UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH TEMPERATUR AMBIEN TERHADAP KARAKTERISTIK TEMPERATUR HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR DAYA

SKRIPSI

ANDIGAN D. SITOMPUL

07 06 26 7502

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2011

UNIVERSITAS INDONESIA

STUDI PENGARUH TEMPERATUR AMBIEN TERHADAP KARAKTERISTIK TEMPERATUR HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR DAYA

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ANDIGAN D. SITOMPUL

07 06 26 7502

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk,
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama	**: Andigan D. Sitompul**
NPM	**: 0706267502**
Tanda Tangan	**:**
Tanggal	**: 25 Juni 2011**

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh	:	
Nama	:	Andigan D. Sitompul
NPM	:	0706267502
Program Studi	:	Teknik Elektro
Judul Skripsi	:	Studi Pengaruh Temperatur Ambien terhadap Karakteristik Temperatur Hotspot pada Transformator Daya

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bahan persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing	:	Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M K, MT
Penguji	:	Ir. I Made Ardita, MT
Penguji	:	Ir. Amien Rahardjo, MT

Ditetapkan di	:	Depok
Tanggal	:	.. Juni 2011

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan seminar yang berjudul "STUDI PENGARUH TEMPERATUR AMBIEN TERHADAP KARAKTERISTIK TEMPERATUR HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR DAYA" ini. Penulisan seminar ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dari masa perkuliahan hingga saat penyusunan seminar ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan seminar ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K,M.T, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan masukan bagi terselesaikannya seminar ini.
2. Bapak Aji Nur Widyanto S.T, M.T dan Faiz Husnayain S.T, yang telah memberikan banyak masukan dan informasi yang bermanfaat bagi penyelesaian seminar ini
3. Ayah, Ibu, Kakak, Abang dan Adik penulis yang selalu memberi dukungan moril dalam penyusunan seminar ini.
4. Teman-teman sesama bimbingan (Aulia, Daniel Wijaya, Gagah, Jonathan dan Saut Daniel) yang telah banyak bertukar pikiran dan memberi masukan bagi kemajuan seminar ini.
5. Semua pihak yang telah banyak membantu dan memberi dukungan terhadap penulisan seminar ini, khususnya teman-teman Elektro 2007.

Penulis juga meminta maaf atas segala kekurangan yang ada pada seminar ini dan menyadari bahwa penulisan seminar ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu penulis berharap adanya kritik dan saran dari pembaca demi kesempurnaan laporan ini dan semoga dapat bermanfaat bagi semuannya.

Depok, 25 Juni 2011

Penulis

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama	**: Andigan D. Sitompul**
NPM	**: 0706267502**
Program Studi	**: Teknik Elektro**
Departemen	**: Teknik Elektro**
Fakultas	**: Teknik**
Jenis Karya	**: Skripsi**

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty-Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

STUDI PENGARUH TEMPERATUR AMBIEN TERHADAP KARAKTERISTIK TEMPERATUR HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR DAYA

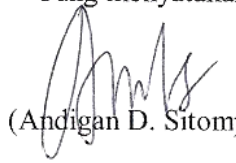
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan seminar saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 25 Juni 2010

Yang menyatakan,



(Andigan D. Sitompul)

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

ABSTRAK

Nama : Andigan D. Sitompul
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : STUDI PENGARUH TEMPERATUR AMBIEN TERHADAP KARAKTERISTIK TEMPERATUR HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR DAYA

Temperatur hotspot merupakan parameter penting dalam penentuan umur suatu transformator. Di mana hotspot ini dapat diartikan sebagai titik dimana terjadi kenaikan suhu paling tinggi pada bagian transformator. Untuk itu diperlukan upaya untuk menemukan dan menghitung hotspot pada transformator sehingga diketahui bahwa hotspot yang terjadi tidak melebihi batas kenaikan suhu yang sudah ditentukan. Ada beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kenaikan nilai hotspot pada transformator. Salah satunya adalah temperatur lingkungan (temperatur ambien), di mana berdasarkan metode IEEE, temperatur ambien ini memberikan efek pada kenaikan nilai hotspot pada transformator. Metode IEEE yang digunakan adalah metode IEEE yang dikenal dengan Clause 7. Pada skripsi ini diperoleh kesimpulan bahwa setiap kenaikan 10% temperatur ambien maka temperatur hotspot juga mengalami kenaikan rata-rata sebesar 3.58%.

Kata Kunci : transformator, hotspot, temperatur ambien, metode IEEE Clause 7

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

ABSTRACT

Name : Andigan D. Sitompul
Major : Electrical Engineering
Title : STUDY OF AMBIENT TEMPERATURE EFFECT ON THE CHARACTERISTICS OF HOTSPOT TEMPERATURE IN POWER TRANSFORMER

Hotspot temperature is an important parameter in determining the age of a transformer. These hotspots can be interpreted as points where the highest temperature rise exist in the transformer . It required effort to find and calculate the hotspot in the transformer so that the we know that hotspots that occur do not exceed limits of specified temperature rise. There are several parameters that influence the increase in value of hotspots in the transformer. One is the environment temperature (ambient temperature) which based on the IEEE method, this temperature has effect on the increase in value of hotspots in the transformer. IEEE method that used in this paper is known as Clause 7. In this thesis the conclusion is that in every 10% rising in temperature ambient, then the temperature of the hotspot will rise an average of 3.58%.

Keywords: transformer, hotspot, ambient temperature, IEEE Clause 7 method.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS ii
HALAMAN PENGESAHAN iii
UCAPAN TERIMA KASIH iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH v
ABSTRAK vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR GAMBAR x
DAFTAR TABEL xi

BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Tujuan Penelitian 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Metode Penulisan 4
1.5 Sistematika Penulisan 4

BAB II LANDASAN TEORI 5
2.1 Defenisi Transformator 5
2.2 Prinsip Kerja Transformator 6
2.3 Transformator Daya 7
2.3.1 Konstruksi transformator daya 8
2.4 Rating dan Klasifikasi Transformator Daya 16
2.5 Pendinginan 17
2.6 Perpindahan Panas 17
2.6.1 Konduksi 17
2.6.1 Konveksi 18
2.6.1 Radiasi 18

BAB III LANDASAN TEORI 19
3.1 Defenisi Hotspot 19
3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Temperatur Hotspot 21
3.3 Metode Perhitungan Hotspot 22
3.4 Diagram Alir Penelitian 25
3.4.1 Tahapan Persiapan 26
3.4.2 Alat dan Bahan 27

BAB IV ANALISIS DATA 28
4.1 Data-data yang Dibutuhkan 28
4.1.1 Data Transformator 28
4.1.2 Data Pembebanan Transformator 29

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

4.1.3 Data Pengukuran Transformator 31
4.1.4 Data Temperatur Ambien tanggal 22/09/2010-25/09/2010 32
4.2 Perhitungan Temperatur Hotspot Transformator 32
4.3 Analisis Karakteristik Hotspot transformator 38
4.3.1 Analisis Kenaikan Beban 38
4.3.2 Analisis Kenaikan Minyak Puncak 43
4.3.3 Analisis Kenaikan Temperatur Ambien 46
4.3.4 Hubungan Beban,Temperatur Ambien,Top Oil, dan Temperatur Hotspot Transformator 48
4.4 Analisis Perhitungan dengan Pengukuran 49
4.4.1 Analisis Temperatur Minyak Puncak dengan Metode Pengukuran dan Perhitungan 49
4.4.2 Analisis Temperatur Hotspot Transformator dengan Metode Pengukuran dan Perhitungan 53
4.5 Persentase Kenaikan Hotspot Transformator terhadap Perubahan Parameter Hotspot 56
4.5.1 Variasi Beban dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap 56
4.5.2 Variasi Temperatur Ambien dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap 59
4.5.3 Variasi Temperatur Minyak Puncak dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap 62
4.5.4 Variasi Tipe Pendingin Transformator dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap 64

