

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Transformator

Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bias secara terus menerus tanpa berhenti). Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu, maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan system dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian lainnya.

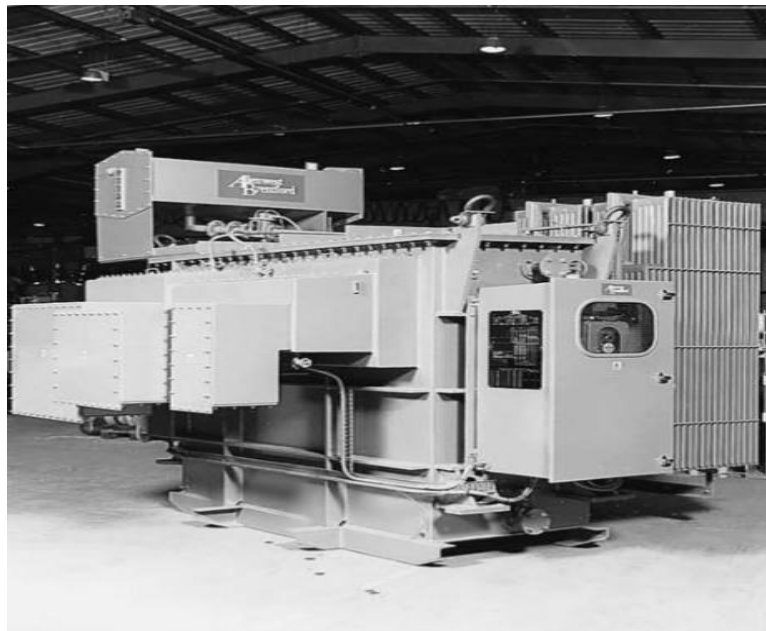
Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut Interbus Transformator (IBT). Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk system proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan thanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV nya.

Di dalam transformator juga terdapat minyak transformator. Minyak transformator memiliki dua fungsi antara lain sebagai isolator dan sebagai pendingin. Kebanyakan transformator pada sistem tenaga listrik merupakan transformator dengan inti terendam. Transformator daya tentunya berhubungan dengan daya yang sangat besar. Hal tersebut menyebabkan kenaikan temperatur (panas) yang tinggi pada transformator. Untuk menghindari terjadinya kerusakan akibat temperatur tinggi, maka digunakan minyak trafo sebagai pendingin. Kelebihan dari pada minyak trafo yaitu bersifat sebagai media pemindah panas dengan cara sirkulasi dan dapat menjangkau celah-celah sempit sekalipun. Sebagai isolator, minyak transformator mencegah terjadinya hubung singkat antara coil pada konduktor dan sebagai pengamanan apabila terjadi percik api (*sparks*) di dalam transformator.

Pada transformator daya dapat terjadi gangguan- gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan transformator. Untuk itu diperlukan perawatan dan

pemeliharaan pada transformator daya, salah satunya dengan melakukan pengujian minyak transformator yaitu pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator. Uji DGA merupakan analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak transformator. Pada tulisan ini menggunakan empat metode untuk analisa kegagalan transformator yaitu metode TDCG, Key Gass, Roger's Ratio, Duval's Triangle. Uji DGA dilakukan pada suatu sampel minyak diambil dari unit transformator kemudian gas-gas terlarut (*Dissolved Gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individual, dan dihitung kualitasnya (dalam satuan Part Per Million-ppm).

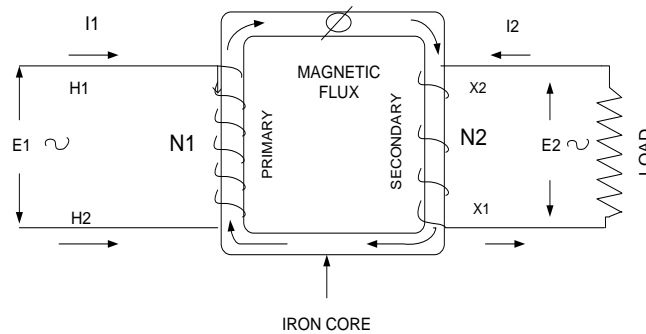
Keuntungan utama uji DGA adalah deteksi dini akan adanya fenomena kegagalan yang ada pada transformator yang diujikan. Namun kelemahan utamanya adalah diperlukan tingkat kemurnian yang tinggi dari sampel minyak yang diujikan. Rata-rata alat uji DGA memiliki sensitivitas yang tinggi, sehingga ketidakmurnian sampel akan menurunkan tingkat akurasi dari hasil uji DGA.



Gambar 2.1 Transformator

2.1.1 Prinsip Kerja Transformator

Secara umum prinsip kerja transformator sama dengan prinsip kerja motor dan generator yaitu memanfaatkan medan elektromagnetik (*fluk*). Pada motor induksi, kita mengubah tenaga listrik menjadi magnet lalu menjadi gerak. Pada Generator kita mengubah tenaga gerak menjadi magnet lalu menjadi tenaga listrik. Maka pada trafo/transformator adalah gabungan keduanya. Pada sisi lilitan primer, tenaga listrik kita ubah menjadi medan magnet. Medan magnet yang berubah-ubah pada sisi primer, menyebabkan induksi magnet pada sisi sekunder, lalu listrik dibangkitkan pada sisi sekunder. Konstruksi transformator (trafo) yang terdiri dari coil primer dan coil sekunder.



Gambar 2.2 Prinsip Dasar Dari Tranformator

Besaran tegangan listrik yang dihasilkan serta besaran arus yang dapat dilalui pada trafo dapat dihitung berdasarkan persamaan dibawah ini:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

- E_1 = Tegangan primer (V) N_1 = Jumlah lilitan primer
- E_2 = Tegangan skunder(V) N_2 = Jumlah lilitan skunder
- I_1 = Arus primer (A) I_2 = Arus sekunder (A)

Jadi tegangan primer nilainya berbanding lurus dengan arus sekunder, itu juga dipengaruhi oleh jumlah lilitan primer.

