



TUGAS AKHIR - EE 184801

**EVALUASI JENIS MATERIAL INTI TRANSFORMATOR
TERHADAP KAPASITAS TRANSFORMATOR
BERDASARKAN ANALISA INRUSH CURRENT**

Muhammad Kaymal Akbar
NRP 0711144000094

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.
Danar Fahmi ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



FINAL PROJECT - EE 184801

**Evaluation type of Transformer core Material to
Transformer Capacity Based on Analysis Inrush
Current**

Muhammad Kaymal Akbar
NRP 0711144000094

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.
Danar Fahmi ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul "**Evaluasi Jenis Material Inti Transformator terhadap Kapasitas Transformator Berdasarkan Analisa *Inrush Current***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 29 Mei 2019



Muhammad Kaymal A
NRP. 0711144000094

**EVALUASI JENIS MATERIAL INTI
TRANSFORMATOR TERHADAP KAPASITAS
TRANSFORMATOR BERDASARKAN ANALISA
INRUSH CURRENT**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

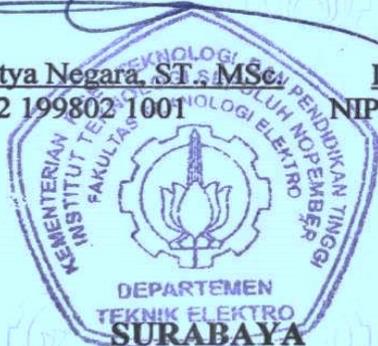
Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST, MSc

Daniar Fahmi, ST., MT.

NIP. 19700712 199802 1001

NIP. 1989 09 25 2014 04 1002



Juli, 2019

EVALUASI JENIS MATERIAL INTI TRANSFORMATOR TERHADAP KAPASITAS TRANSFORMATOR BERDASARKAN ANALISA *INRUSH CURRENT*

Nama : Muhammad Kaymal Akbar
NRP : 0711144000094
Pembimbing I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Transformator memiliki peranan penting yang ditemukan dan dipergunakan secara luas dalam sistem tenaga listrik. Inti besi dari transformator merupakan komponen induktansi nonlinier. Ketika suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan arus bolak balik (AC) untuk pertama kalinya, maka fenomena *inrush current* dapat terjadi. Nilai *inrush current* besarnya mencapai 6-12 kali arus nominal. Fenomena *Inrush current* dapat menyebabkan kerusakan pada transformator. Beberapa model transformator dengan prinsip dualitas telah tersedia pada ATPDraw seperti model *hybrid* (XFMR). Penggunaan prinsip ini memberikan gambaran inti secara signifikan, yang dapat membantu untuk studi energi transformator. Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui efek dari perbedaan inti transformator terhadap kapasitas transformator dengan menggunakan fenomena *inrush current*. Pada tugas akhir ini, transformator tiga fasa dengan tipe inti yang berbeda disimulasikan pada perangkat lunak ATPDraw. Hasil perbandingan *inrush current* yang didapatkan bahwa jenis material inti M5 merupakan material terburuk bila dibandingkan dengan jenis material inti MOH dan ZDKH pada kapasitas transformator 6 MVA, 7MVA, 15MVA, 20MVA dan 30 MVA.

Kata kunci: inti transformator, *inrush current*, transformator tiga fasa, ATPDraw

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Evaluation type of Transformer core Material to Transformer Capacity Based on Analysis Inrush Current

Nama : Muhammad Kaymal Akbar
NRP : 0711144000094
Advisor I : Dr. Eng. I Made Yulistya Negara, ST., MSc.
Advisor II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

The transformer has an important role found and used in electric power systems. The core of the transformer is a nonlinear inductance component. When a transformer discusses with an AC source for the first time, the phenomenon of a surge can occur. The value of nominal inrush current reaches 6-12 times the nominal current. Phenomenon inrush current can cause damage to the transformer. Some transformer models with duality principles are available on ATPDraw such as hybrid models (XFMR). The use of this principle provides a significant picture, which can help for study energy transformers. The purpose of this study is to study the effect of the difference in transformer core on transformer capacity using a fast inrush phenomenon. In this final project, three phase transformers with different core types in ATPDraw software. The result of the inrush current comparison show that the core material type M5 is the worst material when compared to the core material type MOH and ZDKH at 6 MVA, 7MVA, 15MVA, 20MVA, and 30 MVA transformer capacities.

Keywords: Iron core, inrush current , three phase transformer, ATPDraw

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan tepat waktu. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berjudul:

EVALUASI JENIS MATERIAL INTI TRANSFORMATOR TERHADAP KAPASITAS TRANSFORMATOR BERDASARKAN ANALISA INRUSH CURRENT

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia-Nya.
2. Ibu, bapak, dan kakak-kakak saya atas doa dan dukungannya dalam mendampingi saya hingga menjadi seorang sarjana.
3. Bapak Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc dan bapak Daniar Fahmi, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu dan berbagi ilmu selama penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T, M.Eng. selaku Ketua Departemen serta seluruh dosen dan karyawan yang telah memberikan banyak ilmu dan bantuannya selama proses perkuliahan di Teknik Elektro ITS.
5. Mas Arief Budi Ksatria, Reno Hidayat, dan Rafael yang senantiasa membantu memberikan masukan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Teman-teman Kantin dan DPR yang telah banyak membantu dalam menghibur dikala sedang pusing pengerjaan tugas akhir ini.
7. Edo rizaldi, Saiful Islam S, Rafid Rinanda yang telah rela menjadi sahabat penulis sejak dari SMP.
8. Keluarga besar Kucing Mweong yang selalu memberi dukungan support maupun doa selama pengerjaan tugas akhir ini.
9. Seluruh keluarga besar e-54 atas semangat dan motivasi selama 5 tahun di jurusan teknik elektro.

10. Pihak-pihak lain yang belum bisa penulis sebutkan satu per satu yang ikut membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan masukan sangat diharapkan untuk perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, 8 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	3
BAB II KAJIAN PENELITIAN DAN DASAR TEORI	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	5
2.2 Transformator.....	5
2.2.1 Pengertian Transformator.....	5
2.2.2 Prinsip Kerja Transformator.....	6
2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator	7
2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator.....	7
2.2.5 Pengujian Transformator.....	8
2.3 <i>Inrush Current</i>	11
2.3.1 Pengertian <i>Inrush current</i>	11
BAB III SKEMA PEMODELAN <i>INRUSH CURRENT</i>	15
3.1 Pemodelan Rangkaian <i>Inrush Current</i>	15
3.2 Pengambilan Data	24
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI <i>INRUSH CURRENT</i> PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA	27
4.1 Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Beberapa Kapasitas Transformator.....	27
4.1.1 Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Kapasitas 6MVA	27
4.1.2 Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 7 MVA	32
4.1.3 Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 15 MVA	37

4.1.4	Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 20 MVA	42
4.1.5	Analisa Simulasi <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 30 MVA	48
4.2	Analisa perbandingan Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada Material M5, MOH, dan ZDKH dengan Berberapa Kapasitas Transformator.....	52
4.2.1	Perbandingan Kurva Magnetisasi pada Masing-Masing Jenis Transformator	53
4.2.2	Analisa Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 6 MVA	57
4.2.3	Analisa Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 7 MVA	58
4.2.4	Analisa Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 15 MVA	59
4.2.5	Analisa Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 20 MVA	60
4.2.6	Analisa Simulasi dan Perhitungan <i>Inrush Current</i> pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 30 MVA	61
4.2.7	Analisa Perbandingan Simulasi dan Perhitungan pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Kapasitas 6MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA.....	62
4.3	Analisa perbandingan Simulasi dan Perhitungan Tegangan dan Arus pada Material M5, MOH, dan ZDKH dengan Berberapa Kapasitas Transformator	64
BAB V PENUTUP		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA.....		75
RIWAYAT HIDUP.....		77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Model transformator sederhana	6
Gambar 2. 2	Jenis-jenis kurva magnetisasi.....	7
Gambar 2. 3	Rangkaian ekivalen transformator	9
Gambar 2. 4	Rangkaian ekivalen transformator (a) Referensi sisi primer (b) Referensi sisi sekunder.....	9
Gambar 2. 5	Skema pengujian hubung terbuka transformator	9
Gambar 2. 6	Skema pengujian hubung singkat transformator.....	10
Gambar 2. 7	Kurva hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks [9]..	12
Gambar 3. 1	Rangkaian pemodelan <i>inrush current</i> transformator tiga fasa.....	24
Gambar 3.2	<i>Flowchart</i> pengambilan dan pengolahan data	25
Gambar 4.5 1	Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 6MVA	53
Gambar 4.5 2	Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 7MVA	54
Gambar 4.5 3	Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 15 MVA.....	55
Gambar 4.5 4	Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 20 MVA.....	55
Gambar 4.5 5	Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 30 MVA.....	56
Gambar 4.5 6	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 6 MVA	65
Gambar 4.5 7	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 6 MVA.....	65
Gambar 4.5 8	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 6 MVA	65
Gambar 4.5 9	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 7 MVA.....	66
Gambar 4.5 10	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 7 MVA	66
Gambar 4.5 11	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 7 MVA	67
Gambar 4.5 12	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 15 MVA	67

Gambar 4.5 13	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 15 MVA	68
Gambar 4.5 14	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 15 MVA.....	68
Gambar 4.5 15	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 20 MVA.....	69
Gambar 4.5 16	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 20 MVA	69
Gambar 4.5 17	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 20 MVA	69
Gambar 4.5 18	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 20 MVA	70
Gambar 4.5 19	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 20 MVA	70
Gambar 4.5 20	Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 30 MVA.....	71

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH inti transformator yang disimulasikan 6 MVA	17
Tabel 3.2	Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 7 MVA	17
Tabel 3.3	Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 15 MVA	17
Tabel 3.4	Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 20 MVA	17
Tabel 3.5	Spesifikasi jenis inti transformator yang disimulasikan 30 MVA	17
Tabel 3.6	Hasil pengujian <i>open circuit</i> 6 MVA (M5)	18
Tabel 3.7	Hasil pengujian <i>open circuit</i> 6 MVA (MOH).....	18
Tabel 3.8	Hasil pengujian <i>open circuit</i> 6 MVA (ZDKH).....	18
Tabel 3.9	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 7 MVA (M5)	18
Tabel 3.10	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 7 MVA (MOH)	19
Tabel 3.11	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 7 MVA (ZDKH).....	19
Tabel 3.12	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 15 MVA (M5)	19
Tabel 3.13	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 15 MVA (MOH)	20
Tabel 3.14	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 15 MVA (ZDKH).....	20
Tabel 3.15	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 20 MVA (M5)	20
Tabel 3.16	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 20 MVA (MOH)	21
Tabel 3.17	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 20 MVA (ZDKH).....	21
Tabel 3.18	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 30 MVA (M5)	21
Tabel 3.19	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 30 MVA (MOH)	21
Tabel 3.20	Hasil Pengujian <i>open circuit</i> 30 MVA (ZDKH).....	22
Tabel3.21	Parameter rangkaian pemodelan <i>Inrush Current</i> dengan kapasitas 6 MVA.....	22
Tabel 3.22	Parameter rangkaian pemodelan <i>Inrush Current</i> dengan kapasitas 7 MVA.....	22
Tabel 3.23	Parameter rangkaian pemodelan <i>Inrush Current</i> dengan kaasitas 15 MVA.....	23
Tabel 3.24	Parameter rangkaian pemodelan <i>Inrush Current</i> dengan kapasitas 20 MVA.....	23
Tabel 3.25	Parameter rangkaian pemodelan <i>Inrush Current</i> dengan kapasitas 30 MVA.....	24

Tabel 4.1 Perbandingan nilai <i>inrush current</i> pada fasa T material M5 berbagai kapasitas	62
Tabel 4.2 Perbandingan nilai <i>inrush current</i> pada fasa T material MOH berbagai kapasitas	63
Tabel 4.3 Perbandingan nilai <i>inrush current</i> pada fasa T material MOH berbagai kapasitas	64
Tabel 4.4 Tabel perbandingan nilai arus material M5, MOH dan ZDKH	71

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan salah satu komponen sangat penting yang digunakan dalam penyaluran energi listrik pada sistem tenaga listrik. Secara sederhana transformator terdiri dari kumparan primer, kumparan sekunder dan inti transformator. Inti besi yang dimiliki transformator merupakan sebuah komponen induktansi nonlinear. Penggunaan material magnet pada inti transformator berkaitan dengan titik kejenuhan (saturasi) material magnetik.

Terjadinya *inrush current* berawal saat saturasi yang tinggi dari inti besi, ketika suatu transformator di hubungkan dengan suatu sumber tegangan AC untuk yang pertama kalinya, akan ada suatu arus surja tambahan melewati kumparan primer dan nilainya mencapai 6-12 kali arus nominalnya[1]. Karena arus yang besar ini belitan transformator menderita beban yang sangat besar. Arus yang besar mengakibatkan panas berlebih pada penghantar, sehingga kekuatan isolator penghantar berkurang. Secara mekanik belitan akan mendapatkan gaya yang besar sehingga bentuk belitan rusak. Dampak arus *inrush* secara mekanik telah dilakukan penelitian[2]. Pengaruh lain pada fenomena *inrush current* pada sistem tenaga listrik ialah dapat menaikkan harmonisa tegangan lebih dan mengganggu sistem pengamanan jaringan. Dalam upaya menyediakan model transformator yang lebih akurat, dalam hal hemat biaya untuk penggunaan bahan inti yang memiliki rugi rendah, investasi yang *signifikan* banyak upaya telah dilakukan dalam dekade terakhir ini. Sebagian besar model yang diusulkan didasarkan pada prinsip dualitas, di mana elemen rangkaian listrik diperoleh dari rangkaian magnetik berdasarkan parameter fisik transformator, seperti dimensi inti dan topologi [3].

Berdasarkan prinsip dualitas model transformator, ATPDraw memiliki model yang disebut *hybrid* atau XFMR. Dalam model yang dimiliki ATPDraw, inti transformator ditempatkan pada belitan yang terpisah dan perwakilannya tergantung pada topologi inti yang bisa berupa *triplex* (*core* independen), *core stacked* (tiga atau lima kaki), dan juga *core shell*. Representasi inti yang lebih rinci ini penting untuk studi *inrush current* selama pemberian sumber tegangan AC pada transformator untuk pertama kalinya.

Pada studi ini akan dilakukan simulasi model *hybrid* atau XFMR pada ATPDraw menggunakan transformator tiga fasa buatan Bambang Djaja dengan tipe inti yang berbeda dengan kapasitas yang bermacam-macam. Pada studi ini akan diamati pengaruh nilai *inrush current* ketika pemodelan transformator dengan tipe inti dan kapasitas yang berbeda-beda. Dengan menganalisa besar dari arus inrush maksimum diharapkan dapat dijadikan acuan dalam merancang transformator yang baik. Baik dari besar arus inrush maupun rugi-rugi yang ada pada transformator.

Permasalahan pada studi ini adalah kurangnya acuan dalam merancang transformator yang baik, khususnya dalam pemilihan jenis material inti berdasarkan karakteristik *inrush current*. Batasan masalah pada studi ini adalah transformator yang disimulasikan, yakni transformator 70/6kV 6MVA, 70/6,3kV 7MVA, 70/20kV 15MVA dan 70/22kV 20MVA buatan PT. Bambang Djaja dengan tipe inti M5, MOH, dan ZDKH. Batasan masalah lainnya adalah *trigger* berupa *switching* tiga fasa secara serempak pada pemodelan rangkaian perhitungan *inrush current* dimana menggunakan transformator *hybrid* atau XFMR, dan analisa karakteristik *inrush current* pada tegangan sisi primer dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak ATPDraw.

Tujuan dan relevansi dari tugas akhir ini adalah untuk mendapatkan metode dalam pemilihan transformator hemat biaya dalam penggunaan jenis material inti dengan nilai kerugian rendah, penghematan energi dan melakukan investasi yang signifikan dalam memilih transformator. Hasil dari penelitian ini nantinya dapat digunakan untuk acuan dalam pemilihan model transformator sesuai dengan jenis material inti dan dalam pemilihan sistem pengamanan jaringan berdasarkan jenis material inti berdasarkan analisa *inrush current*-nya.

Metode penelitian dalam studi ini berawal dari pengumpulan referensi mengenai *inrush current* dan karakteristik inti transformator untuk digunakan dalam studi literatur. Kemudian dilakukan pengumpulan data hasil pengujian transformator Bambang Djaja untuk kemudian dilakukan pemodelan dan simulasi rangkaian pada perangkat lunak ATPDraw. Simulasi rangkaian dilakukan dengan beberapa parameter yang berbeda yaitu inti transformator serta nilai kapasitasnya. Hal ini dilakukan untuk melihat karakteristik *inrush current* pada inti yang berbeda, dengan dilakukan *trigger switching* secara serempak. Kemudian setelah data selesai diambil akan dilakukan analisis data hasil simulasi. Hasil yang didapat akan digunakan untuk karakteristik *inrush current*

berdasarkan beberapa kapasitas transformator pada inti yang berbeda. Terakhir adalah penarikan kesimpulan mengenai karakteristik fenomena *inrush current* pada transformator tiga fasa Bambang Djaja dengan inti yang berbeda serta memberikan saran untuk studi selanjutnya.

1.2 Sistematika Penulisan

Bab satu berisi tentang latar belakang, permasalahan, batasan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, manfaat, relevansi dari penulisan pada studi ini.

Bab dua berisi teori penunjang yang membahas tentang sistem tenaga listrik khususnya sistem transmisi tenaga listrik, transformator, feroresonansi, dan bifurkasi.

