

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Jaringan Distribusi

Sistem jaringan distribusi tenaga listrik merupakan bagian dari penyaluran tenaga listrik dari gardu induk sampai ke konsumen tenaga listrik. Terdapat dua sistem jaringan distribusi, yaitu sistem jaringan distribusi primer dan sekunder. Kedua sistem tersebut dibedakan berdasarkan tegangan kerjanya. Pada umumnya, tegangan kerja sistem jaringan distribusi primer adalah 20 kV, sedangkan tegangan kerja sistem jaringan distribusi sekunder adalah 380/220 V. Hal yang harus diperhatikan dalam sistem distribusi adalah sebagai berikut :

1. Regulasi tegangan, yaitu variasi tegangan pelayanan harus pada batas-batas yang diijinkan maksimum 5% dan minimum 10% (SPLN 1, 1995).
2. Kontinuitas pelayanan serta pengamanan, yaitu tidak sering terjadi pemadaman listrik karena gangguan. Hal tersebut dapat dicapai dengan sistem pengamanan dengan peralatan pengaman, pentanahan, dsb.
3. Efisiensi sistem distribusi listrik, yaitu menekan serendah mungkin rugi-rugi teknis dengan pengoperasian dan pemilihan peralatan yang baik, juga menekan rugi-rugi non teknis dengan mencegah kesalahan pengukuran dan pencurian. (I Made Aditya Nugraha)

Permasalahan yang terjadi pada transformator distribusi antara lain :

1. Pemeliharaan transformator distribusi yang tidak teratur akan memudahkan terjadinya kerusakan sehingga akan menimbulkan pemadaman yang mengakibatkan kerugian.
2. Penggunaan kapasitas transformator distribusi yang tidak sesuai dengan kebutuhan beban akan menyebabkan sistem menjadi tidak ekonomis.

3. Penempatan transformator distribusi yang tidak tepat atau diletakkan terlalu jauh dari konsumen akan menyebabkan tegangan jatuh yang besar sehingga tegangan pada konsumen menjadi turun.

2.1.1 Perencanaan Transformator Distribusi Secara Optimal

Kebutuhan akan energi listrik dari pelanggan selalu bertambah dari waktu ke waktu. Untuk tetap dapat melayani kebutuhan tenaga listrik dari para pelanggan, maka sistem tenaga listrik haruslah dikembangkan seiring dengan kenaikan kebutuhan tenaga listrik dari pelanggan.

Perencanaan transformator distribusi mempunyai peranan yang amat penting dalam usaha-usaha pembangunan, perbaikan dan pengembangan sistem distribusi guna memenuhi kebutuhan akan tenaga listrik yang terus meningkat. Perencanaan transformator distribusi tenaga listrik merupakan bagian yang esensial dalam mengantisipasi pertumbuhan kebutuhan energi listrik yang cukup pesat.

Perencanaan transformator distribusi ini harus dilakukan secara sistematis dengan pendekatan yang didasarkan pada peramalan beban untuk memperoleh suatu pola pelayanan yang optimal. Pengembangan sistem yang terlambat memberikan resiko terjadinya pemadaman dalam penyediaan tenaga listrik bagi pelanggan sebagai akibat terjadinya penambahan beban, sebaliknya pengembangan sistem yang terlalu cepat merupakan pemborosan energi.

Tujuan perencanaan transformator distribusi adalah untuk mendapatkan suatu fleksibilitas pelayanan optimal yang mampu dengan cara cepat mengantisipasi pertumbuhan kebutuhan energi listrik yang terkait dengan makin tingginya konsumsi energi listrik dan kerapatan beban yang harus dilayani.

Perencanaan yang baik akan memberikan kontribusi besar terhadap kualitas dan keandalan sistem distribusi. Kondisi ini disebabkan oleh kenyataan bahwa sistem distribusi merupakan pelayanan energi listrik yang langsung berhubungan dengan konsumen sehingga adanya gangguan pada sistem distribusi akan berakibat langsung pada konsumen. Di Indonesia, PT. PLN (Persero) merupakan lembaga BUMN yang bertugas untuk melayani kebutuhan tenaga listrik kepada masyarakat serta bertanggung jawab atas suplai tenaga listrik yang andal dan memiliki kualitas yang baik. (I Made Aditya Nugraha)

Sistem distribusi tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari gardu induk (GI) hingga sampai kepada konsumen pada tingkat tegangan yang diperlukan. Jaringan distribusi terdiri atas dua bagian, yang pertama adalah jaringan tegangan menengah (JTM), yang menggunakan tiga kawat atau empat kawat untuk tiga fasa. Jaringan distribusi primer berada antara gardu induk dan transformator distribusi. Jaringan yang kedua adalah jaringan tegangan rendah (JTR) dengan tegangan 380 – 220 Volt (Hamles Leonardo Latuperissa)

Saluran distribusi merupakan saluran yang menghubungkan gardu induk dengan konsumen, terdiri atas saluran distribusi primer dengan Tegangan Menengah (TM) dan saluran distribusi sekunder dengan Tegangan Rendah (TR). Ketiga adalah saluran yang disebut instalasi pemanfaatan, yaitu saluran yang menghubungkan sumber tenaga listrik dengan peralatan pemanfaatan tenaga listrik (Abrar Tanjung, Atmam)

2.1.2 Kubikel 20 kV

Kubikel 20 kV adalah seperangkat peralatan listrik yang dipasang pada gardu distribusi yang berfungsi sebagai pembagi, pemutus, penghubung

pengontrol dan proteksi sistem penyaluran tenaga listrik tegangan 20 kV. Kubikel 20 kV biasa terpasang pada gardu distribusi atau gardu hubung yang berupa beton maupun kios. (Muhammad Syukri, Selamat Muslimin)

2.1.3 Circuit Breaker

Circuit breaker adalah saklar elektrik yang berfungsi otomatis untuk mencegah kerusakan terjadi pada sirkuit listrik dikarenakan adanya hubungan singkat / short circuit, beban berlebihan / overload dan gangguan ke tanah / ground fault. Salah satu bahaya dari penggunaan arus listrik yang tidak benar adalah terjadinya hubungan pendek terjadi karena aliran listrik lebih besar daripada tahanan listrik sehingga menyebabkan arus meledak, memotong sirkuit listrik dan menghentikan aliran listrik. Pada panel listrik terdapat circuit breaker yang memproteksi dari arus pendek. Arus pendek berbahaya karena dapat menyebabkan percikan api yang kemudian menyebabkan kebakaran. Hal ini membahayakan nyawa pekerja maupun masyarakat di sekitarnya. (Muhammad Syukri, Selamat Muslimin)

2.1.4 Kabel Listrik

Salah satu peralatan penyaluran yang digunakan dalam sistem distribusi dan transmisi listrik adalah kabel listrik. Kabel-kabel yang digunakan pada sistem instalasi listrik tersebut harus memenuhi standar yang ditentukan, baik dari segi konduktor, bahan isolasi dan seluruh konstruksi kabel. Isolator adalah bahan pembungkus konduktor untuk menahan tekanan listrik yang disebabkan tegangan arus bolak-balik maupun tegangan transien tanpa mengalami kegagalan isolasi dan tidak menyebabkan hubung pendek (short circuit), terbuat dari karet atau plastik. Sedangkan konduktor berfungsi untuk menyalurkan energi listrik, berupa

kumpulan kawat yang dipilin agar lebih fleksibel terbuat dari tembaga atau aluminium (Muhammad Syukri, Selamat Muslimin)

2.1.5 Jaringan Tegangan Rendah

Pada sistem distribusi keluaran tenaga listrik tegangan rendah dari transformator merupakan jaringan tegangan rendah dimana besar tegangan tersebut sebesar 220 atau 380 volt, Jaringan tegangan rendah berfungsi sebagai penghubung antara beban listrik konsumen dengan keluaran skunder dari transformator.(Suartika & Wijaya, 2010) Pada jaringan tegangan rendah terdapat dua macam penghantar yaitu Saluran udara tegangan rendah dan saluran kabel tanah tegangan rendah. Untuk mengetahui tahanan dari penghantar menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$R = \frac{\rho l}{A} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

R = tahanan penghantar (Ω)

ρ = hambatan jenis penghantar ($\Omega.m$)

l = panjang penghantar (m)

A = luas penampang (m^2)

2.1.5.1 Saluran Udara Tegangan Rendah



Gambar 2. 1. Kabel NFA2X Sumber: (PT .Multi Kencana Niagatama, 2022)

Kabel listrik NFA2X merupakan sistem penyaluran penghantar energi listrik yang terpasang di udara, inti penghantar yang digunakan oleh kabel NFA2X yaitu aluminium. Aluminium merupakan bahan terbaik untuk kabel listrik yang menghantarkan arus listrik skala besar, bahan kabel listrik yang sesuai standar PLN. (PT.PLN, 2010) Saluran udara merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kawat penghantar yang ditopang pada tiang listrik.

Kelebihan :

1. Lebih fleksibel dan leluasa dalam upaya perluasan beban
2. Dapat digunakan untuk penyaluran tenaga listrik pada tegangan diatas 66 kV
3. Lebih mudah dalam pemasangannya
4. Bila terjadi gangguan hubung singkat, mudah diatasi dan dideteksi

Kelemahan :

1. Mudah terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon
2. Untuk wilayah yang penuh dengan bangunan yang tinggi, sukar untuk menempatkan saluran

3. Masalah efek kulit, induktansi dan kapasitansi yang terjadi akan mengakibatkan tegangan drop lebih tinggi
4. Ongkos pemeliharaan lebih mahal, karena perlu jadwal pengecatan dan penggantian material listrik bila terjadi kerusakan.

