

PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP KENAIKAN SUHU PADA BELITAN TRANSFORMATOR DAYA JENIS TERENDAM MINYAK

Janny Olly Wuwung

Abstrak:

Penelitian ini bertujuan (1) Menghitung kenaikan suhu minyak-atas; (2) Menghitung kenaikan suhu titik-panas; (3) Menentukan faktor laju-penuaan dan susut-umur; (4) Menentukan harapan-hidup (umur) dari transformator daya.

Objek penelitian adalah pengaruh pembebanan terhadap kenaikan suhu pada belitan transformator daya jenis terendam minyak (oil-immersed power transformer). Dalam penelitian ini dapat diketahui seberapa besar harapan-hidup (umur) transformator daya jika dibebani. Dalam menganalisis kenaikan suhu belitan transformator menggunakan teori perpindahan panas yang berpedoman pada panduan standar internasional IEC dan IEEE.

Hasil menunjukkan bahwa untuk faktor beban $K = 1$ pu, dengan suhu lingkungan sebesar $20^{\circ}\text{C} - 29.06^{\circ}\text{C}$, kenaikan suhu belitan dan suhu minyak-atas sebesar $45^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$, tidak melebihi batas suhu yang diizinkan sebesar 65°C . Kenaikan suhu titik-panas sebesar 34.5°C tidak melebihi batas suhu yang diizinkan sebesar 80°C . Umur transformator pada keadaan pembebanan tersebut sebesar 16-41 tahun. Pada faktor beban $K=1.1$ pu, kenaikan suhu minyak-atas dan suhu belitan berada pada nilai maksimal yang diizinkan sebesar 65°C . Suhu titik-panas sebesar $140-150^{\circ}\text{C}$ sudah melebihi suhu yang diizinkan 110°C . Sehingga umur transformator berkisar pada 0.6 tahun – 1.5 tahun. Dengan adanya kenaikan faktor beban akan meningkatkan faktor laju penuaan sehingga umur transformator berkurang.

Kata Kunci : Pembebanan, suhu, ambient, laju-penuaan, transformator.

1. PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Salah satu komponen utama dalam suatu sistem tenaga listrik untuk menyalurkan tenaga listrik dari suatu pembangkit sampai kepada kelompok-kelompok beban yang dilayani adalah transformator, yang berfungsi sebagai penyesuai terhadap tegangan beban.

Transformator-transformator jenis terendam-minyak yang dipergunakan di Indonesia, dirancang dan dibuat berdasarkan standar IEC (International Electrotechnical Commission), (Publikasi IEC 354, yang ditetapkan menjadi standar PLN. (SPLN 17 A:1979). Standar IEC menetapkan iklim negara-negara empat musim sebagai kriteria perancangan transformator, dimana suhu sekitar efektif sepanjang tahun adalah 20°C , (30°C untuk standar IEEE, 1999). Berdasarkan standar IEC, transformator dirancang untuk dibebani sepenuhnya selama 24 jam pada suhu sekitar 20°C . Nilai-nilai tersebut menjamin transformator tidak mengalami kenaikan susut-umur (tetap sesuai perancangan), karena akan menyebabkan suhu titik-panas pada belitan mencapai 98°C , (110°C untuk standar IEEE, 1999). Dengan kondisi iklim tropis di Indonesia yang memiliki dua musim yaitu musim kemarau dan musim hujan dengan suhu sekitar efektif 30°C , maka standar tersebut tidak sesuai lagi. Pengoperasian transformator pada suhu sekitar lebih

dari 30°C akan mengakibatkan kenaikan susut-umur yang lebih besar dari susut-umur normalnya, sehingga terjadi penuaan yang lebih cepat pada isolasi belitan transformator.

Proses penuaan suatu transformator disebabkan oleh banyak hal dan berbagai kompleksitasnya seperti panas, listrik, kimia dan mekanik. Namun berdasarkan hasil survey penelitian yang telah dilakukan oleh Marius-C.Popescu, 2009, bahwa penyebab utama kerusakan pada transformator daya adalah akibat dari kegagalan isolasi dan dinyatakan sebesar 48%.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Rumusan permasalahan dalam menganalisis pengaruh kenaikan suhu pada belitan transformator daya yaitu :

Bagaimana menghitung kenaikan suhu minyak-atas dari transformator ?

Bagaimana menghitung kenaikan suhu titik-panas dari transformator ?

Bagaimana menentukan faktor laju-penuaan dan susut-umur dari transformator ?

Bagaimana menentukan harapan-hidup (umur) transformator ?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan penelitian ini adalah :
Menghitung kenaikan suhu minyak-atas dari transformator daya.

Menghitung kenaikan suhu titik-panas dari transformator daya.
Menentukan faktor laju-penuaan dan susut-umur dari transformator daya.
Menentukan harapan-hidup (umur) dari transformator daya.

1.4 MANFAAT PENELITIAN

Manfaat penelitian berorientasi pada:
Memberikan informasi mengenai batasan-batasan suhu untuk sistem proteksi termal transformator daya.
Mengantisipasi terjadinya percepatan penuaan pada transformator pada pembebanan-lebih.
Informasi yang diperoleh dapat diterapkan pada sistem SCADA.

1.5 BATASAN MASALAH

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:
Analisis kenaikan suhu belitan transformator berpedoman pada panduan standar IEC dan IEEE.
Transformator yang dimaksud adalah transformator daya jenis terendam-minyak (*oil-immersed power transformer*) dengan kapasitas menengah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TRANSFORMATOR

Prinsip Dasar

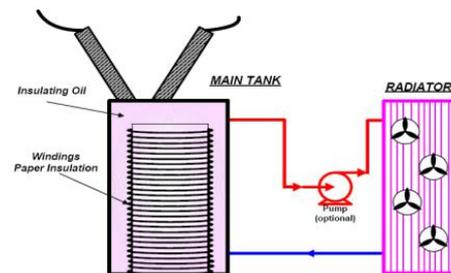
Hukum utama dalam transformator adalah hukum induksi faraday. Menurut hukum ini suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup, adalah berbanding lurus dengan perubahan persatuan waktu dari pada arus induksi atau flux yang dilingkari oleh garis lengkung itu. Selain hukum Faraday, transformator menggunakan hukum Lorenz.

Dasar dari teori transformator adalah arus listrik bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi, maka inti besi itu akan berubah menjadi magnit dan apabila magnit tersebut dikelilingi oleh suatu belitan, maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda tegangan.