Bab tiga membahas tentang pemodelan rangkaian *hybrid* atau XFMR metode pengambilan data menggunakan ATPDraw akan digunakan dalam studi ini.

Bab empat berisi hasil simulasi pemodelan rangkaian *hybrid* transformator berdasarkan parameter inti transformator menggunakan ATPDraw. Hasil simulasi ini meliputi respon tegangan antar fasa tiap parameter inti transformator, perbandingan respon arus antar inti.

Bab lima berisi kesimpulan dari simulasi dan analisis yang dilakukan melalui sebuah rangkaian pemodelan transformator *hybrid* atau XFMR dan saran untuk penelitian atau studi selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PENELITIAN DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan ATPDraw dalam mengevaluasi jenis material inti transformator terhadap kapasitas transformator berdasarkan *inrush current*. Penggunaan material inti transformator dengan menggunakan jenis M5, MOH, dan ZDKH dengan berbagai kapasitas diantaranya 6MVA, 7MVA, 15MVA, 20MVA dan 30MVA. Jenis material inti dan kapasitasnya didapat dari produksi Bambang Djaja agar dapat menunjang penelitian ini sesuai dengan keadaan di lapangan. Hal ini bertujuan untuk hal hemat biaya untuk penggunaan bahan inti yang memiliki rugi rendah, investasi yang *signifikan* dan mendapatkan transformator yang akurat.

Berdasarkan beberapa penelitian[4], analisa pengaturan inti dari model XFMR ATPDraw berdasarkan konten harmonik pada *inrush current* dengan menggunakan permisalan material dan juga kapasitas transformator mendapatkan hasil yang kurang signifikan dikarenakan komponen harmonik *inrush current* hanya bergantung pada urutan komponen dan lebar pulsa alfa, dan pulsa alfa bergantung pada lokasi titik lutut. Penelitian yang lain dengan menggunakan material inti M4 dan MOH dengan menggunakan analisa menggunakan FEM dimana model pemotongan inti transformator berpengaruh terhadap nilai *inrush*[5].

2.2 Transformator

2.2.1 Pengertian Transformator

Transformator adalah peralatan listrik yang digunakan pada sistem tenaga listrik untuk menyalurkan daya dari pembangkit ke konsumen. Pada sistem tenaga listrik terdapat tegangan transmisi dan distribusi yang beragam. Hal ini menyebabkan transformator daya harus diletakkan pada tiap titik dimana di titik tersebut terjadi transisi antar level tegangan.

Transformator diklasifikasikan berdasarkan daya keluaran yang mampu dihantarkan pada rating tegangan dan frekuensi tertentu dibawah kondisi operasi normal tanpa melewati batasan temperatur transformator yang telah ditentukan. Temperatur yang diijinkan isolator saat kondisi operasi sangat penting untuk menentukan *output* rating dari transformator (rating kVA). Transformator didisain untuk membatasi temperatur

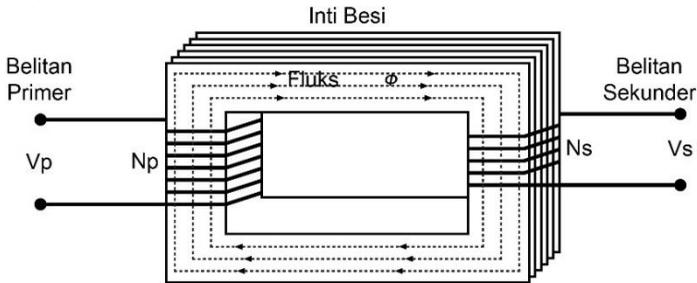
berdasarkan besar beban, termasuk rata-rata kenaikan temperatur dari belitan, dan kenaikan temperatur minyak [6].

Menurut kapasitasnya, transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut (*U.S. rating*) :

1. Transformator daya kecil; 500 – 7500 kVA
2. Transformator daya menengah; 7500 kVA – 100 MVA
3. Transformator daya besar; diatas 100 MVA

2.2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induktansi mutual antara dua buah belitan yang dihubungkan oleh sebuah fluks magnetik. Gambar 2.1 merupakan model transformator sederhana yang terdiri dari belitan primer, inti besi, serta belitan sekunder.



Gambar 2. 1 Model transformator sederhana

Jika belitan primer dihubungkan oleh suatu sumber tegangan AC, maka akan muncul fluks magnetic pada kumparan. Fluks ini terhubung dengan inti besi sehingga terhubung dengan belitan sekunder. Pada belitan sekunder akan muncul gaya gerak listrik induksi akibat adanya fluks magnetik dari belitan primer. Prinsip kerja transformator ini sesuai dengan Hukum Faraday. Hukum Faraday menyatakan bahwa pada rangkaian tertutup, nilai gaya gerak listrik induksi sama dengan negatif rate perubahan fluks terhadap waktu [7]. Berdasarkan hukum faraday tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{\lambda}{N} \quad (2.2)$$

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

dimana:

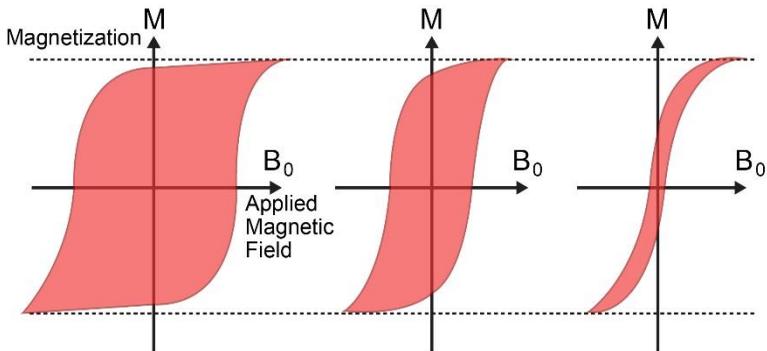
λ = Total fluks linkage

ϕ = Fluks

- $d\phi$ = Perubahan garis-garis gaya magnet (Webber)
- dt = Perubahan waktu (s)
- N = Jumlah belitan
- e = GGL induksi (Volt)

2.2.3 Kurva Magnetisasi Transformator

Gambar 2.3 menunjukkan jenis jenis kurva magnetisasi. Semakin lebar kurva magnetisasinya, maka kurva akan mempertahankan keadaan saturasinya lebih lama ketika sumber medan dilepas. Hal ini dapat ditemui pada magnet permanen. Ketika kurva magnetisasi cenderung sempit, hal ini akan berakibat pada rugi-rugi inti yang semakin kecil ketika alat sedang beroperasi. Hal ini dapat ditemui pada mesin AC seperti transformator dan motor [7].



Gambar 2. 2 Jenis-jenis kurva magnetisasi

2.2.4 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Pada transformator terdapat beberapa rugi-rugi yang harus diperhitungkan pada pemodelan transformator [7]. Rugi rugi tersebut adalah:

- a. Rugi-rugi belitan
Rugi-rugi belitan adalah rugi-rugi resistif dimana menghasilkan panas yang terjadi pada belitan primer dan sekunder dari transformator.
- b. Rugi-rugi arus eddy
Rugi-rugi arus eddy merupakan rugi-rugi resistif dimana menghasilkan panas pada inti transformator.

c. Rugi-rugi histeresis

Rugi-rugi histeresis berhubungan dengan kurva magnetisasi dari inti.

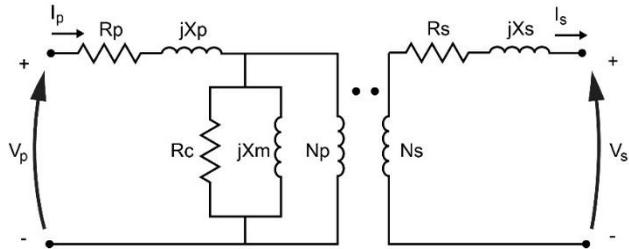
d. Rugi-rugi flux bocor

Fluks bocor merupakan ϕ_{LP} dan ϕ_{LS} yang keluar dari inti dan hanya melewati satu belitan transformator. Hal ini dapat mengakibatkan induktansi mutual pada belitan primer dan sekunder.

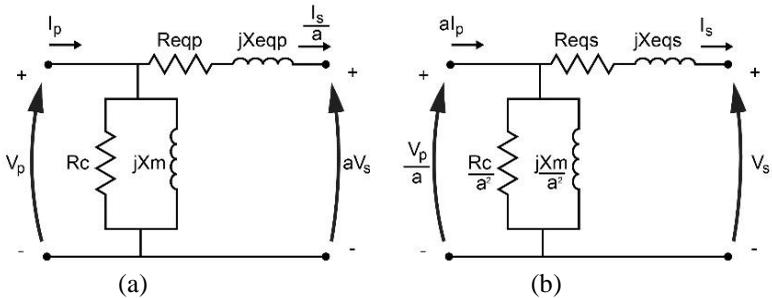
Seperti yang dijelaskan pada rugi-rugi transformator, pemodelan rangkaian ekivalen bermula dari pemodelan rugi-rugi transformer. Rugi-rugi belitan dimodelkan sebagai resistansi pada sisi primer R_P dan resistansi pada sisi sekunder R_S . Fluks bocor pada belitan primer ϕ_{LP} dan belitan sekunder ϕ_{LS} dimodelkan dengan induktor pada sisi primer dan sekunder. Efek eksitasi dimodelkan sebagai X_M dan R_C . Pemodelan efek eksitasi diletakkan antara resistansi primer R_P dan induktansi primer L_P . Hal ini dikarenakan tegangan pada inti transformator merupakan tegangan yang disuplai ke transformator. Gambar 2.4 menunjukkan pemodelan akurat dari transformator. Akan tetapi, untuk dapat menganalisa rangkaian secara praktikal, Rangkaian ekivalen dibuat menjadi satu level tegangan saja seperti pada gambar 2.5.

2.2.5 Pengujian Transformator

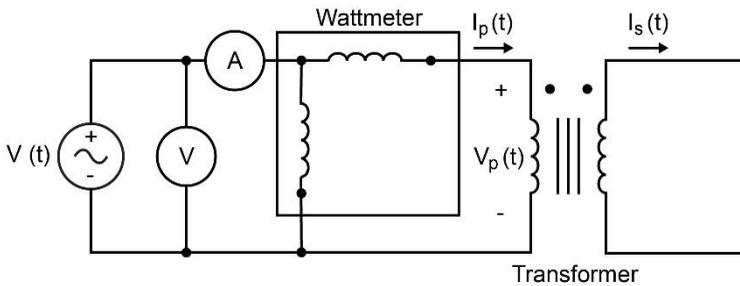
Untuk dapat mengetahui nilai induktansi dan resistansi dari sebuah transformator, pengujian hubung singkat dan pengujian hubung terbuka dapat dilakukan [7]. Pada pengujian hubung terbuka, belitan sekunder transformator tidak dihubungkan dan belitan primernya dihubungkan dengan sumber tegangan. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 2.5. Nilai yang diukur pada saat pengujian adalah tegangan sumber, arus, dan daya. Ketika pengujian dilakukan, semua arus dari sumber akan mengalir ke bagian eksitasi transformator. Nilai R_p dan X_p terlalu kecil jika dibandingkan dengan R_c dan X_m sehingga drop tegangannya tidak terlalu signifikan.



Gambar 2. 3 Rangkaian ekivalen transformator



Gambar 2. 4 Rangkaian ekivalen transformator (a) Referensi sisi primer (b) Referensi sisi sekunder



Gambar 2. 5 Skema pengujian hubung terbuka transformator

Pengujian hubung terbuka ini dilakukan untuk mendapatkan nilai R_c dan X_m . Rumus untuk mendapatkan nilai R_c dan X_m dapat dilihat dari persamaan 2.3 hingga 2.5.

$$|Y_E| = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \quad (2.4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{OC}}{V_{OC} I_{OC}} \quad (2.5)$$

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\theta = \frac{1}{R_C} - j \frac{1}{X_M} \quad (2.6)$$

Dimana:

Y_E = Admittansi (Siemens)

I_{OC} = Arus hubung terbuka (A)

V_{OC} = Tegangan hubung terbuka (V)

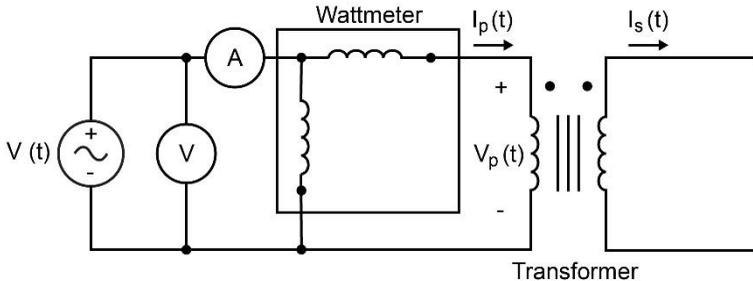
R_C = Resistansi inti (Ohm)

X_M = Reaktansi magnetisasi (Ohm)

Pada pengujian hubung singkat, belitan sekunder dihubungkan singkatkan dan belitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 2.6. Tegangan sumber disesuaikan hingga arus pada belitan sekunder mencapai nilai ratingnya. Nilai yang diukur pada saat pengujian adalah tegangan sumber, arus, dan daya. Karena tegangan sumber relatif kecil ketika pengujian, arus eksitasi transformator dapat diabaikan. Karena arus ekstiasi diabaikan, tegangan jatuh pada saat pengujian terjadi akibat elemen seri pada transformator. Pengujian hubung singkat transformator digunakan untuk mendapatkan nilai R_{eq} dan X_{eq} .

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \quad (2.7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{SC}}{V_{SC} I_{SC}} \quad (2.8)$$



Gambar 2. 6 Skema pengujian hubung singkat transformator

$$Z_{SE} = \frac{V_{SC} \angle 0^\circ}{I_{SC} \angle -\theta} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle -\theta = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.9)$$

$$R_{eq} = R_p + a^2 R_s \quad (2.10)$$

$$X_{eq} = X_p + a^2 X_s \quad (2.11)$$

- Z_{SE} = Impedansi (Ohm)
 I_{SC} = Arus hubung singkat (A)
 V_{SC} = Tegangan hubung singkat (V)
 R_{eq} = Resistansi ekivalen (Ω)
 X_{eq} = Reaktansi ekivalen (Ω)

2.3 Inrush Current

2.3.1 Pengertian Inrush current

Ketika suatu transformator di hubungkan dengan suatu sumber tegangan AC untuk yang pertama kalinya, akan ada suatu surge arus yang disebut *inrush current*. *Inrush current* memiliki magnitudo yang besar, serta harmonisa yang luas. Oleh karena itu, kebanyakan trafo dirancang dengan suatu batas yang cukup antara puncak normal fluks dan batas saturasi untuk mencegah saturasi yang dapat terjadinya kesalahan operasi pada rele-rele pengaman, mengurangi usia peralatan dan mengurangi kualitas daya sistem. Inti magnet pada transformator penyebab utama terjadinya *inrush current*. Selama saturasi, yang disebabkan oleh perubahan yang tiba-tiba mengakibatkan sejumlah ketidakseimbangan mmf diperlukan untuk membangkitkan fluks. Ini berarti bahwa arus kumparan, yang menghasilkan mmf menyebabkan fluks pada inti, akan naik secara tak sebanding menuju suatu nilai yang mencapai 6-12 kali nominalnya. Besar arus inrush ini dipengaruhi oleh ukuran inti dari transformator dan level fluksi yang sudah ada pada inti[8].

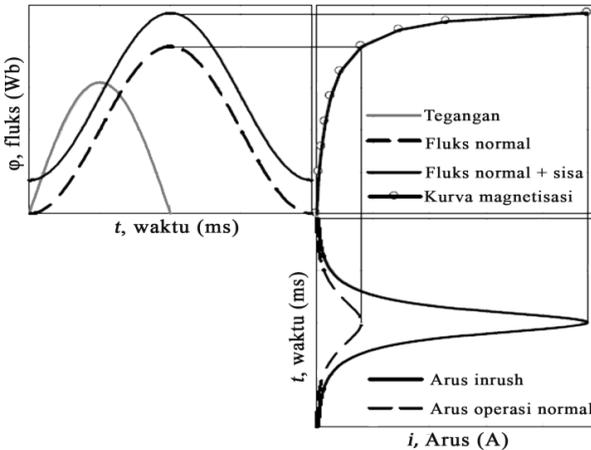
Ada beberapa metode untuk mengukur *inrush current* pada transformator, dengan metode simulasi *inrush current* dan metode perhitungan analisis *inrush current*. Pada metode simulasi permodelan transformator menggunakan *software* seperti *EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)*, atau ATPDraw.

Nilai puncak *inrush current* merupakan fungsi dari tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, kerapatan medan magnet saturasi, resistansi belitan primer dan induktansi pada transformator[8]. Berdasarkan studi [9] secara matematis nilai dari *inrush current* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut:

$$i_{max} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left(\frac{2B_n + B_r - B_s}{B_n} \right)$$

Dengan keterangan:

- V_m = Tegangan terhubung maksimum (V)
- L = Induktansi transformator (H)
- R = Resistansi transformator (Ohm)
- B_n = Kerapatan medan magnet normal (Wb/m²)
- B_r = Kerapatan medan magnet sisa (Wb/m²)
- B_s = Kerapatan medan magnet jenuh (Wb/m²)



Gambar 2. 7 Kurva hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks [9]

Kerapatan medan magnet normal diperoleh saat transformator beroperasi secara normal. Sedangkan kerapatan medan magnet sisa (B_r) dan kerapatan medan magnet jenuh (B_s) diperoleh berdasarkan permeabilitas inti transformator. Sehingga pada jenis material yang berbeda nilai arus inrush dapat berbeda meskipun memiliki kapasitas yang sama. Gambar 2.7 diatas menjelaskan bahwa adanya fluks sisa pada inti transformator berpengaruh pada kurva magnetisasi. Semakin tinggi nilai magnetisasi (saturasi), semakin tinggi pula arus yang dihasilkan.