BAB V KESIMPULAN 66
DAFTAR ACUAN xii
DAFTAR PUSTAKA xiii

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konstruksi trafo daya 7
Gambar 2.2. Inti trafo dengan kumparan lilitan 10
Gambar 2.3. Macam-macam sistem pendingin trafo 12
Gambar 2.4. Trafo daya 3 fasa , 20 MVA, 161:26.4 x 13.2 kV 16
Gambar 2.5. Nilai rating 16
Gambar 3.1. Diagram thermal transformator 19
Gambar 3.2. Diagram Alir Perhitungan Hotspot Trafo 24
Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian 24
Gambar 4.1. Grafik daya dan suhu minyak puncak (*top oil*) terhadap waktu 38
Gambar 4.2. Grafik daya dan temperatur ambien terhadap waktu. 40
Gambar 4.3. Grafik daya dan temperatur hotspot terhadap waktu. 41
Gambar 4.4. Grafik temperatur ambien dan minyak puncak terhadap waktu 44
Gambar 4.5. Grafik temperatur minyak puncak dan hotspot terhadap waktu 45
Gambar 4.6. Grafik temperatur minyak puncak dan hotspot terhadap waktu 47
Gambar 4.7. Grafik beban, temperatur ambien, minyak puncak dan hotspot terhadap waktu. 48
Gambar 4.8. Grafik perbandingan minyak pengukuran dan perhitungan terhadap waktu. 52
Gambar 4.9. Grafik perbandingan temperatur hotspot pengukuran dan perhitungan terhadap waktu. 55
Gambar 4.10. Grafik perubahan beban terhadap perubahan hotspot 58
Gambar 4.11. Grafik perubahan suhu ambien terhadap perubahan hotspot 60
Gambar 4.12. Grafik perubahan suhu minyak puncak terhadap perubahan hotspot 64
Gambar 4.13. Grafik perbandingan eksponen kelas pendingin trafo terhadap perubahan hotspot 65

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Trafo IBT 1 daerah Cibatu 28
Tabel 4.2 Data Pembebanan Trafo IBT 1 daerah Cibatu tanggal 22/09-25/09/2010. 29
Tabel 4.3 Data Pengukuran Temperatur Minyak Puncak Trafo IBT 1 daerah Cibatu ... 31
Tabel 4.4 Data Temperatur Ambien (selama 3 hari) Trafo IBT 1 daerah Cibatu 32
Tabel 4.5 Nilai Eksponen m dan n berdasarkan Kelas Pendingin Trafo 33
Tabel 4.6 Data Olahan Perhitungan Hotspot Trafo berdasarkan IEEE 35
Tabel 4.7 Data Olahan Perbandingan Minyak Puncak Pengukuran dan Perhitungan 50
Tabel 4.8Data Olahan Perbandingan Temperatur Hotspot Pengukuran dan Perhitungan 53
Tabel 4.9 Data Olahan Persentase Perbahan Beban terhadap Perubahan Hotspot 57
Tabel4.10 Data Olahan Persentase Perubahan Suhu Ambien terhadap Perubahan Hotspot 58
Tabel 4.11 Data Olahan Persentase Perubahan Suhu Minyak Puncak terhadap Perubahan Hotspot 62
Tabel 4.12 Data Olahan Persentase Perubahan Eksponen Kelas Pendingin terhadap Perubahan Hotspot 64

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penemuan transformator pada akhir abad sembilan memberikan dampak yang sangat baik dalam perkembangan transmisi dan distribusi listrik dunia. Ini dikarenakan dengan transformator, kita dapat mendistribusikan daya dengan menggunakan tegangan AC yang konstan, sehingga kita dapat menyalurkan listrik dari sumber ke beban walaupun jarak antara keduanya sangat jauh. Beda halnya sebelum ditemukannya transformator, di mana sistem kelistrikan masih menggunakan tegangan DC , sehingga jarak antara sumber dengan beban harus dekat.

Saat ini, dunia kelistrikan menyangkut transmisi dan distribusi listrik, sangat tergantung dan tidak pernah lepas dari perkembangan transformator. Transformator sekarang ini memiliki efisiensi yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan beberapa abad lalu. Hal ini dapat kita lihat dari efisiensi kerja transformator yang sangat tinggi yaitu sekitar 99,5 % dengan perbandingan *loss* (kehilangan) daya yang sangat kecil (+/- 0,5%) [1]. Di samping efisiensi yang sangat tinggi, transformator juga diharapkan memiliki *lifetime* (umur) yang sangat tinggi, terutama untuk transformator-transformator pembangkitan dan distribusi.

Di salah satu negara pembuat transformator, misalnya Amerika Serikat, sebuah transformator dinyatakan baik, jika dapat menyuplai daya dengan rating tegangan dan frekuensi tertentu tanpa melebihi temperatur internal transformator yang sudah ditentukan. Transformator-transformator ini memang didesain agar dapat bekerja berdasarkan beban yang diinginkan, tanpa melewati rating temperatur yang diinginkan, seperti kenaikan temperatur rata-rata lilitan, kenaikan temperatur hotspot lilitan, dan bagian transformator yang dilingkupi cairan (unit yang dilingkupi minyak transformator), tanpa melebihi rating temperatur yang dibuat.

Temperatur merupakan faktor yang sangat penting diperhatikan dalam kinerja transformator. Di mana, pada transformator sudah ditetapkan sebelumnya batas-batas

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

atau rating temperatur yang tidak boleh dilewati ketika sedang beroperasi. Untuk itulah, sangat penting mengetahui pentingnya dampak parameter-parameter yang dapat mempengaruhi hal ini. Parameter tersebut antara lain, suhu lingkungan, pembebanan, jenis pendingin transformator dan lain-lain. Dari beberapa parameter di atas, temperatur ambien merupakan parameter penting yang akan ditinjau pada tulisan ini karena nilai keseluruhan dari temperatur transformator adalah dengan menambahkan temperatur lingkungan (ambien) pada nilai-nilai temperatur transformator saat sedang beroperasi.

Namun, ada suatu masalah yang timbul dari hal tersebut. Pada umumnya, transformator yang didesain disesuaikan dengan keadaan lingkungan suatu negara dimana transformator itu didesain dan dibuat. Misalnya, temperatur lingkungan, kelembapan, ketinggian 1000 m di atas permukaan laut, kondisi seismik, dan total beban harmonik yang ada di lingkungan negara tersebut [1]. Inilah yang menjadi suatu permasalahan ketika suatu negara membeli transformator dari negara lain (manufaktur transformator) untuk dipakai di negaranya. Sebagai contoh Indonesia, yang hampir semua transformator daya dan transmisi dibeli dari negara lain.

Sebagai contoh, Indonesia membeli sebuah transformator daya dari Amerika. Amerika serikat memiliki keadaan lingkungan yang jelas berbeda dengan negara Indonesia, seperti adanya perbedaan musim, suhu lingkungan, kecepatan angin dan lain-lain. Hal inilah yang mengakibatkan perbedaan yang kontras antara Amerika dengan Indonesia. Di Amerika Serikat, terdapat empat musim, dan yang paling ekstrim adalah musim dingin. Pada musim dingin, temperatur ambien bisa mencapai titik terendah yaitu -20^{o} C, sedangkan titik terpanas yang mungkin dicapai adalah berkisar 40^{o}C. Sehingga ambien temperatur rata-rata adalah 20^{o}C.

