

TUGAS AKHIR

STUDI EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO)

*Diajukan Untuk Melengkapi Tugas-Tugas dan Sebagai Persyaratan Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik (S.T) Pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Oleh :

GIO ISNANDIO

NPM : 1207220026



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2017**

ABSTRAK

Efisiensi adalah perbandingan yang terbaik antara input (masukan) dan output (hasil antara keuntungan dengan sumber-sumber yang dipergunakan), seperti halnya juga hasil optimal yang dicapai dengan penggunaan sumber yang terbatas. Dengan kata lain hubungan antara apa yang telah diselesaikan. Besar kecilnya efisiensi yang dihasilkan oleh transformator dapat dipengaruhi oleh besar kecilnya pembebanan, dan juga dipengaruhi oleh rugi-rugi total yang berupa rugi inti dan rugi tembaga, yang terdapat pada transformator. Besar rugi-rugi transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO) yaitu tertinggi siang TD1 139,09 kW, tertinggi malam TD1 142,14 kW, terendah siang TD1 92,35 kW, terendah malam TD1 92,72 kW, tertinggi siang TD3 120,88 kW, tertinggi malam 123,20 kW, terendah siang 81,70 kW, dan terendah malam 82,76 kW. Besar efisiensi transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO) yaitu tertinggi siang TD1 99,62%, tertinggi malam TD1 99,62%, terendah siang TD1 99,64%, terendah malam TD1 99,65%, tertinggi siang TD3 99,66%, tertinggi malam 99,66%, terendah siang 99,70%, dan terendah malam 99,70%.

Kata Kunci : Gardu Induk, Trafo, Rugi-rugi, Efisiensi

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum wr.wb

Puji syukur kehadiran ALLAH SWT atas rahmat dan karunianya yang telah menjadikan kita sebagai manusia yang beriman dan insya ALLAH berguna bagi semesta alam. Shalawat berangkaikan salam kita panjatkan kepada junjungan kita Nabi besar Muhammad.SAW yang mana beliau adalah suri tauladan bagi kita semua dan telah membawa kita dari zaman kebodohan menuju zaman yang penuh dengan ilmu pengetahuan.

Tulisan ini dibuat sebagai tugas akhir untuk memenuhi syarat dalam meraih gelar kesarjanaan pada Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Adapun judul tugas akhir ini adalah “***Studi Efisiensi Transformator Daya Di Gardu Induk Payageli PT. PLN (PERSERO)***”.

Selesainya penulisan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Ayahanda dan Ibunda serta Abangda dan Adinda tersayang, yang dengan cinta kasih dan sayang setulus jiwa mengasuh, mendidik dan membimbing dengan segenap ketulusan hati tanpa mengenal kata lelah sehingga penulis bisa seperti saat ini.
2. Bapak Rahmatullah, S.T, M.Sc. Selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Ibu Rohana, S.T, M.T. Selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

4. Bapak Zulfikar, S.T, M.T. Selaku Sekretaris Program Studi Teknik Elektro.
5. Bapak Ir. Zul Arsil Siregar Selaku Dosen Pembimbing I dalam penyusunan tugas akhir ini.
6. Bapak Muhammad Syafri, S.T.,M.T. Selaku Dosen Pembimbing II dalam penyusunan tugas akhir ini.
7. Bapak dan Ibu Dosen di Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Karyawan Biro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Teman-teman sejawat dan seperjuangan Fakultas Teknik, khususnya Program Studi Teknik Elektro angkatan 2012 yang selalu memberi dukungan dan motivasi kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa tulisan ini masih jauh dari kata sempurna, hal ini disebabkan keterbatasan kemampuan penulis, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan kritik & saran yang membangun dari segenap pihak.

Akhir kata penulis mengharapkan semoga tulisan ini dapat menambah dan memperkaya lembar khazanah pengetahuan bagi para pembaca sekalian dan khususnya bagi penulis sendiri. Sebelum dan sesudahnya penulis mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alakum wr.wb

Medan, 11 April 2016

Penulis

Gio Isnandio

1207220026

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	ii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	viii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penulisan.....	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Manfaat	3
1.6. Metode Penulisan.....	3
1.7. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Landasan Teori.....	5
2.2. Tinjauan Pustaka Relevan.....	6
2.3. Konstruksi Transformator	8
2.3.1. Inti Besi.....	10
2.3.2. Kumparan Transformator (<i>Winding</i>)	10
2.3.3. Minyak Transformator	11
2.3.4. <i>Bushing</i>	12
2.3.5. Tangki Konservator	13
2.3.6. Pendingin	14

2.3.7. Tap Changer (On Load Tap Changer)	15
2.3.8. NGR (Neutral Grounding Resistant)	17
2.3.9. Peralatan Indikator	18
2.3.9.1. Termometer	18
2.3.9.2. Peralatan Proteksi Transformator	19
2.4. Rangkaian Transformator Tanpa Beban	19
2.5. Rangkaian Transformator Dengan Beban	20
2.6. Rugi-rugi Transformator	21
2.6.1. Rugi Tembaga (P_{cu})	22
2.6.2. Rugi Besi (P_i)	23
2.7. Efisiensi Transformator	24
2.8. Transformator Tiga Fasa	25
2.8.1. Hubungan belitan transformator tiga fasa	26
2.8.1.1. Hubungan Bintang	26
2.8.1.2. Hubungan Delta	27
2.8.1.3. Hubungan Zig-Zag	28

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian	29
3.2. Peralatan Penelitian	29
3.3. Data Penelitian	30
3.3.1. Transformator Daya di GI Payageli	30
3.3.2. Data Pembebanan Transformator Daya 1	33
3.3.3. Data Pembebanan Transformator Daya 3	35
3.4. <i>Flowchart</i> Penelitian	38

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembebanan	39
4.1.1. Daya Semu	39
4.1.2. Rugi-rugi inti (P_i)	40
4.1.3. Rugi Tembaga (P_{cu})	40
4.1.4. Pembebanan dan Efisiensi Transformator Daya (TD) 1	41
4.1.4.1. Data Pembebanan Tertinggi Siang TD1	41
4.1.4.2. Data Pembebanan Tertinggi Malam TD1	42
4.1.4.3. Data Pembebanan Terendah Siang TD1	42
4.1.4.4. Data Pembebanan Terendah Malam TD1	43
4.1.5. Pembebanan dan Efisiensi Transformator Daya (TD) 3	43
4.1.5.1. Data Pembebanan Tertinggi Siang	43
4.1.5.2. Data Pembebanan Tertinggi Malam	44
4.1.5.3. Data Pembebanan Terendah Siang	44
4.1.5.4. Data Pembebanan Terendah Malam	45
4.2. Grafik	45
4.2.1. Perbandingan daya saat pembebanan terhadap efisiensi transformator	45
4.2.2. Perbandingan daya saat pembebanan terhadap rugi Transformator	47

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan	50
5.2. Saran	51

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
Gambar 2.1	Transformator	6
Gambar 2.2	Konstruksi Transformator	9
Gambar 2.3	(a) Tipe Inti (<i>Core Type</i>), (b) Tipe Cangkang (<i>Shell Type</i>).....	9
Gambar 2.4	Inti Besi.....	10
Gambar 2.5	Kumparan Fasa R-S-T	11
Gambar 2.6	Bushing	12
Gambar 2.7	Konservator Minyak Transformator	13
Gambar 2.8	Silicagel	14
Gambar 2.9	Konstruksi konservator dengan <i>rubber bag</i>	14
Gambar 2.10	OLTC Pada Transformator	17
Gambar 2.11	<i>Neutral grounding resistance</i> (NGR).....	18
Gambar 2.12	Transformator Tanpa Beban.....	19
Gambar 2.13	Transformator Berbeban.....	20
Gambar 2.14	Transformator Hubungan Bintang 3 Fasa	26
Gambar 2.15	Transformator Hubungan Delta 3 Fasa	27
Gambar 3.1	Transformator Daya 1 (TD 1).....	31
Gambar 3.2	Transformator Daya 3(TD 3).....	33
Gambar 3.3	Diagram alir penelitian	38
Gambar 4.1	Perbandingan daya saat pembebanan terhadap efisiensi TD1	46
Gambar 4.2	Perbandingan daya saat pembebanan terhadap efisiensi TD3.....	46
Gambar 4.3	Perbandingan daya saat pembebanan terhadap rugi total TD1 ...	48
Gambar 4.4	Perbandingan daya saat pembebanan terhadap rugi total TD3 ...	48

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
Tabel 2.1	Batasan nilai parameter minyak isolasi.....	11
Tabel 2.2	Macam-macam pendingin pada transformator	15
Tabel. 3.1	Pembebanan Tertinggi Siang TD1	33
Tabel. 3.2	Pembebanan Tertinggi Malam TD1	34
Tabel. 3.3	Pembebanan Terendah Siang TD1	34
Tabel. 3.4	Pembebanan Terendah Malam TD1	35
Tabel. 3.5	Pembebanan Tertinggi Siang TD 3	36
Tabel. 3.6	Pembebanan Tertinggi Malam TD 3	36
Tabel. 3.7	Pembebanan Terendah Siang TD 3	37
Tabel. 3.8	Pembebanan Terendah Malam TD 3	37
Tabel 4.1	Pembebanan tertinggi siang TD 1	41
Tabel 4.2	Pembebanan tertinggi malam TD1	42
Tabel 4.3	Pembebanan terendah siang TD1	42
Tabel 4.4	Pembebanan terendah malam TD1	43
Tabel 4.5	Pembebanan tertinggi siang TD3	43
Tabel 4.6	Pembebanan tertinggi malam TD3	44
Tabel 4.7	Pembebanan terendah siang TD3	44
Tabel 4.8	Pembebanan terendah malam TD3	45

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada bidang industri, transformator digunakan sebagai penaik tegangan (transformator step up) dan digunakan sebagai penurun tegangan (transformator step down). Transformator tersebut biasanya dihubungkan ke beban-beban. Pada transformator keadaan berbeban, daya yang keluar dari transformator (daya output transformator) tidak selalu 100% karena terdapat rugi-rugi pada saat penyaluran ke beban, baik rugi yang disebabkan arus mengalir pada kawat tembaga, rugi yang disebabkan fluks bolak balik pada inti besi, maupun rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi yang mengakibatkan daya yang keluar (daya output) dari transformator ke beban tidak sama dengan daya yang masuk (daya input) ke transformator. Hal ini di kenal sebagai efisiensi transformator.

Pada dunia industri, beban yang terpasang pada transformator biasanya tidak konstan atau selalu berubah-ubah. Jadi pada saat perubahan beban pada transformator tersebut akan menimbulkan rugi-rugi yang terjadi pada transformator dan juga mengakibatkan efisiensi pada transformator tersebut tidak 100 %.

Untuk itu perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui rugi-rugi dan efisiensi transformator daya pada saat pembebanan. Oleh sebab itulah pada tugas akhir ini penulis mengambil judul **STUDI EFISIENSI TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO)**.

1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dikemukakan dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Berapakah besar rugi-rugi transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO).
2. Berapakah besar efisiensi transformator GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO).

1.3. Tujuan Penulisan

Adapun tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Untuk menghitung seberapa besar rugi-rugi transformator di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO).
2. Untuk menghitung seberapa besar efisiensi transformator di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO).