Tabel 2. 1. Spesifikasi Kabel Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR). Sumber :
(SPLN 42-10,1993)

Ukuran Kabel (mm)	Panjang Standar Kabel (m)	Kuat Hantar Arus (A)
4x10	1000	54
4x16	1000	72
4x25	1000	102
4x35	1000	125

2.1.5.2 Saluran Kabel Tanah Tegangan Rendah



Gambar 2. 2. Kabel NYFGbY Sumber: (PT .Multi Kencana Niagatama, 2022)

Kabel listrik NYFGbY merupakan sistem penyaluran tenaga listrik melalui kabel yang ditanam di dalam tanah, dimana dalam pemasangannya kabel di tanam dengan kedalaman 70 cm, yang sering sekali di pasang dan diaplikasikan untuk tegangan menengah. (PT.PLN Persero, 2010)

Kelebihan :

1. Tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, bahaya petir, badai, tertimpa pohon dsb
2. Tidak mengganggu pandangan, bila adanya bangunan yang tinggi
3. Dari segi keindahan, saluran bawah tanah lebih sempurna dan lebih indah di pandang
4. Mempunyai batas umur pakai dua kali lipat dari saluran udara
5. Ongkos pemeliharaan lebih murah, karena tidak perlu adanya pengecatan
6. Tegangan drop lebih rendah karena masalah induktansi bisa diabaikan

Kelemahan :

1. Biaya investasi pembangunan lebih mahal dibandingkan dengan saluran udara
2. Saat terjadi gangguan hubung singkat, usaha pencarian titik gangguan tidak mudah (susah)
3. Perlu pertimbangan-pertimbangan teknis yang lebih mendalam di dalam perencanaan khususnya untuk kondisi tanah yang dilalui
4. Hanya tidak dapat menghindari bila terjadi bencana banjir, desakan akar pohon dan ketidak stabilan tanah.

Tabel 2. 2. Spesifikasi Kabel Tanah Tegangan Rendah. Sumber : (PT.PLN Persero, 2010)

Ukuran Kabel (mm)	Panjang Standar Kabel (m)	Kuat Hantar Arus (A)
4x25	0,727	128
4x50	0,387	185
4x70	0,268	228
4x95	0,193	275

2.1.6 Panel Hubung Bagi

Pada sistem distribusi tenaga listrik panel hubung bagi mempunyai peran yang sangat penting dimana panel hubung bagi memiliki fungsi sebagai penghubung, pelindung, dan pengendali dari Sumber tenaga listrik seperti pembangkit, gardu induk, dan transformator sampai ke konsumen atau pelanggan. (Rikumahu et al., 2019) Pada pemasangan panel hubung bagi di tegangan rendah biasa menggunakan panel hubung bagi jenis terbuka dimana bagian – bagian yang memiliki tegangan terpasang tanpa isolasi.

Adapun ciri – ciri dari panel hubung bagi antara lain (Rikumahu et al., 2019):

- a. Kerangka dari panel hubung bagi terbuat dari besi
- b. Untuk penempatan dapat dipasang pada dinding , pada lantai atau didalam dinding.
- c. Panel pada bagian depan berfungsi sebagai penutup dan pelindung dari komponen serta alat ukur yang terdapat pada bagian dalam panel.

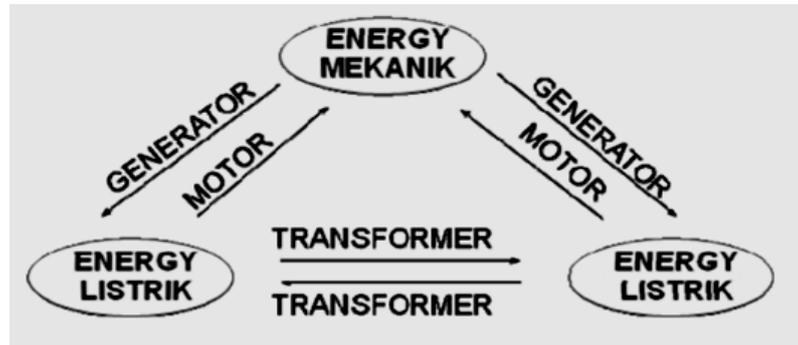
Panel hubung bagi memiliki beberapa fungsi antara lain(Rikumahu et al., 2019):

- a. Saklar utama berfungsi untuk mengendalikan rangkaian
- b. Fuse atau pelebur berfungsi untuk melindungi rangkaian
- c. Membagi rangkaian untuk dikelompokan

2.2 Transformator Distribusi

Transformator merupakan suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah tenaga listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya, dengan frekuensi yang sama. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan jumlah

lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya.(Nasution, Pasaribu, and Hidayat 2021)



Gambar 2. 3. Transformator Energi.(Nasution, Pasaribu, and Hidayat 2021)



Gambar 2. 4. Transformator Distribusi

Transformator distribusi merupakan suatu komponen yang sangat penting dalam penyaluran tenaga listrik dari gardu induk ke konsumen karena sangat menentukan dalam pendistribusian tenaga listrik tegangan rendah. Transformator distribusi berfungsi mengubah tegangan listrik arus bolak-balik dari tegangan menengah 20 kV menjadi tegangan rendah 380/220V dengan frekwensi tetap. (I Made Aditya Nugraha)

Transformator merupakan suatu alat listrik yang mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip-prinsip induksi elektromagnet. Transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. (Hamles Leonardo Latuperissa)

Penggunaan transformator yang sederhana dan handal memungkinkan dipilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan serta merupakan salah satu sebab penting bahwa arus bolak-balik sangat banyak dipergunakan untuk pembangkitan dan penyaluran tenaga listrik. (Hamles Leonardo Latuperissa)

Pada dasarnya perhitungan yang tepat serta management yang baik dari Transformator distribusi akan meningkatkan keandalan system tenaga listrik sehingga kontinuitas pelayanan listrik ke konsumen terjamin.

Transformator distribusi merupakan komponen yang sangat penting dalam mendistribusikan tenaga listrik ke konsumen, jadi ada beberapa faktor yang mempengaruhi keandalan dan lama waktu pakai transformator jaringan distribusi, yaitu pemilihan trafo jaringan distribusi. Kapasitas KVA Transformator Distribusi didasarkan pada beban yang dilayani, transformator distribusi umumnya mencapai efisiensi maksimum (rugi-rugi transformator minimum). Bila beban transformator terlalu besar, maka dilakukan penggantian transformator atau penyisipan transformator atau mutasi transformator (Transformator yang melayani beban kecil dimutasikan ke beban besar, dan begitu sebaliknya). (Hamles Leonardo Latuperissa)

Menurut IEC 354, transformator di Indonesia dirancang untuk bekerja pada temperatur sekitar tidak melebihi 40 dan pada temperatur rata-rata harian 30 serta temperatur rata-rata tahunan 30. International electrotechnical commission (IEC) menetapkan umur transformator 20 tahun atau setara 7300 hari apabila di bebani 100% dari nilai rating daya transformator pada temperatur sekitar 30 , sehingga susut umur normal adalah 0,0137% per hari. (Tri Ongko Priyono) Sebab menurut standar IEC 345 transformator di Indonesia telah dirancang dengan suhu lingkungan tidak melebihi 40.

2.2.1 Spesifikasi Umum Tegangan Primer Transformator Distribusi SPLN 50 : 1997

Tegangan primer ditetapkan sesuai dengan tegangan nominal sistem pada jaringan tegangan menengah (JTM) yang berlaku di Indonesia, yaitu 20 kV. Pada sistem distribusi tiga phasa, 4 kawat, maka transformator phasa tunggal yang dipasang tentunya mempunyai tegangan pengenal $20\text{kV}/\sqrt{3} = 11,547 \text{ kV}$. Karena SPLN 1 : 1995 menetapkan tegangan nominal sistem 20 kV. Maka masih perlu dipesan transformator fase tunggal dengan tegangan pengenal 11,547 kV

2.2.2 Spesifikasi Umum Tegangan Sekunder Transformator Distribusi SPLN 50 : 1997

Tegangan sekunder ditetapkan tanpa disesuaikan dengan tegangan nominal sistem jaringan tegangan rendah (JTR) yang berlaku di Indonesia 231 Volt (untuk sistem fase tunggal) dan 400/231 Volt (untuk sistem fase tiga), yaitu 231 Volt dan 400/231 Volt (pada keadaan tanpa beban)

Dengan demikian ada dua macam transformator yang dibedakan oleh tegangan sekundernya, yaitu :

1. Transformator bertegangan sekunder 231/462 Volt (fase-tunggal)
2. Transformator bertegangan sekunder 400/231 Volt (fase-tiga)

2.2.3 Spesifikasi Umum Daya Pengenal Transformator Distribusi SPLN 50 : 1997

Nilai-nilai daya pengenal tercantum dalam tabel 2.1 (Transformator Distribusi Fase Tunggal) dan tabel 2.2 (Transformator Distribusi Fase Tiga)

Tabel 2. 3. Spesifikasi Transformator Distribusi Fase Tunggal

Uraian	Satuan	Spesifikasi Transformator Distribusi fase tunggal jenis pasang luar dan dalam, pendingin ONAN				
Daya Pengenal	KVA	5	10	15	25	50
Jumlah Fase	-	1	2	1	1	1
Frekuensi Pengenal	Hz	50	50	50	50	50
Tegangan primer pengenal	kV	20	20	20	20	20
Tegangan sekunder Pengenal (beban nol)	V	231/462	231/462	231/462	231/462	231/462
Kelompok vektor	-	li0	li0	li0	li0	li0
Tegangan uji impuls	kV	125	125	125	125	125
Tegangan uji terapan	kV	50	50	50	50	50
Kelas isolasi	kV	24	24	24	24	24
Kenaikan suhu isolasi	-	A	A	A	A	A
Kenaikan suhu maks.Belitan	K	55	55	55	55	55
Kenaikan suhu maks.minyak atas	K	50	50	50	50	50
Suhu titik panas	C	98	98	98	98	98
Penyadapan primer	%	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10
Impedansi	%	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Rugi besi	W	50	60	75	105	107
Rugi belitan (rugi beban) pada						
Beban pengenal 75	W	120	220	275	385	585
Rugi total pada 75	W	3,40	2,80	2,33	1,96	1,51
Arus beban nol Efisiensi pada 75 C	%	2,40	2,30	2,00	1,60	1,40

Uraian		Satuan	Spesifikasi Transformator Distribusi fase tunggal jenis pasang luar dan dalam, pendingin ONAN				
Faktor daya 1	Beban 100%	%	96,71	97,27	97,72	98,08	
	Beban 75%	%	96,96	97,61	98,00	98,31	98,51
	Beban 50%	%	98,90	87,75	98,12	98,41	98,69
	Beban 25%	%	95,92	96,62	97,16	97,16	98,75
Faktor daya 0,8	Beban 100%	%	95,92	96,62	97,16	97,61	98,15
	Beban 75%	%	96,23	97,03	97,51	97,90	98,36
	Beban 50%	%	96,15	97,20	97,66	98,03	98,44
	Beban 25%	%	94,56	96,44	97,02	97,48	97,98
Pengaturan pada beban penuh							
Faktor daya 1		%	2,82	2,91	2,85	2,73	2,75
Faktor daya 0,8		%	2,40	2,21	1,85	1,56	1,20