2.1.2 Bagian-bagian Transformator

Transformator terdiri dari :

2.1.2.1 Bagian Utama :

- a) Inti besi pada transformator berfungsi untuk mempermudah jalan fluks, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh arus eddy.



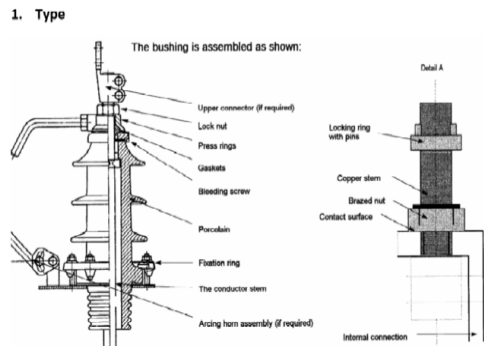
Gambar 2.3 Inti besi pada transformator

- b) Kumparan Transformator Adalah beberapa lilitan kawat berisolasi yang membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut terdiri dari kumparan primer dan kumparan sekunder yang diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap antar kumparan dengan isolasi padat seperti karton, pertinak dan lain-lain. Kumparan tersebut sebagai alat transformasi tegangan dan arus.



Gambar 2.4 Kumparan Tranformator

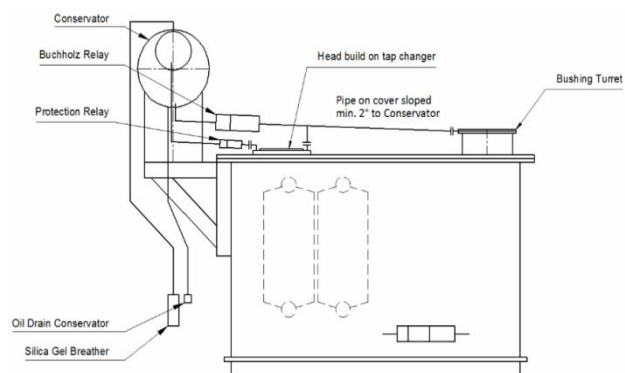
- c) Minyak Transformator Sebagian besar kumparan-kumparan dan inti trafo tenaga direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai isolasi dan media pemindah, sehingga minyak trafo tersebut berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.
- d) 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.



Gambar 2.5 Bushing

- e) Tangki-Konservator Pada umumnya terdapat pada bagian atas dari trafo Saat terjadi kenaikan suhu operasi pada transformator, minyak isolasi akan memuai sehingga volumenya bertambah. Sebaliknya saat terjadi penurunan suhu operasi, maka minyak akan menyusut dan volume minyak akan turun. Konservator digunakan untuk menampung minyak tranformator.

INSTALLATION OF CONSERVATOR AND PIPES



Gambar 2.6 Consevator

2.1.2.2 Peralatan Bantu

- a) Sistem Pendinginan digunakan untuk mendinginkan 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 (di dalam transformator). Maka untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan maka perlu dilengkapi dengan alat atau sistem pendingin. Untuk menyalurkan panas keluar transformator pada cara alamiah (natural), pengaliran media panas sebagai akibat adanya perbedaan suhu panas dan untuk mempercepat perpindahan panas dari media tersebut ke udara luar diperlukan bidang perpindahan panas yang lebih luas antara media (minyak, udara, gas) dengan cara melengkapi transformator dengan sirip-sirip (Radiator). Bila diinginkan penyaluran panas yang lebih cepat lagi, cara alamiah tersebut dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air. Cara ini disebut pendingin paksa (Forced).
- b) Tap Changer (Perubahan tap).

Tap changer adalah alat perubah perbandingan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan / primer yang berubah-ubah. Tap changer yang hanya bisa beroperasi untuk memindahkan tap transformator dalam keadaan transformator tidak berbeban disebut “Off Load Tap Changer” dan hanya dapat dioperasikan manual.



Gambar 2.7 Tap Changer

c) Alat Pernapasan.

Karena pengaruh naik turunnya beban transformator maupun suhu udara luar, maka suhu minyak pun akan berubah-ubah mengikuti keadaan tersebut. Bila suhu minyak tinggi, minyak akan memuai dan mendesak udara di atas permukaan minyak keluar dari tangki, sebaliknya apabila suhu minyak turun, minyak menyusut maka udara luar akan masuk ke dalam tangki. Kedua proses di atas disebut pernapasan transformator.

Akibat pernapasan transformator tersebut maka permukaan minyak akan selalu bersinggungan dengan udara luar. Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung kaca berisi kristal zat hygroskopis sehingga dapat dilihat warnanya yang biasa disebut juga sebagai silicagel, dimana silicagel ini sebagai pengontrol kelembaban dan dapat berubah warna tergantung dari kadar kelembaban transformator.



Gambar 2.8 Pernapasan Pada Trafo

- d) Indikator Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indicator pada transformator sebagai berikut: - Indikator suhu minyak - Indikator permukaan minyak. - Indikator kedudukan tap.

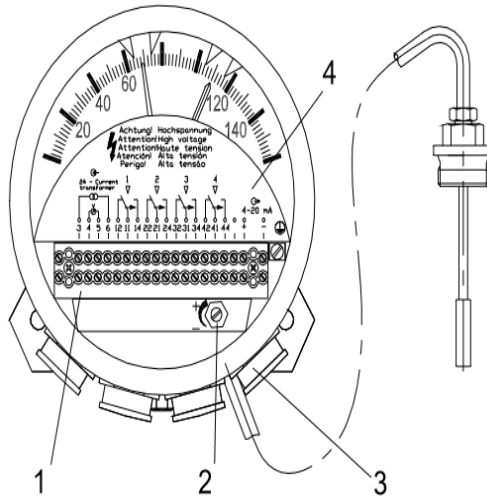


Bild 3 / Fig. 3

Gambar 2.9 Indikator suhu minyak

- e) Minyak Transformator Isolator merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang berdekatan untuk mencegah adanya kebocoran arus/hubung singkat, maupun sebagai pelindung mekanis dari kerusakan yang diakibatkan oleh korosif atau stressing.