Berbeda halnya dengan Indonesia. Di Indonesia tidak terdapat musim dingin, sehingga tidak ada perubahan suhu yang sangat ekstrim. Asumsi Indonesia memiliki titik terendah temperatur ambien adalah 30^{o} C, dan titik tertinggi adalah 40^{o}C. Dimana dengan demikian temperatur ambien rata-ratanya adalah 35^{o}C. Terdapat selisih yang sangat besar antara kedua negara tersebut yaitu sebesar 15^{o}C. Hal ini jelas sangat berpengaruh terhadap suhu absolut atau hotspottransformator yang

nantinya akan merusak material-material penyusun transformator yang berdampak pada terganggu efisiensi kinerja dari transformator.

Pentingnya analisis mengenai dampak temperatur ambien sudah mulai marak dibicarakan akhir-akhir ini. Di Indonesia sendiri, hal ini sangat penting dilakukan mengingat dampak temperatur ambien yang sangat besar pada transformator, terutama masalah hotspot transformator. Jika melihat data yang ada di atas, dapat kita lihat bahwa terdapat perbedaan kondisi yang signifikan antara negara tempat manufaktur dengan si pemakai, walaupun rating transformator yang digunakan adalah sama. Dengan latar belakang tersebut penulis mengangkat tema tulisan ini agar dampak atau hubungan antara parameter-parameter tersebut terutama temperatur ambient pada hotspot transformator dapat dianalisa lebih lanjut.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui dan menganalisa faktor-faktor yang berpengaruh terhadap hotspot transformator, mengkaji hubungan antara parameter-parameter hotspot dengan temperatur hotspot transformator sesuai dengan metode IEEE serta menganalisa pengaruh temperatur ambien terhadap karakteristik temperatur hotspot transformator

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

(1) Transformator yang digunakan sebagai bahan penelitian adalah transformator daya / *Interbus* transformator (IBT 1) PLN wilayah Cibatu

(2) Parameter yang dibandingkan adalah seperti temperatur ambien (suhu lingkungan), beban (daya yang digunakan), suhu minyak puncak (*top oil*), dan kelas pendingin yang digunakan transformator

(3) Temperatur ambien yang digunakan adalah temperatur rata-rata ambien Indonesia sesuai data Badan Meteorologi dan Geofisika (BMKG)

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

1.4 Metode Penulisan

Metode penulisan yang dilakukan dalam seminar ini adalah

1. Studi literatur, yaitu dengan membaca buku-buku berkaitan dengan temperatur hotspot transformator
2. Membaca jurnal-jurnal dan laporan penelitan tentang pengaruh temperatur terhadap hot-spot temperatur

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan seminar ini terdiri dari lima bab yaitu Pendahuluan, Landasan Teori, Hotspot pada Transformator, Analisa Data, dan Kesimpulan.

Bab pertama memuat latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan makalah. Bab kedua berisi dasar teori mengenai defenisi transformator, cara kerja transformator, jenis-jenis dan klasifikasi transformator, rating transformator, kelas pendinginan transformator, efisiensi dan loss transformator, serta perpindahan panas pada transformator. Bab ketiga berisikan dasar teori mengenai hotspot transformator, faktor-faktor yang mempengaruhi hotspot dan metode perhitungan hotspot transformator. Bab keempat berisi tata cara pengambilan data yang akan dilakukan dalam penelitian. Bab kelima berisi kesimpulan yang diambil dari tulisan ini.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Defenisi Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang digunakan untuk memindahkan tenaga listrik dari suatu kumparan ke kumparan lainnya dengan menggunakan induksi magnet pada frekuensi yang tetap / sama. Pada umumnya transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan lilitan dengan atau tidak adanya *core* atau inti transformator. Ketika arus AC mengalir pada lilitan konduktor pada kumparan primer maka terjadilah medan magnet bolak-balik (AC) pada konduktor. Jika diletakkan konduktor lain yaitu kumparan sekunder tepat memotong medan magnet tersebut, maka timbullah fluks pada konduktor kedua yang kemudian akan menginduksikan tegangan ke kumparan sekunder.

Pada umumnya transformator digunakan untuk mengubah tegangan listrik sesuai dengan keperluan yang dibutuhkan. Dalam sistem tenaga listrik, pemakaian transformator dapat dibagi menjadi :

a. transformator daya penaik tegangan (step-up), berguna untuk menaikkan tegangan. Biasanya digunakan untuk menaikkan tegangan yang dibangkitkan / dikeluarkan generator untuk menjadi tegangan transmisi
b. transformator daya penurun tegangan (step-down) untuk menurunkan tegangan. Biasanya digunakan pada transformator distribusi, yaitu untuk menurunkan tegangan transmisi untuk disesuaikan dengan sistem distribusi yang digunakan.
c. transformator instrumentasi, digunakan untuk mensuplai alat-alat ukur, relay-relay pengaman dan sebagainya. Transformator instrumentasi terdiri

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

dari dua jenis, yaitu transformator tegangan (potensial transformer) dan transformator arus (current transformer).

Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal (kalau bisa terus menerus tanpa berhenti). Mengingat kerja keras dari suatu transformator seperti itu maka cara pemeliharaan juga dituntut sebaik mungkin. Oleh karena itu transformator harus dipelihara dengan menggunakan sistem dan peralatan yang benar, baik dan tepat. Untuk itu regu pemeliharaan harus mengetahui bagian-bagian transformator dan bagian-bagian mana yang perlu diawasi melebihi bagian yang lainnya.

Berdasarkan tegangan operasinya dapat dibedakanmenjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformator* (IBT). Transformator dengan rating 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga transformator distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi. Sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV nya.

Transformator dapat dibagi menurut fungsi/pemakaian seperti:

1. Transformator mesin (pembangkit)
2. Tarnsformator gardu Induk.
3. Transformator distribusi

Transformator dapat dibagi menurut kapasitas dan tegangan seperti:

1. Transformator besar
2. Tarnsformator sedang
3. Transformator kecil

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Hukum utama yang berlaku dalam transformator adalah hukum induksi faraday. Menurut hukum ini suatu gaya listrik yang melalui garis lengkung yang

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

tertutup, adalah berbanding lurus dengan perubahan pada arus induksi atau flux persatuan waktu. Bila kumparan primer dari transformator dihubungkan dengan sumber listrik AC maka kumparan primer akan menghasilkan fluks magnetic yang berubah-ubah per satuan waktu dalam inti transformator. Fluks yang berubah ini akan menimbulkan tegangan induksi pada kumparan primer dan kumparan sekunder.

Bila tegangan supply V1 dan tegangan induksi pada kumparan primer dan sekunder masing-masing E1 dan E2 di mana banyak lilitan kumparan primer N1 dan kumparan sekunder N2, maka didapat hubungan sebagai berikut :

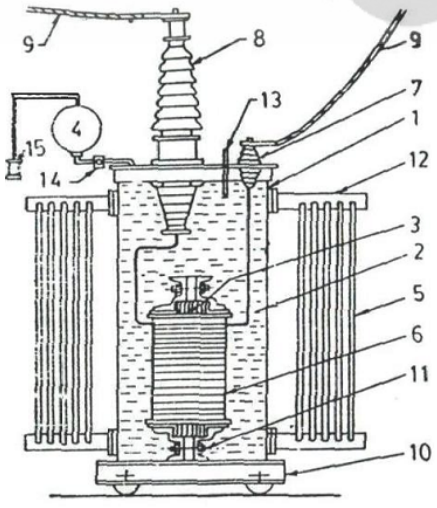
$$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{E2} = a \qquad (2.1)$$

di mana E1 / E2 disebut dengan perbandingan tegangan, sedangkan N1 / N2 disebut perbandingan lilitan.

Apabila transformator diberikan beban, maka pada kumparan sekunder mengalir arus I2, sedangkan pada kumparan primer mengalir arus I1 (arus sumber), sehingga terdapat keseimbangan antara perkalian arus dan lilitan primer sama dengan perkalian arus dengan lilitan sekunder.

