

ANALISA KEGAGALAN TRANSFORMATOR DAYA BERDASARKAN HASIL UJI DGA DENGAN METODE TDCG, KEY GAS, ROGER'S RATIO, DUVAL'S TRIANGLE PADA GARDU INDUK

A. R. Demmassabu, L. S. Patras, F. Lisi

Jurusan Teknik Elektro-FT. UNSRAT, Manado-95115, Email: alanroberto@ymail.com

Abstrak—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. 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*. Setelah membandingkan keempat metode ini maka metode analisa yang paling efektif adalah metode analisa Duval's Triangle. Metode ini dapat menunjukkan gangguan dengan lebih jelas dan detil serta merupakan metode dengan sistem tertutup sehingga mengurangi presentase kasus diluar kriteria atau kesalahan analisis.

Kata kunci: Kegagalan transformator, metode analisa, pengujian minyak trafo, uji DGA.

Abstract—In power transformer can happen disruption which can cause transformer failure. For it required care and maintenance in power transformer, one of them by doing testing oil transformer that is DGA testing. This test done for know the presence or absence abnormality the transformer. DGA test is analysis transformer condition conducted based total dissolved gas in transformer oil. In this paper use four methods for analysis transformer failure that is method *TDCG*, *Key Gass*, *Roger's ratio*, *Duval's Triangle*. After comparing fourth method then method of analysis most effective is analysis method *Duval's Triangle*. This method can show interference with clearer and details and a method with a closed system so that reduce the percentage of cases outside the criteria or error analysis.

Key words: DGA testing, method of analysis, testing oil transformer, transformer failure.

I. PENDAHULUAN

Salah satu peralatan yang berperan penting dalam penyaluran daya listrik yaitu transformator daya. Transformator daya merupakan peralatan listrik yang sangat vital, oleh karena itu transformator harus dipelihara agar dapat beroperasi secara maksimal dan jauh dari gangguan-gangguan yang dapat menyebabkan kegagalan transformator. Untuk itu keandalannya harus terjaga agar proses penyaluran lancar.

Transformator merupakan peralatan daya listrik yang penting karena berhubungan langsung dengan saluran transmisi dan distribusi listrik. Gangguan pada transformator akan menyebabkan terputusnya daya ke konsumen. Oleh karena itu perawatan dan pendeteksian kerusakan transformator perlu dilakukan secara rutin agar transformator bisa bekerja sesuai dengan masa pemakaian maksimumnya.

Untuk pemeliharaan transformator daya diperlukan empat pedoman pemeliharaan untuk mengetahui kondisi transformator. Pedoman tersebut diantaranya adalah *in service inspection*, *in service measurement*, *shutdown testing*, dan *treatment*. PLN memiliki banyak standar pengujian untuk menguji minyak isolasi, misalnya tegangan tembus, rugi-rugi dielektrik, DGA. Salah satu pengujian yaitu DGA, metode pengujian ini dilakukan untuk menguji keadaan minyak isolasi dengan mengambil sampel minyak isolasi dari unit transformator untuk mengetahui jenis-jenis gas yang terlarut dalam minyak isolasi transformator.

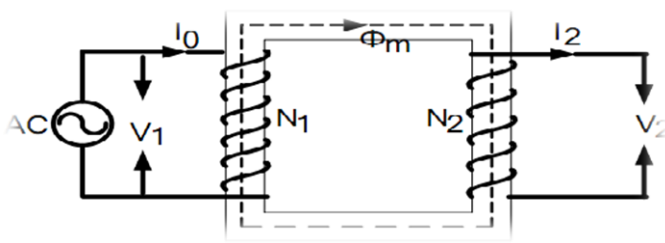
Oleh karena itu perlu dilakukan analisis untuk ketidaknormalan pada transformator dengan pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*) agar dapat diketahui nantinya kegagalan transformator yang akan terjadi dan tindakan penanggulangannya. Dengan melakukan analisa kegagalan transformator daya berdasarkan hasil uji DGA dengan empat metode yaitu metode *TDCG*, metode *Key Gass*, *Duval's Triangle*, *Roger's Ratio*.

II. LANDASAN TEORI

A. Pengertian dan Prinsip Kerja

Transformator daya merupakan peralatan listrik yang tidak mempunyai bagian yang bergerak, berfungsi untuk mengubah daya dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Untuk menggunakan transformator, energi listrik dapat ditransfer dari satu rangkain ke rangkaian lain tanpa melalui hubungan fisik diantara dua rangkaian. Transfer daya tersebut dilakukan sepenuhnya oleh rangkaian medan magnet.

Tegangan bolak-balik yang terdapat pada kumparan primer, mengalirkan arus bolak-balik melalui kumparan primer dan arus tersebut akan menghasilkan fluksi bolak-balik pada inti besi. Diperlihatkan pada gambar 1 merupakan rangkaian sederhana transformator.



(Sumber : Jhon J.Winders Jr, "Transformer Principles and Applications)

Gambar 1. Rangkaian Sederhana Transformator

B. Konstruksi dan Material Transformator

Inti (Core)

Inti adalah lintasan untuk merambatnya fluks magnet, terdiri dari lembaran baja tipis yang dilaminasi, terpisah secara listrik dengan lapisan tipis dari material isolasi. Ketebalannya berkisar 0,23 mm – 0,36 mm.

Belitan (Winding)

Belitan terdiri dari konduktor atau penghantar arus yang dililit melingkari bagian inti dan harus diisolasi seperlunya, ditopang serta didinginkan untuk menahan operasi dan kondisi uji.