Ada beberapa metode untuk mengukur *inrush current* pada transformator, dengan metode simulasi *inrush current* dan metode perhitungan analisis *inrush current*. Pada metode simulasi permodelan transformator menggunakan *software* seperti *EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)*, atau ATPDraw. Pada metode sistematis dengan menggunakan analisa melalui menurunkan teori transformator 1 fasa. Ada beberapa rumus sebagai acuan ialah; *Specht* [10]; dan *Holcomb*[11].

Secara teori, *inrush current* memiliki magnitudo maksimum pada saat dinyalakan dengan sudut penyalaan 0 derajat dan memiliki minimum magnitudo dengan sudut penyalaan 90 derajat[11].

Ketika transformator diberikan tegangan menggunakan sumber AC akan berpengaruh oleh 2 faktor yakni faktor internal dan faktor eksternal. Karakteristik dari material inti yang memiliki kurva saturasi dan kurva histerisis yang berbeda-beda adalah faktor internal, sedangkan pengaruh fluks residu atau fluks sisa pada transformator adalah faktor eksternal. *Inrush current* terdiri dari 2 bagian, pertama ialah arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator yang biasa disebut dengan arus magnetisasi dan yang kedua arus yang diperlukan untuk rugi histerisis dan rugi arus *eddy* yang disebut dengan arus rugi inti. Fenomena hubungan *inrush current* akibat adanya pengaruh fluks dan kurva magnetisasi inti ditunjukkan pada gambar 2.7

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

SKEMA PEMODELAN *INRUSH CURRENT*

3.1 Pemodelan Rangkaian *Inrush Current*

Fenomena *inrush current* pada transformator dengan inti yang berbeda dan kapasitas yang berbeda dapat ditunjukkan menggunakan pemodelan rangkaian pada studi ini. Pemodelan rangkaian dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw (*Alternative Transient Program*).

Pada rangkaian pemodelan, parameter inti dari transformator merupakan fokus utama pada studi ini. Berdasarkan datasheet trafo yang disimulasikan, inti trafo yang digunakan adalah jenis *grain oriented Hi-B silicon steel, laser or non-laser steel*. *Orient core Hi-B* adalah sebuah jenis inti transformator yang memiliki kerapatan fluks magnetik yang tinggi, kerugian inti yang rendah, dan magnetostriction yang lebih rendah dibandingkan inti besi *grain-oriented* jenis konvensional. Jenis ini terbagi lagi berdasarkan tingkat gradenya. Terdapat tiga buah jenis inti transformator yang disimulasikan pada studi ini. Inti tersebut adalah jenis M5, MOH, dan ZDKH.

M5, MOH, dan ZDKH adalah jenis inti buatan Nippon Steel Cooperation. Jenis inti ini sudah memenuhi standard JIS (*Japanese Industrial Standard*) C 2552-1986 dan standard AISI (*American Iron and Steel Institute*) 1983. Jenis inti yang disimulasikan memiliki perbedaan pada ketebalan, rugi-rugi inti maksimum pada 1,7T, dan induksi minimum pada 800A/m. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi dari inti trafo yang digunakan.

Dengan menggunakan metode *open circuit test*, didapatkan parameter inti transformator, yaitu nilai resistansi magnetisasi, fluks, dan arus eksitasi. Sedangkan dengan pengujian short circuit test didapatkan parameter resistansi dan induktansi sisi primer dan sekunder transformator. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 3.2.1 hingga 3.2.15

$$Un (V) = \frac{Un(\%)}{\sqrt{3}} V_{HV} \quad (3.1)$$

$$Iex (A) = \frac{Iex(\%).S_{rated}}{\sqrt{3}.V_{HV}} \quad (3.2)$$

$$Q = Un. Iex \quad (3.3)$$

$$P = \frac{P_{NLL}}{3} * 1000 \quad (3.4)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.5)$$

$$I_r = \frac{P}{V} \quad (3.6)$$

$$R_m = \frac{Un}{I_r} \quad (3.7)$$

$$X_M = \frac{V}{I_{ex}} \quad (3.8)$$

$$L_M = \frac{X_M}{2\pi f} \quad (3.9)$$

$$\lambda = I_{ex}L_M \quad (3.10)$$

Dimana:

Un	= Tegangan suplai (V)
I_{ex}	= Arus eksitasi (A)
Q	= Daya Reaktif (VAR)
P	= Daya Aktif (Watt)
S	= Daya Semu (VA)
I_r	= Arus resistif (A)
R_m	= Resistansi magnetisasi (Ω)
X_M	= Reaktansi magnetisasi (Ω)
L_M	= Induktansi magnetisasi (Henry)
λ	= Fluks (Wb-T)

Berdasarkan data hasil pengujian pada tabel 3.2 hingga 3.16, Persamaan (3.1) hingga (3.10) digunakan untuk mendapatkan parameter tagangan suplai, arus eksitasi, dan Daya aktif (loss) untuk mendapatkan parameter tiap inti transformator yang digunakan pada simulasi, serta untuk mendapatkan kurva magnetisasi dari simulasi.

Pada gambar 3.1, pemodelan rangkaian *inrush current* terdiri dari sumber tegangan tiga fasa yang diketanahkan. Sumber ini terhubung ke RCL kemudian menuju ke *switch* tiga fasa. Kemudian switch terhubung ke transformator tiga fasa dengan parameter pada tabel 3.2 hingga 3.22

Tabel 3.1 Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH inti transformator yang disimulasikan 6 MVA

Panjang Luar	Lebar Luar	Luas Luar	Panjang Rongga	Lebar Rongga	Luas
885 mm	885 mm	0.783 m ²	735mm	330mm	0.242 m ²
Luas Area = 0.783 m ² - 0.242 m ² = 0.541 m ²					

Tabel 3. 2 Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 7 MVA

Panjang Luar	Lebar Luar	Luas Luar	Panjang Rongga	Lebar Rongga	Luas
691 mm	1473 mm	1.018 m ²	269 mm	1371mm	0.369 m ²
Luas Area = 1.018 m ² - 0.369 m ² = 0.65 m ²					

Tabel 3. 3 Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 15 MVA

Panjang Luar	Lebar Luar	Luas Luar	Panjang Rongga	Lebar Rongga	Luas
885 mm	1055 mm	0.934 m ²	350 mm	985 mm	0.345 m ²
Luas Area = 0.934 m ² - 0.345 m ² = 0.59 m ²					

Tabel 3. 4 Spesifikasi jenis material inti M5, MOH dan ZDKH transformator yang disimulasikan 20 MVA

Panjang Luar	Lebar Luar	Luas Luar	Panjang Rongga	Lebar Rongga	Luas
1065 mm	1050 mm	1.12 m ²	920 mm	435 mm	0.4 m ²
Luas Area = 1.12 m ² - 0.4 m ² = 0.72 m ²					

Tabel 3. 5 Spesifikasi jenis inti transformator yang disimulasikan 30 MVA

Panjang Luar	Lebar Luar	Luas Luar	Panjang Rongga	Lebar Rongga	Luas
1065 mm	1050 mm	1.12 m ²	920 mm	435 mm	0.4 m ²
Luas Area = 1.12 m ² - 0.4 m ² = 0.72 m ²					

Tabel 3.6 Hasil pengujian *open circuit* 6 MVA (M5)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	5,9290	0,1877
95	6,8160	0,2422
100	7,9020	0,3507
105	9,2750	0,6002
110	11,0880	1,3092
115	13,6460	4,0615
120	17,5930	21,0064

Tabel 3. 7 Hasil pengujian *open circuit* 6 MVA (MOH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	5,418	0,138
95	6,164	0,163
100	7,053	0,211
105	8,136	0,321
110	9,599	0,633
115	12,058	1,899
120	17,462	11,197

Tabel 3. 8 Hasil pengujian *open circuit* 6 MVA (ZDKH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	4,101	0,140
95	4,674	0,166
100	5,358	0,220
105	6,200	0,347
110	7,369	0,724
115	9,429	2,394
120	14,180	16,652

Tabel 3. 9 Hasil Pengujian *open circuit* 7 MVA (M5)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	4,163	0,128
95	4,875	0,180

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
100	5,801	0,296
105	7,059	0,616
110	8,872	1,808
115	11,691	8,815
118,64	14,880	43,792

Tabel 3. 10 Hasil Pengujian *open circuit* 7 MVA (MOH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	3,848	0,089
95	4,418	0,112
100	5,128	0,164
105	6,066	0,304
110	7,506	0,843
115	10,299	4,507
118,64	14,623	29,052

Tabel 3. 11 Hasil Pengujian *open circuit* 7 MVA (ZDKH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	2,916	0,091
95	3,355	0,116
100	3,906	0,175
105	4,647	0,342
110	5,825	1,037
115	8,216	6,467
117,78	10,889	28,844

Tabel 3. 12 Hasil Pengujian *open circuit* 15 MVA (M5)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	7,586	0,104
95	8,833	0,148
100	10,434	0,247
105	12,586	0,528
110	15,677	1,612

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	I _{eksitasi} (%I _n)
115	20,520	8,346
118,18	25,261	34,918

Tabel 3. 13 Hasil Pengujian *open circuit* 15 MVA (MOH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	I _{eksitasi} (%I _n)
90	6,899	0,072
95	7,935	0,091
100	9,180	0,135
105	10,787	0,259
110	13,337	0,752
115	18,756	4,356
118,18	26,316	23,165

Tabel 3. 14 Hasil Pengujian *open circuit* 15 MVA (ZDKH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	I _{eksitasi} (%I _n)
90	5,230	0,073
95	6,025	0,095
100	6,987	0,145
105	8,257	0,293
110	10,366	0,934
115	15,088	6,366
117,33	19,595	22,999

Tabel 3. 15 Hasil Pengujian *open circuit* 20 MVA (M5)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	I _{eksitasi} (%I _n)
90	11,144	0,106
95	12,825	0,139
100	14,896	0,205
105	17,538	0,362
110	21,072	0,828
115	26,145	2,756
120	34,138	15,851

Tabel 3. 16 Hasil Pengujian *open circuit* 20 MVA (MOH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	10,149	0,078
95	11,576	0,092
100	13,269	0,122
105	15,328	0,191
110	18,144	0,396
115	23,043	1,296
120	34,285	8,839

Tabel 3. 17 Hasil Pengujian *open circuit* 20 MVA (ZDKH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	7,686	0,078
95	8,780	0,094
100	10,082	0,127
105	11,683	0,207
110	13,943	0,458
115	18,076	1,666
120	28,033	13,601

Tabel 3. 18 Hasil Pengujian *open circuit* 30 MVA (M5)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	16,439	0,106
95	18,952	0,139
100	22,057	0,206
105	26,029	0,364
110	31,355	0,835
115	39,009	2,798
120	51,059	16,243

Tabel 3. 19 Hasil Pengujian *open circuit* 30 MVA (MOH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	Ieksitasi (%In)
90	15,053	0,077
95	17,150	0,092

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	$I_{eksitasi}$ (%In)
100	19,664	0,122
105	22,770	0,192
110	27,075	0,400
115	34,570	1,316
120	51,590	9,097

Tabel 3. 20 Hasil Pengujian *open circuit* 30 MVA (ZDKH)

U_n (%)	P_{NLL} (kW)	$I_{eksitasi}$ (%In)
90	11,396	0,078
95	13,007	0,094
100	14,944	0,127
105	17,365	0,208
110	20,824	0,462
115	27,139	1,695
120	42,182	14,038

Tabel 3. 21 Parameter rangkaian pemodelan *Inrush Current* dengan kapasitas 6 MVA

Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas Daya (3 fasa)	MVA	6
Frekuensi	Hz	50
No Load Losses	kW	18
Full Load Losses	kW	65
HV (L-L) / LV (L-L)	kV	70 / 6
Arus HV (L-L) / Arus LV (L-L)	A	49,55 / 578,03
Hubungan Belitan		Y-D
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	S	0,02
Impedansi	Ω (%)	12,5

Tabel 3. 22 Parameter rangkaian pemodelan *Inrush Current* dengan kapasitas 7 MVA

Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas Daya (3 fasa)	MVA	7
Frekuensi	Hz	50
No Load Losses	kW	6

Parameter	Satuan	Nilai
Full Load Losses	kW	48,2
HV (L-L) / LV (L-L)	kV	70 / 6,3
Arus HV (L-L) / Arus LV (L-L)	A	57, 8/ 642,26
Hubungan Belitan		Y-D
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	S	0,02
Impedansi	Ω (%)	7,5

Tabel 3. 23 Parameter rangkaian pemodelan *Inrush Current* dengan kapasitas 15 MVA

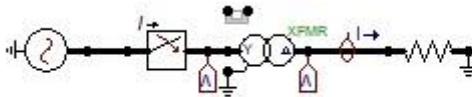
Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas Daya (3 fasa)	MVA	15
Frekuensi	Hz	50
No Load Losses	kW	11
Full Load Losses	kW	600
HV (L-L) / LV (L-L)	kV	70 / 20
Arus HV (L-L) / Arus LV (L-L)	A	123,86 / 433,526
Hubungan Belitan		Y-D
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	S	0,02
Impedansi	Ω (%)	120

Tabel 3. 24 Parameter rangkaian pemodelan *Inrush Current* dengan kapasitas 20 MVA

Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas Daya (3 fasa)	MVA	20
Frekuensi	Hz	50
No Load Losses	kW	12
Full Load Losses	kW	77,5
HV (L-L) / LV (L-L)	kV	70 / 22
Arus HV (L-L) / Arus LV (L-L)	A	165,15 / 525,4861
Hubungan Belitan		Y-Y
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	S	0,02
Impedansi	Ω (%)	12,5

Tabel 3. 25 Parameter rangkaian pemodelan *Inrush Current* dengan kapasitas 30 MVA

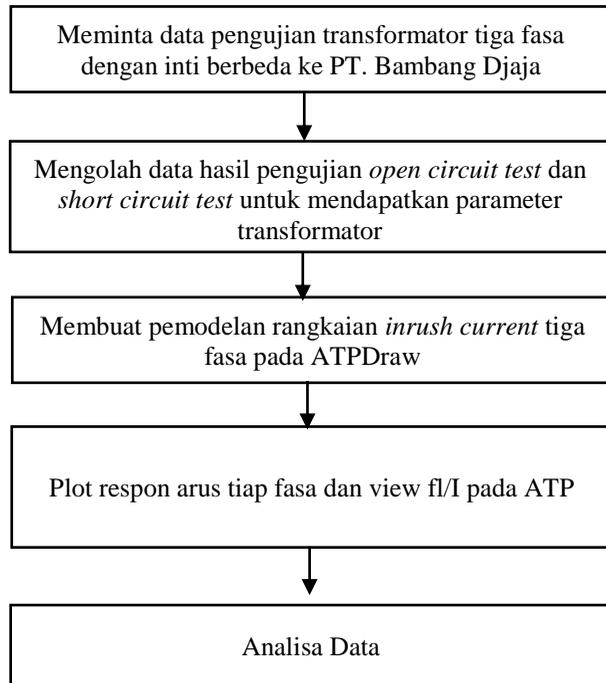
Parameter	Satuan	Nilai
Kapasitas Daya (3 fasa)	MVA	30
Frekuensi	Hz	50
No Load Losses	kW	18
Full Load Losses	kW	65
HV (L-L) / LV (L-L)	kV	70 / 22
Arus HV (L-L) / Arus LV (L-L)	A	247,73 / 788,23
Hubungan Belitan		Y-Y
<i>Switching</i> (SW1, SW 2, SW3)	S	0,02
Impedansi	Ω (%)	12,5



Gambar 3. 1 Rangkaian pemodelan *inrush current* transformator tiga fasa

3.2 Pengambilan Data

Pada studi ini, proses pengambilan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ATPDraw. ATPDraw adalah sebuah perangkat lunak yang dapat digunakan untuk mensimulasikan rangkaian untuk memunculkan nilai dari fenomena *inrush current* per satu fasa maupun tiga fasa. Kondisi pada studi ini, yaitu saat kondisi tanpa beban dengan *switching* serentak. Data yang di ambil adalah respon arus pada sisi Primer tiap fasa transformator dan nilai kurva magnetisasi fluks yang berbanding dengan arus.



Gambar 3.2 Flowchart pengambilan dan pengolahan data

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

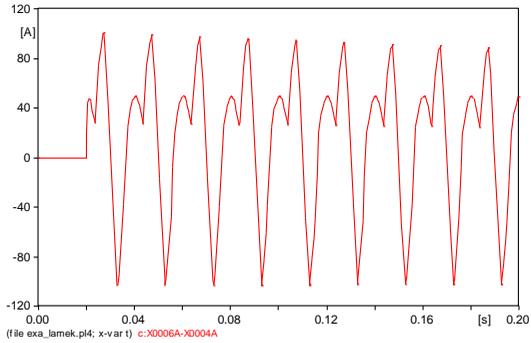
ANALISIS HASIL SIMULASI INRUSH CURRENT PADA TRANSFORMATOR TIGA FASA DENGAN INTI BERBEDA

4.1 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Beberapa Kapasitas Transformator

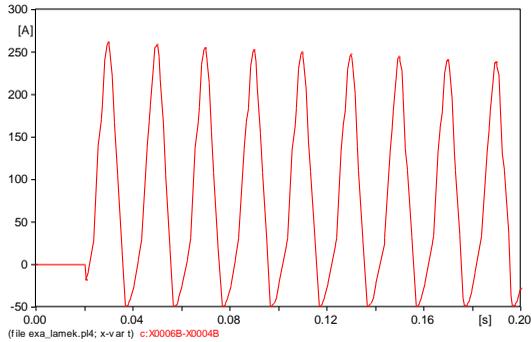
Subbab ini membahas tentang simulasi *software* ATPDraw dimana untuk menentukan karakteristik *inrush current* pada transformator menggunakan parameter yang didapat dari perusahaan Bambang Djaja dengan berbagai jenis material inti transformator dan kapasitas. Jenis material inti yang digunakan ialah M5, MOH dan ZDKH dengan beberapa kapasitas, dengan rincian 6 MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA. Setelah mendapatkan nilai *inrush current* menggunakan parameter input yang diperoleh dari Bambang Djaja dilakukannya perbandingan antar fasa pertama, kedua dan ketiga pada setiap material dan kapasitasnya sehingga memperoleh rekomendasi material mana yang sesuai dengan kapasitasnya berdasarkan nilai dari *inrush current* yang disimulasikan. Semakin kecil nilai *inrush current* semakin bagus material yang di dapat karena tidak perlu untuk mereduksi nilai *inrush currentnya*.

