



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu gandengan magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.^[2]

Transformator adalah peralatan listrik (*apparatus electrical*) yang digunakan untuk menaikkan tegangan (*step up*) atau untuk menurunkan tegangan (*step down*). Transformator juga berfungsi untuk mentransformasi AC tegangan rendah arus tinggi menjadi AC tegangan tinggi arus rendah digunakan untuk transmisi tenaga listrik atau untuk mentransformasi AC tegangan tinggi arus rendah menjadi AC tegangan rendah arus tinggi digunakan untuk distribusi dan mentransformasi impedansi rangkaian menjadi impedansi yang berbeda supaya diperoleh pengalihan (*transfer*) daya yang lebih baik dari sumber ke beban^[3].

Transformator digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan; misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Berdasarkan frekuensi, transformator dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- Frekuensi daya, 50-60 c/s.
- Frekuensi pendengaran 50 c/s-20 c/s.
- Frekuensi radio, di atas 30 kc/s.

^[2] <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/20976/3/Chapter%20II.pdf>. diakses 22 Juni 2019

^[3] <http://dokumen.tips/documents/makalah-transformator-559bf8b0e988a.html>. diakses 21 Juni 2019

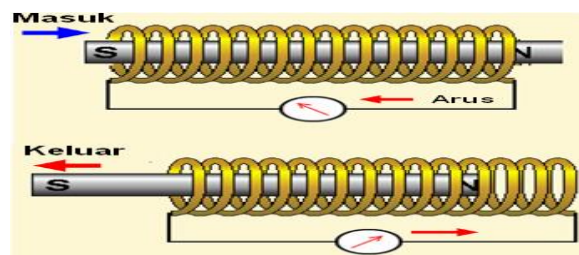


Berdasarkan bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi:

- Transformator daya.
- Transformator distribusi.
- Transformator pengukuran: yang terdiri dari transformator arus dan transformator tegangan.

2.2. Prinsip Kerja Transformator

Dalam suatu eksperimennya *Michael Faraday* dengan menggunakan bahan-bahan berupa sebuah koil, magnet batang dan galvanometer (Gambar 2.1) dapat membuktikan bahwa bila kita mendorong medan magnet batang ke dalam koil tersebut, dengan kutub utaranya menghadap koil tersebut, ketika batang magnet sedang bergerak, jarum galvanometer memperlihatkan penyimpangan yang menunjukkan bahwa sebuah arus telah dihasilkan di dalam koil tersebut. Bila batang magnet tersebut digerakkan dengan arah sebaliknya maka arah penunjukan pada galvanometer arahnya pun berlawanan yang menunjukkan bahwa arah arus yang terjadi berlawanan juga. Jadi yang terjadi dalam percobaan itu adalah apa yang disebut arus imbas yang dihasilkan oleh tegangan gerak listrik imbas.



Gambar 2.1 Percobaan Arus Induksi^[4]

Dari percobaan seperti telah dijelaskan di atas *Michael Faraday* dapat menyimpulkan bahwa tegangan gerak listrik imbas e didalam sebuah rangkaian listrik adalah sama dengan perubahan *fluks* yang melalui rangkaian-rangkaian tersebut. Jika kecepatan perubahan *fluks* dinyatakan didalam *weber/detik*, maka

^[4] Prih Sumardjati, dkk. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik. Untuk SMK Jilid 3*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Halaman 356.



tegangan gerak listrik e dinyatakan dalam Volt, yang dalam bentuk persamaannya adalah :

$$e = - (d\Phi/dt) \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan persamaan 2.1 dan 2.2

e = ggl induksi (Volt)

$d\Phi/dt$ = Laju perubahan *fluks* magnet

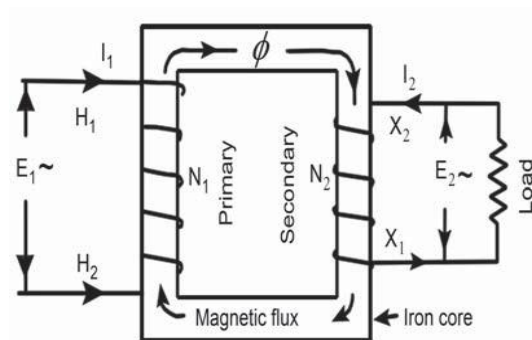
n = Jumlah Lilitan

Persamaan (2.1) ini dikenal dengan hukum *Induksi Faraday*, tanda negatif menunjukkan bahwa arus induksi akan selalu mengadakan perlawanan terhadap yang menghasilkan arus induksi tersebut. Bila koil terdiri dari N Lilitan, tegangan gerak listrik imbas yang dihasilkan merupakan jumlah dari tiap lilitan, dalam bentuk persamaan :

$$e = -N (d\Phi/dt) \dots\dots\dots(2.2)$$

dan $Nd\Phi$ dinamakan tautan fluksi (*Flux Linkages*) didalam alat tersebut.

Untuk dapat membangkitkan tegangan listrik pada kumparan sekunder, *fluks* magnet yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Untuk memenuhi hal ini, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer haruslah aliran listrik bolak-balik (perhatikan Gambar 2.2)



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Transformator^[5]

^[5] <https://dokumen.tips/dokuments/cara-kerja-transformator-komponen-elektronika.html> diakses 26 Juni 2019



Keterangan gambar 2.2 :

E_1 : Tegangan belitan primer E_2 : Tegangan belitan sekunder

H_1 : Polaritas sisi primer (+) H_2 : Polaritas sisi primer (-)

X_1 : Polaritas sisi sekunder (+) X_2 : Polaritas sisi sekunder (-)

Load : Beban

Saat kumparan primer dihubungkan ke sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak magnet bersama yang bolak-balik juga. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, disekitar kumparan primer timbul *fluks* magnet bersama yang juga bolak-balik. Adanya *fluks* magnet bersama ini, pada ujung-ujung kumparan sekunder gaya gerak listrik induksi sekunder akan mungkin sama, lebih tinggi, atau lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini bergantung pada perbandingan transformasi kumparan trafo tersebut.

Jika kumparan sekunder dihubungkan ke beban, maka pada kumparan sekunder timbul arus listrik bolak-balik sekunder akibat adanya gaya gerak listrik induksi sekunder. Hal ini mengakibatkan timbul gaya gerak magnet pada kumparan sekunder dan akibatnya pada beban timbul tegangan sekunder. Kombinasi antar gaya gerak magnet induksi sekunder dan primer disebut induksi silang atau *mutual induction*.

2.3 Konstruksi Transformator^[6]

Pada umumnya konstruksi transformator terdiri atas bagian-bagian sebagai berikut

1. Inti (*core*) yang dilaminasi.
2. Dua buah kumparan, kumparan primer dan sekunder.
3. Tangki.
4. Sistem pendingin.
5. Terminal.
6. *Bushing*.

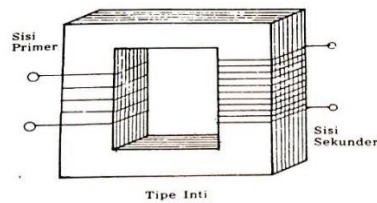
^[6]Ayu Nur Khalifah, 2015. "Analisis Pengaruh Jumlah dan Panjang Kumparan Luar Terhadap Daya Keluaran Pada Hubbard Coil", UIN Maulana Malik Ibrahim, Malang.