Minyak isolator yang dipergunakan dalam transformator daya mempunyai beberapa tugas utama, yaitu :

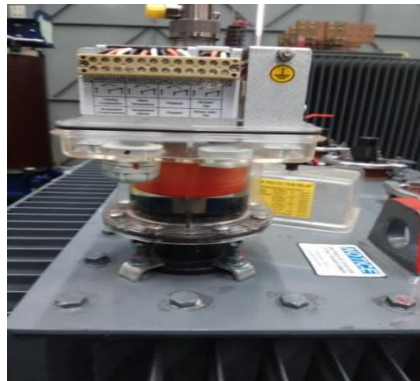
1. Media isolator
2. Media pendingin
3. Media/alat untuk memadamkan busur api

Karakteristik Minyak Terhadap Temperatur atau Kenaikan temperatur akan mengkatalis terjadinya oksidasi di dalam minyak transformator. Dengan semakin tingginya pembebanan transformator maka reaksi kimia yang terjadi didalam minyak transformator akan semakin cepat sehingga kandungan asam akan semakin tinggi. Dengan meningkatnya kandungan asam dalam minyak, maka kualitas minyak menjadi menurun.

f) DMCR (*Detection Measurement And Control Relay*)

DMCR adalah relai perlindungan yang dirancang untuk terendam minyak yang tertutup rapat tanpa bantalan gas. perangkat ini memungkinkan kontrol penuh terhadap parameter internal tangki yaitu tekanan, level minyak dan deteksi gas. pengaplikasian perangkat ini yaitu di pasang langsung pada cover transformator sisi atas.

Relai ini memastikan perlindungan terhadap gangguan internal transformator, tegangan berlebih yang berkepanjangan dan resiko kebakaran terkait dengan penggunaan cairan dielektrik yang mudah terbakar



Gambar 2.10 DMCR Proteksi Relay

2.1.3 Jenis Gangguan pada transformator

Gangguan pada transformator terbagi menjadi beberapa jenis yang meliputi :

2.1.3.1 Gangguan Dalam (*Internal Fault*)

Internal Fault adalah gangguan ini bersumber dari dalam transformator itu sendiri.

Gangguan ini dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

- a) Terjadi busur api (*are*) yang kecil dan pemanasan lokal yang dapat disebabkan oleh:
 - cara penyambungan konduktor yang tidak baik.
 - *partial discharge*.
 - kerusakan isolasi pada baut – baut penjepit inti.
- b) Gangguan pada sistem pendingin.
- c) Arus sirkulasi pada trafo – trafo yang bekerja paralel.
- d) Gangguan hubung singkat di dalam transformator misalnya hubung singkat diantara gulungan belitan tegangan tinggi atau rendah.

Semuanya ini menyebabkan pemanasan lokal, tetapi tidak mempengaruhi suhu trafo secara keseluruhan. Gangguan ini tidak dapat dideteksi dari terminal trafo karena besar dan keseimbangan arus serta tegangan tidak berbeda dengan kondisi pada operasi normal. Walaupun *incipient faults* merupakan gangguan yang kecil, tetapi jika tidak segera dideteksi akan membesar dan menimbulkan kerusakan yang lebih serius.

2.1.2.3 Gangguan dari luar (*Through Fault*).

Gangguan ini terjadi di luar transformator dan dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

a) Gangguan diluar (*External Fault*)

Gangguan hubung singkat antara fasa atau gangguan fasa ke tanah di luar transformator, misalnya di busbar atau di sisi penyulang tegangan menengah. Arus gangguan ini cukup besar dan dapat di deteksi.

b) Beban lebih (*Over load*)

Transformator tenaga dapat beroperasi secara kontinu pada beban nominal. Bila beban lebih besar dari beban nominal, maka transformator akan berbeban lebih, akan menimbulkan arus lebih yang mengakibatkan pemanasan lebih. Ini akan menurunkan kemampuan isolasi.

c) Gelombang Surja.

Gelombang surja dapat terjadi karena cuaca, yaitu petir yang menyambar jaringan transmisi dan kemudian akan merambat ke gardu terdekat dimana transformator tenaga terpasang. Walaupun hanya terjadi dalam kurun waktu sangat singkat (beberapa puluh mikrodetik), akan tetapi karena tegangan puncak yang dimiliki cukup tinggi dan energi yang dikandungnya besar, maka ini dapat menyebabkan kerusakan pada transformator tenaga.

Disamping dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan , gangguan tersebut dapat juga membahayakan manusia atau operator yang ada disekitarnya. Akibat-akibat yang terjadi pada manusia atau operator adalah seperti terkejut, pingsan bahkan sampai meninggal.

2. 2 DGA (Dissolved Gas Analysis) (1)

Salah satu metoda untuk mengetahui ada tidaknya ketidaknormalan pada transformator adalah dengan mengetahui dampak dari ketidaknormalan transformator itu sendiri. Untuk mengetahui dampak ketidaknormalan pada transformator digunakan metoda DGA (*Dissolved Gas Analysis*).

