet sepanjang batas tersebut adalah nol.

b. Kondisi Neumann

Kondisi Neumann menyaratkan untuk memberikan suatu nilai pada turunan dari  $A_z$  yang normal terhadap batas, jadi garis-garis fluksi memiliki perbedaan sudut dengan batas. Pada kasus kondisi Neumann, garis-garis fluksi dipaksa untuk tegak lurus dengan garis batas. Kondisi ini diaplikasikan pada medan magnet yang memaksa vektor kerapatan fluksi  $\mathbf{B}$  untuk memiliki komponen normal terhadap batas saja.



Gambar 2.8. Contoh penerapan kondisi Neumann dalam menyederhanakan daerah analisis (a) sebelum disederhanakan (b) setelah disederhanakan

Salah satu contoh kondisi Neumann adalah penerapan pada reaktansi satu fasa dalam simetri planar sehingga struktur reaktansi tersebut dapat dianalisis secara mudah dengan simetri terhadap garis AA' sehingga diperoleh gambar (b) namun komponen medan magnet dan garis fluksi seharusnya tidak boleh putus dan normal terhadap garis AA' maka dari itu digunakanlah batas Neumann pada garis AA'.

c. Kondisi Periodik

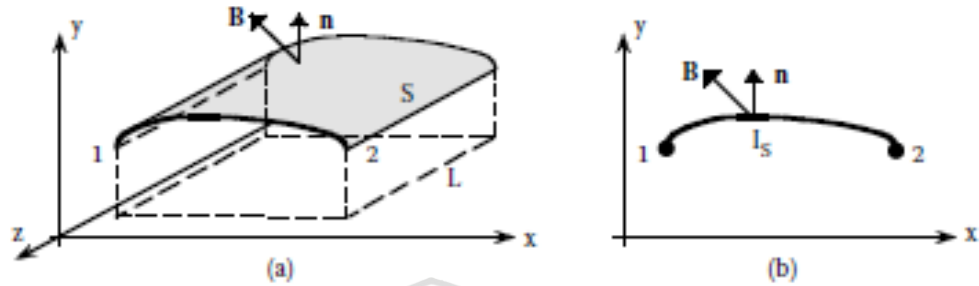
Kondisi dimana digunakan paling sedikit dua buah garis batas. Diantara keduanya dipilih salah satu sebagai garis utama dan lainnya sebagai garis potensial. Batas-batas ini berguna pada struktur yang menunjukkan pengulangan dari medan elektromagnetik Dengan menerapkan kondisi batas ini, struktur yang dianalisis dapat disederhanakan.

3. Melakukan perhitungan struktur

a. Menggambar garis-garis fluksi

Garis-garis fluksi adalah garis-garis dimana vektor kerapatan fluksi  $\mathbf{B}$  paralel. Garis-garis tersebut menyesuaikan dengan garis ekuipotensial dari vektor magnet potensial  $\mathbf{A}$ .

b. Fluks magnet dan Fluks Lingkup



Gambar 2.9. (a) Integral luasan pada bidang 2D dan (b) Integral garis

Dalam studi dua dimensi, integral luasan disederhanakan menjadi perhitungan integral garis dimana fluksi magnetik digitung dengan mengintegalkan kerapatan fluksi  $\mathbf{B}$  terhadap vektor  $\mathbf{n}$  sepanjang garis  $I_S$  dan hasilnya dikalikan dengan panjang  $L$  seperti terlihat pada gambar 2.9. Persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

$$\phi = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = L \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dl \dots\dots\dots(2-78)$$

dengan menggunakan teorema Stokes, fluksi magnetik dapat ditentukan ats integral tertutup dari vektor potensial magnetik  $\mathbf{A}$

$$\phi = \int \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} dS = L \int (\text{curl} \mathbf{A}) \cdot \mathbf{n} dl = \oint \mathbf{A} \cdot \mathbf{t} dl \dots\dots\dots(2-79)$$

dimana

$$\phi = (A_{z1} - A_{z2})L \dots\dots\dots(2-80)$$

sehingga

$$\phi = \frac{L}{s_{cu}} \left( \int_{S_{cu+}} A_z dS - \int_{S_{cu-}} A_z dS \right) \dots\dots\dots(2-81)$$

## c. Rugi daya Joule

Jika kerapatan arus diketahui di setiap titik pada struktur, pada waktu  $t$ , rugi daya Joule adalah

$$P_J(t) = \int_{\tau} \rho J^2 d\tau \dots \dots \dots (2-82)$$

pada simetri planar dimana  $J = J_z \mathbf{u}_z$

Pada kasus medan tetap, kerapatan arus tidak bergantung pada waktu sehingga daya bernilai tetap sedangkan pada kasus medan yang tidak tetap tetapi sinusoidal terhadap waktu, kerapatan arus adalah sebagai berikut

$$\mathbf{J} = J_z \mathbf{u}_z = |J_z| e^{j\phi} \mathbf{u}_z \dots \dots \dots (2-83)$$

Sehingga daya rata-rata yang hilang dalam satu periode adalah

$$P_J = \int_{\tau} \frac{\rho |J|^2}{2} d\tau = \frac{1}{2} \rho \int_{\tau} J \cdot J d\tau \dots \dots \dots (2-84)$$

## d. Energi Magnetik

Energi magnetik yang tersimpan dalam sebuah struktur benda dapat dihitung sebagai

$$W_m = \int_{\tau} \int_0^B \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} d\tau = \int_{\tau} \int_0^B \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} d\tau \dots \dots \dots (2-85)$$

Apabila media yang digunakan linier

$$W_m = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} d\tau = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mu H^2 d\tau \dots \dots \dots (2-86)$$

$$= \frac{1}{2} \int_{\tau} |\mathbf{J} \cdot \mathbf{A}| d\tau = J_z \cdot A_z d\tau \dots \dots \dots (2-87)$$

Pada kasus medan tetap, energi bernilai tetap bernilai tetap sedangkan pada kasus medan yang tidak tetap tetapi sinusoidal terhadap waktu, energi rata-rata yang tersimpan dalam satu periode adalah sebagai berikut

$$W_m = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} d\tau = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mu H^2 d\tau \dots \dots \dots (2-88)$$

## 2.7. Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga (FEMM)

Perangkat lunak berbasis metode elemen hingga yang digunakan pada penelitian ini adalah *FEMM 4.2*. FEMM adalah suatu program yang cocok untuk menyelesaikan masalah elektromagnetik dengan frekuensi rendah dalam bentuk planar dua dimensi dan axissimetri. Program ini ditujukan untuk permasalahan linier atau nonlinier magnetostatik, linier/nonlinier harmonik magnetik, linier elektrostatik dan aliran panas (Meeker, 2015).

### 2.7.1. Persamaan Differensial Parsial yang digunakan dalam FEMM

Persamaan diferensial parsial digunakan dalam permasalahan medan adalah persamaan Maxwell. Medan yang dianalisis ada dua macam yaitu medan statis dan medan yang

dipengaruhi oleh waktu. Persamaan (2-54), (2-56), dan (2-58) digunakan dalam FEMM. Perlu diketahui bahwa hubungan B dan H pada persamaan (2-56) adalah persamaan untuk bahan dengan permeabilitas linier sedangkan untuk permeabilitas yang tidak linier adalah (Meeker, 2015, p.8-9)

$$\mathbf{B} = \mu \frac{\mathbf{B}}{H(\mathbf{B})} \dots\dots\dots(2-89)$$

Apabila persamaan (2-54) disubstitusikan ke persamaan (2-56). Kemudian hasil dari substitusi persamaan tersebut kemudian disubstitusikan ke persamaan (2-58) persamaan yang diperoleh sebagai berikut

$$\text{curl} \left( \frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \text{curl} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \dots\dots\dots(2-90)$$

Apabila medan magnet berubah-ubah terhadap waktu, arus eddy dapat diinduksikan pada bahan yang memiliki suatu nilai konduktivitas. Persamaan Maxwell yang berkaitan dengan distribusi medan listrik harus digunakan. Dimulai dari substitusi persamaan (2-65) ke persamaan (2-66) sehingga

$$J = -\sigma \frac{\delta A}{\delta t} - \sigma \text{grad}V \dots\dots\dots(2-91)$$

Mensubstitusikan persamaan (2-90) ke persamaan (2-91) sehingga

$$\text{curl} \left( \frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \text{curl} \mathbf{A} \right) = -\sigma \frac{\delta A}{\delta t} + J_{src} - \sigma \text{grad}V \dots\dots\dots(2-92)$$

dimana  $J_{src}$  adalah sumber arus tambahan dan  $\text{grad}V$  adalah penambahan tegangan dimana pada benda yang terkonduksi tetap nilainya. Persamaan (2-93) adalah untuk kasus dimana medan beresilasi pada salah satu frekuensi sehingga nilai A merupakan bilangan kompleks. Oleh karena itu pada kasus ini dibutuhkan transformasi fasor untuk menyatakan besar dan sudut dari A untuk menyelesaikan analisis metode elemen hingga. Transformasi tersebut adalah

$$A = \text{Re}[a(\cos \omega t + j \sin \omega t)] = \text{Re}[ae^{j\omega t}] \dots\dots\dots(2-93)$$

Dengan memasukkan nilai a pada persamaan (2-92) sehingga diperoleh persamaan dimana FEMM secara tepat menyelesaikan masalah medan magnet yang berubah-ubah terhadap waktu.

$$\text{curl} \left( \frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \text{curl} \mathbf{a} \right) = -\sigma \frac{\delta A}{\delta t} + J_{src} - \sigma \text{grad}V \dots\dots\dots(2-94)$$

### 2.7.2. Tampilan Interaktif

FEMM dibagi menjadi tiga bagian (Meeker, 2005):

1. Tampilan interaktif

Bagian ini adalah bagian dimana terdapat tempat untuk menggambar geometri transformator bahkan file hasil perancangan pada perangkat lunak *autocad* berupa *.dxf* dapat dimasukkan ke FEMM 4.2. Selain itu terdapat pula tampilan solusi medan magnet berupa kontur dan kerapatan. Program memperbolehkan pengguna untuk mengetahui medan pada titik tertentu, luasan tertentu dan sepanjang garis kontur. Tampilan interaktif dibagi menjadi dua macam yaitu *Preprocessor* dan *Post processor*. *Preprocessor* digunakan untuk menggambar geometri, mendefinisikan bahan dan mendefinisikan kondisi batas sedangkan *postprocessor* digunakan untuk melihat hasil analisis yang dilakukan *fkern solver*. Nilai rugi, energi yang tersimpan, induktansi, kerapatan medan magnet dan lain-lain terdapat pada *Magnetic Postprocessor*. Jendela *Magnetic Postprocessor* berupa file dengan jenis *.ans* (Meeker, 2015).

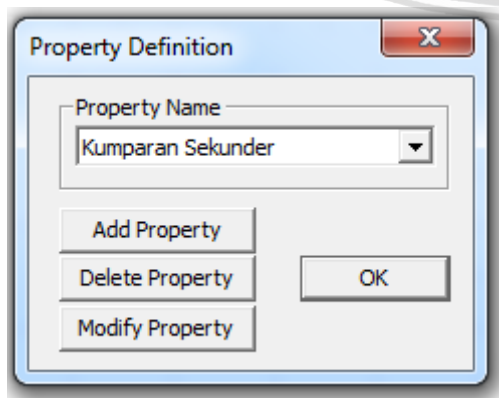
Pada jendela *Magnetic Preprocessor* terdapat *toolbar* yang dapat digunakan yaitu titik, garis dan lain-lain dan menu-menu untuk mendesain suatu benda, mendefinisikan daerah analisis menjadi subdaerah analisis Tombol-tombol yang digunakan adalah



Gambar 2.10. Toolbar untuk menggambar dan plot subdaerah analisis.

Sumber: Meeker(2015,p.16)

Tanda titik garis lurus dan garis lengkung adalah tombol untuk menggambar benda yang akan dianalisis sedangkan tombol lingkaran hijau untuk menandai bagian dari benda yang dianalisis dengan bahan-bahannya (misal pada transformator ada kumparan dengan bahan tembaga, ada inti dengan bahan *Permendur*, sela udara, dan lain-lain) dan tombol terakhir adalah untuk pengelompokan bagian-bagian benda tersebut (Meeker, 2015).



Gambar 2.11. Kotak pendefinisian properti

Sumber: Meeker(2015,p.26)

Kotak ini sangat penting dalam simulasi FEMM. Pada kasus medan magnetik, kotak ini berfungsi untuk menambah, menghapus dan mengubah properti. Kotak dialog ini terdapat pada menu *properties* yang terdapat empat submenu di antara lain; bahan, batas, titik dan rangkaian. Oleh karena itu kotak ini digunakan untuk menambah, menghapus atau mengubah bahan, menambah, menghapus atau mengubah batas dan seterusnya, Kotak ini terdapat pada *Magnetic Preprocessor* FEMM.

*Magnetic Postprocessor* terdapat *toolbar* dengan tombol titik, garis, dan blok. serta tombol untuk plot garis-garis medan magnet, kerapatan medan, intensitas medan magnet dan kerapatan arus (Meeker, 2015).

Ada tiga mode yang digunakan *Postprocessor* yaitu mode titik, kontur dan blok. Dengan menggunakan mode titik, pengguna dapat mengetahui nilai medan pada benda, kontur digunakan untuk mengetahui nilai medan sepanjang garis sedangkan untuk mengetahui energi yang tersimpan, berbagai jenis rugi, total arus dan lain-lain digunakan mode blok. Ketiga mode diwakili dalam ketiga tombol pada gambar 2.12 (Meeker, 2015).



Gambar 2.12. Toolbar Button mode analisis

Sumber: Meeker(2015,p.35)

Gambar 2.12 apabila dilihat dari kiri ke kanan berturut-turut adalah tombol mode titik, kontur, dan blok. Untuk mode titik dapat diketahui langsung nilai medan pada titik tertentu namun untuk mode kontur dan blok diperlukan tombol tambahan untuk mendapatkan nilai yang diinginkan bahkan dapat ditampilkan dalam bentuk gambar menggunakan *toolbar button* pada gambar 2.14.



Gambar 2.13. Toolbar Button mode grafis

Sumber: Meeker (2015,p.38)

Gambar 2.14 apabila dilihat dari kiri ke kanan berturut-turut adalah tombol untuk menampilkan *mesh* pada objek, garis-garis magnet, distribusi medan, dan vektor medan magnet. Tombol plot grafik dapat digunakan untuk mengetahui total nilai dan distribusi suatu besaran pada suatu garis yang ditentukan dan tombol integral adalah untuk



mengetahui nilai suatu besaran pada kontur atau blok yang ditentukan sedangkan *toolbar button* untuk plot grafik, integral dan keterangan rangkaian ada pada gambar 2.14.



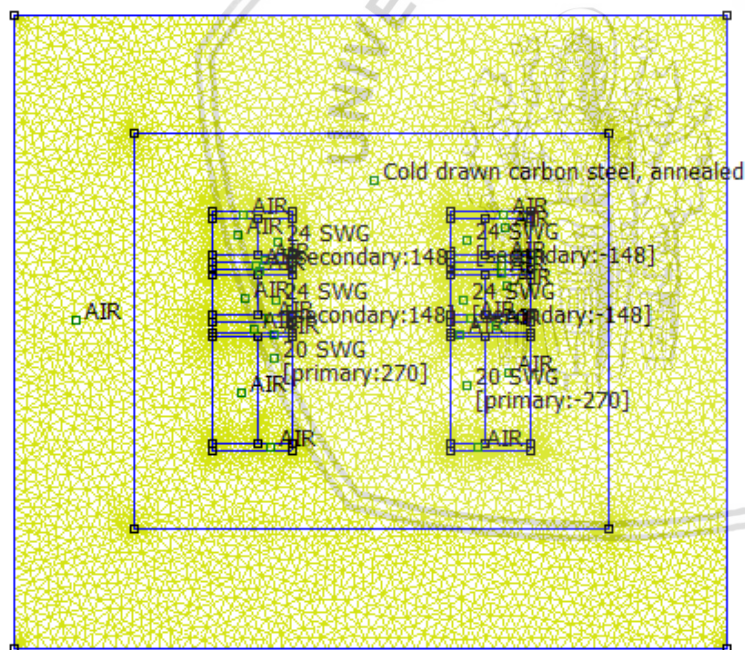
Gambar 2.14. *Toolbar button* untuk plot grafik, integral, dan keterangan rangkaian

Sumber: Meeker (2015,p.38)

Pada prinsipnya tombol-tombol ini dapat digunakan sesuai persamaan-persamaan magnetik pada umumnya.

## 2. *triangle.exe*

Bagian ini sangat penting dalam proses pembentukan elemen hingga karena *Triangle* membagi sebuah daerah yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen segitiga dalam jumlah yang besar. Program ini ditulis oleh Jonathan Shewchuck dan tersedia di [www.cs.cmu.edu/quake/triangle.html](http://www.cs.cmu.edu/quake/triangle.html). Hasil pembentukan elemen-elemen ini membentuk jala-jala seperti terlihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.15. Pembentukan jala-jala pada FEMM

Sumber: FEMM 4.2

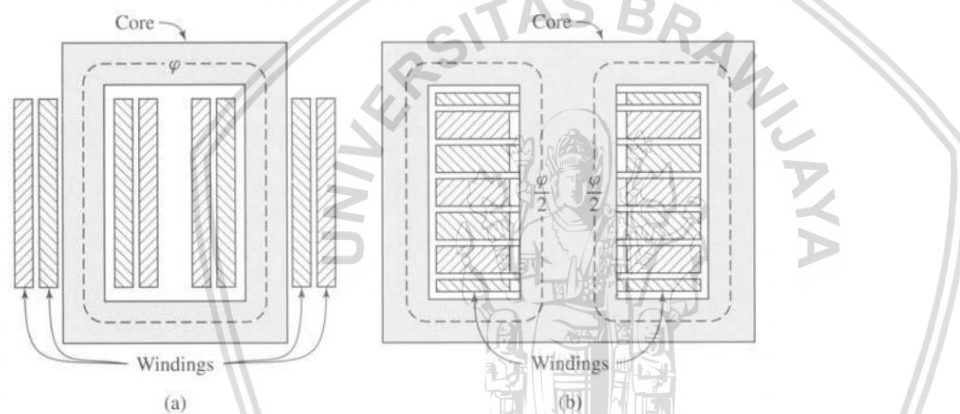
## 3. *Solvers*

Bagian ini adalah bagian dimana otak dari perangkat lunak ini. Setiap *Solver* mengambil satu *set* data yang mana dideskripsikan permasalahannya dan diselesaikan menggunakan persamaan diferensial untuk menentukan nilai medan sesuai daerah penyelesaian. Jenis *solver* pada FEMM adalah *fkern.exe* untuk permasalahan magnetik,

*belasolv* untuk elektrostatik, *hsolv* untuk aliran panas, dan *csolv* untuk aliran arus (Meeker, 2015). Penjelasan detail mengenai FEMM ada pada manual book FEMM 4.2 yang telah dilampirkan.

## 2.8. Transformator Satu Fasa

Transformator adalah salah satu alat yang menggabungkan dua atau lebih rangkaian elektrik dengan diperantarai fluksi magnetis yang mengalir pada inti besi. Inti besi ini terdiri dari kumpulan besi tipis berlaminasi untuk mengurangi rugi arus *eddy*. Transformator memiliki dua atau lebih kumparan. Pada umumnya terdiri dari dua kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer terhubung dengan sumber tegangan bolak balik sedangkan kumparan sekunder terhubung dengan beban. Berdasarkan struktur transformator terdiri dari dua macam yaitu transformator tipe cangkang dan tipe inti (Fitzgerald, 2003).



Gambar 2.16. a. Transformator tipe inti dan b. Transformator tipe cangkang

Sumber: A.E. Fitzgerald (2003:p.58)

### 2.8.1. Prinsip Kerja Transformator

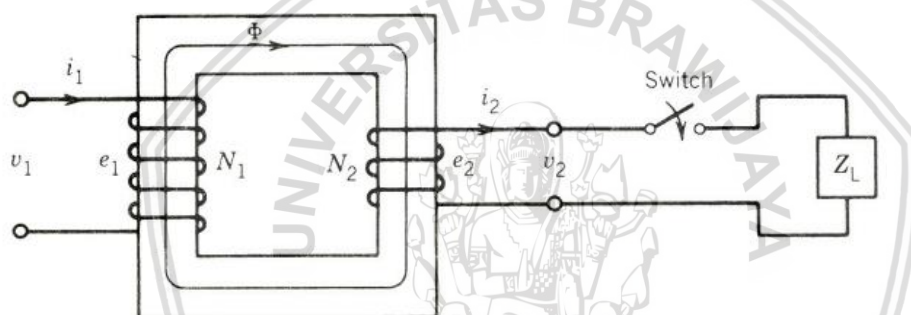
Transformator terdiri atas dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan sekunder yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini biasanya terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktans (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul didalam inti yang dilaminasi dan akan mengalir arus pada kumparan primer tersebut karena rangkaian tertutup. Dengan adanya fluks yang mengalir di kumparan primer, secara bersama akan muncul induksi diri (*self induction*) pada kumparan primer tersebut. Fluksi ini mengalir pada inti yang sama maka akan terjadi pula induksi di sisi kumparan sekunder yang disebut induksi bersama (*mutual induction*). Induksi oleh fluksi magnet ini mengakibatkan timbulnya GGL (Gaya Gerak Listrik) induksi pada kumparan sekunder. Apabila kumparan sekunder dihubungkan ke beban arus bolak-balik

sekunder akan mengalir menuju beban seperti pada gambar 2.20. Besar GGL dipengaruhi oleh jumlah lilitan pada kumparan tersebut sehingga dapat direpresentasikan dalam persamaan (2-95) dan (2-96) dimana transformator dianggap ideal sehingga tegangan terminal sama dengan GGL induksi (Chapman, 2005).

### 2.8.2. Transformator Ideal

Transformator dapat dikatakan sebagai transformator ideal apabila memiliki tiga syarat sebagai berikut (Fitzgerald,2003:p.64):

1. Resistansi kumparan ( $R_1$  dan  $R_2$ ) diabaikan
2. Seluruh fluksi dibatasi hanya pada inti dan menghubungkan kedua kumparan. Rugi inti diabaikan.
3. Permeabilitas inti adalah sangat besar bahkan tidak hingga sehingga gaya gerak magnet yang membangkitkan fluksi (arus magnetisasi) pada inti diabaikan.



Gambar 2.17. Transformator ideal yang tersambung dengan saklar dan beban.

Sumber: Sen, (2014: p.43)

Apabila kumparan primer tersambung dengan sumber tegangan bolak-balik, arus bolak-balik akan mengalir. Dengan demikian timbul fluksi yang bolak-balik pula yang dapat menghasilkan tegangan induksi pada kumparan primer. Telah disebutkan pada poin 1 pada subbab ini dimana resistansi kumparan diabaikan sehingga nilai tegangan masukan kumparan primer  $v_1$  adalah sama dengan tegangan induksi primer  $e_1$  (Sen, 2014)

$$V_1 = E_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2-95)$$

Begitu pula dengan kumparan sekunder

$$V_2 = E_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2-96)$$

Melalui persamaan (2-95) dan (2-96) didapat hubungan antara GGL induksi dengan lilitan adalah sebagai berikut

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2-97)$$

Setelah itu *switch* (saklar) ditutup. Arus sekunder akan mengalir dari sumber menuju beban. Arus ini menghasilkan Gaya Gerak Magnet (GGM) sebesar  $N_2 \times i_2$  yang mana melawan gaya gerak magnet yang dihasilkan arus primer. Arus primer ini menghasilkan gaya gerak magnet sebesar  $N_1 \times i_1$ . Selain itu berdasarkan poin 3 bahwa pada permeabilitas inti transformator ideal sangat besar sehingga menyebabkan gaya gerak magnet yang menghasilkan fluksi (*net mmf*) adalah bernilai nol seperti persamaan berikut (Sen, 2014)

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = \text{net mmf} = 0 \dots\dots\dots (2-98)$$

sehingga

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} = a \dots\dots\dots (2-99)$$

dimana  $a$  adalah angka transformasi.

Perbandingan  $N_1$  dan  $N_2$  dapat disebut sebagai angka transformasi ( $a$ ). Selanjutnya kita cari transformasi impedansi transformator sebagai berikut (Sen, 2014)

$$V_1 = V_2 \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2-100)$$

$$V_2 = V_1 \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2-101)$$

dan

$$i_1 = i_2 \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots (2-102)$$

$$i_2 = i_1 \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots (2-103)$$

$$\frac{V_1}{i_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \frac{V_2}{i_2} \dots\dots\dots (2-104)$$

diketahui impedansi beban  $Z_2$  berhubungan dengan tegangan sekunder dan arus sekunder transformator maka transformasi impedansi transformator adalah

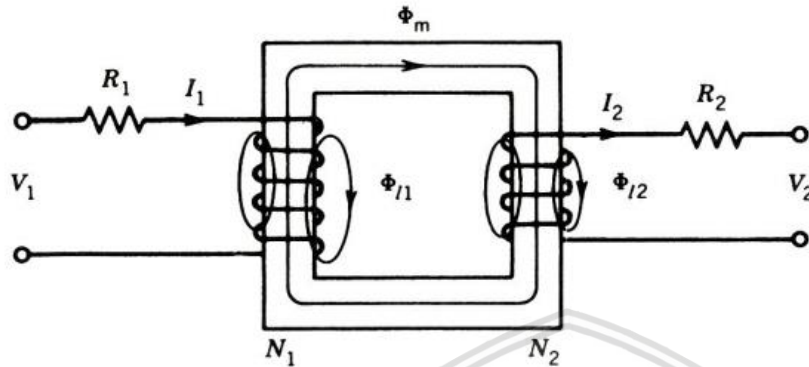
$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \dots\dots\dots (2-105)$$

### 2.8.3. Transformator Praktik dan Rangkaian Pengganti Transformator

Berbeda halnya dengan transformator ideal, transformator praktik atau transformator yang digunakan di kehidupan nyata memiliki resistansi pada kumparannya, tidak semua kumparan tersambung dengan fluksi yang sama, permeabilitas bahan inti tidak sama dengan tak terhingga dan rugi inti timbul ketika inti dikenai oleh fluksi yang berubah tiap waktu. Pada analisis dari transformator praktik, perihal tersebut harus ditentukan (Sen, 2014).