Transformator daya

Transformator daya adalah transformator yang digunakan antara stasiun pembangkit dan jaringan distribusi. Transformator daya pada dasarnya terdiri dari inti baja, belitan yaitu lilitan kawat tembaga atau aluminium berisolasi, minyak sebagai isolasi dan medium pendingin untuk seluruh transformator, dan tangki sebagai wadah, serta perlengkapan perlindungan lainnya. Inti, belitan, dan isolasi semua memiliki kemampuan termal khusus. Kerugian di belitan akan menyebabkan kenaikan suhu inti dalam transformator, yang ditransfer ke

minyak isolasi. Kegagalan untuk membatasi suhu ini yang meningkat sesuai dengan kemampuan termal isolasi dan bahan inti, dapat menyebabkan kegagalan *prematur* dalam transformator.



Gambar 1. Representasi transformator daya sederhana

Pemanasan Transformator

Kerugian Tanpa beban dan berbeban adalah dua sumber penting dari pemanasan yang dipertimbangkan dalam pemodelan termal transformator daya. Kerugian tanpa beban terdiri dari rugi hysteresis dan rugi Eddy dalam inti transformator, dan kerugian ini timbul ketika transformator diberi energi. Rugi histerisis disebabkan oleh material magnet dasar yang menyelaraskan dengan medan magnet bolak-balik. Arus Eddy diinduksikan dalam inti oleh medan magnet bolak-balik. Jumlah rugi hysteresis dan rugi arus Eddy tergantung pada tegangan yang dibangkitkan dari transformator.

Kerugian beban adalah sumber yang lebih signifikan dari pemanasan transformator, yang terdiri dari kerugian tembaga akibat hambatan belitan dan rugi beban tersesat karena arus Eddy di bagian struktural lainnya dalam transformator. Kerugian tembaga terdiri dari kerugian resistensi DC, dan kerugian arus Eddy belitan. Jumlah kerugian yang terjadi tergantung pada arus beban transformator, serta suhu minyak. Meningkatnya kerugian resistansi DC akan meningkatkan suhu, sementara kerugian pembebanan lainnya menurun dengan peningkatan suhu minyak.

Rugi-Rugi Besi

Rugi-rugi besi ini sebagian besar terjadi pada inti transformator, sehingga sering juga disebut dengan rugi-rugi inti; Dapat juga terjadi dalam bejana transformator yaitu bila fluks meninggalkan inti sehingga mencapai bejana, tetapi nilainya kecil sehingga biasanya diabaikan. Rugi-rugi pada inti transformator terdiri dari rugi hysteresis (*Hysteresis Loss*) dan rugi arus pusar (*Eddy Current Loss*).

Rugi Histeresis (*Hysteresis Loss*)

Rugi histeresis adalah rugi yang disebabkan oleh fluks bolak-balik pada inti besi. Secara empiris, besar rugi histeresis adalah:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{maks}^h \text{ (watt) (1)}$$

Rugi arus-pusar (*Eddy Current Loss*)

Rugi arus-pusar adalah rugi yang disebabkan oleh arus pusar pada inti besi transformator. Secara empiris rugi arus-pusar dituliskan:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^h \text{ (watt) (2)}$$

Rugi-rugi tembaga

Yang dimaksud dengan rugi tembaga adalah rugi-rugi yang disebabkan oleh arus beban yang mengalir pada belitan transformator. Besarnya rugi tembaga tersebut adalah:

$$P_{cu} = I^2 \cdot R \text{ (watt) (3)}$$

Besarnya rugi tembaga sangat bergantung pada besarnya arus beban, semakin besar arus beban semakin besar pula rugi tembaga yang timbul dan berubah menjadi panas pada transformator.

Pendinginan Transformator

Panas yang timbul pada belitan maupun inti transformator pada saat transformator dibebani tidak boleh berlebihan karena dapat merusak dan menurunkan tahanan isolasi belitan. Untuk mengatasi agar panas yang timbul tidak berlebihan maka digunakan minyak pendingin transformator. Selain pendingin, minyak pendingin transformator juga berfungsi sebagai isolator. Selain itu pendinginan transformator juga terjadi secara alami, yaitu berupa udara di sekitar transformator tersebut. Menurut jenis pendinginnya, transformator dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu *Dry Type Transformer* dan *Oil-Immersed Transformer*.

Dry Type Transformer

Transformator jenis ini paling mudah dalam pengoperasiannya, karena sistem pendinginan secara alamiah dengan memanfaatkan udara di sekitar transformator sehingga tidak memerlukan biaya dalam perawatan.

Oil-Immersed Transformer

Pada transformator ini terbagi atas beberapa macam, yaitu:

Natural cooling; Pendinginan ini bekerja sendiri dan hanya dibantu dengan pemasangan radiator untuk sirkulasi minyaknya.

Air blast cooling; Pendinginan ini dibantu dengan pemasangan radiator dan kipas angin (*blower*).

Forced Oil Circulation; Pendinginan ini terbagi tiga yaitu:

Natural cooling dengan sirkulasi minyak

Airblast cooling dengan sirkulasi minyak

Water cooling dengan sirkulasi minyak

Sebagai lambang pengenal dalam jenis pendinginan pada transformator dikenal empat jenis lambang pengenal yaitu:

Transformator ONAN (*Oil Natural Air Natural*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara alamiah pula.

Transformator ONAF (*Oil Natural Air Forced*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.

Transformator OFAF (*Oil Forced Air Forced*), ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara paksa atau buatan dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.

Transformator OFWF (*Oil Forced Water Forced*) ialah transformator dengan minyak sebagai pendingin belitan yang bersirkulasi secara paksa atau buatan dan air sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.

Radiator

Metode dasar untuk pendinginan transformator adalah mentransfer panas dari inti dan belitan melalui minyak isolasi. Sirkulasi minyak mentransfer panas ke radiator eksternal. Radiator meningkatkan luas permukaan pendinginan tangki transformator. Pompa dapat digunakan untuk meningkatkan aliran minyak dan meningkatkan efisiensi radiator.

2.2 MINYAK TRANSFORMATOR

Pada sebuah transformator terdapat dua komponen yang secara aktif membangkitkan energi panas yaitu besi (inti) dan tembaga (belitan). Bila energi panas itu tidak disalurkan melalui suatu sistem pendinginan, maka besi dan tembaga akan mencapai suhu tertinggi sehingga dapat merusak minyak isolasi. Oleh karena itu belitan dan inti besi direndam (*impregnant*) ke dalam minyak transformator. Minyak ini mempunyai fungsi ganda yaitu sebagai pendingin dan isolasi.

2.3 SUHU LINGKUNGAN (*AMBIENT*)

Transformator daya yang digunakan di Indonesia, baik produksi lokal maupun produksi luar negeri, kebanyakan didesain untuk digunakan pada suhu lingkungan 20°C, sesuai dengan standar IEC.