Tap Changer

Peralatan *tap changer* dipasang pada sisi tegangan yang lebih tinggi atau sisi primer. Untuk itu transformator dirancang sedemikian rupa sehingga perubahan tegangan pada sisi masuk/*input* tidak mengakibatkan perubahan tegangan pada sisi keluar/*output*.

Bushing dan Terminal

Ujung atau keluaran dari belitan harus keluar dari selubung atau tangki transformator. Hubungan antara kumparan transformator dengan jaringan luar melalui sebuah *bushing* yang diselubungi oleh isolator.

Sistem Pemeliharaan Minyak

Minyak transformator sebagai isolasi untuk inti dan belitan. Minyak yang terkontaminasi adalah masalah serius sebab akan merusak sifat dielektrik minyak dan menjadi tidak berguna sebagai media isolasi.

Tangki Transformator

Tangki transformator sebelumnya dibuat dari besi tuang yang berat tetapi, sedangkan untuk transformator dewasa ini tangkinya dibuat dari baja lembaran yang dilas. Belitan-belitan dan posisi keluaran *bushing* berada dalam tangki.

Pendinginan Transformator

Kenaikan suhu pada suatu transformator akan terjadi dalam inti besi dan belitan-belitan yang mengakibatkan rugi-rugi inti besi (*iron loss*) dan rugi-rugi tembaga (*Cu loss*).

C. Peralatan Proteksi Transformator

Relai Bucholtz

Penggunaan relai ini untuk mendeteksi gas pada transformator terendam minyak yaitu untuk mengamankan transformator akibat gangguan pada transformator seperti: *arcing*, *partial discharge*, *over heating* yang umumnya menghasilkan gas. Gas-gas tersebut dikumpulkan pada ruangan relai dan akan mengerjakan kontak-kontak alarm.

Pressure Relief Devices

Ketika transformator berbeban lebih untuk suatu periode atau ketika terjadi gangguan internal, tekanan lebih akan terjadi didalam tangki. Dimana sejumlah peralatan digunakan untuk mengubah perubahan tekanan ini seperti *pressure relief devices* juga ditempatkan dibelakang *pressure gauge* untuk tangki yang diséal.

Sudden Pressure Relay

Ketika transformator mengalami gangguan internal maka sejumlah besar gas dibangkitkan dalam waktu yang singkat, akan melebihi tekanan yang ditentukan, menekan *sensing bellows* dan mengaktifkan kontak-kontak. Kontak-kontak ini akan mengaktifkan alarm, *circuit breaker* dan rele lainnya.

Lightning Arrester

Peralatan yang digunakan untuk melindungi transformator apabila terjadi gangguan tegangan lebih diakibatkan oleh surja petir. Surja arrester digunakan untuk melindungi peralatan vital dan instalasi terutama (transformator daya) yang berhubungan dengan tegangan lebih.

Relay Differensial

Relai *differensial* digunakan untuk mengamankan transformator dari gangguan hubungan singkat yang terjadi didalam transformator, antara lain hubung singkat antara belitan dengan belitan dan belitan dengan tangki. Relai ini bekerja berdasarkan perbedaan arus dari transformator arus yang terpasang.

D. Tipe-tipe Transformator

Transformator Distribusi

Seperti transformator besar lainnya, transformator distribusi adalah transformator yang mengambil tegangan dari rangkaian distribusi primer dan diturunkan ke level tegangan pada rangkaian distribusi sekunder atau ke rangkaian pemakai. Walaupun banyak standar yang menggolongkannya dengan rating kVA (5-500 kVA) namun ada juga transformator distribusi mempunyai rating dibawah dan diatas penggolongan *rating* tersebut.

Transformator Penyearah

Rangkaian elektronika daya dapat mengubah arus bolak-balik ke arus searah, ini disebut rangkaian penyearah. Rangkaian yang dapat mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik.

Transformator Instrument

Transformator *instrument* digunakan untuk mengubah tegangan-tegangan atau arus-arus yang besar ke dalam nilai satuan dan dapat diukur dengan aman, serta rugi (*losses*) internal yang rendah. Transformator *instrument* digunakan untuk pengukuran jika dihubungkan ke *instrument-instrument* pengukur, meter-meter dan untuk proteksi jika transformator dihubungkan ke alat-alat proteksi. Untuk proses pengukuran di gardu induk diperlukan transformator instrument.

E. Pedoman Pemeliharaan Transformator

In Service Inspection

In service inspection adalah kegiatan inspeksi yang dilakukan pada saat transformator dalam kondisi bertegangan/operasi. Tujuannya yaitu mendeteksi secara dini ketidaknormalan yang mungkin terjadi didalam transformator tanpa melakukan pemadaman. *In service inspection* yang dilakukan pada *subsystem transformer* adalah *bushing*, pendingin, pernafasan, sistem kontrol dan proteksi, OLTC, struktur mekanik, meter suhu / temperatur, sistem monitoring *thermal*, belitan, NGR (*Neutral Grounding Resistor*).

In service Measurement

In service Measurement adalah kegiatan pengukuran/pengujian yang dilakukan pada saat transformator dalam keadaan bertegangan. Tujuannya mengetahui kondisi transformator tanpa pemadaman. Kegiatan pengukuran dan pengujian yang dilakukan adalah *thermovisi/thermal Image*, *DGA (Dissolved Gas Analysis)*, pengujian kualitas minyak terdiri dari pengujian kadar air, pengujian tegangan tembus, pengujian kadar asam, pengujian warna minyak, pengujian sediment, tangens delta minyak (δ), pengujian *partial discharge*, *vibrase* dan *noise*.