4.1.1 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Kapasitas 6MVA

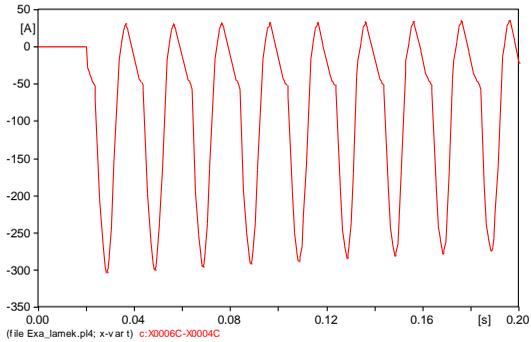
Berdasarkan rangkaian yang di simulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.2 hingga 3.4 serta tabel 3.17. Simulasi pada analisa ini menggunakan sumber 70 kV. Hasil dari kondisi simulasi menampilkan fenomena *inrush current* per fasa dimana kemudian dibandingkan per fasa dengan jenis material lainnya.



Gambar 4. 1 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material M5 kapasitas 6 MVA

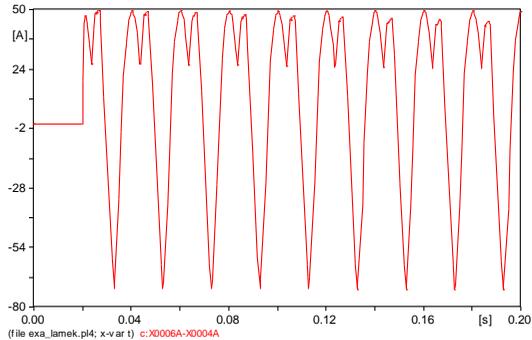


Gambar 4. 2 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material M5 kapasitas 6 MVA

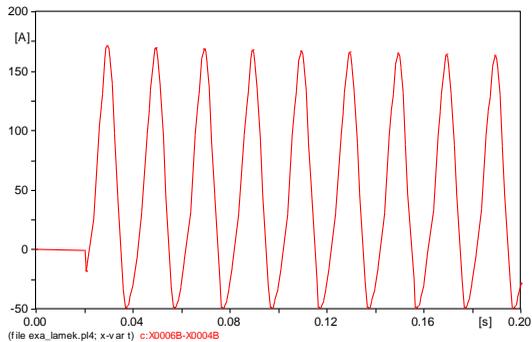


Gambar 4. 3 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material M5 kapasitas 6 MVA

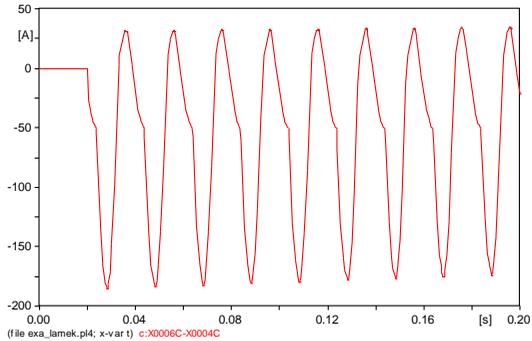
Gambar 4.1 hingga 4.3 merupakan hasil simulasi dari material M5 dimana pada fasa a dan b menunjukkan polaritas positif dan pada fasa c menunjukkan polaritas negatif dengan masing masing nilai puncaknya -103 A, 216.5 A, dan -303.48 A. Perbedaan polaritas nilai *inrush current* dikarenakan polaritas tegangan sumber pada tiap fasa saat transformator dalam kondisi di *energize* tidakalah sama.



Gambar 4. 4 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material MOH kapasitas 6 MVA

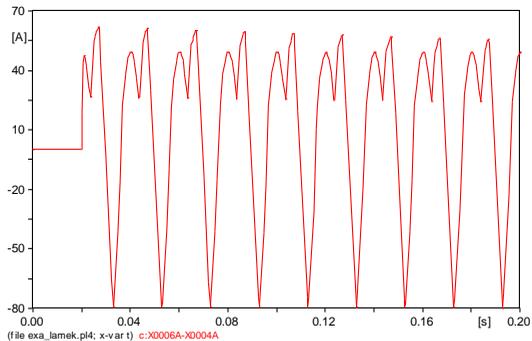


Gambar 4. 5 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material MOH kapasitas 6 MVA

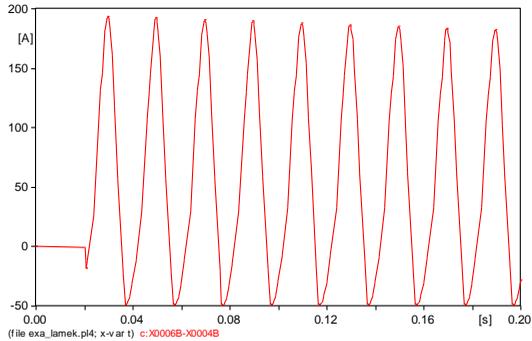


Gambar 4. 6 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material MOH kapasitas 6 MVA

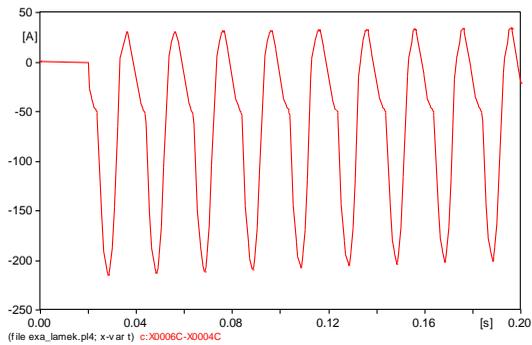
Gambar 4.4 hingga 4.6 merupakan hasil simulasi pada material MOH per fasa dengan polaritas positif pada fasa d dan e serta polaritas negatif pada fasa f dimana nilai puncak dari *inrush current*nya sebesar 71.66 A, 171.3 A, dan 185.3 A.



Gambar 4. 7 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 6 MVA



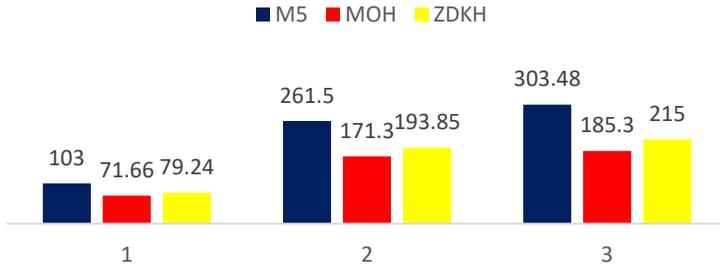
Gambar 4. 8 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material ZDKH kapasitas 6 MVA



Gambar 4. 9 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 6 MVA

Gambar 4.7 hingga 4.9 merupakan hasil simulasi pada material ZDKH perfasa dengan polarisasi positif pada fasa g dan h, polarisasi negatif pada fasa i dimana memiliki nilai *inrush current*nya sebesar 79.24 A, 193.85 A dan 215 A.

6MVA

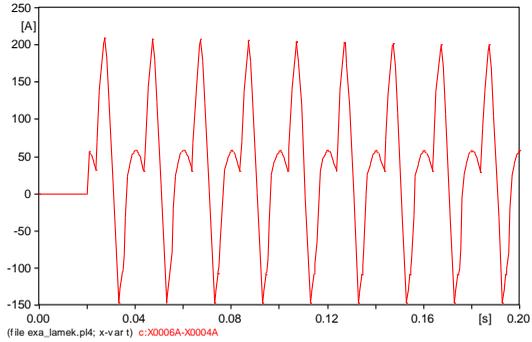


Gambar 4. 10 hasil perbandingan antar fasa material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas transformator 6MVA

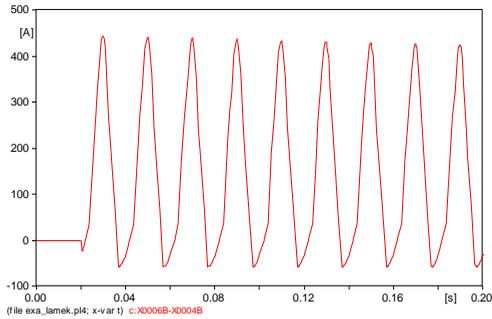
Gambar 4.10 merupakan hasil dari perbandingan antara fasa pertama kedua dan ketiga pada masing masing material, dengan nilai dari *switch* serentak sebesar 0,2s dimana dari gambar 4.10 menunjukkan bahwa nilai pada material M5 memiliki nilai *inrush current* paling besar pada ketiga fasanya dan material MOH yang memiliki nilai *inrush current* paling kecil pada ketiga fasanya, apabila dibandingkan antara material MOH dan ZDKH hanya memiliki perbedaan sebesar 0,02 pada fasa ke 3 dimana dari hasil simulasi perbedaan berartikan material MOH sebagai rekomendasi sebagai material yang sesuai untuk dipilih pada kapasitas 6 MVA.

4.1.2 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 7 MVA

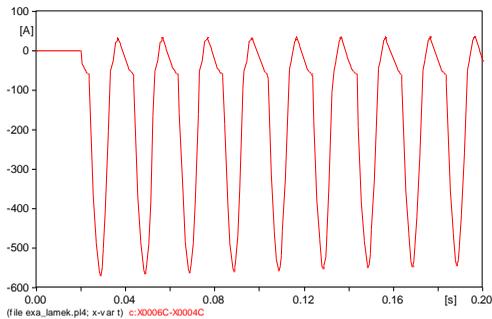
Berdasarkan rangkaian yang di simulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.5 hingga 3.7 serta tabel 3.18. Simulasi pada analisa ini menggunakan sumber 70 kV. Hasil dari kondisi simulasi menampilkan fenomena *inrush current* per fasa dimana kemudian dibandingkan per fasa dengan jenis material lainnya.



Gambar 4. 11 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material M5 kapasitas 7 MVA

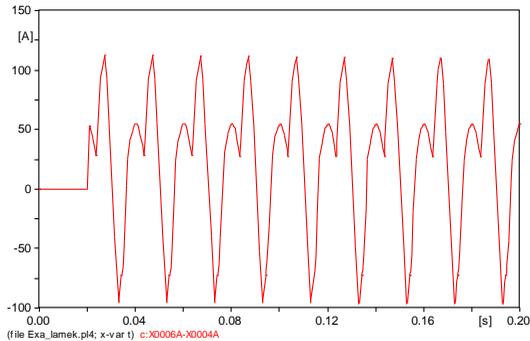


Gambar 4. 12 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material M5 kapasitas 7 MVA

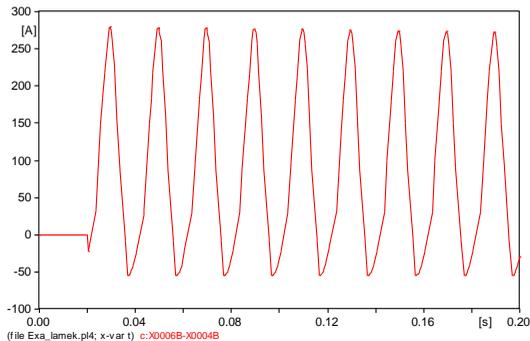


Gambar 4. 13 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material M5 kapasitas 7 MVA

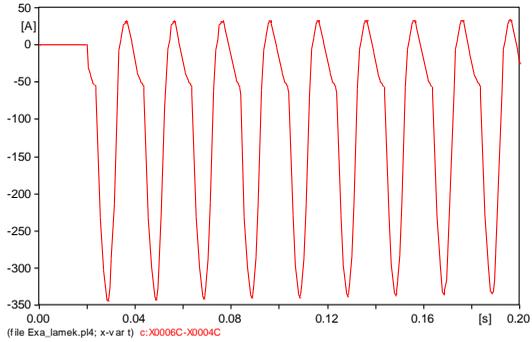
Gambar 4.11 hingga 4.13 merupakan hasil simulasi dari material M5 dimana pada fasa a dan b menunjukkan polaritas positif dan pada fasa c menunjukkan polaritas negatif dengan masing masing nilai puncaknya 209.41 A, 442.16 A, dan 568.23 A. Perbedaan polaritas nilai *inrush current* dikarenakan polaritas tegangan sumber pada tiap fasa saat transformator dalam kondisi di *energize* tidaklah sama.



Gambar 4. 14 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material MOH kapasitas 7 MVA

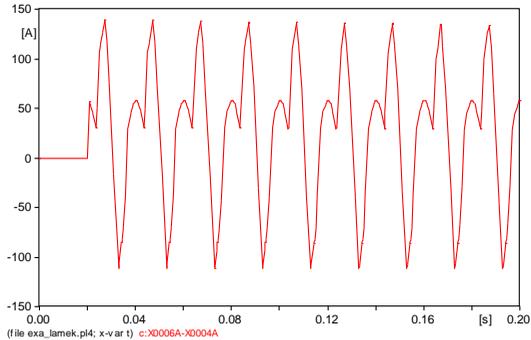


Gambar 4. 15 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material MOH kapasitas 7 MVA

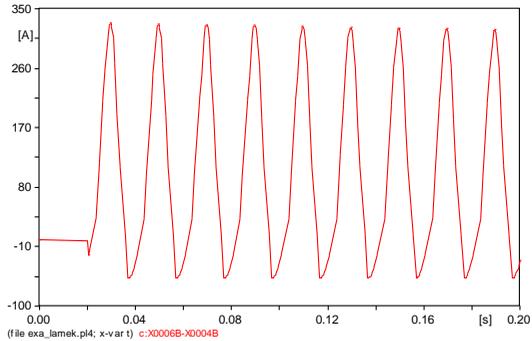


Gambar 4. 16 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material MOH kapasitas 7 MVA

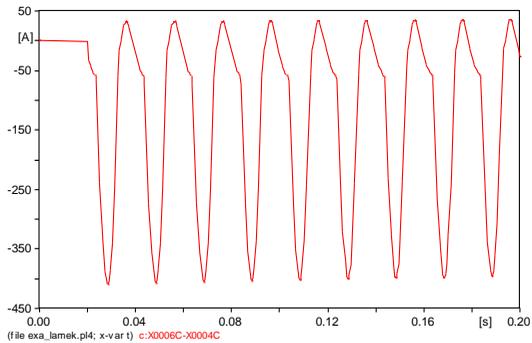
Gambar 4.14 hingga 4.16 merupakan hasil simulasi pada material MOH per fasa dengan polaritas positif pada fasa d dan e serta polaritas negatif pada fasa f dimana nilai puncak dari *inrush current*nya sebesar 112.86A, 279.3A, dan 343.85A.



Gambar 4. 17 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 7 MVA

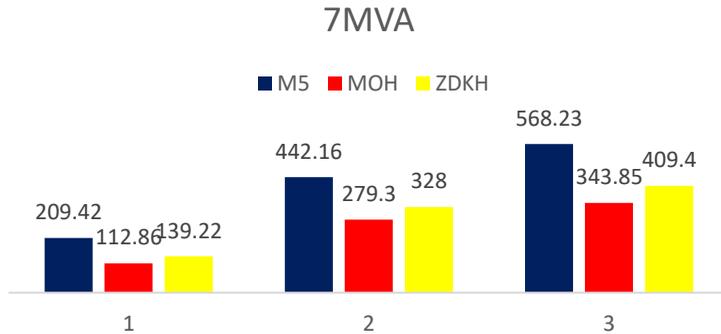


Gambar 4. 18 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material ZDKH kapasitas 7 MVA



Gambar 4. 19 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material ZDKH kapasitas 7 MVA

Gambar 4.17 hingga 4.19 merupakan hasil simulasi pada material ZDKH perfasa dengan polarisasi positif pada fasa g dan h, polarisasi negatif pada fasa i dimana memiliki nilai *inrush currentnya* sebesar 139.22A, 328A dan 409.4 A.