Sementara data dari Badan Meteorologi dan Geofisika menunjukkan bahwa Indonesia mempunyai suhu lingkungan rata-rata 30°C.

Standar pembebanan transformator daya menggunakan standar IEC yang telah ditetapkan menjadi standar PLN. Berdasarkan standar PLN tersebut, dijelaskan bahwa pada suhu titik-panas belitan sebesar 98°C (110°C Standar IEEE), maka transformator daya akan mengalami pemburukan isolasi yang normal. Suhu 98°C ini ditetapkan berdasarkan suhu sekitar (lingkungan) sebesar 20°C, (30°C Standar IEEE). Dengan kata lain bahwa transformator daya tidak akan mengalami kenaikan susut-umur jika suhu titik-panas (*hot-spot temperatur*) tidak melebihi nilai 98°C (110 °C untuk Standar IEEE).

Suhu lingkungan (*ambient temperature*) adalah suhu udara sekeliling transformator. Untuk transformator pasangan luar yang berpendingin udara, suhu lingkungan yang diambil adalah suhu udara dimana transformator tersebut ditempatkan. Jika suhu lingkungan berubah-ubah selama pembebanan, maka digunakan nilai suhu lingkungan efektif. Suhu lingkungan efektif (*weighted ambient temperature*) adalah suhu lingkungan yang konstan pada selang waktu tertentu yang menyebabkan penuaan yang sama dengan pengaruh suhu lingkungan yang berubah-ubah pada selang waktu tersebut (hari, bulan, tahun). Jika perubahan suhu tersebut besar, maka digunakan persamaan (4) untuk memperoleh nilai suhu lingkungan efektif, karena nilainya berbeda dengan nilai rata-rata yang dihitung secara aritmetika.

$$\Theta_A = 20 \log \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{\Theta_{an}/20} \right\} \dots\dots (4)$$

Pada Tabel 1. diperlihatkan hubungan antara suhu lingkungan efektif dengan beban yang diizinkan untuk memperoleh susut-umur normal menurut standar IEC 354.

Tabel 1. Hubungan antara beban dengan suhu lingkungan

Suhu lingkungan (°C)	0	10	20	30	40
Beban (p.u)	1.17	1.09	1.00	0.91	0.81

Sumber: Publikasi IEC 354, 1991.

2.4 MODEL TERMAL

Hukum Termal menentukan bahwa aliran fluks termal dari temperatur yang lebih tinggi ke bagian temperatur yang lebih rendah, sampai tercapai kesetimbangan termal.

Transisi suhu panas di antara bagian-bagian yang lebih tinggi dan lebih rendah dapat dicapai melalui konduksi, konveksi dan radiasi. Masing-masing mekanisme perpindahan panas bergantung

pada karakteristik bahan tertentu (kapasitas termal, dan koefisien konduktivitas, konveksi, radiasi), bahan anisotropi atau isotropi, parameter geometrik; beberapa karakteristiknya tergantung pada suhu.

Perpindahan panas dari sumber panas ke medium pendingin dapat dibagi menjadi empat bagian:

- 1). Dari bagian dalam komponen aktif (gulungan dan inti) ke permukaan luarnya yang berhubungan dengan minyak; di sini mekanisme perpindahan panas terutama disebabkan konduktivitas;
- 2). Dari permukaan luar bagian aktif, ke minyak; disini mekanisme perpindahan panas ini terutama disebabkan oleh konveksi minyak;
- 3). Dari minyak ke permukaan luar tangki; dengan mengabaikan lebar tangki (di mana perpindahan panas disebabkan konduktivitas) dapat disumsikan bahwa konveksi minyak adalah mekanisme utama perpindahan panas;
- 4). Dari bagian luar permukaan tangki ke media pendinginan luar (udara); di sini, panas yang hilang dengan konveksi udara dan radiasi.

2.5 OPERASIONAL TRANSFORMATOR

Dampak Suhu Minyak

Peningkatan beban transformator akan meningkatkan suhu minyak isolasi, sehingga beban di atas *rating* perancangan menimbulkan resiko. Batas suhu didefinisikan dalam Panduan IEEE untuk pembebanan transformator daya jenis terendam-minyak mineral, seperti pada Tabel 2.

Salah satu kerugian dalam transformator pada saat kondisi suhu-lebih adalah hilangnya umur isolasi. Umur isolasi kertas halus ini didasarkan pada suhu, kadar air, dan kadar oksigen dari waktu ke waktu. Penggunaan minyak untuk meminimalkan dampak kelembaban dan oksigen pada umur isolasi. Oleh karena itu, studi umur transformator menggunakan suhu titik-terpanas minyak memiliki hubungan yang berkaitan dengan menentukan umur transformator.

Tabel 2. Batasan suhu dan umur trafo pada suhu lingkungan 30°C

Variabel	Suhu (°C)	Keterangan
Kenaikan suhu belitan rata-rata	65	Diatas suhu lingkungan
Kenaikan suhu titik-panas	80	Diatas suhu lingkungan
Kenaikan suhu minyak-atas	65	Diatas suhu lingkungan
Batas suhu titik-panas maksimum	110	absolut
Rata-rata umur trafo normal	20.55 tahun (180000)	

	jam)	
--	------	--

Sumber: Standard IEEE, 1999.

Faktor Laju Penuaan Isolasi

Hubungan antara suhu minyak dan harapan-hidup transformator diberikan oleh faktor laju penuaan. F_{AA} , selama kenaikan 65 °C suhu transformator dan didefinisikan sebagai:

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{\Theta_H + 273} \right]} \text{perunit} \dots \dots \dots (5)$$

Faktor ini menyesuaikan harapan-hidup normal transformator selama suhu-lebih.

Harapan-Hidup Transformator Daya

Untuk transformator yang dioperasikan terus-menerus pada suhu spesifik, harapan-hidup sebenarnya adalah harapan-hidup normal dibagi dengan faktor laju penuaan F_{AA} .