Shutdown testing

Shutdown testing adalah pekerjaan pengujian yang dilakukan pada saat transformator dalam keadaan padam. Pengujian yang dilakukan adalah pengukuran tahanan isolasi, pengukuran tan delta (δ), pengukuran SFRA, tes rasio.

Shutdown Function Check

Shutdown function check pekerjaan yang bertujuan menguji fungsi dari rele-rele proteksi maupun indikator-indikator yang ada pada transformator adalah rele bucholtz rele jensen, rele *sudden pressure*, rele *thermal*.

III. PENGUJIAN DAN DIAGNOSA MINYAK TRANSFORMATOR

A. Minyak Transformator

Minyak transformator adalah cairan yang dihasilkan dari proses pemurnian minyak mentah. Selain itu minyak ini juga berasal dari bahan organik. Minyak transformator merupakan salah satu bahan isolasi cair yang dipergunakan sebagai isolasi dan pendingin pada transformator. Sebagai bahan isolasi minyak harus memiliki kemampuan untuk menahan tegangan tembus, sedangkan sebagai pendingin minyak transformator

harus mampu meredam panas yang ditimbulkan, sehingga dengan kedua kemampuan ini maka minyak diharapkan akan mampu melindungi transformator dari gangguan. Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan, antara lain adalah isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul, isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan (*discharge*).

Bahan dasar pembuatan minyak transformator adalah minyak mentah (*crude oil*). Namun pabrik-pabrik pembuat minyak transformator menambah zat-zat tertentu untuk mendapatkan kualitas dielektrik yang lebih baik. Pada umumnya minyak transformator tersusun dari senyawa-senyawa hidrokarbon dan non hidrokarbon.

Minyak transformator mineral dari hasil pengolahan minyak bumi yaitu antara fraksi minyak diesel dengan turbin (C_{16-30}) mempunyai struktur kimia yang kompleks. Senyawa hidrokarbon utama minyak transformator adalah parafinik, naftenik dan aromatik. Sedangkan senyawa lainnya adalah senyawa hetero yaitu senyawa yang mempunyai kerangka serupa dengan hidrokarbon yang mana atom-atom karbonnya digantikan oleh satu, dua, tiga atau lebih atom-atom belerang, oksigen, atau nitrogen.

Hidrokarbon parafinik adalah hidrokarbon jenuh, karena semua martabat karbon adalah jenuh oleh hidrogen (C_nH_{2n}). Bagian utamanya adalah alkana yang berantai lurus atau bercabang. Hidrokarbon naftenik dikualifikasikan sebagai hidrokarbon tertutup atau senyawa cincin seperti aliskik (non aromatik) C_nH_{2n} . Naftenik dapat memiliki sebuah cincin atau lebih tergantung dari banyaknya jumlah karbon. Hidrokarbon aromatik memiliki satu atau banyak cincin aromatik (ikatan rangkap) C_nH_{2n-6} yang mana dapat digabung dengan cincin lain.

B. Pengujian Minyak Transformator

Oksidasi dan kontaminan adalah hal yang dapat menurunkan kualitas minyak yang berarti dapat menurunkan kemampuannya sebagai isolator. Oksidasi pada minyak transformator juga akan ikut andil dalam penurunan kualitas kertas isolasi transformator. Pada saat minyak isolasi mengalami oksidasi, maka minyak akan menghasilkan asam. Asam ini apabila bercampur dengan air pada suhu tertentu akan mengakibatkan proses hidrolisis pada isolasi kertas. Proses hidrolisis ini akan menurunkan kualitas kertas isolasi.

Untuk mengetahui kehadiran kontaminan atau terjadinya oksidasi didalam minyak, maka dilakukanlah pengujian *oil quality test* (karakteristik). Pengujian *oil quality test* melingkupi beberapa pengujian yang metodenya mengacu pada standar IEC 60422. Adapun jenis pengujiannya.

Pengujian Kadar Air

Fungsi minyak transformator sebagai media isolasi di dalam transformator dapat menurun seiring banyaknya air yang mengotori minyak. Oleh karena itu dilakukan pengujian kadar air untuk mengetahui seberapa besar kadar air yang terlarut / terkandung di minyak. Metode yang dipakai adalah metoda Karl Fischer.

Pengujian Tegangan Tembus

Pengujian tegangan tembus dilakukan untuk mengetahui kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan. Minyak yang jernih akan menunjukkan nilai tegangan tembus yang tinggi. Dapat dikatakan bahwa pengujian ini dapat menjadi indikasi keberadaan kontaminan seperti kadar air. Rendahnya nilai tegangan tembus dapat mengindikasikan keberadaan salah satu kontaminan tersebut, dan tingginya tegangan tembus belum tentu juga mengindikasikan bebasnya minyak dari semua jenis kontaminan. Pengujian ini mengacu standar IEC 60156.

Pengujian Kadar Asam

Minyak yang rusak akibat oksidasi akan menghasilkan senyawa asam yang akan menurunkan kualitas kertas isolasi pada transformator. Asam ini juga dapat menjadi penyebab proses korosi pada tembaga dan bagian transformator yang terbuat dari bahan metal. Untuk mengetahui seberapa besar asam yang terkandung di dalam minyak, dilakukan pengujian kadar asam pada minyak isolasi. Besarnya kadar asam pada minyak juga dapat dijadikan sebagai dasar apakah minyak isolasi transformator tersebut harus segera dilakukan reklamasi atau diganti.