Secara umum transformator dapat dibedakan dua jenis menurut konstruksinya

2.3.1. Tipe inti

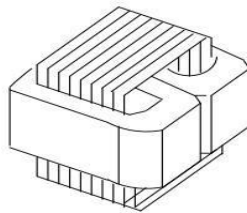
Pada transformator tipe inti, kumparan mengelilingi inti dan konstruksi dari intinya berbentuk huruf L atau huruf U.



Gambar 2.3 Konstruksi Transformator Tipe Inti^[6]

2.3.2. Tipe cangkang

Pada transformator tipe cangkang, kumparan atau belitan transformator dikelilingi oleh inti dan konstruksi intinya berbentuk huruf E, huruf I, dan huruf F..



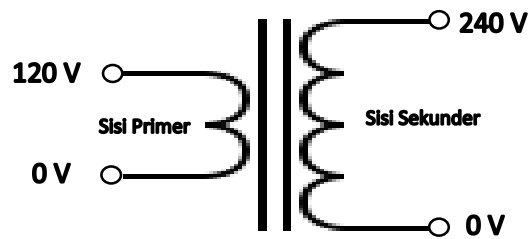
Gambar 2.4 Kontruksi Transformator Tipe Cangkang.^[6]

2.4 Jenis Jenis Transformator

2.4.1. Step Up

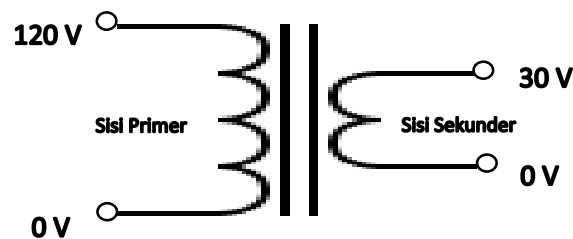
Transformator *step-up* adalah transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih banyak daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penaik tegangan. Transformator ini biasa ditemui pada pembangkit tenaga listrik sebagai penaik tegangan yang dihasilkan generator menjadi tegangan tinggi yang digunakan dalam transmisi jarak jauh

^[6] *Ibid Hal 16*

Gambar 2.5 Lambang Transformator *Step-Up*^[13]

4.4.2. Step Down

Transformator *step-down* memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. Transformator jenis ini sangat mudah ditemui, terutama dalam adaptor AC-DC.

Gambar 2.6 Skema Transformator *Step-Down*^[13]

4.4.3. Autotransformator

Transformator jenis ini hanya terdiri dari satu lilitan yang berlanjut secara listrik, dengan sadapan tengah. Dalam transformator ini, sebagian lilitan primer juga merupakan lilitan sekunder. Fasa arus dalam lilitan sekunder selalu berlawanan dengan arus primer, sehingga untuk tarif daya yang sama lilitan sekunder bisa dibuat dengan kawat yang tipis dibandingkan transformator biasa. Keuntungan dari autotransformator adalah ukuran fisiknya yang cenderung kecil dan kerugian yang lebih rendah daripada jenis dua lilitan. Tetapi transformator

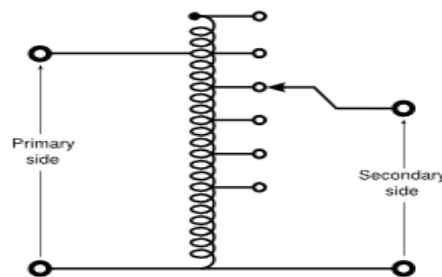
^[13] <http://zhagitolah.blogspot.com/2010/01/jenis-jenis-dan-prinsip-kerja.html?m=1> diakses 30 Juni 2019



jenis ini tidak dapat memberikan isolasi secara listrik antara lilitan primer dengan lilitan sekunder. Selain itu, *autotransformator* tidak dapat digunakan sebagai penaik tegangan lebih dari beberapa kali lipat (biasanya tidak lebih dari 1,5 kali).

4.4.4. *Autotransformator Variabel*

Autotransformator variabel sebenarnya adalah *autotransformator* biasa yang sadapan tengahnya bisa diubah-ubah, memberikan perbandingan lilitan primer-sekunder yang berubah-ubah.



Gambar 2.7 Skema *Autotransformator Variabel*^[13]

4.4.5. Transformator Isolasi

Transformator isolasi memiliki lilitan sekunder yang berjumlah sama dengan lilitan primer, sehingga tegangan sekunder sama dengan tegangan primer. Tetapi pada beberapa desain, gulungan sekunder dibuat sedikit lebih banyak untuk mengkompensasi kerugian. Transformator seperti ini berfungsi sebagai isolasi antara dua kalang. Untuk penerapan audio, transformator jenis ini telah banyak digantikan oleh kopling kapasitor.

4.4.6. Transformator Pulsa

Transformator pulsa adalah transformator yang didesain khusus untuk memberikan keluaran gelombang pulsa. Transformator jenis ini menggunakan material inti yang cepat jenuh sehingga setelah arus primer mencapai titik tertentu,

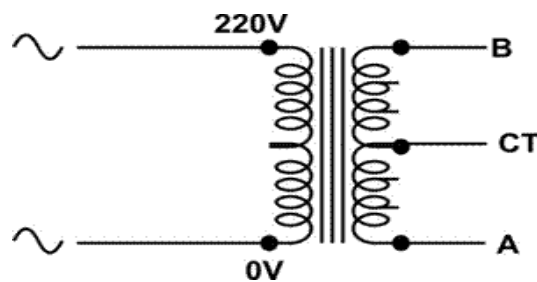
^[13] <http://zhagitoleh.blogspot.com/2010/01/jenis-jenis-dan-prinsip-kerja.html?m=1> diakses 30 Juni 2019



fluks magnet berhenti berubah. Karena GGL induksi pada lilitan sekunder hanya terbentuk jika terjadi perubahan *fluks* magnet, transformator hanya memberikan keluaran saat inti tidak jenuh, yaitu saat arus pada lilitan primer berbalik arah.

2.4.7 Transformator Center Tap

Transformator Center Tap adalah salah satu jenis transformator yang mempunyai dua gulungan sekunder yang sama dan terhubung secara seri. dengan kata lain transformator yang mempunyai gulungan sekunder yang di-tap (dibuat terminal sambungan) tepat pada titik tengah gulungannya, itulah sebabnya ada sebutan “center tap” yang berarti “tap tengah” transformator jenis ini



Gambar 2.8 Transformator Center Tap^[14]

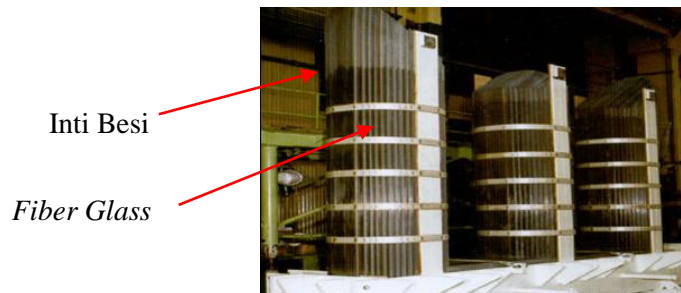
2.5 Bagian-bagian Transformator^[7]

2.5.1 Inti besi

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalannya *fluks*, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis yang saling diisolasi, untuk mengurangi rugi rugi daya (dalam bentuk *thermal*) yang ditimbulkan oleh adanya rugi rugi hysteresis dan rugi rugi akibat arus pusar (*eddy current*).