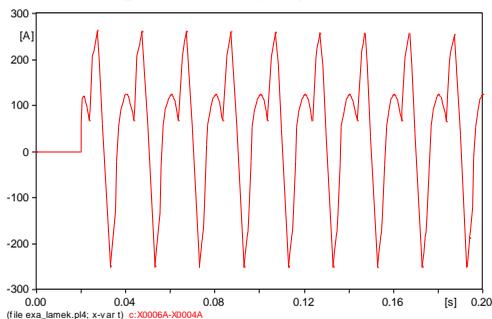
Gambar 4. 20 hasil perbandingan antar fasa material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas transformator 7MVA

Gambar 4.20 merupakan hasil dari perbandingan antara fasa pertama kedua dan ketiga pada masing masing material, dimana dari gambar 4.20 menunjukkan bahwa nilai pada material M5 memiliki nilai *inrush current* paling besar pada ketiga fasanya dan material MOH yang memiliki nilai *inrush current* paling kecil pada ketiga fasanya, apabila dibandingkan antara material M5 dengan MOH dan ZDKH. Material M5 dengan MOH memiliki selisih sebesar 96.56 A pada fasa pertama, 90.2 A pada fasa ke 2 dan 118.18 A pada fasa ke 3, dari perbandingan material M5 dengan MOH menunjukkan bahwa nilai *inrush current* yang dimiliki material M5 nilai sangat besar pada setiap fasanya, begitu juga pada saat di bandingkan dengan material ZDKH selisih antar fasanya sebesar 70.2 A fasa 1, 114.16 A fasa 2, dan 158.83 A fasa 3. Berbeda ketika material MOH dibandingkan dengan material ZDKH dimana perbedaan nilai setiap fasanya lebih besar pada material ZDKH dengan nilai *inrush current* 26.36 A fasa 1, 48.7 A fasa 2 dan 65.55 A fasa C. Sehingga dapat di simpulkan bahwa material MOH sebagai rekomendasi pemilihan material pada kapasitas 7MVA.

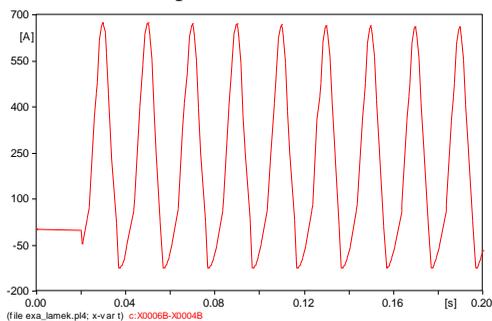
4.1.3 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 15 MVA

Berdasarkan rangkaian yang di simulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.8 hingga 3.10 serta tabel 3.19. Simulasi pada analisa ini menggunakan sumber 70 kV. Hasil dari

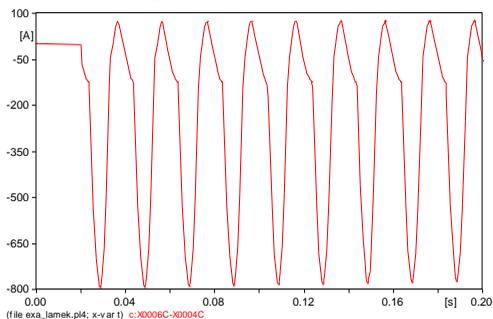
kondisi simulasi menampilkan fenomena *inrush current* per fasa dimana kemudian dibandingkan per fasa dengan jenis material lainnya.



Gambar 4. 21 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material M5 kapasitas 15 MVA

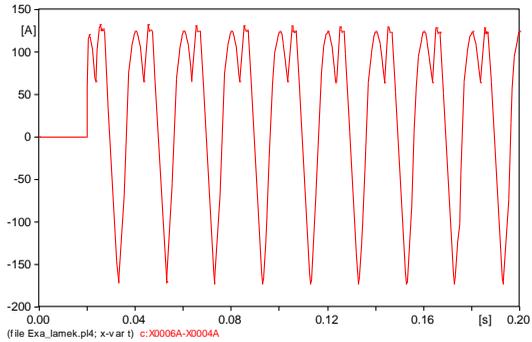


Gambar 4. 22 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material M5 kapasitas 15 MVA

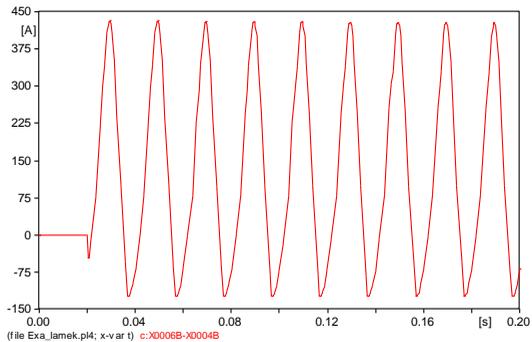


Gambar 4. 23 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material M5 kapasitas 15 MVA

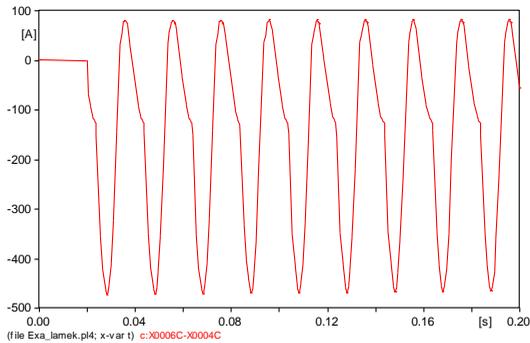
Gambar 4.21 hingga 4.23 merupakan hasil simulasi dari material M5 dimana pada fasa a dan b menunjukkan polaritas positif dan pada fasa c menunjukkan polaritas negatif dengan masing masing nilai puncaknya 262.25 A, 674.7 A, dan 795 A. Perbedaan polaritas nilai *inrush current* dikarenakan polaritas tegangan sumber pada tiap fasa saat transformator dalam kondisi di *energize* tidakalah sama.



Gambar 4. 24 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material MOH kapasitas 15 MVA

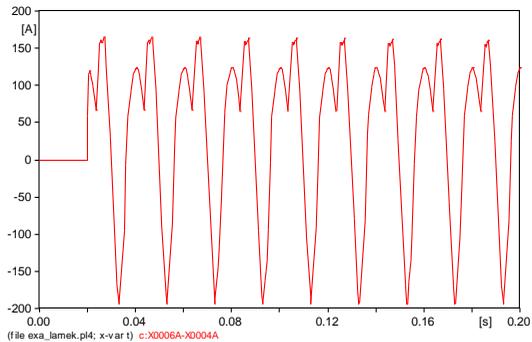


Gambar 4. 25 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material MOH kapasitas 15 MVA

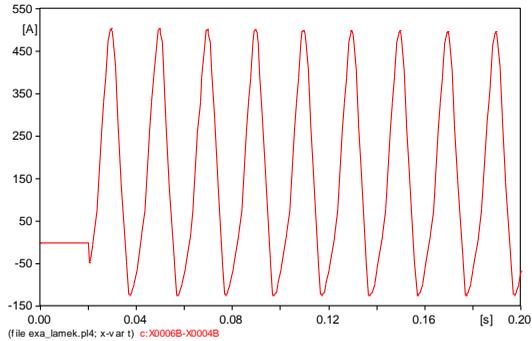


Gambar 4. 26 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material MOH kapasitas 15 MVA

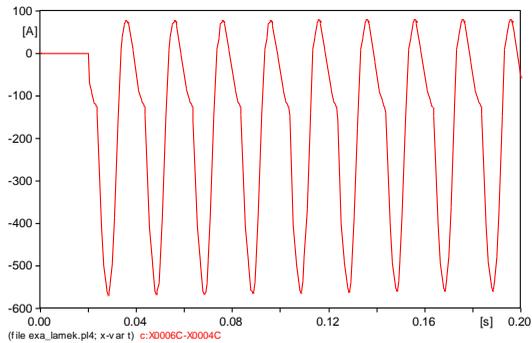
Gambar 4.24 hingga 4.26 merupakan hasil simulasi pada material MOH per fasa dengan polaritas positif pada fasa d dan e serta polaritas negatif pada fasa f, dimana nilai puncak dari *inrush current*nya sebesar 171.97 A, 431.85 A, dan 472.09 A.



Gambar 4. 27 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 15 MVA



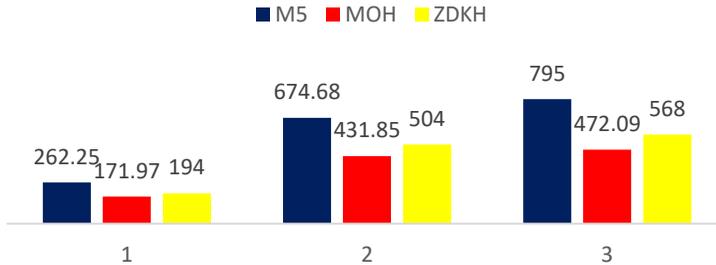
Gambar 4. 28 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material ZDKH kapasitas 15 MVA



Gambar 4. 29 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material ZDKH kapasitas 15 MVA

Gambar 4.27 hingga 4.29 merupakan hasil simulasi pada material ZDKH perfasa dengan polarisasi positif pada fasa g dan h, polarisasi negatif pada fasa i, Nilai puncak *inrush current* dalam perfasanya sebesar 194 A, 504 A dan 568 A.

15 MVA



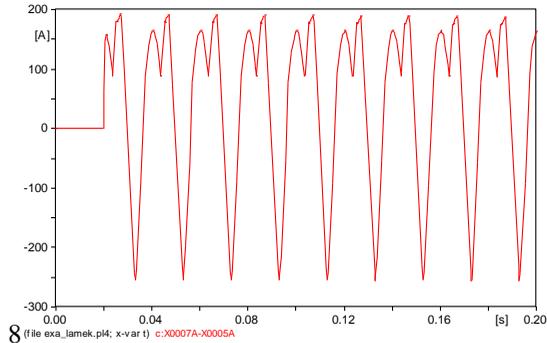
Gambar 4. 30 hasil perbandingan antar fasa material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas transformator 15MVA

Gambar 4.30 merupakan hasil dari perbandingan antara fasa pertama kedua dan ketiga pada masing masing material, dimana dari gambar 4.30 menunjukkan bahwa nilai pada material M5 memiliki nilai *inrush current* sangat besar pada ketiga fasanya dan material ZDKH yang memiliki nilai *inrush current* paling kecil pada fasa kedua dan ketiga, sedangkan material M5 memiliki nilai terkecil pada fasa pertama mungkin karena pengaruh dari ketahanan materialnya, apabila dibandingkan antara material M5 dengan MOH dan ZDKH. Material M5 dengan MOH memiliki selisih sebesar 90.3 A pada fasa pertama, 242.83 A pada fasa ke 2 dan 322.91 A pada fasa ke 3, dari perbandingan material M5 dengan MOH menunjukkan bahwa nilai *inrush current* yang dimiliki material M5 nilai sangat besar pada setiap fasanya, begitu juga pada saat di bandingkan dengan material ZDKH selisih antar fasanya sebesar 68.25 A fasa 1, 170.7 A fasa 2, dan 227 A fasa 3. Berbeda ketika material MOH dibandingkan dengan material ZDKH pada fasa pertama 22.03 A, kedua 48.7 A, dan ketiga 65.55 A. Untuk memilih material mana pada kapasitas 15 MVA yang lebih cocok yaitu pada material MOH karena memiliki rata rata terkecil dibandingkan dengan material M5 maupun ZDKH.

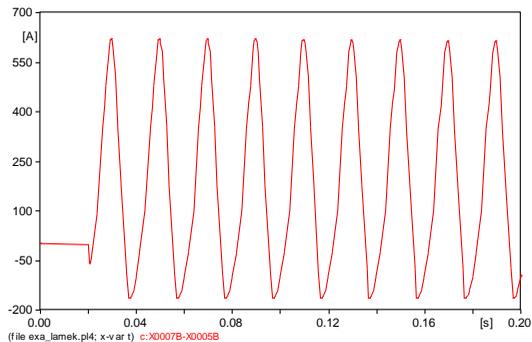
4.1.4 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 20 MVA

Berdasarkan rangkaian yang di simulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.11 hingga 3.13 serta tabel

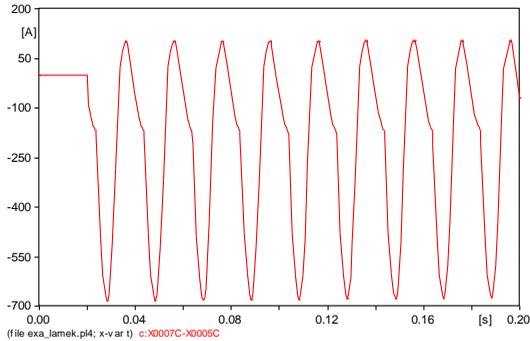
3.20. Simulasi pada analisa ini menggunakan sumber 70 kV. Hasil dari kondisi simulasi menampilkan fenomena *inrush current* per fasa dimana kemudian dibandingkan per fasa dengan jenis material lainnya, perbandingan per fasa disini untuk melihat material manakah yang memiliki nilai arus paling tinggi dan paling rendah sehingga dapat menunjukkan material inti transformator mana yang lebih sesuai berdasarkan kapasitas transformator.



Gambar 4. 31 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material M5 kapasitas 20 MVA

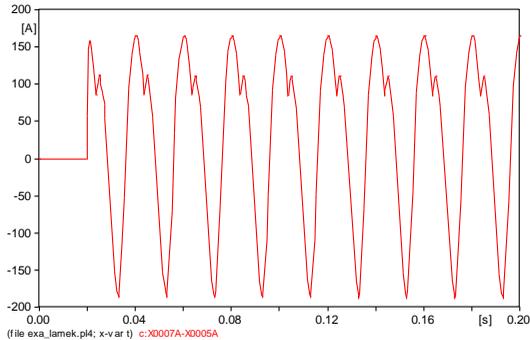


Gambar 4. 32 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material M5 kapasitas 20 MVA

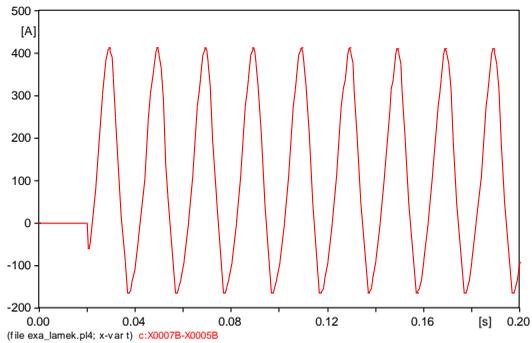


Gambar 4. 33 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material M5 kapasitas 20 MVA

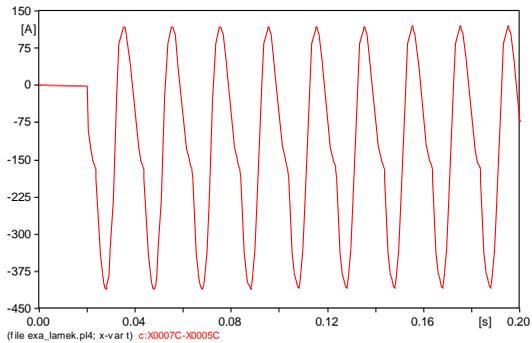
Gambar 4.31 hingga 4.33 merupakan hasil simulasi dari material M5 dimana pada fasa a dan b menunjukkan polaritas positif dan pada fasa c menunjukkan polaritas negatif dengan masing masing nilai puncaknya 254.25 A, 622.15 A, dan 684 A. Perbedaan polaritas nilai *inrush current* dikarenakan polaritas tegangan sumber pada tiap fasa saat transformator dalam kondisi di *energize* tidaklah sama.



Gambar 4. 34 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material MOH kapasitas 20 MVA

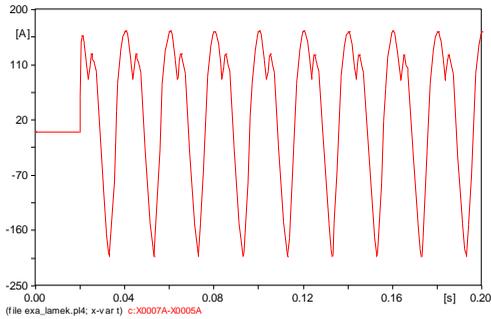


Gambar 4. 35 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material MOH kapasitas 20 MVA

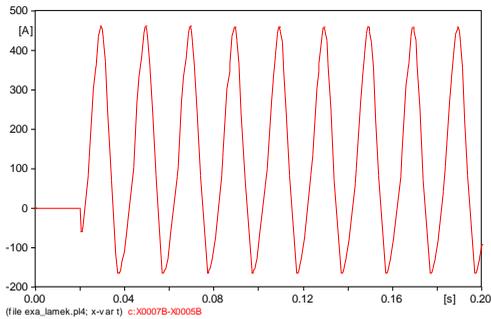


Gambar 4. 36 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material MOH kapasitas 20 MVA

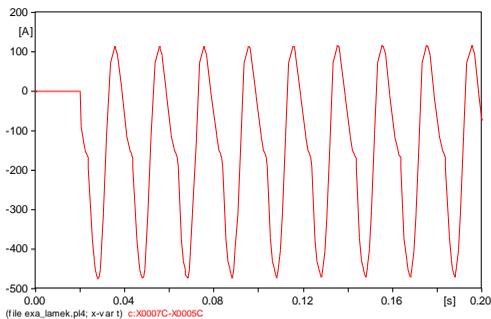
Gambar 4.34 hingga 4.36 merupakan hasil simulasi pada material MOH per fasa dengan polaritas positif pada fasa d dan e serta polaritas negatif pada fasa f, dimana nilai puncak dari *inrush currentnya* sebesar 186.76 A, 413.4 A, dan 410.73 A.



Gambar 4. 37 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 20 MVA

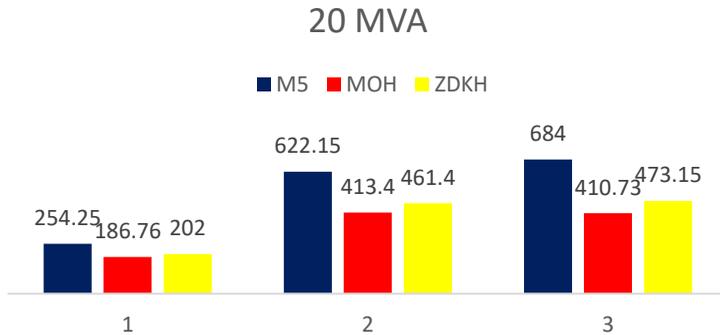


Gambar 4. 38 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material ZDKH kapasitas 20 MVA



Gambar 4. 39 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material ZDKH kapasitas 20 MVA

Gambar 4.37 hingga 4.39 merupakan hasil simulasi pada material ZDKH perfasa dengan polarisasi positif pada fasa g dan h, polarisasi negatif pada fasa i, Nilai puncak *inrush current* dalam perfasanya sebesar 202 A, 461.4 A dan 473.15 A.