Pada saat terjadi ketidaknormalan pada transformator, minyak isolasi sebagai rantai hidrokarbon akan terurai akibat besarnya ketidaknormalan dan

akan membentuk gas-gas hidrokarbon yang larut dalam minyak isolasi itu sendiri. Pada dasarnya DGA adalah proses untuk menghitung kadar/nilai dari gas-gas hidrokarbon yang terbentuk akibat ketidaknormalan pada trafo. Dari komposisi kadar gas-gas itulah dapat diprediksi dampak-dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam transformator, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona*.

DGA secara harafiah dapat diartikan sebagai analisis kondisi transformator yang dilakukan berdasarkan jumlah gas terlarut pada minyak transformator. Pengujian kandungan gas terlarut pada minyak transformator akan memberi informasi terkait dengan kondisi dan kualitas kerja transformator. Uji DGA dilakukan pada sampel minyak yang diambil dari transformator, kemudian gas-gas terlarut (*dissolved gas*) tersebut diekstrak. Gas yang telah diekstrak lalu dipisahkan, diidentifikasi komponen-komponen individualnya, selanjutnya dihitung kuantitasnya (dalam satuan part per million – ppm). Dari komposisi kadar / nilai gas - gas itulah dapat diprediksi dampak - dampak ketidaknormalan apa yang ada di dalam transformator, apakah *overheat*, *arcing* atau *corona*.

Gas gas yang terdeteksi dari hasil pengujian DGA ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

No	Nama Gas	Lambang Kimia
1	Hidrogen	H ₂
2	Metana	CH ₄
3	Karbon Monoksida	CO
4	Karbon Dioksida	CO ₂
5	Etilen	C ₂ H ₄
6	Ethana	C ₂ H ₆
7	Asetilene	C ₂ H ₂

Tabel 2.1 Jenis gas yang terlarut dalam minyak isolasi (1)

Analisis kondisi transformator berdasarkan hasil pengujian DGA, setelah diketahui karakteristik dan jumlah dari gas-gas terlarut yang diperoleh dari sampel minyak, selanjutnya dilakukan analisis kondisi transformator. Ada beberapa metode untuk melakukan interpretasi data dan analisis seperti yang tercantum pada IEEE standard. C57-104.2008, adalah Metode TDCG, *key gas*, *roger's ratio*, *duval's triangle*.

2. 2.1 Metode TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)(1)

Analisa hasil pengujian DGA mengacu pada standar IEEE C57-104. Batasan standar hasil pengujian DGA dengan menggunakan standar IEEE C57 104.2008 adalah seperti terlihat pada Tabel 2.3. Hasil pengujian DGA dibandingkan dengan nilai batasan standar untuk mengetahui apakah transformator berada pada kondisi normal atau ada indikasi kondisi 2, 3 atau 4 (lihat Tabel 2.3). Nilai batasan standar TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) adalah jumlah gas mudah terbakar yang terlarut.

Berdasarkan standard IEEE yang membuat pedoman untuk mengklasifikasikan kondisi operasional transformator yang terbagi dalam 4 kondisi yaitu :

1. Kondisi 1 transformator beroperasi normal. Namun perlu dilakukan pemantauan kondisi gas-gas tersebut
2. Kondisi 2 tingkat TDCG mulai tinggi. Ada kemungkinan timbul gejala-gejala kegagalan yang harus diwaspadai. Perlu dilakukan pengambilan sampel minyak yang lebih rutin dan sering.
3. Kondisi 3, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi dari isolasi kertas/isolasi minyak transformator. Berbagai kegagalan mungkin dapat terjadi, oleh karena itu perlu diwaspadai dan perlu perawatan lebih lanjut.
4. Kondisi 4, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi/kerusakan pada isolasi kertas/minyak transformator yang telah meluas.

Standard IEEE merupakan standar utama yang digunakan dalam analisis DGA. Namun fungsinya hanyalah sebagai acuan, karena hanya menunjukkan dan menggolongkan tingkat konsentrasi gas dan jumlah TDCG dalam tingkat kewaspadaan. Standar ini tidak memberikan proses analisis yang lebih pasti akan indikasi kegagalan yang sebenarnya terjadi. Ketika konsentrasi gas terlarut telah melewati kondisi 1 (TDCG >720 ppm), maka perlu dilakukan proses analisis lebih lanjut untuk mengetahui indikasi kegagalan yang terjadi pada transformator.

Berdasarkan hasil pengujian dapat dilakukan investigasi kemungkinan terjadi kelainan dengan metoda key gas, ratio (*Roger dan Doernenburg*) dan *duval's triangle*.

Status	H ₂ (ppm)	H ₄ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	CO (ppm)	TDCG (ppm)
1	100	120	35	50	65	350	720
2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	721-1920
3	701-1800	401-1000	51-80	101-200	101-150	571-1400	1921-4630
4	>1800	>1000	>80	>200	>150	>1400	>4630

Tabel 2.3 Konsentrasi Gas Terlarut Minyak Transformator (1)

2. 2.2 Metode Key Gas(1)

Key gas didefinisikan oleh IEEE standar C57-104.2008 sebagai “gas-gas yang terbentuk pada transformator pendingin minyak yang secara kualitatif dapat digunakan untuk menentukan jenis kegagalan yang terjadi, berdasarkan jenis gas yang khas atau lebih dominan yang terbentuk pada berbagai temperatur”.