Pada dasarnya minyak yang akan diuji dicampur dengan larutan alkohol dengan komposisi tertentu lalu campuran tersebut (bersifat asam) di titrasi (ditambahkan larutan) dengan larutan KOH (bersifat basa). Perhitungan berapa besar asam yang terkandung didalam minyak didasarkan dari berapa banyak KOH yang dilarutkan. Pengujian ini mengacu pada standar IEC 62021 – 1.

Pengujian Warna Minyak

Warna minyak isolasi transformator akan berubah seiring penuaan yang terjadi pada minyak dan dipengaruhi oleh material material pengotor seperti karbon. Pengujian warna minyak pada dasarnya membandingkan warna minyak terpakai dengan minyak yang baru. Pengujian ini mengacu kepada standar ISO 2049.

Pengujian Sediment

Banyak material yang dapat mengkontaminasi minyak transformator, seperti karbon dan endapan lumpur (*sludge*). Pengujian sediment ini bertujuan mengukur seberapa banyak (%) zat pengotor yang terdapat pada minyak isolasi transformator. Pengujian ini pada dasarnya membandingkan berat endapan yang tersaring dengan berat minyak yang diuji. Pengujian ini mengacu kepada standar IEC 60422 – Annex C.

Pengujian Titik Nyala

Pengujian titik nyala dilakukan dengan menggunakan sebuah perangkat yang berfungsi memanaskan minyak secara manual (*heater* atau kompor). Dimana diatas cawan pemanas tersebut di letakan sumber api yang berasal dari gas. Sumber api ini berfungsi sebagai pemancing saat mulai terbakarnya minyak. Seiring dengan lamanya proses pemanasan, suhu minyak pun akan mengalami peningkatan. Pada suhu tertentu minyak akan terbakar dengan sumber api.

Tangen Delta Minyak (δ)

Salah satu pengujian yang dilakukan terhadap minyak isolasi adalah pengujian tangen delta. Dari hasil pengujian tangen delta dapat diketahui sejauh mana minyak isolasi mengalami penuaan. Pengujian ini mengacu kepada standar IEC 60247.

Metal in Oil

Pengujian metal *in oil* digunakan sebagai pelengkap dari pengujian DGA. Saat DGA mengindikasikan timbulnya kemungkinan gangguan, pengujian metal *in oil* akan membantu menentukan jenis gangguan dan lokasinya. Gangguan tidak hanya menurunkan kualitas isolasi transformator (minyak, kertas, kayu) tapi juga menghasilkan partikel partikel metal yang tersebar dalam minyak.

Partikel ini akan didistribusikan kesemua bagian transformator karena proses sirkulasi. Beberapa komponen transformator yang secara khusus menghasilkan partikel metal. Partikel metal ini dapat ditemukan sebagai unsur tunggal atau sebagai senyawa. Jenis metal yang ditemukan dalam pengujian dapat membantu dalam menentukan komponen mana yang mengalami gangguan.

C. Diagnosa DGA

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. 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).

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. C57-104.1991 dan IEC 60599, adalah Metode TDCG, *key gas*, *roger's ratio*, *duval's triangle*.

TABEL I
KONSENTRASI GAS TERLARUT

Status	H ₂ (ppm)	CH ₄ (ppm)	C ₂ H ₂ (ppm)	C ₂ H ₄ (ppm)	C ₂ H ₆ (ppm)	CO (ppm)	TDC G (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	>180 0	>1000	>80	>200	>150	>1400	>4630

Metode TDCG (Total Dissolved Combustible Gas)

Analisa hasil pengujian DGA mengacu pada standar IEEE C57-104 1991 dan IEC 60599. Batasan standar hasil pengujian DGA dengan menggunakan standar IEEE C57 104 1991 adalah seperti terlihat pada Tabel I. 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 I). Nilai batasan standar TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) adalah jumlah gas mudah terbakar yang terlarut.

Berdasarkan standar IEEE yang membuat pedoman untuk mengklasifikasikan kondisi operasional transformator yang terbagi dalam 4 kondisi yang akan dijelaskan berikut: adalah kondisi 1 transformator beroperasi normal. Namun perlu dilakukan pemantauan kondisi gas-gas tersebut, 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, 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, kondisi 4, TDCG pada tingkat ini menunjukkan adanya dekomposisi/kerusakan pada isolasi kertas/minyak transformator yang telah meluas.

Standar 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*.

TABEL II
JENIS KEGAGALAN MENURUT KEY GAS

Gangguan	Gas Kunci	Kriteria	Jumlah Prosentase Gas
Busur api (<i>Arcing</i>)	Asetilen (C ₂ H ₂)	Hidrogen (H ₂) dan Asetilen (C ₂ H ₂) dalam jumlah besar dan sedikit metana (CH ₄) dan etilen (C ₂ H ₄)	Hidrogen (H ₂) : 60% Asetilen (C ₂ H ₂) : 30%
Korona (<i>Partial Discharge</i>)	Hidrogen (H ₂)	Hidrogen dalam jumlah besar, metana jumlah sedang, dan sedikit etilen	Hidrogen :85% Metana :13%
Pemanasan lebih minyak	Etana	Etana dalam jumlah besar dan etilen dalam jumlah kecil	Etana : 63% Etilen : 20%
Pemanasan lebih selulosa	Karbon monoksida	CO dalam jumlah besar	CO : 92%

Key Gas

Key gas didefinisikan oleh IEEE standar C57-104.1991 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". diperlihatkan pada Tabel II.

Roger's ratio

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 : C₂H₂/C₂H₄, CH₂/H₂, C₂H₄/C₂H₆. Setelah diperoleh nilai perbandingan dari gas-gas tersebut, selanjutnya dimasukkan kedalam kode ratio yang diperlihatkan pada Tabel III.