Sebagai contoh, jika $\Theta_H = 140$ °C, kemudian faktor laju penuaan trafo;

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{\Theta_H + 273} \right]} = e^{\left[\frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{140 + 273} \right]} = 17.2$$

$$\text{Harapan- hidup trafo} = \frac{65,000}{17.2} = 3779 \text{ jam} \dots (6)$$

Faktor Susut-Umur (Loss of Life)

Transformator tidak akan beroperasi pada suhu-lebih konstan untuk jangka waktu yang panjang. Oleh karena itu, lebih praktis untuk menetapkan faktor kerugian umur yang mewakili dari jumlah kekuatan isolasi yang hilang selama keadaan suhu-lebih. Panduan untuk pembebanan mendefinisikan faktor susut-umur sebagai:

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA} n \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \dots \dots \dots (7)$$

Perbandingan susut-umur diskrit terhadap harapan-hidup total menyediakan perhitungan untuk persentase susut-umur. Singkatnya, metode ini terdiri dari perhitungan susut-umur pada interval waktu yang teratur, dan menentukan susut-umur rata-rata di seluruh keadaan.

$$\frac{F_{EQA}}{65,000} \times 100 = \% \text{ Loss of Life}$$

Atau $\frac{65,000 - F_{EQA}}{65,000} \times 100 = \text{Remaining life} \dots \dots (8)$

Suhu Minyak-Atas

Suhu minyak-atas adalah suhu dari minyak isolasi yang diukur di bagian atas tangki transformator. Kenaikan suhu minyak-atas sepadan dengan kuadrat arus sesuai standar IEEE, *rating* kenaikan suhu minyak-atas adalah 65 °C di atas suhu lingkungan. Panduan untuk pembebanan memberikan suhu minyak-atas sebagai,

$$\Theta_{TO} = \Theta_A + \Delta\Theta_T \dots \dots \dots (9)$$

Kenaikan suhu minyak-atas secara langsung berkaitan dengan arus beban dan karakteristik termal transformator. Panduan untuk pembebanan mendefinisikan kenaikan suhu minyak-atas di atas suhu lingkungan untuk setiap langkah perubahan beban sebagai,

$$\Delta\Theta_{TO} = (\Delta\Theta_{TO,U} - \Delta\Theta_{TO,i}) (1 - \exp^{-\frac{1}{\tau_{TO}}}) + \Delta\Theta_{TO,i} \dots (10)$$

Kenaikan awal suhu minyak-atas merupakan faktor arus beban, dan ditetapkan lebih lanjut oleh Panduan untuk Pembebanan sebagai:

$$\Delta\Theta_{TO,i} = \Delta\Theta_{TO,R} \left[\frac{(K_i^2 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \dots \dots \dots (11)$$

Persamaan ini menunjukkan hubungan antara suhu lingkungan, pembebanan transformator, dan suhu minyak-atas.

Suhu Titik-Panas (Hot-Spot Temperature)

Suhu titik-panas adalah suhu terpanas di dalam belitan transformator. Lokasi belitan terpanas adalah tergantung pada desain fisik transformator. Panduan untuk Pembebanan menetapkan batas desain untuk suhu titik-panas normal 110 °C, atau 80 °C di atas suhu lingkungan yang diasumsikan sebesar 30 °C (Standard IEEE). Untuk situasi beban-lebih darurat, Panduan untuk Pembebanan mengizinkan suhu titik-panas tidak melebihi 110 °C (Standard IEEE). Karena suhu yang berlebihan dapat menyebabkan kerugian yang tidak bisa diterima dari umur isolasi.

Suhu titik-panas tergantung pada suhu lingkungan dan meningkatnya suhu minyak-atas, seperti yang ditetapkan oleh Panduan untuk Pembebanan:

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H \dots \dots \dots (12)$$

Seperti halnya dengan suhu minyak-atas, suhu titik-panas belitan tergantung pada beban transformator dan karakteristik termal transformator. Suhu titik-panas belitan transien suhu minyak-atas diberikan oleh:

$$\Delta\Theta_H = (\Delta\Theta_{H,U} - \Delta\Theta_{H,i}) (1 - \exp^{-\frac{1}{\tau_w}}) + \Delta\Theta_{H,i} \dots (13)$$

Kenaikan awal titik-panas merupakan faktor yang tergantung pada arus beban, dan ditetapkan lebih lanjut oleh Panduan untuk pembebanan sebagai:

$$\Delta\Theta_{H,i} = \Delta\Theta_{H,R} K_i^{2m} \dots \dots \dots (14)$$

2.6 KEADAAN PEMBEBANAN

Suhu minyak-atas dan kondisi titik-panas, ketika melampaui batas desain normal 110°C, maka akan meningkatkan penuaan transformator. Panduan untuk pembebanan mendefinisikan empat keadaan operasi transformator.

Keempat keadaan ini adalah perkiraan umur pada pembebanan normal (*NLE*), beban yang direncanakan di luar *rating* rancangan (*PLBN*), pembebanan darurat jangka panjang (*LTE*), dan pembebanan darurat jangka pendek (*STE*). Untuk masing-masing kondisi, Panduan untuk pembebanan mengizinkan suhu titik-panas pada belitan, dan susut-umur (*Loss of Life*) seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Keadaan Pembebanan Transformator

	<i>NLE</i>	<i>PLBN</i>	<i>LTE</i>	<i>STE</i>
Suhu minyak-atas	105°C	110°C	110°C	110°C
Suhu titik-panas	110°C	130°C	140°C	180°C
Faktor susut-umur	1.0000	6.9842	17.1994	424.9218
Umur trafo	65,000 jam	9,307 jam	3,779 jam	153 jam

Sumber: Standard IEEE, 1999.

3. HASIL PENELITIAN / PEMBAHASAN

3.1 HASIL PERHITUNGAN SUHU

3.1.1 Perhitungan Suhu Minyak-Atas

Parameter yang diperlukan sebagai masukan untuk menghitung suhu minyak-atas Θ_{TO} , meliputi: faktor beban *K*, rasio rugi-rugi *R*, variabel suhu lingkungan Θ_A , nilai eksponen minyak *n* suatu nilai eksponen yang diturunkan secara empiris untuk menghitung variasi dari kenaikan suhu minyak-atas $\Delta\Theta_{TO}$ dengan perubahan pada beban dan dipilih berdasarkan jenis pendinginan transformator dan konstanta minyak-atas τ_{TO} .

a. Data masukan

Data masukan untuk menghitung suhu minyak atas Θ_{TO} diperlihatkan pada Tabel 4.

1. Faktor beban *K* (*per unit*).

Nilai faktor beban didefinisikan sebagai $K \equiv I/I_R$

Dalam pengujian dipilih faktor beban, $K=1$ dan $K=1.1$, ($K > 1$).

Rasio rugi-rugi *R*.

Dalam perhitungan, Nilai rasio rugi-rugi untuk transformator daya menengah dan besar berpendinginan ON.., OF.. dan OD.. adalah $R = 6$.

Suhu lingkungan (Θ_A).

Nilai suhu lingkungan dalam perhitungan, diambil dari suhu standar IEC, $\Theta_A=20$ oC dan dari hasil perhitungan suhu lingkungan efektif untuk suhu musim panas $T_k=30$ oC, suhu musim

hujan $T_h=28$ oC, diperoleh $\Theta_A=29.06$ oC, (untuk sampel $\Theta_A > 20$ oC).