1.4. Batasan Masalah

Agar isi dan pembahasan tugas akhir ini menjadi terarah dan dapat mencapai hasil yang diharapkan, maka penulis perlu membuat batasan masalah yang akan dibahas. Adapun batasan masalah pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Wilayah penelitian adalah transformator daya GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO).
2. Besar daya output yang dihasilkan oleh transformator saat beban tertinggi dan terendah.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat yang dapat diambil dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Bagi penulis, dapat mengetahui bagaimana cara memperhitungkan besarnya rugi-rugi transformator, serta memperhitungkan besarnya efisiensi transformator.
2. Bagi mahasiswa, dapat dijadikan sebagai referensi untuk mengetahui kajian mengenai rugi-rugi transformator, serta efisiensi transformator.
3. Bagi PT. PLN, lebih memudahkan PT PLN (Persero) dalam melaksanakan analisa & evaluasi rugi-rugi, serta efisiensi transformator di wilayah kerjanya.

1.6 Metode Penulisan

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur, yaitu dengan membaca teori-teori yang berkaitan dengan topik Tugas Akhir ini, baik dari buku referensi, artikel, jurnal, internet dan lain-lain.
2. Studi Lapangan, yaitu dengan melakukan pengambilan data pada gardu induk PAYAGELI PT. PLN (Persero)
3. Studi Bimbingan, yaitu dengan melakukan diskusi tentang topik Tugas Akhir ini dengan Dosen Pembimbing yang telah ditunjuk oleh pihak Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, dengan dosen-dosen bidang yang berkaitan, dan teman-teman sesama mahasiswa.

1.7 Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun berdasarkan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bagian ini berisikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, manfaat penulisan, metode dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang tinjauan pustaka relevan, transformator dan dasar-dasar perhitungan efisiensi transformator secara umum.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang Metode yang dilakukan dalam penulisan Tugas Akhir ini, metode pengumpulan data, metode pengolahan data.

BAB IV HASIL DAN ANALISIS

Bab ini berisi pembahasan tentang, data yang diambil dari PT. PLN (Persero) Gardu Induk PAYAGELI, dan pengolahan data.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisikan kesimpulan dan saran dari penyusunan tugas akhir..

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

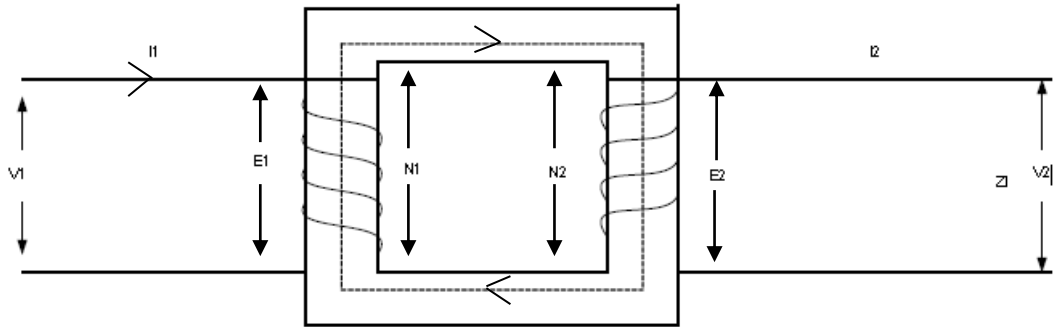
Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian ke rangkaian listrik yang lain, melalui suatu gandingan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika.

Transformator satu fasa mempunyai satu sisi masukan dan satu sisi keluaran. Sisi masukan disebut sisi primer, dan sisi keluaran disebut sisi sekunder. Sedangkan transformator tiga fasa mempunyai tiga buah sisi masukan dan tiga buah sisi keluaran, Transformator tiga fasa dapat dibentuk dari tiga buah transformator satu fasa ataupun dari bentuk konstruksi transformator tiga fasa satu inti. Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu sebagai berikut :

1. Transformator pembangkit/ daya
2. Transformator distribusi
3. Transformator pengukuran

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandingan magnet antara rangkaian dan sekunder. Gandingan magnet ini berupa inti besi tempat melakukan fluks bersama. Secara umum transformator terdapat dua sisi kumparan, yaitu sisi primer (N_1) dan sisi sekunder (N_2), seperti terlihat gambar 2.1 dibawah ini. Dimana jika tegangan pada

sisi primer lebih besar dari sisi sekunder maka disebut transformator penurun tegangan. Sebaliknya bila tegangan pada sisi sekunder lebih besar dari pada sisi primer, maka dinamakan transformator penaik tegangan.



Gambar 2.1 Transformator

Keterangan gambar 2.1 yaitu :

N_1 = Jumlah lilitan sisi primer

N_2 = Jumlah lilitan sisi sekunder

V_1 = Tegangan input (volt)

V_2 = Tegangan output (volt)

E_1 = GGL efektif sisi primer (volt)

E_2 = GGL efektif sisi sekunder (volt)

ϕ = Fluksi magnet

2.2. Tinjauan Pustaka Relevan

Trafo frekuensi tinggi (TFT) 1 fasa, 15 kW, 7/17,5 kV, 40 kHz yang dibuat telah dioperasikan pada mesin berkas elekttron (MBE) namun belum diketahui karakteristiknya. Efisiensi merupakan karakteristik TFT yang penting

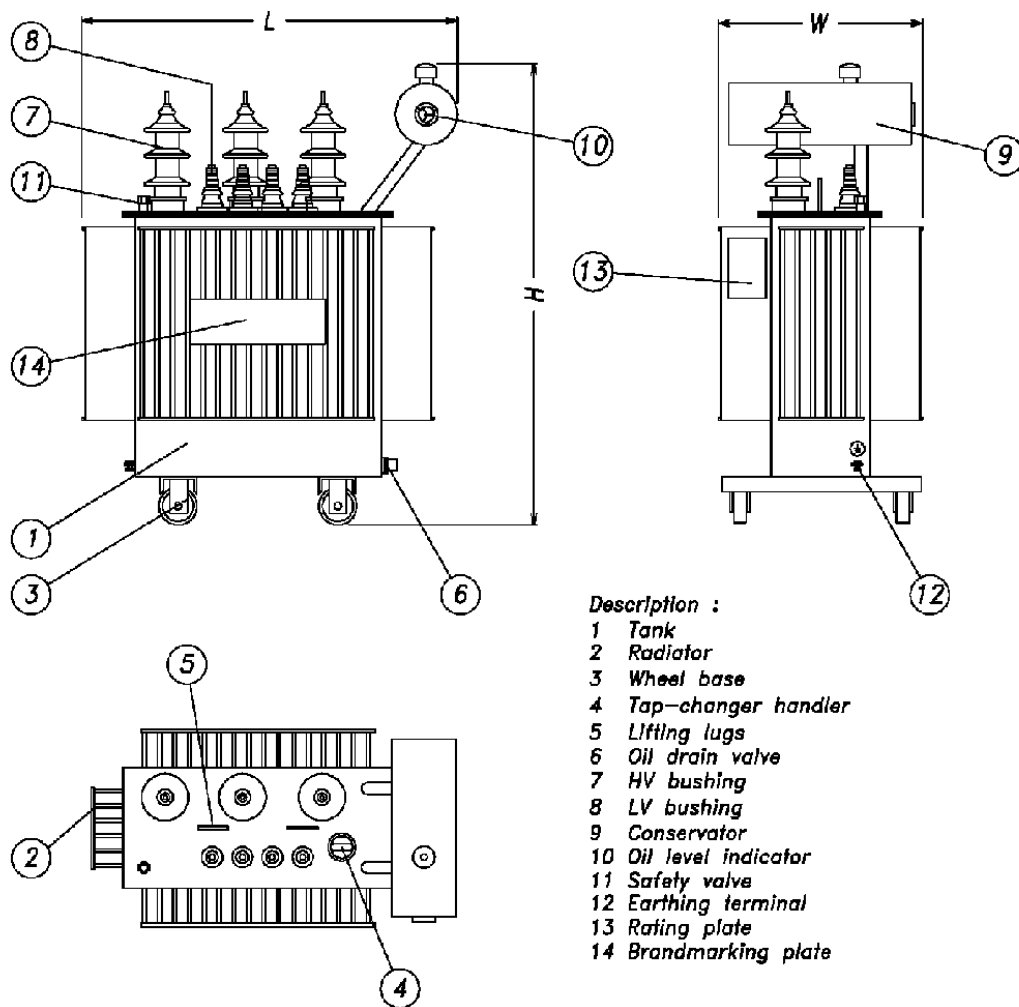
untuk dianalisis dalam rangka mengetahui kemampuannya dalam mencatu daya STT-MBE pada berbagai arus berkas elektron. Analisis dilakukan dengan menghitung rugi-rugi inti dan rugi-rugi lilitan dimana rugi inti tergantung pada bahannya, sedangkan rugi lilitan tergantung pada arus dan tahanannya dengan memperhatikan kenaikan suhu yang terjadi saat dioperasikan. Pada induksi magnet maksimum B_m 0,15 T dan frekuensi operasi 40 kHz, diketahui rugi daya inti 611,78 W sedangkan rugi daya lilitan total 9,85 W pada beban penuh 1,07 A sehingga efisiensi trafo pada beban penuh 96,02 %. Efisiensi trafo dihitung dengan variasi arus beban atau arus berkas elektron I_{be} dimana rugi daya lilitan berbanding kuadrat terhadap arus beban. Efisiensi maksimum (η_m) TFT di bawah beban penuh adalah sebesar 95,71 % terjadi pada I_{be} 11 mA atau 92,4 % beban penuh. Pada I_{be} yang lebih besar misalnya 12 mA, TFT mengalami kondisi beban lebih sebesar 9,34 %. Jika dibandingkan dengan trafo tenaga yang mempunyai efisiensi maksimum sekitar 80 % beban penuh, maka TFT yang dibuat mempunyai efisiensi maksimum pada persen beban yang lebih besar. Efisiensi TFT juga mempunyai kecenderungan sama dengan jenis trafo tenaga yaitu semakin besar bila bebannya semakin besar. (Darsono, 2014)

Suatu transformator bila dibebani, maka akan timbul rugi tembaga pada belitan transformator dan inti yang diubah menjadi panas. Panas yang ditimbulkan dapat menaikkan temperatur transformator. Semakin besar beban yang diterima, menyebabkan kenaikan temperatur yang semakin tinggi, rugi-rugi menjadi semakin besar, dan efisiensi menjadi turun. Paper ini akan membahas pengaruh penggunaan sistem pendingin dengan pendingin udara tekan yang bertujuan untuk menurunkan temperatur pada transformator. Dengan diberikan pendinginan,

