

# PENGARUH OVER EKSTIASI PADA TRANSFORMATOR DISTRIBUSI DI GARDU INDUK SERPONG TERHADAP PENUAAN ISOLASI KERTAS DITINJAU DARI SISI TERMAL

Muhammad Luqmanul Hakim<sup>1)</sup>, Aris Kiswanto<sup>2)</sup>, M. Tony Prasetyo<sup>3)</sup>

<sup>1,2,3)</sup>Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik  
Universitas Muhammadiyah Semarang  
Jl. Kasipah no 10-12 Semarang – Indonesia

## Abstract

*Distribution of electricity to consumers through some process that begins from power plants to substations supplied (sub-station), then lowered into the substation - a low-voltage distribution substations.*

→ *The distance is too far between the point on the voltage distribution in particular between the IBT to the parent distribution substation secondary voltage drop triggers. It is as well as on the distance between new or IBT IBT cilegon Gandul to trigger serpong substation secondary voltage drop at substation serpong.*

*To stabilize the voltage of the secondary to the primary voltage on distribution transformer tap changer operation. Problems arise when the tap changer to operate too much will lead to the over-excitation of the distribution transformer.*

*The side effects of the over-excitation also trigger an increase in temperature of the thermal transformer, so the effect on the components within it, is no exception to the isolation of paper in the process of thermal temperature rise is accelerating aging insulating paper itself.*

*The existence of aging insulating paper must be accompanied by the estimated number of clear that the replacement of aging insulating paper on time, so it requires the calculation of accurate data on the thermal temperature kenaikan to aging transformer paper insulation.*

**Keywords:** *electricity distribution process, reduced secondary voltage, over-excitation, aging insulating paper, the estimated value.*

## 1. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik adalah hubungan antara pusat listrik (pembangkit) dan konsumen (beban) dimana diantara keduanya terdapat saluran transmisi, gardu induk, dan saluran distribusi sehingga energi listrik

yang dihasilkan pusat listrik dapat dipergunakan oleh konsumen.

Dimana dalam sistem tenaga listrik tidak bisa dipisahkan dengan peralatan-peralatan (komponen-komponen) yang ada. Salah satu peralatan terpenting dalam sistem tenaga listrik yaitu



transformator. Alat ini menyambungkan antara suplai daya dari sisi pembangkit ke sisi konsumen.

Sebagai komponen yang mengkonversi besaran tegangan dan menghubungkan penyuplai daya dengan konsumen, keberadaan transformator sangat penting dalam menyalurkan daya, sehingga diharapkan transformator selalu dapat beroperasi. Akan tetapi, seringkali transformator mengalami kerusakan, terutama transformator-transformator yang terhubung ke penyulang (*transformator distribusi*).

Melihat ke dalam lagi dari sisi transformator, isolasi kertas mempunyai andil yang cukup besar terhadap kinerja dari transformator itu sendiri, Isolasi kertas merupakan hal yang sangat penting pada transformator. Umur isolasi kertas menentukan masa hidup transformator. Isolasi ini dapat mengalami penurunan kekuatan, sehingga faktor-faktor yang menyebabkan penurunan umur atau penuaan (*ageing*) dan penurunan kekuatan dielektrik (penurunan nilai tahanan) isolasi kertas harus dikurangi saat pengoperasian transformator.

Ada beberapa faktor yang menyebabkan penuaan dan penurunan tahanan isolasi kertas, yaitu:

1. Gangguan hubung singkat
2. Jenis beban (*harmonisa*)

3. Tegangan operasi

4. Kandungan air (*water content*), oksigen (*oxygen content*), dan asam (*acid content*), baik pada isolasi kertas maupun minyak transformator.

Gangguan hubung singkat, harmonisa beban, dan tegangan operasi akan menimbulkan stress termal pada isolasi kertas. Sedangkan kandungan air, oksigen, dan asam akan menyebabkan terjadinya reaksi kimia yang mengakibatkan depolimerisasi isolasi kertas sehingga kekuatannya menurun.

Dari beberapa faktor penyebab penuaan isolasi kertas di atas Tegangan operasi pada suatu transformator dapat menyebabkan terjadinya over eksitasi inti pada transformator yang mengakibatkan terjadinya kenaikan temperatur atau pemanasan pada transformator. Akumulasi terjadinya pemanasan sedikit demi sedikit akan menjadi salah satu penyebab faktor terjadinya penurunan kekuatan, penuaan, dan kerusakan isolasi transformator. Sehingga perlu adanya perhitungan nilai estimasi dari penuaan isolasi kertas agar penggantian isolasi kertas ini bisa tepat pada waktunya dengan harapan memperkecil terjadinya rasio gangguan dalam sistem tenaga listrik.



## 2. Tinjauan Pustaka

Gardu Induk merupakan sub sistem dari sistem penyaluran (*transmisi*) tenaga listrik, atau merupakan satu kesatuan dari sistem penyaluran (*transmisi*), Penyaluran (*transmisi*) merupakan sub sistem dari sistem tenaga listrik. Berarti, gardu induk merupakan sub-sub sistem dari sistem tenaga listrik.

Sebagai sub sistem dari sistem penyaluran (*transmisi*), gardu induk mempunyai peranan penting, dalam pengoperasiannya tidak dapat dipisahkan dari sistem penyaluran (*transmisi*) secara keseluruhan.