Transformator praktik memiliki resistansi dan resistansi tersebut terlihat sebagai suatu besaran  $R_1$  dan  $R_2$  yang dirangkai seri dengan kumparan seperti pada gambar di

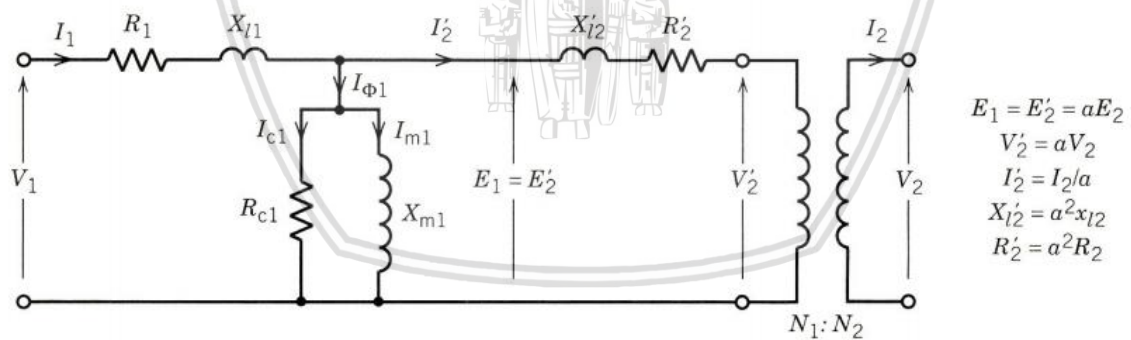
bawah ini (gambar 2.21). Ketika arus mengalir melewati kumparan transformator, mereka menghasilkan fluksi bersama  $\Phi_m$  yang terdapat pada inti yang terlihat pada gambar 2.21 (Sen, 2014).



Gambar 2.18. Transformator satu fasa

Sumber : Sen (2014: p.49)

Selain itu transformator praktik menghasilkan fluksi bocor yang menunjukkan bahwa tidak seluruh fluksi mengalir pada inti transformator sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.21 yang ditandai dengan simbol  $\Phi_{I1}$  pada kumparan primer dan  $\Phi_{I2}$  pada kumparan sekunder. Efek fluksi bocor ini ditandai dengan reaktansi bocor  $X_1$  pada kumparan primer dan  $X_2$  pada kumparan sekunder (Sen,2014).



Gambar 2.19.. Rangkaian pengganti transformator dengan referensi primer transformator

Sumber : Sen (2014:p.49)

Untuk keperluan analisis, diperlukan rangkaian pengganti transformator. Rangkaian pengganti transformator ini dibentuk dari rangkaian pengganti rangkaian transformator ideal dengan tambahan impedansi eksternal. Selain itu untuk menyederhanakan analisis, rangkaian pengganti harus ditransformasikan ke sisi primer atau sekunder. Gambar 2.22 adalah rangkaian pengganti transformator yang ditransformasikan ke sisi sekunder transformator. Angka transformasi sangat penting digunakan untuk transformasi referensi

rangkaian pengganti transformator. Apabila seluruh besaran impedansi pada kumparan sekunder ditransformasikan pada sisi primer, maka seluruh impedansi dibagi nilainya dengan  $a^2$ , tegangan terinduksi  $E$  dan tegangan terminal kumparan  $V$  dibagi dengan nilai  $a$  serta arus sekunder dikali dengan  $a$ . Hasil dari transformasi ini ditandai dengan simbol ' (dibaca : aksen) dimana tegangan sekunder yang ditransformasikan ke sisi primer transformator  $V_2'$ , arus sekunder yang ditransformasikan ke sisi primer transformator  $I_2'$  dan seterusnya. Berikut persamaan arus dan tegangan (Sen,2014):

$$E_1 = E_2' = a E_2 \dots\dots\dots(2-106)$$

$$V_2' = a V_2 \dots\dots\dots(2-107)$$

$$I_2' = \frac{I_2}{a} \dots\dots\dots(2-108)$$

$$R_2' = a^2 R_2 \dots\dots\dots(2-109)$$

$$X_{l2}' = a^2 X_{l2} \dots\dots\dots(2-110)$$

$$Z' = a^2 Z \dots\dots\dots(2-111)$$

Berdasarkan gambar rangkaian pengganti (gambar 2.21) diperoleh persamaan tegangan terminal transformator yang direferensikan pada sisi primer transformator (Chapman, 2005):

$$V_1 = R_1 I_1 + jX_{l1} I_1 + E_1 \dots\dots\dots(2-112)$$

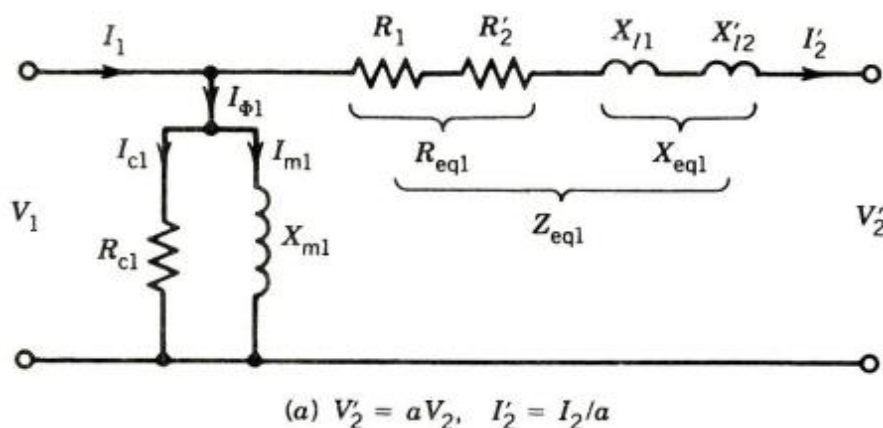
$$V_2 = E_2' - R_2' I_2' - jX_{l2}' I_2' \dots\dots\dots(2-113)$$

Selain itu berdasarkan rangkaian pengganti transformator pada gambar 2.21 dapat diketahui hubungan antara arus primer  $i_1$ , arus sekunder  $i_2$  dan arus eksitasi  $i_{\phi 1}$  (Sen, 2014)

$$i_1 = i_{\phi 1} + i_2 \dots\dots\dots(2-114)$$

dimana arus eksitasi diperoleh melalui tegangan terinduksi  $E_2'$  dibagi dengan impedansi tanpa beban  $Z_0$  (Sen, 2014) :

$$i_{\phi 1} = \frac{E_2'}{Z_0} \dots\dots\dots(2-115)$$



Gambar 2.20. Rangkaian pengganti transformator dengan referensi primer transformator Sumber (Sen: 2014: p.51)

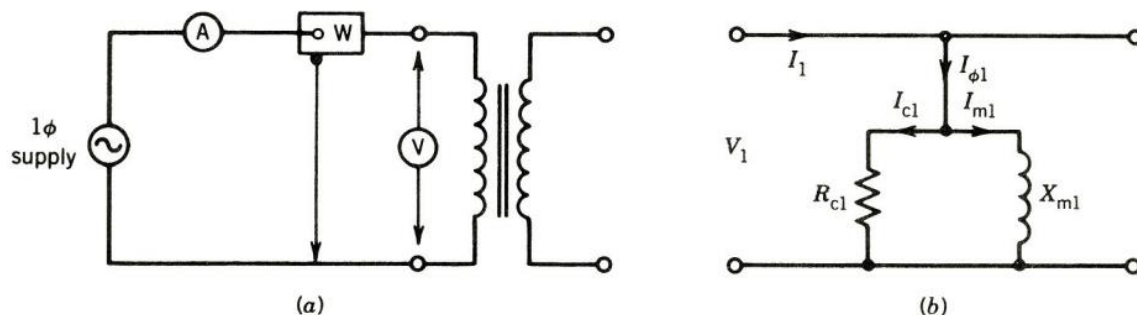
Tegangan jatuh  $I_1 R_1$  dan  $I_1 X_1$  biasanya bernilai kecil dan  $|E_1| \cong |V_1|$ . Apabila ini benar maka impedansi pada cabang ( $R_c$  dan  $X_m$ ) dapat dipindahkan ke terminal sumber seperti yang terlihat pada gambar 2.23. Pendekatan rangkaian pengganti ini menyederhanakan perhitungan arus karena kedua cabang impedansi dan cabang beban terhubung langsung dengan sumber tegangan. Disisi lain, resistansi kumparan dan reaktansi bocor dapat dikumpulkan menjadi satu yaitu resistansi ekuivalen  $R_{eq}$  dan reaktansi ekuivalen  $X_{eq}$  (Sen, 2014).  $R_{eq}$  adalah hasil penjumlahan dari  $R_1$  dan  $R_2'$  sedangkan  $X_{eq}$  adalah hasil penjumlahan dari  $X_1$  dan  $X_2'$ . Persamaan arus sama dengan persamaan (2-114) sedangkan persamaan tegangan adalah (Chapman,2005)

$$V_2 = E_2' - R_{eq} I_2' - jX_{eq} I_2' \dots\dots\dots(2-116)$$

**2.8.4. Percobaan Transformator**

Pengujian transformator digunakan untuk menghasilkan parameter transformator. Ada dua pengujian transformator yaitu (Sen, 2014):

**1. Percobaan Tanpa Beban**



Gambar 2.21. a) Diagram pengkabelan percobaan tanpa beban dan b) rangkaian percobaan tanpa beban

Sumber: Sen (2014, p.52)

Keterangan : V: Voltmeter, A: Amperemeter, W: Wattmeter

Melalui percobaan transformator dihubung buka maka didapatkan parameter  $R_C$ , dan  $X_m$  sebagai berikut (Chapman, 2005):

$$P_o = V_o \times I_o \cos \varphi \dots \dots \dots (2-117)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_o}{V_o \times I_o} \dots \dots \dots (2-118)$$

kemudian diperoleh persamaan admitansi transformator tanpa beban ( $Y_0$ )

$$Y_o = \frac{I_o}{V_o} \angle -\cos^{-1} \varphi \dots \dots \dots (2-119)$$

dimana

$$Y_o = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_m} \dots \dots \dots (2-120)$$

sehingga

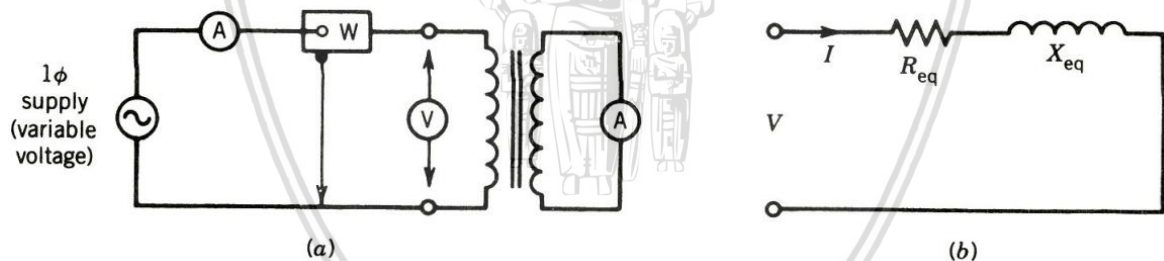
$$R_C = \frac{1}{Y_o \cos \varphi} \dots \dots \dots (2-121)$$

$$\text{dan } X_m = \frac{1}{Y_o \sin \varphi} \dots \dots \dots (2-122)$$

selain itu impedansi tanpa beban diperoleh dari kebalikan nilai admitansi tanpa beban:

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} \angle \cos^{-1} \varphi \dots \dots \dots (2-123)$$

**2. Percobaan Berbeban Penuh**



Gambar 2.22. a) Diagram pengkabelan percobaan tanpa beban dan b) rangkaian percobaan tanpa beban.

Sumber : Sen (2014,p.52)

sedangkan nilai  $R_{eq}$ , dan  $X_{eq}$  adalah sebagai berikut (Chapman,2005):

$$P_{SC} = V_{SC} \times I_{SC} \cos \varphi \dots \dots \dots (2-124)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{SC}}{V_{SC} \times I_{SC}} \dots \dots \dots (2-125)$$

kemudian diperoleh persamaan impedansi transformator berbeban penuh ( $Z_{sc}$ )

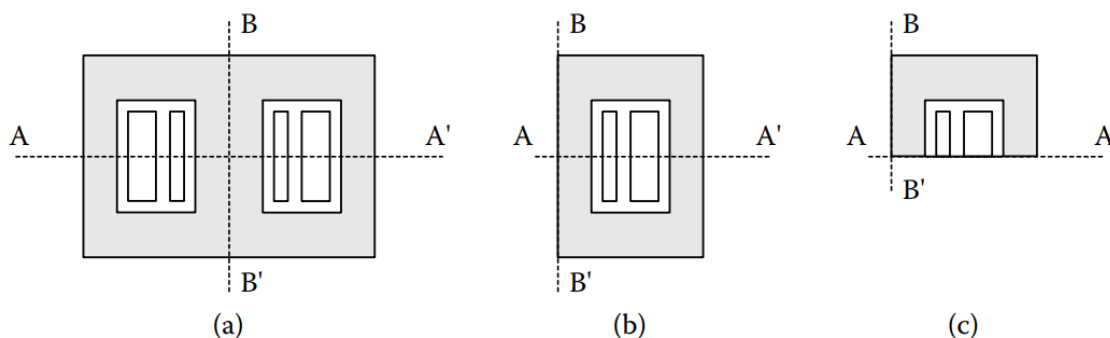
$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \cos^{-1} \varphi \dots \dots \dots (2-126)$$

$$R_{eq} = Z_{sc} \cos \varphi \dots \dots \dots (2-127)$$

$$\text{dan } X_{eq} = Z_{sc} \sin \varphi \dots \dots \dots (2-128)$$



## 2.9. Analisis Rugi Transformator Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga



*Gambar 2.23.* Penyederhanaan bentuk transformator yang akan dianalisis berdasarkan simetri. (a) 2D transformator, (b) Setengah bagian dari gambar (a), (c) Seperempat bagian dari gambar (a)

Sumber: Bianchi (2005,p.96).

Ada tiga gambar pada gambar 2.25 yaitu gambar (a), (b) dan (c). Gambar 2.25 adalah penyederhanaan bentuk transformator yang akan dianalisis. Hal ini dilakukan untuk mempermudah dan mempersingkat waktu analisis. Semakin sederhana bentuk yang digunakan maka akan semakin singkat analisis yang dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Penyederhanaan ini harus dilakukan berdasarkan simetri yang ditandai dengan garis putus-putus AA' dan BB'. Gambar (b) disederhanakan dari gambar (a) dengan simetri AA' sedangkan gambar (c) disederhanakan dari gambar (b) berdasarkan simetri BB' atau melalui gambar (a) yang disederhanakan oleh simetri AA' kemudian BB'. Berbeda halnya dengan FEMM 4.2 hanya bisa digunakan gambar (a) saja karena FEMM 4.2 tidak dapat mendefinisikan garis simetri tersebut sebagai dua buah bagian inti (Bianchi,2005).

Setelah dilakukan proses perancangan di atas, dilakukan analisis menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga. Selanjutnya dapat dilakukan perhitungan lanjutan dapat dilakukan. Perhitungan ini sama halnya dengan subbab sebelumnya (Bianchi,2005):

1. Kerapatan Medan
2. Rugi
3. Energi Magnet
4. Fluksi Utama dan lain-lain

Analisis metode elemen hingga pada struktur berupa transformator yang telah dilakukan dibutuhkan perhitungan lanjutan untuk mendapatkan besaran yang diinginkan.

Besaran ini berupa besaran listrik dan besaran magnetik. Perhitungan ini dilakukan pada bagian *Magnetic Postprocessor* FEMM 4.2 dimana terdapat toolbar yang didalamnya terdapat tombol-tombol dan menu-menu seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 2.13. Berikut adalah perhitungan besaran-besaran tersebut beserta penjelasan penggunaan. Perhitungan-perhitungan dibawah ini adalah berdasarkan struktur transformator pada gambar 2.25 (b) (Bianchi, 2005:p.66-69):

**a. Kerapatan Fluksi Magnet (B)**

Kerapatan fluksi magnet pada tiap titik dapat dengan mudah diketahui dengan menggunakan mode titik seperti pada gambar 2.13 dimana terdapat *output window* yang menampilkan besaran-besaran magnetik. Nilai  $B$  ada didalam *output window* tersebut. Selain itu untuk mengetahui distribusi  $B$  pada kontur dapat digunakan mode garis pada gambar 2.13 dan tombol kurva pada gambar 2.15.

**b. Energi Magnetik ( $W_m$ )**

Energi magnetik yang dimaksud adalah energi yang tersimpan pada bagian-bagian transformator seperti inti dan kumparan. Energi yang tersimpan pada inti diperoleh dari induksi magnet oleh kumparan primer. Perhitungan energi magnetik pada inti atau kumparan mengacu pada persamaan (2-87) dan (2-88) dimana persamaan tersebut diperoleh melalui perkalian antara intensitas medan magnet  $H$  dengan kerapatan fluksi magnet  $B$  atau perkalian antara kerapatan arus  $J$  dengan vektor potensial magnet  $A$ . FEMM 4.2 menyediakan tombol mode blok integral dan integral untuk memperoleh nilai energi magnet. Untuk mendapatkan nilai energi magnetik pada inti diterapkan mode blok pada inti kemudian dilakukan integral.

**c. Fluksi Utama ( $\Phi$ )**

Fluksi utama ditentukan oleh hasil integral komponen kerapatan flux yang bersifat normal terhadap bagian inti diatas permukaan yang sama. Misalnya fluksi utama pada inti. Persamaan ini mengacu pada persamaan (2-78).

**d. Fluksi Lingkup ( $\lambda$ )**

Fluks lingkup adalah total fluksi yang dihasilkan oleh suatu kumparan berarus pada kumparan primer  $\lambda$

$$\lambda = N \Phi \dots\dots\dots(2-129)$$

Persamaan (2-125 ) dapat dijabarkan lebih rinci menjadi sebagai berikut:

$$\lambda_{10} = 2 N_1 L_{Fe} \frac{1}{S_{Cu1}} \left( \int_{S_{Cu1+}} A_z dS \right) \dots\dots\dots(2-130)$$

$$\lambda_{20} = 2 N_2 L_{Fe} \frac{1}{S_{Cu1}} \left( \int_{S_{Cu1+}} A_z dS \right) \dots\dots\dots(2-131)$$



Persamaan (2-126) dan (2-127) adalah persamaan untuk fluksi lingkup kumparan pada transformator tipe *shell* (cangkang) dalam keadaan tanpa beban. Perhitungan fluksi lingkup dilakukan dengan mengintegrasikan nilai  $A$  seluas luasan kumparan yang dihitung. Tanda  $S_{Cu1+}$  adalah luasan blok kumparan dimana arus mengalir mendekati pembaca sehingga luasan kumparan yang diintegrasikan adalah luasan tersebut saja. Kemudian dilakukan operasi perkalian dengan jumlah lilitan kumparan  $N_1$  dan panjang inti  $L_{Fe}$  serta bilangan pengali senilai 2. Bilangan pengali senilai 2 ini disebabkan adanya dua luasan kumparan primer atau sekunder yang bertanda  $+$  dan  $-$  dan memiliki luas yang sama (gambar 2.17). Apabila transformator dalam keadaan berbeban atau berbeban penuh, persamaan fluksi lingkup menjadi

$$\lambda_1 = 2 N_1 L_{average} \frac{1}{S_{Cu1+}} \left( \int_{S_{Cu1+}} A_z dS \right) \dots \dots \dots (2-132)$$

$$\lambda_2 = 2 N_2 L_{average} \frac{1}{S_{Cu2+}} \left( \int_{S_{Cu2+}} A_z dS \right) \dots \dots \dots (2-133)$$

Persamaan (2-132) dan (2-133) adalah fluksi lingkup yang dihasilkan oleh kumparan primer yang berarus  $\lambda_1$  dan oleh kumparan sekunder berarus  $\lambda_2$  dimana terdapat  $L_{average}$  yang berarti setengah panjang kumparan dalam satu lilitan.

#### e. Tegangan Terinduksi

Tegangan terinduksi pada dua kumparan adalah hasil perkalian dari fluksi lingkup dengan frekuensi listrik  $\omega = 2\pi f$  dimana transformator bekerja. Pada keadaan transformator tanpa beban diperoleh nilai tegangan terinduksi pada kumparan primer  $E_{10}$  dan sekunder  $E_{20}$  berturut-turut adalah

$$E_{10} = \omega \lambda_{10} \dots \dots \dots (2-134)$$

$$E_{20} = \omega \lambda_{20} \dots \dots \dots (2-135)$$

sedangkan nilai tegangan terinduksi pada kumparan primer  $E_1$  dan sekunder  $E_2$  saat berbeban atau berbeban penuh berturut-turut adalah sebagai berikut

$$E_1 = \omega \lambda_1 \dots \dots \dots (2-136)$$

$$E_2 = \omega \lambda_2 \dots \dots \dots (2-137)$$

#### f. Induktansi Sendiri dan Induktansi Bersama

Pada pengujian tanpa beban dengan FEMM, nilai induktansi sendiri adalah nilai induktansi tanpa beban atau induktansi magnetisasi  $L_m$ .

$$L_m = \frac{\lambda_{10}}{I_{10}} \dots \dots \dots (2-138)$$

dimana  $I_{10}$  adalah arus maksimum tanpa beban pada kumparan primer. Nilai  $L_m$  dapat diperoleh melalui nilai energi magnetik

$$L_m = \frac{2 w_m}{I_{10}^2} \dots\dots\dots(2-139)$$

Selain induktansi magnetisasi diketahui, induktansi bocor pun dapat diketahui. Induktansi bocor diperoleh dengan melakukan simulasi transformator berbeban penuh dengan masukan nilai arus pada keadaan berbeban penuh. Dengan membuat nilai arus magnetisasi bernilai nol sehingga nilai arus pada kumparan primer  $i_1$  dan arus kumparan sekunder  $i_2$  adalah sebagai berikut.

$$i_{\phi 1} = i_1 + \frac{i_2}{a} = 0 \dots\dots\dots(2-140)$$

$$i_1 = -\frac{i_2}{a} \dots\dots\dots(2-141)$$

$$i_2 = -i_1 a \dots\dots\dots(2-142)$$

sehingga diperoleh nilai induktansi bocor kumparan primer  $L_1$  dan induktansi bocor  $L_2$  melalui operasi pembagian fluksi bocor pada kumparan primer  $\lambda_{1\sigma}$  terhadap arus hubung singkat kumparan primer dan fluksi bocor pada kumparan sekunder  $\lambda_{2\sigma}$  terhadap arus hubung singkat kumparan sekunder  $I_2$ . Nilai fluksi lingkup dan arus tersebut adalah nilai maksimum fluksi lingkup dan arus tersebut.

$$L_1 = \frac{\lambda_{1\sigma}}{i_1} \dots\dots\dots(2-143)$$

$$L_2 = \frac{\lambda_{2\sigma}}{i_2} \dots\dots\dots(2-144)$$

#### g. Rugi Daya Joule

Rugi daya joule adalah rugi yang berkaitan dengan resistansi atau disebut rugi resistif atau rugi  $I^2R$  dalam IEEE std C57.110-1998. Rugi ini terdapat pada kumparan saja. Tentunya rugi ini dipengaruhi oleh besarnya arus pada kumparan.

Persamaan rugi daya joule sesaat adalah

$$P_j = \int_{\tau} \rho J^2 d\tau \dots\dots\dots(2-145)$$

Apabila objek yang akan dianalisis berupa planar, maka persamaan rugi daya joule ini adalah sebagai berikut:

$$P_j = L \int_S \rho J^2 dS \dots\dots\dots(2-146)$$

dimana L adalah panjang kumparan dan S adalah luas blok kumparan.

Hasil perhitungan rugi daya joule pada FEMM adalah nilai rata-rata rugi tersebut sehingga persamaan rugi tersebut adalah

$$P_j = \frac{L}{2} \int_S \rho J^2 dS \dots\dots\dots(2-147)$$

## 2.10. Rugi Transformator

Rugi transformator ( $P_T$ ) terdiri dari rugi-rugi berbeban (*load losses*) dan rugi tanpa beban (*no-load losses*) seperti persamaan berikut (Sharifian *et al*, 2003)

$$P_T = P_{LL} + P_{NL} \dots\dots\dots (2-148)$$

### 2.10.1. Rugi Berbeban( $P_{LL}$ )

Rugi berbeban ada dua macam yaitu rugi  $I^2 R$  dan rugi *stray*. Rugi berbeban inilah yang dipengaruhi oleh adanya beban non linier. Rugi liar total ( $P_{TSL}$ ) adalah rugi oleh fluksi elektromagnetik bocor yang terdapat pada belitan, tangki, klem inti dan lain-lain (IEEE, 1998). Rugi *stray* total ini dibagi menjadi dua yaitu rugi arus eddy pada belitan  $P_{EC}$  dan rugi *stray* lainnya ( $P_{OSL}$ ) sedangkan rugi  $I^2 R$  atau rugi ohmik adalah rugi yang timbul akibat adanya arus yang mengalir pada kumparan primer dan kumparan sekunder transformator. Nilai rugi belitan ini akan meningkat pangkat dua dari nilai arus beban. Apabila transformator dibebani beban non-linier nilai rugi belitan akan bertambah sangat besar lagi seiring nilai rms arus beban akibat adanya beban non-linier (Asrami, *et al*, 2011).

#### 2.10.1.1. Rugi $I^2 R$ / Rugi Resistif

Rugi  $I^2 R$  adalah rugi akibat adanya pemanasan resistif pada kumparan primer dan sekunder transformator. Rugi ini berbanding lurus dengan kuadrat arus yang mengalir pada kumparan-kumparan tersebut (Chapman,2005)

#### 2.10.1.2. Rugi *Stray* ( $P_{SL}$ )

Ada banyak penyebab rugi *stray*, salah satunya adalah *proximity effect*. *Proximity effect*. yang menyebabkan penambahan rugi pada kumparan. yang disebabkan adanya ketidakseragaman arus pada konduktor. Ketidakseragaman arus ini disebabkan oleh medan magnet yang memotong konduktor lain didekatnya yang dapat menambah resistansi kumparan atau dapat disebut sebagai dampak langsung dari Hukum Faraday dimana ada arus pusar yang terinduksi yang melawan fluksi yang dihasilkan oleh arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan (Hurley & Wolfle, 2013). Fluksi yang memotong konduktor tersebut adalah fluksi bocor. Pada standar IEEE dikategorikan sebagai rugi arus eddy pada kumparan. Rugi *stray* ini dihasilkan saat transformator berbeban.

### 2.10.2. Rugi Inti Besi/Rugi Tanpa Beban ( $P_c$ )

Rugi inti besi adalah rugi yang terjadi ketika jenis material feromagnetik dialiri fluksi yang memiliki arah yang tetap dan besaran yang berubah-ubah tiap waktu (Sawhney, 1990). Persamaan rugi inti adalah sebagai berikut (Bianchi,2005):

$$P_C = \int_{\tau} P_{s,c} B_M^2 \gamma d\tau \text{ Watt} \dots \dots \dots (2-149)$$

Keterangan:

$P_C$  : Rugi inti (W)

$P_{s,c}$  : Rugi spesifik inti (W/kg)

$B_M$  : Kerapatan Fluksi Magnet Maksimum (T)

$\gamma$  : berat spesifik inti (kg/m<sup>3</sup>)

$\tau$  : volume (m<sup>3</sup>)

Apabila transformator bekerja pada frekuensi selain 50 Hz, rugi inti harus dikalikan dengan  $(f/50)^2$  (Bianchi, 2005).