2.3 Transformator Daya

Salah satu bagian penting dari sistem tenaga listrik adalah transformator daya atau power transformer.Transformator daya dapat didefinisikan sebagai sebuah transformator yang digunakan untuk memindahkan energi listrik yang terletak di berbagai bagian dari rangkaian listrik antara generator dengan rangkaian primer dari sistem distribusi.Berikut adalah gambar dari sebuah transformator daya.



Keterangan :

1. Mounting flange
2. Tangki transformator
3. Core
4. Konservator
5. Sirip Radiator (Radiator Fin)
6. Windings

Gambar 2.1 Konstruksi transformator daya [2]

7. LV Bushing
8. HV Bushing
9. Terminal connection
10. Carriage
11. Baut pada core
12. Header
13. Termometer
14. Relai Buchholz
15. Breather

Transformator daya adalah transformator yang digunakan antara generator dengan rangkaian distribusi dan biasanya memiliki rating mulai dari 500 kVA ke atas. Pada umumnya transformator digunakan pada kondisi di mana terdapat perubahan atau transisi level tegangan yang sangat tinggi. Transformator daya dapat digunakan untuk operasi step-up, yaitu pada generator (umumnya disebut dengan generator step-up-GSU) dan juga step-down, yang bisanya untuk menyuplai masukan rangkaian-rangkaian distribusi.

2.3.1 Konstruksi transformator daya

2.3.1.1 Bagian utama transformator daya

Sebuah transformator mempunyai bagian-bagian utama sebagai berikut, yaitu :

- inti transformator (core)
- kumparan-kumparan lilitan
- isolasi antara kumparan
- bushing dan
- tangki konservator

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

a. Inti transformator (Core) [1]

Inti transformator (*core*) berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparandi mana bahannya terbuat lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh *Eddy Current*.

Inti transformator dapat dibedakan menjadi dua, yaitu Air Core Transformer (Inti transformator dengan menggunakan udara) dan Iron / Steel Core Transformer (Inti besi transformator).

- *Air Core Transformer*

  Pada umumnya digunakan pada transformator dengan aplikasi daya yang kecil, di mana udara digunakan sebagai pemisah antara dua kumparan.Transformator demikian tidaklah efisien karena persentase fluks yang dihasilkan menjadi sedikit. Tegangan yang diinduksikan dari kumparan primer ke kumparan sekunder adalah

  $$E = -\frac{N\, d\varphi}{dt} \qquad (2.2)$$

  di mana N = jumlah lilitan pada kumparan

  $\frac{d\varphi}{dt}$ = perubahan fluks / waktu

  Oleh karena jumlah fluks yang memotong kumparan kedua pada *Air Core Transformer* kecil diperlukan usaha untuk menaikkan tegangan yang diinduksikan, yaitu dengan menambah lilitan yang ada. Namun karena hal ini memakan biaya besar, maka dibuatlah cara lain yaitu dengan menggantikan inti yang digunakan menggunakan besi atau baja.

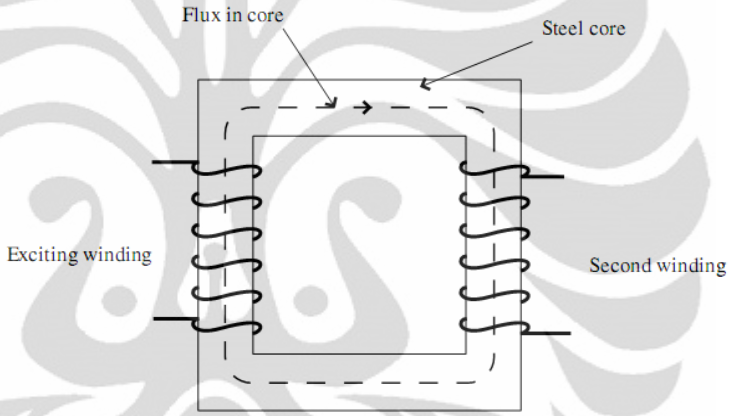
- *Iron Steel Core*

  Kemampuan inti besi untuk melewatkan fluks magnetic jauh lebih besar dibandingkan dengan udara.Kemampuan ini disebut dengan permeabilitas. Sekarang ini bahkan didapatkan perbandingan

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

hingga 1500 : 1 antara inti baja dengan inti udara. Ini berarti bahwa kemampuan inti membawa fluks magnet 1500 kali lebih banyak dibandingkan udara. Ketika dua kumparan dihubungkan dengan menggunakan inti besi, maka hampir 100% fluks dari kumparan pertama mengalir pada inti besi sehingga tegangan yang diinduksikan pada kumparan kedua akan sama apabila jumlah lilitan antara kedua kumparan adalah sama.

Gambar di bawah ini merupakan ilustrasi di mana kedua kumparan dihubungkan pada sebuah inti baja



Gambar 2.2 Inti transformator dengan kumparan lilitan [1]

$$B = \mu.H \quad (2.3)$$

$$B = \frac{\emptyset}{A} \quad (2.4)$$

$$H = \frac{I.N}{lm} \quad (2.5)$$

di mana :

B = medan magnet yang dihasilkan

H= kuat medan magnet

Ø = fluks yang mengalir

N = jumlah lilitan pada kumparan

I = besar arus yang mengalir

A = penampang inti transformator

l_m = panjang lilitan kumparan

b. Kumparan-kumparan

Kumparan transformator berfungsi sebagai saluran aliran listrik yang kemudian menghasilkan medan magnet yang akan menjadi fluks magnet yang akan dibawa oleh inti transformator menuju kumparan transformator lainnya. Normalnya, kumparan primer merupakan bagian yang menerima supply dari jaringan listrik sedangkan kumparan sekunder terhubung dengan beban transformator.

c. Isolasi Transformator

Media isolasi yang digunakan pada transformator tegangan tinggi terdiri dari isolasi kertas dan juga isolasi cair / minyak.Umumnya isolasi kertas digunakan untuk menyelimuti kondkuktor dalam kumparan transformator dicampur dengan minyak, dan kemudian *pressboard* untuk mengisolasi kumparan dari tanah.

d. Bushing

Bushing merupakan sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor tersebut dengan tangki transformator. Bushing biasanya kita lihat dalam bentuk penghubung antara kumparan transformator ke jaringan yang ada di luarnya.

e. Tangki Konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari transformator yang terendam minyak transformator berada (di tempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak transformator, tangki dilengkapi dengan konservator.

2.3.1.2 Bagian pembantu transformator daya

Bagian pembantu transformator daya dapat diklasifikasikan sebagai berikut : [3]

a. Pendingin

Pada inti besi dan kumparan-kumparan akan timbul panas akibat rugi-rugi besi dan rugi-rugi tembaga. Panas dengan kenaikan suhu yang berlebihan, akan merusak isolasi (di dalam transformator) jika tidak segera ditangani.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Media yang dipakai pada sistem pendingin dapat berupa:

1. Udara/gas
2. Minyak.
3. Air dan sebagainya

Sedangkan pengalirannya (sirkulasi) dapat dengan cara:

1. Alamiah (natural) , yaitu menggunakan aliran udara sebagai pendingin dengan cara melengkapi transformator dengan sirip-sirip agar daya tangkap aliran udara semakin baik
2. Tekanan/paksaan, yaitu media pendingin dengan pompa-pompa sirkulasi minyak, udara dan air untuk mempercepat sirkulasi udara. Cara ini disebut pendingin paksa (Forced).