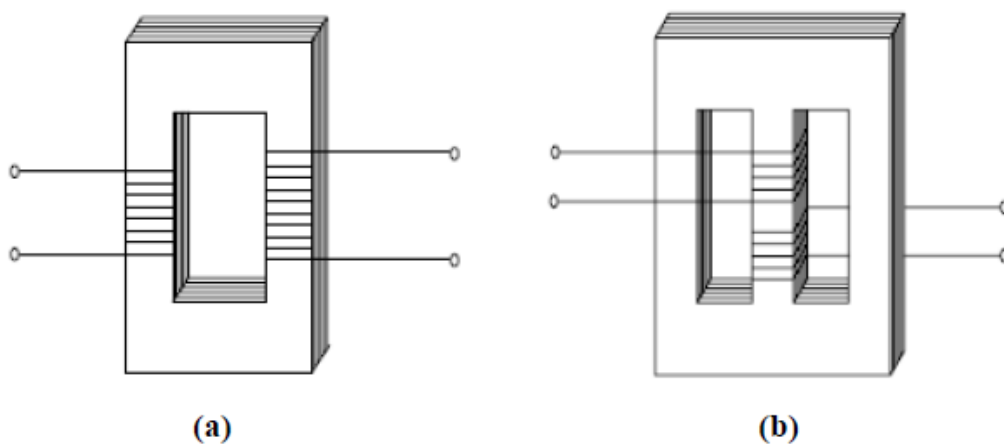
didapatkan perbandingan rugi-rugi, temperatur dan efisiensi transformator adalah: Beban 80% ; $T_n = 57,58^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 4391,936\text{kVA}$; $\eta = 97,38\%$; Beban 130% ; $T_n = 67,24^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 11917,448\text{ kVA}$; $\eta = 96,11\%$; Beban 150% ; $T_n = 77,14^{\circ}\text{C}$; $P_{loss} = 1559,26\text{ kVA}$; $\eta = 95,12\%$. Dengan menjaga temperatur di bawah batas yang diizinkan, maka transformator dapat dibebani lebih besar, bahkan sanggup lebih dari 150%. (Anugrah, 2014)

2.3. Konstruksi Transformator

Kerja transformator yang berdasarkan induksi elektromagnet, menghendaki adanya gandengan magnet antara rangkaian primer dan sekunder. Gandengan magnet ini berupa *inti besi* tempat melakukan *fluks* bersama. Berdasarkan cara melilitkan kumparan pada inti, dikenal dua macam transformator, yaitu tipe inti (*core*) dan tipe cangkang (*shell*).



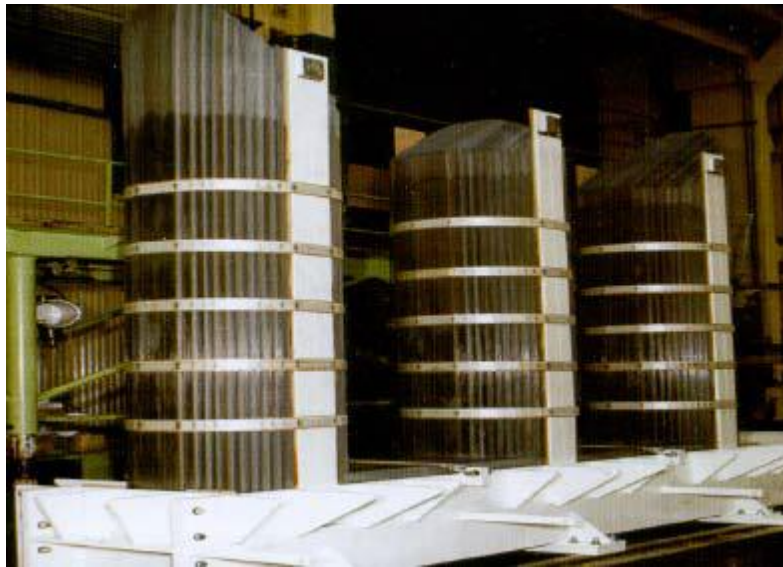
Gambar 2.2 Konstruksi Transformator



Gambar 2.3 (a) Tipe Inti (Core Type), (b) Tipe Cangkang (Shell Type)

2.3.1. Inti Besi

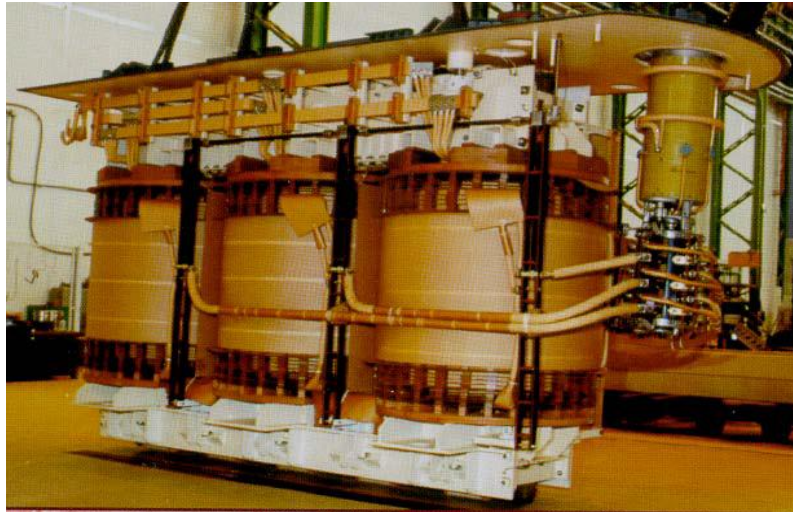
Inti besi digunakan sebagai media jalannya fluks yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga dapat menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan – lempengan besi tipis berisolasi yang di susun sedemikian rupa untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh Eddy Current.



Gambar 2.4 Inti Besi

2.3.2. Kumparan Transformator (*Winding*)

Kumparan transformator adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan fluks magnetik.



Gambar 2.5 Kumbaran Fasa R-S-T

2.3.3. Minyak Transformator

Sebagian besar kumbaran-kumbaran dan inti trafo tenaga direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

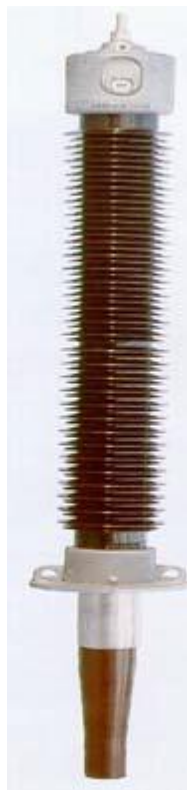
Tabel 2.1 Batasan nilai parameter minyak isolasi

Property	Highest voltage for equipment kV		
	<72,5	72,5 to 170	>170
Appearance	Clear, free from sediment and suspended matter		
Colour (on scale given in ISO 2049)	Max 2.0	Max 2.0	Max 2.0
Breakdown voltage (kV)	>55	>60	>60
Water content (mg/kg) ^a	20 ^b	<10	<10
Acidity (mg KOH/g)	Max 0.03	Max 0.03	Max 0.03
Dielectric dissipation factor at 90°C and 40 Hz to 60 Hz ^c	Max 0.015	Max 0.015	Max 0.010
Resistivity at 90°C (GΩm)	Min 60	Min 60	Min 60
Oxidation stability	As specified in IEC 60296		
Interfacial tension (mN/m)	Min 35	Min 35	Min 35
Total PCB content (mg/kg)	Not detectable (< 2 total)		
Particies			See table B 1 ^d

2.3.4. *Bushing*

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah bushing yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki trafo. Pada bushing dilengkapi fasilitas untuk pengujian tentang kondisi bushing yang sering disebut *center tap*.

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu *oil impregnated paper* dan *resin impregnated paper*. Pada tipe *oil impregnated paper isolasi* yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe *resin impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.



Gambar 2.6 Bushing

2.3.5. Tangki Konservator

Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.



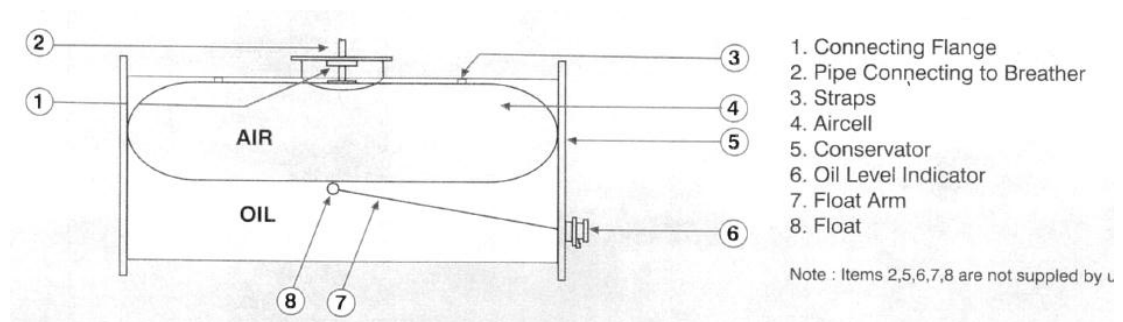
Gambar 2.7 Konservator Minyak Transformator

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuaian dan penyusutan minyak, volume udara didalam konservator pun akan bertambah dan berkurang. Penambahan atau pembuangan udara didalam konservator akan berhubungan dengan udara luar. Agar minyak isolasi transformator tidak terkontaminasi oleh kelembaban dan oksigen dari luar, maka udara yang akan masuk kedalam konservator akan difilter melalui silicagel.



Gambar 2.8 Silicagel

Untuk menghindari agar minyak trafo tidak berhubungan langsung dengan udara luar, maka saat ini konservator dirancang dengan menggunakan *brether bag/rubber bag*, yaitu sejenis balon karet yang dipasang didalam tangki konservator.



Gambar 2.9 Konstruksi konservator dengan *rubber bag*

2.3.6. Pendingin

Sebagai instalasi tenaga listrik yang dialiri arus maka pada transformator akan terjadi panas yang sebanding dengan arus yang mengalir serta temperatur udara disekeliling transformator tersebut. Jika temperatur luar cukup tinggi dan

beban transformator juga tinggi maka transformator akan beroperasi dengan temperatur yang tinggi pula. Untuk mengatasi hal tersebut transformator perlu dilengkapi dengan sistim pendingin yang bisa memanfaatkan sifat alamiah dari cairan pendingin dan dengan cara mensirkulasikan secara teknis, baik yang menggunakan sistem radiator, sirip-sirip yang tipis berisi minyak dan dibantu dengan hembusan angin dari kipas-kipas sebagai pendingin yang dapat beroperasi secara otomatis berdasarkan pada *setting* rele temperatur dan sirkulasi air yang bersinggungan dengan pipa minyak isolasi panas.

Tabel 2.2 Macam-macam pendingin pada transformator

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

2.3.7. Tap Changer (On Load Tap Changer)

Kestabilan tegangan dalam suatu jaringan merupakan salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut memiliki nilai tegangan *output* yang stabil sedangkan besarnya tegangan *input* tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer, diharapkan dapat mengubah perbandingan antara belitan primer dan sekunder. Dengan demikian tegangan

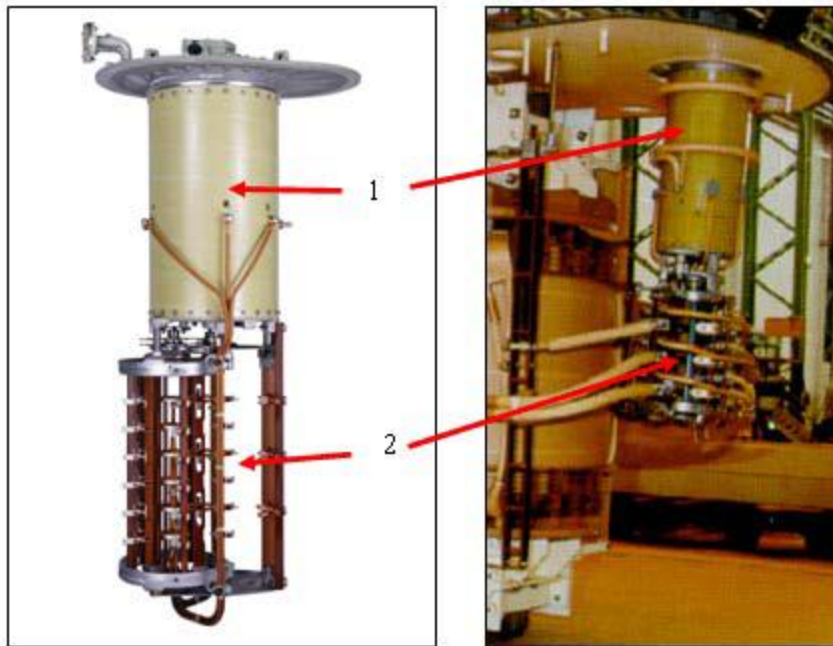
output sekunder pun dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem, berapa pun tegangan *input*/primernya. Penyesuaian perbandingan belitan ini disebut *Tap changer*.