Tabel 2. 4. Spesifikasi Transformator Distribusi Tiga Fasa

Uraian	Satuan	Spesifikasi Transformator Distribusi fase tiga jenis pasang luar dan dalam, pendingin ONAN															
Daya pengenal	kVA	25	50	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
Jumlah fase	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Frekuensi pengenal	Hz	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Tegangan primer pengenal	KV	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Tegangan sekunder pengenal (beban nol)	V	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Kelompok vektor	-	Yzn5	Yzn6	Yzn7	Yzn8	Dyn5	Dyn6	Dyn7	Dyn8	Dyn9	Dyn10	Dyn11	Dyn12	Dyn13	Dyn14	Dyn15	Dyn16
Tegangan uji impuls	kV	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125
Tegangan uji terapan	kV	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Kelas isolasi	kV	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Kelas suhu isolasi	-	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
Kenaikan suhu maks. Belitan	K	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Kenaikan suhu maks. Minyak atas	K	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Suhu titik panas	C	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Penyadapan primer	%	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10	±5±10
Impedansi	%	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4,5	5	5,5	6	7	7
Rugi besi	W	75	150	300	400	480	600	770	930	1100	1300	1750	2300	2500	3000	3600	4000

Rugi belitan (rugi beban) pada beban pengenal 75C	W	425	800	1600	2000	2500	3000	3900	4600	5300	6500	9100	12100	15000	18100	21000	25000
Rugi total pada 75C	%	2.00	1.90	1.90	1.50	1.49	1.44	1.48	1.38	1.32	1.24	1.36	1.44	1.40	1.32	1.23	1.16
Arus beban nol efisiensi pada 75C	%	2.4	2.3	2.3	2.3	2.2	2.1	2	1.9	1.8	2	2	2	2	2	2	2
Faktor daya 1 beban 100 %	%	97.90	98.13	98.13	97.52	98.53	98.58	98.54	98.64	98.70	98.78	98.66	97.90	98.60	98.68	98.78	98.85
beban 75 %	%	98.22	98.42	98.42	98.74	98.76	98.79	98.76	98.84	98.89	98.96	98.87	98.50	98.82	98.88	98.98	99.04
beban 50 %	%	98.44	98.62	98.62	98.89	98.91	98.93	98.90	98.97	99.02	99.08	99.00	98.00	98.98	99.03	99.12	99.19
beban 25 %	%	98.22	98.42	98.42	98.70	98.74	98.75	98.72	98.79	98.86	98.93	98.85	90.95	98.85	98.98	99.02	99.20
Faktor daya 0,8 beban 100 %	%	97.39	97.68	97.68	98.16	98.17	98.23	98.18	98.30	98.30	98.48	98.33	98.23	98.26	98.36	98.48	98.57
beban 75 %	%	97.79	98.04	98.04	98.44	98.45	98.50	98.46	98.56	98.62	98.71	98.59	98.51	98.54	98.62	98.73	98.81
beban 50 %	%	98.06	98.28	98.28	98.61	98.62	98.67	98.63	98.72	98.78	98.85	98.76	98.69	98.73	98.79	98.90	98.98
beban 25 %	%	97.79	98.04	98.04	98.38	98.39	98.45	98.42	98.50	98.58	98.66	98.57	98.50	98.57	98.63	98.79	98.90
Pengaturan pada beban penuh																	
Faktor daya 1	%	3.60	3.50	3.50	3.31	3.31	3.28	3.3	3.25	3.22	3.17	3.65	3.93	4.25	4.52	5.11	5.08
Faktor daya 0,8	%	1.86	1.67	1.67	1.32	1.32	1.27	1.31	1.22	1.17	1.11	1.37	1.33	1.34	1.3	1.29	1.24

2.2.4 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri atas dua buah kumpatan yang bersifat induktif. Kedua kumparan ini terpisah secara elektrik namun berhubungan secara magnetis melalui jalur yang memiliki reluktansi rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak balik, maka fluks bolak balik akan muncul di dalam inti yang di laminasi. Karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup, maka mengalirlah arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer, maka di kumparan primer terjadi induksi dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder. Maka mengalirlah arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat di transfer keseluruhan. (Nasution, Pasaribu, and Hidayat 2021)

Prinsip kerja transformator adalah berdasarkan hukum ampere dan hukum faraday, yaitu arus listrik dapat menimbulkan medan magnet dan sebaliknya medan magnet dapat menimbulkan arus listrik. Jika pada salah satu kumparan pada transformator diberi arus bolak-balik, maka jumlah garis gaya magnet berubah-ubah. Akibatnya pada sisi primer terjadi induksi. Sisi sekunder menerima garis gaya magnet dari sisi primer jumlahnya berubah-ubah pula. Maka di sisi sekunder juga timbul induksi, akibatnya antara dua ujung terdapat beda tegangan. (Hamles Leonardo Latuperissa)

fluks di kumparan primer maka di kumparan primer terjadi induksi (self induction) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (mutual induction)

yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalir arus sekunder jika rangkaian sekunder dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan (secara magnetisasi) (Siregar, 2017).

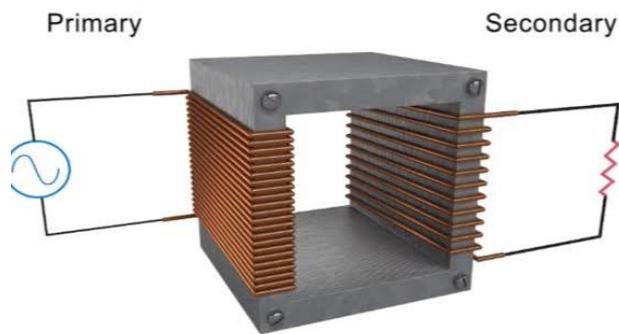
$$e = N \frac{d}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

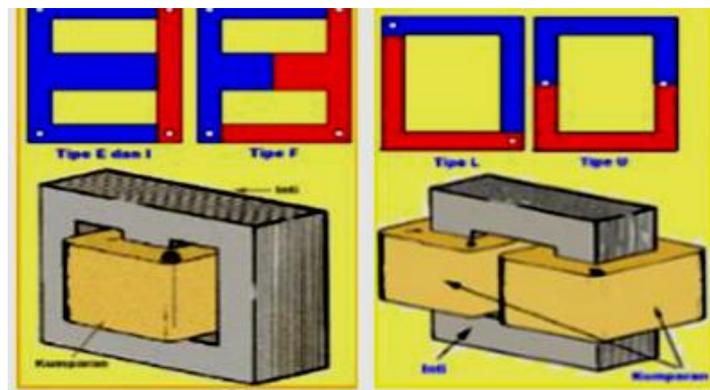
e = gaya gerak listrik (volt)

N = jumlah lilitan (turn)

d/dt = perubahan fluks magnet (weber/detik)



Gambar 2. 5. Fluks Magnet Transformator



Gambar 2. 6. (a) Transformator tipe inti dan (b) Tipe Cangkang

2.2.5 Kontruksi Transformator

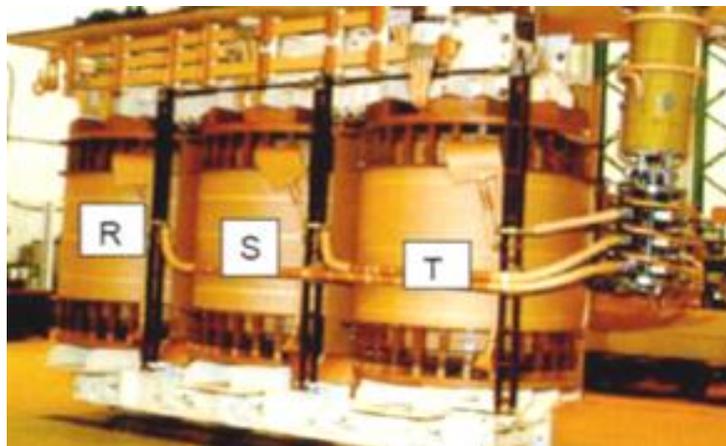
1. Inti Besi/Kernel



Gambar 2. 7. Inti Besi. Sumber: (PT.PLN(Persero), 2014)

Inti besi berfungsi untuk membangkitkan dan mempermudah jalan fluks yang timbul akibat adanya arus listrik dalam belitan atau kumparan Minyak Transformator. Bahan inti tersebut terbuat dari lempengan-lempengan baja tipis mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang diakibatkan oleh arus eddy (eddy current). (Yudi Yantoro Sabari)

2. Belitan (Winding)



Gambar 2. 8. Belitan Transformator. Sumber: (PT.PLN(Persero), 2014)

3. Kumparan Minyak Transformator

Kumparan Minyak Transformator terdiri dari beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk kumparan, dan kumparan tersebut diisolasi, baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan menggunakan isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain. Terdapat dua kumparan pada inti tersebut yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Jika kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluks yang menimbulkan induksi tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaiannya beban) maka mengalir arus pada kumparan tersebut. Sehingga pada kumparan ini berfungsi sebagai alat transformasi tegangan dan arus. Khusus jenis Minyak Transformator tenaga tipe basah, kumparan-kumparan dan intinya direndam dalam minyak-Minyak Transformator, terutama Minyak Transformator-Minyak Transformator tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak Minyak Transformator mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan bersifat pula sebagai isolasi (tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

Minyak Transformator harus memenuhi persyaratan sbb:

- a. Ketahanan isolasi harus tinggi ($>10\text{kV/mm}$)
- b. Berat jenis harus kecil, sehingga partikel-partikel di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
- c. Penyalur panas yang baik
- d. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yg dapat membahayakan.
- e. Sifat kimia yang stabil. (Yudi Yantoro Sabari)



Gambar 2. 9. Minyak Isolasi Transformator. Sumber: (PT.PLN(Persero), 2014)

Minyak isolasi pada suatu trafo harus memiliki daya hantar panas yang baik agar dapat membawa panas yang terjadi pada inti dan kumpatan ke medium sekitarnya. Kekuatan dielektrik sistem isolasi dan umur suatu trafo bergantung sepenuhnya pada kualitas minyak isolasi. Oleh karena itu minyak isolasi yang digunakan pada suatu trafo harus memenuhi syarat-syarat dibawah ini :

- a. Mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi
- b. Mempunyai daya hantar panas yang baik
- c. Mempunyai berat jenis yang rendah, jika berat jenis minyak rendah, maka partikel-partikel yang melayang didalam minyak akan segera mengendap pada dasar tangki, hal ini sangat membantu dalam mempertahankan homogenitas minyak
- d. Memiliki kekentalan yang rendah. Minyak yang encer lebih mudah dialirkan atau bersirkulasi, sehingga mendinginkan trafo lebih baik.
- e. Memiliki titik tuang rendah. Minyak dengan titik tuang yang rendah akan berhenti mengalir pada temperatur yang rendah.