Dari profil suhu Manado dan sekitarnya, berdasarkan persamaan (9) diperoleh suhu lingkungan efektif tahunan sebesar $\Theta_A=26.08$ oC. Nilai eksponen minyak (*n*).

Dalam perhitungan, Nilai eksponen *n* untuk transformator daya menengah dan besar berpendinginan untuk ON.., adalah $n = 0.9$, dan untuk OF.. dan OD.. adalah $n = 1.0$. Konstanta minyak-atas (τ_{TO}).

Dalam perhitungan, Nilai konstanta minyak-atas (τ_{TO}) untuk transformator daya menengah dan besar berpendinginan untuk ON.., adalah $\tau_{TO} = 2.5$, dan untuk OF.. dan OD.. adalah $\tau_{TO} = 1.5$.

b. Hasil perhitungan suhu minyak-atas (Θ_{TO})

Hasil perhitungan suhu minyak-atas Θ_{TO} dapat dilihat pada Tabel 4. dibawah ini.

Tabel 4. Hasil perhitungan suhu minyak-atas (Θ_{TO})

	Kenaikan suhu minyak-atas Rated beban $\Delta\Theta_{TRR}$	Kenaikan suhu minyak-atas ultimate $\Delta\Theta_{TOU}$	Kenaikan suhu minyak-atas initial $\Delta\Theta_{TOI}$	Kenaikan suhu minyak-atas $\Delta\Theta_{TO}$	Suhu minyak-atas Θ_{TO} (°C)
Faktor beban $K=1$	55.00	65.00	55.00	50.08	70.08
	55.00	65.00	55.00	45.52	65.52
	55.00	65.00	55.00	50.08	79.14
	55.00	65.00	55.00	45.52	74.58
Faktor beban $K=1.1$	55.00	65.00	63.83	63.26	83.26
	55.00	65.00	64.90	64.81	84.81
	55.00	65.00	63.83	63.26	92.32
	55.00	65.00	64.90	64.81	93.86

3.1.2 Perhitungan Suhu Titik-Panas

Suhu titik-panas Θ_H adalah suhu yang paling umum yang akan dihitung karena kesulitan praktis untuk mengukur suhu ini. Metode perhitungan suhu ini memerlukan masukan berupa faktor beban *K*, suhu minyak-atas Θ_{TO} yang diperoleh dari perhitungan atau dengan pengukuran langsung, konstanta belitan τ_w , nilai eksponen belitan *m* suatu nilai eksponen yang diturunkan secara empiris dan dipakai untuk menghitung variasi dari kenaikan suhu titik-panas $\Delta\Theta_H$ dengan perubahan pada beban dan dipilih berdasarkan pada jenis pendinginan transformator.

a. Data masukan

Data masukan untuk menghitung suhu titik-panas Θ_H yaitu:

1. Faktor beban *K* (*per unit*).

Nilai faktor beban didefinisikan sebagai $K \equiv I/I_R$.

Dalam pengujian dipilih faktor beban, $K=1$ dan $K=1.1$, ($K > 1$).

2. Suhu minyak-atas Θ_{TO}
Diperoleh dari perhitungan seperti di atas atau dengan pengukuran langsung.
3. Konstanta belitan (τ_w).
Dalam perhitungan, nilai konstanta belitan diambil $\tau_w=1$.
4. Nilai eksponen belitan (m).
Dalam perhitungan, Nilai eksponen m untuk transformator daya menengah dan besar berpendinginan untuk ON.. dan OF.., adalah $m = 1.6$, dan untuk OD.., adalah $m = 2.0$.

b. Hasil perhitungan suhu titik-panas (Θ_H)

Hasil perhitungan suhu minyak-atas Θ_H dapat dilihat pada Tabel 5. dibawah ini.

Tabel 5. Hasil perhitungan suhu titik-panas Θ_H

	Kenaikan suhu titik-panas ($^{\circ}\text{C}$)					Suhu Titik-panas Θ_H ($^{\circ}\text{C}$)
	$\Delta\Theta_{H,R}$	$\Delta\Theta_{H,A,R}$	$\Delta\Theta_{H,U}$	$\Delta\Theta_{H,i}$	$\Delta\Theta_H$	
$\Theta_A = 20^{\circ}\text{C}$	50.00	70.00	120.00	50.00	34.50	104.58
	50.00	70.00	120.00	50.00	34.50	100.02
$\Theta_A = 29^{\circ}\text{C}$	50.00	70.00	120.00	50.00	34.50	113.64
	50.00	70.00	120.00	50.00	34.50	109.08
$\Theta_A = 20^{\circ}\text{C}$	50.00	70.00	120.00	50.00	56.28	139.54
	50.00	70.00	120.00	50.00	56.28	141.09
$\Theta_A = 29^{\circ}\text{C}$	50.00	70.00	120.00	50.00	56.28	148.60
	50.00	70.00	120.00	50.00	56.28	150.14

3.2 ANALISIS KENAIKAN SUHU

3.2.1 Pengaruh suhu lingkungan Θ_A terhadap suhu minyak-atas Θ_{TO}

Dari Tabel 6. dapat dilihat bahwa hasil perhitungan suhu minyak- atas Θ_{TO} diperoleh dari hasil penjumlahan suhu lingkungan Θ_A dan kenaikan suhu minyak-atas, sehingga peningkatan suhu lingkungan Θ_A akan mengakibatkan peningkatan suhu minyak-atas Θ_{TO} .

Tabel 6. Pengaruh suhu lingkungan terhadap suhu minyak atas

	Konstanta Minyak-atas τ_{TO} ($^{\circ}\text{C}$)	Kenaikan Suhu minyak-atas $\Delta\Theta_{TO}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu minyak-atas Θ_{TO} ($^{\circ}\text{C}$)
Suhu lingkungan $\Theta_A=20^{\circ}\text{C}$	2.50	50.08	70.08
	1.50	45.52	65.52
Suhu lingkungan $\Theta_A=29^{\circ}\text{C}$	2.50	50.08	79.14
	1.50	45.52	74.58

Suhu lingkungan $\Theta_A=20^{\circ}\text{C}$	2.50	63.26	83.26
	1.50	64.81	84.81
Suhu lingkungan $\Theta_A=29^{\circ}\text{C}$	2.50	63.26	92.32
	1.50	64.81	93.86

Transformator daya kapasitas menengah dengan pemakaian metode pendinginan ON..., $\tau_{TO} = 2,5$ mengalami kenaikan suhu minyak-atas Θ_{TO} lebih besar dibandingkan dengan pemakaian metode pendinginan OF..., dan OD..., masing-masing dengan nilai $\tau_{TO} = 1,5$. (Spesifikasi IEC, 1991).