Dalam pembahasan ini difokuskan pada masalah gardu induk yang pada umumnya terpasang di Indonesia, pembahasannya bersifat praktis (terapan) sesuai konstruksi yang terpasang di lapangan.

Tegangan yang dibangkitkan generator terbatas dalam belasan kilovolt, sedangkan transmisi membutuhkan tegangan dalam puluhan sampai ratusan kilovolt, sehingga diantara pembangkit dan transmisi dibutuhkan trafo daya *step up*. Oleh karena itu, semua peralatan yang terpasang di sisi sekunder trafo ini harus mampu memikul tegangan tinggi.

Tegangan transmisi dalam puluhan sampai ratusan kilovolt sedangkan konsumen membutuhkan tegangan ratusan sampai dua puluhan kilovolt, sehingga diantara transmisi dan konsumen dibutuhkan trafo daya *step down*. Semua perlengkapan yang terpasang di sisi primer trafo ini juga harus mampu memikul tegangan tinggi. Trafo- trafo daya ini bersama perlengkapan-perengkapannya disebut gardu induk.

Trafo Distribusi adalah merupakan suatu komponen yang sangat penting dalam penyaluran tenaga listrik dari gardu distribusi ke konsumen. Kerusakan pada Trafo Distribusi menyebabkan kontinuitas pelayanan terhadap konsumen akan terganggu (terjadi pemutusan aliran listrik atau pemadaman). Pemadaman merupakan suatu kerugian yang menyebabkan biaya-biaya pembangkitan akan meningkat tergantung harga KWH yang tidak terjual. Pemilihan rating Trafo Distribusi yang tidak sesuai dengan kebutuhan beban akan menyebabkan efisiensi menjadi kecil, begitu juga penempatan lokasi Trafo Distribusi yang tidak cocok mempengaruhi drop tegangan ujung pada konsumen atau



jatuhnya/turunnya tegangan ujung saluran/konsumen.

Transformator atau trafo adalah komponen elektromagnet yang dapat merubah tegangan tinggi ke rendah atau sebaliknya dalam frekuensi sama. Trafo merupakan jantung dari distribusi dan transmisi yang diharapkan beroperasi maksimal (kerja terus menerus tanpa henti). Agar dapat berfungsi dengan baik, maka trafo harus dipelihara dan dirawat dengan baik menggunakan sistem dan peralatan yang tepat.

#### 1. Tap changer (perubah tap) :

Tap Changer adalah perubah perbandingan transformator untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder sesuai yang diinginkan dari tegangan jaringan / primer yang berubah-ubah. Tap changer dapat dioperasikan baik dalam keadaan berbeban (*on-load*) atau dalam keadaan tak berbeban (*off load*), tergantung jenisnya.

Trafo Distribusi dapat dipasang diluar ruanga (pemasangan diluar) dan dapat dipasang diruangan (pemasangan dalam) tergantung kepada keadaan lokasi beban. Pemeliharaan merupakan salah satu komponen yang secara langsung mendukung keandalan, daya mampu serta mutu produksi dari suatu peralatan. Pemeliharaan tidak saja merupakan

pekerjaan pisik yang langsung terhadap peralatan yang bersangkutan, tetapi diperlukan suatu perencanaan yang baik dan pengawasan terhadap pelaksanaannya, sehingga dengan demikian pemeliharaan akan dapat dilakukan dengan teratur dan sesuai dengan ketentuan-ketentuan, petunjuk-petunjuk yang berlaku terhadap peralatan yang bersangkutan.

Distribusi yang tepat, rating sesuai dengan kebutuhan beban akan menjaga tegangan jatuh pada konsumen dan akan menaikkan efisiensi penggunaan Trafo Distribusi. Jadi Transformator Distribusi merupakan salah satu peralatan yang perlu dipelihara dan dipergunakan sebaik mungkin (seefisien mungkin), sehingga keandalan/*kontinuitas* pelayanan terhadap terjamin.

Over eksitasi pada transformator merupakan suatu kejadian dimana inti transformator mengalami saturasi karena fluks magnetik yang mengalir di inti meningkat sehingga meningkatkan arus eksitasi yang melebihi batas desain peralatan.

Seringkali tanpa disadari suatu transformator yang beroperasi pada jaringan mengalami over eksitasi. Oleh karena itu perlu diketahui penyebab terjadinya over eksitasi pada transformator.

M. Luqmanul Hakim, Aris Kiswanto, M. Tony P



Dalam jaringan, seringkali jarak antara IBT 500/150 kV dengan transformator 150/20 kV sangat jauh hingga ratusan kilometer. Keadaan ini tentu saja menyebabkan tegangan suplai ke transformator 150/20 kV menjadi turun, bernilai lebih rendah, dibawah tegangan nominalnya bahkan hingga batas toleransi minimum yang diperbolehkan, sehingga tegangan di sisi sekunder (penyulang) pun akan ikut turun, berada di bawah tegangan nominalnya. Begitu juga saat suatu transformator dari keadaan tidak berbeban, kemudian menjadi berbeban, maka tegangan di sisi sekunder akan turun dibandingkan tegangan ratingnya (mengalami *voltage drop*).