Setelah dikonversi kedalam kode-kode seperti pada Tabel diatas, maka untuk analisis gangguan yang terjadi pada minyak transformator dapat diketahui dari Tabel IV seperti berikut :

Duval's Triangle

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 III dan IV 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.

TABEL III
KODE-KODE ROGER'S RATIO

Rentang kode roger	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
< 0.1	0	1	0
0,1-1	1	1	0
1-3	1	2	1
>3	2	2	2

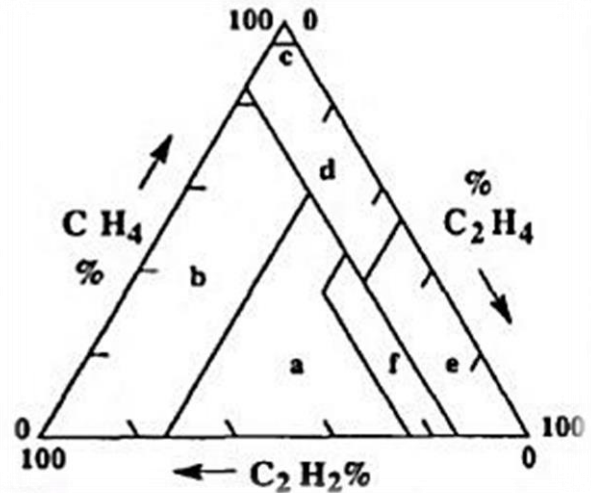
TABEL IV
TIPE GANGGUAN PADA TRANSFORMATOR

Kasus	Tipe gangguan	Kode roger's ratio		
		C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /CH ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
1	Tidak ada gangguan	0	0	0
2	Low energy Partial discharge	1	1	0
2	High energy partial discharge	1-2	1	0
4	Low energy discharges, sparking, arching	1-2	0	1-2
5	High energy discharge, sparking, arching	1	0	2
6	Thermal fault suhu dibawah 150 c	0	0	1
7	Thermal fault suhu antara 150-300 c	1	2	1
8	Thermal fault suhu antara 300-700 c	0	2	0
9	Thermal fault suhu diatas 700 c	0	2	2

Duval's Triangle

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 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.



Gambar 2
Duval's Triangle

D. Data Hasil Uji DGA

Data Hasil Uji DGA di GI Tomohon

Spesifikasi Transformator :

Unit Transformator I

- Merk/Tahun : Hyundai/1987
- Daya : 10.000 kVA
- Tegangan : 70/20 kV
- Volume Oil : 8300 kg
- Main Tank S/N : T.73009
- Impedansi : 7,39 %

Data Hasil Uji DGA di GI Teling

Spesifikasi Transformator :

Unit Transformator III

- Merk/Tahun : Pasti/1992
- Daya : 20.000 kVA
- Tegangan : 70/20 kV
- Volume Oil : 13943
- Main Tank S/N : 9124114
- Impedansi : 11,85 %

Data Hasil Uji DGA di GI Ranomut

Spesifikasi Transformator :

Unit Transformator I

- Merk/Tahun : Pasti/1992
- Daya : 20.000 kVA
- Tegangan : 70/20 kV
- Volume Oil : 13943
- Main Tank S/N : 9124202
- Impedansi : 11,81 %

TABEL V
DATA UJI DGA DI GI TOMOHON

No	Combustible gas	konsentrasi (ppm)		
		2010	2011	2012
1	Hidrogen	6	12	31
2	Oksigen	12426	12510	12602
3	Nitrogen	66333	67213	68111
4	Metana	4	10	28
5	karbon monoksida	210	257	330
6	karbon dioksida	1900	1940	1986
7	Etana	4	9	19
8	Etilen	5	17	39
9	Asetilen	1	2	2
total combustible gas		230	307	449
total gas		80888	81968	83146

TABEL VIII
DATA UJI DI GI TELING

No	Combustible gas	Konsentrasi (ppm)		
		2010	2011	2012
1	Hidrogen	21	11	19
2	Oksigen	12425	12102	12311
3	Nitrogen	64256	63490	64180
4	Metana	107	72	76
5	karbon monoksida	353	230	278
6	karbon dioksida	2258	2034	2240
7	Etana	411	265	145
8	Etilen	44	21	25
9	Asetilen	1	0	0
total combustible gas		937	599	543
total gas		79875	78265	79443

TABEL VI
DATA UJI DI GI RANOMUT

No	Combustible gas	Konsentrasi (ppm)		
		2010	2011	2012
1	Hidrogen	34	10	13
2	Oksigen	12448	12302	12400
3	Nitrogen	66443	65700	66200
4	Metana	154	71	74
5	karbon monoksida	372	126	134
6	karbon dioksida	2681	2554	2285
7	Etana	920	410	435
8	Etilen	80	41	46
9	Asetilen	1	1	0
total combustible gas		1561	659	702
total gas		83132	81214	81587

TABEL IX

DATA UJI MINYAK TRANSFORMATOR DI GI RANOMUT

No	Jenis Test		2010	2011	2012
1	Asam (mg. KOH/g)	ASTM D974	0,307 UN	0,310 UN	0,311 UN
2	IFT (mN/m)	ASTM D971	15,6 UN	15,7 UN	15,7
3	Tegangan Tembus (kV)	IEC 156	85 AC	82 AC	81 AC
4	Warna	ASTM D1500	7,0 UN	7,0 UN	7,5 UN
5	Kerapatan Relatif	ASTM D4052	0,8834 AC	0,8835 AC	0,8835 AC

IV . HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Hasil

Melalui pengolahan data pada Tabel V, VI, VII, VIII, IX diperoleh hasil perhitungan pengujian *oil quality* transformator dan pengujian DGA untuk tiga gardu induk yaitu GI Tomohon, GI Teling, GI Ranomut.