Proses perubahan perbandingan belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*).

Tap changer terdiri dari :

- *Selector Switch*
- *Diverter Switch*
- Tahanan transisi

Dikarenakan aktifitas *tap changer* lebih dinamis dibanding dengan belitan utama dan inti besi, maka kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. *Selector switch* merupakan rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal terminal untuk menentukan posisi tap atau perbandingan belitan primer. *Diverter switch* merupakan rangkaian mekanis yang dirancang untuk melakukan kontak atau melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. Tahanan transisi merupakan tahanan sementara yang akan dilewati arus primer pada saat perubahan tap.



Gambar 2.10 OLTC Pada Transformator

Keterangan :

1. *Diverter Switch*
2. *Selektor Switch*

2.3.8. NGR (*Neutral Grounding Resistant*)

Salah satu metoda pentanahan adalah dengan menggunakan NGR. NGR adalah sebuah tahanan yang dipasang serial dengan netral sekunder pada transformator sebelum terhubung ke tanah. Tujuan dipasangnya NGR adalah untuk mengontrol besarnya arus gangguan yang mengalir dari sisi netral ke tanah.

Ada dua jenis NGR, Liquid dan Solid

1. Liquid

berarti resistornya menggunakan larutan air murni yang ditampung didalam bejana dan ditambahkan garam (NaCl) untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan

2. Solid

Sedangkan NGR jenis padat terbuat dari *Stainless Steel*, *FeCrAl*, *Cast Iron*, *Copper Nickel* atau *Nichrome* yang diatur sesuai nilai tahanannya.



Gambar 2.11 *Neutral grounding resistance (NGR)*

2.3.9. Peralatan Indikator

2.3.9.1. Termometer

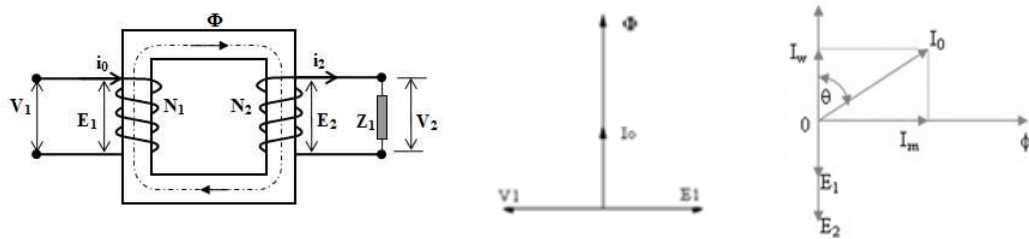
Adalah alat pengukur tingkat panas dari trafo baik panasnya kumparan primer dan sekunder juga minyak. Thermometer ini bekerja atas dasar air raksa (mercuri/Hg) yang tersambung dengan tabung pemuaian dan tersambung dengan jarum indikator derajat panas.

2.3.9.2. Peralatan Proteksi Transformator

Peralatan proteksi Transformator diantaranya adalah rele bucholz (mendeteksi gas), rele pengaman tekanan lebih, rele jensen, rele suhu, dan lain lain.

2.4. Rangkaian Transformator Tanpa Beban

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoid, akan mengalirkan arus primer I_0 yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 .



Gambar 2.12 Transformator Tanpa Beban

Arus primer I_0 menimbulkan fluks (Φ) yang sefasa dan juga berbentuk sinusoid.

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1

$$e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d(\phi_{\max} \sin \omega t)}{dt}$$

$$= -N_1 \cdot \omega \cdot \phi_{\max} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi)$$

Harga efektifnya

$$E_1 = \frac{N_1 \cdot 2\pi f \phi_{maks}}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f \phi_{maks}$$

Pada rangkaian sekunder, fluks (Φ) bersama tadi menimbulkan:

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

$$e_2 = -N_2 \cdot \phi_{max} \cdot \cos \omega t$$

$$E_2 = 4.44 N_2 f \phi_{maks}$$

Sehingga : $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$

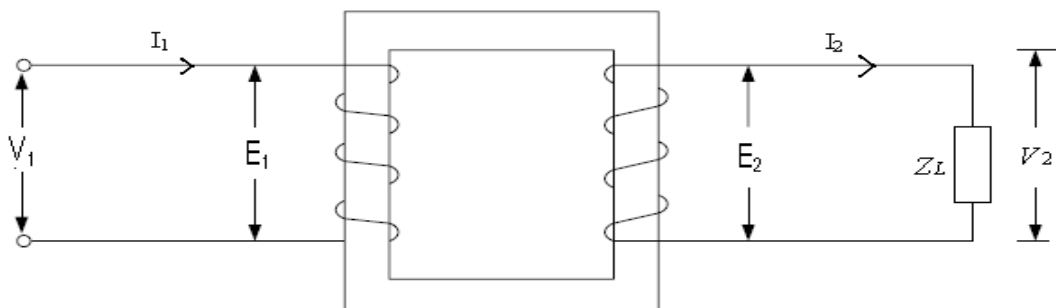
Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya fluks bocor

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a ; \text{Dimana } a = \text{perbandingan transformasi} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dalam hal ini tegangan induksi E_1 mempunyai besaran yang sama tetapi berlawanan arah dengan tegangan sumber V_1 .

2.5. Rangkaian Transformator Dengan Beban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = V_2 / Z_L$, dengan $\theta_2 =$ faktor kerja beban



Gambar 2.13 Transformator Berbeban

Arus beban I_2 ini menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan I_M . Agar fluks bersama itu tidak berubah nilainya, pada kumparan primer harus mengalir arus I_2 , yang menentang arus yang dibangkitkan oleh beban I_2 , sehingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I_2$$

Bila rugi besi diabaikan, maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I_2$$

Untuk menjaga agar fluks tetap tidak berubah sebesar ggm yang dihasilkan oleh arus pemagnetan I_M saja, berlaku hubungan :

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_M + I_2) - N_2 I_2$$

$$\text{Sehingga : } N_1 I_2 = N_2 I_2$$

Karena nilai I_M dianggap kecil, maka $I_2 = I_1$, jadi

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \text{ atau}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.6. Rugi-rugi Transformator

Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti atau rugi besi dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer maupun kumparan sekunder. Untuk memperkecil rugi-rugi tembaga harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan. Pada keadaan tanpa beban, besarnya daya adalah :

$$P = VI \cos \varphi \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana $\cos \varphi$ = factor kerja

Dari persamaan diatas juga didapat

$$S = \sqrt{3}VI$$

Maka

$$\cos \varphi = \frac{P(W)}{S(VA)} \dots\dots\dots (2.4)$$

Tujuan utama dari perancangan listrik adalah untuk mengurangi berbagai kerugian, yang mana walaupun dalam persentasi adalah kecil, mungkin harganya sangat besar pada transformator yang lebih besar. Adapun rugi-rugi transformator antara lain :

2.6.1. Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi ini disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga, dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_{cu} = I^2R$$

Karena arus beban berubah-ubah, maka rugi tembaga juga tidak konstan, bergantung pada beban. Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan:

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan :

P_{t2} = Rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan tertentu

P_{t1} = Rugi-rugi tembaga beban penuh

S_2 = Beban yang dioperasikan

S_1 = Nilai pengenalan

2.6.2. Rugi Besi (P_i)

Sedangkan untuk rugi-rugi inti (rugi besi) dalam keadaan normal selalu konstan tidak tergantung terhadap besarnya perubahan beban dan rugi ini dapat dikelompokkan dalam dua bagian yaitu :

a. Rugi Histerisis (P_h)

Rugi ini akibat dari inti besi menerima fluksi bolak-balik, yang dinyatakan dengan persamaan :

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^{1.6} \text{ watt}$$

Dimana :

K_h = Konstanta hysteresis

B_{maks} = Fluksi maksimum (weber)

b. Rugi *Eddy Current*

Rugi *Eddy Current* terjadinya disebabkan arus pusar pada inti besi. Dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2$$

Dimana :

K_e = Konstanta *Eddy current*

Sehingga rugi inti (rugi besi) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana : P_i = Rugi besi
 P_h = Rugi histeresis
 P_e = Rugi *Eddy current*

2.7. Efisiensi Transformator

Efisiensi menunjukkan tingkat keefisienan kerja suatu peralatan dalam hal ini transformator yang merupakan perbandingan rating *output* (keluaran) terhadap *input* (masukan) dan dinyatakan dengan persamaan dibawah ini :

$$\eta = \left(\frac{P_o}{P_{in}} \right) \times 100\%$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \sum rugi} \times 100\% \dots \dots \dots (2.7)$$

$$\sum rugi = P_{cu} + P_i \dots \dots \dots (2.8)$$

Dimana :

P_o = Daya keluaran (*output*)

P_i = Daya masukan (*input*)

P_{cu} = Rugi Tembaga

P_i = Rugi Besi

Jika dimisalkan daya keluaran adalah $V_2 I_2 \cos \theta$ dan rugi-rugi adalah rugi besi (P_i) sedang rugi-rugi tembaga (P_{cu}) dinyatakan dengan $I_2 R_{2ek}$, maka efisiensi dapat dinyatakan :

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \Phi}{V_2 I_2 \cos \Phi + I_2^2 R_{2ek} + P_i}$$

Dengan dibagi I_2 , maka di dapat :

$$\eta = \frac{V_2 \cos \Phi}{V_2 \cos \Phi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}}$$

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left(I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0$$

$$\text{Jadi } R_{2ek} = \frac{P_i}{P_2}$$

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu} \dots \dots \dots (2.9)$$

Artinya :

Untuk beban tertentu, efisiensi maksimum terjadi ketika rugi tembaga = rugi inti.

2.8. Transformator Tiga Fasa

Transformator 3 fasa pada umumnya digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik pada sistem tegangan 3 fasa (arus bolak-balik). Pada sisi primer dan sekunder masing-masing mempunyai lilitan yang identik dengan 3 buah transformator satu fasa, yang ujung kumparan primer dan skunder dapat disambung (dihubungkan) secara bintang (Y) atau segi-tiga (Δ). Kadang-kadang untuk suatu maksud tertentu sisi sekunder dihubungkan secara zig-zag (Z).