3.2.2 Pengaruh suhu lingkungan Θ_A terhadap suhu titik-panas (Θ_H)

Dari Tabel 7. dapat dilihat bahwa hasil perhitungan suhu titik-panas Θ_H diperoleh dari hasil penjumlahan suhu lingkungan Θ_A , kenaikan suhu minyak-atas, dan kenaikan suhu titik-panas. Peningkatan suhu lingkungan Θ_A akan mengakibatkan peningkatan suhu titik-panas Θ_H .

Tabel 7. Pengaruh suhu lingkungan terhadap suhu titik-panas Θ_H

	Suhu lingkungan Θ_A ($^{\circ}\text{C}$)	Kenaikan suhu minyak-atas $\Delta\Theta_{TO}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Kenaikan suhu titik-panas $\Delta\Theta_H$ ($^{\circ}\text{C}$)	Suhu Titik-panas Θ_H ($^{\circ}\text{C}$)
Faktor beban $K=1$	20.00	50.08	34.50	104.58
	20.00	45.52	34.50	100.02
	29.06	50.08	34.50	113.64
	29.06	45.52	34.50	109.08
Faktor beban $K=1.1$	20.00	63.26	56.28	139.54
	20.00	64.81	56.28	141.09
	29.06	63.26	56.28	148.60
	29.06	64.81	56.28	150.14

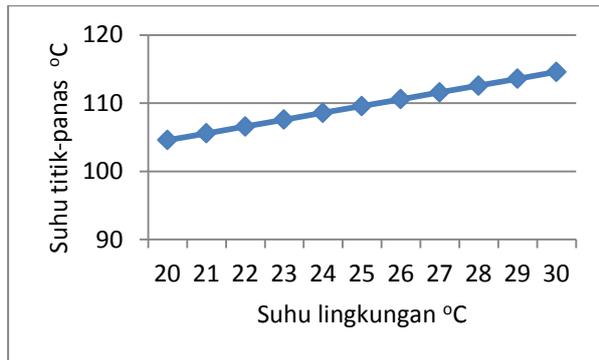
Transformator daya kapasitas menengah dengan pemakaian metode pendinginan ON..., $\tau_{TO} = 2,5$ mengalami kenaikan suhu titik-panas lebih besar dibandingkan dengan pemakaian metode pendinginan OF..., dan OD..., masing-masing dengan nilai $\tau_{TO} = 1,5$. (Spesifikasi IEC 354, 1991).

3.2.3 Hubungan kenaikan suhu lingkungan terhadap suhu titik-panas

Dari Gambar 2. terlihat bahwa pada suhu lingkungan $\Theta_A = 20^{\circ}\text{C}$, suhu titik-panas $\Theta_H = 104,58^{\circ}\text{C}$, dan pada $\Theta_A = 30^{\circ}\text{C}$, suhu titik panas $\Theta_H = 149,54^{\circ}\text{C}$.

Peningkatan suhu lingkungan Θ_A mengakibatkan peningkatan suhu titik-panas Θ_H .

Berdasarkan spesifikasi dari IEEE, batas suhu maksimum 110°C tercapai pada suhu lingkungan $\Theta_A = 25^\circ\text{C}$.

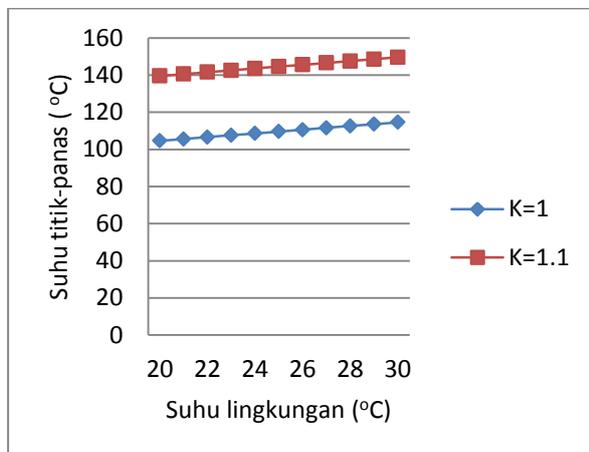


Gambar 2. Grafik hubungan kenaikan variasi suhu lingkungan terhadap suhu titik panas untuk K=1 p.u.

3.3 ANALISIS PEMBEBANAN

Dari Gambar 3., terlihat bahwa pada saat suhu lingkungan $\Theta_A = 20^\circ\text{C}$, dengan faktor beban K=1 pu diperoleh suhu titik-panas $\Theta_H = 104,58^\circ\text{C}$. Pada saat faktor beban K=1,1 pu diperoleh suhu titik-panas $\Theta_H = 139,54^\circ\text{C}$.

Peningkatan faktor beban K mengakibatkan peningkatan suhu titik-panas Θ_H .



Gambar 3. Grafik suhu titik panas dengan faktor beban K=1 pu dan K=1.1 pu

3.4 HUBUNGAN KENAIKAN SUHU TITIK-PANAS BELITAN TERHADAP UMUR TRANSFORMATOR

Hasil perhitungan kenaikan suhu titik panas belitan dan umur transformator diperlihatkan pada Tabel 8., di bawah ini.

Dari Gambar 4 grafik dapat diambil persamaan bentuk umumnya adalah sama dengan

$$e^{\left[\frac{15,000}{383} - \frac{15,000}{\Theta_H + 273} \right]}$$

dimana Θ_H adalah suhu titik-panas.

Dari Gambar 4., terlihat bahwa pada suhu titik-panas $\Theta_H = 28,37^\circ\text{C}$, umur transformator 750.000 jam atau 85,6164 tahun.

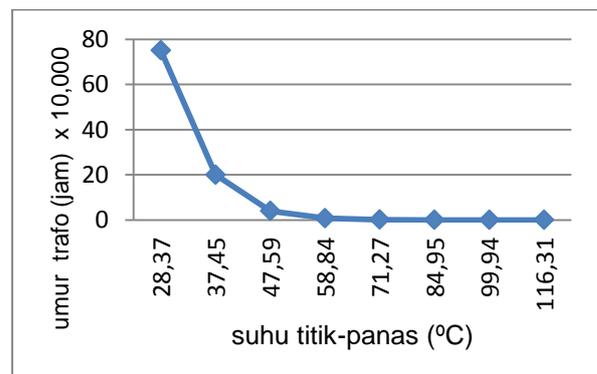
Pada saat kenaikan suhu titik-panas mencapai $\Theta_H = 37,45^\circ\text{C}$, umur transformator menjadi 200.000 jam atau 22,8311 tahun.