### 2.11. Efisiensi Transformator

Berkaitan dengan rugi-rugi transformator yang telah diuraikan di atas adalah efisiensi. Efisiensi adalah perbandingan antara daya masukan dengan daya keluaran yang biasanya diwujudkan dalam bentuk prosentase. Bagaimana daya masukan dapat dikirim semaksimal mungkin menuju beban. Beban yang tersambung dengan transformator sangat berpengaruh terhadap efisiensi transformator. Beban yang semakin besar akan membutuhkan arus yang besar pula. Arus yang besar yang mengalir dapat menyebabkan rugi-rugi berupa panas pada belitan transformator. Rugi-rugi yang besar sedangkan daya masukan yang tetap akan menyebabkan efisiensi transformator yang rendah sehingga daya yang terkirim tidak dapat maksimal. Efisiensi dinyatakan dalam persamaan berikut (Chapman,2005)

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out}+P_T} \times 100\% \dots \dots \dots (2-150)$$

dengan (Hart,2011)

$$P_{out} = I_{rms}^2 R \dots \dots \dots (2-151)$$

Keterangan :

$P_{out}$  : Daya keluaran beban (W)

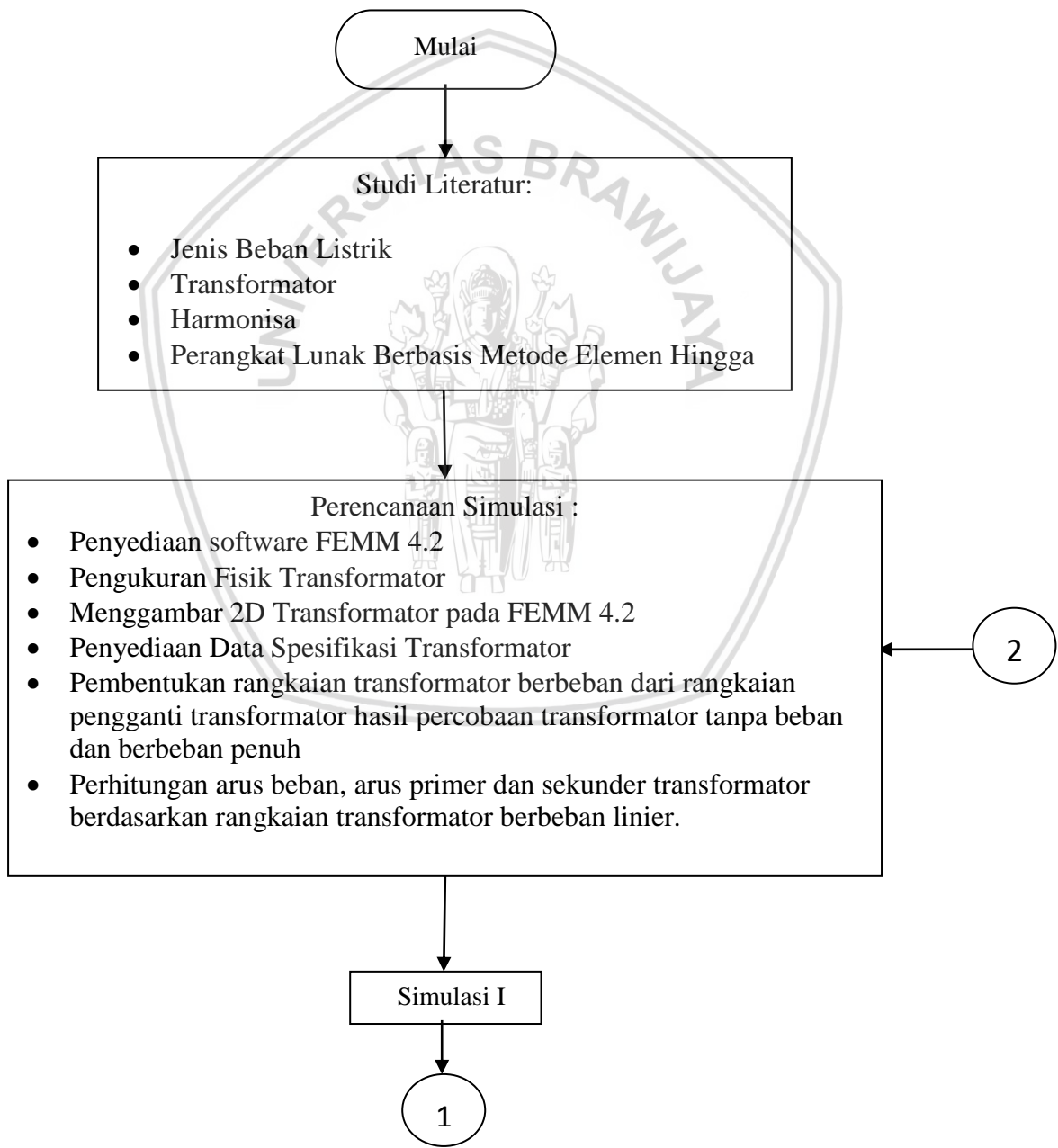
$P_T$  : Rugi-rugi total (W)

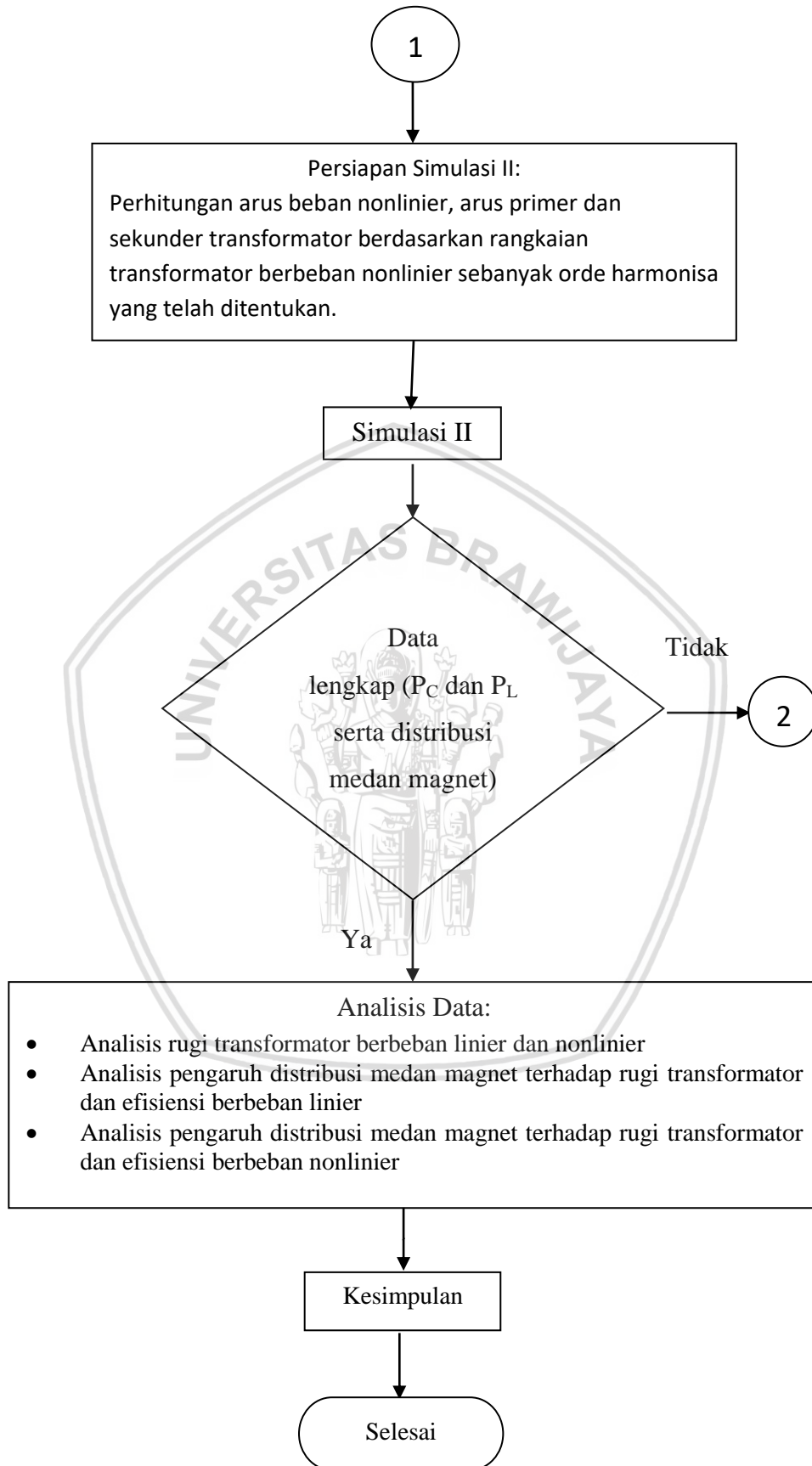
$I_{rms}$  : arus rms beban

$R$  : nilai resistor pada beban

### BAB III METODE PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian dibutuhkan cara atau metode penelitian. Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai rugi-rugi transformator berbeban linier dan nonlinier dan distribusi medan magnet transformator menggunakan FEMM 4.2.. Berikut adalah diagram alir penelitian:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



### 3.1. Studi Literatur

Dalam penelitian ini dibutuhkan pemahaman mengenai jenis beban non linier dan linier, transformator, harmonisa, perangkat lunak berbasis metode elemen hingga serta hubungan antara ketiga hal tersebut. Untuk memahami hal-hal tersebut digunakan jurnal ilmiah, buku, skripsi, jurnal dan sumber relevan lainnya.

### 3.2. Perencanaan Simulasi

Perencanaan simulasi dilakukan agar simulasi berjalan dengan baik. Perencanaan simulasi dilakukan dalam dua tahap karena simulasi yang dilakukan sebanyak dua kali yakni simulasi I dan II

#### 3.2.1. Perencanaan Simulasi I

Simulasi I adalah simulasi transformator tanpa beban, simulasi II berbeban linier dan berbeban non linier. Di dalam bagian ini terdapat perencanaan yang bersifat umum yaitu seperti penyediaan perangkat lunak (FEMM 4.2), *datasheet* transformator, dan hasil pengukuran transformator. Untuk lebih detail, ada beberapa hal yang perlu dilakukan pada tahap ini:

1. Penyediaan software FEMM 4.2

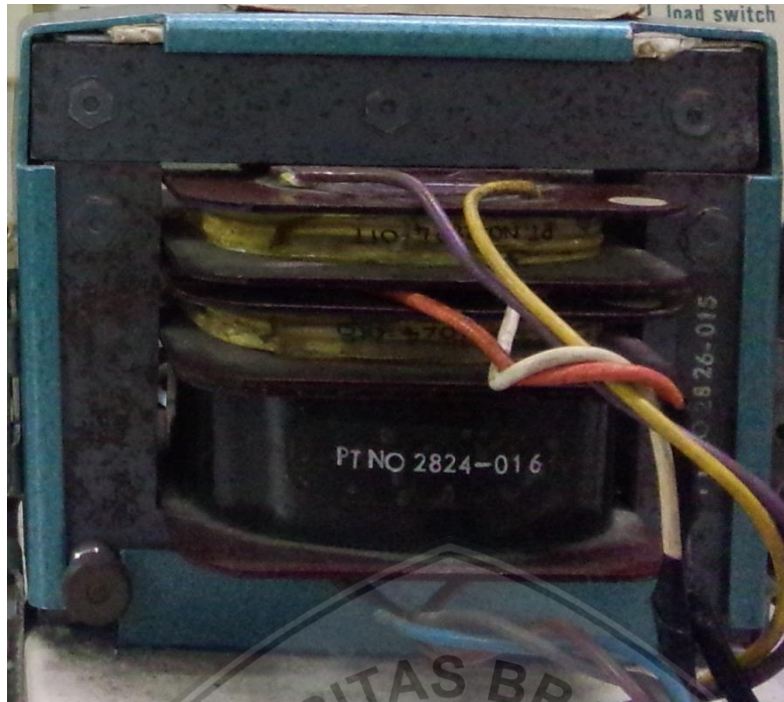
Software ini bersifat bebas dan mudah untuk diunduh. Software ini didapatkan pada situs [femm.org](http://femm.org)

2. Pengukuran bentuk fisik transformator

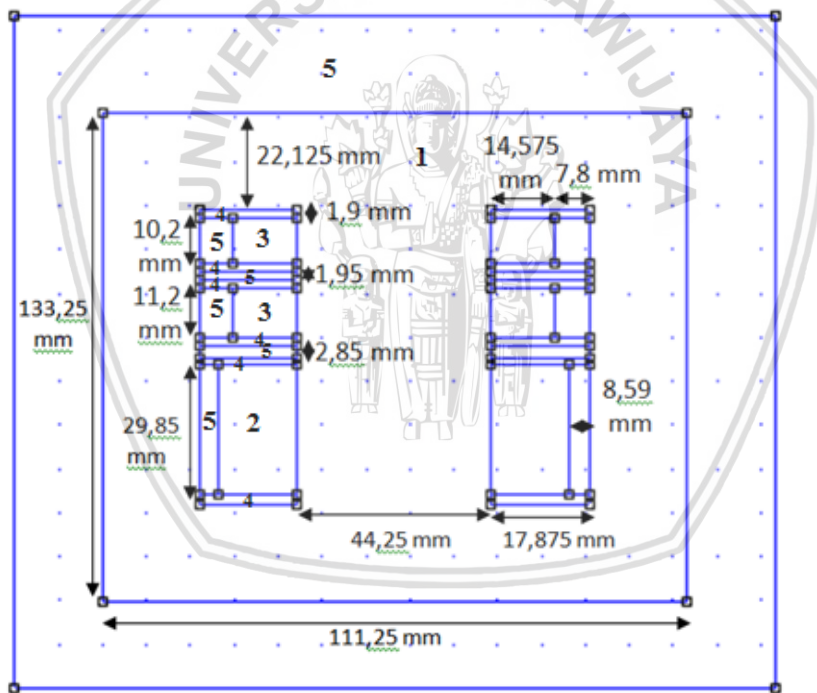
Pengukuran ini bertujuan untuk mendapatkan ukuran panjang, lebar, tinggi inti besi, jarak sela antar belitan dan jarak sela belitan dan inti besi. Pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong.

3. Penggambaran 2D Transformator pada FEMM 4.2

Bentuk transformator sebenarnya tidak dapat langsung dimasukkan ke dalam FEMM melainkan harus disederhanakan terlebih dahulu menjadi bentuk 2D. Oleh karena itu setelah dilakukan pengukuran transformator dilakukan penggambaran transformator dalam 2D. Transformator yang akan dianalisis telah disederhanakan berdasarkan teori pada bab II perihal penyederhanaan bentuk transformator yang dianalisis menggunakan metode elemen hingga. Bentuk transformator sebenarnya dan detail ukuran transformator dalam 2D dapat dilihat dalam gambar 3.2 dibawah ini.



a)



b)

Gambar 3.2. a) Bentuk transformator sebenarnya dan b) bentuk dan ukuran detail 2D transformator yang akan dianalisis serta bagian-bagian transformator

Sumber: FEMM 4.2

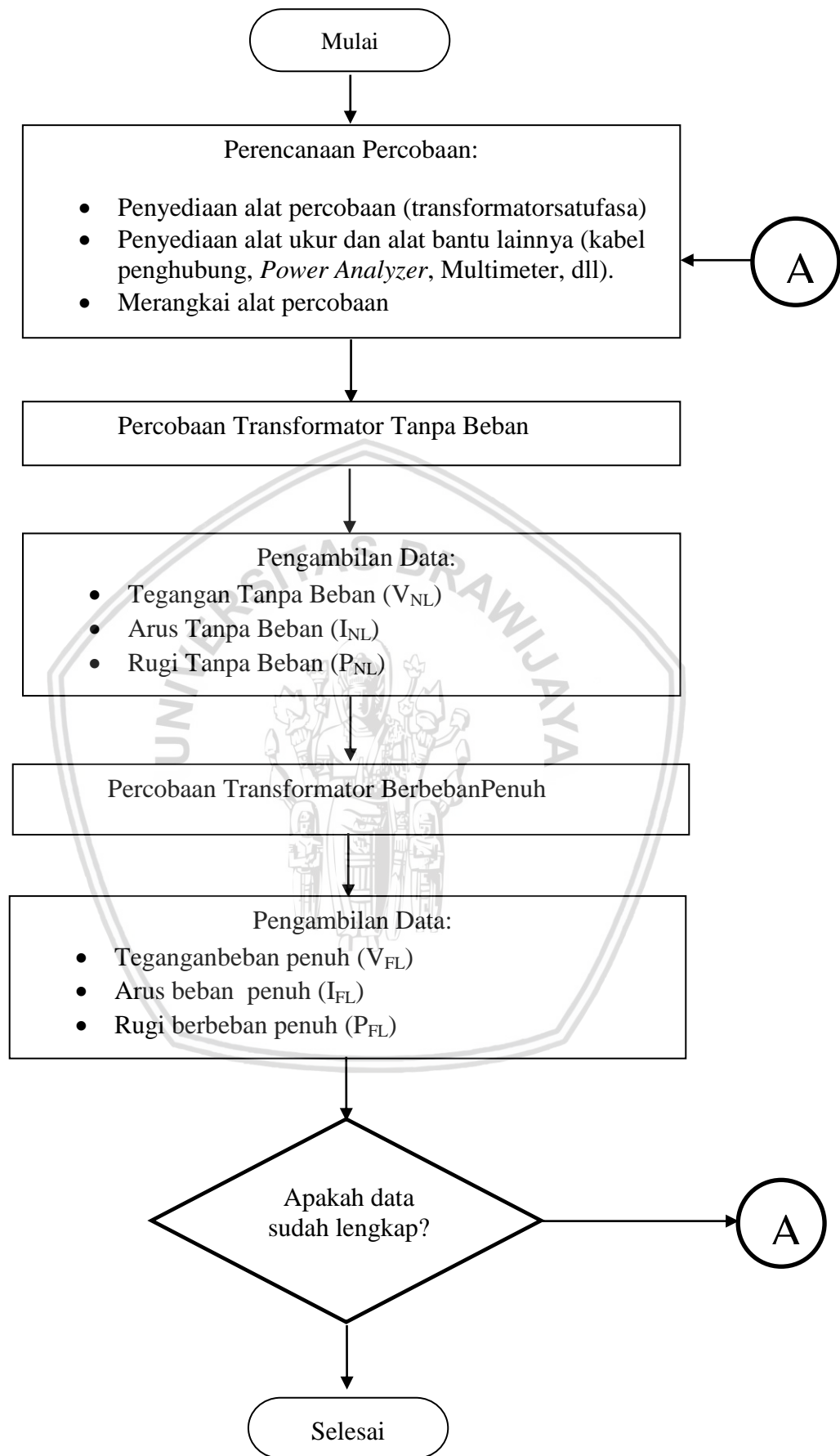
Keterangan gambar:

1. Inti , 2. Kumparan sekunder, 3. Kumparan Sekunder, 4. Mika, 5. Udara
4. Penyediaan data spesifikasi transformator

Penyediaan data spesifikasi transformator dimanaberguna untuk desain transformator yang akan dianalisis. Beberapa spesifikasi transformator diambil dari buku petunjuk *Feedback Transformer TT 179* yang terdapat pada lampiran laporan ini. Berikut adalah detail spesifikasi transformator yang digunakan pada penelitian ini;

1. Daya : 240 VA
  2. Tegangan primer : 120/60 V
  3. Tegangan sekunder : 120/60 V
  4. Frekuensi kerja : 50 Hz
  5. Tipe transformator : Tipe *Shell*
  6. Ukuran inti besi : 111x30x133 mm
  7. Jenis bahan Inti besi : *Cold Rolled Low Carbon Steel, annealed*
  8. Jumlah lilitan kumparan primer : 270 lilitan
  9. Jumlah lilitan kunparan sekunder : 148 lilitan
  10. Tinggi kumparan primer : 29,85 mm
  11. Tinggi kumparan sekunder : 10,2 mm
  12. Diameter kumparan primer : 0,91 mm.
  13. Tebal inti besi : 30 mm
  14. Keliling kumparan primer : 280 mm
  15. Keliling kumparan sekunder : 248 mm
5. Pembentukan rangkaian transformator berbeban dari rangkaian pengganti transformator hasil percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh

Rangkaian pengganti didapat melalui parameter transformator yang didapat dengan melakukan percobaan transformator tanpa beban dan beban penuh. Data hasil percobaan transformator tersebut diolah sehingga diperoleh parameter transformator



Gambar 3.3 Diagram alir percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh

Berikut detail percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh.

### 1. Perencanaan Percobaan

Sebelum dilakukan pengujian, perlu adanya perencanaan yang meliputi penyediaan, persiapan, dan pengecekan pada alat pengujian serta alat instrumentasi. Hal tersebut harus dilakukan agar mengurangi kegagalan dan keakuratan dalam pengambilan data, sehingga dalam percobaan ini berjalan dengan baik.

- Penyediaan alat percobaan (transformator satu fasa)
- Penyediaan alat ukur dan alat bantu lainnya (kabel penghubung, Multimeter, dll).
- Merangkai rangkaian percobaan

#### 1a. Penyediaan Alat Pengujian

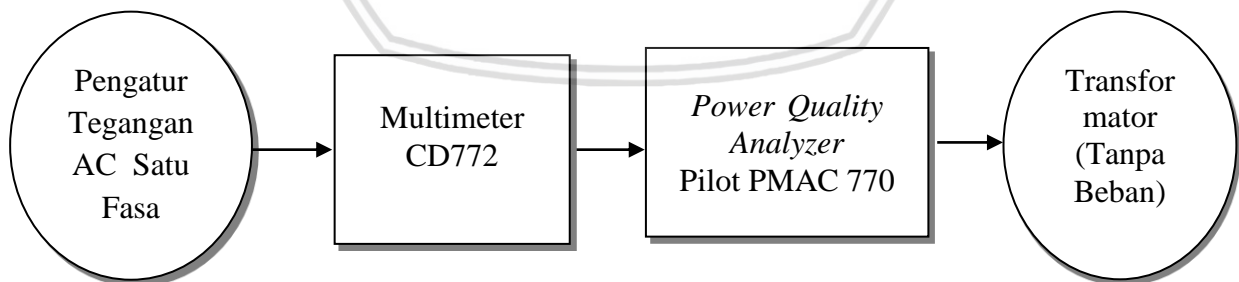
Pada penelitian ini digunakan beban resistif sebagai beban linier sedangkan beban non linier yang digunakan adalah beban resistif yang dirangkai seri dengan dioda. Dioda ini dirangkai rangkaian penyearah satu fasa gelombang penuh sebagai beban non linier.

Berikut merupakan alat-alat pengujian yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah

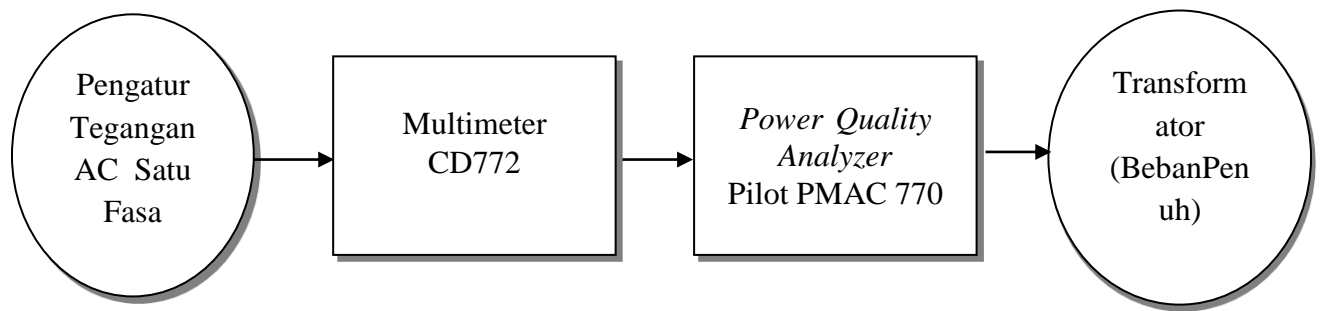
1. Trafo Satu Fasa 120/120 V Tipe Shell merk *Feed Back Transformer TT-179*
2. Kabel Penghubung
3. *Power Quality Analyzer Pilot PMAC 770*
4. Multimeter Elektronik CD 772

#### 1b. Merangkai Alat Percobaan

Alat-alat percobaan yang sudah disiapkan dirangkai sesuai prosedur percobaan. Prosedur percobaan ada pada bab IV sedangkan rangkaian percobaan sesuai diagram percobaan pada *gambar 3.4* dan *gambar 3.5*.



*Gambar 3.4* Diagram percobaan tanpa beban



Gambar 3.5 Diagram percobaan transformator beban penuh.

Tegangan, arus dan rugi tanpa beban dan bebaban penuh diukur pada sisi primer transformator. Multimeter elektronik CD772 digunakan untuk mengukur tegangan tanpa beban pada percobaan tanpa beban dan tegangan transformator berbeban penuh pada percobaan berbeban penuh sedangkan *Power Quality Analyzer Pilot PMAC 770* digunakan untuk mengukur arus dan rugi tanpa beban pada percobaan transformator tanpa beban sedangkan pada percobaan transformator berbeban penuh digunakan untuk mengukur arus dan rugi transformator berbeban penuh.

## 2. Percobaan

Percobaan yang dilakukan ada dua macam percobaan adalah percobaan tanpa beban dan berbeban penuh. Percobaan tanpa beban dan berbeban penuh dilakukan untuk mendapatkan parameter transformator. Data yang didapat dalam percobaan tanpa beban ada tiga macam yaitu tegangan tanpa beban, arus tanpa beban dan rugi tanpa beban ( $V_{NL}$ ,  $I_{NL}$ ,  $P_{NL}$ ) sedangkan data yang didapat dalam percobaan berbeban penuh yaitu tegangan beban penuh, arus beban penuh dan rugi berbeban penuh ( $V_{FL}$ ,  $I_{FL}$ ,  $P_{FL}$ ).

### 3.2.2. Perencanaan Simulasi II

Simulasi II adalah simulasi transformator berbeban non linier sehingga hal-hal yang perlu direncanakan adalah data harmonisa arus primer dan sekunder yang akan digunakan sebagai masukan simulasi transformator berbeban nonlinier. Data ini diperoleh dari hasil perhitungan arus menggunakan rangkaian transformator berbeban nonlinier.