Macam-macam sistem pendingin transformator berdasarkan media dan cara pengalirannya dapat diklasifikasikan sebagai berikut :

Tabel Macam-macam Sistem Pendingin

No.	Macam Sistem Pendingin *)	Media			
		Dalam Transformator		Diluar Transformator	
		Sirkulasi alamiah	Sirkulasi Paksa	Sirkulasi Alamiah	Sirkulasi Paksa
1.	AN	-	-	Udara	-
2.	AF	-	-	-	Udara
3.	ONAN	Minyak	-	Udara	-
4.	ONAF	Minyak	-	-	Udara
5.	OFAN	-	Minyak	Udara	-
6.	OFAF	-	Minyak	-	Udara
7.	OFWF	-	Minyak	-	Air
8.	ONAN/ONAF	Kombinasi 3 dan 4			
9.	ONAN/OFAN	Kombinasi 3 dan 5			
10.	ONAN/OFAF	Kombinasi 3 dan 6			
11.	ONAN/OFWF	Kombinasi 3 dan 7			

***) Menurut IEC tahun 1976**

Gambar 2.3 Macam-macam Sistem Pendingin

[2]

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

b. Tap Changer

Tap changer adalah alat perubah perbandingan lilitan transformasi untuk mendapatkan tegangan operasi sekunder yang lebih baik (diinginkan) dari tegangan jaringan / primer yang berubah-ubah. Perubahan tap transformator yang hanya dapat dilakukan pada keadaan tidak berbeban atau sering disebut dengan "Off Load Tap Changer" dan hanya dapat dioperasikan manual. Sedangkan tap changer yang dapat beroperasi untuk mengubah tap transformator dalam keadaan transformator berbeban disebut "On Load Tap Changer" dan dapat dioperasikan secara manual atau otomatis.

c. Alat pernapasan (*Dehydrating Breather*)

Udara luar yang lembab akan menurunkan nilai tegangan tembus minyak transformator, maka untuk mencegah hal tersebut, pada ujung pipa penghubung udara luar dilengkapi dengan alat pernapasan, berupa tabung berisi kristal zat hygroskopis.

d. Indikator-indikator : Thermometer, permukaan minyak

Untuk mengawasi kinerja transformator selama beroperasi, maka diperlukan adanya indikator pada transformator, yaitu sebagai berikut:

- Indikator suhu minyak
- Indikator permukaan minyak
- Indikator sistem pendingin.
- Indikator kedudukan tap.
- dan sebagainya

e. Peralatan Proteksi.

Ada beberapa peralatan proteksi yang digunakan pada transformator daya, antara lain :

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

- Rele bucholz

  Rele bucholz adalah alat/rele yang digunakan untuk mendeteksi dan mengamankan transformator terhadap gangguan di dalam transformator yang menimbulkan gas. Gas yang timbul diakibatkan oleh karena :

  1. Hubung singkat antar lilitan /dalam phasa
  2. Hubung singkat antar phasa
  3. Hubung singkat antar phasa ke tanah
  4. Busur api listrik antar laminasi
  5. Busur api listrik karena kontak yang kurang baik

- Pengaman tekanan lebih (Explosive Membrane) / Bursting Plate

  Alat ini berupa membrane yang dibuat dari kaca, plastik, tembaga atau katup berpegas, berfungsi sebagai pengaman tangki transformator terhadap kenaikan tekanan gas yang timbul di dalam tangki (yang akan pecah pada tekanan tertentu) dan kekuatannya lebih rendah dari kekuatan tangki transformator.

- Rele tekanan lebih (Sudden Pressure Relay)

  Rele ini bekerja akibat adanya kenaikan tekanan gas yang tiba-tiba sehingga rele langsung menjatuhkan PMT

- Relay Suhu

  Relay ini digunakan untuk mengamankan transformator dari kerusakan akibat adanya suhu yang berlebihan.

- Rele pengaman tangki

  Pengaman tangki transformator biasanya menggunakan relay aruslebih dengan karakteristik waktu kerja seketika (instantaneous).

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

f. Peralatan Tambahan untuk Pengaman Transformator.

- Rele Differensial (Differential Relay)

  Berfungsi mengamankan transformator dari gangguan di dalam transformator antara lain, Flash Over antara kumparan dengan kumparan atau kumparan dengan tangki atau belitan dengan belitan di dalam kumparan ataupun beda kumparan.

- Rele Arus Lebih

  Berfungsi mengamankan transformator dari arus yang melebihi rating arus yang telah diperkenankan lewat dari transformator tersebut dan arus lebih ini dapat terjadi oleh karena beban lebih atau gangguan hubung singkat.

- Rele Tangki Tanah

  Berfungsi untuk mengamankan transformator bila ada hubung singkat antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada transformator.

- Rele Hubung Tanah

  Berfungsi untuk mengamankan transformator bila terjadi gangguan satu phasa ke tanah.

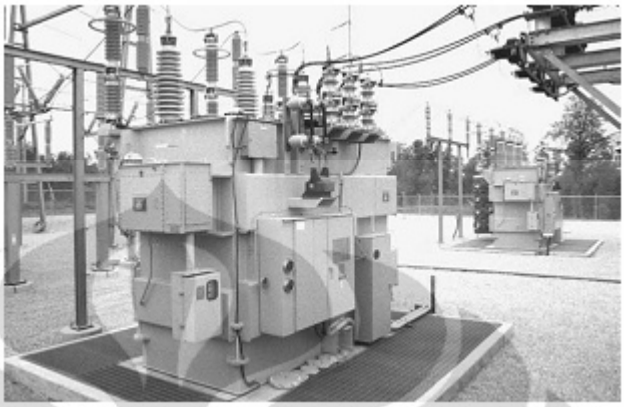
- Rele Termis

  Berfungsi untuk mencegah/mengamankan transformator dari kerusakan isolasi kumparan, akibat adanya panas lebih yang ditimbulkan akibat arus lebih.

- Arrester

  Berfungsi sebagai alat penangkal petir.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011



Gambar 2.4 transformator daya 3 fasa , 20 MVA, 161:26.4 x 13.2 kV[1]

2.4 Rating dan Klasifikasi Transformator Daya

Di Amerika, rating transformator didasarkan pada kemampuan transformator menghantarkan daya pada level tegangan tertentu dan frekuensi di bawah kondisi operasi tanpa melebih temperatur internal yang sudah dibatasi. Temperatur di mana isolasi masih diizinkan untuk mencapai kondisi masih di bawah standar operasi maksimum digunakan untuk menentukan rating output transformator yang disebut dengan rating kVA. Transformator didesain dengan batasan nilai temperatur sesuai dengan permintaan beban, rata-rata kenaikan temperatur lilitan, *hotspot* kenaikan temperatur lilitan, dan temperatur cairan / minyak atas (top). Untuk memperoleh nilak absolut temperatur dari nilai-nilai di atas, maka kita harus menambahkan nilai temperatur lingkungan (*ambient*).

Average winding temperature rise	65°C[a]
Hot spot temperature rise	80°C
Top liquid temperature rise	65°C

[a]The base rating is frequently specified and tested as a 55°C rise.

Gambar 2.5 Nilai rating [1]

Normalnya, ekspektasi dari umur transformator daya adalah sekitar 30 tahun ketika beroperasi dengan rating yang sudah ditentukan. Namun dalam beberapa

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

kondisi tertentu, kemungkinan terjadi overload dan operasi melebihi rating yang ada, sehingga menyebabkan terjadinya penurunan umur transformator.

Berdasarkan kemampuan dayanya, transformator daya pada umumnya dapat dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu [1]:

- Transformator daya kecil : 500 – 7500 kVA
- Transformator daya sedang : 7500 – 100 MVA
- Transformator daya besa : di atas 100 MVA

2.5 Pendinginan

Karena tidak adanya transformator yang benar-benar ideal, maka ada sejumlah energi yang hilang yang diubah menjadi panas dalam proses transfer energy pada transformator. Untuk itu, diperlukan metode untuk menghilangkan atau meminimalisasi panas ini, yang tergantung pada aplikasi transformator, besarnya unit transformator, dan jumlah panas yang harus didisipasi.