GI Tomohon

Melalui hasil perhitungan Tabel V dapat diketahui transformator pada GI Tomohon telah mengalami oksidasi pada minyak transformator. Hal ini dapat dilihat dari tes pengujian kadar asam yang melebihi batas standar. Juga warna minyak transformator telah dipengaruhi material pengotor, dilihat dari uji warna minyak yang melebihi standar.

Hasil diatas yang diperoleh dianalisis bahwa transformator pada GI Tomohon dari tahun 2010 sampai 2012 masih beroperasi normal. Hal ini dapat dilihat TDCG masih berada di bawah 720 ppm sesuai standar diperlihatkan pada Tabel X dan XI.

TABEL VII

DATA UJI MINYAK TRANSFORMATOR DI GI RANOMUT

No	Jenis Test		2010	2011	2012
1	Asam (mg. KOH/g)	ASTM D974	0,235 UN	0,233 UN	0,231 UN
2	IFT (mN/m)	ASTM D971	19,4 UN	19,4 UN	19,6 UN
3	Tegangan Tembus (kV)	IEC 156	62 AC	65 AC	68 AC
4	Warna	ASTM D1500	5,5 UN	6,0 UN	6,0 UN
5	Kerapatan	ASTM D4052	0,8879 AC	0,8881 AC	0,8882 AC

TABEL X
HASIL PERHITUNGAN PENGUJIAN DGA

Metode	Standar	2010	2011	2012
TDCG	720	230	307	449
Indikasi	Kondisi 1-4	Kondisi I (normal)	Kondisi I (normal)	Kondisi I (normal)

TABEL X1
HASIL PERHITUNGAN PENGUJIAN MINYAK TRANSFORMATOR

No	Jenis Test	Standar	2010	2011	2012
1	Asam (mg.KOH/g)	0,05 - 0,2	0,307 UN	0,310 UN	0,311 UN
2	IFT (mN/m)	30	15,6 UN	15,7 UN	15,7
3	Tegangan Tembus (kV)	>40	85 AC	82 AC	81 AC
4	Warna	1,5	7,0 UN	7,0 UN	7,5 UN
5	Kerapatan Relatif	0,8 - 0,91	0,8834 AC	0,8835 AC	0,8835 AC
6	Kejernihan	Jernih	CLEAR AC	CLEAR AC	CLEAR AC

Berdasarkan dari dua hasil perhitungan pada pengujian minyak transformator dan pengujian DGA dapat dianalisa bahwa transformator yang diujikan tidak mengalami kerusakan atau gangguan karena masih pada kondisi I atau normal. Namun demikian harus ada investigasi lebih lanjut karena hasil pengujian minyak yang akan berdampak pada unjuk kerja dari minyak tersebut.

GI Teling

Melalui hasil perhitungan pada Tabel XII, dapat diketahui transformator pada GI Teling telah mengalami kontaminan dan oksidasi pada minyak transformator. Hal ini dapat dilihat dari tes pengujian kadar asam yang melebihi batas standar.

Hasil diatas dapat dianalisis bahwa transformator pada GI Teling tahun 2010 terdapat kemungkinan gejala-gejala kegagalan yang harus diwaspadai. Hal ini dilihat dari TCDG berada pada kondisi II yaitu sebesar 937 ppm. Kemudian dilanjutkan dengan analisa metode *key gass*, dimana minyak transformator mengalami pemanasan lebih. Selanjutnya dilakukan analisa *roger's ratio dan duval's triangle*, ternyata dapat dilihat terjadi gangguan yang lebih spesifik di jelaskan yaitu transformator mengalami *thermal fault 300^oC-700^oC* diperlihatkan pada Tabel XIII. Berdasarkan hasil pengujian minyak transformator dapat disimpulkan bahwa kondisi minyak transformator mulai ada indikasi kegagalan. Untuk itu direkomendasikan untuk dilakukan filter minyak dan pengujian minyak yang lebih intensif.

GI Ranomut

Melalui hasil perhitungan dapat diketahui transformator pada GI Ranomut telah mengalami kontaminan dan oksidasi pada minyak transformator. Hal ini dilihat dari hasil tes pengujian kadar asam dan warna minyak yang melebihi batas standar diperlihatkan pada Tabel XIV.

TABEL X11
HASIL PERHITUNGAN UJI DGA DENGAN EMPAT METODE

Metode	Indikasi	Standar	2010	2011	2012
TDCG		720 ppm	1561 ppm	659 ppm	702 ppm
	Kondisi 1,2,3 dan 4		Kondisi II (tingkat TDCG mulai tinggi)	Kondisi I (normal)	Kondisi I (normal)
Key gass	Arcing	Asetilen (C ₂ H ₄)	1 ppm	-	-
	Korona	Hidrogen	34 ppm	-	-
	Pemanasan lebih minyak	Etana (C ₂ H ₄)	920 ppm	-	-
	Pemanasan lebih selulosa	Karbon Monoksida (CO)	372 ppm	-	-
Roger's Ratio dan Duval's Triangle	Tidak ada gangguan	-	-	-	-
	Partial discharge	-	-	-	-
	Arcing	-	-	-	-
	Kegagalan panas <150 ^o c	-	-	-	-
	Kegagalan panas 150 ^o c-300 ^o c	-	-	-	-
	Kegagalan panas 300 ^o c - 700 ^o c	-	-	✓	-

Hasil perhitungan dari ketiga gardu induk dapat dilihat bahwa pengujian minyak transformator tingkat kadar asam yang tinggi yaitu pada GI Tomohon dan kadar asam yang rendah pada GI Teling. Sedangkan pada pengujian minyak transformator tingkat warna minyak yang paling tinggi yaitu pada GI Tomohon dan tingkat warna yang paling rendah pada GI Teling. Juga diketahui minyak transformator yang memiliki kadar asam yang tinggi berbanding lurus dengan peningkatan warna minyak pada ketiga GI.