### 3.3. Simulasi

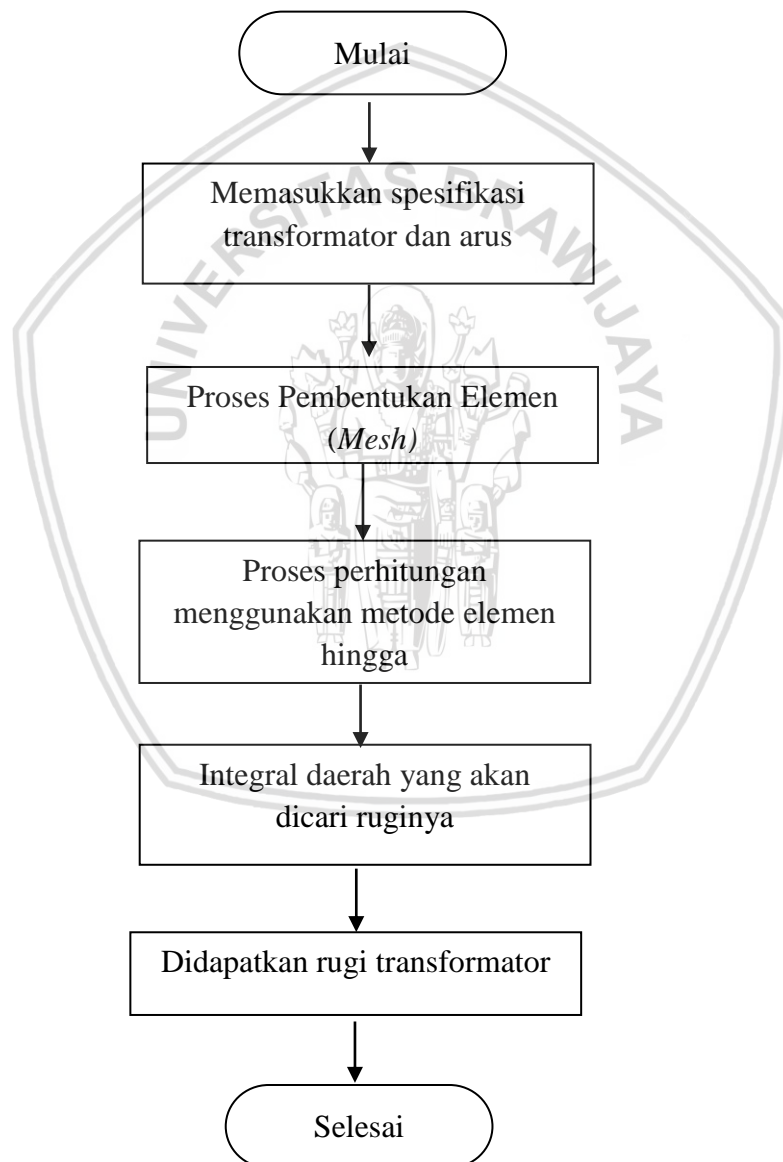
Simulasi dilakukan sebanyak dua tahap yakni simulasi I dan simulasi II. Simulasi I dilakukan untuk transformator berbeban linier sedangkan simulasi II dilakukan untuk transformator berbeban non linier. Dibutuhkan data-data arus dari hasil percobaan transformator berbeban.

### 3.3.1 Simulasi I

Simulasi I adalah simulasi transformator berbeban linier dimana bertujuan untuk mendapatkan rugi transformator berbeban linier. Simulasi dilakukan sebanyak tiga kali sesuai jenis beban yang digunakan yaitu resistor senilai 150 Ohm, 200 Ohm dan 300 Ohm.

### 3.3.2 Simulasi II

Simulasi II adalah simulasi transformator berbeban nonlinier dimana bertujuan untuk mendapatkan rugi transformator berbeban nonlinier. Simulasi dilakukan sebanyak enam kali untuk setiap jenis pembebanan nonlinier transformator yaitu untuk orde ke-0, 1, 2, 4, 6 dan 8. Berikut adalah diagram simulasi secara umum



Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi FEMM secara umum

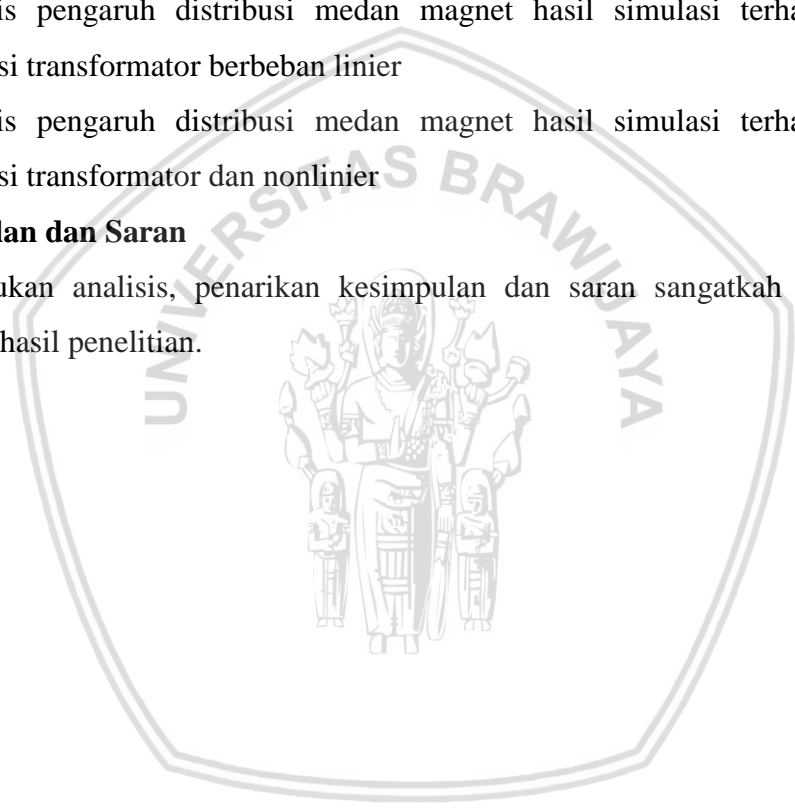
### 3.4 Analisis Data

Sebelum melakukan simulasi, perlu dilakukan perhitungan arus primer dan sekunder transformator. Arus primer dan sekunder transformator ini diperoleh melalui perhitungan arus berdasarkan rangkaian transformator berbeban linier dan nonlinier. Rangkaian tersebut berasal dari rangkaian pengganti transformator yang diperoleh dari hasil pengujian transformator tanpa beban dan berbeban penuh. Setelah dilakukan simulasi menggunakan FEMM 4.2, didapatkan hasil rugi transformator berbeban linier dan non linier. Ada beberapa hal yang dilakukan dalam subbab ini:

1. Analisis rugi transformator berbeban linier dan nonlinier
2. Analisis pengaruh distribusi medan magnet hasil simulasi terhadap rugi dan efisiensi transformator berbeban linier
3. Analisis pengaruh distribusi medan magnet hasil simulasi terhadap rugi dan efisiensi transformator dan nonlinier

### 3.5 Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisis, penarikan kesimpulan dan saran sangatlah penting untuk mengevaluasi hasil penelitian.









## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Data Hasil Percobaan

Data hasil percobaan yang diperoleh pada bab ini adalah data hasil percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh dimana dilakukan sesuai prosedur percobaan yang telah dijelaskan pada bab III. Data hasil percobaan tanpa beban diperoleh tiga data yaitu tegangan tanpa beban  $V_{NL}$ , arus tanpa beban  $I_{NL}$ , dan daya tanpa beban  $P_{NL}$  sedangkan percobaan berbeban penuh menghasilkan tiga data yaitu data tegangan beban penuh  $V_{FL}$ , arus beban penuh  $I_{NL}$  dan daya beban penuh  $P_{FL}$ .

##### 4.1.1 Data Hasil Percobaan Transformator Tanpa Beban

Hasil percobaan transformator tanpa beban adalah sebagai berikut

Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan Tanpa Beban Transformator

$V_{NL}(V)$	$I_{NL}(A)$	$P_{NL}(W)$
120	0,82872	8,7

Keterangan:

$V_{in}$  : tegangan masukan (V)

$I_{NL}$  : arus tanpa beban (A)

$P_{NL}$  : rugi transformator tanpa beban (W)

Dengan menggunakan tabel 4.1, ditemukan tanpa beban  $P_{NL}$ . Selanjutnya hasil pengukuran tegangan, arus dan rugi transformator berbeban penuh digunakan untuk menentukan parameter transformator seperti resistansi ekuivalen kumparan  $R_{eq}$  dan impedansi bocor ekuivalen kumparan  $X_{eq}$ .

#### 4.1.2 Data Hasil Percobaan Transformator Berbeban Penuh

Hasil percobaan transformator transformator berbeban penuh adalah sebagai berikut

Tabel 4.2 Data Hasil Percobaan Transformator Berbeban Penuh

$I_{FL}$ (A)	$V_{FL}$ (V)	$P_{FL}$ (W)
2	15,23	25,4

Keterangan:

$I_{SC}$  : arus beban penuh (A)

$V_{SC}$  : tegangan primer transformator ketika transformator berbeban penuh (V)

$P_{SC}$  : rugi transformator ketika transformator berbeban penuh (W)

#### 4.2 Perhitungan Parameter Transformator dan Pembentukan Rangkaian Pengganti Transformator

Setelah dilakukan percobaan transformator tanpa beban dan berbeban penuh, dilakukan perhitungan parameter transformator dan pembentukan rangkaian pengganti transformator. Perhitungan parameter transformator ada dua macam perhitungan. Pertama, perhitungan parameter transformator tanpa beban dan perhitungan parameter transformator berbeban penuh. Perhitungan parameter transformator tanpa beban adalah berupa nilai resistansi inti besi  $R_C$  dan reaktansi magnetisasi  $X_m$  sedangkan hasil perhitungan parameter transformator berbeban penuh adalah berupa nilai resistansi ekuivalen  $R_{eq}$  dan reaktansi ekuivalen  $X_{eq}$  atau yang disebut sebagai reaktansi bocor kumparan. Dengan demikian rangkaian pengganti transformator dapat dibentuk. Perhitungan parameter transformator dilakukan berdasarkan persamaan (2-117) hingga (2-128).

$$P_o = V_o x I_o \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P_o}{V_o x I_o}$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left[ \frac{P_o}{V_o x I_o} \right]$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left[ \frac{8,7}{120 x 0,82872} \right]$$

$$\varphi = 84,9811^\circ$$

dimana

$$Y_o = \frac{I_o}{V_o} \angle - 84,9811^\circ$$

$$Y_o = \frac{0,82872}{120} \angle -84,9811^\circ$$

$$Y_o = 0,006906 \angle -84,9811^\circ \text{ Mho}$$

$$Y_o = 0,006906 \cos(-84,9811^\circ) + j 0,006906 \sin(-84,9811^\circ) \text{ Mho}$$

$$Y_o = 0,006906 - j 0,00688 \text{ Mho}$$

dimana

$$Y_o = \frac{1}{R_c} - j \frac{1}{X_m}$$

sehingga  $R_c = \frac{1}{0,006906} = 145,35894 \text{ Ohm}$

$$X_m = 145,35894 \text{ H}$$

Untuk memudahkan perhitungan arus eksitasi saat transformator berbeban nonlinier dibutuhkan nilai  $Z_o$ :

$$Z_o = \frac{V_o}{I_o} \angle 84,9811^\circ \text{ Ohm}$$

$$Z_o = \frac{120}{0,82872} \angle 84,9811^\circ \text{ Ohm}$$

$$Z_o = 144,8016 \angle 84,9811^\circ \text{ Ohm}$$

$$Z_o = 12,66787 + j144,2464 \text{ Ohm}$$

sedangkan untuk pengujian hubung singkat

$$P_{SC} = V_{SC} \times I_{SC} \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{SC}}{V_{SC} \times I_{SC}}$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left[ \frac{25,4}{15,23 \times 2} \right]$$

$$\varphi = 33,5006^\circ$$

$$Z_{SC} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle \varphi$$

dimana

$$Z_{SC} = \frac{15,23}{2} \angle 33,5006^\circ$$

$$Z_{SC} = 7,615 \angle 33,5006^\circ \text{ Ohm}$$

kemudian diubah menjadi bilangan kompleks

$$Z_{SC} = R_{eq} + jX_{eq} \text{ Ohm}$$

$$Z_{SC} = 6,35 + j4,20306 \text{ Ohm}$$

sehingga  $R_{eq} = 6,35 \text{ Ohm}$  dan  $X_{eq} = j4,20306 \text{ Ohm}$

Parameter transformator adalah parameter transformator dengan referensi primer transformator. Untuk mendapatkan nilai arus rms primer dan sekunder transformator, parameter tersebut harus ditransformasikan terlebih dahulu ke sisi sekunder transformator. Hal ini dilakukan untuk memudahkan perhitungan arus rms beban transformator. Oleh karena itu dibutuhkan angka transformasi  $a$ . Berikut perhitungan secara detail perhitungan angka transformasi dan parameter transformator dengan referensi sekunder transformator

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

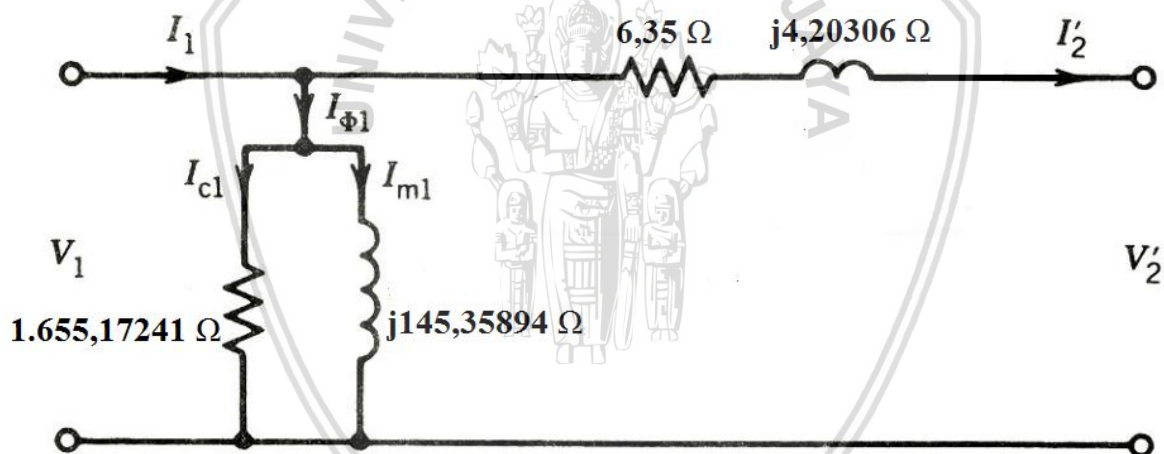
$$a = \frac{270}{148+148} = 0,9122$$

sehingga

$$\frac{V_1}{V_1'} = 0,9122$$

$$V_1' = \frac{120}{0,9122}$$

$$V_1' = 131,5555 \text{ V}$$



Gambar 4.1. Rangkaian pengganti transformator dengan primersebagai referensi.

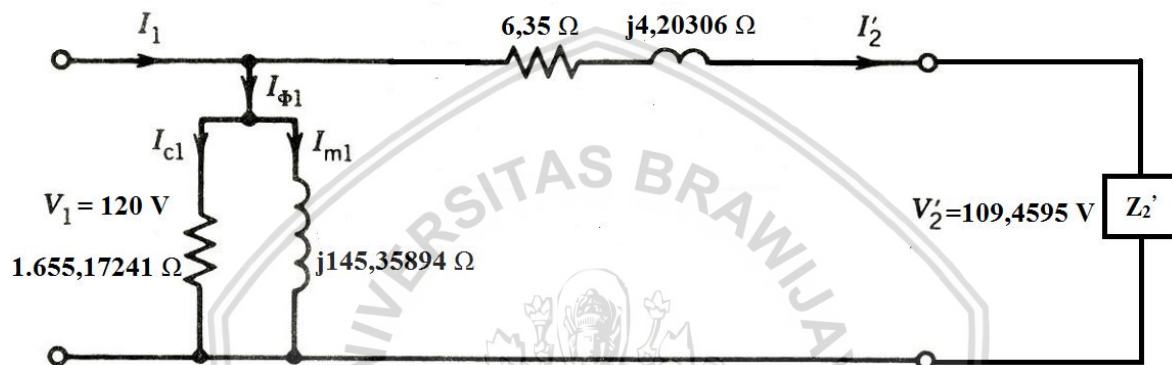
#### 4.3 Perhitungan Amplitudo Arus Beban Linier dan Nonlinier

Rangkaian telah diketahui. Namun nilai resistansi dan reaktansi bocor tidak bernilai sangat kecil apabila dibandingkan dengan nilai resistansi dan reaktansi tanpa beban sehingga perlu dilakukan perhitungan arus primer dan sekunder berdasarkan persamaan (2-114) menggunakan rangkaian pengganti transformator pada gambar (2.19). Yang perlu diperhatikan adalah nilai arus yang digunakan adalah nilai maksimum arus tersebut agar perhitungan sesuai dengan teori yang telah dibahas sebelumnya. Dengan telah diketahui rangkaian pengganti transformator, dilakukan pembentukan rangkaian listrik transformator berbeban dimana beban linier berupa resistor dengan nilai berturut-turut sebesar 150 Ohm,

200 Ohm dan 300 Ohm sedangkan beban nonlinier yang digunakan adalah berupa rangkaian penyearah gelombang penuh satu fasa dengan resistor yang diseri dengan induktor senilai  $150+j0,05$  Ohm,  $200+j0,05$  Ohm dan  $300+j0,05$  Ohm. Untuk memudahkan penyebutan masing-masing beban yang berturut-turut diberi nama *Linier I*, *Linier II*, *Linier III*, *Nonlinier 1* *Nonlinier 2*, dan *Nonlinier 3*.

#### 4.3.1 Perhitungan Amplitudo Arus Transformator Berbeban Linier

Dengan diperoleh nilai tegangan sekunder transformator, berikut rangkaian pengganti transformator berbeban linier yang ditransformasikan pada sisi sekunder transformator sesuai gambar 2.13a.



Gambar 4.2. Rangkaian transformator berbeban linier dengan primer sebagai referensi.

Sumber : Sen (2014;p.51)

Dengan diketahuinya rangkaian pengganti transformator berbeban linier maka didapatkan nilai arus beban. Berikut adalah perhitungan arus maksimum beban linier:

Untuk Beban Linier 150 Ohm

$$Z_2' = \frac{Z_2}{a^2}$$

$$Z_2' = \frac{Z_2}{a^2}$$

$$I_L = \frac{V_2}{Z/a^2}$$

$$I_L = \frac{120\sqrt{2}}{150/0,9122^2} = 1,131370849898476 \text{ A}$$

Dengan telah diketahuinya rangkaian transformator tersebut, selanjutnya dapat dihitung impedansi beban dan arus-arus pada transformator. Berikut adalah perhitungan impedansi beban dan arus-arus pada transformator berbeban *Linier I*.

$$Z' = a^2 Z$$

$$Z' = \left(\frac{270}{296}\right)^2 \times 150$$

$$Z' = 124,80597 \text{ Ohm}$$

sehingga arus sekunder sebesar

$$I_2' = \frac{109,4595x\sqrt{2}}{124,80597}$$

$$I_2' = 1,240318 \text{ A.}$$

nilai arus sekunder ini adalah nilai maksimum atau amplitudo gelombang arus sekunder. Selanjutnya dihitung tegangan terinduksi  $E_2'$  untuk memperoleh arus eksitasi. Tegangan terinduksi diperoleh melalui perhitungan tegangan pada rangkaian sesuai persamaan (2-116)

$$V_2 = E_2' - R_{eq} I_2' - jX_{eq} I_2'$$

$$E_2' = V_2' + R_{eq} I_2' + jX_{eq} I_2'$$

$$E_2' = 120 x \sqrt{2} x \frac{270}{296} + 6,35 x 1,240318 + j4,20306x 1,240318$$

$$E_2' = 161,9833 + j5,21313 \text{ Volt}$$

$$E_2' = 162,06712 \angle 1,843322^\circ \text{ Volt}$$

sehingga nilai arus eksitasi

$$I_{\phi 1} = \frac{E_1}{Z_0}$$

$$I_{\phi 1} = \frac{162,06712 \angle 1,843322^\circ}{144,8016 \angle 84,9811^\circ}$$

$$I_{\phi 1} = 1,11924 \angle -84,9811^\circ \text{ A}$$

$$I_{\phi 1} = 0,133729 - j1,11122 \text{ A}$$

dengan demikian nilai arus primer

$$I_1 = I_{\phi 1} + I_2'$$

$$I_1 = 0,133729 - j1,11122 + 1,240318$$

$$I_1 = 1,37405 - j1,11122^\circ \text{ A}$$

$$I_1 = 1,76715 \angle -38,9631^\circ \text{ A}$$

Nilai arus yang digunakan dalam simulasi adalah besar dari arus tersebut sehingga nilai arus primer transformator berbeban *Linier 1* adalah sebesar 1,76715 A. Setelah dilakukan perhitungan arus primer dan sekunder untuk beban *Linier 1* dilakukan perhitungan arus primer dan arus sekunder beban *Linier 2* dan *Linier 3* sehingga diperoleh nilai arus-arus tersebut pada tabel 4.2. Nilai arus sekunder yang digunakan dalam simulasi adalah nilai arus sekunder pada asalnya yaitu  $I_2$  sehingga nilai  $I_2'$  dikalikan angka transformasi  $a$  yang tercantum pada tabel 4.2.

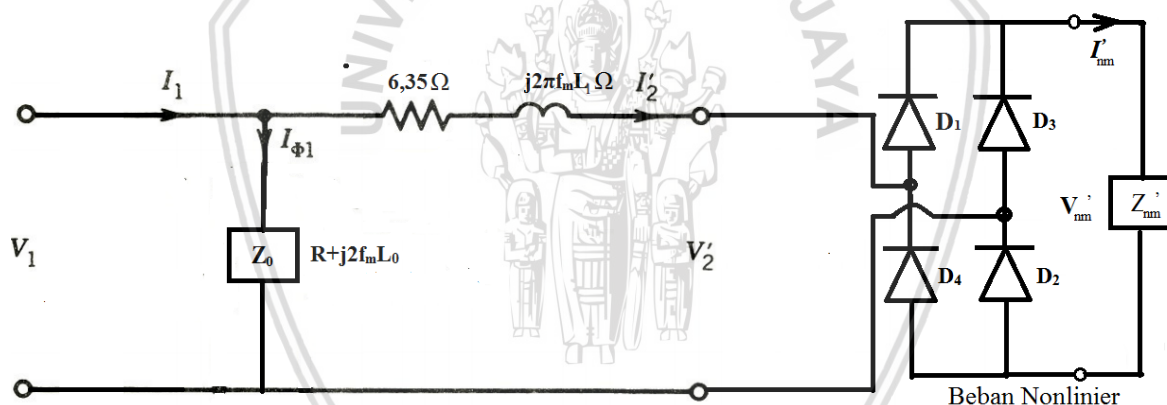


Tabel 4.3. Amplitudo Arus Primer dan Arus Sekunder

Jenis Beban	Arus Primer (A)	Arus Sekunder (A)
Linier 1	1,767147	1,13137
Linier 2	1,523144	0,84853
Linier 3	1,312387	0,56569

### 4.3.2 Perhitungan Amplitudo Arus Transformator Berbeban Nonlinier

Sama halnya dengan subbab 4.3.1, analisis transformator berbeban nonlinier menggunakan rangkaian transformator berbeban yang mirip dengan gambar 4.6 dengan pembeda pada bagian *load*-nya saja. Pada bagian *load* atau beban digunakan sebuah empat buah dioda sebagai penyearah gelombang penuh yang dirangkai seri dengan resistor dan induktor dengan berbagai nilai yaitu  $150+j0,05$  Ohm,  $200+j0,05$  Ohm dan  $300+j0,05$  Ohm. Untuk memudahkan penyebutan dan penulisan digunakan istilah yang secara berturut-turut adalah *Nonlinier 1*, *Nonlinier 2*, dan *Nonlinier 3*.



Gambar 4.3. Rangkaian transformator berbeban nonlinier dengan primer sebagai referensi.

Sumber : Sen (2014;p.51)

Gambar 4.3 di atas adalah rangkaian transformator berbeban nonlinier.  $f_m$  adalah frekuensi harmonisa ke- $m$  dan  $L_0$  adalah induktansi tanpa beban serta  $L_1$  adalah induktansi bocor. Gambar 4.3 dibentuk untuk memudahkan perhitungan arus-arus pada transformator. Sebelum dilakukan analisis rugi transformator berbeban nonlinier, perlu dilakukan analisis fourier untuk gelombang tegangan pada sisi  $Z$  dan arus beban *Nonlinier 1* dengan menggunakan persamaan (2-16) hingga (2-20) diperoleh nilai arus searah:

$$I_{n0} = \frac{2V_2}{\pi R}$$

$$I_{n0} = \frac{2 \times 120 \times \sqrt{2}}{\pi \times 150} = 0,720253 \text{ A}$$

sedangkan untuk komponen harmonisa arus pada orde 2:

$$m = 2$$

$$V_{n2} = \frac{2V_2}{\pi} \left( \frac{1}{(m^2 - 1)} \right)$$

$$V_{n2} = \frac{2 \times 120 \times \sqrt{2}}{\pi} \left( \frac{1}{(2^2 - 1)\pi} \right) = 108,038 \text{ V}$$

sehingga amplitudo harmonisa arus orde dua  $I_{n2}$  sebesar

$$I_{n2} = \frac{V_{n2}}{Z} = \frac{108,038}{|150 + j0,05|} = 0,46997 \text{ A}$$

kemudian dilakukan perhitungan hingga orde 8. Tabel 4.4 dan tabel 4.5 adalah tabel lengkap hasil analisis *fourier* berturut-turut untuk beban *Nonlinier 1*, *Nonlinier 2* dan *Nonlinier 3*:

Tabel 4.4. Hasil Analisis Fourier Transformator Berbeban Nonlinier

Jenis Beban	m	V <sub>nm</sub>	Z <sub>nm</sub>	I <sub>nm</sub>
<b>Nonlinier 1</b>	0	108,038	150	0,720253
	2	72,02531	153,2546	0,469972
	4	14,40506	162,6279	0,088577
	6	6,173598	177,1515	0,034849
	8	3,429776	195,6818	0,017527
<b>Nonlinier 2</b>	0	108,038	200	0,54019
	2	72,02531	202,4524	0,355764
	4	14,40506	209,6374	0,068714
	6	6,173598	221,0942	0,027923
	8	3,429776	236,202	0,014521
<b>Nonlinier 3</b>	0	108,038	300	0,360127
	2	72,02531	301,6404	0,238779
	4	14,40506	306,5091	0,046997
	6	6,173598	314,4561	0,019633
	8	3,429776	325,2558	0,010545

Nilai arus pada tabel 4.3 perlu ditransformasikan ke sisi primer untuk digunakan perhitungan arus primer. Berikut adalah transformasi arus sekunder transformator berbeban *Nonlinier 1* pada sisi primer:

Nilai arus searah dengan primer sebagai referensi

$$I_{n_0}' = \frac{I_{n_0}}{a}$$

$$I_{n_0}' = \frac{0,720253}{270/296}$$

$$I_{n_0}' = 0,789611$$

Nilai harmonisa arus orde dua dengan primer sebagai referensi

$$I_{n_2}' = \frac{I_{n_2}}{a}$$

$$I_{n_2} = \frac{0,33232}{270/296} \text{ A}$$

$$I_{n_2} = 0,515228 \text{ A}$$

kemudian dilakukan perhitungan arus untuk orde-orde harmonisa arus selanjutnya pada beban *Nonlinier 1* dan perhitungan arus pada transformator berbeban nonlinier lainnya.