Lilitan dan inti transformator pada kumparan primer merupakan sumber utama dari panas transformator. Oleh karena itu sangat diperlukan untuk memiliki saluran pendinginan yang tepat dan berdekatan dengan sumber panas sehingga aliran pendinginan dapat menghilangkan panas transformator secara efektif.

2.6 Perpindahan Panas

2.6.1 Konduksi

Konduksi adalah proses transport panas dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah dalam satu medium (padat, cair atau gas), atau antara medium – medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung.

Pada transformator daya, perpindahan panas secara konduksi terjadi ketika panas mengalir di sekitar winding, dan juga inti transformator. Pada bagian kumparan / *winding*, panas ini menyebabkan panas pada isolasi minyak transformator yang berfungsi sebagai pendingin. Jika panas ini melebihi kapasitas yang dapat diterima minyak transformator, maka minyak isolasi akan mengalami degradasi sehingga kinerja minyak sebagai isolasi akan berkurang atau terjadi kegagalan isolasi.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Sedangkan pada bagian inti transformator, panas dapat mengalir ke bagian isolasi dari kumparan / *winding* transformator. Jika panas ini melebihi kapasitas dari isolasi kumparan tersebut, maka kemampuan isolasi akan berkurang atau mengalami kegagalan / *breakdown*.

2.6.2 Konveksi

Pada perpindahan kalor secara konveksi, energi kalor berpindah dengan perantaraan aliran fluida. Oleh karena pengaliran fluida melibatkan pengangkutan massa, maka selama pengaliran fluida bersentuhan dengan permukaan bahan yang panas, maka suhu fluida akan naik. Gerakan fluida melibatkan kecepatan yang seterusnya akan menghasilkan aliran momentum. Jadi, massa fluida yang mempunyai energi termal yang lebih tinggi akan mempunyai momentum yang lebih tinggi.

Pada transformator daya, aliran panas ini terjadi di sekitar minyak isolasi transformator. Aliran panas yang timbul diisolasi minyak transformator akan mengalir pada bagian kumparan transformator yang dilalui. Di samping itu panas dari isolasi minyak transformator ini juga akan mengalir ke bagian inti transformator. Hal ini akan menimbulkan aksi dan reaksi yang akan memberikan aliran panas satu sama lain. Jika panas ini melebihi batas yang ditentukan, maka panas ini dapat merusak isolasi yang digunakan, baik isolasi minyak maupun isolasi pada kumparan transformator.

2.6.3 Radiasi

Pada hakekatnya proses perpindahan kalor radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet. Pada transformator daya, radiasi memiliki pengaruh yang besar terhadap kinerja transformator. Hal ini disebabkan oleh adanya kenaikan suhu transformator jika suhu lingkungan luar yang teradiasi ke bagian transformator semakin besar. Inilah salah satu penyebab kenaikan temperatur ambien pada transformator daya. Semakin tinggi temperatur ambien, maka semakin besar juga kenaikan suhu pada transformator.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

BAB 3
HOTSPOT PADA TRANSFORMATOR

3.1 Defenisi Hotspot

Temperatur hotspot (θ_H) merupakan parameter temperatur yang digunakan untuk menentukan kemampuan thermal dari sebuah transformator. Di mana temperatur ini merupakan batas kenaikan temperatur yang diizinkan pada transformator daya yang juga digunakan untuk menentukan umur isolasi yang digunakan transformator.

Pada umumnya lokasi hotspot berada di kumparan dan inti transformator. Pada kumparan, biasanya berada di dekat puncak kumparan tegangan tinggi atau rendah. Hal ini disebabkan oleh karena daerah-daerah ini memiliki *eddy losses* yang tinggi karena flux bocor senantiasa berputar secara radial di ujung kumparan. Sedangkan pada bagian inti transformator.temperatur hotspot terletak pada bagian tengah hubungan T.

Kenaikan temperatur dapat diasumsikan dengan diagram thermal sederhana seperti ditunjukkan gambar 3.1. Gambar ini dapat dipahami karena merupakan diagram penyederhanaan dari distribusi yang lebih rumit. Minyak pada top oil adalah campuran sebagian dari minyak yang bersirkukasi pada sepanjang kumparan. Tetapi perbedaan ini tidak dipertimbangkan dengan cukup signifikan atau dapat diabaikan untuk mempermudah perhitungan.

Metode ini disederhanakan sebagai asumsi yang telah dibuat sebagai berikut [6]:

a) Temperatur minyak bertambah secara linear sesuai dengan temperatur kumparan

b) Kenaikkan temperatur rata-rata minyak adalah sama untuk semua kumparan dari kolom yang sama.

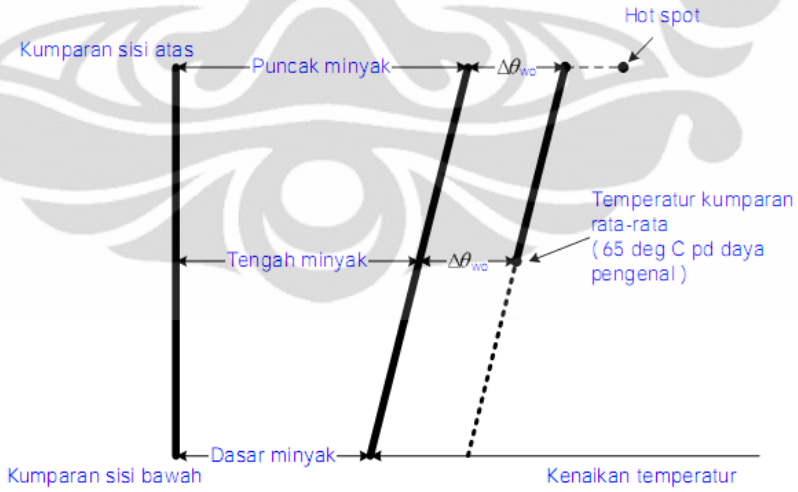
Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

c) Perbedaan temperatur antara minyak pada puncak kumparan dan minyak yang berada di dasar kumparan adalah sama untuk semua bagian kumparan.

d) Kenaikkan temperatur rata-rata dari tembaga pada setiap posisi di atas kumparan meningkat secara linear sejalan kenaikkan temperatur minyak yang mempunyai selisih kostan Λwo antara dua garis lurus di mana Λwo adalah selisih antara kenaikkan temperatur rata-rata tahanan dan kenaikkan temperatur rata-rata minyak.

e) Kenaikkan temperatur rata-rata puncak kumparan adalah kenaikkan temperatur rata-rata minyak ditambah Λwo.

f) Kenaikkan temperatur hot spot adalah lebih tinggi dibanding kenaikkan temperatur rata-rata puncak kumparan. Untuk menghitung perbedaan antara kedua kenaikkan temperatur ini, nilai Λwo diasumsikan 0,1 untuk sirkulasi minyak secara alami. Sehingga kenaikkan temperatur hotspot adalah sepadan dengan kenaikkan temperatur top oil ditambah 1.1 Λwo.



Gambar 3.1 Diagram Termal Transformator [6]

Berdasarkan standar IEEE,1994, suhu lingkungan rata-rata udara yang berhubungan dengan peralatan pendingin yang diizinkan adalah sekitar 30 ^{o}C dan

maksimum tidak melebihi 40 ^{o}C. Sebagai contoh, dalam satu hari, suhu lingkungan tertinggi adalah 35^{o}C dan suhu paling rendah adalah 25^{o}C, sehingga suhu rata-rata lingkungan menjadi 30^{o}C. Di mana dengan kondisi ini, maka kenaikan suhu rata-rata pada kumparan seharusnya tidak melebihi 65 ^{o} C dengan beban yang tetap.