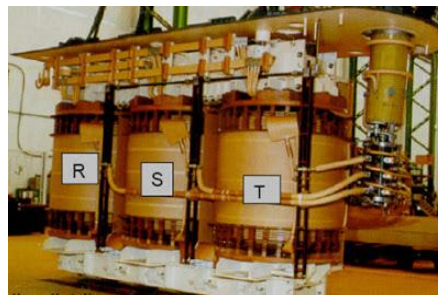
^[14] <http://www.elektronikasport.com/2015/01/transformator-ct-dari-transformator-html?m=1> diakses 12 Juli 2019

^[7] https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA, diakses pada 23 Juni 2019

Gambar 2.9 Inti Besi dan Laminasi yang diikat *Fiber Glass* ^[8]

2.5.2 Kumparan

Beberapa lilitan kawat pada inti besi membentuk suatu kumparan, dan kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain. Pada transformator terdapat kumparan primer, kumparan sekunder dan kumparan tersier.

Gambar 2.10. Kumparan Fasa RST^[8]

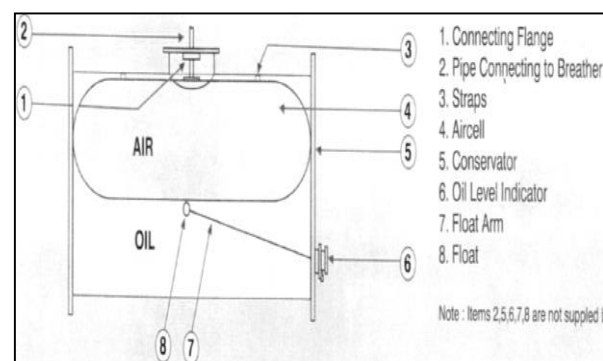
2.5.3 Tangki Konservator

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 2.11(a) digunakan untuk menampung minyak pada saat transformator mengalami kenaikan suhu.

^[8] Ariasatu.2019,*Peralatan Gardu Induk 3* ,<https://ariasayi.wordpress.com/2019>.diakses 22 Juni 2019

Gambar 2.11 (a)(Tangki Konservator^[1])Gambar 2.11(b) Silicagel^[1]

Seiring dengan naik turunnya volume minyak di konservator akibat pemuain 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 2.11(b). 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 2.12 Konstruksi Konservator dengan *Rubber Bag*^[1]

^[1] Ikhsanuddin, 2010. *Laporan Akhir Studi Efisiensi Transformator Daya di Gardu Induk Payageli PT PLN (Persero)*, Universitas Sumatera Utara Hal 14-15



2.5.4 Tap Changer ^[1]

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*.

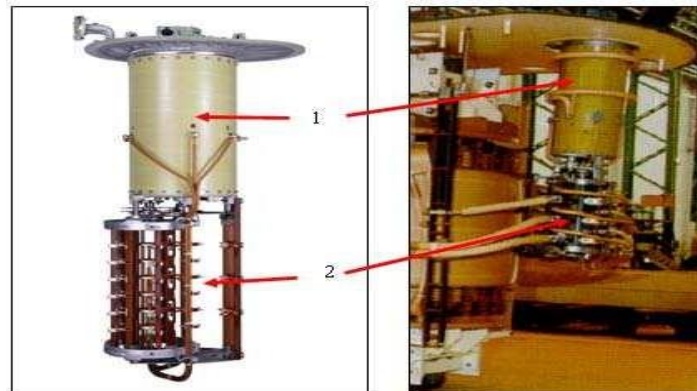
Proses perubahan perbandingan belitan ini dapat dilakukan pada saat transformator sedang berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*).

Tap changer sendiri terdiri dari

1. *Selector switch*,
2. *Diverter switch*, dan
3. 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. Perhatikan gambar yang ditunjuk anak panah dibawah ini yang merupakan keterangan gambar 2.13 dimana, 1 adalah *diverter switch* dan 2 adalah *selektor switch*

^[1] *Ibid.*, Hal 17.

Gambar 2.13 OLTC Pada Transformator^[1]

2.5.5 Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator yang dipasang pada transformator. Indikator tersebut adalah sebagai berikut:

- indikator suhu minyak
- indikator permukaan minyak
- indikator sistem pendingin
- indikator kedudukan tap, dan sebagainya.

Gambar 2.14(a) Indikator Minyak^[11] Gambar 2.14(b) Indikator Suhu^[11]

^[1] loc.cit

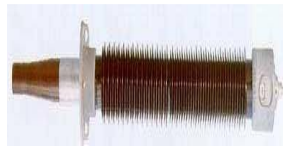
^[11]Suci Siswandari,2016, "Studi Efisiensi Transformator Daya 54 MVA 11/11/150KV di PT PLN (Persero) Sektor Pembangunan Keramasan Palembang" Palembang Hal 21



2.5.6 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.



2.15 Bushing^[1]

2.5.7 Minyak Transformator

Sebagian besar kumparan-kumparan 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.



Gambar 2.16 Minyak Isolasi Trafo Tenaga^[11]

^[1] *op.cit.*, Hal 14

^[11] *op.cit.*, Hal 14



Untuk spesifikasi yang dipersyaratkan seperti tampak pada Tabel 2.1 di bawah ini.

Tabel 2.1 Spesifikasi Minyak Isolasi Baru^[7]

No	Sifat Minyak Isolasi	Satuan	Klas I/ Klas II	Metode Uji	Tempat Uji
1	Kejernihan	-	Jernih	IEC 296	Di tempat
2	Masa Jenis (20°C)	g/cm ³	< 0,895	IEC 296	Lab
3	Vikositas (20°C)	cSt	< 40 < 25	IEC 296	Lab
	Kinematik – (15°C)	cSt	< 800		
	Kinematik - (30°C)	cSt	<1800		
4	Titik Nyata	°C	>140 > 100	IEC 296A	Lab
5	Titik Tuang	°C	< 30 < 40	IEC296A	Lab
6	Angka Kenetralan	MgKOH/g	< 0,03	IEC 296	Lab
7	Korosi Belerang	-	Tidak Korosif	IEC 296	Ditempat/ Lab
8	Tegangan Tembus	KV/2,5 mm	>30 >50	IEC 1568 IEC 296	Ditempat/ Lab
9	Faktor Kebocoran Dielektrik	-	< 0,05	IEC 250 IEC 474 & IEC 74	Lab
10	Ketahanan Oksidasi	mgKOH/ 9%		IEC 74	Lab
	a. Angka Kenetralan		< 0,40		
	b. Kotoran		< 0,10		

^[7] https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA, diakses pada 23 Juni 2019



Untuk minyak isolasi yang sudah terpakai, transformator berkapasitas >1 MVA dan bertegangan >30 kV, spesifikasi yang dipersyaratkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi Minyak Isolasi Pakai^[7]