Tabel 4.4. Harmonisa Arus Beban yang Ditransformasikan ke Sisi Primer

Jenis Beban	m	$I_{nm}'$
<b>Nonlinier 1</b>	0	0,789611
	2	0,515228
	4	0,097106
	6	0,038205
	8	0,019215
<b>Nonlinier 2</b>	0	0,592208
	2	0,390023
	4	0,075331
	6	0,030612
	8	0,015919
<b>Nonlinier 3</b>	0	0,394805
	2	0,261772
	4	0,051523
	6	0,021523
	8	0,01156

Harmonisa pada arus yang dihasilkan oleh beban nonlinier terhadap transformator terkandung arus-arus dengan frekuensi kelipatan dari frekuensi dasarnya sehingga dalam memperoleh nilai arus harus dilakukan perhitungan satu persatu sebanyak orde  $m$  yang

ditentukan. Frekuensi pada tiap orde harmonisa memiliki pengaruh terhadap reaktansi sehingga nilai arus eksitasi juga akan bervariasi terhadap nilai tegangan terinduksi dan impedansi. Berikut adalah perhitungan arus eksitasi dan arus primer transformator berbeban *Nonlinier I* di bawah ini:

- Perhitungan arus eksitasi searah (pada orde ke nol):

$$V_2 = E_2' - R_{eq} I_2' - jX_{eq} I_2'$$

$$E_2' = V_2' + R_{eq} I_2' + jX_{eq} I_2'$$

$$E_2' = 0 + 6,35 \times 0,789661 + 0$$

$$E_2' = 5,01403 \text{ Volt}$$

sehingga nilai arus eksitasi

$$I_{\phi 1} = \frac{E_2'}{Z_0}$$

Nilai  $Z_0$  saat frekuensi harmonisa 0 Hz diperoleh dari

$$Z_0 = \frac{V_{NL}}{I_{NL}} \angle \varphi$$

$$Z_0 = \frac{120}{0,82872} \angle \varphi$$

$$Z_0 = R + j2\pi \times 0 \times L_0$$

$$I_{\phi 1} = \frac{5,01403}{12,6679}$$

$$I_{\phi 1} = 0,3958 \text{ A}$$

Jadi nilai arus primer pada orde ke nol

$$I_1 = I_{\phi 1} + I_2'$$

$$I_1 = 0,3958 + 0,789611$$

$$I_1 = 1,18542 \text{ A}$$

Perhitungan arus eksitasi pada orde pertama

$$V_2 = E_2' - R_{eq} I_2' - jX_{eq} I_2'$$

$$E_2' = V_2' + R_{eq} I_2' + jX_{eq} I_2'$$

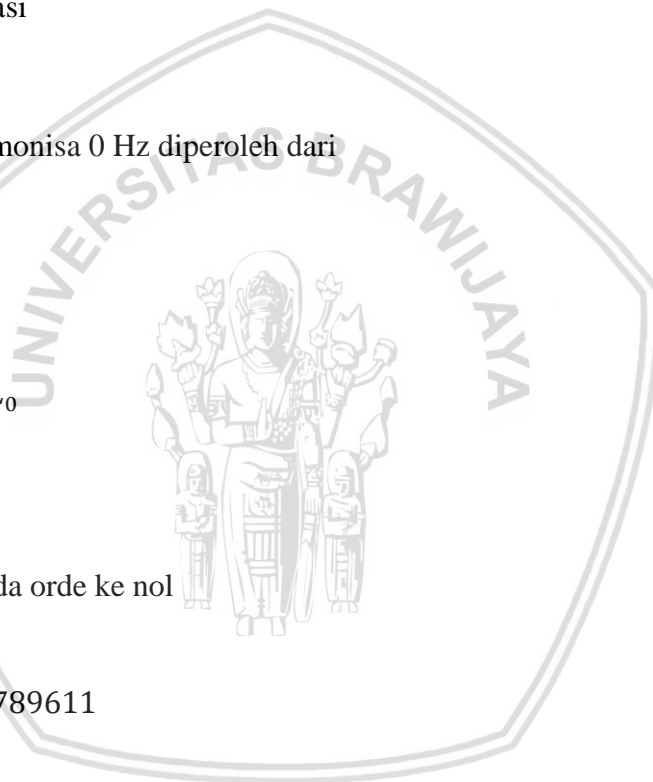
$$E_2' = 120 \times \sqrt{2} \times \left(\frac{270}{296}\right)$$

$$E_2' = 154,79905 \text{ Volt}$$

$$I_{\phi 1} = \frac{E_2'}{Z_0}$$

$$I_{\phi 1} = \frac{154,79905}{144,8016 \angle 84,9811}$$

$$I_{\phi 1} = 1,069 \angle -84,9811^\circ \text{ A}$$



$$I_{\phi 1} = 0,093524 - j1,064914 \text{ A}$$

Jadi nilai arus primer pada orde pertama

$$I_1 = I_{\phi 1} + I_2'$$

$$I_1 = 0,093524 - j1,064914 \text{ A}$$

$$I_1 = 1,069 \angle -84,9811^\circ \text{ A}$$

kemudian perhitungan dilakukan untuk orde-orde selanjutnya pada beban *Nonlinier 1* dan beban *Nonlinier 2* dan *Nonlinier 3*. Berikut adalah detail hasil perhitungan arus primer dan arus sekunder pada ketiga jenis beban nonlinier pada tiap orde

Tabel 4.5. Amplitudo Arus Primer dan arus sekunder transformator berbeban nonlinier

Jenis Beban	m	I <sub>1</sub> (A)	I <sub>2</sub> (A)
<b>Nonlinier 1</b>	0	1,185418	0,720253
	1	1,069042	0
	2	0,530816	0,469971
	4	0,099963	0,08858
	6	0,039323	0,034849
	8	0,019776	0,017527
<b>Nonlinier 2</b>	0	0,889063	0,540190
	1	1,069042	0
	2	0,401823	0,355764
	4	0,077547	0,068714
	6	0,031508	0,027923
	8	0,016384	0,014521
<b>Nonlinier 3</b>	0	0,592708	0,360126
	1	1,069042	0
	2	0,269692	0,238779
	4	0,053039	0,046997
	6	0,022153	0,019632
	8	0,011898	0,010545

Data arus primer dan sekunder pada tabel 4.5 dapat digunakan sebagai masukan arus primer dan sekunder pada FEMM 4.2.

#### 4.4. Analisis Rugi Transformator Hasil Simulasi

Analisis yang dilakukan ada dua macam yaitu analisis rugi transformator berbeban linier dan analisis rugi transformator berbeban nonlinier. Nilai rugi inti di bawah ini dikalikan dengan ketebalan inti 30 mm sedangkan nilai rugi resistif adalah penjumlahan rugi pada satu sisi blok kedua kumparan dikalikan dengan panjang rata-rata kumparan 139,0155 mm karena ketebalan transformator yang disimulasikan sebesar 1 mm.

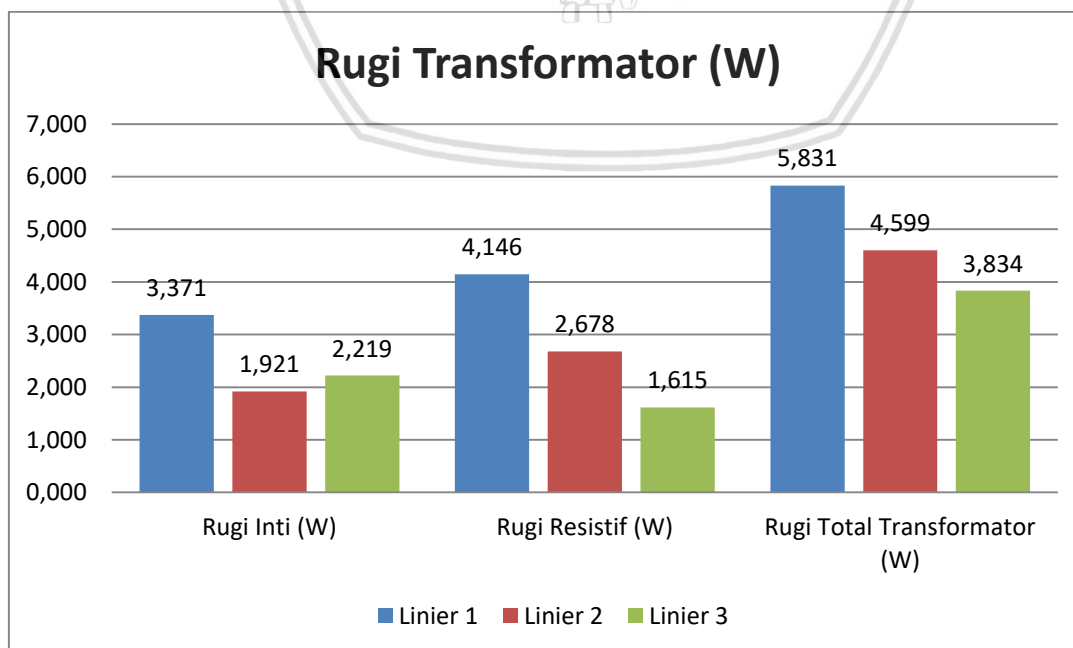
##### 4.4.1 Analisis Rugi Transformator Berbeban Linier Hasil Simulasi

Untuk keperluan analisis rugi, dibutuhkan masukan berupa arus primer dan arus sekunder. Nilai arus-arus ini dimasukkan pada blok kumparan yang bertanda *Kumparan Primer* dan *Kumparan Sekunder*. Kemudian dilakukan analisis menggunakan metode elemen hingga yang secara *default* telah disediakan menu untuk penggunaan metode ini pada FEMM 4.2. Berikut adalah hasil analisis rugi transformator berbeban linier menggunakan FEMM 4.2.

Tabel 4.6. Rugi transformator berbeban linier

Jenis Beban	Rugi Inti Besi (W)	Rugi Resistif (W)	Rugi Total Transformator(W)
Linier 1	3,370956	4,145510428	5,830988428
Linier 2	1,921005	2,678003263	4,599008263
Linier 3	2,21949	1,614941341	3,834431341

Tabel di atas dibentuk grafik menjadi seperti di bawah ini



Gambar 4.4. Grafik rugi transformator berbeban linier.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa dengan frekuensi kerja transformator yang tetap, total rugi berbeban transformator berbeban *Linier 1* menghasilkan rugi terbesar daripada rugi transformator berbeban linier lainnya. Rugi total transformator ini adalah hasil penjumlahan dari kedua jenis beban yaitu rugi inti dan rugi resistif. Apabila dibandingkan kedua rugi tersebut rugi inti transformator berbeban linier relatif tidak jauh berbeda antara satu beban dengan beban yang lainnya. Namun, berbeda halnya dengan rugi resistif transformator berbeban linier, selisih nilai rugi resistif transformator berbeban linier yang satu dengan yang lainnya memiliki selisih cukup besar. Misalnya selisih antara rugi resistif transformator berbeban *Linier 1* dengan *Linier 2* adalah sekitar 1,468 Watt dan untuk beban *Linier 1* dan *Linier 3* adalah 2,53 Watt sedangkan untuk rugi inti transformator berbeban *Linier 1* dan *Linier 2* adalah 0,235 Watt dan untuk beban *Linier 1* dan *Linier 3* adalah sebesar 0,534 Watt. Jadi rugi inti relatif konstan nilainya daripada rugi resistif terhadap perubahan nilai beban.

#### **4.4.2. Analisis Rugi Transformator Berbeban Nonlinier Hasil Simulasi**

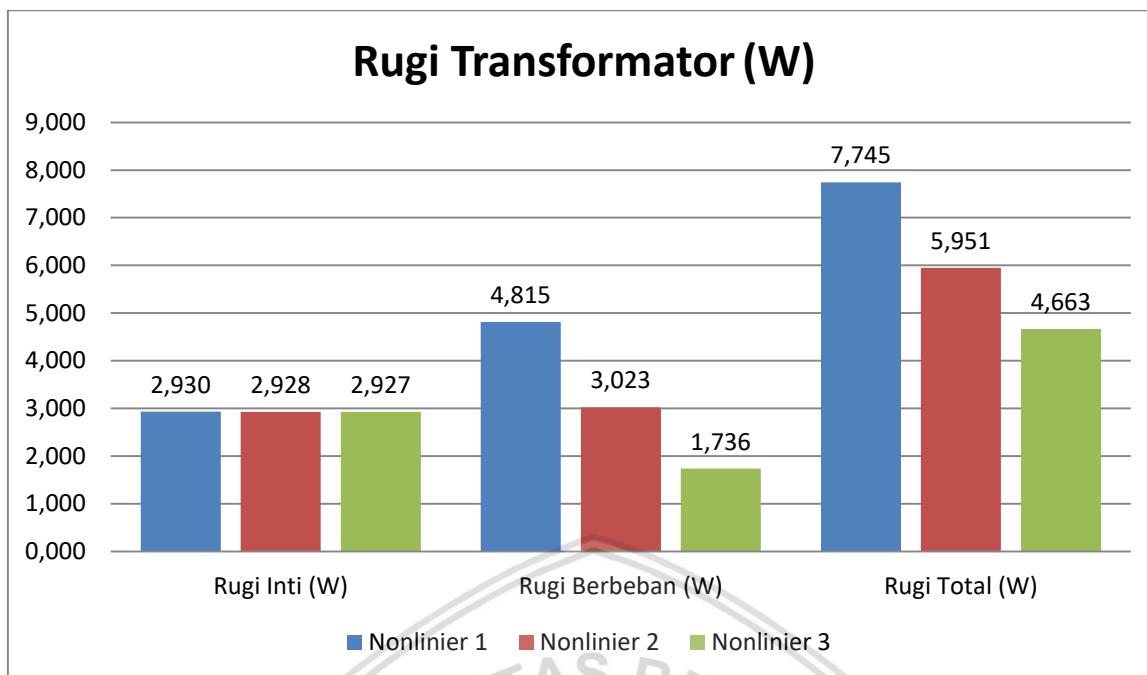
Analisis rugi transformator berbeban nonlinier berbeda dengan analisis transformator berbeban nonlinier. Analisis rugi dilakukan satu persatu sebanyak orde harmonisa arus yang dihasilkan dari perhitungan. Total data arus tersebut untuk setiap beban ada sebanyak enam data sehingga diperoleh data-data rugi transformator berbeban nonlinier pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.7. Rugi transformator berbeban nonlinier

Jenis Beban	m	Rugi Inti (W)	Total Rugi Inti (W)	Rugi Resistif (W)	Total Rugi Resistif W)	Rugi Total Transformator (W)
<b>Nonlinier 1</b>	0	0	2,9299	3,531740124	4,81491	7,74484
	1	2,92606		0,702164983		
	2	0,002909385		0,557377324		
	4	0,000774678		0,019790104		
	6	0,000130733		0,003062991		
	8	$5.58618 \times 10^{-5}$		0,000774911		
<b>Nonlinier 2</b>	0	0	2,92805	1,986617464	3,02261	5,95065
	1	2,92606		0,702164983		
	2	0,001666941		0,319392296		
	4	0,000234616		0,011908151		
	6	$8,46762 \times 10^{-5}$		0,001966114		
	8	$2,51567 \times 10^{-6}$		0,000556365		
<b>Nonlinier 3</b>	0	0	2,92698	0,882947625	1,73582	4,662797
	1	2,92606		0,702164983		
	2	0,000749667		0,143880522		
	4	0,000108925		0,005571456		
	6	$4,18974 \times 10^{-5}$		0,0009719		
	8	$2,010157 \times 10^{-5}$		0,00028024		

Terlihat pada tabel 4.7 bahwa nilai arus transformator yang semakin kecil seiring dengan penambahan orde transformator. Hal ini menyebabkan rugi berlebih pada kumparan transformator. Selain itu nilai rugi tersebut semakin kecil seiring dengan penambahan orde harmonisa.





Gambar 4.5. Grafik rugi transformator berbeban nonlinier

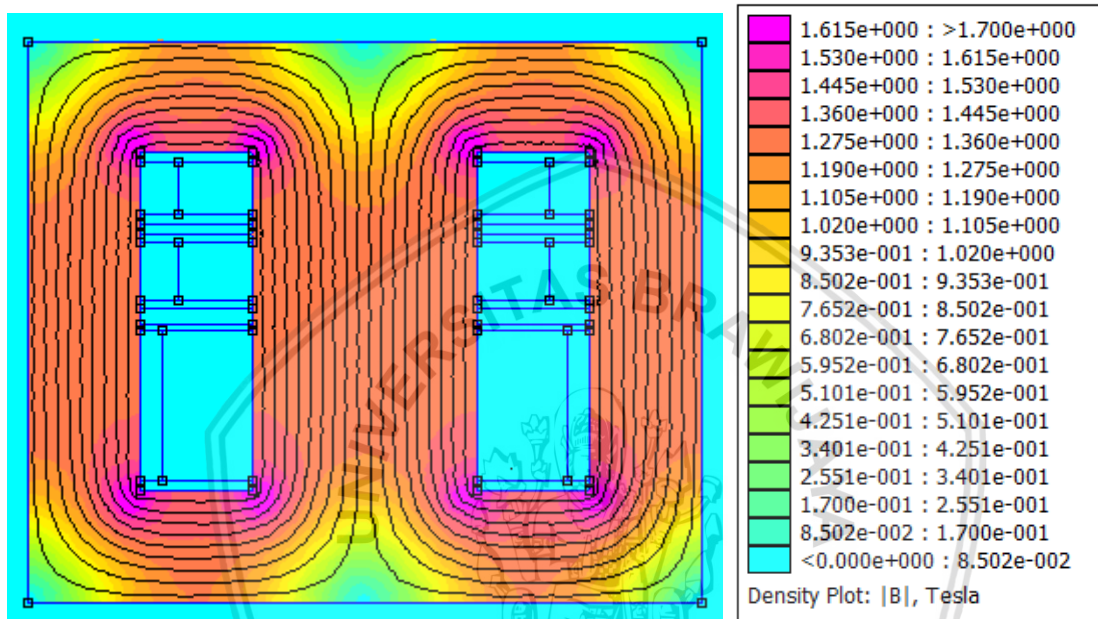
Ada tiga grafik pada gambar 4.5 yaitu grafik rugi inti transformator, rugi berbeban dan rugi total transformator berbeban nonlinier. Rugi inti menunjukkan bahwa rugi inti transformator berbeban *Nonlinier 1* adalah penyebab rugi inti terbesar dari ketiga beban nonlinier lainnya karena memiliki nilai arus yang paling besar. Begitupula dengan rugi resistifnya memiliki rugi terbesar pula. Dengan demikian rugi total transformator berbeban *Nonlinier 1* memiliki rugi terbesar diantara ketiga jenis beban nonlinier lainnya. Selain itu terlihat pada tabel 4.7 terdapat nilai rugi di tiap orde harmonisa arus, hal ini menyatakan bahwa adanya rugi berlebih atau rugi tambahan pada kumparan dan inti transformator yang dibebani nonlinier.

#### 4.5. Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator dan Efisiensi

Rugi tidak hanya berpengaruh dengan adanya arus. Rugi dapat ditimbulkan oleh besar kecilnya medan magnet yaitu rugi inti transformator. Rugi inti dipengaruhi oleh adanya kerapatan medan maksimum  $B_M$  sehingga pada subbab ini akan ditampilkan distribusi medan magnet untuk seluruh jenis beban transformator yang telah ditentukan dan ditampilkan grafik mengenai hubungan distribusi medan magnet yang direpresentasikan dalam kerapatan medan magnet maksimum  $B_M$  terhadap rugi inti dan efisiensi. Dua gambar berupa distribusi medan magnet dan legenda (keterangan) nilai dari distribusi medan magnet akan ditampilkan.

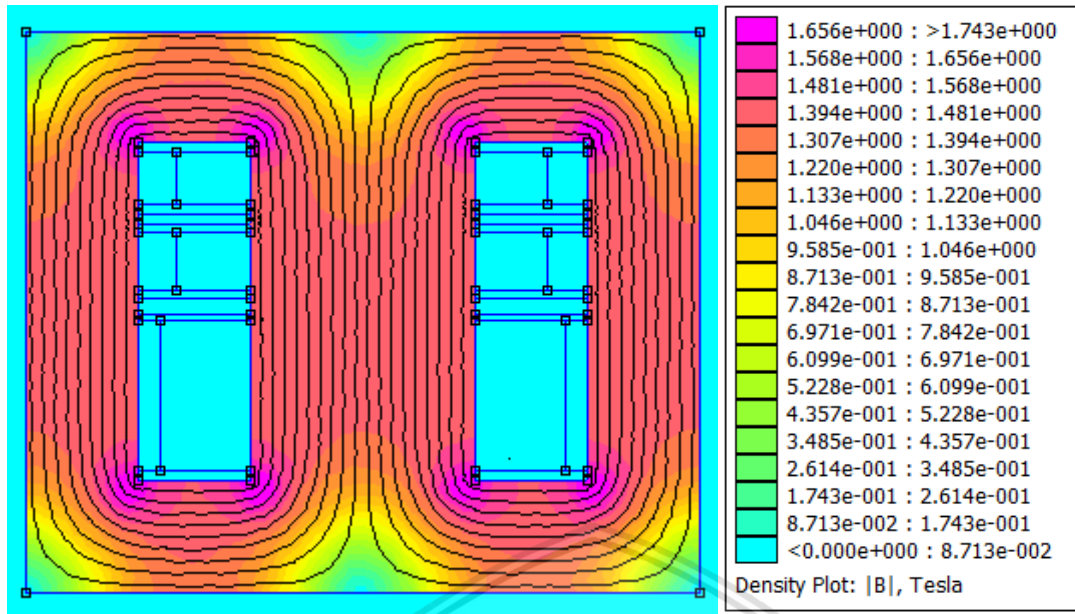
#### 4.5.1. Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator Berbeban Linier dan Efisiensi

Beban transformator yang linier tidak menimbulkan harmonisa pada arusnya sehingga tidak ada pengaruh frekuensi terhadap rugi transformator sehingga distribusi medan magnet yang ditimbulkan adalah pada frekuensi dasar atau frekuensi kerja transformator sebesar 50 Hz. Berikut adalah distribusi medan magnet transformator berbeban *Linier 1*:



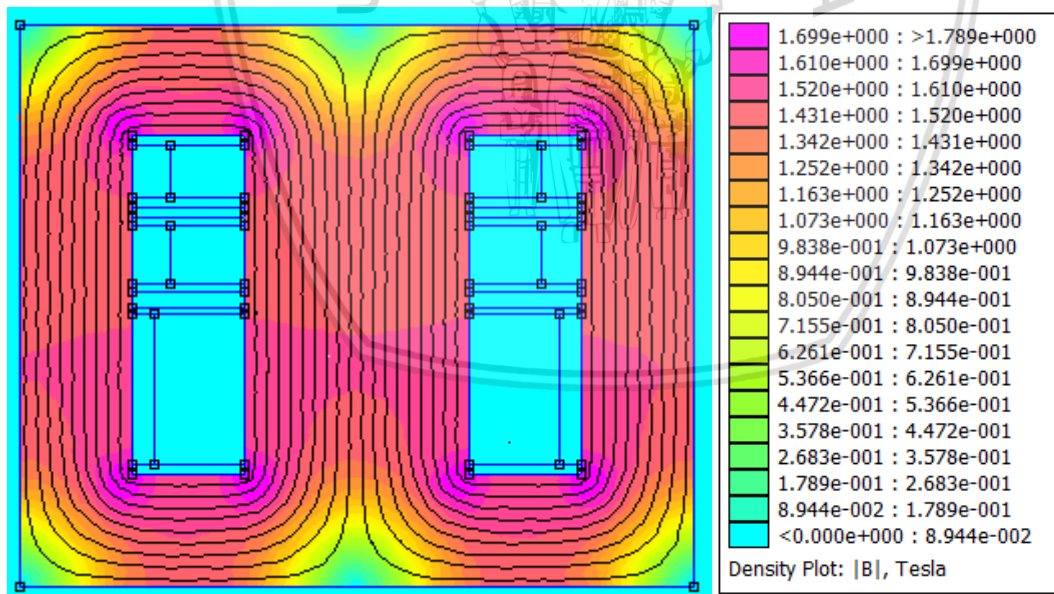
Gambar 4.6. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Linier 1*.

Pada gambar 4.6, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,6736 Tesla.



Gambar 4.7. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Linier 2*.

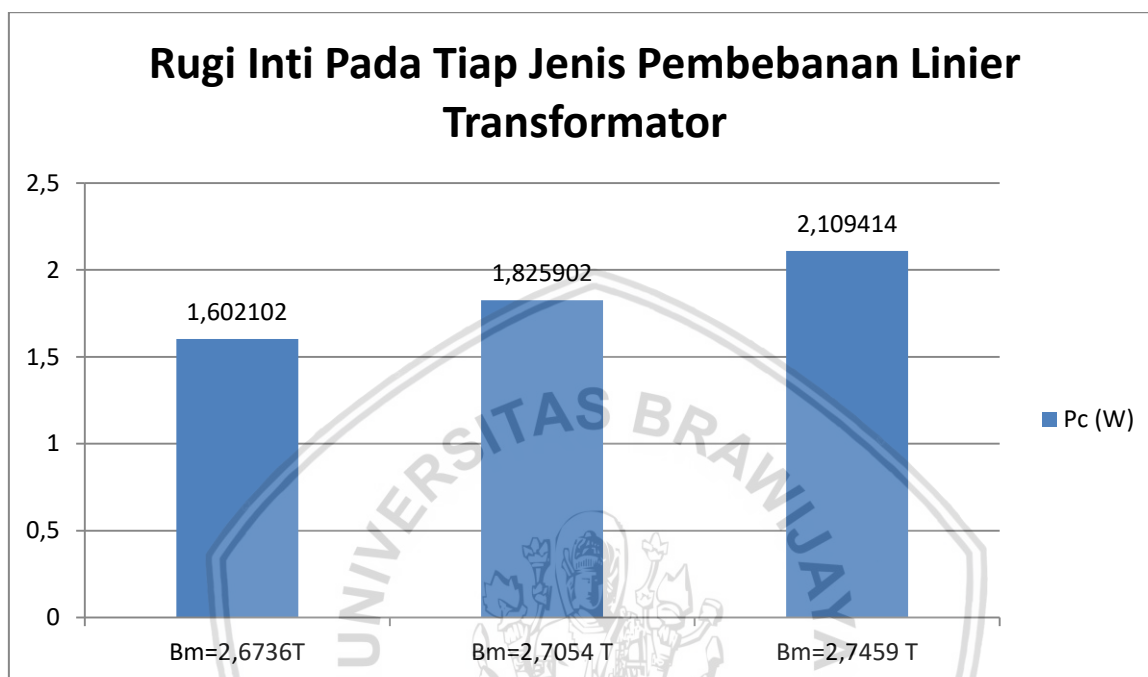
Pada gambar 4.7, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,7054 Tesla.



Gambar 4.8. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Linier 3*.

Pada gambar 4.8, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,7459 Tesla.

Berdasarkan hasil analisis distribusi medan di atas beban *Linier 1* menghasilkan kerapatan medan maksimum pada inti transformator sebesar 2,6736 Tesla, untuk pembebanan *Linier 2* menghasilkan 2,7054 Tesla serta untuk pembebanan *Linier 3* adalah sebesar 2,7459 Tesla. Nilai kerapatan medan magnet ini apabila dihubungkan dengan rugi inti pada tabel 4.6 adalah sebagai berikut



Gambar 4.9. Grafik rugi inti pada tiap jenis pembebanan linier transformator.