Untuk menjaga kualitas ke sisi konsumen, transformator-transformator ke sisi penyulang ini harus dinaikkan kembali tegangannya agar kualitas tegangan yang disyaratkan terpenuhi. Hal ini biasanya dilakukan dengan pengoperasian OLTC (*On Load Tap Changer*) pada posisi tap tertentu sehingga diperoleh nilai tegangan sekunder yang sesuai. Penjelasan ini

dapat lebih mudah dipahami dengan

$$\text{rumus: } \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (1)$$

Tegangan primer ( $V_p$ ) merupakan tegangan yang diterima dari suplai, sehingga nilainya tetap. Sedangkan tegangan sekunder ( $V_s$ ) merupakan tegangan hasil konversi transformator sesuai dengan perbandingan lilitan. Nilai tegangan sekunder ini akan dinaikkan kembali ke nilai nominal agar kualitas terjaga.

Belitan sekunder ( $N_s$ ) bernilai tetap, sehingga untuk menaikkan kembali tegangan sekunder, dilakukan dengan mengurangi panjang belitan primer yang digunakan (memperkecil rasio belitan) dengan pengoperasian OLTC (penaikan tap-changer).

Hukum faraday menyatakan bahwa gaya gerak listrik (*GGL*) sebanding dengan rata-rata perubahan fluks.

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

$$e(t) = -N \frac{d(\phi \max \sin \omega t)}{dt} \quad (3)$$

$$e(t) = N \omega \phi \max \cos \omega t \quad (4)$$

$$\phi = B.A = \frac{\mu i N}{l} A \quad (5)$$

Pada frekuensi 50 Hz, maka:



$$E_{max} = N \cdot \omega \cdot A \cdot B_{max} \quad (6)$$

dengan  $\omega = 2\pi f$

Pada operasi *steady-state*, nilai rms dari induksi *GGL* ini adalah:

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \cdot N \cdot A \cdot B_{max} = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N \cdot A \cdot B_{max} \quad (7)$$

Pada bagian primer transformator, tegangan ( $E$ ) bernilai tetap, frekuensi sistem ( $f$ ) konstan, luas penampang inti ( $A$ ) juga tetap. Oleh karena itu, penurunan panjang belitan primer ( $N$ ) yang digunakan akan menyebabkan peningkatan densitas fluks ( $B$ ) yang terjadi karena bertambahnya fluks yang mengalir pada inti transformator.

Fluks yang mengalir pada suatu penghantar sebanding dengan besar arus. Peningkatan jumlah fluks yang mengalir pada inti akan meningkatkan arus eksitasi. Peningkatan arus eksitasi ini dapat menyebabkan transformator mengalami over eksitasi.

Nilai over eksitasi yang terjadi adalah sebesar tegangan sistem dibagi dengan tegangan desain yang sesuai dengan pilihan tap-nya.

$$\text{Over eksitasi} = \frac{\text{tegangan sistem}}{\text{tegangan pada tap}} \quad (8)$$

Fluks magnetik pada inti transformator besarnya sebanding dengan tegangan dan

berbanding terbalik dengan frekuensi sistem (Walter, 2004).

$$E = \sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N \cdot \phi \quad (9)$$

$$\phi = \frac{E}{\sqrt{2} \pi \cdot f \cdot N} \quad (10)$$

Oleh karena itu, satuan eksitasi adalah per unit tegangan dibagi dengan per unit frekuensi (*volt/hertz*). Over eksitasi terjadi jika per unit *volt/hertz* melebihi batas desain peralatan (Walter, 2004).

Kondisi *over voltage* dan/atau *under frequency* dapat menghasilkan suatu *level fluks* yang menyebabkan inti transformator mengalami saturasi. Keadaan operasi yang tidak normal ini dapat terjadi pada setiap bagian dari sistem tenaga listrik, termasuk transformator, mengalami over eksitasi (Harlow, 2004).

## 2. Akibat Over Eksitasi Pada Transformator

Over eksitasi pada transformator menyebabkan kenaikan temperatur inti transformator dan meningkatkan temperatur minyak transformator sebagai media pendingin transformator, meningkatkan tingkat kebisingan (*noise*) dan getaran (*vibration*) pada transformator (Harlow, 2004).

Beberapa transformator yang mengalami over eksitasi mengalami *stress termal* yang lebih besar



dibandingkan dengan transformator sejenis pada beban yang sama jika tanpa over eksitasi.

Over eksitasi dapat menyebabkan kerusakan permanen pada belitan dan inti transformator akibat panas yang disebabkan oleh arus eksitasi yang tinggi yang mengalir ketika tegangan meningkat tajam ke *level saturasi* (Castro, 2004).

Transformator akan menuju ke kondisi over eksitasi ketika tegangan sistem berubah, ketika beban berubah dan/atau faktor daya (*PF*) berubah, atau ketika kombinasi antara tegangan sistem dan kondisi beban (Castro, 2004).

Peningkatan over eksitasi juga dapat menyebabkan penurunan kemampuan menyuplai daya pada transformator. Walaupun penurunan ini tidak terlalu besar, *hot spot* akan meningkat dan menyebabkan terjadinya penuaan pada isolasi transformator sehingga terjadi penurunan masa hidup (*lifetime*) isolasi transformator yang cukup mengkhawatirkan (Savaghebi, 2007).