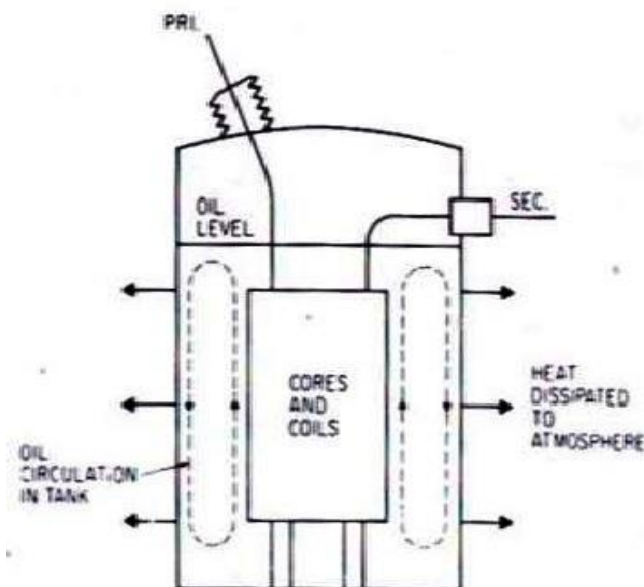
No	Sifat Minyak Isolasi	Tegangan Peralatan	Batas yang diperbolehkan	Metode Uji	Tempat Uji
1	Tegangan tembus	>170 KV 70. 170 KV	>50 KV/ 2,5 mm	IEC 156 ISO 760	Ditempat/ Lab
2	Kandungan Air	< 70 KV >170 KV < 70 KV	>30 KV/ 2,5 mm < 20 mg/L < 30 mg/L	IEC 93 & IEC 250 (90°)	Lab
3	Faktor	All Voltage	< 0,2 – 2,0	IEC 93 & IEC 247	Lab
4	Dielektrik Tahanan Jenis	All Voltage	G/mm	IEC 93 & IEC 247	Lab
5	Angka Kenetralan	All Voltage	< 0,5 mg/KOH	IEC 296	Lab
6	Sedimen		Tidak terukur penurunan	IEC 296	Lab
7	Titik Nyata		Maksimum 15°C	IEC 296	Lab
8	Tegangan Permukaan	>170 KV	>15 x 10 ³ Nm ⁻¹	Sedang dikerjakan IEC	Dalam proses pengerjaan IEC
9	Kandungan Gas			Sedang dikerjakan IEC	Dalam proses pengerjaan IEC

^[7] https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA, diakses pada 23 Juni 2019



2.5.8 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.



Gambar 2.17 Pendinginan pada Transformator ^[7]

^[7] https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA, diakses pada 23 Juni 2019

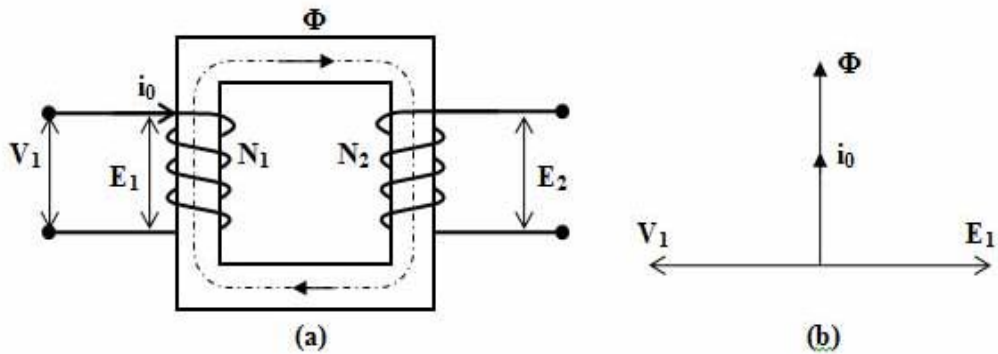
Tabel 2.3 Tipe Pendinginan Trafo ^[7]

No	Macam sistem pendingin	Media				Singkatan
		Didalam transformator		Diluar Transformator		
		Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	Sirkulasi alami	Sirkulasi paksa	
1	<i>AN</i>	-	-	Udara	-	<i>Air Natural</i>
2	<i>AF</i>	-	-	-	Udara	<i>Air Forced</i>
3	<i>ONAN</i>	Minyak	-	Udara	-	<i>Oil Natural</i> <i>Air Natural</i>
4	<i>ONAF</i>	Minyak	-	-	Udara	<i>Oil Natural</i> <i>Air Forced</i>
5	<i>OFAN</i>	-	Minyak	Udara	-	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
6	<i>OFAF</i>	-	Minyak	-	Udara	<i>Oil Forced</i> <i>Air Forced</i>
7	<i>OFWF</i>	-	Minyak	-	Air	<i>Oil Forced</i> <i>Water Forced</i>
8	<i>ONAN/ONAF</i>	Kombinasi 3 dan 4				
9	<i>ONAN/OFAN</i>	Kombinasi 3 dan 5				
10	<i>ONAN/OFAF</i>	Kombinasi 3 dan 6				
11	<i>ONAN/OFWF</i>	Kombinasi 3 dan 7				

^[7] https://www.academia.edu/9900561/BAB_I_TRANSFORMATOR_DAYA, diakses pada 23 Juni 2019



2.6 Transformator Tanpa Beban^[9]

Gambar 2.18(a) Trafo tanpa beban^[9]Gambar 2.18(b) Hubungan antara I_0

Φ , E_1 , dan V_1 ^[9]

Keterangan gambar 2.18(a) dan 2.18(b) :

E_1 : Tegangan belitan primer

E_2 : Tegangan belitan sekunder

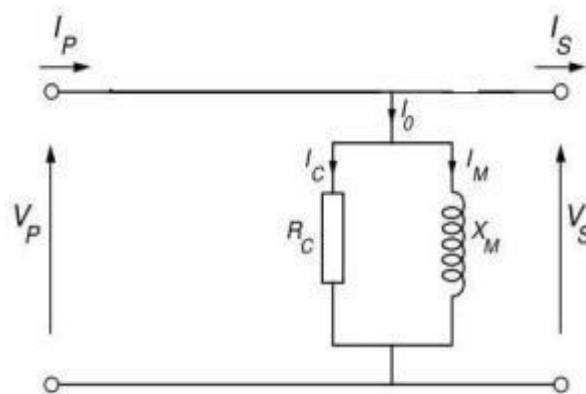
N_1 : Belitan primer

N_2 : Belitan sekunder

I_0 : Arus primer

V_1 : Tegangan primer

φ : fluks Magnet

Gambar 2.19 Ragkaian Ekivalen Transformator Tanpa Beban^[11]

^[9] Zuhail. 1995. *Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*. Bandung: ITB Bandung. Halaman 44-45

^[11] *op.cit.*, Hal 23



Keterangan gambar 2.19 :

V_p	: Tegangan Primer	V_s	: Tegangan sekunder
I_p	: Arus Primer	I_s	: Arus sekunder
I_M	: Arus Pemagnetan	R_c	: Hambatan inti
X_M	: Reaktansi pemagnitan		

Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer I_o yang juga sinusoid dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni, I_o akan tertinggal 90° dari V_1 (gambar 2.18.b). Arus primer I_o menimbulkan *fluks* (Φ) yang sefasa juga berbentuk sinusoidal.

$$\Phi = \Phi_{\text{maks}} \sin \omega t \dots\dots\dots (2.3)$$

Fluks yang sinusoid ini akan menghasilkan tegangan induksi e_1 (*Hukum Faraday*)

$$e_1 = - N_1 \cdot \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

$$e_1 = - N_1 \cdot \left(\frac{d(\Phi_{\text{maks}} \sin \omega t)}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

$$e_1 = -N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cdot \cos \omega t \text{ (tertinggal } 90^\circ \text{ dari } \Phi) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$\text{harga efektifnya adalah } E_1 = \left(\frac{N_1 \cdot 2 \pi f \Phi_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

$$E_1 = 4.44 n_1 \cdot f \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.8)$$