Gambar 4.9 menjelaskan bahwa kerapatan medan magnet berpengaruh pada rugi transformator. Kerapatan medan maksimum  $B_M$  yang semakin besar menyebabkan nilai rugi inti yang semakin besar pula.

Kerapatan medan magnet berpengaruh terhadap rugi inti. Tentunya rugi inti akan mempengaruhi besarnya efisiensi. Efisiensi adalah perbandingan daya keluaran dengan daya masukan atau daya keluaran disbanding dengan daya keluaran yang ditambah dengan rugi total transformator sesuai dengan persamaan (2-150). Nilai rugi total transformator diperoleh berdasarkan tabel 4.6 untuk pembebanan linier dan tabel 4.7 untuk pembebanan nonlinier. Untuk mengetahui pengaruh kerapatan medan magnet terhadap efisiensi, perlu dilakukan perhitungan efisiensi seperti di bawah ini

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_T}; P_T = P_C + P_L$$

Untuk transformator berbeban *Linier 1*, ( $\cos \theta = 1$ ):

$$P_{out} = V_0 I_0 \cos \theta$$

$$P_{out} = 120 \times 1,13137 \times 1$$

$$P_{out} = 135,7645 \text{ W}$$

Sehingga nilai efisiensi transformator berbeban *Linier 1*:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_T}$$

$$\eta = \frac{135,7645}{135,7645 + 5,83098}$$

$$\eta = 95,88 \%$$

Untuk transformator berbeban *Linier 2* , ( $\cos \theta = 1$ ):

$$P_{out} = V_0 I_0 \cos \theta$$

$$P_{out} = 120 \times 0,84853 \times 1$$

$$P_{out} = 101,8234 \text{ W}$$

sehingga nilai efisiensi transformator berbeban *Linier 1*:

$$\eta = \frac{101,8234}{101,8234 + 4,599}$$

$$\eta = 95,68 \%$$

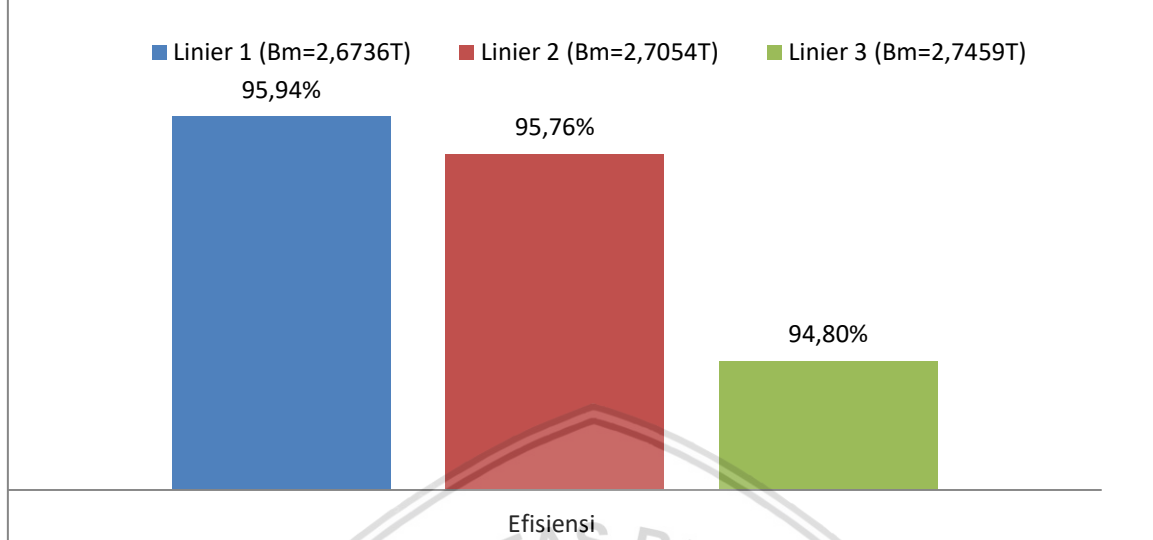
Begitupula untuk beban *Linier 3* sehingga dapat dirangkum dalam sebuah tabel 4.8 sebagai berikut

Tabel 4.8. Efisiensi Transformator Berbeban Linier

Jenis Beban	Efisiensi (%)
<b>Linier 1</b>	95,88
<b>Linier 2</b>	95,68
<b>Linier 3</b>	94,65

Dengan demikian diperoleh hubungan antara kerapatan medan magnet dengan efisiensi pada gambar dibawah ini

## Efisiensi Pada Tiap Jenis Pembebanan Linier Transformator

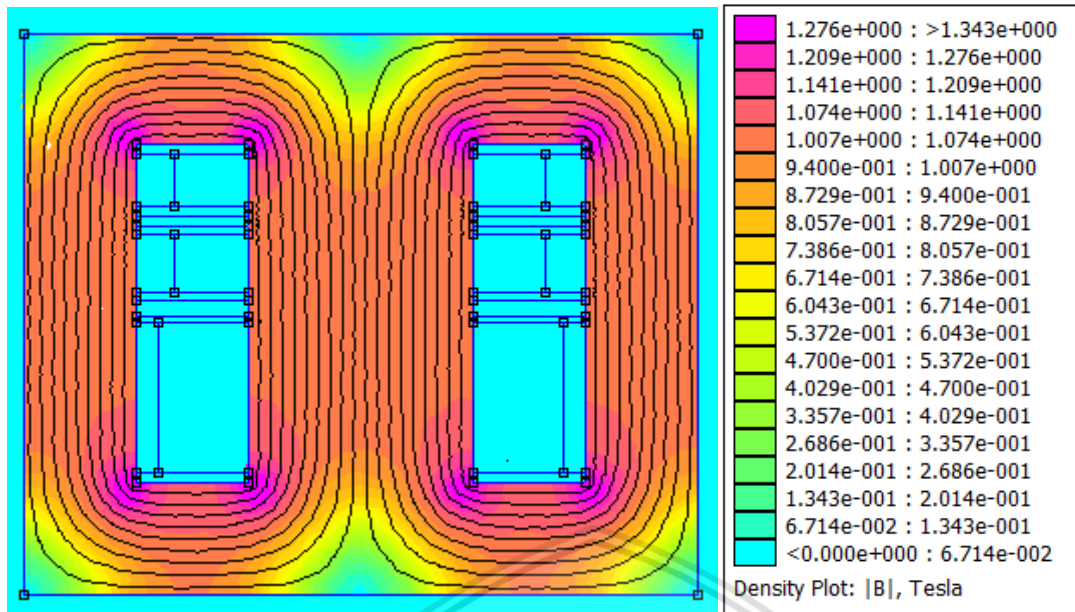


Gambar 4.10. Grafik rugi pada tiap jenis pembebanan linier transformator

Tentunya dengan semakin besarnya kerapatan medan maksimum  $B_M$  maka semakin besar nilai rugi inti transformator. Besarnya rugi inti transformator mempengaruhi besarnya efisiensi. Semakin besar rugi inti maka semakin kecil efisiensi transformator.

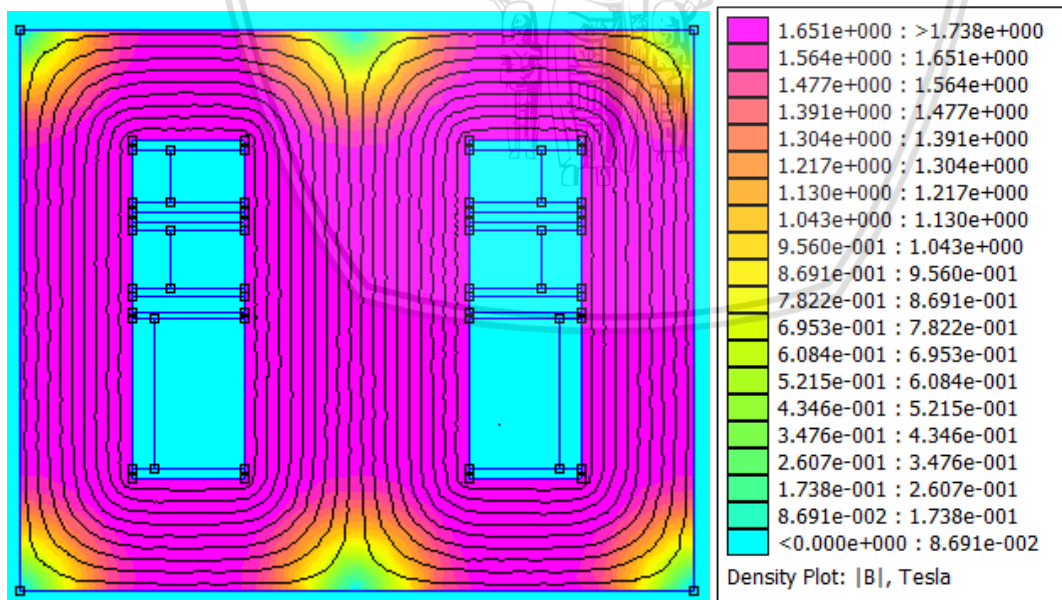
### 4.5.2. Analisis Distribusi Medan Magnet terhadap Rugi Transformator Berbeban Nonlinier dan Efisiensi

Berbeda halnya dengan transformator berbeban linier, transformator berbeban nonlinier menimbulkan harmonisa pada arusnya sehingga bukan hanya kerapatan medan maksimum yang berpengaruh terhadap rugi transformator saja melainkan frekuensi sehingga ada dua faktor yang berpengaruh terhadap rugi inti. Distribusi medan magnet pada transformator berbeban *Nonlinier 1* ada pada gambar 4.11 hingga gambar 4.16, distribusi medan magnet pada transformator berbeban *Nonlinier 2* ada pada gambar 4.17 hingga gambar 4.22 dan distribusi medan magnet pada transformator berbeban *Nonlinier 3* ada pada gambar 4.23 hingga gambar 4.28.



Gambar 4.11. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 1* pada harmonisa orde ke-0.

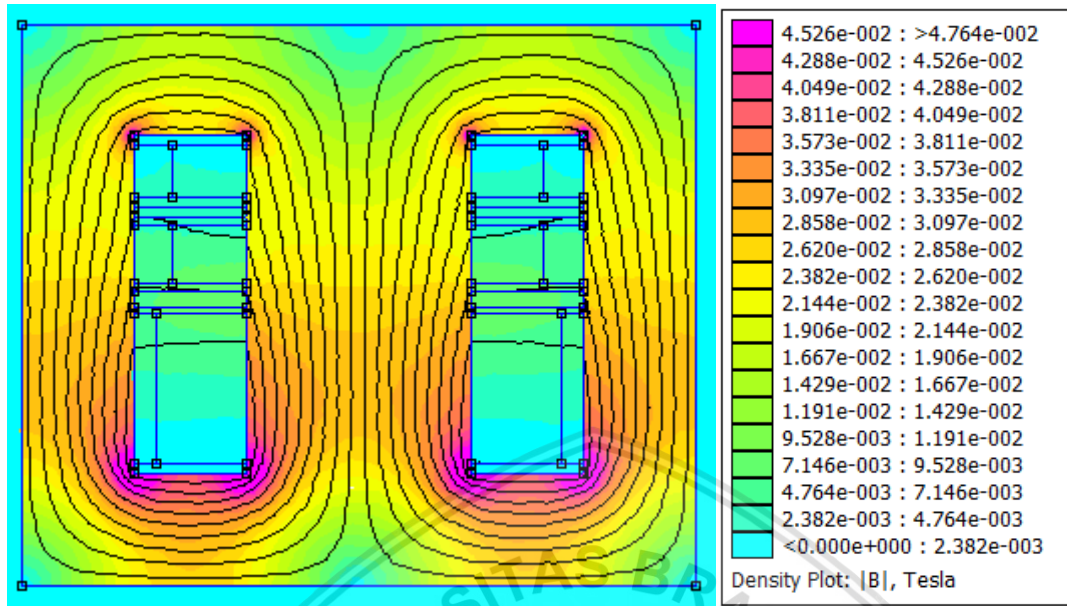
Pada gambar 4.11, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna kuning dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna kuning tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,1022 Tesla.



Gambar 4.12. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 1* pada harmonisa orde pertama.

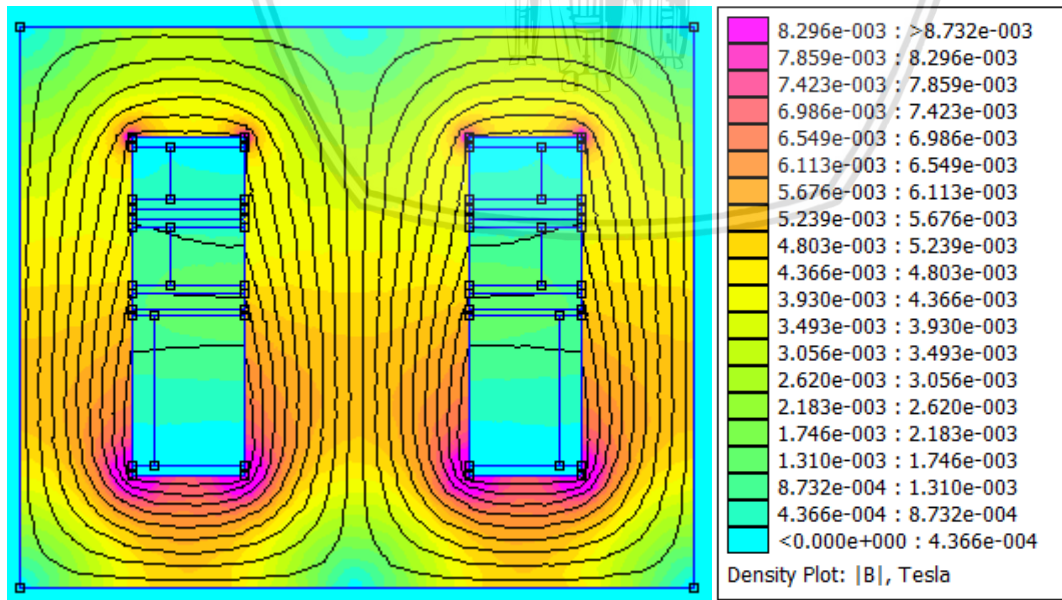
Pada gambar 4.12, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut

bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2.8433 Tesla pada orde harmonisa pertama.



Gambar 4.13. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 1* pada harmonisa orde kedua

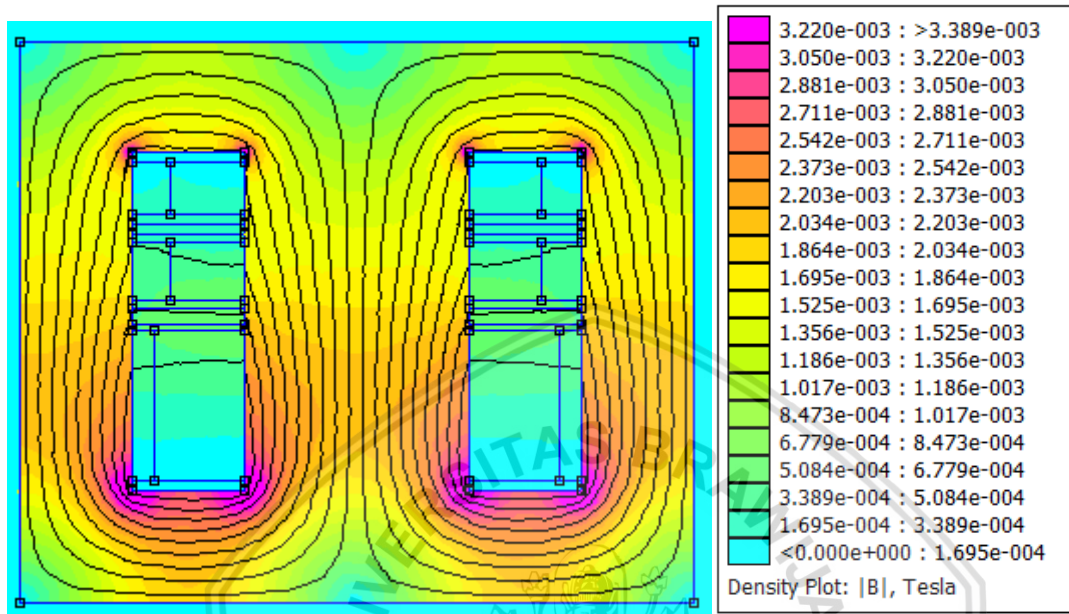
Pada gambar 4.13, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2.6861 Tesla pada orde kedua harmonisa arus.



Gambar 4.14. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 1* pada harmonisa orde keempat.

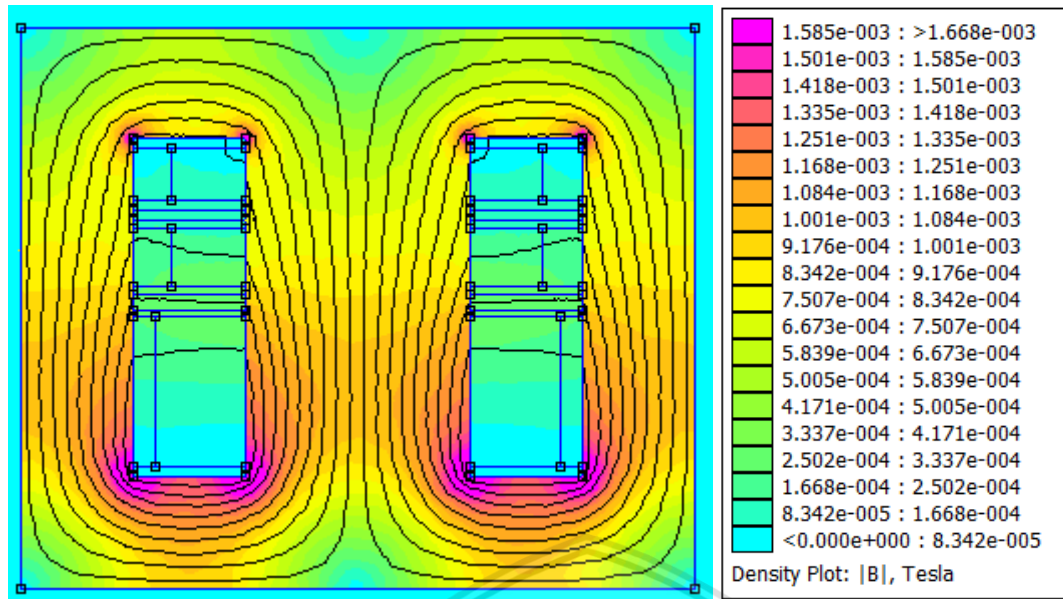


Pada gambar 4.18, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,04807 Tesla pada orde kedua harmonisa arus.



Gambar 4.15. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier I* pada harmonisa orde keenam.

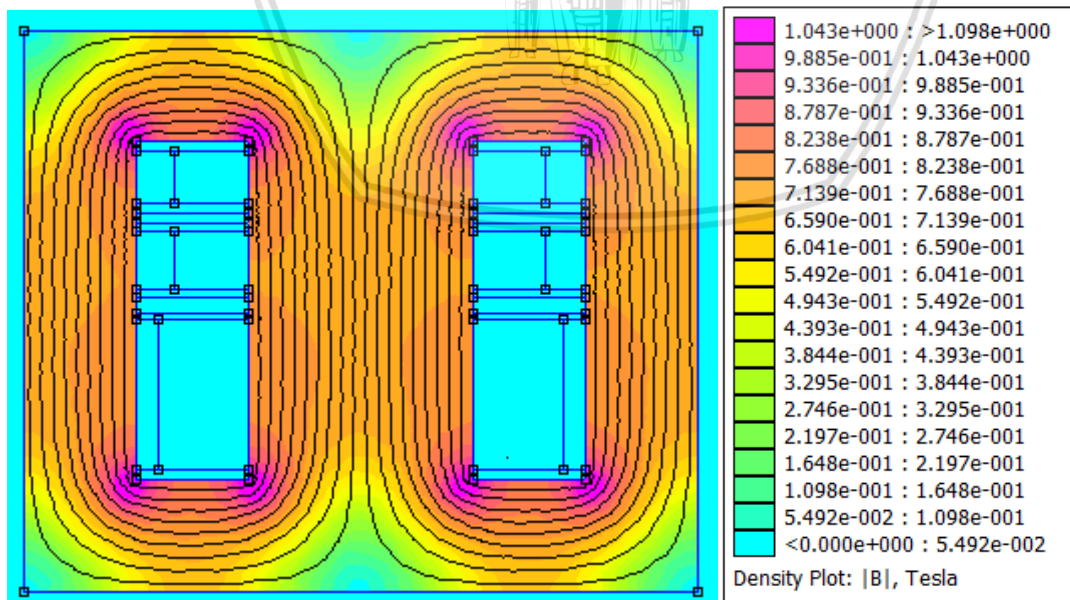
Pada gambar 4.15, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,018645 Tesla pada orde kedua harmonisa arus.



Gambar 4.16. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 1* pada harmonisa orde kedelapan.

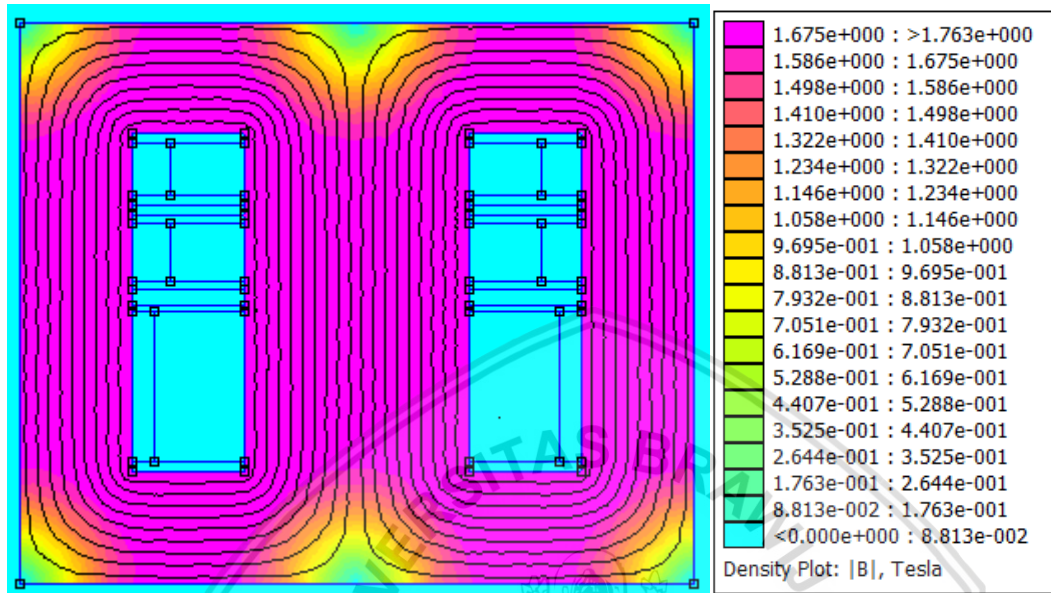
Pada gambar 4.16, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,0091751Tesla.

Untuk pembebanan *Nonlinier 2* transformator memiliki distribusi medan magnet sebagai berikut:



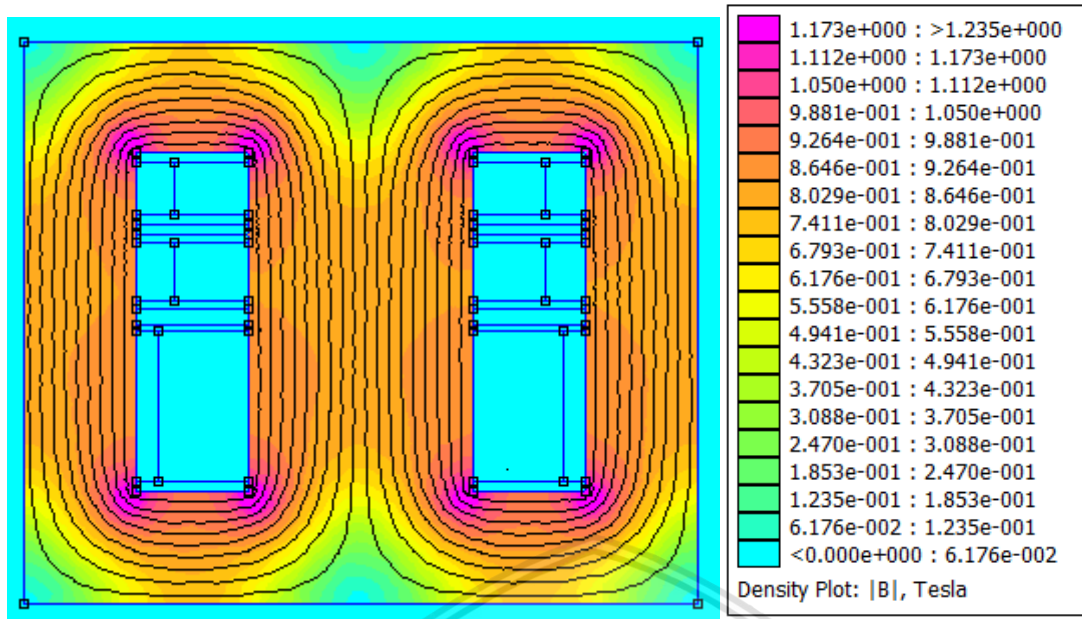
Gambar 4.17. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 2* pada harmonisa orde ke-0.

Pada gambar 4.17, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,03 Tesla.



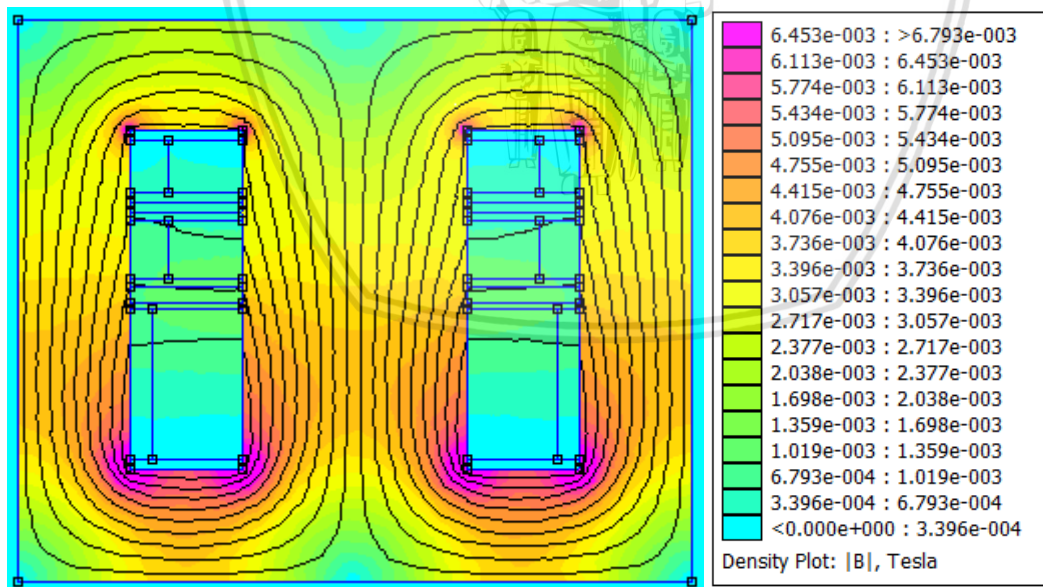
Gambar 4.18. Distribusi medan magnet transformator bebahan *Nonlinier 2* pada harmonisa orde pertama.