Transformator tiga fasa dapat dikonstruksikan dari tiga macam tipe yaitu :

1. 3 x 1 fasa dimana tiga transformator terdiri dari satu fasa yang identik
2. 1 x 3 fasa dimana satu fasa transformator konstruksi tipe tiga fasa

Ciri-ciri transformator 3 x 1 fasa yaitu :

- a. Kumparan primer dan sekunder dapat dibuat beberapa macam vektor group dan angka jam yang sesuai dengan yang diinginkan.
- b. Ketiga transformator dapat dioperasikan ke beban menjadi satu fasa dengan cara yang dihubung paralel.
- c. Dengan daya yang sama ketiga fasa maka untuk 3x1 fasa dibandingkan dengan 1x3 fasa lebih berat dan lebih mahal.
- d. Tegangan untuk ketiga fasanya primer dan sekunder betul-betul seimbang.

Sedangkan ciri-ciri transformator 1 x 3 fasa yaitu :

- a. Konstruksi sudah didesain dari pabrik dalam bentuk permanen.

- b. Dapat digunakan untuk mensuplai beban satu fasa maka dari setiap fasa maksimal beban yang dapat dipikul $\frac{1}{3}$ x daya tiga fasa.
- c. Transformator ini lebih ringan (material lebih kecil) sehingga lebih murah.
- d. Keseimbangan tegangan antara ketiga fasanya primer dan sekunder kurang begitu seimbang.

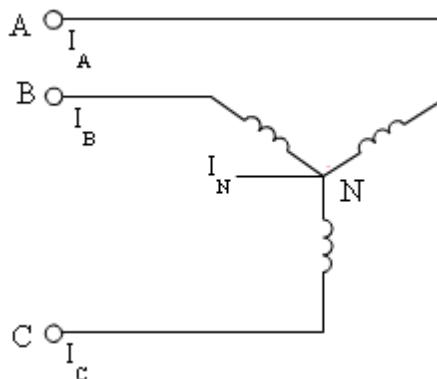
2.8.1. Hubungan belitan transformator tiga fasa

sisi primer atau sisi sekunder transformator tiga fasa dapat dihubungkan menurut tiga cara yaitu :

- a. Hubungan bintang
- b. Hubungan delta
- c. Hubungan zig-zag

2.8.1.1. Hubungan Bintang

Pada hubungan bintang dari ketiga kumparan dihubungkan apa yang dinamakan titik bintang. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu I_A , I_B , dan I_C yang masing-masing fasanya beda 120° .



Gambar 2.14 Transformator Hubungan Bintang 3 Fasa

Pada gambar diatas didapat bahwa :

$$I_N = I_A + I_B + I_C$$

$$V_{AB} = V_{AN} + V_{BN} = V_{AN} + V_{BN}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$$

$$V_{AB} = 3 V_{AN} \text{ atau}$$

$$V_P = \sqrt{3} V_L \text{ dan } I_L = I_P$$

Maka besarnya daya hubungan bintang adalah :

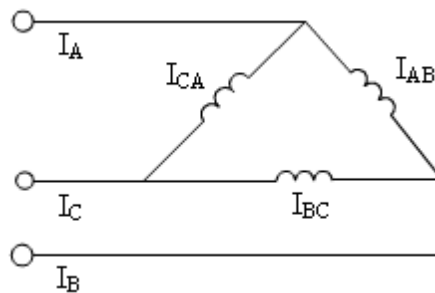
$$VA = 3 I_P V_P$$

$$VA = \sqrt{3} \cdot V_L I_L$$

2.8.1.2. Hubungan Delta

Tegangan tranformator tiga fasa dengan beban yang dihubung delta yaitu

V_{AB} , V_{BC} , dan V_{CA} , masing-masing berbeda sudut 120° .



Gambar 2.15 Transformator Hubungan Delta 3 Fasa

Pada gambar diatas, didapat bahwa :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0$$

Sedang untuk beban yang seimbang berlaku :

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{BA}$$

$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$

2.8.1.3. Hubungan Zig-Zag

Transformator *zig-zag* merupakan transformator dengan tujuan khusus. Salah satu aplikasinya adalah menyediakan titik netral untuk sistem listrik yang tidak memiliki titik netral. Hubungan ini biasa digunakan untuk beban yang tidak seimbang (asimetris), artinya beban antar fasa tidak sama, ada yang lebih besar atau lebih kecil.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Metode yang dilakukan dalam penulisan tugas akhir ini adalah metode pengumpulan data dan pengolahan data. Metode pengumpulan data dilakukan di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO), Jl. Mesjid, Sunggal Kanan, Sunggal, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20351, mulai dari tanggal 14 november 2016 sampai dengan 15 november 2016 . data yang dikumpulkan adalah data transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO). Metode pengolahan data dilakukan secara perhitungan manual.

3.2. Peralatan Penelitian

Peralatan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Notebook

Merk : Acer Aspire One D270

Processor : Intel[®] Atom[™] CPU N2600 (1.6 GHz, 1 MB L2 cache)

RAM : 2.00 GB

System Type : 32-bit Operating System

2. Flashdisk

Merk : Sandisk

Space : 4.00 GB

3.3. Data Penelitian

Data yang di ambil dalam penyelesaian tugas akhir ini menggunakan data-datad yang diperoleh dari GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO) antara lain sebagai berikut :

3.3.1 Transformator Daya di GI Payageli

Pada Gardu Induk Paya Geli, terdapat dua buah trafo daya yang digunakan untuk penyaluran daya dari tegangan 150 kV ke tegangan distribusi 20 kV, mempunyai data-data sebagai berikut :

a. Transformator Daya 1 (TD 1)

<i>Merk</i>	: GEC ALSTHOM
<i>Serial Number</i>	: 91.4.4051
<i>Year of manufactured</i>	: 1994
<i>Standard</i>	: ITC 76
<i>Rated power</i>	: 60 MVA
<i>Cooling</i>	: 0NAN / ONAF – 70 / 100 %
<i>Frequency</i>	: 50 Hz
<i>Phases</i>	: 3
<i>Insulation levels (KVp / KV rms</i>	: HV 650 / 275 HVN 95 / 38 LV 125 / 52 TERIASY 75 / 28
<i>Connection symbol</i>	: YN yn 0 + d
<i>Max altitude</i>	: 100 m
<i>Tap change</i>	: MR – MS III 300 – 72,5 + MA9
<i>Contract no</i>	: 006. PJ / 9220 / 1994 / M
<i>Temp rise below</i>	: Top oil 53 K
<i>100 m altitude</i>	: Average wind 58 K
<i>Vacuum withstand</i>	: Tank 100 %

Capability : *Conservator* 100 %
Radiator 100 %
Type of oil : Shell diala B
Mass : *Total* 90,35 +
Oil 24,08 +
Untanking 48,45 +

Pada Gambar 3.1 berikut ini terlihat trafo daya 1 (TD 1) yang terpasang pada Gardu Induk Paya Geli.



Gambar 3.1 Transformator Daya 1 (TD 1)

b. Transformator Daya 3 (TD 3)

Merk : PASTI
Serial number : 91.4.4051
Year of manufactured : 1994
Standard : IEC 76
Rated power : 60 MVA

<i>Cooling</i>	: 0NAN / ONAF – 70 / 100 %
<i>Frequency</i>	: 50 Hz
<i>Phases</i>	: 3
<i>Insulation levels</i>	: L1 650 AC 275 - L1 - AC 38/ L1 125 AC 50 - L1 - AC 50/ L1 - AC 38
<i>Connection symbol</i>	: YN yn 0 + d
<i>Max altitude</i>	: 100 m
<i>Tap change</i>	: MR – MS III 300 – 72,5 + MA9
<i>Contract no</i>	: 006. PJ / 9220 / 1994 / M
<i>Temp rise below</i>	: <i>Top oil</i> 53 K
100 m altitude	: <i>Average wind</i> 58 K
<i>Vacuum withstand</i>	: <i>Tank</i> 100 %
<i>Capability</i>	: <i>Conservator</i> 100 % <i>Radiator</i> 100 %
<i>Type of oil</i>	: Shell diala B
<i>Mass</i>	: Total 90,35 + <i>Oil</i> 24,08 + <i>Untanking</i> 48,45 +

Pada Gambar 3.2 di berikut ini terlihat trafo daya 3 (TD 3) yang terpasang pada Gardu Induk Paya Geli.



Gambar 3.2 Transformator Daya 3(TD 3)

3.3.2. Data Pembebanan Transformator Daya 1

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 1

- a. Data pembebanan tertinggi siang

Tabel. 3.1 Pembebanan Tertinggi Siang TD1

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	37,9	13	1280
2	19	38,4	12	1295
3	19	40,1	13,5	1355
4	19	35,5	11,5	1200
5	20	36,6	12	1175
6	20	27,4	9	880

Tabel. 3.1 (Lanjutan)

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
7	19	37,5	13	1265

8	19	37,8	12	1275
9	19	37,9	12,5	1280
10	19	35,7	11	1205

b. Data pembebanan tertinggi malam

Tabel. 3.2 Pembebanan Tertinggi Malam TD 1

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	36,7	10,5	1240
2	19	38,5	13	1300
3	19	37,6	13	1270
4	19	37	12	1250
5	20	35,7	12	1205
6	19,5	33,7	11	1110
7	19	36,7	11,5	1240
8	19	36,6	12	1235
9	19	35,2	12,5	1190
10	19	43,1	12	1455

c. Data pembebanan terendah siang

Tabel. 3.3 Pembebanan Terendah Siang TD 1

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	30,2	8,5	1020
2	19	24,9	8	840
3	19	30,7	10	1035
4	19	17,6	8,5	595

Tabel. 3.3 (Lanjutan)

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
5	19	29,5	8	995
6	20	16,5	6,5	530
7	20	27	8,5	865
8	19	30,1	9,5	1015
9	19	28,7	9	970
10	19	29	10	980

d. Data pembebanan terendah malam

Tabel. 3.4 Pembebanan Terendah Malam TD1

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	28,9	8	975
2	19	24,9	8	840
3	19	23,7	7	800
4	19	28,6	9	965
5	19	29,9	9	1010
6	20	24,6	9	790
7	20	24,9	8,5	800
8	19	27,5	9	930
9	19	27,5	9	930
10	19	28,3	9	955

3.3.3. Data Pembebanan Transformator Daya 3

Berikut ini adalah data pembebanan untuk transformator daya 3

a. Data pembebanan tertinggi siang

Tabel. 3.5 Pembebanan Tertinggi Siang TD 3

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	38,9	12	1290
2	19	39,1	12	1310
3	19	38,8	12	1300
4	19	36,7	11	1230
5	20	37,7	12	1200
6	19	27,2	8	910
7	19	38,5	12	1290
8	19	38,8	12	1300
9	19	39,4	12	1320
10	19	36,1	10,5	1210

b. Data pembebanan tertinggi malam

Tabel. 3.6 Pembebanan Tertinggi Malam TD 3

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	37,2	11	1245
2	19	38,2	12	1280
3	19	37,9	12	1270
4	19	39,1	11	1310
5	20	38,3	12	1220
6	19	32,6	10	1090
7	19	38,8	11	1300
8	19	38,8	12	1300
9	19	37	12	1240
10	19	38,9	12	1305

c. Data pembebanan terendah siang

Tabel. 3.7 Pembebanan Terendah Siang TD 3

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	37,2	11	1245
2	19	38,2	12	1280
3	19	37,9	12	1270
4	19	39,1	11	1310
5	20	38,3	12	1220
6	19	32,6	10	1090
7	19	38,8	11	1300
8	19	38,8	12	1300
9	19	37	12	1240
10	19	38,9	12	1305