- f. Mempunyai titik nyala yang tinggi. Karakteristik titik nyala mempengaruhi penguapan minyak. Jika titik nyala minyak rendah maka minyak mudah menguap, ketika minyak menguap volumenya berkurang minyak semakin kental dan reaksi dengan udara diatas permukaan minyak membentuk bahan yang dapat meledak.
- g. Tidak merusak material isolasi dan material lain trafo
- h. Unsur kimianya harus stabil agar usia pemakaiannya panjang

Menurut SPLN 49-1-1982, spesifikasi minyak isolasi baru adalah seperti tabel 2.1. Biasanya setelah suatu trafo beroperasi dalam waktu lama, akan terjadi pengasaman pada minyak isolasinya. Asam yang terjadi pada minyak cenderung mengakibatkan isolasi kumparan rapuh dan mudah retak, terutama ketika dikenai tekanan mekanik yang terjadi ketika kumparan dialiri arus hubung singkat. Tingkat keasaman yang tinggi sering ditandai dari bau yang menyengat. Pengasaman dalam minyak diikuti dengan pembentukan lumpur yang dapat menyumbat lorong-lorong pendingin, sehingga pembuangan panas terhambat dan temperatur minyak meninggi. Hal ini dapat mengakibatkan tembus listrik termal. Oleh karena itu tingkat keasaman minyak trafo perlu diperiksa secara teratur, minimal sekali dalam setahun.

4. Bushing



Gambar 2. 10. Bushing. Sumber: (PT.PLN(Persero), 2014)

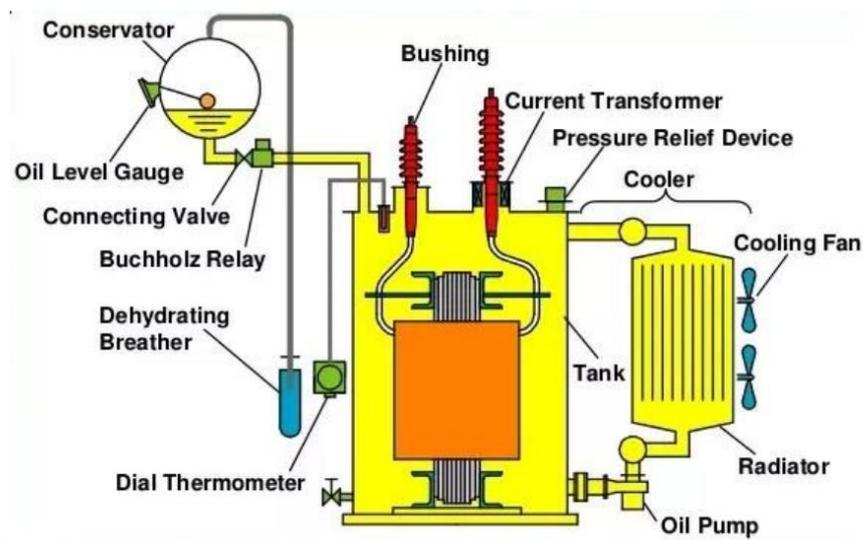
Merupakan penghubung antara kumparan Minyak Transformator ke jaringan luar. Bushing adalah sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekaligus berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki Minyak Transformator. (Yudi Yantoro Sabari)

5. Konservator



Gambar 2. 11. Konservator. Sumber: (PT.PLN(Persero), 2014)

Pada umumnya bagian-bagian dari Minyak Transformator yang terendam minyak Minyak Transformator yang ditempatkan di dalam tangki baja. Tangki Minyak Transformator-Minyak Transformator distribusi umumnya dilengkapi dengan sirip-sirip pendingin (cooling fan) yang berfungsi memperluas permukaan dinding tangki, sehingga penyaluran panas minyak pada saat konveksi menjadi semakin baik dan efektif untuk menampung pemuaian minyak Minyak Transformator, tangki dilengkapi dengan konservator. (Yudi Yantoro Sabari)



Gambar 2. 12. Kontruksi Bagian-bagian trafo Distribusi. Sumber : (PT.PLN(Persero), 2014)

2.2.6 Sistem Pendingin Transformator

Salah satu hal yang mempengaruhi suhu transformator distribusi adalah suhu titik panas. Suhu titik panas merupakan kondisi terpanas bagian transformator dan terjadi pada lilitan transformator. Temperatur sekitar menentukan perubahan temperatur *hot spot*. Besaran pembebanan yang diberikan

terhadap transformator juga menentukan kenaikan suhu transformator tersebut.(Azhar, Rahmawati, and Fadlika 2019)

Minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Bila panas tersebut mengakibatkan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan system pendingin untuk menyalurkan panas keluar transformator.(A.Sofwan, Tias, and N.Lubis 2018)

Jika suatu trafo sedang beroperasi, maka timbul rugi-rugi inti dan tembaga pada trafo, yang berubah menjadi panas, minyak pendingin berperan menghantarkan panas yang terjadi pada inti dan kumparan trafo ke udara bebas. Ada dua bahan pendingin yang digunakan pada trafo, yaitu mineral dan minyak sintetis. Dilihat dari sirkulasi minyak dalam trafo, metode pendinginan dibagi atas dua jenis :

1. Minyak bersirkulasi sendiri (oil immersed)
2. Minyak bersirkulasi paksa (forced oil)

Dilihat dari metode penghantaran panas dari minyak ke udara bebas, pendinginan trafo dibagi atas tiga jenis, yaitu :

- a. Pendinginan dengan udara alami (air natural cooled)
- b. Pendinginan dengan hembusan udara (air blast cooled)
- c. Pendinginan dengan air (water cooled)

Akibat utama dari penuaan adalah menurunnya kekuatan mekanis dan elektris dari isolasi belitan transformator. Efek suhu, air dan oksigen adalah faktor penting dalam penuaan kertas isolasi dan minyak

2.2.7 Overload Transformator Distribusi

Suatu transformator daya akan bekerja secara kontinyu apabila transformator berada pada beban nominalnya. Menurut SPLN, transformator dikatakan *overload* apabila beban transformator melebihi 80% dari kapasitas transformator atau arus nominalnya. Maka transformator akan mengalami suatu pemanasan yang berlebih dan nantinya akan lebih mempersingkat umur isolasi.

Selama lebih dari tiga dekade, sejak awal tahun tujuh puluhan, prinsip evaluasi kapasitas overload transformator telah didefinisikan dalam standar PN-71/E-81000. Kriteria dasar yang dianut dalam standar PN-71/E-81000 adalah untuk menentukan batas muatan transformator pada keadaan termal isolasi. Standar ini mendefinisikan kapasitas overload transformator dengan mengasumsikan dari umur isolasi transformator nominal dan mengurangi harapan hidup isolasi sesuai dengan kondisi transformator yang terkena overload.

Overload sendiri adalah suatu keadaan dimana beban listrik melebihi kapasitas yang tersedia atau adanya gangguan dalam penyaluran terhadap pembebanan. Maka dari itu diperlukan adanya tindakan penambahan kapasitas daya pada transformator distribusi. Proses penambahan kapasitas transformator dapat berpengaruh terhadap suatu keandalan sistem tenaga listrik yang akan mempengaruhi kinerja dari sistem proteksi tenaga listrik, Umumnya faktor yang

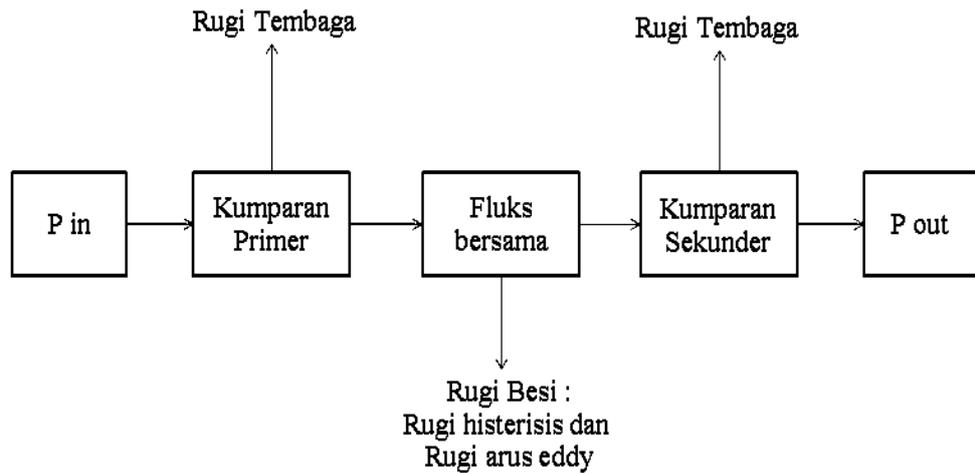
menyebabkan terjadinya percepatan proses penuaan transformator adalah temperatur lingkungan dan frekuensi pembebanan elektrik berupa beban lebih.

2.2.8 Rugi-Rugi Transformator

Transformator yang optimal adalah Transformator yang memiliki 100% efisiensi yaitu tidak terjadi kehilangan daya sama sekali. Namun Trafo yang optimal atau yang sempurna ini hampir dapat dikatakan tidak mungkin akan tercapai, hal ini dikarenakan adanya beberapa faktor yang menyebabkan terjadi kerugian atau kehilangan daya.

Pada dasarnya energi listrik yang dimasukkan ke transformator tidak sama dengan energi listrik yang dikeluarkan dari transformator tersebut. Hal ini dikarenakan adanya rugi-rugi yaitu adanya arus yang hilang saat melewati trafo tersebut. Rugi-rugi daya dapat dibagi menjadi dua yaitu rugi inti (P_i) dan rugi tembaga (P_{cu}). Pada kondisi beban nol, rugi-rugi yang terjadi hanyalah rugi inti. Rugi inti tidak berpengaruh dengan adanya perubahan beban. Besarnya rugi inti dari beban nol sampai beban penuh nilainya sama, dengan asumsi tegangan primer tidak berubah atau konstan.