Pada gambar 4.18, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,8433 Tesla.



Gambar 4.19. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 2* pada harmonisa orde kedua.

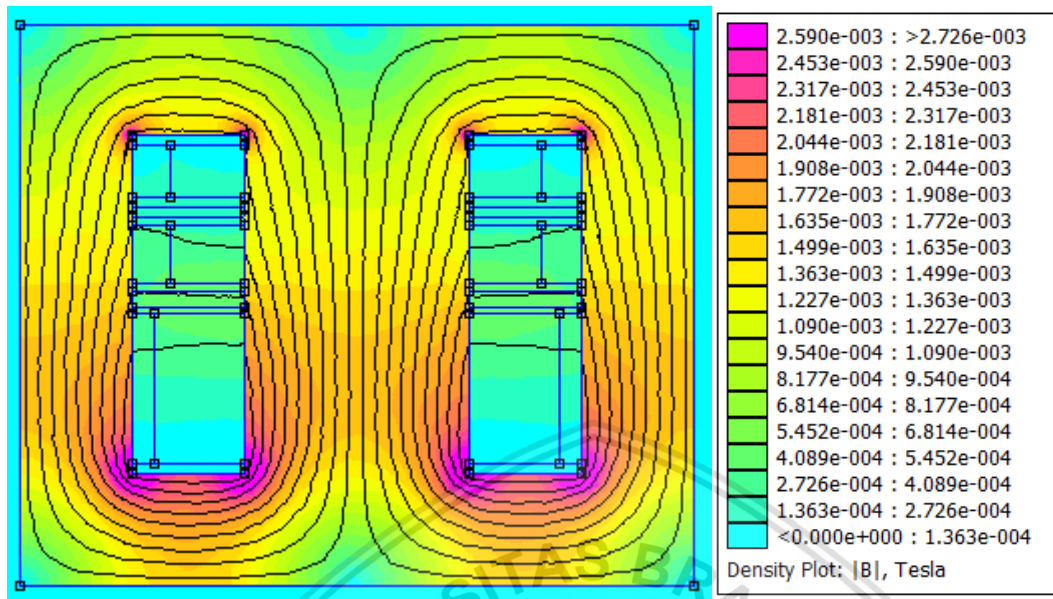
Pada gambar 4.19, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2.0115 Tesla.



Gambar 4.20. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 2* pada harmonisa orde keempat.

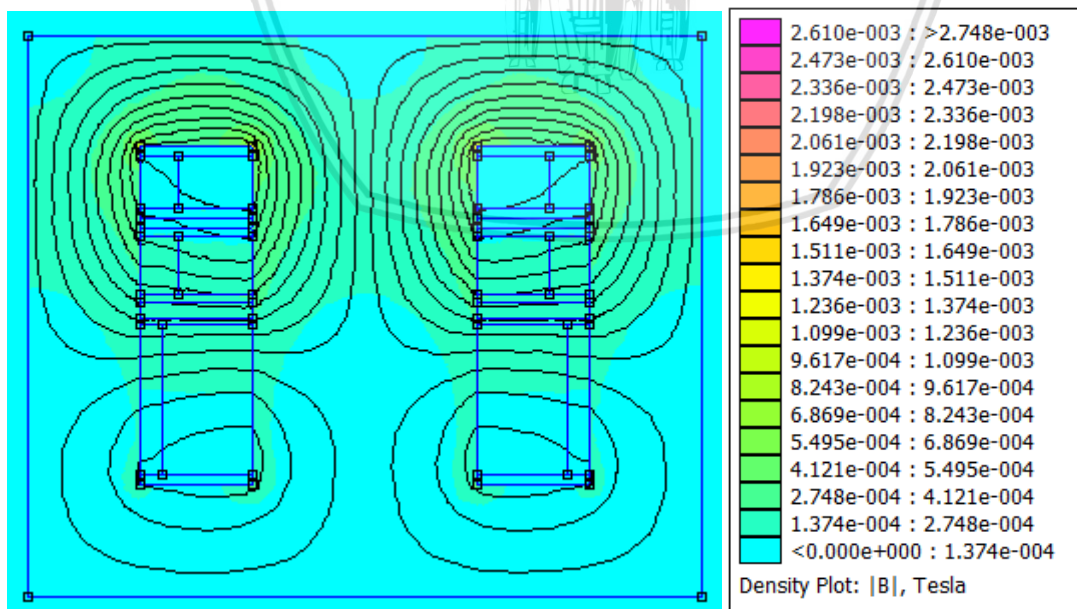
Pada gambar 4.20, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut

bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,037385 Tesla.



Gambar 4.21. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 2* pada harmonisa orde keenam.

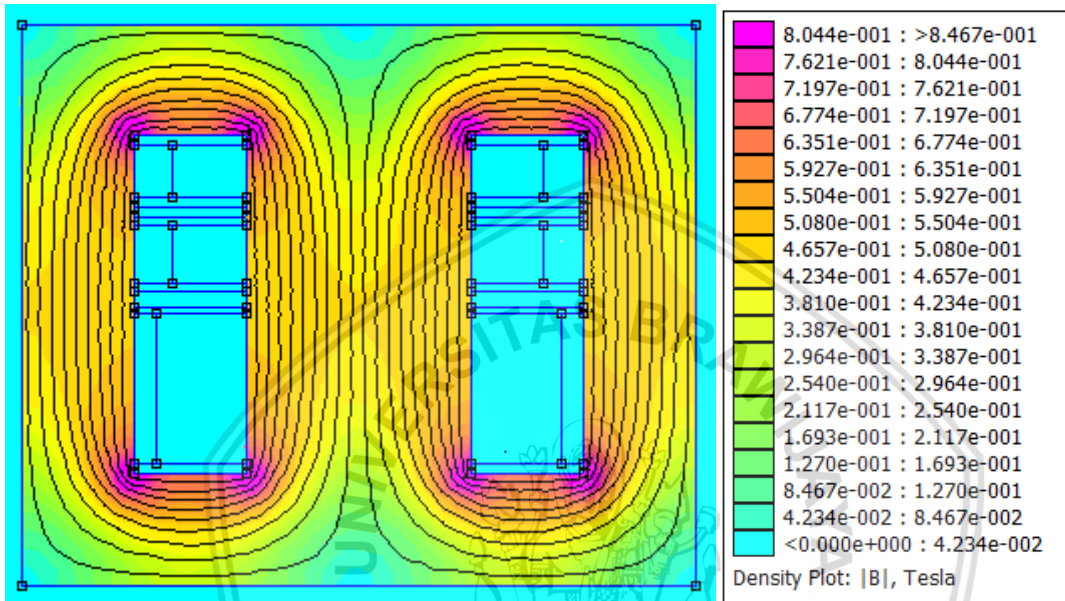
Pada gambar 4.21, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,014995 Tesla.



Gambar 4.22. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 2* pada harmonisa orde kedelapan

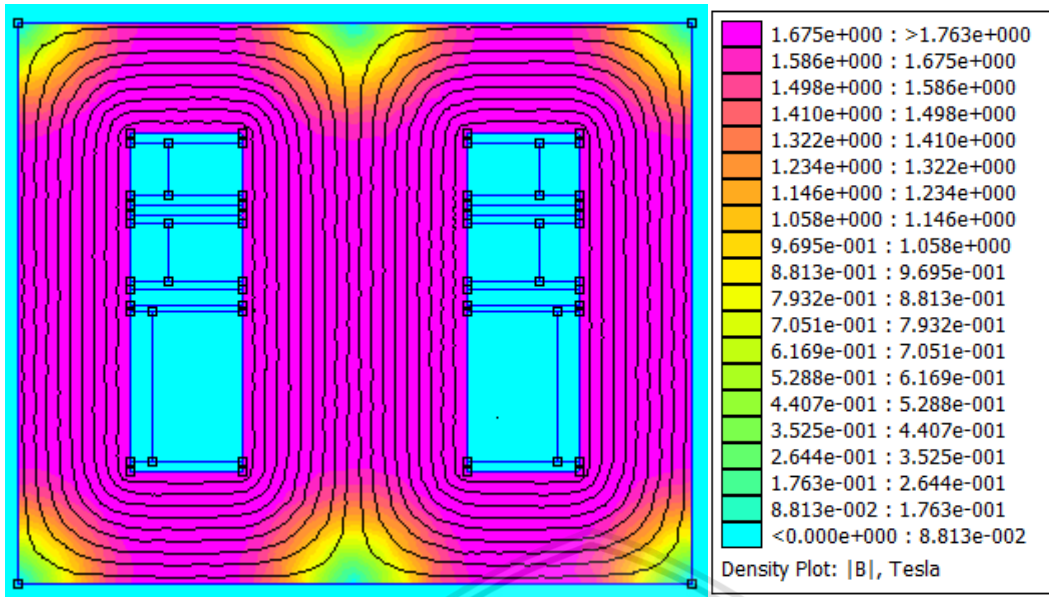
Pada gambar 4.22, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,002528 Tesla.

Untuk pembebanan *Nonlinier 3*, distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* adalah



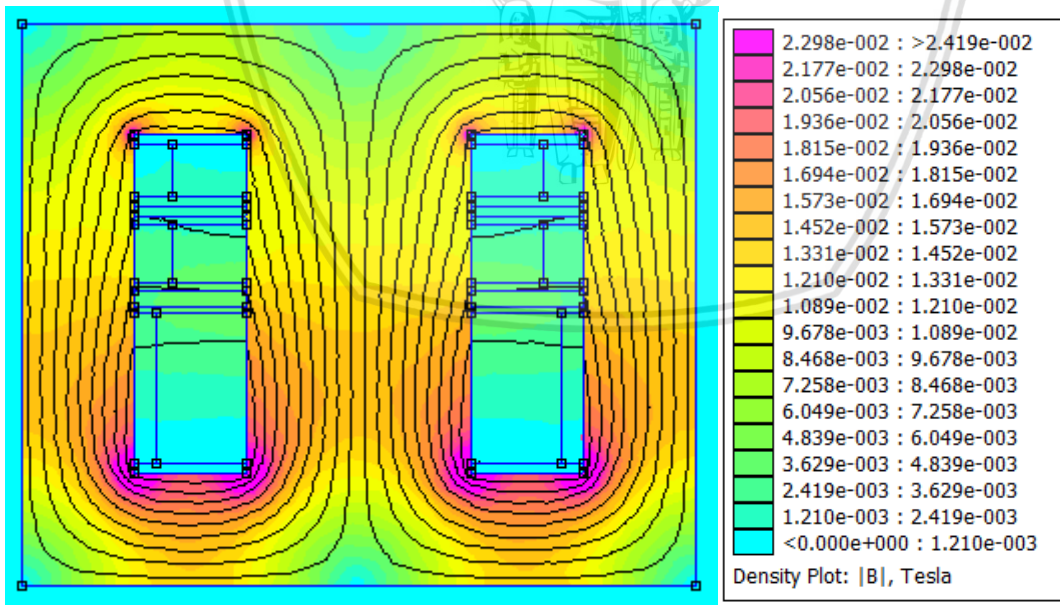
Gambar 4.23. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada harmonisa orde ke-0

Pada gambar 4.23, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 1,8685 Tesla.



Gambar 4.24. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada orde pertama.

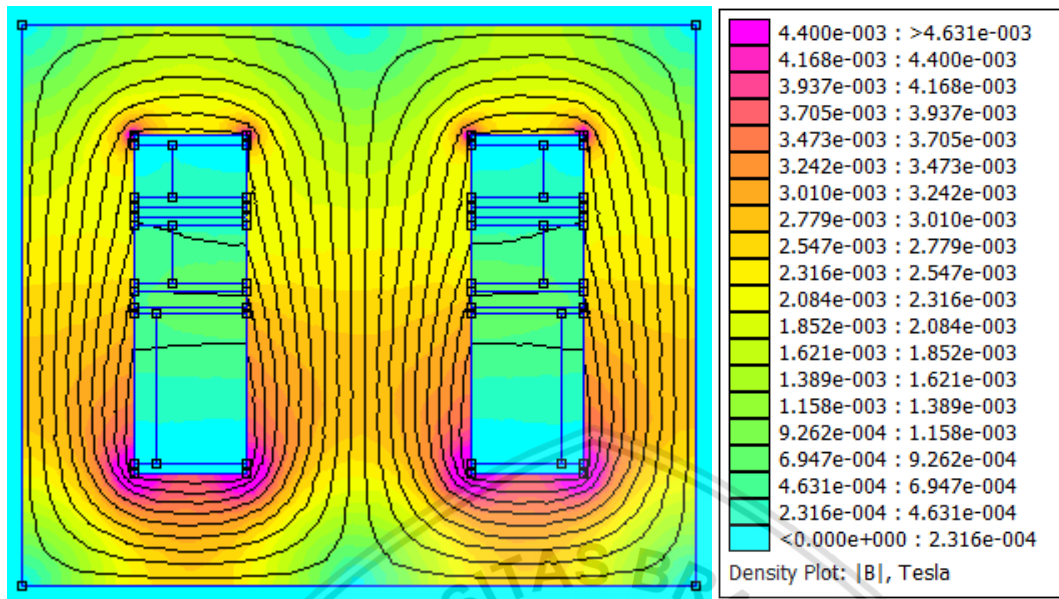
Pada gambar 4.24, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 2,8433 Tesla.



Gambar 4.25. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada orde harmonisa kedua.

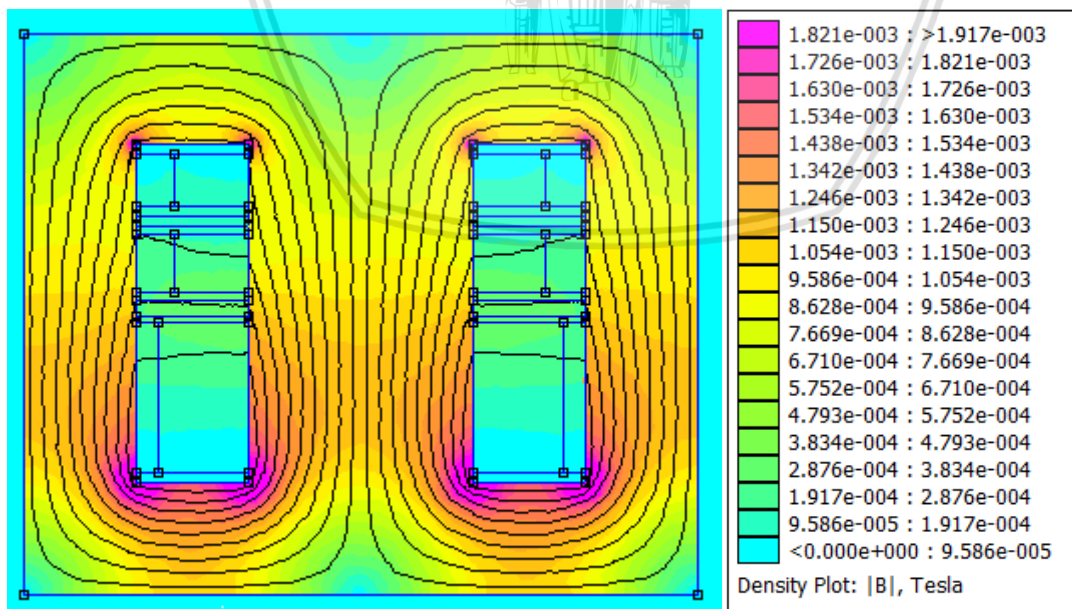
Pada gambar 4.25, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut

bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 1,339 Tesla.



Gambar 4.26. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada harmonisa orde keempat.

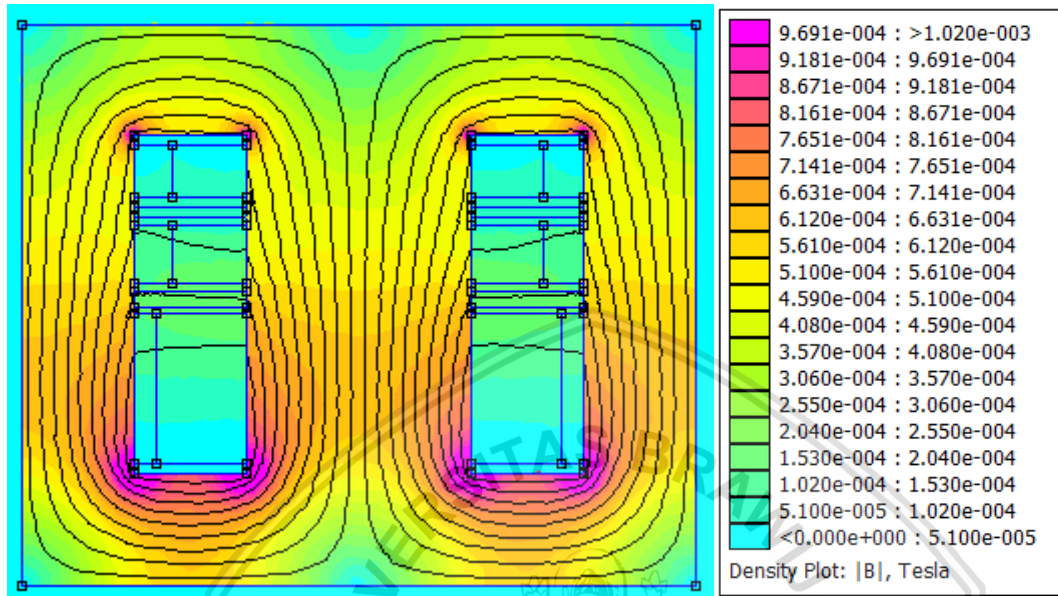
Pada gambar 4.26, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,025482 Tesla.



Gambar 4.27. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada orde harmonisa keenam.



Pada gambar 4.27, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,010547 Tesla.



Gambar 4.28. Distribusi medan magnet transformator berbeban *Nonlinier 3* pada orde harmonisa kedelapan.

Pada gambar 4.28, kerapatan medan maksimum ditunjukkan pada daerah yang berwarna ungu dimana dapat terlihat pada legenda, daerah yang berwarna ungu tersebut bernilai sangat besar. Apabila diteliti lebih lanjut, kerapatan medan maksimum yang dihasilkan adalah sebesar 0,005611 Tesla.

Berdasarkan analisis distribusi medan transformator berbeban nonlinier di atas maka dapat dirangkum nilai kerapatan medan magnet dalam sebuah tabel di bawah ini:

Tabel 4.9. Kerapatan medan magnet maksimum  $B_M$  pada tiap jenis pembebanan nonlinier transformator tiap orde harmonisa  $m$

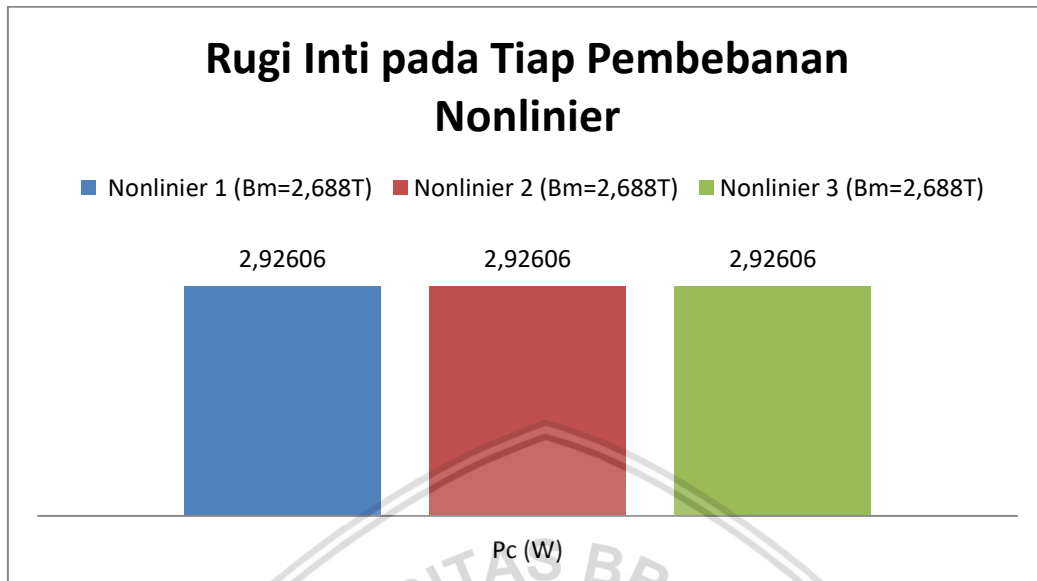
Jenis Beban	$m$	$B_M$ (T)
<b>Nonlinier 1</b>	0	2,10230
	1	2,84332
	2	0,26861
	4	0,04807
	6	0,01865
	8	0,00918
<b>Nonlinier 2</b>	0	2,03000
	1	2,84332
	2	0,20116
	4	0,03739
	6	0,01500
	8	0,00253
<b>Nonlinier 3</b>	0	1,86849
	1	2,84332
	2	0,13392
	4	0,02548
	6	0,01055
	8	0,00561

Berdasarkan tabel 4.9 dan gambar 4.11 hingga gambar 4.28 dapat dicari hubungan antara kerapatan medan maksimum dengan rugi inti. Untuk memperoleh hubungan keduanya diperlukan klasifikasi tiap frekuensi harmonisa. Berikut adalah hubungan kerapatan medan maksimum dengan rugi inti transformator pada tiap frekuensi harmonisa pada tiap pembebanan nonlinier:

1. Harmonisa orde ke-0

Nilai kerapatan medan maksimum yang dihasilkan dari simulasi FEMM pada frekuensi harmonisa ini adalah nol. Apabila dihubungkan dengan persamaan (2-149) nilai kerapatan medan maksimum karena frekuensi yang bernilai nol menyebabkan rugi inti bernilai nol.

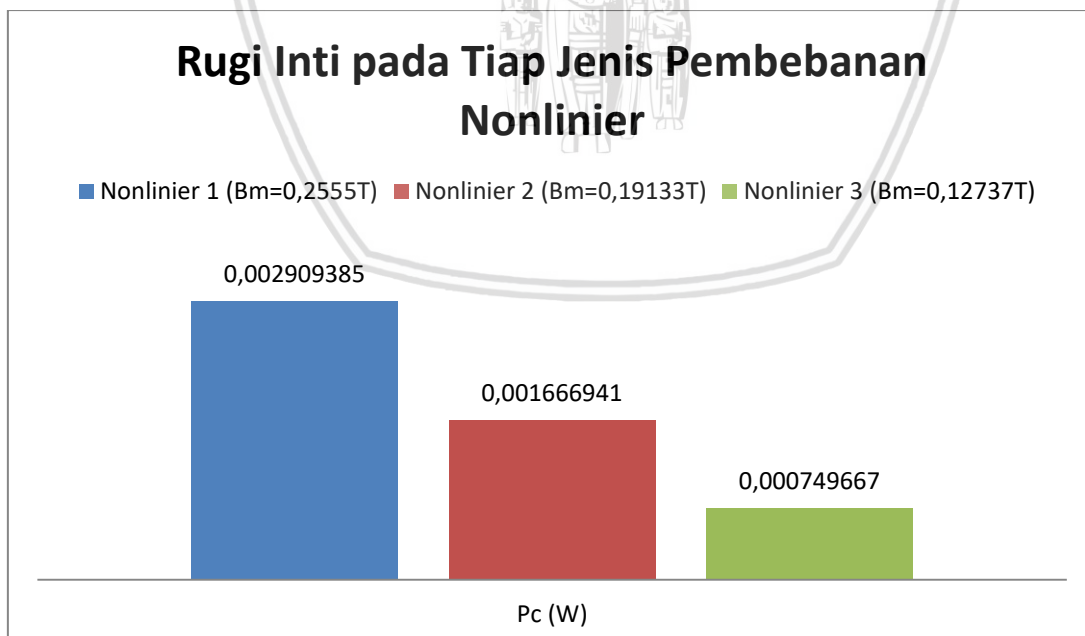
## 2. Harmonisa orde pertama



Gambar 4.29. Grafik hubungan  $B_M$  terhadap  $P_C$  pada transformator berbeban harmonisa orde pertama

Pada harmonisa pertama arus, rugi inti memiliki nilai yang sama. Hal ini disebabkan oleh nilai kerapatan medan maksimum yang sama untuk setiap beban.

## 3. Harmonisa orde kedua

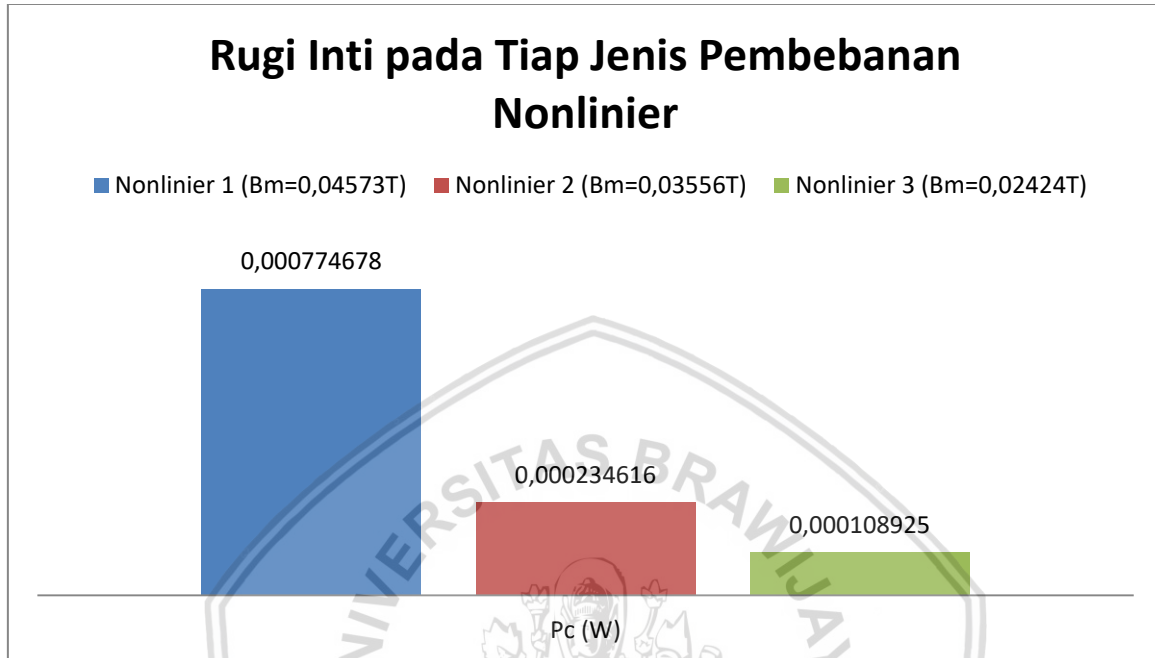


Gambar 4.30. Grafik pada transformator berbeban nonlinier pada harmonisa orde kedua.