Pada saat kenaikan suhu titik-panas mencapai $\Theta_H = 47,59^\circ\text{C}$, umur transformator menjadi 40.000 jam atau 4,5662 tahun.

Pada saat suhu titik-panas mencapai $\Theta_H = 116,31^\circ\text{C}$, umur transformator hanya tersisa 12 jam atau 0,0014 tahun.

Tabel 8. Hasil perhitungan kenaikan suhu belitan dan umur transformator

Suhu Titik-Panas Θ_H (°C)	Umur trafo (Jam)	nilai pembagi	Umur trafo (Tahun)
28,37	750000	8760	85,6164
37,45	200000	8760	22,8311
47,59	40000	8760	4,5662
58,84	8000	8760	0,9132
71,27	1600	8760	0,1826
84,95	300	8760	0,0342
99,94	60	8760	0,0068
116,31	12	8760	0,0014



Gambar 4. Grafik hubungan suhu titik-panas terhadap umur transformator

4. PENUTUP

4.1 KESIMPULAN

- a. Hasil menunjukkan bahwa untuk faktor beban $K = 1$ pu, dengan suhu lingkungan sebesar 20°C sampai dengan 29.06°C , kenaikan suhu belitan dan suhu minyak-atas sebesar 45°C sampai dengan 50°C , tidak melebihi batas suhu yang diizinkan sebesar 65°C . Kenaikan suhu titik-panas sebesar 34.5°C tidak melebihi batas suhu yang diizinkan sebesar 80°C . Umur transformator sebesar 16-41 tahun.
- b. Pada faktor beban $K=1.1$ pu, kenaikan suhu minyak-atas dan suhu belitan berada pada nilai maksimal yang diizinkan sebesar 65°C . Suhu titik-panas sebesar 140 sampai dengan 150°C sudah melebihi suhu yang diizinkan 110°C . Sehingga umur transformator berkisar pada 0.6 tahun sampai dengan 1.5 tahun.
- c. Dengan adanya kenaikan faktor beban ($K=1$ menjadi $K=1.1$) akan meningkatkan faktor laju penuaan sehingga umur transformator berkurang.