Pada konstruksi transformator, kondisi temperatur ruangan dan belitan dipengaruhi oleh Rugi-rugi belitan dan rugi-rugi inti. Rugi-rugi yang terdapat pada transformator ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2. 13. Diagram Rugi-rugi dan Efisiensi Transformator

Rugi-rugi daya transformator berupa rugi inti (rugi besi) dan rugi tembaga yang terdapat pada kumparan primer, kumparan sekunder maupun tersier. Untuk memperkecil rugi-rugi tembaga harus diambil kawat tembaga yang penampangnya cukup besar untuk mengalirkan arus listrik yang diperlukan.

1. Rugi Tembaga (P_{cu})

Rugi-rugi tembaga terjadi karena resistansi dalam belitan atau disebabkan oleh arus yang mengalir pada kawat tembaga yang terjadi pada kumparan sekunder, rugi-rugi tembaga akan berbanding lurus dengan besarnya beban sehingga meningkatnya arus beban akan meningkatkan rugi-rugi tembaga. Persamaan untuk mencari rugi tembaga dapat ditulis sebagai berikut.

Rugi tembaga adalah rugi tidak tetap (variable losses), dipengaruhi oleh besarnya beban. Besarnya rugi tembaga yang dihasilkan adalah sebesar :

$$P_{cu} = I^2 R \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

I = Arus pada penghantara (A)

R = Tahanan penghantar (Ω)

Karena arus beban berubah-ubah, maka rugi tembaga juga tidak konstan bergantung pada beban. Besarnya rugi-rugi tembaga pada setiap perubahan beban adalah kuadrat arus beban atau kuadrat daya semunya.

$$P_{t2} = \left(\frac{S_1^2}{S_2}\right) \times P_{t1} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

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

P_{t1} = Rugi-rugi tembaga beban penuh (kW)

S_2 = Beban yang dioperasikan (MVA)

S_1 = Daya terpasang (MVA)

Berdasarkan SPLN 50 tahun 1997, berbagai nilai dari rugi-rugi transformator distribusi dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut :

Tabel 2. 5 Nilai rugi-rugi Transformator Distribusi

KVA	P_i (Watt)	P_{cu} (Watt)
25	75	700
50	150	1100
100	300	1750
160	400	2000
200	550	2850
315	770	3900
400	930	4600
680	1300	6500
800	1950	10200
1000	2300	12100
1250	2700	15000
1600	3300	18100

2. Rugi Besi (P_i)

Core Losses atau Iron Losses adalah kehilangan daya pada Transformator yang dikarenakan oleh inti besi transformator itu sendiri. Terdapat dua faktor yang menyebabkan terjadinya Core Loss yaitu kerugian arus pusar (Eddy Current) dan kerugian histeresis (Hysteresis loss). Kedua Kerugian ini pada dasarnya tergantung pada sifat magnetik bahan yang digunakan untuk konstruksi inti transformator.

Rugi-rugi inti (P_i) dalam keadaan normal selalu konstan tidak tergantung terhadap besarnya perubahan beban, Jadi rugi inti dapat dituliskan dalam persamaan :

$$P_i = P_h + P_e \dots\dots\dots(2.5)$$

Dimana :

P_i = Rugi inti (watt)

P_h = Rugi Histerisis

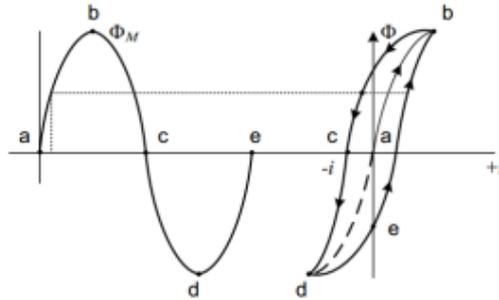
P_e = Rugi Eddy Current

a. Rugi Histerisis

Rugi histerisis adalah rugi yang disebabkan oleh siklus bolak-balik pada inti besi. Pada besi yang mendapat fluks bolak balik, rugi histerisis per cycle berbanding dengan luas lup histerisis, kehilangan atau kerugian ini tergantung pada volume dan kadar besi yang digunakan untuk kontruksi inti besi trafo, frekuensi pembalikan magnetik dan nilai kerapatan fluks.

Rugi ini dapat terjadi disebabkan oleh gesekan molekul yang melawan arah aliran gaya magnet didalam inti besi transformator. Gesekan molekul ini

menimbulkan panas. Panas yang berlebih dapat merusak transformator. Oleh karena itu didalam transformator diberi pendingin. Pendingin ini dapat berupa minyak transformator.



Gambar 2. 14. Kurva Histerisis. Sumber:

Pada Gambar 2.27 diatas disumsikan titik a sebagai fluks di inti (dimulai dari nol). Ketika besar arus dinaikan maka kerapatan fluks naik akibat naikknya kuat medan magnet dan mencapai titik jenuh maka fluks menjadi ab. Ketika besar arus diturunkan kembali maka fluks akan berubah mengikuti arus dengan arah yang berbeda dari arah ab yaitu bcd (mencapai titik jenuh negatif). Ketika besar arus dinaikkan kembali fluks menjadi deb. Terbentuknya kurva ini disebabkan oleh magnet sisa (remanensi) yang terdapat pada inti akibat pemagnetisasi sebelumnya.

$$P_h = K_h \cdot f \cdot K^{1.6} \text{ maks Watt} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dimana :

P_h = Rugi arus pusar [w/kg]

K_h = Konstanta material inti

f = frekuensi [Hz]

B_{max} = Nilai puncak medan magnet [T]

b. Rugi Eddy Current

Rugi Eddy Current terjadinya disebabkan arus pusar pada inti besi. Kerugian karena eddy Current disebabkan oleh aliran sirkulasi arus yang menginduksi logam. Hal ini disebabkan oleh aliran flux magnetik disekitar inti besi. Eddy Current dapat menyebabkan kerugian daya pada transformator karena pada saat terjadi induksi energi listrik pada inti besi, maka sejumlah energi listrik akan diubah menjadi energi panas.

Arus eddy pada material inti menyebabkan kerugian resistif. Fluks inti menginduksi arus eddy yang cenderung berlawanan dengan perubahan densitas fluks, untuk mengurangi rugi eddy current (P_e), maka inti besi transformator dibuat berlapis-lapis. Tujuan dibuatnya inti besi berlapis-lapis adalah untuk memecah induksi eddy current (P_e) didalam inti besi.

Rugi Eddy current (P_e) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$P_e = K_e \cdot f \cdot B^2 \text{ maks Watt..} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana :

P_e = Rugi arus pusar [w/kg]

K_e = Konstanta material inti

f = frekuensi [Hz]

B_{\max} = Nilai puncak medan magnet [T]

3. Rugi – Rugi Akibat Arus Netral Pada Transformator

Sebagai akibat dari ketidakseimbangan beban antara tiap-tiap fasa pada sisi sekunder trafo (fasa R, fasa S, fasa T) mengalir arus di netral trafo. Arus yang mengalir pada penghantar netral trafo ini menyebabkan losses (rugi-rugi).

Rugi-rugi pada penghantar netral trafo ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_N = I_N^2 \cdot R_N \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

P_N = Rugi netral penghantar trafo [watt]

I_N = Arus netral trafo (A)

R_N = Tahanan netral penghantar trafo [Ohm]

Sedangkan losses yang diakibatkan karena arus netral yang mengalir ke tanah (ground) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut :

$$P_G = I_G^2 \cdot R_G \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana :

P_G = Losses akibat arus netral yang mengalir ke tanah [watt]

I_G = Arus yang mengalir ke tanah (A)

R_G = tahanan pembumian netral trafo (Ohm)

Seperti diketahui, kerugian daya suatu saluran merupakan perkalian arus pangkat dua dengan resistensi atau reaktansi dari saluran tersebut. Rugi-rugi dapat dinyatakan sebagai berikut:

Rugi daya nyata = $I^2 \cdot R$ Watt

Rugi daya reaktif = $I^2 \cdot X$ Watt

Rugi daya semu = $\sqrt{(I^2 \cdot R)^2 + (I^2 \cdot X)^2}$

2.2.9 Efisiensi Transformator

Pada kenyataannya, transformator tidak pernah ideal. Jika transformator dioperasikan, maka didalam transformator akan timbul energi kalor. Dengan demikian, energi listrik yang masuk kedalam kumparan primer akan selalu lebih besar dari energi listrik yang keluar dari kumparan sekunder maupun kumparan

tersier. Akibatnya daya yang keluar lebih besar pada kumparan primer. Berkurangnya daya dan energi listrik pada sebuah transformator ditentukan oleh besarnya efisiensi transformator tersebut.

Efisiensi adalah perbandingan daya keluaran dan daya masukan. Atau dapat dikatakan hasil bagi antara energi sekunder dengan energi primer yang dinyatakan dalam persen. Untuk mencari efisiensi transformator, nilai primer dibawa ke sekunder. Efisiensi transformator dinyatakan dalam η . Besar efisiensi dapat di rumuskan sebagai berikut :

$$Efisiensi \eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana :

$$P_{out} = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi^2 \dots\dots\dots(2.11)$$

Karena besar daya keluaran transformator dipengaruhi oleh rugi-rugi, maka total daya masuk pada transformator adalah jumlah dari daya keluaran transformator dengan rugi-rugi transformator.

$$P_{in} = P_{out} + \text{Rugi-Rugi} \dots\dots\dots(2.12)$$

$$P_{in} = V_2 \cdot I_2 \cos\phi^2 + P_{cu} + P_i \dots\dots\dots(2.13)$$

$$P_{in} = V_2 \cdot I_2 \cos\phi^2 + I_{22} R_{c2} + P_i \dots\dots\dots(2.14)$$

Maka besar nilai efisiensi transformator dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cos\phi^2}{V_2 \cdot I_2 \cos\phi^2 + I_{22} R_{c2} + P_i} \times 100\% \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana :

η = Efisiensi

V_2 = Tegangan Keluaran Transformator (Volt)

I_2 = Arus Keluaran Transformator (Ampere)

$\cos\theta_2$ = Faktor Daya Beban

RC2 = Tahanan Total Tembaga (Ohm)

Pcu = Rugi-Rugi Tembaga (Watt)

Pi = Rugi-Rugi Inti (Watt)