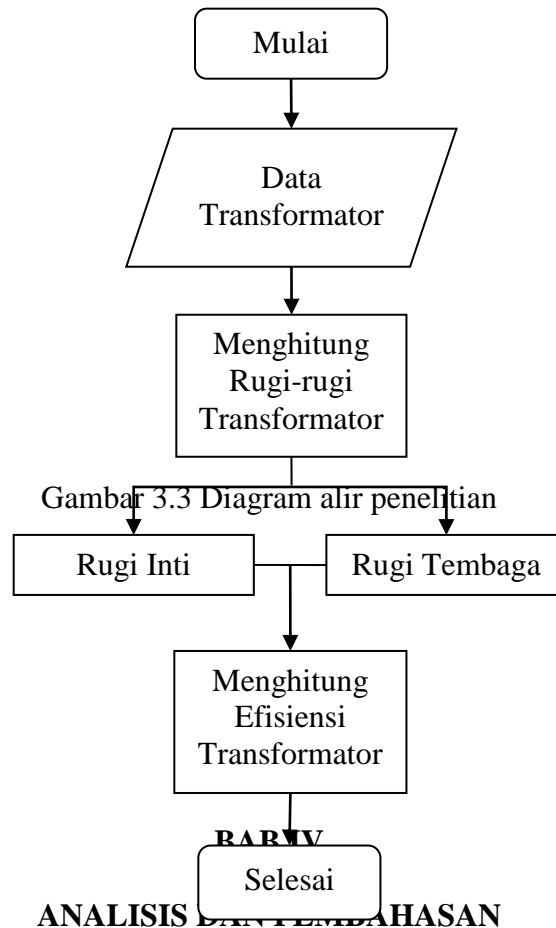
d. Data Pembebanan terendah malam

Tabel. 3.8 Pembebanan Terendah Malam TD 3

TGL	DATA			
	TEG	DAYA		ARUS
	kV	MW	MVAR	A
1	19	30,5	8	1020
2	19	28,1	7	940
3	19	21,6	5	720
4	19	29,5	7,5	985
5	19	31,4	8	1050
6	20	26,2	8	830
7	20	26,2	8	830
8	19	30,2	9	1010
9	19	30,2	8	1010
10	19	27,2	7	910

3.4. *Flowchart* Penelitian

Adapun proses penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan langkah kerja yang terdapat pada alur diagram *flowchart* berikut ini :



Transformator yang terpasang di Gardu Induk Payageli adalah Transformator penurun tegangan 60 MVA, 150/20 kV. Terdapat dua buah transformator yang terpasang dengan kapasitas yang sama, masing-masing dengan merk yang berbeda, yaitu transformator PASTI dan ALSTHOM.

4.1 Pembebanan

4.1.1 Daya Semu

Berdasarkan data pembebanan pada Tabel 3.1, pada tanggal 01 Oktober 2016 sampai dengan tanggal 10 Oktober 2016, dengan memperhatikan data arus (*Ampere*) yang tertinggi, maupun yang terendah, maka dengan menggunakan persamaan, maka akan didapat besar daya semu yang dihasilkan. Sebagai contoh digunakan data untuk pembebanan transformator daya 1 saat beban siang tertinggi tanggal 01 Oktober 2016.

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I$$

$$S = \sqrt{3} \cdot 19000 \cdot 1280$$

$$S = 42,1 \text{ MVA}$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai dari $\cos \varphi$, dapat dihitung dengan persamaan :

$$\cos \varphi = \frac{P(MW)}{S(MVA)}$$

$$\cos \varphi = \frac{37,9(MW)}{42,1(MVA)}$$

$$\cos \varphi = 0,9$$

4.1.2. Rugi-rugi inti (P_i)

Rugi-rugi inti yang terjadi dapat dicari dengan memperhitungkan operasi transformator dalam keadaan tanpa beban. Dalam keadaan normal rugi inti adalah konstan tidak tergantung pada besarnya beban. Dari data yang diperoleh dari perusahaan bahwa transformator ALSTHOM memiliki rugi inti 38 kW dan rugi

tembaga beban penuh sebesar 220 kW. Pada Transformator PASTI memiliki rugi inti 32 kW dan rugi tembaga beban penuh sebesar 190 kW.

4.1.3. Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi-rugi transformator berbeban merupakan rugi tembaga sebab rugi inti merupakan rugi yang konstan tidak tergantung pada perubahan beban, Beban yang berubah-ubah menyebabkan terjadinya perubahan arus pada kumparan transformator. Perubahan arus menyebabkan besar kecilnya rugi-rugi yang terjadi dikumparan transformator tersebut.

Untuk mendapatkan rugi-rugi tembaga di setiap pembebanan, maka dapat dihitung dengan persamaan, dan dengan mengambil contoh pada data pembebanan transformator daya 1, rugi tembaga dapat di hitung:

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1}$$

$$P_{t2} = \left(\frac{42100}{60000}\right)^2 \times 220$$

$$P_{t2} = 108,31 \text{ kW}$$

Rugi Total = Rugi inti + rugi tembaga

$$= 38 \text{ kW} + 108,31 \text{ kW}$$

$$= 146,31 \text{ kW}$$

Maka, efisiensi dapat dihitung

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + \sum \text{rugi}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{37900}{37900 + 146,31} \times 100\%$$

$$\eta = 99,61\%$$

Dengan cara yang sama dapat dihitung berapa besar daya semu (S), $\cos \varphi$, P_{cu} , rugi total, dan efisiensi pada tanggal 01 oktober 2016 sampai dengan tanggal 10 oktober 2016.

4.1.4. Pembebanan dan Efisiensi Transformator Daya (TD) 1

4.1.4.1. Data Pembebanan Tertinggi Siang TD1

Tabel 4.1 Pembebanan tertinggi siang TD 1

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos φ	Pcu	Rugi total	Efisiensi
	(kV)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1280	37,9	42,1	0,9	108,31	146,31	99,61
2	19	1295	38,4	42,6	0,9	110,9	148,9	99,61
3	19	1355	40,1	44,6	0,89	121,55	159,55	99,64
4	19	1200	35,5	39,5	0,89	95,34	133,34	99,66
5	20	1175	36,6	40,7	0,89	101,22	139,22	99,65
6	20	880	27,4	30,4	0,9	56,47	94,47	99,65
7	19	1265	37,5	41,6	0,9	105,75	143,75	99,61
8	19	1275	37,8	41,9	0,9	107,28	145,28	99,61
9	19	1280	37,9	42,1	0,9	108,31	146,31	99,61
10	19	1205	35,7	39,6	0,9	95,83	133,83	99,62

Efisiensi rata-rata adalah 99,62%

4.1.4.2. Data Pembebanan Tertinggi Malam TD1

Tabel 4.2 Pembebanan tertinggi malam TD1

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos φ	Pcu	Rugi total	Efisiensi
	(kV)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1240	36,7	40,8	0,89	101,72	139,72	99,62
2	19	1300	38,5	42,8	0,89	111,94	149,94	99,61
3	19	1270	37,6	41,8	0,89	106,77	144,77	99,61
4	19	1250	37	41,1	0,9	103,22	141,22	99,61
5	19	1205	35,7	39,6	0,9	95,83	133,83	99,62
6	19,5	1110	33,7	37,5	0,89	85,93	123,93	99,63
7	19	1240	36,7	40,8	0,89	101,72	139,72	99,62
8	19	1235	36,6	40,6	0,9	100,73	138,73	99,62
9	19	1190	35,2	39,1	0,9	93,42	131,42	99,62
10	19	1455	43,1	47,9	0,89	140,21	178,21	99,58

Efisiensi rata-rata adalah 99,61%

4.1.4.3. Data Pembebanan Terendah Siang TD1

Tabel 4.3 Pembebanan terendah siang TD1

Tgl	Tegangan	Arus (A)	P (MW)	S (MVA)	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(kV)					(kW)	(kW)	
1	19	1020	30,2	33,5	0,9	68,58	106,58	99,64
2	19	840	24,9	27,6	0,9	46,55	84,55	99,66
3	19	1035	30,7	34	0,9	70,64	108,64	99,64
4	19	595	17,6	19,5	0,9	23,23	61,23	99,65
5	19	995	29,5	32,7	0,9	65,34	103,34	99,65
6	20	530	16,5	18,3	0,9	20,46	58,46	99,64
7	20	865	27	30	0,9	55,00	93,00	99,65
8	19	1015	30,1	33,4	0,9	68,17	106,17	99,64
9	19	970	28,7	31,9	0,89	62,18	100,18	99,65
10	19	980	29	32,2	0,9	63,36	101,36	99,65

Efisiensi rata-rata adalah 99,64%

4.1.4.4. Data Pembebanan Terendah Malam TD1

Tabel 4.4 Pembebanan terendah malam TD1

Tgl	Tegangan	Arus (A)	P (MW)	S (MVA)	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(kV)					(kW)	(kW)	
1	19	975	28,9	32	0,9	62,57	100,57	99,65
2	19	840	24,9	27,6	0,9	46,55	84,55	99,66
3	19	800	23,7	26,3	0,9	42,26	80,26	99,66
4	19	965	28,6	31,7	0,9	61,40	99,40	99,65
5	19	1010	29,9	33,2	0,9	67,35	105,35	99,64
6	20	790	24,6	27,3	0,9	45,54	83,54	99,64
7	20	800	24,9	27,7	0,89	46,88	84,88	99,66
8	19	930	27,5	30,6	0,89	57,22	95,22	99,65
9	19	930	27,5	30,6	0,89	57,22	95,22	99,65
10	19	955	28,3	31,4	0,9	60,25	98,25	99,65

Efisiensi rata-rata 99,65%

4.1.5. Pembebanan dan Efisiensi Transformator Daya (TD) 3

4.1.5.1. Data Pembebanan Tertinggi Siang

Tabel 4.5 Pembebanan tertinggi siang TD3

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(V)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1290	38,5	42,4	0,9	94,88	126,88	99,67
2	19	1310	39,1	43,1	0,9	98,04	130,04	99,66
3	19	1300	38,8	42,8	0,9	96,68	128,68	99,66
4	19	1230	36,7	40,5	0,9	86,56	118,56	99,67
5	20	1200	37,7	41,5	0,9	90,89	122,89	99,67
6	19	910	27,2	29,9	0,9	47,18	79,18	99,63
7	19	1290	38,5	42,4	0,9	94,88	126,88	99,67
8	19	1300	38,8	42,8	0,9	96,68	128,68	99,66
9	19	1320	39,4	43,4	0,9	99,41	131,41	99,66
10	19	1210	36,1	39,8	0,9	83,60	115,60	99,68

Efisiensi rata-rata 99,66%

4.1.5.2. Data Pembebanan Tertinggi Malam

Tabel 4.6 Pembebanan tertinggi malam TD3

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(V)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1245	37,2	40,9	0,9	88,28	120,28	99,67
2	19	1280	38,2	42,1	0,9	93,54	125,54	99,67
3	19	1270	37,9	41,8	0,9	92,21	124,21	99,67
4	19	1310	39,1	43,1	0,9	98,04	130,04	99,66
5	20	1220	38,3	42,2	0,9	93,98	125,98	99,67
6	19	1090	32,6	35,8	0,91	67,64	99,64	99,69
7	19	1300	38,8	42,8	0,9	96,68	128,68	99,66
8	19	1300	38,8	42,8	0,9	96,68	128,68	99,66
9	19	1240	37	40,8	0,9	87,85	119,85	99,67
10	19	1305	38,9	42,9	0,9	97,13	129,13	99,66