3.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Temperatur Hotspot

Ada beberapa parameter penting yang menyebabkan terjadinya temperatur hotspot, yaitu :

1. Temperatur ambien / lingkungan

Salah satu faktor yang sangat penting dalam penentuan temperatur hotspot adalah temperatur ambien. Hal ini disebabkan karena temperatur ambien berhubungan langsung dalam memberi penambahan temperatur pada transformator. Selain menjadi parameter yang penting, temperatur ambien juga menjadi masalah utama yang harus diperhatikan.

Pada umumnya transformator daya dibuat berdasarkan kondisi lingkungan di mana transformator itu dibuat. Hal ini menjadi masalah ketika transformator tersebut digunakan di negara lain. Karena dengan demikian terdapat perbedaan antara suhu lingkungan negara produsen dengan konsumen. Untuk itulah diperlukan usaha untuk menentukan nilai temperatur hotspot transformator supaya nilai tersebut dapat disesuaikan dengan batas spesifikasi yang sudah ditentukan.

2. Beban Transformator

Beban transformator merupakan daya yang dipikul transformator untuk disalurkan ke pemakai. Sehingga semakin besar beban yang dipakai oleh konsumen listrik, maka semakin daya pula yang dipikul transformator. Dengan bertambahnya beban / daya ini, maka arus yang melewati kumparan-kumparan pada transformator akan bertambah. Dengan demikian rugi-rugi pada transformator pun bertambah sehingga panas yang ditimbulkan akibat rugi-rugi ini juga semakin besar. Hal inilah

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

yang menyebabkan bahwa beban juga berpengaruh terhadap kenaikan temperatur hotspot transformator.

3. Temperatur minyak puncak

Temperatur minyak puncak terjadi saat transformator memikul beban penuh dan saat maksimum temperatur ambien rata-rata tercapai. Hal ini menyebabkan bahwa pada umumnya temperatur hotspot dapat dilihat saat beban penuh dan juga 105% dari rating tegangan. Sehingga perlu diketahui bahwa walaupun rating tegangan mencapai 110 % dari tegangan yang dihasilkan, tetapi tidak ada beban yang dipikul transformator, maka temperatur minyak puncak akan jauh lebih rendah dibandingkan dengan rating tegangan 105% dan beban penuh [5].

4. Temperatur gradient hotspot

Merupakan perubahan temperatur sesuai dengan waktu dan pembebanan yang terjadi. Temperatur gradient hotspot akan semakin besar jika perubahan beban juga semakin besar dan demikian juga sebaliknya.

3.3 Metode Perhitungan Hotspot

Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung temperatur hotspot sebuah transformator. Salah satu metode yang umum digunakan adalah dengan menggunakan metode pada *IEEE loading guide* yang dikenal dengan istilah Clause 7. Metode penghitungan dengan menggunakan standar IEEE ini dapat digunakan untuk menghitung hotspot pada transformator yang diisi dengan minyak dan transformator dengan rating beberapa MVA. Temperatur lingkungan (ambien) diasumsikan konstan dan semua temperatur adalah dalam ^{0}C.

Di bawah ini adalah rumus-rumus yang digunakan untuk menghitung hotspot dari sebuah transformator daya.

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \quad (3.1)$$

Untuk menghitung θ_{TO} digunakan persamaan berikut :

$$\theta_{TO} = \theta_A + \Delta\theta_{TO} \quad (3.2)$$

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Jika terdapat perubahan beban, maka Kenaikan temperatur top-oil setelah terjadinya perubahan beban step tersebut pada suatu waktu tertentu yang diberikan sebagai fungsi eksponensial yang mengandung konstanta waktu minyak adalah

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,J})\,(1 - e^{-t/\tau TO}) + \Delta\theta_{TO,J} \quad (3.3)$$

$$\Delta\theta_{TO,J} = \Delta\theta_{TO,R}\left(\frac{K_i^2 R+1}{R+1}\right)^n \quad (3.4)$$

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R}\left(\frac{K_u^2 R+1}{R+1}\right)^n \quad (3.5)$$

Temperatur gradient hotspot lilitan sangat tergantung pada beban dan waktu pembebanan, sehingga :

$$\Delta\theta_{H} = (\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{H,J})\,(1 - e^{-t/\tau W}) + \Delta\theta_{H,J} \quad (3.6)$$

$$\Delta\theta_{H,J} = \Delta\theta_{H,R} \text{ x } K_i^{2m}$$

- Untuk OA

$$C = 0{,}06 \text{ x } W_{CC} + 0{,}04 \text{ x } W_{TF} + 1{,}33 \text{ x GO Wh/}^0\text{C} \quad (3.7)$$

- Untuk FOA

$$C = 0{,}06 \text{ x } W_{CC} + 0{,}04 \text{ x } W_{TF} + 1{,}93 \text{ x GO Wh/}^0\text{C} \quad (3.8)$$

$$\tau_{TO,R} = C \times \frac{\Delta\theta_{TO,R}}{P_{T,R}} \quad (3.9)$$

Untuk menghitung τ_{TO}

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \times \frac{\Delta\theta_{TO,U}/\Delta\theta_{TO,R} - \Delta\theta_{TO,I}/\Delta\theta_{TO,R}}{(\Delta\theta_{TO,U}/\Delta\theta_{TO,R})^{1/n} - (\Delta\theta_{TO,I}/\Delta\theta_{TO,R})^{1/n}} \quad (3.10)$$

Keterangan simbol :

θ_A = temperatur ambien

$\Delta\theta_{TO}$ = gradient temperatur dari temperatur puncak minyak (melebihi temperatur ambien)

$\Delta\theta_H$ = gradient temperatur dari hotspot (melebihi temperatur minyak puncak)

$\Delta\theta_{TO,U}$ = temperatur gradient minyak puncak steady state

$\Delta\theta_{TO,J}$ = temperatur gradien minyak puncak mula-mula

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

t = durasi perubahan beban , jam

τ_{TO} = waktu konstan minyak , jam

R = perbandingan loss beban pada dari keadaan rated load hingga no load sesuai dengan tes

K_t = perbandingan beban mula-mula dengan rating beban

$\Delta\theta_{TO,R}$ = gradient temperatur minyak puncak pada rating beban berdasarkan tes

n = nilai eksponen yang bergantung pada kelas pendinginan transformator yang digunakan, di mana nilai n untuk berbagai kelas pendinginan adalah sebagai berikut, yaitu :

n = 0,8 untuk OA

n = 0,9 untuk FA dan FOA

n = 1 untuk FOA dan FOW

K_v = perbandingan antara load dengan rated load

di mana

$\Delta\theta_{H,U}$ = temperatur gradient hotspot dalm kondisi steady state

$\Delta\theta_{H,J}$ = temperatur gradient hotspot mula-mula

t = lama perubahan beban , jam

τ_W = konstanta waktu lilian , jam

$\Delta\theta_{H,R}$ = temperatur gradient hotspot pada rating beban berdasarkan tes

m = nilai eksponen yang bergantung pada kelas pendinginan transformator yang digunakan, di mana nilai m untuk berbagai kelas pendinginan adalah sebagai berikut, yaitu :