Over eksitasi pada transformator dapat menyebabkan kerusakan termal pada inti akibat fluks besar yang

berlebihan pada rangkaian magnetik. Fluks yang berlebih ini membuat inti besi mengalami saturasi dan mengalir ke dalam struktur yang berdekatan, menyebabkan tingginya rugi-rugi arus Eddy pada inti dan material konduktor yang berdekatan (Walter, 2004).

### 3. Rugi-rugi Inti

Adanya over eksitasi akan menghasilkan rugi-rugi. Rugi-rugi saat over eksitasi ini terjadi di inti. Rugi-rugi ini adalah rugi-rugi tanpa beban (*no-load losses*). Rugi-rugi inti ini lebih bergantung pada besar fluks dibandingkan besar tegangan. Rugi-rugi inti dapat diklasifikasikan menjadi rugi-rugi hysteresis dan rugi-rugi arus eddy. Rugi-rugi inti akan meningkat saat terjadi over eksitasi (Gaudreau, 2002).

### 4. Rugi-rugi Hysteresis

Jika suatu inti magnetik disuplai dengan tegangan AC (seperti pada gambar dibawah) pada belitannya, akan terbentuk kurva *B-H*. Saat terjadi satu siklus arus (atau tegangan), terbentuk kurva *B-H* yang melewati lintasan OZCZ'R' [11].

Setelah beberapa siklus, karakteristik kurva *B-H* menjadi suatu *loop* seperti pada gambar. Kurva ini dinamakan *loop hysteresis*.



Rugi-rugi hysteresis per siklus merupakan luas kurva dapat dihitung dengan rumus [11]:

$$Wh = Vol \oint HdB \quad (11)$$

dengan  $Wh$  merupakan rugi-rugi *Hysteresis/unit volume*.

Karena arus melakukan  $f$  kali siklus dalam satu detik, rugi-rugi Hysteresis dalam volume  $V$  material ketika dioperasikan pada  $f$  Hz adalah [11]:

$$Ph = Wh.V.f \text{ Watt} \quad (12)$$

Untuk menghindari perhitungan luas loop, Steinmetz memberikan rumus empiris untuk menghitung rugi-rugi hysteresis berdasarkan studi eksperimen, sehingga rugi-rugi Hysteresis dapat ditulis (Kothari, 2004):

$$Ph = Kh.f.Bm^n \text{ Watt/m}^3 \quad (13)$$

dengan konstanta  $Kh$  nilainya bergantung pada jenis material dan  $n$  merupakan *eksponen Steinmetz* yang nilainya bergantung pada jenis material [11].

### 5. Rugi-rugi Arus Eddy

Ketika inti magnetik dialiri fluks, tegangan terinduksi pada semua bagian yang dilewati fluks. Hal ini akan menghasilkan arus sirkulasi pada inti. Arus ini disebut arus eddy dan menghasilkan rugi-rugi daya ( $I^2R$ ) yang disebut rugi-rugi arus Eddy (Kothari, 2004). Arus ini terbentuk karena adanya

beda potensial diantara badan material karena perubahan fluks.

Rugi-rugi arus Eddy dapat dihitung dengan rumus empiris (Kothari, 2004):

$$Pe = Ke.f^2.Bm^2 \text{ Watt/m}^3 \quad (14)$$

dengan konstanta  $Ke$  nilainya bergantung pada jenis material.

Rugi-rugi inti merupakan penjumlahan dari rugi-rugi Hysteresis dan rugi-rugi arus Eddy. Rugi-rugi ini dapat dihitung dengan rumus empiris:

$$Pc = Ph + Pe \quad (15)$$

$$Pc = Kh.f.Bm^n + Ke.f^2.Bm^2 \text{ Watt/m}^3 \quad (16)$$

Dari rumus diatas, terlihat bahwa kenaikan densitas fluks menyebabkan kenaikan rugi-rugi inti. Hubungan antara rugi-rugi inti dengan eksitasi pada level ini dapat lebih baik diperkirakan berdasarkan frekuensi yang konstan menggunakan rumus sebagai berikut (Castro, 2004):

$$Pc = K.Bm^q \quad (17)$$

dengan  $q$  merupakan *eksponen Steinmetz* modifikasi dan bernilai sekitar 3,7 (Castro, 2004).

Dari persamaan (20), besar densitas fluks dapat dirumuskan:

$$B_{\max} = \frac{Erms}{\sqrt{2\pi}.f.N.A} \quad (18)$$

sehingga persamaan (17) dapat dijabarkan menjadi:

M. Luqmanul Hakim, Aris Kiswanto, M. Tony P



$$P_c = K \cdot \left( \frac{E_{rms}}{\sqrt{2\pi \cdot f \cdot N \cdot A}} \right)^q \quad (19)$$

$$P_c = \frac{E_{rms}^q}{N^q} \cdot K \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot f \cdot A}} \right)^q \quad (20)$$

Dari persamaan (20) bisa dilihat bahwasanya persamaan tersebut untuk mencari rugi-rugi inti transformator etika transformator dalam keadaan over eksitasi (tap 18) sehingga konsumsi beban saat posisi tap 18 akan menunjukkan arus beban tertinggi nya. Sehingga rugi-rugi berbeban ketika transformator menunjukkan arus beban tertinggi dijabarkan sesuai rumus:

$$P_{LLB} = \frac{I_B^2}{I_N^2} \times P_{LLN} \quad (21)$$

Dimana  $P_{LLB}$  merupakan rugi-rugi pada arus beban tertinggi ( $kW$ ),  $I_B$  arus beban yang terjadi ( $ampere$ ),  $I_N$  arus beban maksimal data pabrikan ( $ampere$ ),  $P_{LLN}$  rugi-rugi berbeban data pabrikan ( $kW$ ).