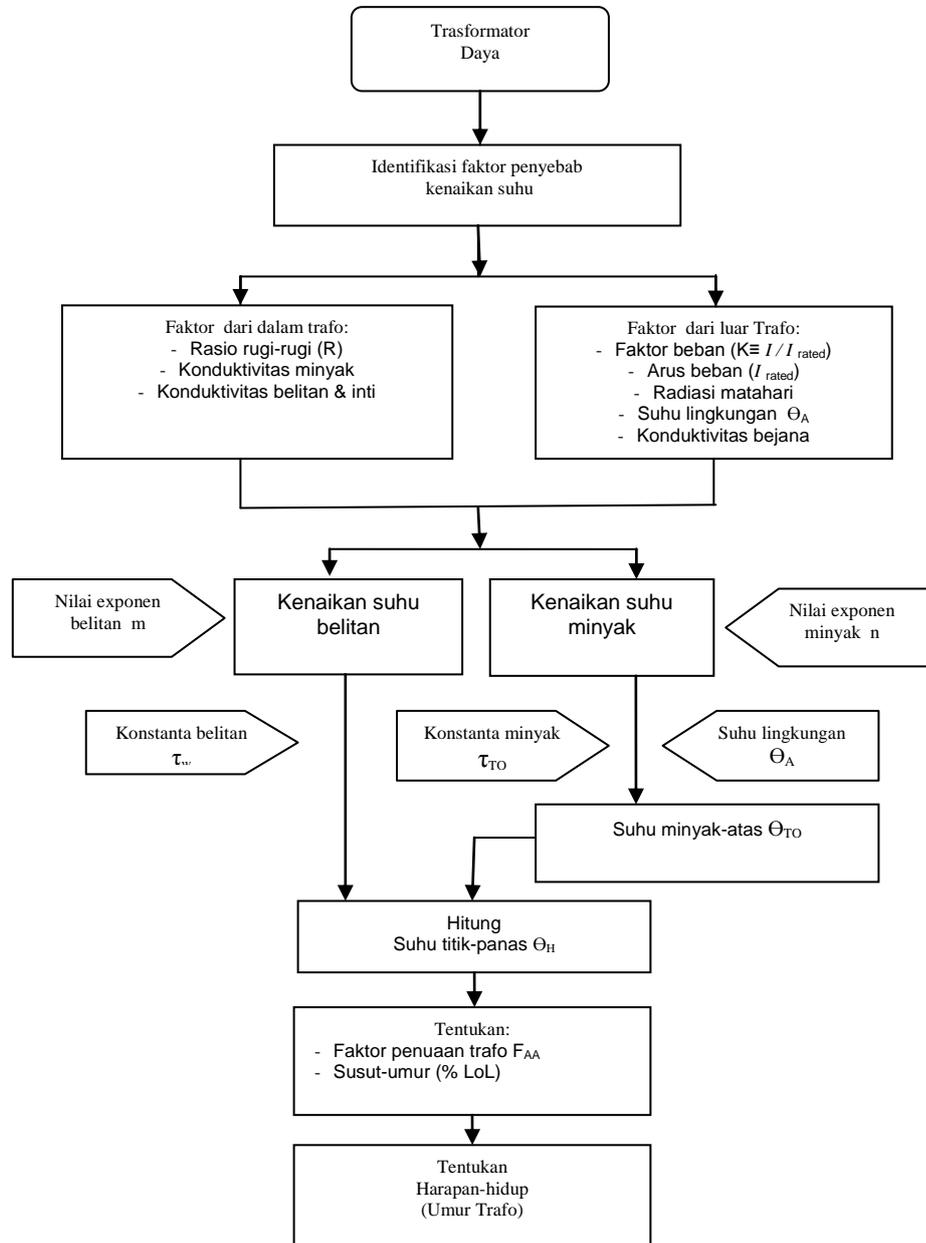
4.2 SARAN

- a. Pemantauan suhu titik-panas secara langsung dapat diterapkan dengan memasang sensor optik pada titik tersebut dan dipasang pada saat pembuatan transformator tersebut.
- b. Perlindungan transformator dengan menggunakan fungsi perlindungan berbasis termal dapat diterapkan pada sistem SCADA.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bennon S., *Thermal Analysis of Transformer Load Cycles*, Transactions on AIEE, III, Vol.77, pp.21-25, April 1958.
- [2] Brancato E.L., *Insulation Aging: An Historical and Critical Review*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.13, n04, pp.308-317, August 1978.
- [3] Dakin T.W., *Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon*, AIEE Transaction, Vol.67, pp.113-122, 1948.
- [4] G. Swift, T. S. Molinski, W. Lehn, *A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling – Part I: Theory and Equivalent Circuit*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 171 – 175.
- [5] G. Swift, T. S. Molinski, R. Bray, R. Menzies, *A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling – Part II: Field Verification*, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 16, No. 2, April 2001, pp. 171 – 180
- [6] Ilie F., Bulucea C.A., Popescu M.C., *Simulations of Oil-filled Transformer Loss-of-Life Models*, Proceedings of the Applied Computing Conference, Published by WSEAS Press, pp.195-202, Vouliagmeni Beach, Greece, September 28-30, 2009
- [7] IEC-76, Part 1, International Electrotechnical Commission, *Power Transformers Temperatur Rise*, Second Edition, 1993.
- [8] IEC-76, Part 2, International Electrotechnical Commission, *Power Transformers Temperatur Rise*, Second Edition, 1993.
- [9] IEC-354, International Electrotechnical Commission, *Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformers*, Second Edition, 1991.
- [10] (IEC, 1991) "IEC 354-1991 Loading Guide for Oil-immersed Power Transformers"
- [11] (IEC, 1993) "IEC 72-1 Power Transformers; Part 1: General", 1993-03 second edition
- [12] (IEC, 1994) "IEC 72-2 Power Transformers; Part 2: Temperature rise", 1994-04 second edition
- [13] (IEEE, 1995) "IEEE Std C57.91-1995 IEEE guide for loading mineral-oil immersed transformers"
- [14] *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Power Transformers*, IEEE Standard C57.91, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York NY, 1995.
- [15] *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers*, IEEE Standard C57.91, Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York NY, 2000.
- [16] James H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*, CRC Press LLC, US, 2004.
- [17] Lindsay J.F., *Temperatur Rise of an Oil-Filed Transformer with Varying Load*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.103, n09, pp.2530- 2535, September 1984.
- [18] L. L. Grigsby, editor, *The Electric Power Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2001.
- [19] Popescu M.C., Bulucea C.A., Perescu L., *Improved Transformeer Thermal Model*, Published by WSEAS Press, pp.87-97, Romania, October, 2009
- [20] (Susa, 2005) Susa D., Lehtonen M., and Nordman H., " *Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, Iss. 1, January 2005, pp. 197 – 204
- [21] SIPROTEC 7UT612 *Differential Protection Relay Instruction Manual*, Siemens AG, Nuremberg, Germany, 2002.

PENGARUH PEMBEBANAN TERHADAP KENAIKAN SUHU
PADA BELITAN TRANSFORMATOR DAYA JENISTERENDAM MINYAK



ANALISIS PROSES PENGAMBARAN PETA JARINGAN JALAN DARI HASIL SURVAI TRACKING JARINGAN JALAN DENGAN ALAT GPS (STUDI KASUS KOTA MANADO)

*Longdong Jefferson
Theo Kurniawan Sendow*

ABSTRAK

Pertumbuhan fisik kota Manado yang sangat cepat mempengaruhi struktur / wajah kota sehingga dalam hal penyajian informasi dalam bentuk peta, saat ini, menjadi tidak akurat.

*Peta jaringan jalan kota Manado merupakan sarana guna memperoleh gambaran data ilmiah jaringan jalan kota Manado dengan cara menggambarkan berbagai tanda-tanda dan keterangan-keterangan, sehingga mudah dibaca dan dimengerti. Perkembangan pembangunan dewasa ini membutuhkan penyediaan sarana peta yang akurat dan up to date secara cepat, untuk mengimbangi perubahan fisik kota atau daerah yang cepat. Penyediaan peta kota, dalam hal ini peta jaringan jalan kota yang up to date dan akurat meupakan salah satu pendekatan cerdas yang mendukung prinsip pembangunan yang dikutip dalam tema Seminar “ **Green Technology for sustainable development**”.*

Metoda pemetaan dengan bantuan Global Positioning System (GPS) sebagai cara alternatif penyediaan perbaikan / revisi peta, dewasa ini patut dikaji secara lebih ilmiah untuk mendapatkan rekomendasi yang dibutuhkan pada kondisi pembangunan sekarang. GPS merupakan suatu sistem penentuan posisi dengan bantuan perangkat keras yang mudah berpindah (Mobile). Untuk menentukan posisi, unit penerima GPS menerima sinyal-sinyal dari satelit GPS dan melakukan perhitungan terhadap sinyal-sinyal tersebut.

Dalam penelitian ini, metode penentuan posisi dengan GPS diujicobakan untuk melakukan revisi penggambaran struktur jaringan jalan kota di kota Manado.

Kata Kunci : Proses, GPS, Jaringan Jalan.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan fisik kota Manado sangat cepat. Hal ini dilihat dengan tumbuhnya berbagai pusat-pusat kegiatan dalam bidang ekonomi dan sosial budaya. Pertumbuhan ini dengan sendirinya merubah letak struktur kota sebagai kesatuan (entity) urban. Salah satu aspek penting yang berperan dalam perubahan ini adalah pengembangan jaringan jalan, baik yang bersifat pembuatan jalan baru ataupun peningkatan kualitas jalan. Perubahan dalam tingkat sekunder ataupun tersier dari struktur kota sebagai fungsi diferensial dari kebijakan pengembangan jalan dapat ditemui dengan hadirnya beberapa fasilitas sarana dan prasarana di kota Manado yang muncul dalam sepuluh tahun terakhir. Sebagai contoh dapat disebutkan antara lain; permukiman Citra Land Di Manado Selatan, Hotel dan permukiman GKIC di kawasan Manado Timur, serta pusat kawasan bisnis Megamall di Manado

Barat (kawasan tepi pantai). Perubahan fisik kota ini (akibat adanya prasarana jalan dan bangunan baru) membuat presentasi informasi dalam peta kota menjadi tidak akurat lagi. Dengan demikian, urgensi akan adanya peta jaringan jalan kota Manado menjadi nyata signifikansinya.

Dalam perencanaan pembuatan peta jaringan jalan, diperlukan pekerjaan survai. Untuk dapat melakukan pekerjaan survai dengan baik, maka diperlukan juga alat yang mendukung pekerjaan tersebut. Pembuatan peta dengan alat survai seperti theodolit dan waterpass membutuhkan banyak tenaga kerja, menggunakan koordinat lokal, memakan waktu yang lama dan biaya yang mahal. Untuk itu perlu diujicobakan pemetaan, dalam hal ini revisi peta eksisting, yang lebih cepat dan murah serta dapat diterima akurasi. Metode Pemetaan dengan bantuan *Global Positioning System* (GPS) merupakan cara