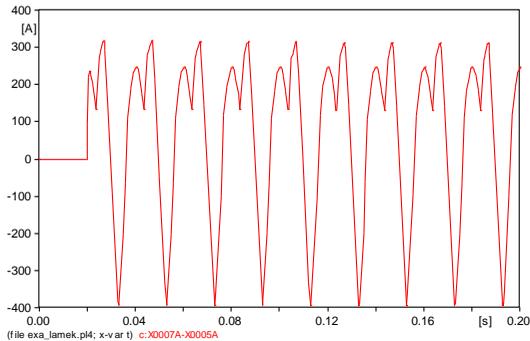


Gambar 4. 40 hasil perbandingan antar fasa material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas transformator 20 MVA

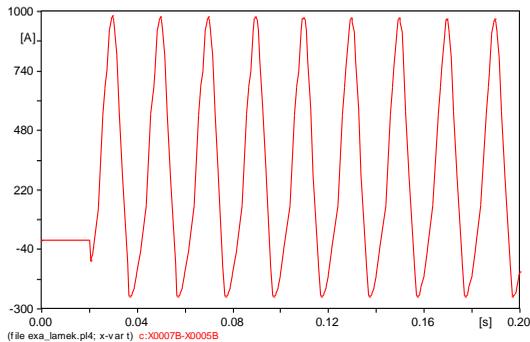
Gambar 4.40 merupakan hasil dari perbandingan antara fasa pertama kedua dan ketiga pada masing masing material, dimana dari gambar 4.40 menunjukkan bahwa nilai pada material M5 memiliki nilai *inrush current* sangat besar pada ketiga fasanya dan material MOH yang memiliki nilai *inrush current* paling kecil pada tiap fasanya, apabila dibandingkan antara material M5 dengan MOH dan ZDKH. Material M5 dengan MOH memiliki selisih sebesar 67.5 A pada fasa pertama, 208.75 A pada fasa ke 2 dan 273.3 A pada fasa ke 3, dari perbandingan material M5 dengan MOH menunjukkan bahwa nilai *inrush current* yang dimiliki material M5 nilai sangat besar pada setiap fasanya, begitu juga pada saat di bandingkan dengan material ZDKH selisih antar fasanya sebesar 52.25 A fasa 1, 160.75 A fasa 2, dan 210.85 A fasa 3. Berbeda ketika material MOH dibandingkan dengan material ZDKH pada fasa pertama 15.24 A, kedua 48 A, dan ketiga 62.42 A. Untuk memilih material mana pada kapasitas 20 MVA yang lebih cocok yaitu pada material MOH karena berdasarkan hasil simulai memiliki nilai *inrush current* kecil di bandingkan dengan material yang lain.

4.1.5 Analisa Simulasi *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 30 MVA

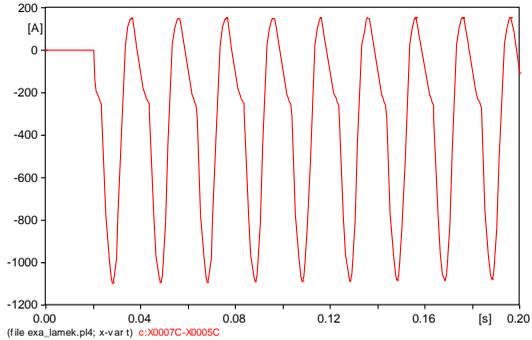
Berdasarkan rangkaian yang di simulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.14 hingga 3.16 serta tabel 3.21. Simulasi pada analisa ini menggunakan sumber 70 kV. Hasil dari kondisi simulasi menampilkan fenomena *inrush current* per fasa dimana kemudian dibandingkan per fasa dengan jenis material lainnya.



Gambar 4. 41 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material M5 kapasitas 30 MVA

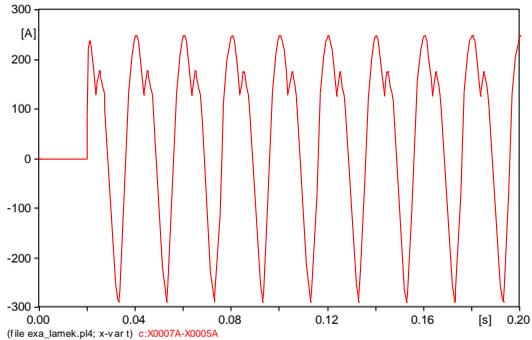


Gambar 4. 42 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material M5 kapasitas 30 MVA

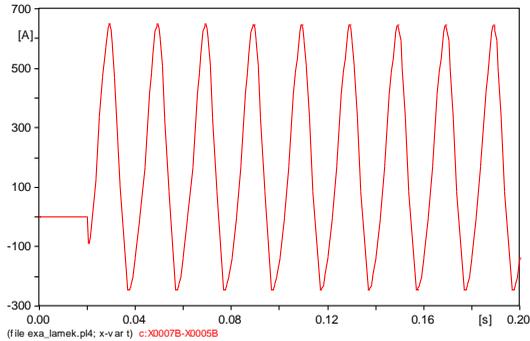


Gambar 4. 43 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material M5 kapasitas 30 MVA

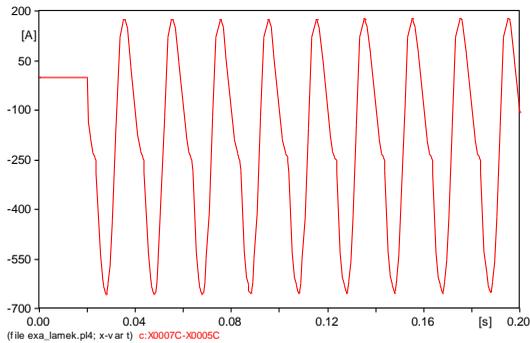
Gambar 4.41 hingga 4.43 merupakan hasil simulasi dari material M5 dimana pada fasa a dan b menunjukkan polaritas positif dan pada fasa c menunjukkan polaritas negatif dengan masing masing nilai puncaknya 393.86 A, 979 A, dan 1095.3 A. Perbedaan polaritas nilai *inrush current* dikarenakan polaritas tegangan sumber pada tiap fasa saat transformator dalam kondisi di *energize* tidaklah sama.



Gambar 4. 44 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material MOH kapasitas 30 MVA

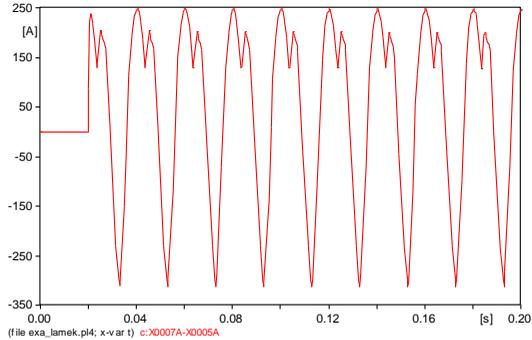


Gambar 4. 45 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material MOH kapasitas 30 MVA

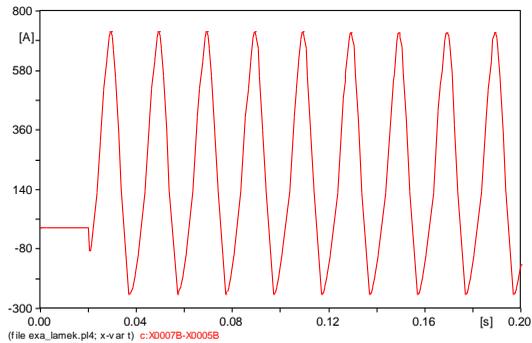


Gambar 4. 46 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material MOH kapasitas 30 MVA

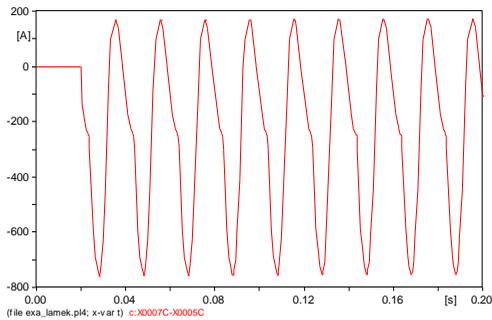
Gambar 4.44 hingga 4.46 merupakan hasil simulasi pada material MOH per fasa dengan polaritas positif pada fasa d dan e serta polaritas negatif pada fasa f, dimana nilai puncak dari *inrush current*nya sebesar 287.6 A, 979 A, dan 1095.3 A.



Gambar 4. 47 Hasil plot simulasi fasa pertama pada material ZDKH kapasitas 30 MVA

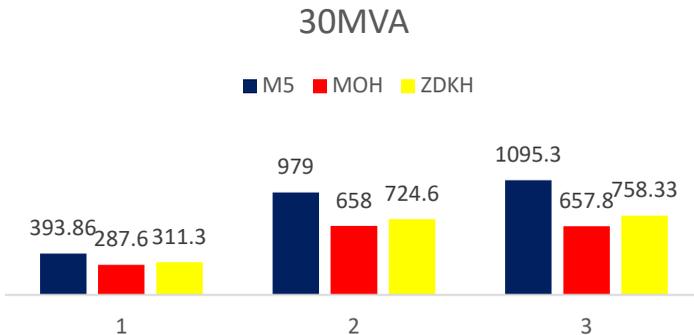


Gambar 4. 48 Hasil plot simulasi fasa kedua pada material ZDKH kapasitas 30 MVA



Gambar 4. 49 Hasil plot simulasi fasa ketiga pada material ZDKH kapasitas 30 MVA

Gambar 4.47 hingga 4.49 merupakan hasil simulasi pada material ZDKH perfasa dengan polarisasi positif pada fasa pertama dan kedua, polarisasi negatif pada fasa ketiga, Nilai puncak *inrush current* dalam perfasanya sebesar 311.3 A, 724.6 A dan 758.33 A.



Gambar 4. 50 hasil perbandingan antar fasa material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas transformator 30 MVA

Gambar 4.50 merupakan hasil dari perbandingan antara fasa pertama kedua dan ketiga pada masing masing material, dimana dari gambar 4.50 menunjukkan bahwa nilai pada material M5 memiliki nilai *inrush current* paling tinggi apabila di bandingkan dengan material MOH dan ZDKH. Dari hasil perbandingan diatas dapat dilihat bahwa material MOH memiliki nilai yang paling kecil di bandingkan material M5 dan ZDKH sehingga menunjukkan material yang paling sesuai apabila dipergunakan pada kpasitas 30 MVA.

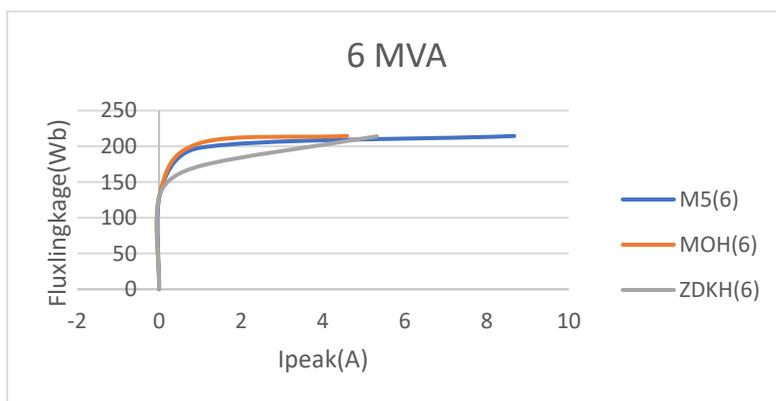
4.2 Analisa perbandingan Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada Material M5, MOH, dan ZDKH dengan Berberapa Kapasitas Transformator

Subbab ini membahas tentang respon *inrush current* hasil dari simulasi ATPDraw dengan menggunakan parameter yang diberikan oleh Bambang Djaja dimana menggunakan 3 jenis material inti transformator dengan 5 kapasitas transformator dengan rincian 6 MVA, 7MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA parameter lain yaitu dengan menggunakan *switching* serentak 0.2 s. Hasil dari simulasi menggunakan ATPDraw ini

yaitu respon arus per 3 fasa dimana kemudian nilai dari *inrush current*nya dibandingkan dengan perhitungan manual agar dapat menunjukkan keabsahan dari simulasi yang kemudian dilanjutkan dengan membandingkan material mana yang sesuai berdasarkan perbandingan nilai *inrush current*nya.

4.2.1 Perbandingan Kurva Magnetisasi pada Masing-Masing Jenis Transformator

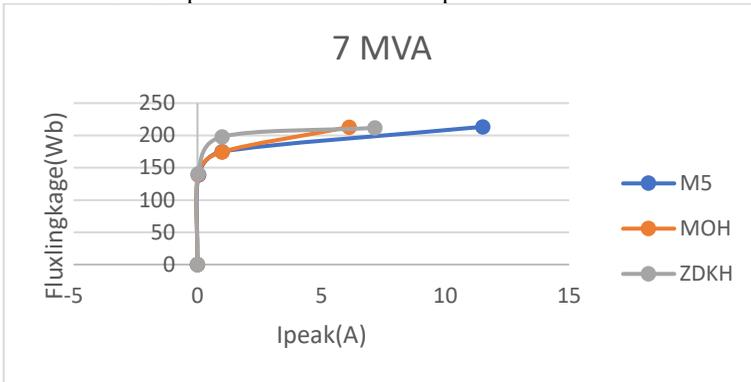
Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi berbeban maksimum pada sisi sekunder dengan menggunakan parameter pada tabel 3.1 hingga 3.25. Simulasi pada ATPDraw tersebut menghasilkan kurva magnetisasi dimana hasil dari simulasi tersebut akan mendapatkan nilai fluks yang kemudian agar dapat mendapatkan nilai kerapatan fluks magnet (**B**) yang nantinya nilai dari kerapatan fluks magnet untuk menghitung nilai dari *inrush current*.



Gambar 4.5 1 Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 6MVA

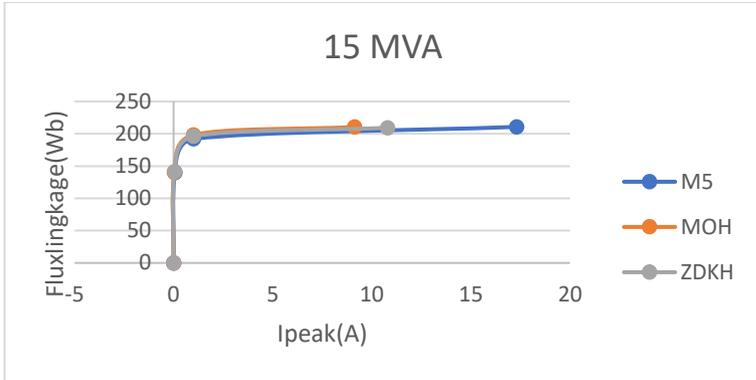
Kurva magnetisasi (gambar 4.51), menunjukkan inti transformator tipe M5 memiliki $B_{min} = 251 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 396.3 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan pada inti transformator tipe MOH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 248 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 396.5 \text{ Wb/m}^2$ dan juga pada inti transformator tipe ZDKH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 245 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 396 \text{ Wb/m}^2$. Nilai **B** pada

inti transformator tipe M5 lebih besar dibandingkan inti transformator tipe MOH dan ZDKH pada sisi minimum maupun maksimum.



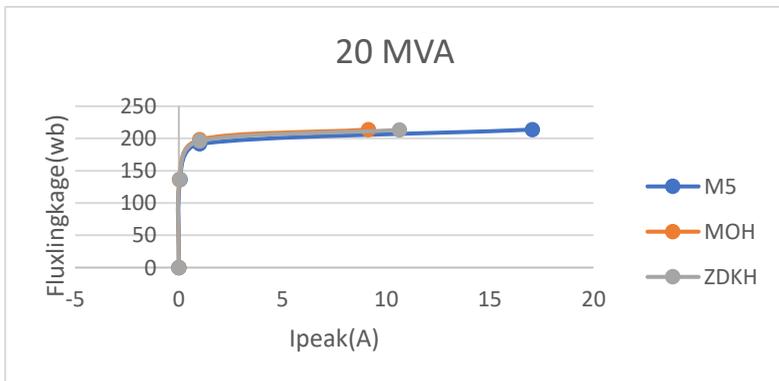
Gambar 4.5.2 Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 7MVA

Kurva magnetisasi (gambar 4.5.2), menunjukkan inti transformator tipe M5 memiliki $B_{min} = 214.25 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 356 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan pada inti transformator tipe MOH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 214.2 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 327.8 \text{ Wb/m}^2$ dan juga pada inti transformator tipe ZDKH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 216 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 325.85 \text{ Wb/m}^2$. Nilai B pada inti transformator tipe MOH lebih besar dibandingkan inti transformator tipe M5 dan ZDKH maksimum, material ZDKH memiliki nilai kerapatan fluks magnet minimum paling besar di banding dengan material M5 dan MOH.