Jika dimisalkan daya keluaran $V_2 \cdot I_2 \cos\theta_2$ dan rugi-rugi adalah rugi besi (Pi) sedangkan rugi tembaga (Pcu) dinyatakan dengan $I_2 \cdot R_{2ek}$, maka efisiensi dapat dinyatakan:

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cos\theta_2}{V_2 \cdot I_2 \cos\theta_2 + V_2^2 R_{2ek} + P_i} \times 100\% \dots\dots\dots(2.16)$$

dengan dibagi I_2 maka didapat :

$$\eta = \frac{V_2 \cdot I_2 \cos\theta_2}{V_2 \cdot I_2 \cos\theta_2 + V_2^2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.17)$$

agar efisiensi maksimum

$$\frac{d}{dI_2} = (I_2 R_{2ek} + \frac{P_i}{I_2}) = 0 \dots\dots\dots(2.18)$$

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

$$P_i = I_2^2 R_{2ek} = P_{cu} \dots\dots\dots(2.19)$$

Dengan kata lain efisiensi pada transformator akan maksimum apabila nilai dari rugi-rugi tembaga sama dengan rugi-rugi inti. Untuk setiap mesin atau peralatan listrik, efisiensi ditentukan oleh besarnya rugi-rugi yang selama operasi normal. Untuk mencari besarnya efisiensi pada transformator, maka dapat digunakan persamaan sebagai berikut [2.16]:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.20)$$

$$P_{in} = P_{out} + \sum r_{ugi} - r_{ugi} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.19) ke dalam persamaan (2.21), maka diperoleh persamaan berikut untuk mencari efisiensi transformator

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \sum r_{ugi} - r_{ugi}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.22)$$

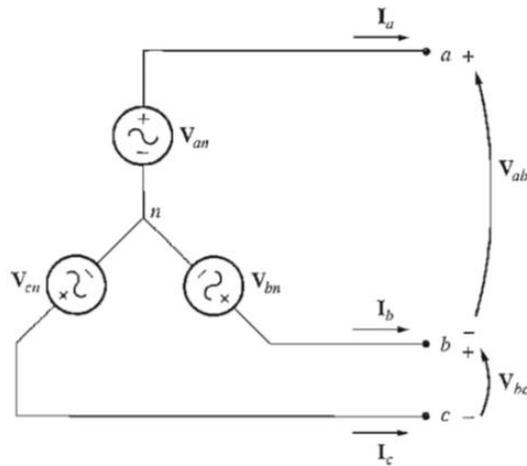
2.3 Sistem Tiga Fasa

Transformator tiga fasa mempunyai inti dengan tiga kaki dan setiap kaki mendukung belitan primer dan sekunder. Transformator tiga fasa sebenarnya adalah tiga transformator yang dihubungkan secara khusus satu sama lain. Lilitan primer biasanya dihubungkan secara bintang (Y) dan lilitan sekunder dihubungkan secara delta (Δ). Di dalam trafo ini terdapat tiga konduktor yang mengalirkan arus AC (yang sama frekuensinya) yang mencapai nilai maksimum pada saat yang tidak bersamaan.

Transformator 3 fasa ini mempunyai sistem hubungan antara kumparan primer dan kumparan sekunder yang dimana besarnya transformator juga bergantung pada hubungan antar kumparan tersebut, hubungan tersebut mempunyai 4 sistem hubungan diantaranya :

- a. Sistem hubungan delta-delta ($\Delta - \Delta$)
- b. Sistem hubungan wye-wye (Y - Y)
- c. Sistem hubungan delta-wye ($\Delta - Y$)
- d. Sistem hubungan wye-delta (Y- Δ)

tiga fasa dapat digambarkan dengan suatu sistem yang terdiri dari tiga sistem fasa tunggal, sebagai berikut :



Gambar 2. 15. Sistem Tiga Fasa Sebagai Tiga Sistem Fasa Tunggal. Sumber: (Chapman, 2015)

$$V_a = V_m \sin \omega t \dots\dots\dots(2.6)$$

$$V_b = V_m \sin (\omega t - 120^\circ)\dots\dots\dots(2.7)$$

$$V_c = V_m \sin (\omega t - 240^\circ)\dots\dots\dots(2.8)$$

$$I_a = I_m \sin \omega t \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I_b = I_m \sin (\omega t - 120^\circ)\dots\dots\dots(2.10)$$

$$I_c = I_m \sin (\omega t - 240^\circ)\dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

V_a = tegangan pada fasa R (volt)

V_b = tegangan pada fasa S (volt)

V_c = tegangan pada fasa T (volt)

V_m = tegangan maksimum (volt)

I_a = arus pada fasa R (ampere)

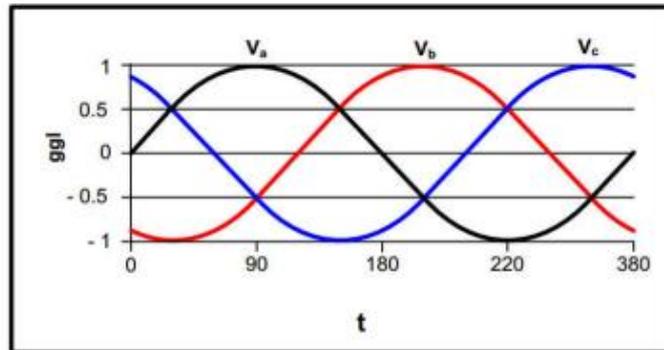
I_b = arus pada fasa S (ampere)

I_c = arus pada fasa T (ampere)

I_m = arus maksimum (ampere)

ωt = sudut fasa

Dimana bentuk gelombang dari sistem tiga fasa yang merupakan fungsi waktu ditunjukkan pada gambar berikut.

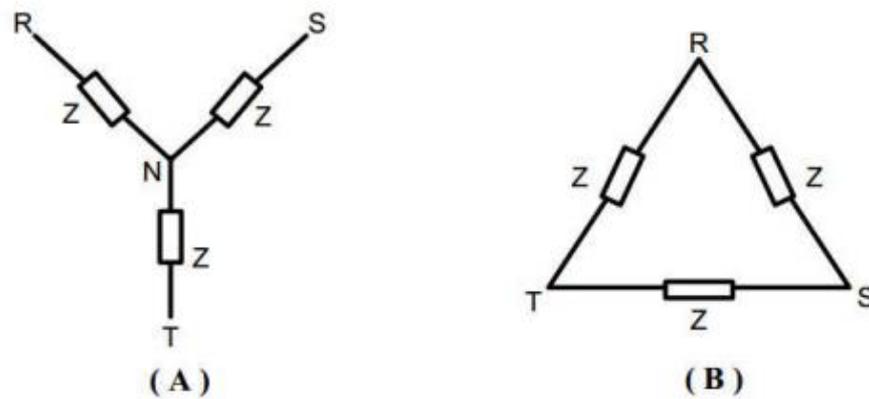


Gambar 2. 16. Bentuk Gelombang Pada Sistem Tiga Fasa. Sumber: (Napitu, 2008)

Pada gambar nampak bahwa antara tegangan fasa satu dengan yang lainnya mempunyai perbedaan fasa sebesar 120° atau $2\pi/3$. Pada umumnya fasa dengan sudut fasa 0° disebut dengan fasa R, fasa dengan sudut fasa 120° disebut fasa S dan fasa dengan sudut fasa 240° disebut fasa T. Perbedaan sudut fasa tersebut pada pembangkit dimulai dari adanya kumparan yang masing-masing tersebar secara terpisah dengan jarak 120° (Napitu, 2008).

2.3.1 Sistem Bintang Dan Delta

Sistem Y merupakan sistem sambungan pada sistem tiga fasa yang menggunakan empat Kawat, yaitu fasa R, S, T dan N. Sistem sambungan tersebut akan menyerupai huruf Y, yang memiliki empat titik sambungan yaitu pada ujung-ujung huruf dan pada titik pertemuan antara tiga garis pembentuk huruf. Sistem Y dapat digambarkan dengan skema berikut.



Gambar 2. 17. Sistem Bintang (Y) Dan Sistem Delta (Δ). Sumber: (Sudirman, 2012)

Sistem hubungan atau sambungan Y, sering juga disebut sebagai hubungan bintang. Sedangkan pada sistem yang lain yang disebut sebagai sistem Delta, hanya menggunakan fasa R, S dan T untuk hubungan dari Sumber ke beban, sebagaimana gambar diatas. Tegangan efektif antar fasa umumnya adalah 380 V dan tegangan efektif fasa ke netral adalah 220 V

2.3.2 Faktor Daya Listrik

Aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik secara garis besar adalah suatu peristiwa daya yang mengalir berupa daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari suatu sistem pembangkit (sisi pengirim) melalui suatu saluran atau jaringan transmisi hingga sampai ke sisi beban (sisi penerima). Pada kondisi ideal, maka daya yang diberikan oleh sisi pengirim akan sama dengan daya yang diterima beban. Namun pada kondisi real, daya yang dikirim sisi pengirim tidak akan sama dengan yang diterima beban. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa hal yakni impedansi di saluran transmisi dan tipe beban yang tersambung jalur antara lain resistif, induktif dan kapasitif. (Muhammad Syukri, Selamat Muslimin)

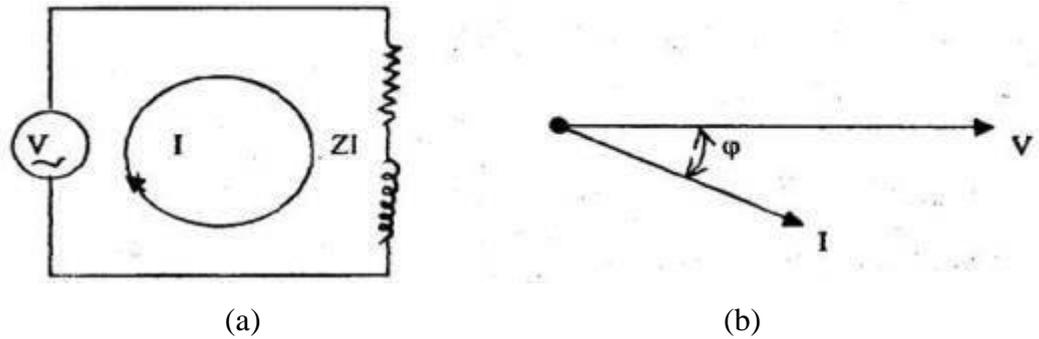
Faktor daya merupakan besarnya perbandingan antara daya listrik yang terpakai atau daya aktif dalam satuan watt (P) dengan besarnya daya semu atau kapasitas daya yang diberikan oleh PLN dalam satuan volt ampere (S). Faktor daya yang kurang baik akan menyebabkan nilai daya reaktif (VAR) menjadi besar dan ini akan menyebabkan kerugian untuk konsumen listrik, maka dari itu PLN memberikan batas minimal dimana faktor daya dapat dikatakan baik jika nilainya lebih besar daripada sama dengan 0,85. Pergeseran fasa antara tegangan dan arus biasanya disebabkan oleh beban yang bersifat induktif seperti motor listrik.