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

$$e_1 = - N_2 \cdot \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$e_1 = - N_2 \cdot \omega \cdot \Phi_{\text{maks}} \cdot \cos \omega t \dots\dots\dots (2.10)$$

$$E_2 = 4.44 N_2 \cdot f \Phi_{\text{maks}} \dots\dots\dots (2.11)$$



sehingga $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2}$ (2.12)

Dengan mengabaikan rugi tahanan dan adanya *fluks* bocor,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{(2.13)}$$

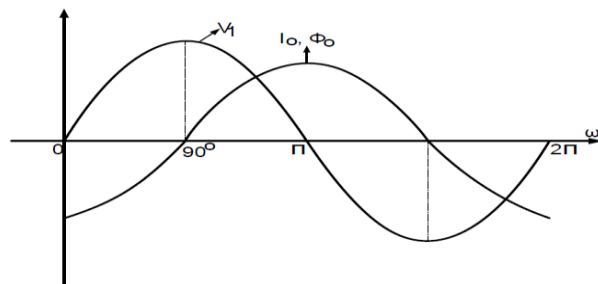
a = perbandingan transformasi

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

Dimana :

e_1 : gaya gerak listrik (Volt) N_1 : jumlah belitan di sisi primer (*turn*)

ω : kecepatan sudut putar (rad/sec) Φ : *fluks* magnet (*weber*)



Gambar 2.20 Gelombang I_o Tertinggal 90° Dari $V^{[11]}$

Keterangan gambar 2.20 :

I_o : Arus Tembaga

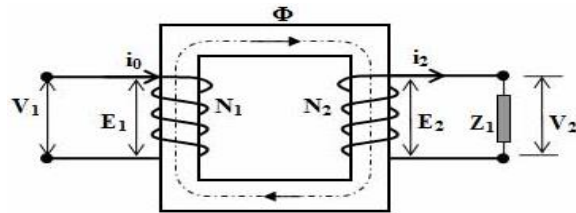
ωt : Frekuensi sudut (rad/sec)

2.7 Transformator Keadaan Berbeban^[9]

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , I_2 mengalir pada kumparan sekunder dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan q_2 = faktor kerja beban.

^[11] *Ibid.*, Hal 24

^[9] *op.cit.*, Hal 46-47



Gambar 2.21 Transformator dalam Keadaan Berbeban^[9]

Keterangan Gambar 2.21 :

Zl : Impedansi (ohm)

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang *fluks* (Φ) 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 *fluks* yang dibangkitkan oleh arus beban I_2 , hingga keseluruhan arus yang mengalir pada kumparan primer menjadi :

$$I_1 = I_0 + I'_2 \dots\dots\dots(2.14)$$

Bila rugi besi diabaikan (I_c diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I'_2 \dots\dots\dots (2.15)$$

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

$$N_1 I_M = N_1 I_1 - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.16)$$

$$N_1 I_M = N_1 (I_1 - I'_2) - N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.17)$$

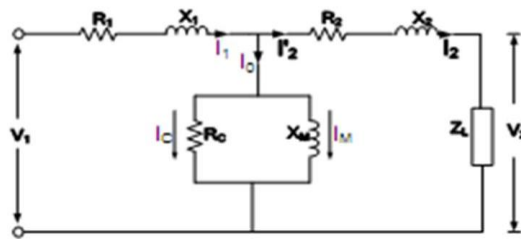
$$\text{Hingga } N_1 I'_2 = N_2 I_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Karena nilai I_M dianggap kecil maka :

$$I_1 = I'_2 \dots\dots\dots (2.19)$$

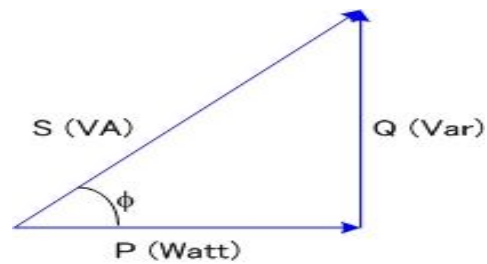
$$\text{Jadi } \rightarrow \frac{N_1}{I_1} \cdot \frac{N_2}{I_2} = \text{atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.20)$$

^[9] Loc.cit

Gambar 2.22 Rangkaian Ekivalen Transformator Berbeban ^[9]

2.8 Segitiga Daya^[10]

Segitiga daya adalah suatu hubungan antara daya nyata, daya semu, dan daya reaktif, yang dapat dilihat hubungannya pada gambar bentuk segitiga berikut ini :

Gambar 2.23 Segitiga Daya^[10]

Daya Listrik dibagi menjadi 3 bagian yaitu sebagai berikut :

- Daya Nyata (P)

Daya nyata merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya.

$$P = V \times I \cos \phi \text{ (1 fasa) } \dots\dots\dots(2.21)$$

$$P = \sqrt{3} V \times I \cos \phi \text{ (3 fasa) } \dots\dots\dots(2.22)$$

^[9] Ibid Hal 49

^[10] <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/54608/3/Chapter%20II.pdf>. diakses 22 Juni 2019



$$P_1 = P_2 = V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s \dots\dots\dots (2.23)$$

- Daya Semu (S)

Daya semu merupakan daya listrik yang melalui suatu penghantar transmisi atau distribusi. Daya ini merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus yang melalui penghantar.

$$S = \sqrt{3} V \times I \text{ (3 fasa) (VA)} \dots\dots\dots (2.24)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (2.25)$$

- Daya Reaktif (Q)

Daya reaktif merupakan selisih antara daya semu yang masuk pada penghantar dengan daya aktif pada penghantar itu sendiri, dimana daya ini terpakai untuk daya mekanik dan panas..

$$Q = V \times I \text{ Sin } \phi \text{ (1 fasa) } \dots\dots\dots (2.26)$$

$$Q = \sqrt{3} V \times I \text{ Cos } \phi \text{ (3 fasa) } \dots\dots\dots (2.27)$$

2.9 Rugi-rugi Transformator^[15]

Rugi – rugi transformator terbagi menjadi dua antara lain sebagai berikut:

2.9.1 Rugi Variabel

Rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga $P_{CU} = I^2R$. Karena arus beban berubah-ubah, rugi tembaga juga tidak tetap tergantung pada beban.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.28)$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.29)$$

^[15] Khoirun Yassir. 2018. Laporan Akhir. "Analisa Pengaruh Rugi-rugi terhadap Efisiensi transformator step down 30 MVA 70/20 KV Menggunakan ETAP 16.0 di Gardu Induk Bukit Siguntang" Palembang. Hal 22



Dengan demikian rugi tembaga total :

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2}$$

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \dots \dots \dots (2.30)$$

Karena $I_2 = a I_1$, maka persamaan dapat juga ditulis dengan

$$\begin{aligned} P_{cu} &= I_1^2 R_1 + (a I_1)^2 R_2 \\ &= I_1^2 (R_1 + a^2 R_2) \\ &= I_1^2 R_{ek1} \text{ atau dapat ditulis} \end{aligned}$$

$$P_{cu} = I_2^2 R_{ek2} \dots \dots \dots (2.31)$$

Jumlah total rugi-rugi pada transformator adalah :

$$P_{rugi \text{ total}} = \text{Rugi-rugi Cu} + \text{Rugi inti} \dots \dots \dots (2.32)$$

Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban dapat ditentukan dengan persamaan :

$$P_{t2} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \times P_{t1} \dots \dots \dots (2.33)$$

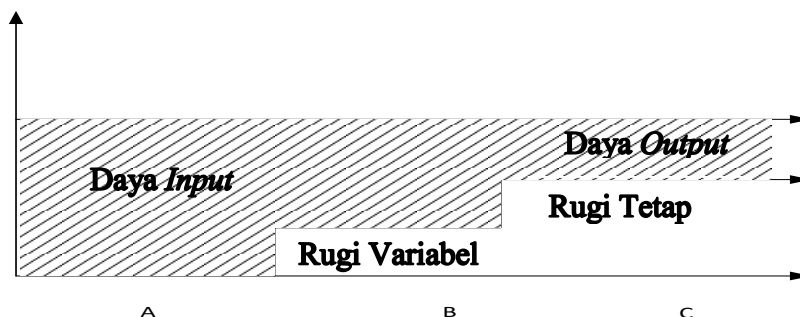
Keterangan :

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



Gambar 2.24 Rugi-rugi Transformator^[15]

^[15] Ibid., Hal 23.



$$\eta_{listrik} = \frac{C}{B} \times 100\% \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\eta_{mekanik} = \frac{B}{A} \times 100\% \dots\dots\dots(2.35)$$

$$\eta_{Trafo} = \eta_{listrik} \times \eta_{mekanik} = \frac{C}{B} \times \frac{B}{A} = \frac{C}{A} = \frac{P_o}{P_{in}} \dots\dots\dots(2.36)$$

2.9.2 Rugi Tetap^[9]

Rugi tetap terdiri atas :

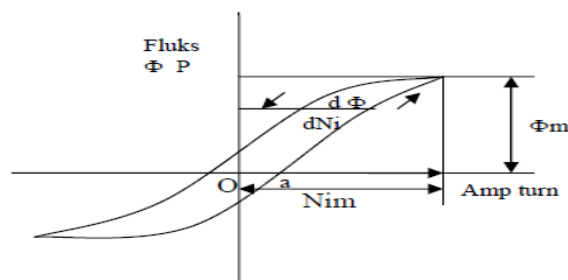
a. **Rugi histerisis**, yaitu rugi yang disebabkan *fluks* bolak-balik pada inti besi.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks} \text{ watt} \dots\dots\dots(2.37)$$

Dimana :

K_h = konstanta

B_{maks} = *fluks* maksimum (*weber*)



Gambar 2.25 Lingkaran Histerisis^[9]

b. **Rugi ‘Arus Eddy’**, yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada besi inti.

$$P_e = K_e^2 \cdot f^2 \cdot B_{maks} \dots\dots\dots(2.38)$$

$$\text{Jadi, rugi besi (rugi inti) } P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots(2.39)$$

2.10 Efisiensi Transformator^[15]

Efisiensi transformator adalah perbandingan antara keluaran daya yang berguna dan masuk daya total. Karena masukan ke transformator sama dengan

^[9] Loc.cit

^[15] op.cit.,Hal 24



keluaran daya yang berguna ditambah kerugiannya, maka persamaan efisiensi dapat ditulis dalam bentuk sebagai berikut :

$$\text{Daya keluaran} = \text{daya input} - \text{kerugian} \dots \dots \dots (2.40)$$

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.41)$$

Atau

$$\eta = \frac{\text{daya keluaran}}{\text{daya keluaran} + \Sigma_{rugi}} \dots \dots \dots (2.42)$$

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma_{rugi}}{\text{daya masukan}} \times 100\% \dots \dots \dots (2.43)$$

Dari persamaan di atas, jelaslah bahwa efisiensi transformator dapat ditentukan untuk setiap beban dengan pengukuran langsung daya masukannya dan daya keluarannya.

2.10.1 Perubahan Efisiensi Terhadap Beban^[9]

$$\eta = \frac{V_2 \cos \varphi}{V_2 \cos \varphi + I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}} \dots \dots \dots (2.44)$$

Agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} \left(I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2} \right) = 0 \dots \dots \dots (2.45)$$

$$\text{Jadi, } R_{2ek} = \frac{P_i}{I_2}$$

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{Cu}$$

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

Untuk menentukan besarnya beban yang dioperasikan pada saat efisiensi maksimum, berlaku :

^[9] op.cit.,Hal 55



$$W_{ef \text{ maks}} = \sqrt{\frac{\text{Rugi-rugi besi}}{\text{Rugi-rugi tembaga beban penuh}}} \times \text{Beban penuh} \dots\dots\dots(2.46)$$

2.10.2 Perubahan Efisiensi Terhadap Paktor Kerja (cosΦ) Beban^[9]

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \text{rugi}}{V_2 I_2 \cos \phi + \Sigma \text{rugi}} \dots\dots\dots(2.47)$$

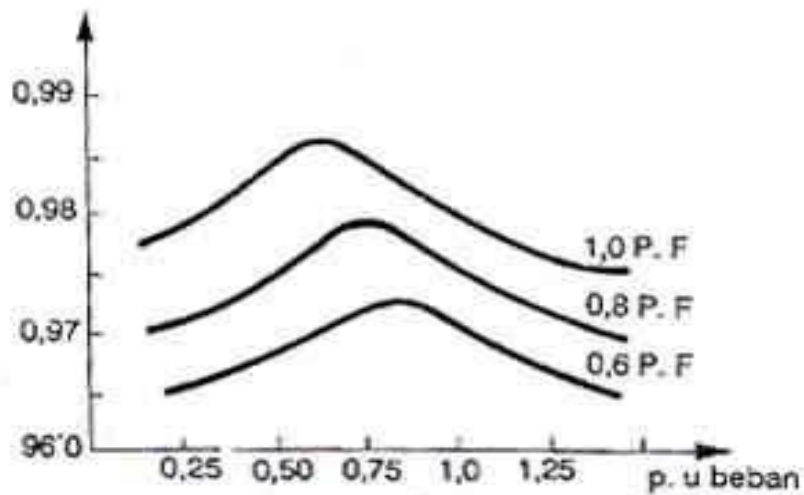
$$\eta = 1 - \Sigma \text{rugi} / V_2 I_2^2 \dots\dots\dots(2.48)$$

Bila $\Sigma \text{rugi} / V_2 I_2 = x = \text{konstanta}$

$$\text{Maka } \eta = 1 - \frac{x}{\cos \phi + x} \dots\dots\dots(2.49)$$

$$\eta = 1 - \frac{x / \cos \phi}{1 + x \cos \phi} \dots\dots\dots(2.50)$$

Hubungan antara efisiensi dengan beban pada cos Φ yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.26 Hubungan antara efisiensi dengan beban pada cos Φ yang berbeda-beda^[9]

^[9] Ibid., Hal 56



2.11 Program MATLAB^[12]

MATLAB adalah sebuah bahasa dengan (*high-performance*) kinerja tinggi untuk komputasi masalah teknik. Matlab mengintegrasikan komputasi, visualisasi, dan pemrograman dalam suatu model yang sangat mudah untuk pakai dimana masalah-masalah dan penyelesaiannya diekspresikan dalam notasi matematika yang familiar. Penggunaan Matlab meliputi bidang–bidang:

- Matematika dan Komputasi
- Pembentukan Algoritma
- Akuisisi Data
- Pemodelan, simulasi, dan pembuatan prototipe
- Analisa data, explorasi, dan visualisasi
- Grafik Keilmuan dan bidang Rekayasa

MATLAB merupakan suatu sistem interaktif yang memiliki elemen data dalam suatu *array* sehingga tidak lagi kita dipusingkan dengan masalah dimensi. Hal ini memungkinkan kita untuk memecahkan banyak masalah teknis yang terkait dengan komputasi, khususnya yang berhubungan dengan matrix dan formulasi vektor, yang mana masalah tersebut merupakan momok apabila kita harus menyelesaikannya dengan menggunakan bahasa level rendah seperti *Pascal*, *C* dan *Basic*.