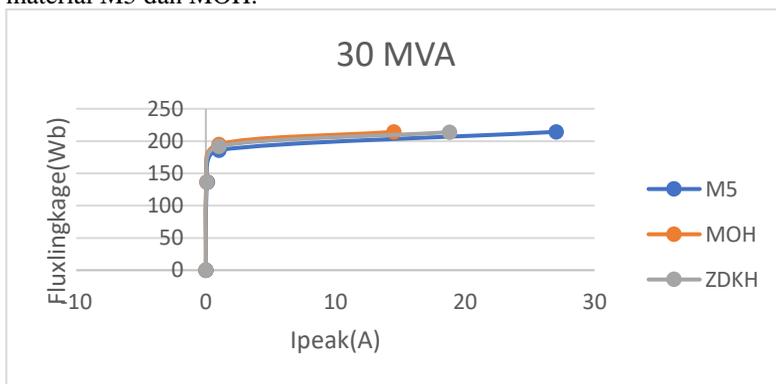
Gambar 4.5 3 Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 15 MVA

Kurva magnetisasi (gambar 4.53), menunjukkan inti transformator tipe M5 memiliki $B_{min} = 237.4 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 357.12 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan pada inti transformator tipe MOH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 234.5 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 356.78 \text{ Wb/m}^2$ dan juga pada inti transformator tipe ZDKH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 239.5 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 354.78 \text{ Wb/m}^2$. Nilai B pada inti transformator tipe MOH lebih besar dibandingkan inti transformator tipe M5 dan ZDKH maksimum, material ZDKH memiliki nilai kerapatan fluks magnet minimum paling besar di banding dengan material M5 dan ZDKH.



Gambar 4.5 4 Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 20 MVA

Kurva magnetisasi (gambar 4.54), menunjukkan inti transformator tipe M5 memiliki $B_{min} = 189,6 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 296.94 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan pada inti transformator tipe MOH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 189.4 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 296.99 \text{ Wb/m}^2$ dan juga pada inti transformator tipe ZDKH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 189.67 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 296.31 \text{ Wb/m}^2$. Nilai B pada inti transformator tipe MOH lebih besar dibandingkan inti transformator tipe M5 dan ZDKH maksimum, material ZDKH memiliki nilai kerapatan fluks magnet minimum paling besar di banding dengan material M5 dan MOH.



Gambar 4.5 5 Kurva Magnetisasi Material M5, MOH dan ZDKH 30 MVA

Kurva magnetisasi (gambar 4.55), menunjukkan inti transformator tipe M5 memiliki $B_{min} = 189.74 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 297.64 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan pada inti transformator tipe MOH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 189.6 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 297.64 \text{ Wb/m}^2$ dan juga pada inti transformator tipe ZDKH memiliki kurva magnetisasi yang diperoleh $B_{min} = 189.72 \text{ Wb/m}^2$; $B_{max} = 297.94 \text{ Wb/m}^2$. Nilai B pada inti transformator tipe ZDKH lebih besar dibandingkan inti transformator tipe M5 dan MOH maksimum, material M5 memiliki nilai kerapatan fluks magnet minimum paling besar di banding dengan material ZDKH dan MOH.

4.2.2 Analisa Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 6 MVA

Pada inti transformator jenis M5 didapatkan nilai flux awal, flux saturasi, dan fluks nominal pada gambar 4.51 sebesar 251 (Wb/m²), 314.23 (Wb/m²) dan 396.3 (Wb/m²). Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{545} \left(\frac{2 \times 251 + 314.23 - 396.3}{251} \right)$$

$$|i_{max}| = 303,9 A$$

Pada ini transformator jenis MOH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.51 sebesar 248 (Wb/m²), 314.23 (Wb/m²) dan 396.5 (Wb/m²). Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{892,6} \left(\frac{2(248)/0,541 + 314.23 - 396.5}{248} \right)$$

$$|i_{max}| = 185,0212 A$$

Pada ini transformator jenis ZDKH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.51 sebesar 245 (Wb/m²), 314.23 (Wb/m²) dan 396 (Wb/m²). Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{767,1} \left(\frac{2(245) + 314.23 - 396}{245} \right)$$

$$|i_{max}| = 215,03 A$$

4.2.3 Analisa Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 7 MVA

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.5 hingga 3.7 serta tabel 3.18. Simulasi berlangsung selama 0.5 detik dengan sumber sebesar 70kV. Hasil respon arus pada simulasi menampilkan keadaan fenomena *inrush current* dan nilai kurva magnetisasi yang berbanding dengan arus. Hasil dari kondisi simulasi dan nilai dari kurva magnetisasi dapat dijadikan pembandingan terhadap kondisi perhitungan.

Pada inti transformator jenis M5 didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.52 sebesar 214.25 (Wb/m²), 246.15(Wb/m²) dan 356 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{281,708} \left(\frac{2(214.25) + 246.15 - 356}{214.25} \right)$$

$$|i_{max}| = 522,65 A$$

Pada ini transformator jenis MOH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar sebesar 214.2 (Wb/m²), 246.15(Wb/m²) dan 327.8 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{466,113} \left(\frac{2(214.2) + 246.15 - 327.8}{214.2} \right)$$

$$|i_{max}| = 343,81 A$$

Pada ini transformator jenis ZDKH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal sebesar 216 (Wb/m²), 261.54(Wb/m²) dan 325.85 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{411,6} \left(\frac{2(216) + 261.54 - 325.85}{216 / 0,65} \right)$$

$$|i_{max}| = 409,5 \text{ A}$$

4.2.4 Analisa Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 15 MVA

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.8 hingga 3.10 serta tabel 3.19. Simulasi berlangsung selama 0.5 detik dengan sumber sebesar 70kV. Hasil respon arus pada simulasi menampilkan keadaan fenomena *inrush current* dan nilai kurva magnetisasi yang berbanding dengan arus. Hasil dari kondisi simulasi dan nilai dari kurva magnetisasi dapat dijadikan pembandingan terhadap kondisi perhitungan.

Pada inti transformator jenis M5 didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.9 sebesar 237.4 (Wb/m²), 288.14 (Wb/m²) dan 357.12 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{212,81} \left(\frac{2(237.4) + 288.14 - 357.12}{237.4} \right)$$

$$|i_{max}| = 795,203 \text{ A}$$

Pada ini transformator jenis MOH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar sebesar 234.5 (Wb/m²), 288.14 (Wb/m²) dan 356.78 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{392,22} \left(\frac{2(234.5) + 288.14 - 356.78}{234.5} \right)$$

$$|i_{max}| = 430,915 \text{ A}$$

Pada ini transformator jenis ZDKH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal sebesar 239.5 (Wb/m²), 288.14 (Wb/m²) dan 354.78 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{300,16} \left(\frac{2(239,5) + 288,14 - 354,78}{239,5} \right)$$

$$|i_{max}| = 567,85 A$$

4.2.5 Analisa Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 20 MVA

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.11 hingga 3.13 serta tabel 3.20. Simulasi berlangsung selama 0.5 detik dengan sumber sebesar 70kV. Hasil respon arus pada simulasi menampilkan keadaan fenomena *inrush current* dan nilai kurva magnetisasi yang berbandingan dengan arus. Hasil dari kondisi simulasi dan nilai dari kurva magnetisasi dapat dijadikan pembandingan terhadap kondisi perhitungan.

Pada inti transformator jenis M5 didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.54 sebesar 189,6 (Wb/m²), 236.1(Wb/m²) dan 296.94 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{242,71} \left(\frac{2(189,6) + 236,1 - 296,94}{189,6} \right)$$

$$|i_{max}| = 684,87 A$$

Pada ini transformator jenis MOH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar sebesar 189.4 (Wb/m²), 236.1 (Wb/m²) dan 296.99 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{402,062} \left(\frac{2(189,4) + 236,1 - 296,99}{236,1} \right)$$

$$|i_{max}| = 413,28 A$$

Pada ini transformator jenis ZDKH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal sebesar 189.67 (Wb/m²), 236.1 (Wb) dan 296.31 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{352,12} \left(\frac{2(189.67) + 236.1 - 296.31}{189.67} \right)$$

$$|i_{max}| = 473,033 A$$

4.2.6 Analisa Simulasi dan Perhitungan *Inrush Current* pada material M5, MOH, dan ZDKH pada kapasitas 30 MVA

Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, didapatkan hasil respon *inrush current* pada saat kondisi tanpa beban dengan menggunakan parameter pada tabel 3.14 hingga 3.16 serta tabel 3.21. Simulasi berlangsung selama 0.5 detik dengan sumber sebesar 70kV. Hasil respon arus pada simulasi menampilkan keadaan fenomena *inrush current* dan nilai kurva magnetisasi yang berbandingan dengan arus. Hasil dari kondisi simulasi dan nilai dari kurva magnetisasi dapat dijadikan pembandingan terhadap kondisi perhitungan.

Pada inti transformator jenis M5 didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.55 sebesar 189.74 (Wb/m²), 236.1 (Wb/m²) dan 297.64 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{151,5} \left(\frac{2(189.74) + 236.1 - 297.64}{189.74} \right)$$

$$|i_{max}| = 1094,931 A$$

Pada ini transformator jenis MOH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal pada gambar 4.55 sebesar 189.6 (Wb/m²), 236.1 (Wb/m²) dan 297.64 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{252} \left(\frac{2(189.6) + 236.1 - 297.64}{189.6} \right)$$

$$|i_{max}| = 658,17 \text{ A}$$

Pada ini transformator jenis ZDKH didapatkan nilai flux sisa, flux maksimal, dan fluks nominal sebesar 189.72 (Wb/m²), 236.1 (Wb/m²) dan 297.94 (Wb/m²).

Sehingga memperoleh *inrush current* sebagai berikut:

$$i_{max} = \frac{(\sqrt{2} \cdot 70000)}{213,313} \left(\frac{2(189.72) + 236.1 - 297.94}{189.72} \right)$$

$$|i_{max}| = 777,63 \text{ A}$$

4.2.7 Analisa Perbandingan Simulasi dan Perhitungan pada Material M5, MOH, dan ZDKH pada Kapasitas 6MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA

Berdasarkan perhitungan diatas dengan menggunakan nilai kerapatan fluks magnet (B) simulasi dimana memiliki perbedaan nilai (B) pada masing-masing transformator. Besar kecilnya kerapatan fluks magnet pada transformator mempengaruhi nilai arus yang dihasilkan. Semakin besar kurva saturasi, semakin besar pula *inrush* yang dihasilkan. Perbandingan *inrush current* transformator dari hasil simulasi dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 4. 1 Perbandingan nilai *inrush current* pada fasa T material M5 berbagai kapasitas

M5	Perhitungan	Simulasi
	I maks (A)	I maks (A)
6 MVA	303,89	303,48
7 MVA	522,65	568,23
15 MVA	795,20	795,00

M5	Perhitungan	Simulasi
	I maks (A)	I maks (A)
20 MVA	684,87	684,00
30 MVA	1094,93	1095,30

Pada table 4.1 menunjukkan nilai *inrush current* pada material M5 semakin tinggi kapasitas transformator semakin tinggi pula *inrush current*. Dapat dilihat dari nilai Arus maksimal pada perhitungan dan juga simulasi. Perbandingan antara perhitungan maupun simulasi nilai *inrush current* pada fasa ketiga ini memiliki selisih yang terbilang kecil pada kapasitas 6 MV, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA, akan tetapi memiliki selisih cukup besar pada kapasitas 7 MVA dengan nilai selisih sebesar 15.58 A pada hasil simulasi.

Tabel 4. 2 Perbandingan nilai inrush current pada fasa T material MOH berbagai kapasitas

MOH	Perhitungan	Simulasi
	I maks (A)	I maks (A)
6 MVA	185,02	185,30
7 MVA	343,81	568,23
15 MVA	430,91	472,09
20 MVA	413,28	410,73
30 MVA	658,17	657,80

Pada table 4.1 menunjukkan nilai *inrush current* pada material M5 semakin tinggi kapasitas transformator semakin tinggi pula *inrush current*. Dapat dilihat dari nilai Arus maksimal pada perhitungan dan juga simulasi. Perbandingan antara perhitungan maupun simulasi nilai *inrush current* pada fasa ketiga ini memiliki selisih yang terbilang kecil pada kapasitas 6 MV, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA, akan tetapi selisih tersebut masih batas toleransi.

Tabel 4. 3 Perbandingan nilai inrush current pada fasa T material MOH berbagai kapasitas.

ZDKH	Perhitungan	Simulasi
	I maks (A)	I maks (A)
6 MVA	215,03	215,00
7 MVA	409,47	409,40
15 MVA	567,85	568,00
20 MVA	473,03	473,15
30 MVA	777,63	758,33

Pada table 4.1 menunjukkan nilai *inrush current* pada material M5 semakin tinggi kapasitas transformator semakin tinggi pula *inrush current*. Dapat dilihat dari nilai Arus maksimal pada perhitungan dan juga simulasi. Perbandingan antara perhitungan maupun simulasi nilai *inrush current* pada fasa ketiga ini memiliki selisih yang terbilang kecil pada kapasitas 6 MV, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA, akan tetapi memiliki selisih cukup besar pada kapasitas 30 MVA dengan nilai selisih sebesar 19.3 A pada hasil perhitungan yang dibandingkan dengan hasil simulasi..

4.3 Analisa perbandingan Simulasi dan Perhitungan Tegangan dan Arus pada Material M5, MOH, dan ZDKH dengan Berberapa Kapasitas Transformator

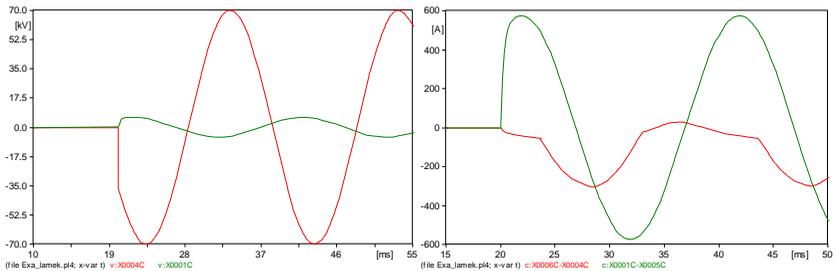
Berdasarkan rangkaian yang disimulasikan pada gambar 3.1, dapat didapatkan hasil respon tegangan dan arus saat kondisi normal. Pada saat kondisi normal, dengan menggunakan *switching* serempak 0.2 sekon dengan beban maksimal pada output sisi skunder pada tegangan sumber 70 kV pada setiap kapasitas dan jenis materialnya. Hasil dari kondisi normal dapat sebagai pembanding nilai tegangan maupun arus pada fasa ketiga.

Sumber tegangan yang digunakan adalah tegangan bolak-balik (AC) *line-ground* ($V_{L-L-peak}$) 70 kV, 50 Hz. Sehingga nilai tegangan *line-ground* ($V_{L-Npeak}$) pada tiap fasa adalah:

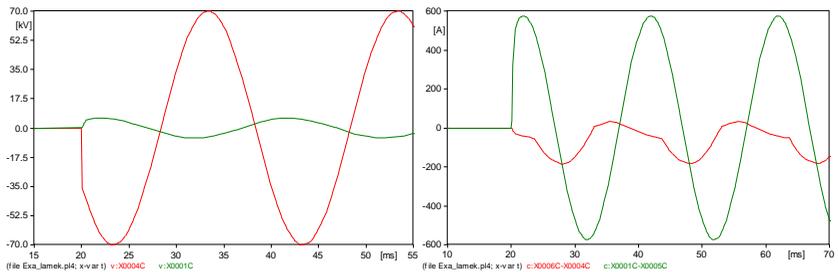
$$V_{L-Npeak} = V_{L-Lpeak}$$

Sehingga tegangan puncak pada sisi primer maupun skunder nilainya sesuai dengan rating dari transformator. Dapat dilihat pada gambar

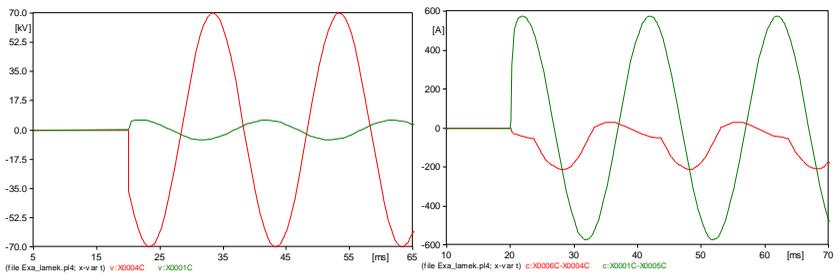
berikut dimana menunjukkan nilai yang sama pada fasa T pada sisi primer maupun sekunder:



Gambar 4.5 6 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 6 MVA



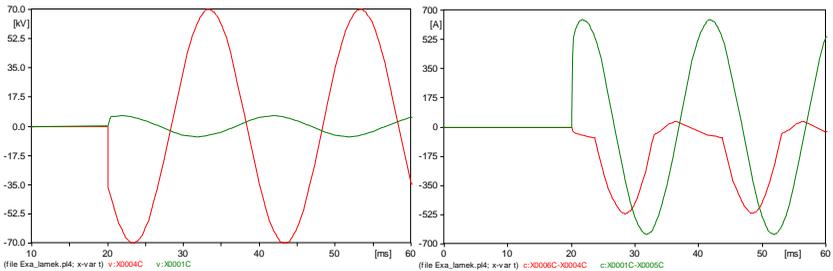
Gambar 4.5 7 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 6 MVA



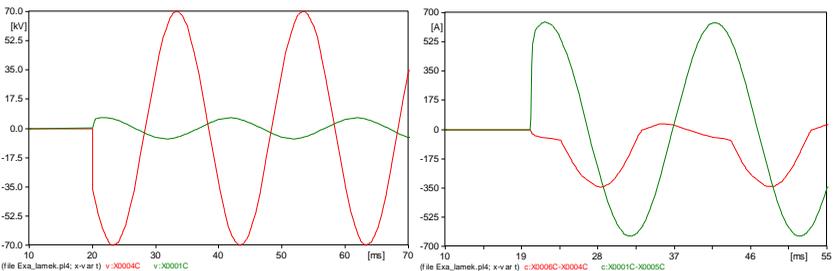
Gambar 4.5 8 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 6 MVA

Pada gambar 4.56 dan 4.58 menunjukkan hasil plotting dari simulasi ATPDraw pada sisi primer dan sekunder material M5 dengan kapasitas 6MVA dimana menunjukkan bahwa sesuai dengan tegangan rating pada sisi primer maupun sekunder dimana memiliki nilai 70 kV pada sisi Primer dan 6 kV pada sisi sekunder. Dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan pada primer maupun sekunder transformator sama dengan tegangan yang terdapat pada nameplate. Dilihat dari hasil plotting Arus pada sisi sekunder memiliki besaran arus terbilang sama akan tetapi pada sisi primer memiliki perbedaan, perbedaan tersebut dapat disimpulkan bahwa terjadi *inrush current* pada masing masing material.