Faktor daya yang kurang baik akan menyebabkan kerugian antara lain:

1. Meningkatkan rugi – rugi hantaran (FR).
2. Kapasitas daya kompleks (S) terpasang terbuang percuma (kVA)
3. Dikenai denda biaya faktor daya (kVAr).
4. Biaya pemeliharaan alat meningkat.
5. Biaya listrik meningkat

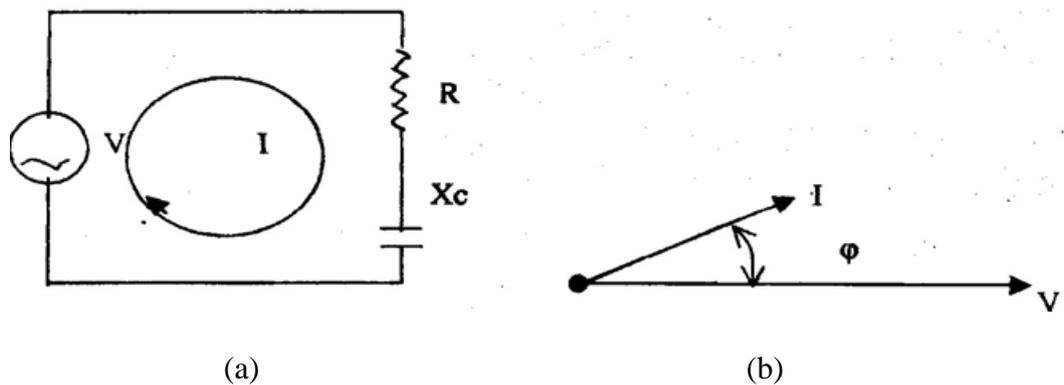
Faktor daya merupakan suatu besaran yang dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Nilai faktor daya ini mempengaruhi jumlah arus yang mengalir pada saluran untuk suatu beban yang sama. Penyebab utama yang mempengaruhi faktor daya adalah beban induktif yang salah satu nya disebabkan motor induksi, dan transformator yang mengakibatkan melebarnya sudut phase antara arus dan tegangan sehingga faktor daya menjadi rendah, faktor daya yang rendah dapat mengakibatkan rugi yang sangat besar pada jaringan.

Impedansi beban bersifat induktif, akan menyebabkan vektor arus (I) tertinggal dari vektor tegangan (V), kondisi ini disebut faktor daya tertinggal (*Lagging power factor*)



Gambar 2. 18. (a) Rangkaian factor daya tertinggal (b) Diagram fasor faktor daya tertinggal

Sedangkan untuk impedansi beban yang bersifat kapasitif, vektor arus (I) akan mendahului vektor tegangan (V), keadaan ini disebut faktor daya mendahului (*Leading power factor*)



Gambar 2. 19. (a) Rangkaian factor daya mendahului (b) Diagram fasor faktor daya mendahului

Factor daya dapat dirumuskan :

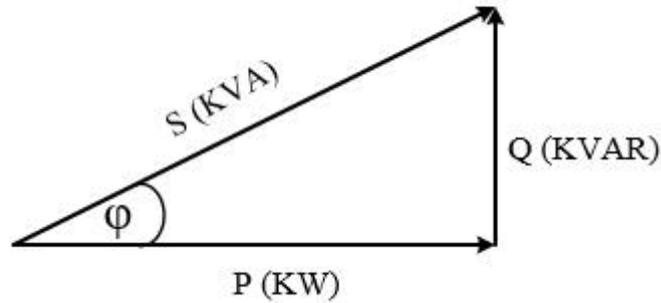
$$\cos\phi = \frac{P}{S} \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

P = Daya aktif (Watt)

S = Daya Semu (VA)

Dalam tenaga listrik dikenal tiga macam daya, yaitu daya semu, daya aktif dan daya reaktif. Seperti ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2. 20. Segitiga Daya

Keterangan :

P : Daya Aktif (Watt)

Q : Daya Reaktif (Var)

S : Daya Semu (VA)

Cos φ : Faktor Daya

Pada sistem 3 fasa berlaku rumus seperti berikut :

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \dots\dots\dots(2.13)$$

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \text{Cos } \varphi \dots\dots\dots(2.14)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \text{Sin } \varphi \dots\dots\dots(2.15)$$

2.3.2.1 Daya Semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antar tegangan dan arus dalam suatu jaringan. Beban yang bersifat daya semu adalah beban yang bersifat resistansi, dengan satuan pada daya semu adalah VA.

$$S = \sqrt{3} \times V_{L-L} \times I \dots\dots\dots(2. 16)$$

Dimana :

$$V_{L-L} = 20 \text{ KV}$$

$$V_{L-N} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}$$

Daya semu biasa juga disebut dengan daya total, karena merupakan hasil penjumlahan dari akar kuadrat P (daya aktif) dan Q (daya reaktif)

$$S^2 = P^2 + Q^2 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :

S = Daya Semu (VA)

P = Daya Aktif (Watt)

Q = Daya Reaktif (VAR)

V_{L-L} = Tegangan antar phase (V)

V_{L-N} = Tegangan Phase (V)

I = Arus Listrik (A)

2.3.2.2 Daya Aktif

Daya aktif atau disebut juga daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban resistif, dimana beban resistif sendiri adalah suatu komponen yang mengandung resistansi (ohm), yang secara umum ditemui dalam komponen-komponen rumah tangga.

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\phi \dots\dots\dots(2.19)$$

Dimana :

P = Daya aktif (Watt)

V = Tegangan yang mengalir (KV)

I = Arus yang mengalir (A)

$\cos\phi$ = Kerugian daya yang disebabkan beban yang memiliki daya harmonik

2.3.2.3 Daya Reaktif

Daya reaktif adalah daya yang diperlukan dalam pembentukan medan magnet. Medan magnet tersebut akan terbentuk fluks magnet. atau daya yang diserap oleh beban yang bersifat induktif, satuan dari daya reaktif adalah VAR

$$3 \text{ phase} : Q = \sqrt{3} \times V \times I \times \sin \phi \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

Q = Daya reaktif (KVAR)

$\sin \phi$ = Faktor kerja (tergantung besar nya ϕ)

2.4 Karakteristik Beban

Berdasarkan jenis konsumen energi listrik, secara garis besar, ragam beban dapat diklasifikasikan ke dalam :

1. Beban rumah tangga,

Pada umumnya beban rumah tangga berupa lampu untuk penerangan, alat rumah tangga, seperti kipas angin, pemanas air, lemari es, penyejuk udara, mixer, oven, motor pompa air dan sebagainya. Beban rumah tangga biasanya memuncak pada malam hari.

2. Beban komersial,

Pada umumnya terdiri atas penerangan untuk reklame, kipas angin, penyejuk udara dan alat – alat listrik lainnya yang diperlukan untuk restoran. Beban hotel juga diklasifikasikan sebagai beban komersial (bisnis) begitu juga perkantoran. Beban ini secara drastis naik di siang hari untuk beban perkantoran dan pertokoan dan menurun di waktu sore.

3. Beban industri

Dibedakan dalam skala kecil dan skala besar. Untuk skala kecil banyak beroperasi di siang hari sedangkan industri besar sekarang ini banyak yang beroperasi sampai 24 jam.

4. Beban Fasilitas Umum

Pengklasifikasian ini sangat penting artinya bila kita melakukan analisa karakteristik beban untuk suatu sistem yang sangat besar. Perbedaan yang paling prinsip dari empat jenis beban diatas, selain dari daya yang digunakan dan juga waktu pembebanannya. Pemakaian daya pada beban rumah tangga akan lebih dominan pada pagi dan malam hari, sedangkan pada beban komersil lebih dominan pada siang dan sore hari. Pemakaian daya pada industri akan lebih merata, karena banyak industri yang bekerja siang-malam. Maka dilihat dari sini, jelas pemakaian daya pada industri akan lebih menguntungkan karena kurva bebannya akan lebih merata. Sedangkan pada beban fasilitas umum lebih dominan pada siang dan malam hari. Beberapa daerah operasi tenaga listrik memberikan ciri tersendiri, misalnya daerah wisata, pelanggan bisnis mempengaruhi penjualan kWh walaupun jumlah pelanggan bisnis jauh lebih kecil dibanding dengan pelanggan rumah tangga.

Karakteristik beban diperlukan agar sistem tegangan dan pengaruh termis dari pembebanan dapat dianalisis dengan baik. Analisis tersebut termasuk dalam menentukan keadaan awal yang akan di proyeksikan dalam perencanaan selanjutnya. Penentuan karakteristik beban listrik suatu gardu distribusi sangat penting artinya untuk mengevaluasi pembebanan gardu distribusi tersebut, ataupun dalam merencanakan suatu gardu distribusi yang baru. Karakteristik beban ini sangat memegang peranan penting dalam memilih kapasitas

transformator secara tepat dan ekonomis. Di lain pihak sangat penting artinya dalam menentukan rating peralatan pemutus rangkaian, analisa rugi-rugi dan menentukan kapasitas pembebanan dan cadangan tersedia dan suatu gardu. Karakteristik beban listrik suatu gardu sangat tergantung pada jenis beban yang

dilayaninya. Hal ini akan jelas terlihat dan hasil pencatatan kurva beban suatu interval waktu. Berikut ini beberapa faktor yang menentukan karakteristik beban.

2.4.1 Kebutuhan (*Demand*)

Kebutuhan sistem listrik adalah beban pada terminal terima secara rata-rata dalam suatu selang (interval) waktu tertentu. Pengertian dari demand (D) dan suatu beban dapat diartikan sebagai besar pembebanan sesaat dan pada waktu tertentu atau besar beban rata-rata untuk suatu interval waktu tertentu. Interval waktu dimana besarnya beban ingin ditentukan disebut : Demand Interval (T). Demand dapat dinyatakan dalam KW, KVA atau KVAR.