Nama MATLAB merupakan singkatan dari *matrix laboratory*. MATLAB pada awalnya ditulis untuk memudahkan akses perangkat lunak matrik yang telah dibentuk oleh LINPACK dan EISPACK. Saat ini perangkat MATLAB telah menggabung dengan LAPACK dan BLAS *library*, yang merupakan satu kesatuan dari sebuah seni tersendiri dalam perangkat lunak untuk komputasi matrix.

Dalam lingkungan perguruan tinggi teknik, Matlab merupakan perangkat standar untuk memperkenalkan dan mengembangkan penyajian materi matematika,

^[12] Widiarsono.W.Teguh,M.T, *Tutorial Praktis Belajar Matlab*



rekayasa dan kelimuan. Di industri, MATLAB merupakan perangkat pilihan untuk penelitian dengan produktifitas yang tinggi, pengembangan dan analisisnya.

Fitur-fitur MATLAB sudah banyak dikembangkan, dan lebih kita kenal dengan nama *toolbox*. Sangat penting bagi seorang pengguna Matlab, *toolbox* mana yang mendukung untuk *learn* dan *apply* teknologi yang sedang dipelajarinya. *Toolbox toolbox* ini merupakan kumpulan dari fungsi-fungsi MATLAB (*M-files*) yang telah dikembangkan ke suatu lingkungan kerja MATLAB untuk memecahkan masalah dalam kelas particular. Area-area yang sudah bisa dipecahkan dengan *toolbox* saat ini meliputi pengolahan sinyal, sistem kontrol, NN (*neural networks*), *fuzzy logic*, *wavelets*, dan lain-lain.

2.11.1 Kelengkapan pada Sistem MATLAB

Sebagai sebuah system, MATLAB tersusun dari 5 bagian utama:

- ***Development Environment***. Merupakan sekumpulan perangkat dan fasilitas yang membantu anda untuk menggunakan fungsi-fungsi dan file-file MATLAB. Beberapa perangkat ini merupakan sebuah *graphical user interfaces (GUI)*. Termasuk didalamnya adalah MATLAB desktop dan *Command Window*, *command history*, sebuah editor dan *debugger*, dan *browsers* untuk melihat *help*, *workspace*, *files*, dan *search path*.
- ***MATLAB Mathematical Function Library***. Merupakan sekumpulan algoritma komputasi mulai dari fungsi-fungsi dasar seperti: *sum*, *sin*, *cos*, dan *complex arithmetic*, sampai dengan fungsi-fungsi yang lebih kompleks seperti *matrix inverse*, *matrix eigenvalues*, *Bessel functions*, dan *fast Fourier transforms*.
- ***MATLAB Language***. Merupakan suatu *high-level matrix/array language* dengan *control flow statements*, *functions*, *data structures*, *input/output*, dan fitur-fitur *object-oriented programming*. Ini memungkinkan bagi kita untuk melakukan kedua hal baik "pemrograman dalam lingkup sederhana " untuk



mendapatkan hasil yang cepat, dan "pemrograman dalam lingkup yang lebih besar" untuk memperoleh hasil-hasil dan aplikasi yang kompleks.

- **Graphics.** MATLAB memiliki fasilitas untuk menampilkan vector dan matrix sebagai suatu grafik. Didalamnya melibatkan *high-level functions* (fungsi-fungsi level tinggi) untuk visualisasi data dua dimensi dan data tiga dimensi, *image processing*, *animation*, dan *presentation graphics*. Ini juga melibatkan fungsi level rendah yang memungkinkan bagi anda untuk membiasakan diri untuk memunculkan grafik mulai dari bentuk yang sederhana sampai dengan tingkatan *graphical user interfaces* pada aplikasi MATLAB anda.
- **MATLAB Application Program Interface (API).** Merupakan suatu *library* yang memungkinkan program yang telah anda tulis dalam bahasa C dan Fortran mampu berinteraksi dengan MATLAB. Ini melibatkan fasilitas untuk pemanggilan routines dari MATLAB (*dynamic linking*), pemanggilan MATLAB sebagai sebuah *computational engine*, dan untuk membaca dan menuliskan MAT-files.

2.11.2 LANGKAH PERCOBAAN

- **Memulai Matlab**

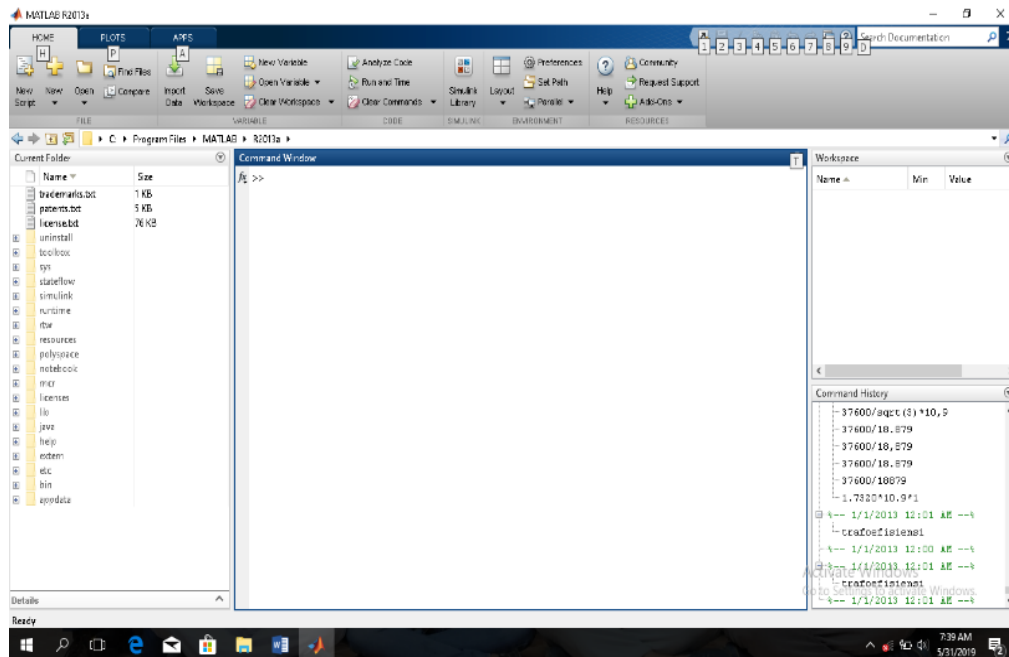
Perhatikan Dekstop pada layar monitor PC, anda mulai MATLAB dengan melakukan *double-clicking* pada *shortcut icon* MATLAB



Gambar 2.27 Logo Matlab ^[16]

Selanjutnya anda akan mendapatkan tampilan seperti pada gambar berikut ini.