Hasil diatas dapat dianalisa bahwa transformator pada GI Ranomut tahun 2010 terdapat kemungkinan gejala-gejala kegagalan yang harus diwaspadai. Hal ini dilihat dari TCDG berada pada kondisi II yaitu sebesar 1561 ppm. Kemudian dilanjutkan dengan metode *key gass*, dimana minyak transformator mengalami pemanasan lebih. Selanjutnya dilakukan analisa *roger's ratio dan duval's triangle*, ternyata terjadi pemanasan lebih (*overheating*) pada inti transformator sekitar 300^oC-700^oC diperlihatkan pada Tabel XV. Berdasarkan hasil pengujian minyak transformator dapat disimpulkan bahwa kondisi minyak transformator mulai ada indikasi kegagalan. Untuk itu direkomendasikan untuk dilakukan filter dan pengujian minyak yang lebih intensif. Juga diketahui minyak transformator memiliki kadar asam yang tinggi dan peningkatan warna minyak.

TABEL X111

HASIL PEHITUNGAN PENGUJIAN MINYAK TRANSFORMATOR

No	Jenis Test	Standar	2010	2011	2012
1	Asam (mg. KOH/g)	0,05 - 0,2	0,157 UN	0,160	0,161
2	IFT (mN/m)	30	20,7 UN	20,1UN	20,1 UN
3	Tegangan Tembus (kV)	>40	68 AC	70 AC	73 AC
4	Warna	1,5	5,0 UN	5,5UN	5,5 UN
5	Kerapatan	0,8 – 0,91	0,8835 AC	0,8833 AC	0,8831 AC
6	Kejernihan	Jernih	CLEAR AC	CLEAR AC	CLEAR AC

TABEL XIV

HASIL PERHITUNGAN PENGUJIAN MINYAK TRANSFORMATOR

No	Jenis Test	Standar	2010	2011	2012
1	Asam (mg. KOH/g)	0,05 -0,2	0,235 UN	0,233 UN	0,231 UN
2	IFT (mN/m)	30	19,4 UN	19,4 UN	19,6 UN
3	Tegangan Tembus (kV)	>40	62 AC	65 AC	68 AC
4	Warna	1,5	5,5 UN	6,0 UN	6,0 UN
5	Kerapatan	0,8 – 0,91	0,8879 AC	0,8881 AC	0,8882 AC
6	Kejernihan	Jernih	CLEAR AC	CLEAR AC	CLEAR AC

B. Analisa Pengujian Kualitas Minyak di Tiga Lokasi Berbeda

Ketiga transformator yang diambil sampel dengan lokasi yang berbeda-beda, dimana diketahui bahwa kondisi sekitar sangat mempengaruhi isolator, demikian pula dalam hal minyak transformator. Ketiga lokasi pengujian tersebut mengandung jumlah konsentrasi gas yang berbeda tergantung pada kondisi kelembapan, tekanan, suhu, temperatur, kontaminan dan arah angin dilokasi transformator itu berada. Dilihat dari ketinggian tempat, gardu induk Tomohon memiliki temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan gardu induk Teling dan gardu induk Ranomut.

Gardu induk Tomohon berada pada dataran tinggi yaitu berada pada ketinggian lebih dari 500 m dari permukaan laut. *Water temperature* pada transformator GI Tomohon suhunya sebesar 40°C dan *oil temperature* sebesar 39°C. Gardu induk Teling dan gardu induk Ranomut berada pada dataran rendah yaitu berada pada ketinggian 0-500 m dari permukaan laut. Dilihat dari data *visual inspection*, *water temperature* pada GI Teling sebesar 56° C dan *oil temperature* sebesar 54° C, pada GI Ranomut sebesar 70° C dan *oil temperature* 68° C.

Penyebab utama terbentuknya gas-gas dalam kondisi operasi transformator adalah adanya gangguan seperti *arching*, *partial discharge* dan *thermal degradation*. Gangguan tersebut dapat terjadi terhadap isolasi kertas maupun isolasi cair. Timbulnya kandungan konsentrasi gas hidrokarbon sangat dipengaruhi oleh temperatur yang tinggi pada transformator

TABEL XV

HASIL PERHITUNGAN UJI DGA DENGAN EMPAT METODE

Metode	Indikasi	Standar	2010	2011	2012	
TDCG		720 ppm	937 ppm	599 ppm	543 ppm	
	Kondisi 1,2,3 dan 4		Kondisi II (tingkat TDCG mulai tinggi)	Kondisi I (normal)	Kondisi I (normal)	
Key gass	Arcing	Asetilen (C ₂ H ₄)	1 ppm	-	-	
	Korona	Hidrogen	21 ppm	-	-	
	Pemanasan lebih minyak	Etana (C ₂ H ₆)	411 ppm	-	-	
	Pemanasan lebih selulosa	Karbon Monoksida (CO)	353 ppm	-	-	
Roger,s Ratio dan Duval,s Triangle	Tidak ada gangguan	-	-	-	-	
	Pelepasan muatan	-	-	-	-	
	Arcing	-	-	-	-	
	Kegagalan panas <150c	-	-	-	-	
	Kegagalan panas 150 ⁰ c-300 ⁰ c	-	-	-	-	
	Kegagalan panas 300 ⁰ c - 700 ⁰ c			✓	-	-
	Kegagalan panas >700 ⁰ c	-	-	-	-	-

sehingga menyebabkan terbentuknya gas-gas hidrokarbon seperti etilen, etana, metana dan hidrogen.