Kenaikan beban pada transformator memicu rugi-rugi yang ditimbulkan juga semakin besar dan berbanding lurus dengan besar kenaikan suhu termal pada transformator itu sendiri, dimana suhu termal pada transformator terkonsentrasi pada beberapa bagian utama yaitu tempertur minyak bagian atas

transformator dan tempertur *hot spot* maksimal transformator, sehingga dari suhu bagian-bagian tersebut nantinya akan terakumulasi menjadi temperatur *hot spot* maksimal/ tempertur keseluruhan transformator. Temperatur minyak bagian atas transformator dipengaruhi oleh besarnya perbandingan rugi-rugi total akibat over eksitasi dan rugi-rugi total data pabrikan dikalikan temperatur minyak data pabrikan (*top oil temperature ise*), sesuai rumus:

$$\Delta\theta_{TOO} = \Delta\theta_{TOR} \times \left( \frac{P_{TO}}{P_{TR}} \right)^{0.8} \quad (22)$$

Kemudian temperatur *hot spot* transformato merupakan penjumlahan kenaikan temperatur minyak bagian atas transformator dan *HS factor x gradien*, dimana ( $HS_{factor} = 14$  dan  $gradien = 1,3$ ) sehingga didapat rumus:

$$\Delta\theta_{HSO} = \Delta\theta_{TOO} + HS_{factor} \times gradien \quad (23)$$

Dari rumus (23) merupakan kenaikan *hot spot* transformator yang masih mengabaikan temperatur *ambient* (suhu lingkungan sekitar transformator), dimana suhu lingkungan sekitar transformator juga ikut mempengaruhi dari kenaikan temperatur *hot spot* transformator itu sendiri. Sehingga didapat rumus:



$$\theta_{HSO} = \theta_A + \Delta_{TOO} + HS_{factor} \times \text{gradien} \quad (24)$$

Kenaikan temperatur *hot spot* transformator memicu penuaan isolasi kertas pada transformator yang semakin cepat, dengan mempertimbangkan titik terpanas (*hottest spot*) sehingga didapat rumus:

$$FAA = \exp\left(\frac{\theta_{HSO} - 98}{6}\right) \quad (25)$$

### 3. Metodologi Penelitian

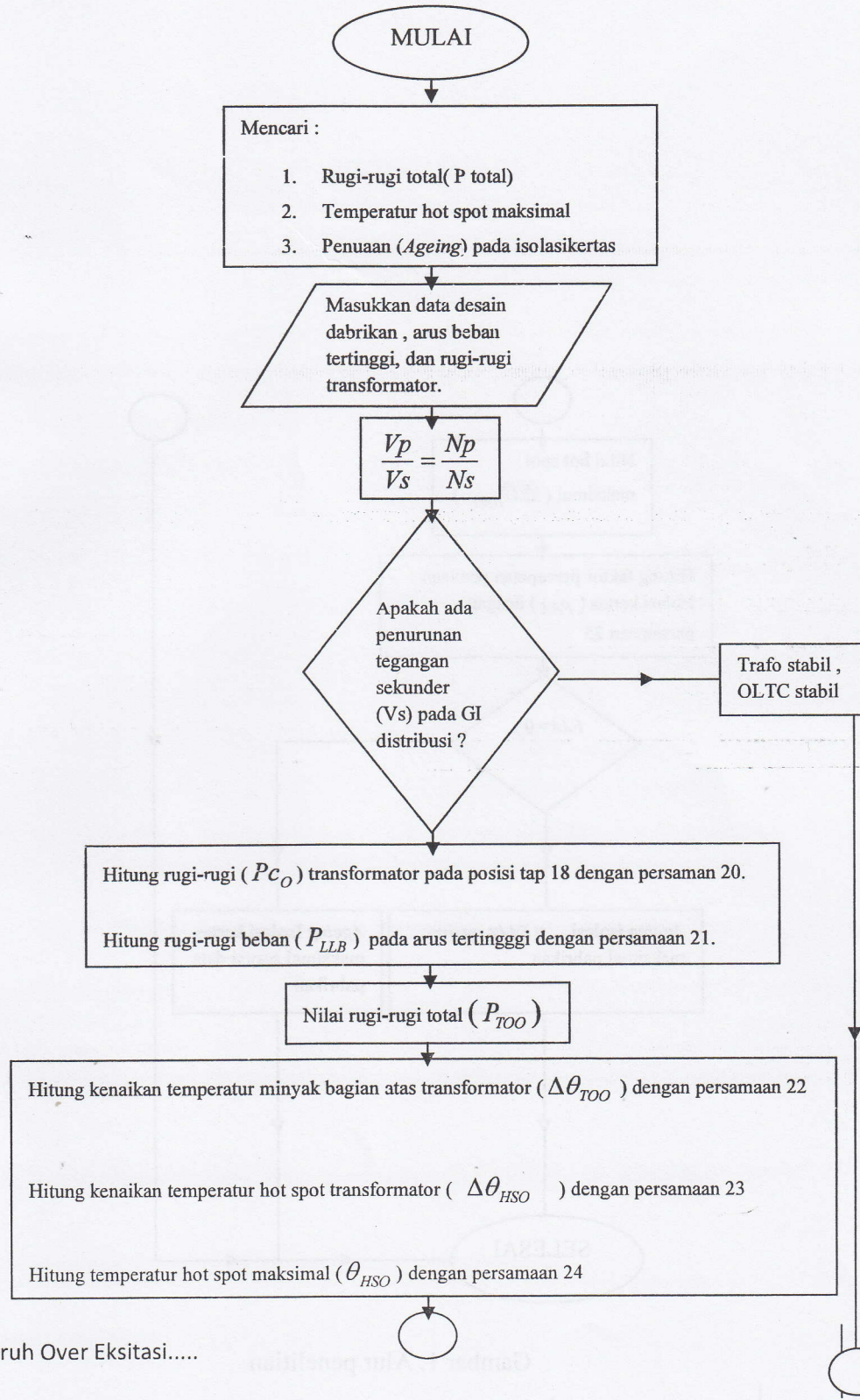
Setelah melalui tahapan metode studi pustaka metode kedua yaitu metode *observasi* (pengamatan secara langsung di lapangan). Dimana pengamatan kasus dilakukan di transformator 1 Gardu Induk Serpong, gardu induk serpong ini letaknya cukup jauh dari suplai pembangkit (sebelum PLTU Balaraja