Efisiensi rata-rata 99,66%

4.1.5.3. Data Pembebanan Terendah Siang

Tabel 4.7 Pembebanan terendah siang TD3

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(V)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1000	29,9	32,9	0,9	57,12	89,12	99,70
2	19	600	18,1	19,7	0,91	20,48	52,48	99,71
3	19	1040	31,1	34,2	0,9	61,73	93,73	99,69
4	19	920	27,5	30,3	0,9	48,45	80,45	99,70
5	19	1040	31,1	34,2	0,9	61,73	93,73	99,69
6	20	810	25,6	28	0,91	41,37	73,37	99,71
7	20	840	26,5	29	0,91	44,38	76,38	99,71
8	19	980	29,3	32,2	0,9	54,72	86,72	99,70
9	19	965	28,9	31,7	0,91	53,03	85,03	99,70
10	19	975	29,2	32	0,91	54,04	86,04	99,70

Efisiensi rata-rata 99,70%

4.1.5.4. Data Pembebanan Terendah Malam

Tabel 4.8 Pembebanan terendah malam TD3

Tgl	Tegangan	Arus	P	S	Cos ϕ	Pcu	Rugi total	Efisiensi (%)
	(V)	(A)	(MW)	(MVA)		(kW)	(kW)	
1	19	1020	30,5	33,5	0,91	59,22	91,22	99,70
2	19	940	28,1	30,9	0,9	50,39	82,39	99,70
3	19	720	21,6	23,6	0,91	29,39	61,39	99,71
4	19	985	29,5	32,4	0,91	55,40	87,40	99,70
5	19	1050	31,4	34,5	0,91	62,81	94,81	99,69
6	20	830	26,2	28,7	0,91	43,47	75,47	99,71
7	20	830	26,2	28,7	0,91	43,47	75,47	99,71
8	19	1010	30,2	33,2	0,9	58,17	90,17	99,70
9	19	1010	30,2	33,2	0,9	58,17	90,17	99,70
10	19	910	27,2	29,9	0,9	47,18	79,18	99,70

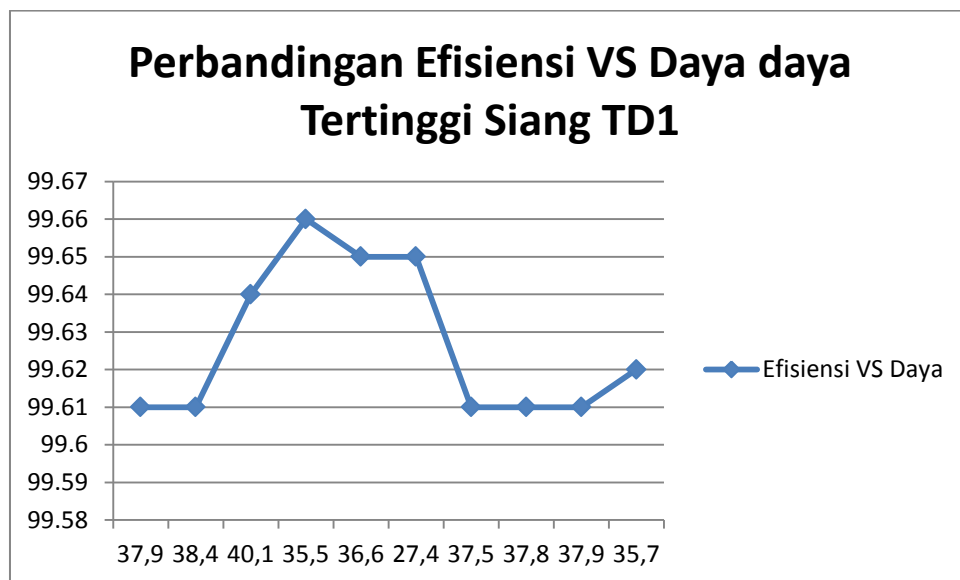
Efisiensi rata-rata 99,70%

4.2. Grafik

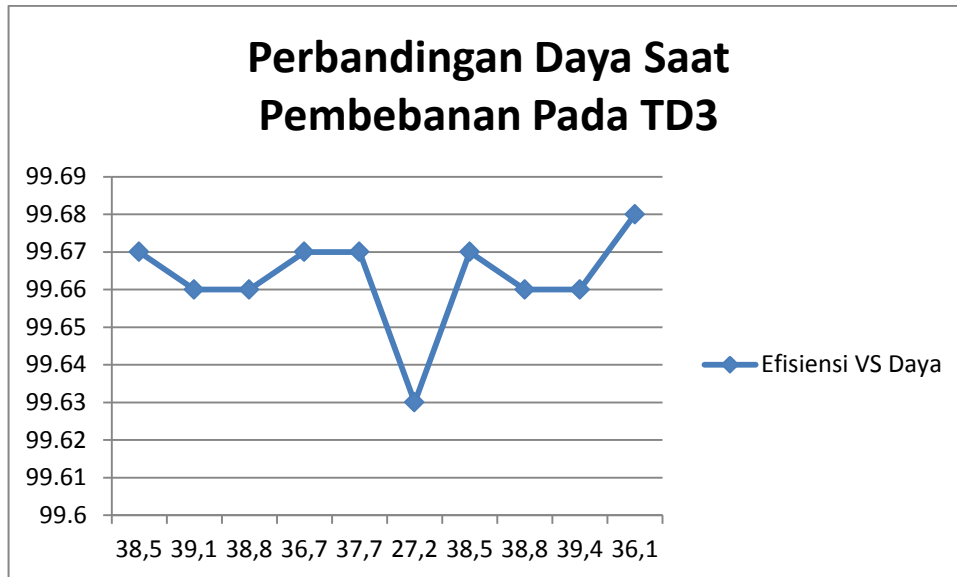
Untuk mempermudah analisa, maka perlu di buat grafik-grafik yang menampilkan data-data yang telah ada. Berdasarkan data-data di atas, maka beberapa hal yang dapat di jadikan perbandingan, diantaranya di tampilkan pada grafik berikut ini :

4.2.1. Perbandingan efisiensi terhadap daya pada tranformator daya 1

Berikut ini ditampilkan grafik perbandingan antara grafik terhadap daya pada transformator daya 1 (Daya Pembebanan Tertinggi Siang).



Gambar 4.1 Perbandingan Efisiensi Daya Tertinggi Siang TD1



Gambar 4.2 Perbandingan Efisiensi Tertinggi Siang Hari TD3

Grafik diatas menampilkan data-data saat terjadi pembebanan, maka dilihat juga pengaruhnya terhadap nilai efisiensinya.

Dari grafik diatas terlihat bahwa, pada transformator daya 1 maupun pada transformator 3, perubahan daya, baik saat beban tertinggi maupun pada saat beban terendah, mempengaruhi efisiensi transformator walaupun nilainya tidak terlalu signifikan. Hal ini sesuai dengan persamaan :

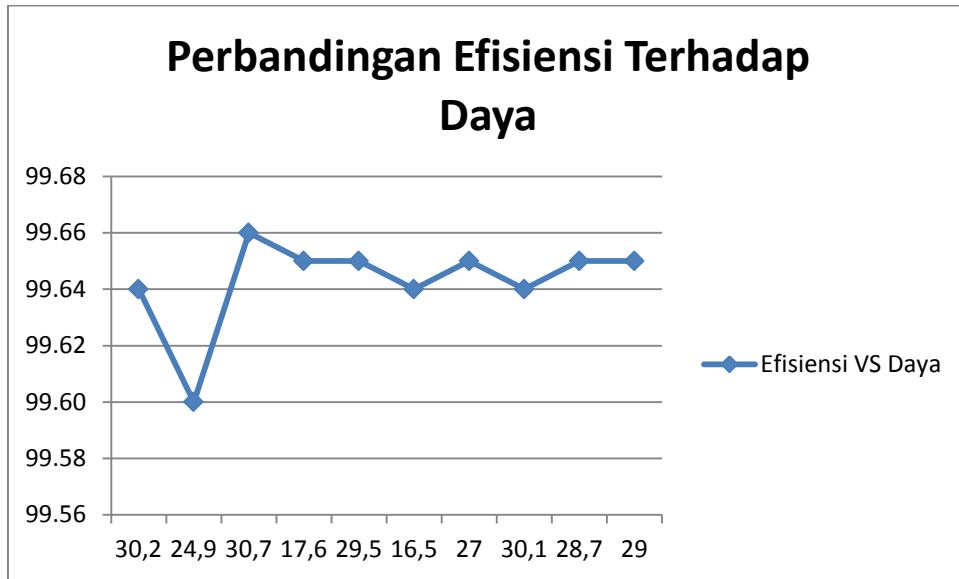
$$\eta = \frac{P_o}{P_o + \sum rugi} \times 100\%$$

Dilihat dari persamaan diatas, hal yang turut mempengaruhi efisiensi adalah rugi-rugi transformator itu sendiri. Namun karena rugi-rugi transformator tergolong kecil bila dibandingkan daya yang di turunkan transformator, maka hal ini juga berpengaruh sedikit pada efisiensi.

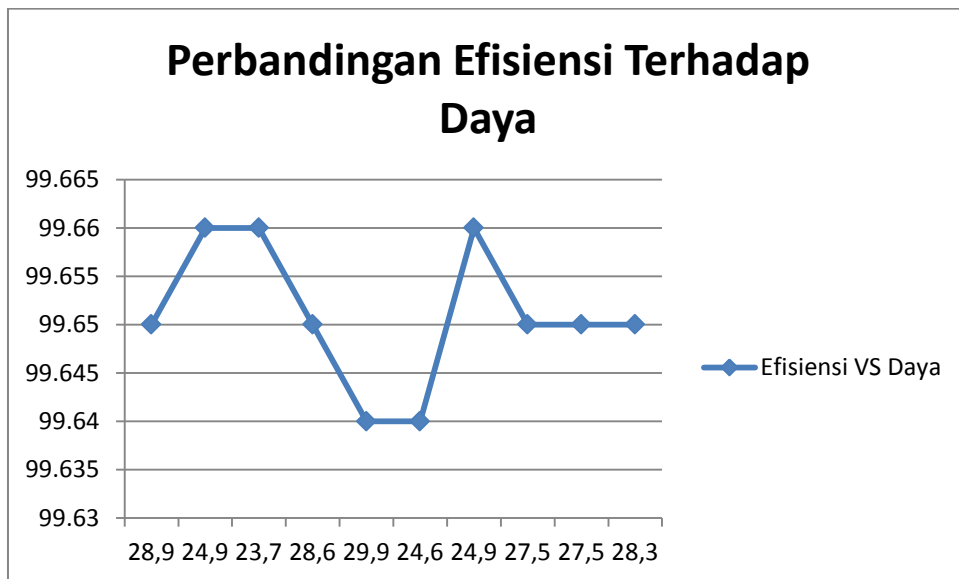
4.2.2. Perbandingan daya saat pembebanan terhadap rugi transformator