Laju kenaikan suhu pada transformator dipengaruhi oleh pembebanan transformator dan kondisi daerah sekitar. Pengaruh kondisi sekitar yaitu temperatur, kelembapan, tekanan dan kontaminan daerah tersebut. Adapun dilihat dari jumlah konsentrasi gas *combustible* dari ketiga transformator yang diambil sampel dari ketiga lokasi berbeda, diketahui juga terjadi peningkatan jumlah konsentrasi gas *combustible* sejalan dengan kenaikan suhu pada transformator pada setiap GI yang akan diuraikan dalam lima hal berikut,.

Jumlah konsentrasi gas (CH₄) metana hanya 4 ppm sedangkan pada GI Teling jumlah konsentrasi gas sebesar 107 ppm dan pada GI Ranomut yaitu sebesar 154 ppm. Maka diketahui bahwa jumlah konsentrasi gas metana pada transformator GI Tomohon lebih sedikit dibandingkan dengan Transformator pada GI Ranomut dan GI Teling.

Jumlah konsentrasi gas etana (C₂H₆) yaitu sebesar 4 ppm sedangkan pada GI Teling yaitu 411 ppm dan pada GI Ranomut yaitu 920 ppm. Maka diketahui bahwa jumlah konsentrasi gas etana pada transformator GI Tomohon lebih sedikit dibandingkan dengan Transformator pada GI Ranomut dan Teling.

Jumlah konsentrasi gas etilen (C₂H₄) yaitu 5 ppm sedangkan transformator pada GI Teling yaitu 44 ppm.

Jumlah konsentrasi gas etilen pada transformator GI Tomohon lebih sedikit dibandingkan dengan Transformator pada GI Ranomut dan Teling.

Jumlah konsentrasi gas etilen yaitu 5 ppm sedangkan transformator pada GI Teling yaitu 44 ppm dan pada GI Ranomut yaitu 80 ppm. Maka diketahui bahwa jumlah konsentrasi gas etilen pada transformator GI Tomohon lebih sedikit dibandingkan dengan Transformator pada GI Ranomut dan Teling.

Pembentukan jumlah konsentrasi gas *combustible* mengalami kenaikan berdasarkan dengan laju kenaikan suhu pada transformator yang dipengaruhi oleh pembebanan transformator dan kondisi sekitar.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian dan analisis data yang telah dilakukan maka dalam penyelesaian tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan yang kan dijabarkan dibawah ini.

Indikasi kegagalan yang akan terjadi pada transformator daya di GI Teling dan GI Ranomut adalah kegagalan *overheating* (pemanasan lebih) pada inti transformator sekitar 300 °C -700 °C. Kegagalan tersebut ditunjukkan dengan pembentukan jumlah gas etana dan karbon monoksida yang sangat besar.

Penyebab kegagalan yang terjadi pada GI Teling dan Ranomut disebabkan oleh menurunnya kualitas minyak transformator

Tindak lanjut yang dapat dilakukan untuk mengurangi kegagalan yang akan terjadi pada GI Teling dan Ranomut antara lain dengan melakukan filtering pada minyak transformator, pengujian minyak yang lebih sering dan intensif.

B. Saran

Perlu dilakukan perawatan dan pengujian transformator secara berkala untuk menjaga kualitas dari transformator yang diuji. Juga semakin tua umur ekonomi transformator, perawatannya harus ditingkatkan, baik dalam perawatan kondisi dan kebersihan transformator.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Petunjuk Batasan Operasi dan Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik, Transformator Tenaga, Jakarta, 2010.
- [2] Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga, No Dokumen : P3B/O&M Trafo/001.01. PT. PLN PERSERO.
- [3] *Transformer Oil Testing SD Myers, Substation Solutions, Western Mining Electric Association*, 2008.
- [4] *A guide to Transformer Oil Analysis by I.A.R GRAY Transformer Chemistry Services*
- [5] Y. Sinuhaji, Analisis keadaan minyak isolasi transformator daya 150 kV menggunakan metode dissolved gas analisis dan *Fuzzy Logic* pada gardu induk, *Skripsi*, Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember. 2012.
- [6] M. Faisal, Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode *Dissolved Gas Analysis*, *Skripsi*, Semarang: Jurusan Teknik Elektro Universitas Diponegoro, 2013.
- [7] *Tutorial On-line monitoring of key fault gases in transformer oil, Operational experience accumulated over the years ISH'97/Montreal Canada*.
- [8] B.L. Efendi, Analisis Gas Mudah Bakar Terlarut pada Minyak Transformator Berdasarkan Faktor Pembebanan dan Beban Harmonik dengan Metode Roger Ratio, Jakarta: Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2011.
- [9] R. Hardityo, Deteksi dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode Analisis Gas Terlarut, Jakarta: Jurusan Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2008.
- [10] S. Hadi, *Power System Analysis. Milwaukee School of Engineering*, WCB Mc Graw-Hill.
- [11] S. Hadi, *Power System Analysis, milwaukee school of engineering*, WCB Mc Graw-Hill.