2.4.2 Kebutuhan Maksimum (*Maksimum Demand*)

Kebutuhan maksimum dari sistem listrik adalah kebutuhan tertinggi beban yang terjadi selama periode waktu tertentu. misal : - maximum demand 1 jam , T = 24 jam, dengan perkataan lain ; Dmx, 1 jam pada T = 24 jam,berarti besarnya beban rata-rata terbesar untuk selang waktu 1 jam pada interval waktu T = 24 jam

2.4.3 Beban Puncak (*Peak Load*)

Beban Puncak adalah nilai terbesar dari pembebanan sesaat pada suatu interval demand tertentu. Untuk menentukan arus beban puncak transformator menggunakan rumus :

$$I_{FL} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V} \dots\dots\dots(2.21)$$

Dimana :

I_{FL} = arus beban puncak (ampere)

S = daya transformator (KVA)

V = tegangan sisi skunder (volt)

2.4.4 Beban Terpasang (*Connected Load*)

Beban terpasang dimaksudkan adalah jumlah kapasitas dari semua beban dengan kapasitas yang tertera pada papan nama (name plate) dan peralatan-peralatan listrik. (suwanto,2009)

Beban terpasang dari suatu sistem adalah jumlah total daya dari seluruh peralatan sesuai dengan kW atau KVA yang tertulis pada papan nama (name plat) peralatan yang akan dilayani oleh system tersebut. Jadi :

$$\text{Persentase pembebanan} = I_{rata-rata} / I_{FL} \times 100\% \dots\dots\dots(2.22)$$

2.4.5 Faktor beban

Adalah perbandingan antara beban rata – rata terhadap beban puncak yang diukur dalam suatu periode tertentu. Beban rata – rata dan beban puncak dapat dinyatakan dalam kilowatt, kilovolt amper, amper dan sebagainya, tetapi satuan dari keduanya harus sama. Faktor beban dapat dihitung untuk periode tertentu biasanya dipakai harian, bulanan atau tahunan. Beban puncak yang dimaksud disini adalah beban puncak sesaat atau beban puncak rata-rata dalam interval tertentu (demand maksimum), pada umumnya dipakai demand maksimum 15 menit atau 30 menit. Faktor beban dapat diketahui dari kurva bebannya. Sedangkan untuk perkiraan besaran faktor beban di masa yang akan datang dapat didekati dengan kata data statistik yang ada berdasarkan jenis bebannya. Faktor

beban (F_b) = Beban rata-rata dalam periode tertentu / beban puncak dalam periode tersebut.

Faktor beban adalah perbandingan antara beban rata-rata selama interval tertentu dengan beban puncak yang terjadi pada interval yang sama. Faktor beban adalah perbandingan antara beban rata – rata terhadap beban puncak dalam periode tertentu. Beban rata – rata dan beban puncak dapat dinyatakan dalam kilowatt, kilovolt –amper, amper dan sebagainya, tetapi satuan dari keduanya harus sama. Faktor beban dapat dihitung untuk periode tertentu biasanya dipakai harian, bulanan atau tahunan

2.4.6 Beban Harian

Faktor beban harian, bervariasi menurut karakteristik dari daerah beban tersebut, apakah daerah pemukiman, daerah industry, perdagangan ataupun gabungan dari bermacam pemakai/pelanggan, juga bagaimana keadaan cuaca atau juga apakah hari libur dan sebagainya.

2.4.7 Faktor Beban harian rata – rata

Faktor-faktor ini sangat berguna dalam meramalkan karakteristik beban masa datang atau dalam menentukan efek pembebanan terhadap kapasitas sistem secara menyeluruh

2.4.8 Rata – rata Arus Beban

Menghitung Arus beban pada Instalasi Listrik dapat dilakukan dengan pengukuran menggunakan tang ampere pada power panel, dirumuskan sebagai berikut

$$m = \frac{\text{sum of the term (a)}}{\text{number of term (b)}} \dots\dots\dots(2\ 23)$$

Dimana :

m = Mean (Rata - rata)

a = Jumlah total Observasi

b = Banyaknya Observasi

2.4.9 Faktor Keragaman Beban (Diversity Factor)

Faktor keserempakan beban dihitung dengan menghitung terlebih dahulu faktor keragaman beban (*diversity*). Faktor keragaman didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah bebanmaksimum dari masing masing unit beban yang ada pada suatu sistem terhadap beban maksimum system secara keseluruhan. Faktor keragaman beban dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut

$$F_{div} = \frac{D_{max\ i} + D_{max\ 2} + \dots + D_{max\ n}}{D_{max\ (1+2+\dots+n)}} \dots\dots\dots(2. 24)$$

Dimana :

$D_{max\ i}$ = beban maksimum beban unit ke i

$D_{max\ s}$ = beban maksimum sistem

Bila $D_{max\ i}$ untuk seluruh unit bersamaan waktunya maka f_{div} akan berharga 1, tetapi bila tidak f_{div} akan lebih besar dari 1. Pada umumnya faktor diversitas untuk gardu distribusi nilainya berkisar seperti dibawah ini :

a. Gardu distribusi 1,00 – 1,50

b. Gardu induk 1,08 – 1,6

2.4.10 Faktor Keserempakan Beban (Coincidence Factor)

Faktor keserempakan beban merupakan perbandingan terbalik dari faktor keragaman beban, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara beban maksimum dari suatu kumpulan beban dari sistem terhadap jumlah beban maksimum dari masing – masing unit beban. Faktor keserempakan beban dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$F_{cf} = \frac{D_{max\ s}}{\sum_{i=1}^n D_{max\ i}} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$F_{cf} = \frac{1}{(F_{div})} \dots\dots\dots(2.26)$$

Faktor kebutuhan didefinisikan sebagai perbandingan antara beban puncak suatu sistem terhadap beban terpasang yang dilayani oleh system.

2.4.11 Pemilihan Kapasitas Transformator

Pemilihan kapasitas transformator distribusi yang sesuai dengan beban konsumen akan menyebabkan efisiensi yang baik dan begitu juga dengan penempatan transformator distribusi yang tepat akan memperkecil tegangan jatuh pada konsumen.

2.4.12 Perhitungan Daya Tranformator

Pemilihan kapasitas kVA transformator distribusi pada Mall Transmart dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Daya Trafo (S)} = \frac{\text{Total Beban}}{\text{Faktor Keserempakan}} \dots\dots\dots(2.27)$$

2.4.13 Perhitungan Presentase Pembebanan Transformator

Menurut PT.PLN, 1997, yang tertuang dalam SPLN No. 50, transformator distribusi diusahakan tidak dibebani lebih dari 80% atau dibawah 40%. Jika melebihi atau kurang dari nilai tersebut transformator bisa dikatakan overload atau underload. Diusahakan agar transformator tidak dibebani keluar dari range tersebut. (Seniari, Fadli, and Ginarsa 2020) Pemilihan kapasitas transformator distribusi yang sesuai dengan beban konsumen akan menyebabkan efisiensi yang baik. Presentase pembebanan transformator distribusi dapat dicari dengan perbandingan antara daya terpasang dengan kapasitas transformator distribusi, yang dapat dinyatakan dalam persen (%) atau dengan persamaan sebagai berikut.(Albar, 2020)

$$\%Pembebanan = \frac{LT}{FT} \times 100\% \dots\dots\dots(2.28)$$

Keterangan :

%Pembebanan : Persentase pembebanan transformator distribusi (%)

LT : Load Transformator / Daya Terpasang (VA)

PT : Kapasitas Transformator distribusi (VA)

Presentase pembebanan transformator distribusi dihitung dengan menghitung terlebih dahulu arus beban penuh (*full load*)

$$I_{FL} = \frac{S}{V (3 \text{ fasa})} \dots\dots\dots(2.29)$$

Perhitungan presentase pembebanan transformator distribusi dengan berdasarkan arus beban penuh (I_{FL}) dan pengukuran arus pada kWh meter adalah sebagai berikut :

$$\%beban = \frac{I(\text{rata2})}{I_{FL}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.30)$$

Hasil perhitungan presentase pembebanan transformator distribusi dengan berdasarkan arus beban penuh (I_{FL}). Perhitungan persentase pembebanan sebagai acuan untuk pemilihan kapasitas transformator dan evaluasi kondisinya transformator. (Hidayah et al. 2021) Untuk mencegah terjadinya over blast yang akan menyebabkan cepat rusaknya transformator distribusi maka toleransi 70% - 90%. Berdasarkan faktor beban yang ada, kita dapat mengoptimalkan penggunaan transformator distribusi. Untuk melaksanakan program ini perlu dilakukan pendataan kapasitas transformator distribusi yang terpasang serta pengukuran beban. Disamping faktor beban, penentuan kapasitas transformator juga memperhatikan perkembangan kebutuhan tenaga listrik konsumen dilokasi yang dilayani oleh transformator distribusi tersebut. Bila beban transformator terlalu besar maka dilakukan penggantian transformator atau

penyisipan transformator atau mutasi transformator (transformator yang melayani beban kecil dimutasikan ke beban besar, dan begitu sebaliknya). (I Made Aditya Nugraha)

2.5 Relevansi Penelitian

Tabel 2. 6. Tabel Relevansi Penelitian

Peneliti	(Iqbal Al Hidayah, 2021)	(Muhammad Rizky Kurniawan, 2022)
Judul	Faktor Kesempakan Beban Terhadap Pemilihan Kapasitas Transformator Distribusi Perumahan	Perencanaan Pemilihan Kapasitas Transformator Distribusi Mall Transmart Berdasarkan Faktor Keserempakan Beban
Masalah Penelitian	Perencanaan dalam memilih kapasitas transformator pada tipe perumahan	Perencanaan dalam memilih kapasistas transformator yang ideal bagi pelanggan sektor industri mall
Objek Penelitian	Perumahan Griya Asri 1	Mall Transmart
<i>Framework</i> / Metode	Metode Perhitungan Faktor Keserempakan Beban dan Perhitungan Presentase Pembebanan 1 Fasa	Metode Perhitungan Faktor Keserempakan Beban dan Perhitungan Persentase Pembebanan 3 Fasa
Implementasi	Menganalisis data hasil pengukuran alat 1 Fasa	Menganalisis data hasil pengukuran alat 3 Fasa