Pada harmonisa kedua arus, rugi inti yang dihasilkan oleh beban *Nonlinier 1* menghasilkan rugi inti terbesar dari beban nonlinier yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai kerapatan

medan maksimum yang sangat besar sedangkan beban yang lain menghasilkan rugi inti yang lebih kecil dari beban *Nonlinier 1* karena kerapatan medan maksimum yang ditimbulkan lebih kecil dari kerapatan medan maksimum beban *Nonlinier 1*.

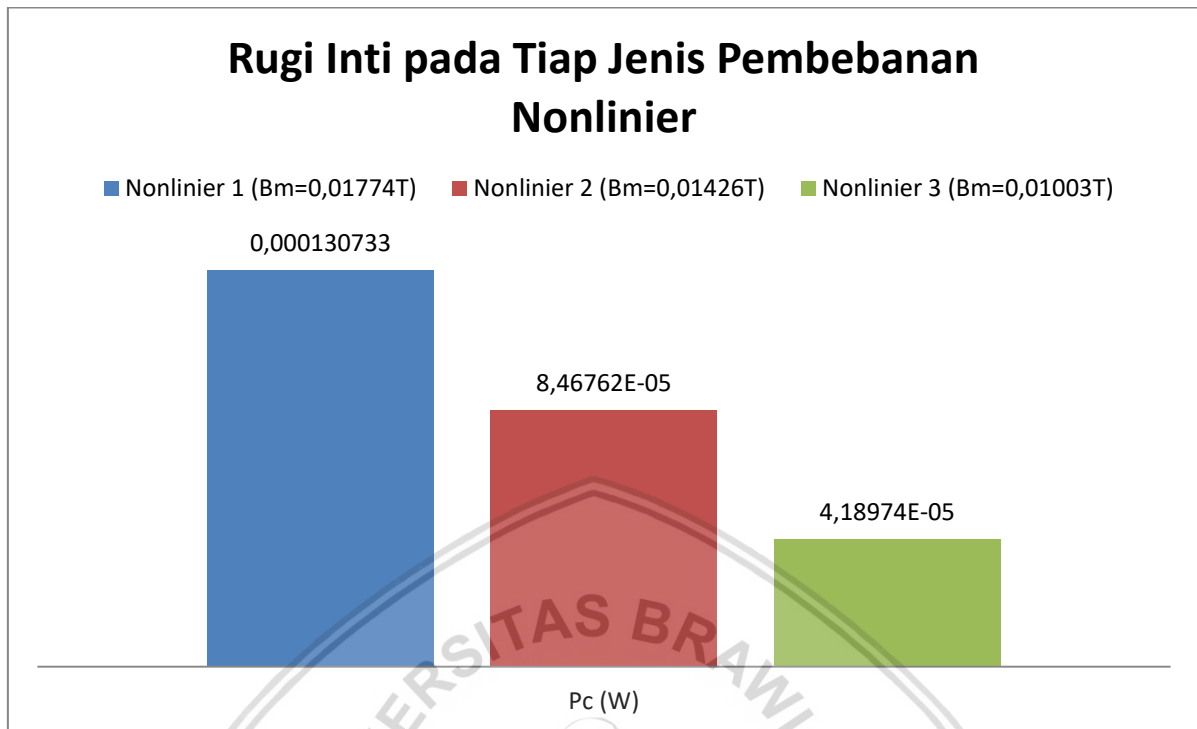
#### 4. Harmonisa orde keempat



Gambar 4.31. Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier orde harmonisa keempat.

Pada harmonisa keempat arus, rugi inti yang dihasilkan oleh beban *Nonlinier 1* menghasilkan rugi inti terbesar dari beban nonlinier yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai kerapatan medan maksimum yang sangat besar sedangkan beban yang lain menghasilkan rugi inti yang lebih kecil dari beban *Nonlinier 1* karena kerapatan medan maksimum yang ditimbulkan lebih kecil dari kerapatan medan maksimum beban *Nonlinier 1*.

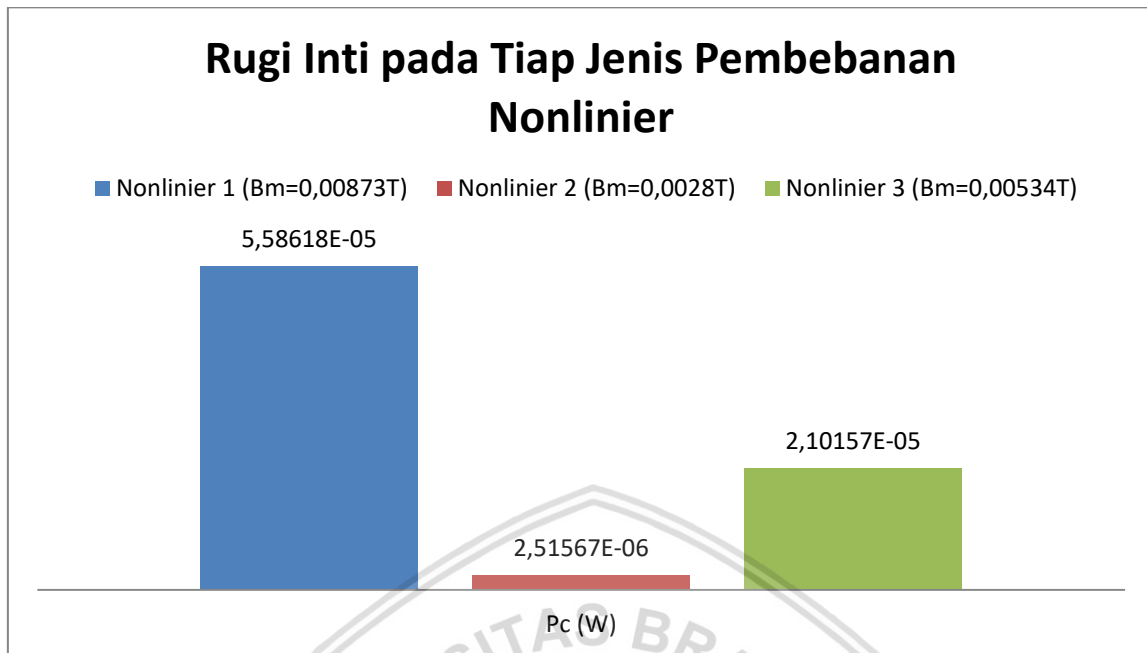
## 5. Harmonisa orde keenam



Gambar 4.32. Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada orde harmonisa keenam.

Pada orde harmonisa keenam arus, rugi inti yang dihasilkan oleh beban *Nonlinier 1* menghasilkan rugi inti terbesar dari beban nonlinier yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai kerapatan medan maksimum yang sangat besar sedangkan beban yang lain menghasilkan rugi inti yang lebih kecil dari beban *Nonlinier 1* karena kerapatan medan maksimum yang ditimbulkan lebih kecil dari kerapatan medan maksimum beban *Nonlinier 1*.

## 6. Orde harmonisa kedelapan



Gambar 4.33. Grafik rugi inti pada transformator berbeban nonlinier pada orde harmonisa kedelapan.

Pada orde harmonisa kedelapan, rugi inti yang dihasilkan oleh beban *Nonlinier 1* menghasilkan rugi inti terbesar dari beban nonlinier yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai kerapatan medan maksimum yang sangat besar sedangkan beban yang lain menghasilkan rugi inti yang lebih kecil dari beban *Nonlinier 1* karena kerapatan medan maksimum yang ditimbulkan lebih kecil dari kerapatan medan maksimum beban *Nonlinier 1*.

Keseluruhan gambar (gambar 4.29 hingga gambar 4.33) menjelaskan bahwa dengan frekuensi yang tetap, kerapatan medan maksimum mempengaruhi rugi inti sehingga semakin besar kerapatan medan maksimum yang dihasilkan maka semakin besar rugi inti yang dihasilkan. Selain itu sama halnya dengan pembebanan linier transformator, perlu dicari hubungan kerapatan medan magnet terhadap efisiensi. Untuk mencari efisiensi transformator berbeban nonlinier dibutuhkan nilai daya beban atau daya keluaran transformator dimana daya keluaran transformator.

1. Untuk transformator berbeban *Nonlinier 1* :

Arus rms beban

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{0,72053^2 + 0^2 + \frac{0,46997^2}{2} + \frac{0,08858^2}{2} + \frac{0,03485^2}{2} + \frac{0,01753^2}{2}}$$

$$I_{rms} = 0,796169 \text{ A}$$

Daya yang diserap beban

$$P = \frac{I^2 R}{2}$$

$$P = 0,79619 \times 150$$

$$P = 95,08277 \text{ W}$$

sehingga nilai efisiensi transformator berbeban *Nonlinier 1*:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_T}$$

$$\eta = \frac{95,08277}{95,08277 + 7,74484} \times 100\%$$

$$\eta = 87,88 \%$$

Untuk transformator berbeban *Linier 2*,

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_{n,rms}^2} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{I_n}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$I_{rms} = \sqrt{0,54019^2 + 0^2 + \frac{0,35577^2}{2} + \frac{0,06871^2}{2} + \frac{0,02792^2}{2} + \frac{0,014521^2}{2}}$$

$$I_{rms} = 0,59828 \text{ A}$$

Daya yang diserap beban :

$$P = I_{rms}^2 \times R$$

$$P_{out} = 0,59828^2 \times 200$$

$$P_{out} = 71,58902 \text{ W}$$

sehingga nilai efisiensi transformator berbeban *Linier 1*:

$$\eta = \frac{71,58902}{71,58902 + 4,5169} \times 100\%$$

$$\eta = 87,69 \%$$

Begitupula untuk beban *Nonlinier 3* sehingga dapat dirangkum dalam sebuah tabel 4.8 sebagai berikut

Tabel 4.10. Efisiensi transformator berbeban nonlinier

Jenis Beban	Efisiensi (%)
Nonlinier 1	87,88
Nonlinier 2	87,69
Nonlinier 3	85,9

sedangkan nilai kerapatan medan maksimum total untuk beban *Nonlinier 1* adalah

$$B_M = \sqrt{B_{M,0}^2 + B_{M,1}^2 + B_{M,2}^2 + B_{M,4}^2 + B_{M,6}^2 + B_{M,8}^2}$$

$$B_M = \sqrt{2,1023^2 + 2,84332^2 + 0,26861^2 + 0,04807^2 + 0,01865^2 + 0,00918^2}$$

$$B_M = 2,8565 \text{ T}$$

Untuk pembebanan *Nonlinier 2*:

$$B_M = \sqrt{B_{M,0}^2 + B_{M,1}^2 + B_{M,2}^2 + B_{M,4}^2 + B_{M,6}^2 + B_{M,8}^2}$$

$$B_M = \sqrt{2,03^2 + 2,84332^2 + 0,20116^2 + 0,03739^2 + 0,015^2 + 0,00253^2}$$

$$B_M = 2,8507 \text{ T}$$

Untuk pembebanan *Nonlinier 3*:

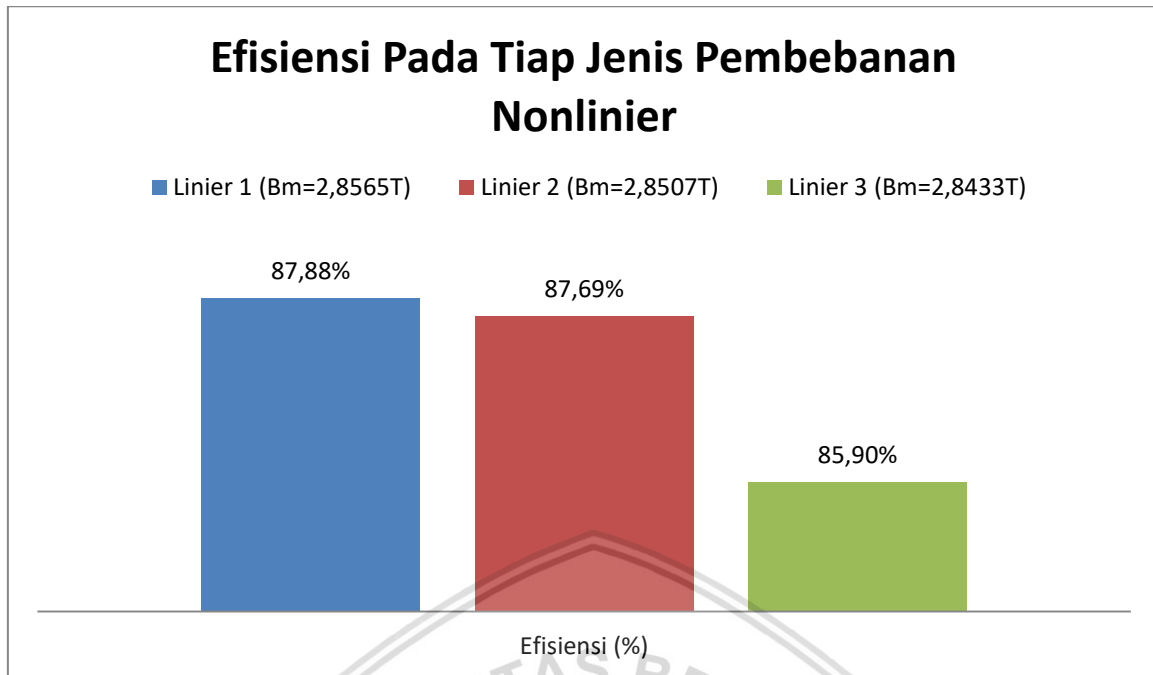
$$B_M = \sqrt{B_{M,0}^2 + B_{M,1}^2 + B_{M,2}^2 + B_{M,4}^2 + B_{M,6}^2 + B_{M,8}^2}$$

$$B_M = \sqrt{1,8685^2 + 2,84332^2 + 0,13392^2 + 0,02548^2 + 0,01055^2 + 0,00561^2}$$

$$B_M = 2,8433 \text{ T}$$

Dimana  $B_{M,0}$ ,  $B_{M,1}$ ,  $B_{M,2}$  dan seterusnya adalah kerapatan medan maksimum tiap orde harmonisa. Dengan demikian untuk mengetahui pengaruh dari kerapatan medan terhadap efisiensi transformator berbeban nonlinier dibentuk grafik efisiensi pada tiap jenis pembebanan nonlinier pada transformator.





Gambar 4.34. Grafik efisiensi pada tiap jenis pembebanan nonlinier .

Tentunya dengan kerapatan medan maksimum  $B_M$  yang besar maka nilai rugi inti transformator semakin besar. Rugi yang besar menyebabkan efisiensi yang kecil. Begitupula sebaliknya jika kerapatan medan maksimum kecil, maka rugi inti yang dihasilkan kecil. Efisiensi akan besar nilainya.



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis pada bab IV maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Perangkat lunak berbasis metode elemen hingga digunakan dalam analisis rugi transformator berdasarkan arus yang mengalir pada kumparan yang memiliki luas penampang dan konduktivitas (kebalikan dari resistivitas) tertentu yang mana menghasilkan rugi resistif sedangkan rugi inti dihasilkan oleh fluksi bolak-balik yang mengalir memotong luas penampang dari inti (kerapatan medan magnet). Fluksi bolak-balik tersebut dihasilkan oleh medan magnet yang dibangkitkan oleh arus bolak-balik yang mengalir pada kumparan transformator.
2. Transformator satu fasa dengan beban nonlinier menghasilkan rugi berlebih pada inti dan kumparannya sedangkan transformator satu fasa dengan beban linier tidak. Hal ini disebabkan oleh adanya harmonisa pada arus beban yang mengalir pada kumparan transformator.
3. Pembebanan transformator yang besar menghasilkan kerapatan medan magnet besar pada inti dan menghasilkan rugi inti yang besar begitupula sebaliknya apabila kerapatan medan magnet yang dihasilkan kecil maka rugi inti pun kecil pada frekuensi yang sama untuk seluruh jenis pembebanan. Rugi yang semakin besar tersebut menyebabkan efisiensi transformator yang kecil begitupula sebaliknya sehingga apabila kerapatan medan magnet tersebut besar maka efisiensi transformator menjadi kecil.

#### **5.2 Saran**

Setelah pelaksanaan penelitian, beberapa hal yang disarankan sebagai berikut:

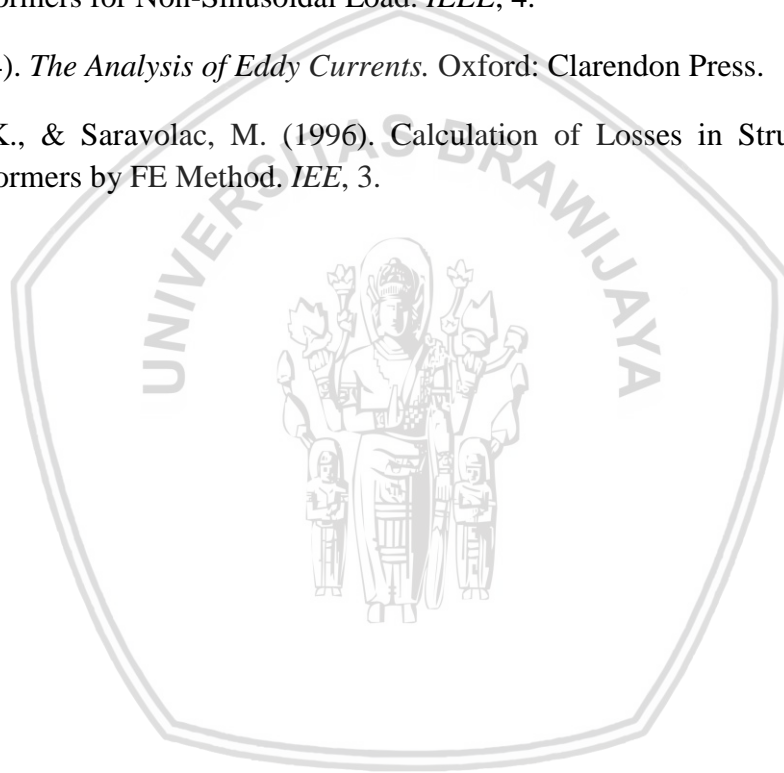
Untuk memperoleh hasil rugi yang lebih akurat diperlukan informasi detail mengenai karakteristik inti transformator. Selain itu perlu dipelajari lebih lanjut mengenai penggunaan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga dalam pembentukan rangkaian pengganti transformator tanpa harus melakukan percobaan tanpa beban dan berbeban penuh terlebih dahulu untuk keperluan analisis rugi.



## Daftar Pustaka

- Asrami, M. Y., Mirzaie, M., & Akmal, A. S. (2010). Calculation of Transformer Losses under Non-Sinusoidal Currents Using two Analytic Methods and Finite Element Analysis. *World Applied Sciences Journal* 9(8):889-897.
- Asrami, M. Y., Mirzaie, M., Akmal, A. S., & Gholamian, S. A. (2011). Life Estimation of Distribution Transformers Under Non-linear Loads Using Calculated Loss by 2D-FEM. *J. Electrical Systems* , 12-24.
- Bianchi, N. (2005). *Electrical Machines Analysis Using Finite Elements*. Boca Raton: CRC Press.
- Biricik, S., & Özerdem, Ö. C. (2011). A Method for Power Losses Evaluation in Single Phase Transformers Under Linear and Nonlinear Load Condition. *Przeglad Elektrotechniczny*.
- Budiono, M. (1997). *Rangkaian Listrik Jilid Kedua*. Bandung: ITB.
- Cahyani, A. (2014). Studi Analisis Pengaruh Harmonisa Beban Nonlinier Rumah Tangga Terhadap Hasil Penunjukan kWh Meter Digital 1 Fasa. *Skripsi. Tidak Dipublikasikan*.
- Chapman, S. J. (2005). *Electrical Machinery Fundamentals*. New York, USA: Mc Graw-Hill.
- Dawood, K., Alboyaci, B., Aytac, C. M., & Sonmez, O. (n.d.). Modelling and Analysis of Transformer using Numerical and Analytical Methods. *Scientific and Technological Research Council Of Turkey*.
- Dursun, K., & Rahmanov, N. (2013). Harmonic Load Losses in Power Transformer Windings Using Finite Element Methods. *EuroCon 2013*. Zagreb, Croatia: IEEE.
- Elmoudi, A. A. (2006). Evaluation of Power System Harmonic Effects on Transformers. *TKK Dissertations* 24.
- Fitzgerald, A., Jr. Charles Kingsley, J., & D., U. S. (2003). *Electric Machinery, Sixth Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Hart. (2011). *Power Electronics*. New York: McGraw-Hill.
- Hurley, W. G., & Wölfle, W. H. (2013). *Transformers and Inductors for Power Electronics*. West Sussex: Wiley.
- IEEE. (1998). IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents. New York: IEEE.



- Meeker, D. (2015). *Finite Element Method Magnetics, User's Manual*.
- Pierce, L. W. (1996). Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 11.
- Rinas, I. W. (2012). Studi Analisis Losses dan Derating Akibat Pengaruh THD pada Gardu Transformator Daya di Fakultas Udayana. *Jurnal Skripsi*.
- Sawhney, A. K. (1990). *Electrical Machine Design*. Delhi: Dhanpai Rai & Sons.
- Sen, P. C. (2014). *Principles of Electric Machines and and Power Electronics, Third Edition*. USA: Wiley.
- Sharifian, M., Faiz, J., Fakheri, S., & Zraatparvar, A. (2003). Derating of Distribution Transformers for Non-Sinusoidal Load. *IEEE*, 4.
- Stoll, R. (1974). *The Analysis of Eddy Currents*. Oxford: Clarendon Press.
- Tekletsadik, K., & Saravolac, M. (1996). Calculation of Losses in Structural Parts of Transformers by FE Method. *IEE*, 3.







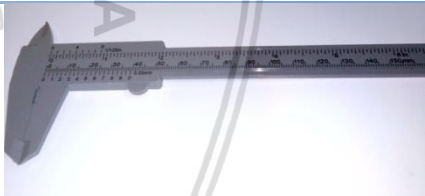

# LAMPIRAN

### Lampiran 1. Peralatan yang dipakai untuk Percobaan

No	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1	Trafo Fasa Satu	Dua Belitan Tipe Shell 120/120 V Feedback Transformer Trainer TT 173	1	
2	Kabel Penghubung	-	20	

No	Nama	Spesifikasi	Jumlah	Gambar
1.	Multimeter Elektronik	CD 772	1	

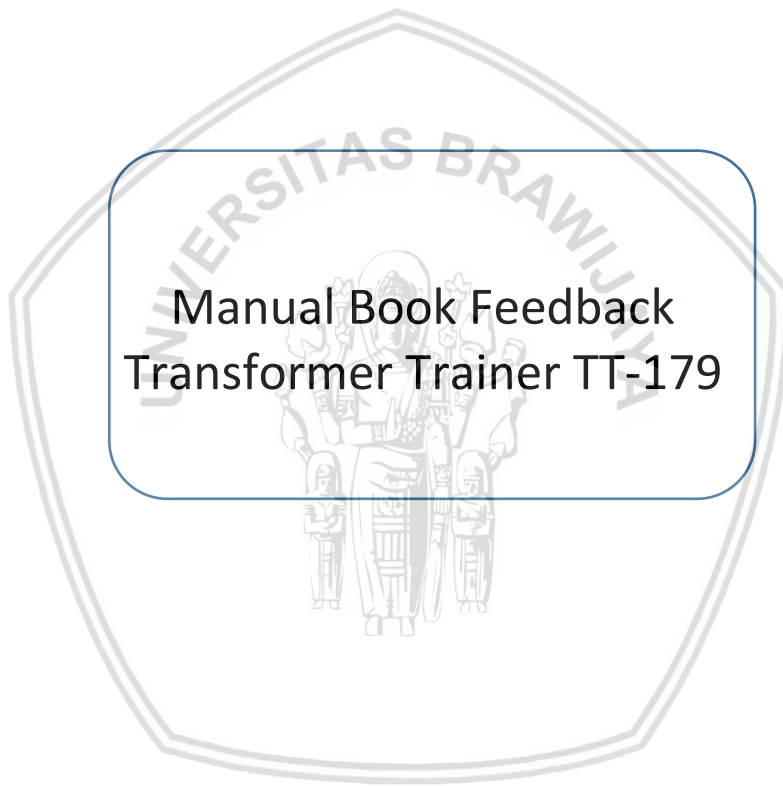


<p>2.</p>	<p>Multimeter Elektronik</p>	<p>Mastech MS8236</p>	<p>1</p>	
<p>3.</p>	<p><i>Power Quality Analyzer</i></p>	<p>Pilot PMAC770; Imax=5A;</p>	<p>1</p>	
<p>4.</p>	<p>Jangka Sorong</p>	<p>-</p>	<p>1</p>	
<p>5.</p>	<p>Software FEMM</p>	<p>Seri 4.2</p>		



**Lampiran 2. *Transformer Trainer TT-179 Manual Book***

Manual Book Feedback  
Transformer Trainer TT-179



Overall dimensions: 140 x 140 x 145mm  
(5.6 x 5.6 x 5.8in)

#### Additional Items Supplied with TT179

The items listed below are supplied in a plastic storage box.

Mercury/glass thermometer - range 0 to 120°C

Connecting leads and links : For interconnection to sockets on front panel of

Measurements Console, (all terminated in 4mm plugs):

QTY COLOUR	LENGTH mm
4 Yellow	65
4 Yellow	115
2 Yellow	155
2 Yellow	190
1 Blue	915
1 Orange	915
2 Black	915
1 Red	915
1 Pink	1700
6 White	Connecting bar
1 Green	Earthing lead

One three-core lead for connecting the external power supply to the rear panel of the Measurements Console. Terminated at the power supply end by 4mm plugs and at the Console end by a Belling Lee 3-pin plug, type 1722/P L.  
Spare fuse links - Two 160mA anti-surge 20 x 5mm, Beswick type TDC123

### Dissectable Transformer

This is a free-standing unit consisting of a two-part laminated and bonded core, a primary coil and two secondary coils, all wound on separate bobbins. The transformer can be taken apart by operating quick-release fasteners attached to the clamp and base. When the clamp is released the core and coils can be removed.

#### *Component Parts*

The Dissectable Transformer contains the following components:

Bonded E-section lamination package, overall dimensions 30 x 22 x 133mm (1.20 x 0.88 x 5.32in)

Bonded I-section lamination package, overall dimensions 30 x 89 x 133mm (1.20 x 0.36 x 5.32in)

Primary winding : 270 turns of 0.90mm wire, centre tapped, with flying leads j terminated by 4mm plugs.

Two Secondary windings: each 148 turns of 0.56mm wire, with flying leads terminated by 4mm plugs.

Two non-magnetic spacers  
Spare unwound bobbin  
Clamping frame  
Mounting base

#### *Electrical Specification*

Continuous full-load rating : 240 volt-amperes, 50/60Hz

Primary voltage : 120 volts, centre tapped for 60 volts.

Secondary 1 voltage and current: 60 volts, 2A.