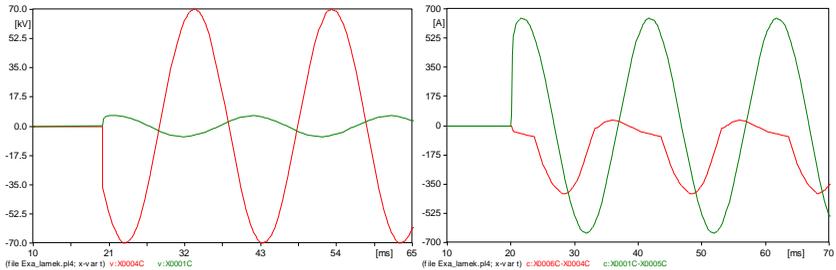
Gambar berikut merupakan hasil plotting pada fasa T pada material M5, MOH dan ZDKH dengan kapasitas 7 MVA dimana plotting tersebut terdapat nilai dari Tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder.



Gambar 4.5 10 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan sekunder pada fasa T material M5 kapasitas 7 MVA

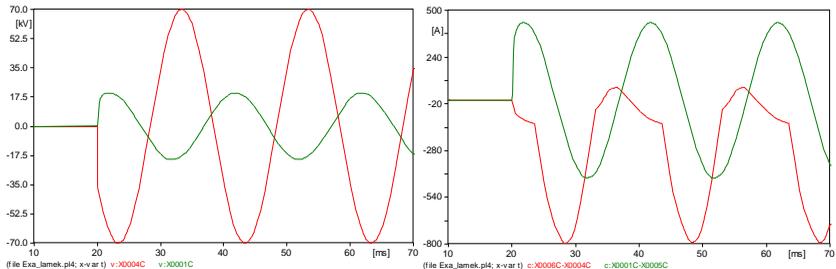


Gambar 4.5 9 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan sekunder pada fasa T material MOH kapasitas 7 MVA

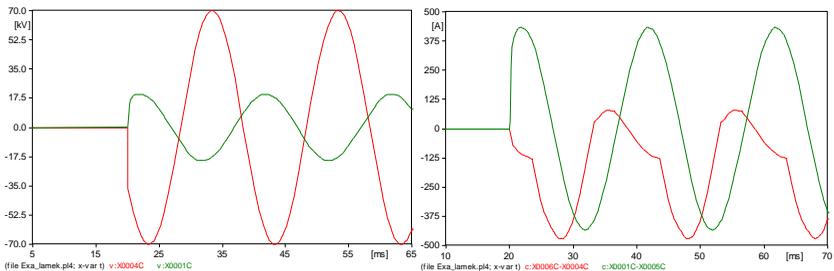


Gambar 4.5 11 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 7 MVA

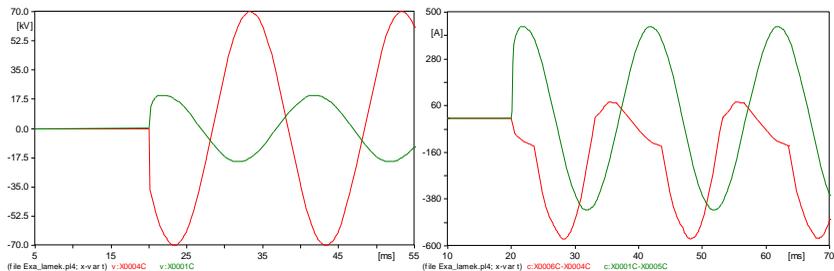
Pada gambar 4.5 9 dan 4.5 11 menunjukkan hasil plotting dari simulasi ATPDraw 3 fasa pada sisi primer dan skunder material M5, MOH dan ZDKH 7MVA dimana tegangan sisi primer maupun menunjukkan bahwa sesuai dengan tegangan rating pada sisi primer maupun sekunder dimana memiliki nilai 70 kV pada sisi Primer dan 6.3 kV pada sisi sekunder. Pada Sisi primer arus terjadi perbedaan dengan nilai kapasitas yang seharusnya, dimana menunjukkan bahwa pada sisi primer terjadi saturasi yang biasanya disebut dengan inrush current. Sedangkan pada sisi skunder arus tidak terjadi perbedaan yang jauh apabila dibandingkan dengan arus nominal.



Gambar 4.5 12 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 15 MVA

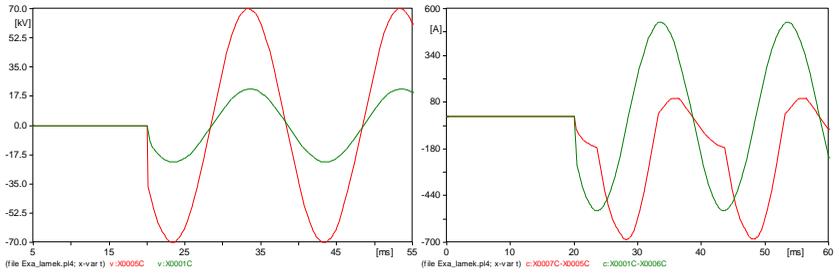


Gambar 4.5 13 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 15 MVA

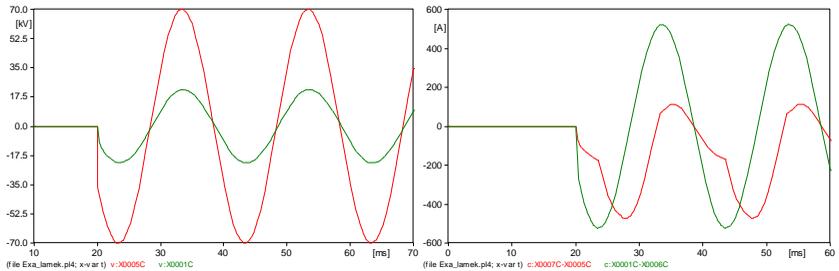


Gambar 4.5 14 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 15 MVA

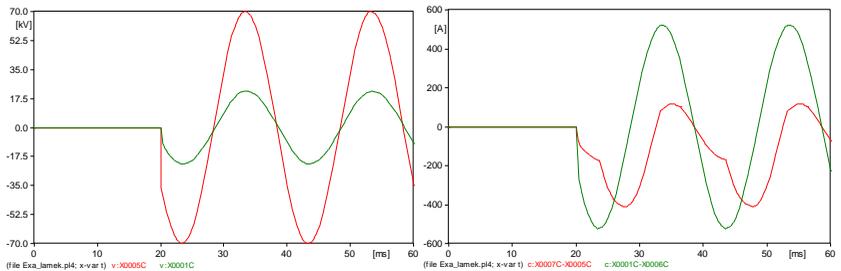
Pada gambar 4.5 12 dan 4.5 14 menunjukkan hasil plotting dari simulasi ATPDraw 3 fasa pada sisi primer dan skunder material M5, MOH dan ZDKH 15 MVA dimana tegangan sisi primer maupun menunjukkan bahwa sesuai dengan tegangan rating pada sisi primer maupun sekunder dimana memiliki nilai 70 kV pada sisi Primer dan 20 kV pada sisi sekunder. Pada Sisi primer arus terjadi perbedaan dengan arus nominal, dimana menunjukkan bahwa pada sisi primer terjadi saturasi yang biasanya disebut dengan *inrush current*. Sedangkan pada sisi skunder arus tidak terjadi perbedaan yang jauh apabila dibandingkan dengan arus nominal.



Gambar 4.5 16 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 20 MVA

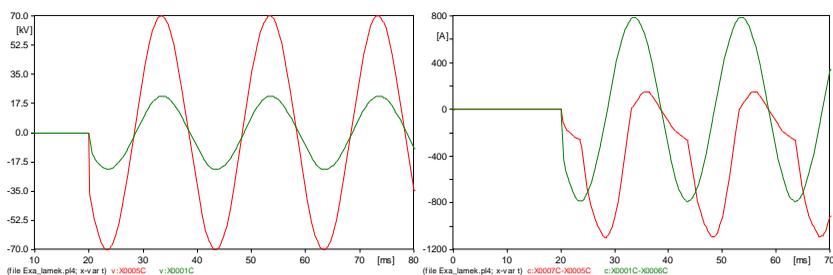


Gambar 4.5 17 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 20 MVA

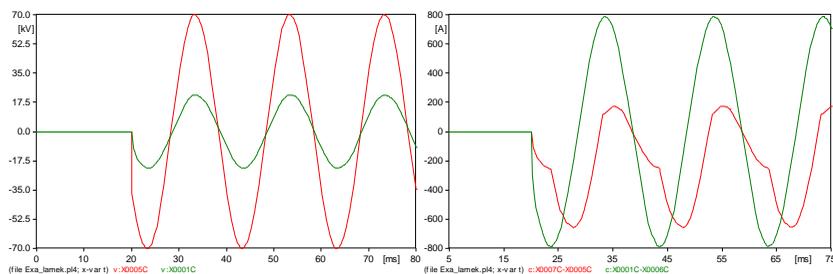


Gambar 4.5 15 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 20 MVA

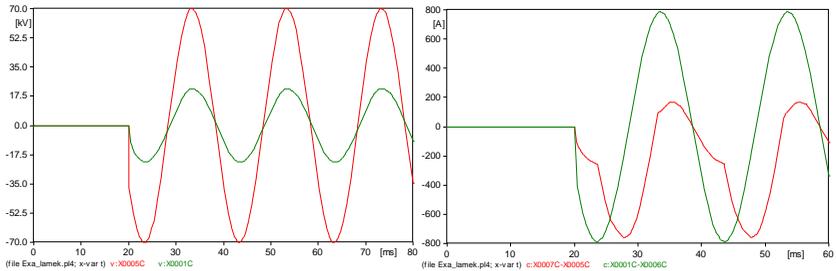
Pada gambar 4.5 15 dan 4.5 17 menunjukkan hasil plotting dari simulasi ATPDraw 3 fasa pada sisi primer dan skunder material M5, MOH dan ZDKH 15 MVA dimana tegangan sisi primer maupun menunjukkan bahwa sesuai dengan tegangan kV rating pada sisi primer maupun sekunder dimana memiliki nilai 70 kV pada sisi Primer dan 22 kV pada sisi sekunder. Pada Sisi primer arus terjadi perbedaan dengan arus nominal, dimana menunjukkan bahwa pada sisi primer terjadi saturasi yang biasanya disebut dengan *inrush current*. Sedangkan pada sisi skunder arus tidak terjadi perbedaan yang jauh apabila dibandingkan dengan arus nominal.



Gambar 4.5 18 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material M5 kapasitas 20 MVA



Gambar 4.5 19 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material MOH kapasitas 20 MVA



Gambar 4.5 20 Hasil plotting Tegangan dan Arus sisi primer dan skunder pada fasa T material ZDKH kapasitas 30 MVA

Pada gambar 4.56 18 dan 4.56 20 menunjukkan hasil plotting dari simulasi ATPDraw 3 fasa pada sisi primer dan skunder material M5, MOH dan ZDKH 15 MVA dimana menunjukkan bahwa sesuai dengan tegangan rating pada sisi primer maupun sekunder dimana memiliki nilai 70 kV pada sisi Primer dan 22 kV pada sisi sekunder, sedangkan Arus pada sisi primer memiliki perbedaan apabila dibandingkan dengan nilai arus nominal dimana menunjukkan bahwa sisi primer terjadi *inrush current* sedangkan pada sisi skunder bernilai sesuai dengan kapasitasnya.

Tabel 4. 4 Tabel perbandingan nilai arus material M5, MOH dan ZDKH

	Simulasi				Perhitungan	
	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Sisi Sekunder (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Sisi Sekunder (A)
	M5	MOH	ZDKH			
6 MVA	303,89	185,02	215,03	577,8	49,55	578,04
7 MVA	522,65	343,81	409,47	624,4	57,8	642,3
15 MVA	795,20	430,91	567,85	432,2	123,87	433,53

	Simulasi				Perhitungan	
	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Sisi Sekunder (A)	Arus Nominal Primer (A)	Arus Nominal Sisi Sekunder (A)
	M5	MOH	ZDKH			
20 MVA	684,87	413,28	473,03	524,3	165,15	525,49
30 MVA	1094,93	658,17	777,63	789,3	247,73	788,23

Dari hasil perbandingan pada table 4.4 diatas menunjukkan bahwa pada sisi primer material M5, MOH dan ZDKH dengan kapasitas 6 MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA, pada simulasi memiliki nilai lebih tinggi hingga lebih dari 3 kali arus nominal pada perhitugn dimana dari hasil diatas dapat menunjukan bahwa pada sisi primer simulasi terjadi *inrush current* ketika transformator diberikan tegangan untuk pertama kalinya. Sedangkan pada sisi sekunder pada simulasi maupun perhitungan memiliki selisih sedikit yang termasuk dalam batas toleransi.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai perbedaan jenis material inti terhadap kapasitas transformator berdasarkan *inrush current*, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Respon *inrush current* dipengaruhi oleh karakteristik material inti transformator.
2. Pada perbandingan respon *inrush current* dengan inti yang berbeda, material MOH memiliki nilai paling kecil pada kapasitas transformator 6 MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA.
3. Pada perbandingan respon *inrush current* dengan inti yang berbeda, material ZDKH memiliki nilai paling kecil kedua pada kapasitas transformator 6 MVA, 7 MVA, 15 MVA, 20 MVA dan 30 MVA.
4. Material M5 memiliki karakteristik *inrush current* tertinggi pada setiap kapasitas transformator.
5. Karakteristik sebuah material sangat berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai *inrush current* seperti pada material MOH pada penelitian ini.
6. Semakin tinggi kapasitas semakin tinggi nilai *inrush current*.
7. *Inrush current* memiliki nilai lebih dari 3 kali arus nominal.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari tugas akhir ini untuk studi di masa yang akan datang adalah berdasarkan hasil simulasi dan hasil perhitungan terjadi perbedaan besar, dari perbedaan yang terjadi disarankan untuk mengupdate (memperbarui) data pengujian perusahaan berdasarkan data riil yang ada.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Wojtasiewicz *et al.*, “Inrush Current of Superconducting Transformer,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 5500304–5500304, Jun. 2013.
- [2] M. Steurer and K. Frohlich, “The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 17, no. 1, pp. 155–160, Jan. 2002.
- [3] N. Chiesa, B. A. Mork, and H. Høidalen, *Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis*, vol. 25. 2010.
- [4] J. R. M. S. Souza C. S. Pereira Filho and A. De Conti, “Evaluation of the Effect of Advanced Core Settings of the Hybrid Transformer Model on the Harmonic Content of Inrush Currents.”
- [5] Y. Wicaksono, “ANALISIS PENGARUH MATERIAL DAN CARA PEMOTONGAN INTI TRANSFORMATOR TERHADAP KERAPATAN FLUKS LISTRIK DAN ARUS INRUSH,” vol. 7, p. 5, 2015.
- [6] J. H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*, vol. 20. 2004.
- [7] S. J. Chapman, *Electric machinery fundamentals*, 4th ed., internat. ed. Boston, Mass.: McGraw-Hill, 2005.
- [8] I. M. Yulistya Negara, D. Fahmi, D. A. Asfani, and N. Arif Kurniawan, *Effect of core cutting topology on inrush current of three-phases transformer*. 2016.
- [9] N. Chiesa, A. Avenda, H. Høidalen, B. A. Mork, D. Ishchenko, and A. P. Kunze, *On the ringdown transient of transformers*. 2007.
- [10] T. R. Specht, *Transformer Magnetizing Inrush Current*, vol. 70. 1951.
- [11] J. E. Holcomb, “Distribution Transformer Magnetizing Inrush Current,” *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 80, no. 3, pp. 697–702, Apr. 1961.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

RIWAYAT HIDUP



Muhammad Kaymal Akbar, lahir di Malang pada tanggal 16 April 1996. Anak kedua dari empat bersaudara. Selama kuliah penulis aktif dalam kegiatan pecinta alam pada DIVISI KALPATARU Elektro ITS sebagai ketua bidang Pecinta Alam pada tahun 2015-2016 dan Wakil DIVISI eksternal pada periode berikutnya. Selain itu, penulis juga aktif pada kegiatan organisasi di Departemen Teknik Elektro yaitu sebagai staff lingkaran kampus (LINGPUS) HIMATEKTRO Super dan panitia perlengkapan event yang diselenggarakan Elektro yaitu BARONAS dan ELECTRA V, sebagai LO region Malang pada ELECTRA IV Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu:

1. SDN 01 Kalipang, Sutojayan Blitar
2. SMPN 10 Malang
3. SMAN 10 Malang

Penulis dapat dihubungi pada email: Kaymalakbar@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)