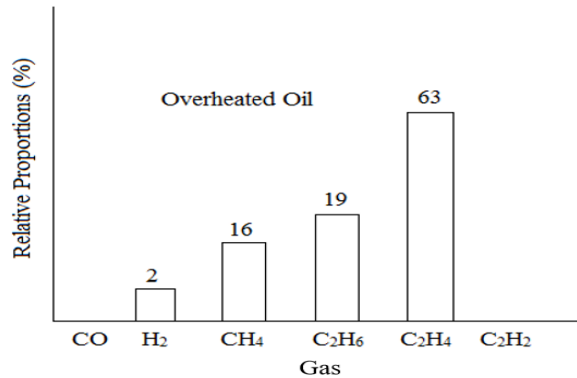
Gangguan	Gas Kunci	Kriteria	Jumlah Persentase Gas
Busur api (<i>arcing</i>)	<i>Asetilen</i>	Hidrogen dan asetilen dalam jumlah besar dan sedikit metana dan etilen	<i>Hidrogen = 60%</i> <i>Asetelin=30%</i>
Korona (<i>partial discharge</i>)	<i>Hidrogen</i>	Hidrogen dalam jumlah besar ,metana jumlah sedang dan seikit etilen	<i>Hidrogen =85%</i> <i>Metana =13%</i>
Pemanasan lebih (minyak)	<i>Etana</i>	Etana dalam jumlah besar dan etilen dalam jumlah kecil	<i>Etana =63%</i> <i>Etilen =20%</i>
Pemanasan lebih (<i>selulosa</i>)	<i>Karbonmonoksida</i>	Karbonmonoksida Dalam jumlah besar	<i>CO = 92%</i>

Tabel 2.4 Jenis Kegagalan Menurut Metode (1)

Jenis jenis kegagalan tersebut dapat digambarkan pada grafik dibawah ini :

1. *Thermal – Oil Dekomposisi* produk termasuk *ethylene* dan *methane* dengan sedikit kuantitas hidrogen dan ethane. Tanda keberadaan acetylene mungkin terbentuk jika fault yang terjadi parah atau diikuti dengan kontrak elektrik.

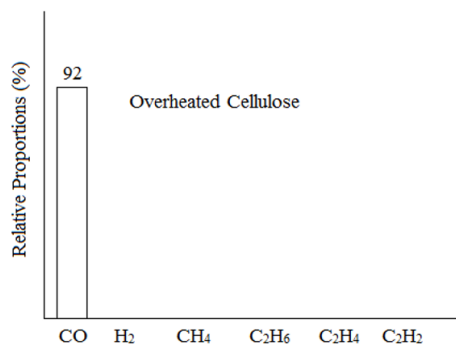
Gas dominan: *Ethylene* (1)



Gambar 2.10 *Overheated in Oil*

2. *Thermal –Selulosa*: Sejumlah karbon dioksida dan karbon monoksida terlibat akibat pemanasan *selulosa*. Gas hidrokarbon, seperti metana dan ethylene akan terbentuk jika fault melibatkan struktur minyak.

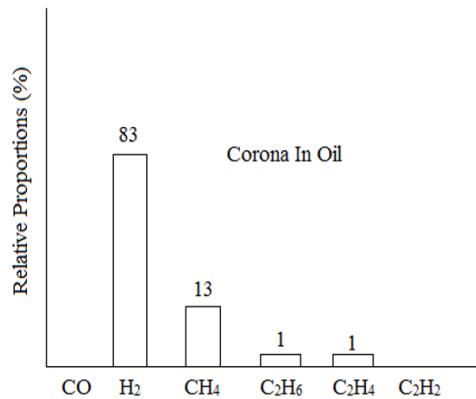
Gas dominan: *Karbon monoksida* (1)



Gambar 2.11 *Overheated Cellulose*

3. *Electrical – Partial Discharge: Discharge elektrik* tenaga rendah menghasilkan hydrogen dan metana dengan sedikit kuantitas *ethane* dan *ethylene*. Jumlah yang sebanding antara karbon monoksida dan karbon dioksida mungkin dihasilkan dari *discharge* pada *selulosa*.

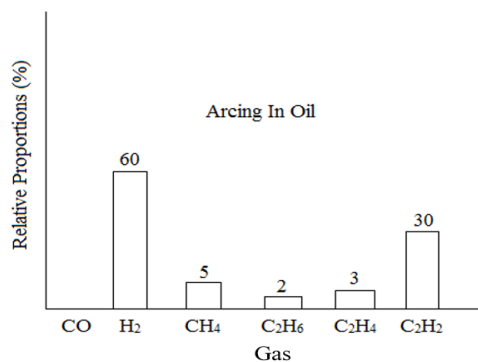
Gas dominan: Hidrogen. (1)



Gambar 2.12 *Corona in Oil*

4. *Electrical -Arching: Sejumlah hidrogen dan acetylene* terproduksi dan sejumlah methane dan ethylene. Karbon dioksida dan karbon monoksida akan selalu dibentuk jika melibatkan *fault selulosa*. Minyak mungkin terkarbonisasi.

Gas dominan: *Acetylene*.(1)



Gambar 2.13 *Arching in Oil*

2. 2.3 Metode Roger's Ratio(1)

Metode roger's ratio merupakan salah satu cara untuk menganalisis gas terurai dari suatu minyak transformator. Metode ini membandingkan nilai-nilai satu gas dengan gas dengan gas yang lain. Gas-gas yang digunakan dalam analisis menggunakan roger's ratio adalah sebagai berikut : $C_2H_2 / C_2 H_4$, CH_4 / H_2 , C_2H_4 / C_2H_6 .