^[16] Software Matlab 2013

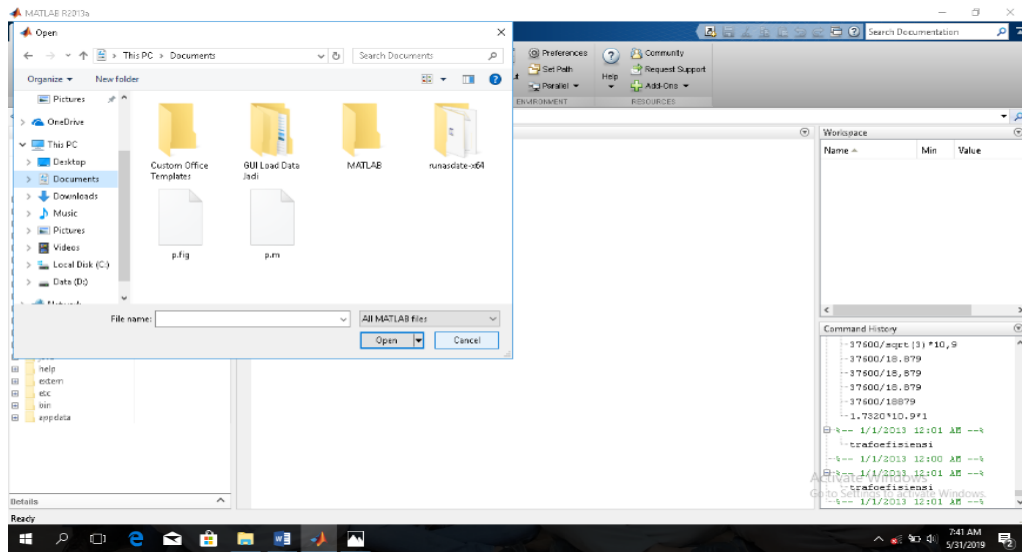
Gambar 2.28 Tampilan awal Matlab^[16]

Sedangkan untuk mengakhiri sebuah sesi MATLAB, anda bisa melakukan dengan dua cara, pertama pilih **File -> Exit MATLAB** dalam window utama MATLAB yang sedang aktif, atau cara kedua lebih mudah yaitu cukup ketikkan type **quit** dalam *Command Window*.

- **Menentukan Direktori Tempat Bekerja**

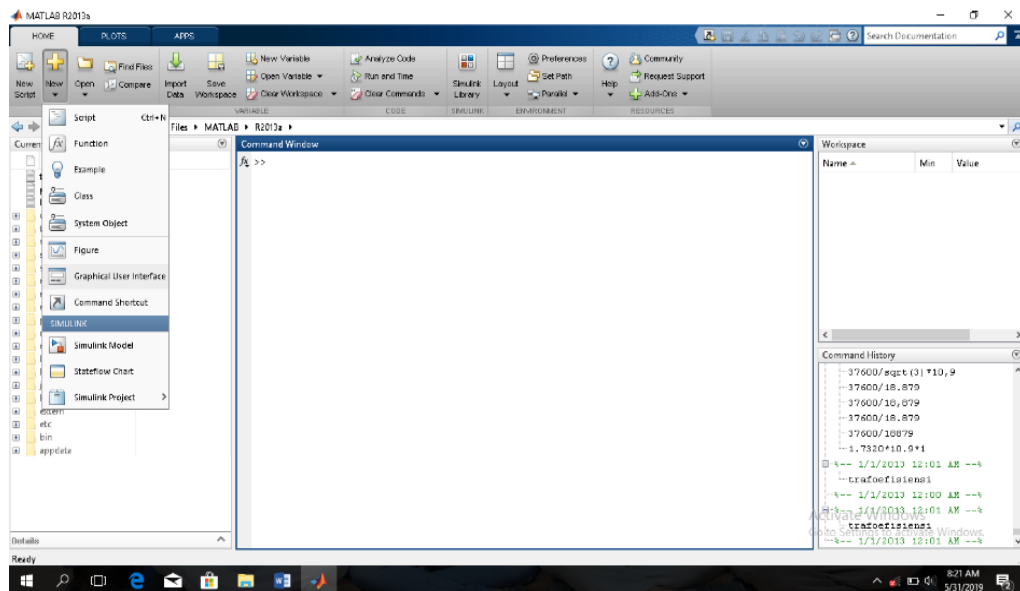
Anda dapat bekerja dengan MATLAB secara *default* pada *directory Work* ada di dalam Folder MATLAB. Tetapi akan lebih bagus dan rapi jika anda membuat satu *directory* khusus dengan nama yang sudah anda kususkan, “*dargombes*” atau nama yang lain yang mudah untuk diingat. Hal ini akan lebih baik bagi anda untuk membiasakan bekerja secara rapi dan tidak mencampur program yang anda buat dengan program orang lain. Untuk itu Arahkan *pointer mouse* anda pada kotak bertanda ... yang ada disebelah kanan tanda panah kebawah (yang menunjukkan folder yang sedang aktif). Pilih *new directory*, selanjutnya ketikkan “*dargombes*”, dan diikuti dengan click *Ok*.

^[16] Software Matlab 2013

Gambar 2.29. Membuat Folder baru tempat program^[16]

2.11.3 Menyusun Program Sederhana

Anda dapat mengedit suatu *file text* yang tersusun dari beberapa perintah Matlab. Ini dapat dilakukan dengan menekan *new* selanjutnya pada icon " *Script* "

Gambar 2.30. Langkah awal menyusun program sederhana^[16]

^[16] Software Matlab 2013



Selanjutnya buat program yang diinginkan, sebagai contoh

```

1  a=input('Masukkan Sumber Tegangan=');
2  b=input('Beban ( watt )=');
3  i=a/b;
4  P=b;
5  S=a*i;
6  Q=sqrt(S^2-b^2);
7  cos_phi=b/(a*i);
8  disp(['I = ',num2str(i),'Ampere']);
9  disp(['P = ',num2str(b),'Watt']);
10 disp(['S = ',num2str(S),'VA']);
11 disp(['Q = ',num2str(Q),'VAR']);
12 c=input('Masukkan cos phi yang diinginkan=');
13 Ip=P/(a*c);
14 Pp=a*b*c;
15 Sp=a*I*p;
16 Qp=sqrt(Sp^2-Pp^2);
17 C=Qp/(-a^2*3.14);
18 disp(['I = perbaikan ',num2str(Ip),'Ampere']);
19 disp(['P = perbaikan ',num2str(Pp),'Watt']);
20 disp(['S = perbaikan ',num2str(Sp),'VA']);
21 disp(['Q = perbaikan ',num2str(Qp),'VAR']);
22 disp(['Jadi Kapasitor yang harus dipasang=',num2str(C),'Farad']);
23 jawab=input('Kembali Kemenu awal ? y/t)->');
24 disp(['Note:Jika jawab t maka program akan keluar']);
25 end
26 jawab='t';
27 while jawab == 't',exit
28     end
29 return
30

```

Gambar 2.31. Contoh penulisan program pada Matlab Editor ^[16]

Lanjutkan dengan menekan *toolbar Debug*, dan jangan lupa anda pilih *Save* anda *Run*. Disitu anda harus menuliskan nama program. Anda tuliskan *coba_1*, secara otomatis akan menjadi file *coba_1.m* dan akan anda lihat tampilan hasilnya.

^[16] Software Matlab 2013