masuk ke sistem) dan menerima suplai tegangan dari IBT yang cukup jauh letaknya (dari IBT Cilegon Baru atau IBT Gandul).

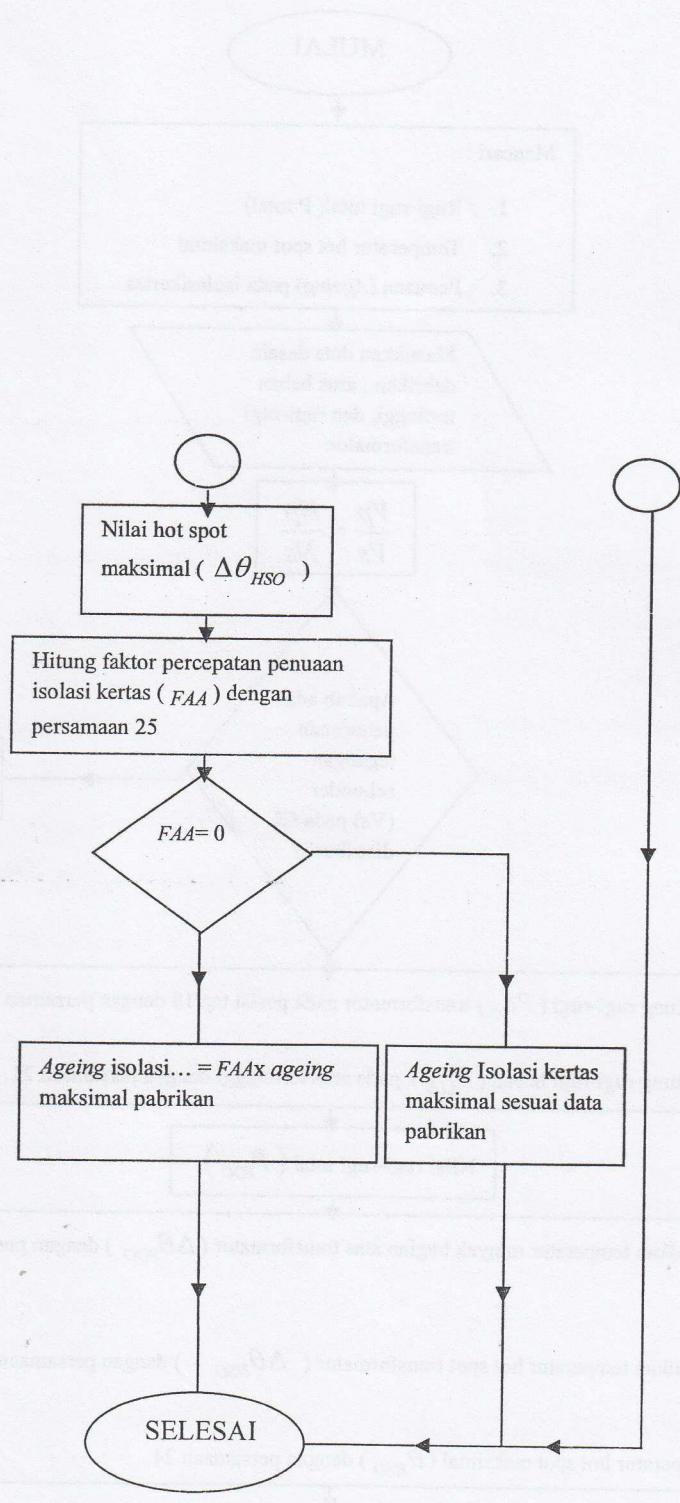
Transformator 1 GI Serpong sering mengalami suplai tegangan ke sisi primer yang rendah dari sistem. Berdasarkan data OPGI tahun 2008, transformator ini pernah mengalami tegangan di bawah batas toleransi minimal (150 kV-10%). Untuk menjaga kualitas tegangan ke konsumen, seringkali dilakukan pengoperasian OLTC hingga tap tertinggi (tap-18), bahkan hampir setiap hari. Oleh karena itu, dilakukan penelitian terhadap transformator 1 Gardu Induk Serpong dengan menganalisa data dan perhitungan secara matematis untuk mendapatkan nilai estimasi penuaan isolasi kertas.