Setelah didapatkan nilai perbandingan dari gas-gas tersebut, selanjutnya dimasukkan kedalam kode ratio yang diperlihatkan pada Tabel 2.5. Setelah dikonversi kedalam kode-kode seperti pada Tabel diatas, maka untuk analisis gangguan yang terjadi pada minyak transformator dapat diketahui dari Tabel 2.6 seperti berikut :

Rentang Kode Roger	$C_2H_2 / C_2 H_4$	CH_4 / H_2	C_2H_4 / C_2H_6
<0.1	0	1	0
0.1-1	1	0	0
01-Mar	1	2	1
>3	2	2	2

Tabel 2.5 Kode Kode Metode *Roger's Ratio*

Kasus	Tipe gangguan	C2H2 / C2 H4	CH4 / H2	CC2H4 / C2H6
0	Tidak ada gangguan	0	0	0
1	Low energy partial discharge	1	1	0
2	High Energy Partial discharge	0	1	0
3	Low Energy discharges, sparking, arcing	01-Feb	0	01-Feb
4	High Energy discharges, arcing	1	0	2
5	Overheating <150 °C	0	0	1
6	Overheating 150-300 °C	0	2	0
7	Kegagalan Suhu 300-700°C	0	2	1
8	Kegagalan Suhu > 700 °C	0	2	2

Tabel 2.6 Tipe Gangguan Pada Transformator Menurut Metode *Roger's Ratio*

Metode *Roger's Ratio* dan *Key Gas* cukup mudah untuk dilakukan, namun kelemahan utamanya adalah metode tersebut hanya dapat mendeteksi kasus-kasus kegagalan yang sesuai dengan Tabel 3 dan Tabel 4. Jika muncul konsentrasi gas diluar Tabel 3 dan 4 maka metode ini tidak dapat mendeteksi jenis kegagalan yang ada. Hal ini terjadi karena metode *roger's ratio* dan *key gas* merupakan sebuah sistem yang terbuka (*open system*). Metode segitiga duval diciptakan untuk membantu metode-metode analisis lain. Kondisi khusus yang diperhatikan adalah konsentrasi metana (CH₄), etilen (C₂H₄) dan asetilen (C₂H₂). Konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100% namun perubahan komposisi dari ketiga gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan. Metode ini merupakan sistem tertutup (*closed system*) sehingga mengurangi persentase kasus di luar kriteria analisis.

2.2.4 Metode Duval's Triangle(1)

Untuk menganalisis dengan metode ini yaitu menggunakan gas CH₄, C₂H₂, C₂H₄. Berikut ini adalah cara menganalisis suatu transformator yang bermasalah menggunakan metode duval's triangle adalah jumlahkan nilai-nilai dari ketiga gas tersebut (H₄, C₂H₂, C₂H₄). Selanjutnya bandingkan harga masing-masing nilai dari tiap gas-gas tersebut dan buat dalam bentuk persen (%). Gambarkan garis pada Duval's Triangle untuk ketiga gas tersebut sesuai nilai prosentase tadi. Daerah pertemuan dari ketiga gas tersebut menunjukkan kondisi yang terjadi pada transformator.

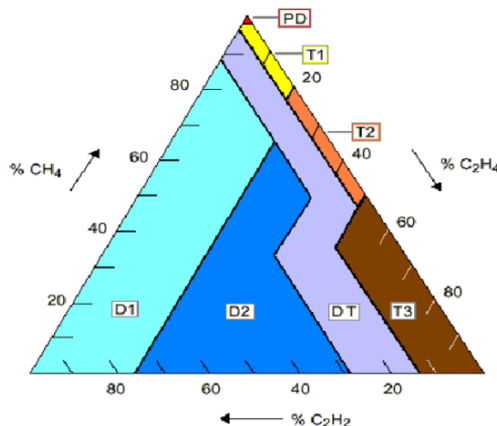
Metode segitiga duval ditemukan oleh Michel Duval pada 1974. Kondisi khusus yang diperhatikan adalah konsentrasi metana (CH₄), etilen (C₂H₄) dan asetilen (C₂H₂). Konsentrasi total ketiga gas ini adalah 100% namun perubahan komposisi dari ketiga gas ini menunjukkan kondisi fenomena kegagalan yang mungkin terjadi pada unit yang diujikan. Syarat menggunakan metode ini adalah setidaknya satu dari ketiga gas hidrokarbon harus berada pada kondisi diatas kondisi 1 (metode TDCG). Yang mungkin terjadi pada unit yang diujikan dan diperlihatkan pada Gambar 2.7.

Perhitungan titik koordinat *Duval Triangle*

$$\%CH_4 = CH_4 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2) \times 100\%$$

$$\%C_2H_4 = C_2H_4 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2) \times 100\%$$

$$\%C_2H_2 = C_2H_2 / (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2) \times 100\%$$



Gambar.2.14 Metode *Duval's Triangle*

Terdapat tujuh gangguan yang menjadi interpretasi dari komposisi ketiga gas tersebut yaitu :

1. PD = *Partial Discharge*
2. T1 = *Thermal Fault Less than 300 °C*
3. T2 = *Thermal Fault Between 300 °C and 700 °C*
4. T3 = *Thermal Fault Greater than 700 °C*
5. D1 = *Low Energy Discharge (Sparking)*
6. D2 = *High Energy Discharge (Arcing)*
7. DT = *Mix of Thermal and Electrical Faults*

2.3 Temperature Rize (2)

Temperature Rize merupakan salah satu pengujian transformator .pengujian ini termasuk pengujian spesial test kerana tidak semua transformator diuji seperti ini. Pemanasan yang terjadi pada sebuah transformator adalah berasal dari rugi-rugi besi dan tembaga. Pada penyaluran tenaga listrik terjadi kerugian sebesar I^2R Watt, kerugian ini akan banyak berkurang apabila tegangan dinaikkan. Dengan demikian saluran-saluran tenaga listrik senantiasa mempergunakan tegangan yang tinggi. Tegangan yang paling tinggi di Indonesia pada saat ini adalah 500 kV yaitu sama dengan 500.000 Volt. Hal ini dilakukan terutama untuk mengurangi kerugian energi yang terjadi. Dan menaikkan tegangan listrik di pusat listrik dari tegangan generator yang biasanya berkisar antara 6-20 kV pada awal saluran transmisi, dan menurunkannya pada ujung saluran itu ketegangan yang lebih rendah, dilakukan dengan transformator. Panas yang timbul akibat rugi rugi akan menyebabkan pertambahan temperatur pada transformator, panas ini diteruskan pada minyak yang dibawa ke tangki untuk disebar ke udara sekeliling. Kenaikan temperatur akan terus berlanjut jika panas yang diterima tidak sebanding dengan pendinginannya. Bila di inginkan perpindahan panas yang lebih cepat lagi, cara alamiah tersebut dapat dilengkapi dengan peralatan untuk mempercepat sirkulasi media pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air. Minyak transformator didalam bak transformator tidak mempunyai suhu yang sama, akan tetapi di sebelah bawah adalah yang terdingin, sedangkan suhu tertinggi disekitar sisi atas dari kumparan tembaga. Sebuah transformator, setelah dibebani akan mengalami kenaikan suhu akhirnya, dan suhu itu akan dicapainya setelah beberapa waktu lampau. Suhu lebih pada lilitan pada umumnya ditentukan dengan pengukuran – pengukuran tahanan , dengan menggunakan rumus yang dipakai IEC 60076 sebagai berikut:

$$T_2 = \frac{R_2}{R_1} \times (225 + T_0) - 225 \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

R_2 = nilai resistansi belitan pada kondisi panas (Ohm)

R_1 = nilai resistansi belitan pada kondisi dingin (Ohm)

T_1 = suhu belitan awal (rata-rata suhu sekitar) ($^\circ\text{C}$)

T_2 = suhu belitan akhir (panas) ($^\circ\text{C}$)



Gambar2.15 Pengujian *Temperature Rize*

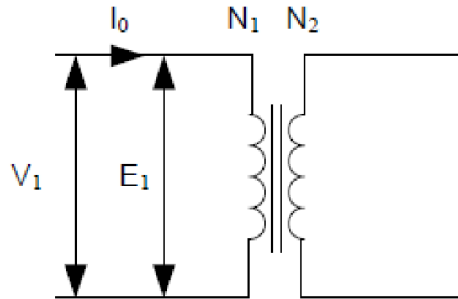
Pada transformator terdapat luas penampang yang dapat mempengaruhi nilai dari kerapatan arus. Dimana kerapatan arus dapat dihitung dengan menggunakan persamaandibawah ini :

$$\delta = \frac{1}{A} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan : δ : Rapat arus (A/mm²)
 I : Besarnya arus (A)
 A : Luas penampang (mm²)

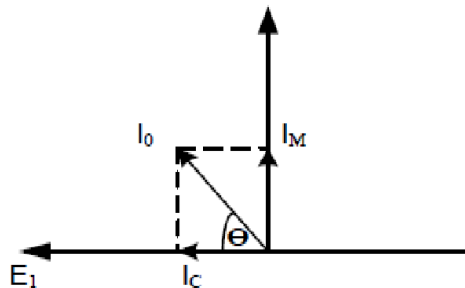
2.3.1 Transformator Tanpa Beban(2)

Transformator Tanpa Beban disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*open circuit*) perhatikan gambar dibawah ini.



Gambar 2.16 Transformator Tanpa Beban

Dalam keadaan ini, arus I_0 yang mengalir pada kumparan primer adalah sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Arus I_0 adalah terdiri dari arus pemagnet (I_M) arus tembaga (I_C). Arus I_M inilah yang menimbulkan fluks magnet bersama yang dapat mengakibatkan timbulnya rugi histerisis dan rugi eddy current (arus pusar). Rugi histerisis dan rugi eddy current inilah yang menimbulkan rugi inti sedangkan adanya arus tembaga akan menimbulkan rugi tembaga. Secara vektoris hubungan antara arus penguat, fluks magnet bersama dan gaya gerak listrik primer ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17 Hubungan Antara I_0 ϕ dan E_1

Dari gambar 2.17 terlihat bahwa:

$$I_0 = I_C + I_M \dots \dots \dots (2.4)$$

Jika beda fasa antara I_C dan I_0 adalah sebesar θ , maka :

$$I_C = I_0 \cos\theta \dots \dots \dots (2.5)$$

$$I_0 = \sqrt{I_C^2 + I_M^2} \dots \dots \dots (2.6)$$

Pada umumnya $R_c > X_m$, sehingga $I_c < I_m$ dianggap I_c , maka besar $\Theta = 90^\circ$. Dengan demikian pada trafo tersebut hanya ada rugi inti sebesar :

$$I_M^2 \cdot X_m = I_0^2 \cdot X_m$$

2. 3.1.1 Perhitungan no load

$$V_{rms} = V_{mean} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$V_{rata-rata} = \left(\frac{V_1+V_2+V_3}{3} \right) \dots\dots\dots(2.8)$$

$$\text{Rugi -rugi besi } (P_O = P_m) = (w_1 + w_2 + w_3) \quad (\text{watt}) \dots\dots\dots(2.9)$$

$$I \text{ no load } (I_{AVG} = I_O) = \left(\frac{I_1+I_2+I_3}{3} \right) \quad (\text{Ampere}) \dots\dots\dots(2.10)$$

Jika $V_{rms} \neq V_{mean}$ harus di koreksi dengan rumus sebagai berikut:

Rugi -rugi besi $P_m = (I + d)$ dimana :

$$d = \left(\frac{V_{mean}-V_{rms}}{V_{rms}} \right) \dots\dots\dots(2.11)$$

dengan ketentuan mean – rms < 3%
max THD (Total Harmonic Distorsi) 5%

keterangan :