Berikut ini ditampilkan grafik perbandingan daya saat pembebanan

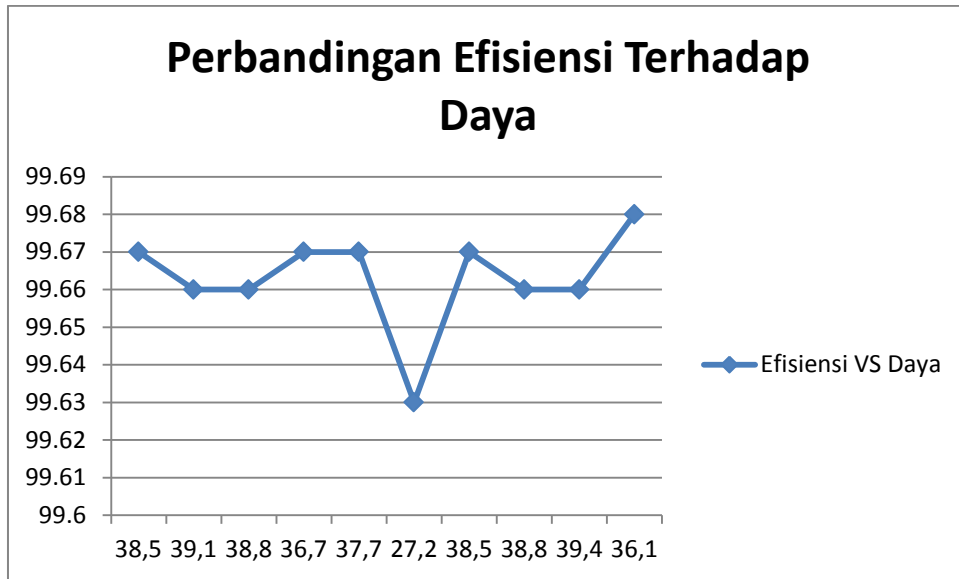
terhadap rugi-rugi total pada transformator 1 dan transformator 3.



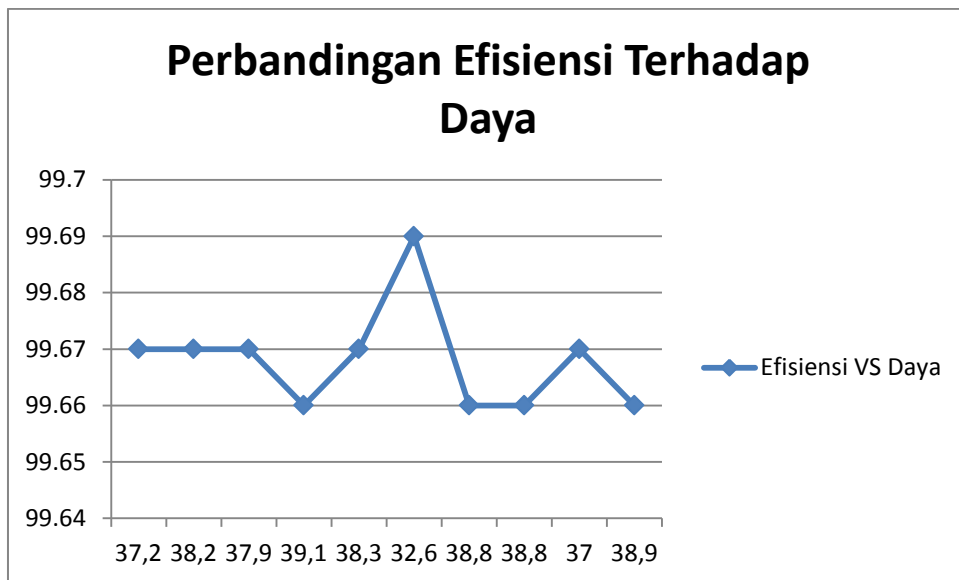
Gambar 4.3 Efisiensi Terendah pada Siang Hari TD1



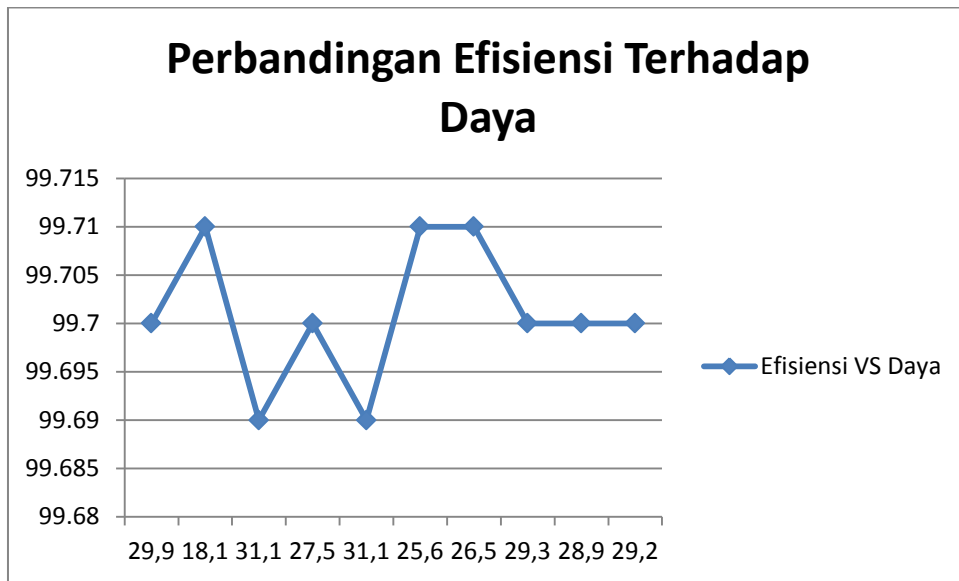
Gambar 4.4 Perbandingan Efisiensi pada Malam Hari TD3



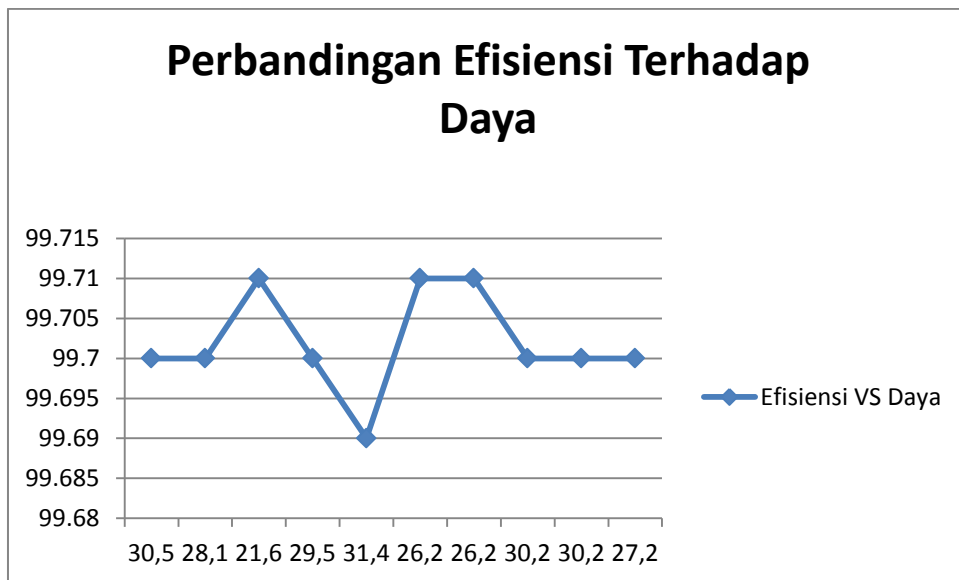
Gambar 4.5 Perbandingan Efisiensi Tertinggi pada Siang hari TD3



Gambar 4.6 Perbandingan Efisiensi Tertinggi pada Malam Hari TD3



Gambar 4.7 Perbandingan efisiensi Terendah pada Siang Hari TD3



Gambar 4.8 Perbandingan efisiensi Terendah pada Malam Hari TD3

Grafik diatas menampilkan data-data saat terjadi pembebanan, maka dilihat juga pengaruhnya terhadap nilai rugi-rugi yang terjadi pada transformator, dimana rugi-rugi transformator ini akan berpengaruh terhadap efisiensi transformatornya.

Dari grafik diatas terlihat bahwa, pada transformator 1 dan transformator 3, pada saat terjadi perubahan daya, maka akan terjadi perubahan rugi-rugi total transformator, dalam hal ini, terjadi perubahan rugi tembaga pada transformator, sedangkan rugi-rugi inti tidak berubah, dimana:

Rugi total = rugi inti + rugi tembaga

Dari persamaan perubahan rugi tembaga terhadap perubahan daya juga dapat diketahui :

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1}$$

Bahwa dengan persamaan diatas diketahui bahwa perubahan daya juga mempengaruhi rugi tembaga.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan pada bab sebelumnya maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Besar rugi-rugi transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO) yaitu tertinggi siang TD1 139,09 kW, tertinggi malam TD1 142,14 kW, terendah siang TD1 92,35 kW, terendah malam TD1 92,72 kW, tertinggi siang TD3 120,88 kW, tertinggi malam 123,20 kW, terendah siang 81,70 kW, dan terendah malam 82,76 kW.
2. Besar efisiensi transformator daya di GARDU INDUK PAYAGELI PT. PLN (PERSERO) yaitu tertinggi siang TD1 99,62%, tertinggi malam TD1 99,62%, terendah siang TD1 99,64%, terendah malam TD1 99,65%, tertinggi siang TD3 99,66%, tertinggi malam 99,66%, terendah siang 99,70%, dan terendah malam 99,70%.
3. Pada transformator daya 1 maupun pada transformator daya 3, perubahan daya baik saat beban tertinggi maupun pada beban terendah, mempengaruhi efisiensi transformator walaupun tidak terlalu signifikan.
4. Pada transformator daya 1 dan transformator daya 3, pada saat terjadi perubahan daya, maka akan terjadi perubahan rugi-rugi total transformator, dalam hal ini terjadi perubahan rugi tembaga pada transformator, sedangkan rugi-rugi inti tidak berubah.

5.2. Saran

1. Dalam pengoperasian transformator sebaiknya besar beban yang dipasang harus sesuai dengan standar yang telah di perbolehkan.
2. Perawatan kepada transformator harus terus dilakukan secara berkala sesuai yang telah ditetapkan oleh pabrikan agar transformator tetap berfungsi sebagaimana seharusnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Kadir, Abdul, *Transformator*, Penerbit P.T. Pradnya Paramita, Jakarta, 1979
- Pedoman O&M Trafo Tenaga, PLN, Jakarta, 2009.
- Sharma, Sanjeev. 2007. *Basics of Electrical Enggineering*. New Delhi : I.K. International
- Theraja, B.L, "*A Text-Book Of Electrical Technology*", Nurja Construction & Development, New Delhi, 1989.
- Tobing, Bonggas L. 2003. *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Wijaya, Mochtar, *Dasar-Dasar Mesin Listrik*, Penerbit Djambatan, Jakarta, 2001.
- Winders, Jhon, "*Power Transformers Principles and Applications*", Marcel Dekker, New York, 2002
- Zuhal, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Edisi keempat, Penerbit Gramedia, Jakarta, 1993.