**Alur penelitian**







Gambar 1. Alur penelitian



#### 4. Pembahasan

##### Besar Rugi-Rugi Akibat Over Eksitasi

Untuk menganalisis over eksitasi, dipilih transformator distribusi dengan kapasitas 60 MVA 150/20 kV menggunakan minyak sebagai media pendingin dan media isolasi, sistem pendingin minyak ONAF dan pada frekuensi fundamental (50 Hz). Rugi-rugi yang diperoleh dari data desain pabrikan pada temperature 75°C adalah (Sumaryadi dkk, 2009):

Rugi beban nol	: 38 kW
Rugi berbeban	: 220 kW
Belitan sisi tegangan tinggi	: 150.000 V, Wye
Belitan sisi tegangan rendah	: 20.000 V, Wye

Temperature hot spot maksimal adalah 98°C (*non thermally upgrade insulation paper*) (IEC 60354, 1991). Kenaikan temperature maksimal pada temperature ambient 27°C adalah: hot spot temperature 71°C, belitan 58°C, minyak 53°C.

Dengan menggunakan perbandingan dua keadaan, yaitu keadaan saat tegangan nominal dan keadaan saat over eksitasi pada posisi tap 18, dapat dihitung besar rugi-rugi inti saat transformator berada pada posisi tap 18 dengan menggunakan

persamaan (20). Nilai konstanta  $K$ , frekuensi ( $f$ ), dan luas penampang inti ( $A$ ) sama pada dua keadaan tersebut, perbandingan belitan menggunakan pendekatan nilai arus pada kurva kontinuitas OLTC, sehingga besar rugi-rugi inti transformator saat over eksitasi (berada pada posisi tap 18) adalah:

$$\frac{P_{C_O}}{P_{C_N}} = \frac{E_{rms_O}^q \cdot N_N^q}{E_{rms_N}^q \cdot N_O^q}$$

$$P_{C_O} = \frac{127.5^{3.7}}{150^{3.7}} \cdot \frac{6.03^{3.7}}{4.867^{3.7}} \times P_{C_N}$$

$$P_{C_O} = 1.211 \times 38 = 46.03 \text{ kW}$$

Rugi-rugi berbeban (*load losses*) merupakan penjumlahan dari rugi-rugi arus searah ( $I^2R$ ), rugi-rugi belitan arus eddy (*winding eddy current losses*), dan rugi-rugi stray lainnya. Besarnya saat beban maksimal adalah sekitar 220 kW (Sumaryadi dkk, 2009).

Dari data beban transformator 1 GI Serpong pada tahun 2008, arus beban tertinggi adalah 1630 A (8 April 2008). Rugi-rugi berbeban pada arus tersebut

$$\text{adalah: } P_{LLB} = \frac{I_B^2}{I_N^2} \times P_{LLN} \quad (21)$$

$$P_{LLB} = \frac{1630^2}{1732^2} \times 220 = 194,85 \text{ kW}$$



Rugi-rugi total transformator adalah penjumlahan rugi-rugi inti dengan rugi-rugi berbeban, sehingga rugi-rugi total pada arus tersebut adalah:

$$194.85 + 46.03 = 240.88 \text{ kW} \quad (15)$$

Akibat adanya penambahan rugi-rugi inti ini, pembebanan transformator pada kondisi ambient temperature (27°C) hanya bisa dilakukan hingga sebesar:

$$\% \text{ beban} = \frac{258 - 46.03}{220} \times 100\% = 96.35\%$$

Jika pada transformator dilakukan pembebanan maksimum (100%), rugi-rugi total akibat over eksitasi menjadi sebesar:

$$220 + 46.03 = 266.03 \text{ kW} \quad (15)$$

Oleh karena itu, agar dapat menghindari rugi-rugi total yang melebihi batas normal dan terjadinya penuaan yang cepat akibat over eksitasi, transformator hanya bisa dibebani hingga arus sebesar:

$$\frac{I_B^2}{I_N^2} = \frac{P_T - P_{C_O}}{P_{LLN}} \quad (8)$$

$$\frac{I_B^2}{I_N^2} = \frac{258 - 46.03}{220}$$

$$I_B = \sqrt{\frac{211.97}{220} \times 1732^2} = 1700.1 \text{ A}$$

Tabel 1. Perhitungan Rugi-Rugi

Jenis Rugi-Rugi	Rugi-Rugi Sesuai Rating	Faktor Pengali (Pengaruh Over Eksitasi)	Koreksi Rugi-rugi
Rugi-rugi inti	38 kW	1.211	46.0kW
Rugi-rugi berbeban	220 kW		220kW
<b>Rugi-rugi total</b>	<b>258 Kw</b>		<b>266.03Kw</b>

### Kenaikan Temperatur Akibat Over Eksitasi

Kenaikan temperatur merupakan hal yang tidak dapat dihindari saat terjadi over eksitasi. Jika pada transformator dilakukan pembebanan maksimum (100%), besarnya kenaikan temperatur adalah sebagai berikut:

Kenaikan temperatur minyak bagian atas transformator (*top-oil temperature rise*) menjadi sebesar (IEEE Std C57.110-1998):

$$\Delta\theta_{TOO} = \Delta\theta_{TOR} \times \left( \frac{P_{TO}}{P_{TR}} \right)^{0.8} \quad (22)$$

$$\Delta\theta_{TOO} = 53 \times \left( \frac{266.03}{258} \right)^{0.8} = 54.32^\circ\text{C}$$

Kenaikan temperatur hot spot transformator (dengan  $HS_{factor} = 14$  dan  $gradient = 1,3$ ) menjadi sebesar (IEEE Std C57.91-1995):

$$\Delta\theta_{HSO} = \Delta\theta_{TOO} + HS_{factor} \times gradient \quad (23)$$

$$\Delta\theta_{HSO} = 54.32 + 18 = 72.32^\circ\text{C}$$



Apabila ambient temperatur pada gardu induk dimana transformator tersebut ditempatkan rata-rata adalah 27°C, temperatur hot spot maksimal menjadi (IEEE Std C57.91-1995):

$$\theta_{HSO} = \theta_A + \Delta_{TOO} + HS_{factor} \times \text{gradien} \quad (24)$$

$$\theta_{HSO} = 27 + 54.32 + 18 = 99.32^\circ\text{C}$$

### Penuaan (*Ageing*) Pada Isolasi Kertas

Penuaan pada isolasi kertas dapat terjadi karena berbagai hal, salah satunya adalah karena kenaikan temperatur hot spot. Karena distribusi temperatur pada kebanyakan transformator tidak seragam, saat ini penuaan dipelajari dengan cara mempertimbangkan titik terpanas (*hottest spot*) pada transformator (Castro, 2004). Akibat adanya kenaikan temperature karena over eksitasi menjadi 99,32°C, faktor percepatan penuaan (*ageing accelerator factor*) untuk isolasi kertas belitan (*non thermally upgrade insulation paper*) transformator menjadi sebesar (Sumaryadi dkk,

$$2009): FAA = \exp\left(\frac{\theta_{HSO} - 98}{6}\right) \quad (25)$$

$$FAA = \exp(0.22) = 1.246$$

Artinya isolasi kertas pada transformator 1 GI Serpong akan mengalami laju penuaan sebesar 1,246 kali lebih cepat.

### Kesimpulan.

1. Over eksitasi dapat menyebabkan kenaikan temperatur inti transformator dan meningkatkan temperatur minyak transformator sebagai media pendingin transformator, meningkatkan tingkat kebisingan (*noise*) dan getaran (*vibration*) pada transformator.
2. Over eksitasi menyebabkan kenaikan rugi-rugi inti pada transformator 1 hingga sebesar 46,03 kW sehingga menyebabkan kenaikan temperatur minyak (*top oil temperature*).
3. Akibat over eksitasi, temperatur hot spot maksimal naik menjadi 99.32°C dan umur isolasi kertas menjadi 1,246 kali lebih cepat dibandingkan saat keadaan normal.

### Daftar Pustaka

- A. Gaudreau, P. Picher, L. Bolduc, dan A. Coutu, 2002, *No-Load Losses in Transformer Under Overexcitation /Inrush-Current Conditions: Test and a New Model*.
- A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., dan Stephen D. Umans. 2002, *Electric Machinery 6th Edition*. McGraw-Hill. Massachussets.



- C.R.T. Castro, S.R. Barbosa, H.L. Ferreira, L.E. Samico, I.J.S. Lopes, dan S.R. Silva. 2004, *Power Transformer Loading Studies Considering Overexcitation*. IEEE.
- D.P. Kothari dan I.J. Nagrath. 2006. *Electric Machines*. Tata McGraw-Hill. New Delhi.
- Didik Susilo Widiyanto. *Power Transformer Design Aspect*. PT. Unindo – Areva. Jakarta.  
<http://kampungelektro.blogspot.com/2012/02/ransformator.html>  
<http://switchyard-electric.blogspot.com/2011/04/20>  
<http://tanotocentre.wordpress.com/2009/06/06>
- IEC 60076. 2000. *Power Transformers*.
- IEC 60354. 1991. *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*.
- IEEE Std C57.110-1998. 1999. IEEE *Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Load Currents*.
- IEEE Std C57.91-1995. *IEEE Guide for Loading Mineral - Oil - Immersed Transformers*.
- J. H. Harlow. 2004. *Electric Power Transformer Engineering*. CRC Press.
- M. Savaghebi, A. Gholami, dan H. Hooshyar. 2007. *Loading Capability of Transformer in Over-excitation Condition*. IEEE.
- Maschinenfabrik Reinhausen. 2005. *Tap Changer Application*.
- Mukund R. Patel. 2005. *Spacecraft Power Systems*. CRC Press.
- Sumaryadi, Bambang Cahyono, dan Indera Arifianto. 2009, *Diagnostic Degradation Process of Power Transformer Insulation System: Harmonic Current Impact to Capability of Transformer #7 Pulogadung s/s*.
- , 2004, *Transformer Handbook*. ABB. Zurich, Switzerland.
- Walter A. Elmore. 2004, *Protective Relaying Theory and Applications*. Marcel Dekker. New York.  
[www.Elektroindonesia.com](http://www.Elektroindonesia.com)