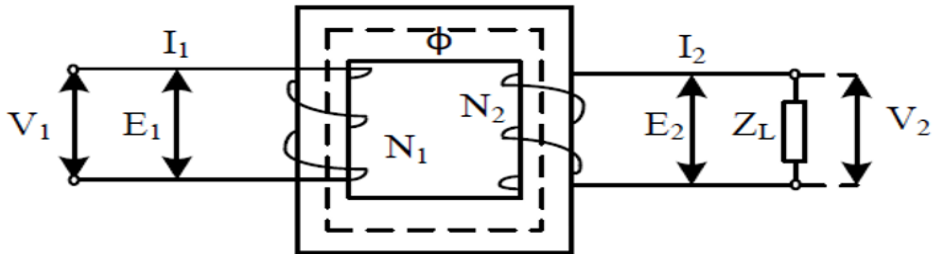
- V_{rms} = Nilai Tegangan Searah(V)
- V_{mean} = Tegangan Terukur(V)
- I_{AVG} = Arus Rata Rata (A)
- $V_{rata-rata}$ = Tegangan Rata Rata (V)
- P_m = Rugi Rugi Besi (W)
- I_0 = Arus Tanpa Beban (A)

2. 3.2 Transformator Berbeban (2)

Tujuan dari pengukuran test beban penuh untuk menentukan rugi-rugi tembaga dari suatu transformer. Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L, I_2 mengalir pada kumparan sekunder, dimana :

$$I_2 = \frac{V_2}{Z_L} \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan $\Theta_2 =$ faktor kerja beban.



Gambar 2.5 Transformator Berbeban

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

$$I_2 = I_0 + I_2' \dots\dots\dots(2.13)$$

Bila rugi tembaga diabaikan (I_C diabaikan) maka $I_0 = I_M$

$$I_1 = I_M + I_2' \dots\dots\dots(2.14)$$

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

$$N_1 \cdot I_M = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.15)$$

$$N_1 \cdot I_M = N_1 (I_M + I_2') - N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.16)$$

Sehingga:

$$N_1 \cdot I_2' = N_2 \cdot I_2 \dots\dots\dots(2.17)$$

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

Jadi,

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \text{ atau } \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \dots\dots\dots(2.18)$$

2. 3.2.1 Perhitungan Full Load

Hitung arus injek / arus nominal (I_n)

Dapat di hitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$S = V_{LV} \times I_N \times \sqrt{3}$$

$$I_N = \frac{S}{V_{LV} \times \sqrt{3}}$$

Contoh: trafo 3500 KVA ,20KV/400V,50 Hz,Dyn5,5%

$$I_N = \frac{S}{V_{LV} \times \sqrt{3}} = \frac{3500 \text{ KVA}}{20 \text{ KV} \times \sqrt{3}} = \frac{175 \text{ A}}{1,732} = 101 \text{ A}$$

a. Menghitung P total (losses) pada temperature 75° C

- menghitung P staryloss (PSL)

misalkan : P measure = 10 kw

I LV = 20 A

I HV = 12 A

R LV = 5 Ω

R HV = 50 Ω

I HV mean = 11 A

$$\frac{P_{\text{nominal}}}{P_{\text{measure}}} = \frac{I_{\text{HV nominal}}}{I_{\text{HV measure}}}$$

$$P_n = \left(\frac{12}{11}\right)^2 \cdot P_{\text{measure}}$$

$$P_n = \left(\frac{12}{11}\right)^2 \cdot 10$$

$$= 11,89 \text{ KW (Dalam Suhu } 35^\circ\text{C Atau Ambien)}$$

- P n = I²R (HV) + I²R (LV) + PSL

$$11,89 = (12)^2 \cdot 50 + (20)^2 \cdot 5 + \text{PSL}$$

$$\text{PSL} = 11,89 - 7,2 - 2$$

$$= 2,69 \text{ KW}$$

- Konversi I²R ke suhu 75° C

$$R_2 = R_1 \cdot \left(\frac{\text{KONSTANTA} + \theta_2}{\text{KONSTANTA} + \theta_1}\right)$$

$$R_{HV 75^\circ} = R_{HV 35^\circ} \left(\frac{235+75}{235+35}\right)$$

$$= 50 \cdot \left(\frac{310}{270}\right)$$

$$= 50 \cdot 1,14$$

$$= 57,41 \Omega$$

$$I^2R 75^\circ = I^2 \cdot R_{HV 75^\circ}$$

$$= 12^2 \cdot 57,41$$

$$= 8,27 \text{ KW}$$

$$\begin{aligned}
R_{LV} 75^\circ &= R_{LV} 35^\circ \left(\frac{235+75}{235+35} \right) \\
&= 5 \cdot \left(\frac{310}{270} \right) \\
&= 5.1.14 \\
&= 5,75 \Omega \\
I^2 R_{75^\circ} &= I^2 \cdot R_{LV} 75^\circ \\
&= 12^2 \cdot 5,75 \\
&= 2,3 \text{ KW}
\end{aligned}$$

- Konversi P Straylos Ke Dalam Suhu 75°C

$$\begin{aligned}
PSL (75^\circ\text{C}) &= PSL (35^\circ\text{C}) \cdot \left(\frac{KONSTANTA+\theta 2}{KONSTANTA+\theta 1} \right) \\
&= 2,69 \text{ KW} \cdot \left(\frac{235+75}{235+35} \right) \\
&= 2,69 \text{ KW} \cdot 1,14 \\
&= 3,06 \text{ KW}
\end{aligned}$$

- Hitung P Total Saat Suhu 75° C

$$\begin{aligned}
P \text{ total } (75^\circ\text{C}) &= (I^2 \cdot R_{HV} 75^\circ) + (I^2 \cdot R_{LV} 75^\circ) + PSL (75^\circ\text{C}) \\
&= 8,27 \text{ KW} + 2,3 \text{ KW} + 3,06 \text{ KW} \\
&= 13,63 \text{ KW}
\end{aligned}$$

Standart pengujian = total losses tidak boleh lebih dari 15 % dari yang digunakan (pada suhu 75° C).
Impedansi $\pm 7,5 \%$

(halaman ini sengaja di kosongkan)