m = 0,8 untuk OA

m = 0,9 untuk FA dan FOA

m = 1 untuk FOA dan FOW

C = kapasitas termal transformator

W_{CC} = berat inti dan kumparan transformator , kg

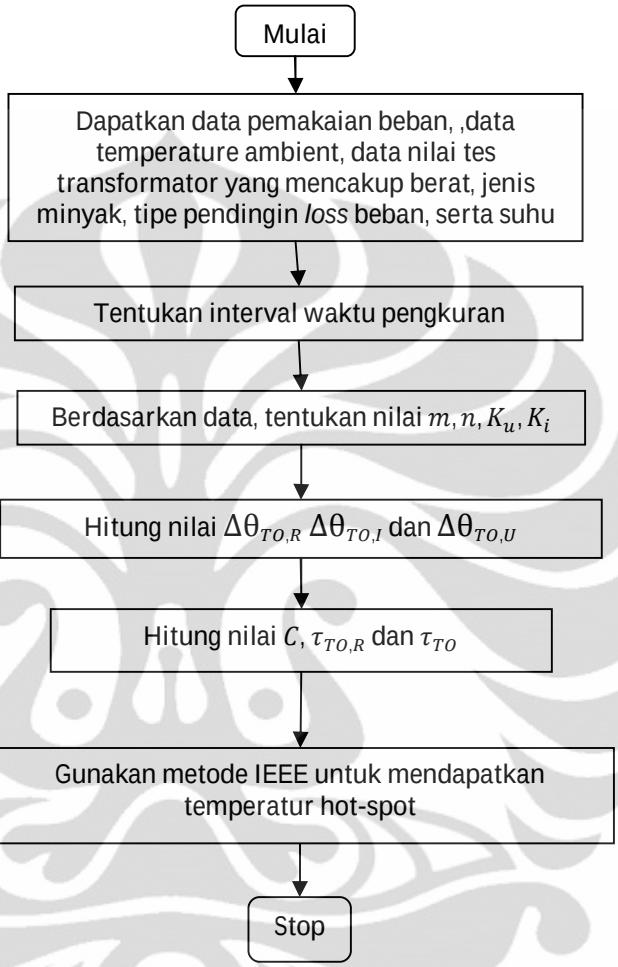
W_{TF} = berat tangki dan fitting , kg

GO = jumlah galon minyak yang digunakan sebagai pendingin, kg

$P_{T,R}$ = total loss beban pada kondisi rate load tes

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Untuk mempermudah perhitungan dapat digunakan diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Hotspot Transformator

3.4 Diagram Alir Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini, tahapan-tahapan yang dilakukan secara berurut disusun secara sistematis dengan tujuan mendapatkan keterhubungan antara data dan informasi yang diperoleh dengan hasil yang ingin didapat, yaitu hubungan antara daya yang dikonsumsi dengan kondisi suhu sekitarnya. Secara garis besar diagram alir penelitian dapat digambarkan seperti berikut:

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur, yaitu pembelajaran melalui jurnal-jurnal lokal dan internasional yang memiliki studi kasus yang sejenis, maupun melalui internet dan buku-buku yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam melakukan penelitian

Tahap persiapan merupakan proses mencari sumber-sumber informasi data yang sekiranya dapat bermanfaat untuk proses penelitian selanjutnya. Informasi yang didapat merupakan data beban listrik PLN dan data temperatur BMKG.

Selanjutnya informasi yang diperoleh diolah sesuai dengan metode yang digunakan, yaitu perhitungan dengan metode IEEE, untuk selanjutnya dilakukan analisis data dan dihubungkan hasil perhitungan tersebut dengan pengaruh suhu dari setiap titik model perhitungan yang dibentuk.

3.4.1 Tahapan Persiapan

Tahapan persiapan merupakan proses pengumpulan data dan informasi yang dibutuhkan dalam proses penelitian ini. Tahapan persiapan terdiri atas beberapa kegiatan, yaitu:

i. Penentuan Daerah Sampel

Dalam pencarian informasi data diperlukan suatu daerah yang dapat dijadikan sampel. Dalam penelitian ini diambil 3 sampel daerah yang dilihat

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

berdasarkan GITET, yaitu daerah Cawang dan sekitarnya, Cibatu dan sekitarnya, serta Cibinong dan sekitarnya. Daerah – daerah ini yang dijadikan acuan dalam pengambilan informasi beban listrik, suhu, dan survey ke mesyarakat umum di daerah tersebut.

ii. Permintaan data beban listrik PLN

Data beban listrik yang digunakan merupakan beban listrik yang berasal dari GITET Cibatu,. Data ini diperoleh melalui historis data yang dimiliki PLN P3B.

iii. Permintaan data suhu BMKG

Data Temperatur yang digunakan merupakan data BMKG untuk daerah acuan yang sama, Cawang, Cibatu, dan Cibinong. Data suhu ini nantinya akan dihubungkan dengan data beban listrik PLN sebelumnya.

3.4.2 Alat dan Bahan

Untuk melakukan penelitian ini dibutuhkan beberapa hal penting, yaitu:

- Data beban listrik PLN untuk daerah Cibatu selama 3 hari
- Data pengukuran top oil transformator IBT Cibatu
- Data tes manufaktur transformator
- Data suhu BMKG untuk daerah yang sama

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

BAB 4

ANALISIS DATA

4.1 Data-data yang Dibutuhkan

Untuk dapat melakukan perhitungan hotspot suhu, maka diperlukan data-data sebagai berikut :

4.1.1 Data Transformator

Tabel 4.1 Data Transformator IBT 1 daerah Cibatu

Parameter	Nilai
Transformator 3 fasa	500/150 KV
Rating Beban	149.99 MVA
$V_{line\text{-}line}$	150 KV
$I_{sekunder}$	1718 A
Volume Minyak	13043 Galons
Jenis Minyak	Diala B
Berat Inti dan Kumparan transformator	253969.92lbs
Berat tangki transformator	30423.48 lbs
C (Kapasitas termal transformator)	33802.33 lbs
Minyak pendingin transformator	Diala B
$P_{T,R}$ (Total *loss* beban)	538000
R	4.29
$\Delta\theta_{TO,R}$	53
$\Delta\theta_{H/A,R}$	69.5
τ_{TO}	3.33

4.1.2 Data Pembebanan Transformator

Data di bawah merupakan data pembebanan transformator selama 3 hari

Tabel 4.2 Data Pembebanan Transformator IBT 1 daerah Cibatu tanggal 22/09/2010-25/09/2010.

Pukul	kV	Amp	MVA	Pukul	kV	Amp	MVA	Pukul	kV	Amp	MVA
0:00	134	1298	100	**0:00**	142	1353	110	**0:00**	141	1383	112
1:00	136	1288	101	**1:00**	142	1327	109	**1:00**	141	1347	110
2:00	138	1279	102	**2:00**	143	1302	107	**2:00**	142	1310	108
3:00	141	1269	103	**3:00**	144	1276	106	**3:00**	143	1273	105
4:00	143	1260	104	**4:00**	144	1251	104	**4:00**	144	1237	103
5:00	145	1250	105	**5:00**	145	1225	103	**5:00**	145	1200	100
6:00	145	1270	106	**6:00**	146	1248	105	**6:00**	146	1185	100
7:00	145	1290	108	**7:00**	146	1270	107	**7:00**	146	1170	99
8:00	141	1380	112	**8:00**	143	1370	113	**8:00**	143	1290	106
9:00	139	1500	120	**9:00**	139	1470	118	**9:00**	139	1410	113
10:00	139	1569	126	**10:00**	138	1500	120	**10:00**	139	1380	110
11:00	139	1637	131	**11:00**	137	1530	121	**11:00**	138	1350	108
12:00	138	1622	130	**12:00**	139	1445	116	**12:00**	139	1360	109
13:00	138	1606	128	**13:00**	141	1360	111	**13:00**	140	1370	111
14:00	137	1591	126	**14:00**	139	1470	118	**14:00**	156	1335	120
15:00	137	1575	124	**15:00**	136	1580	124	**15:00**	171	1300	128
16:00	136	1560	122	**16:00**	136	1555	122	**16:00**	164	1328	126
17:00	137	1533	121	**17:00**	136	1530	120	**17:00**	158	1355	123
18:00	137	1507	119	**18:00**	136	1530	120	**18:00**	151	1383	120
19:00	138	1480	118	**19:00**	137	1530	121	**19:00**	144	1410	117
20:00	124	1332	96	**20:00**	137	1530	121	**20:00**	144	1395	116
21:00	110	1184	75	**21:00**	138	1493	119	**21:00**	144	1380	115
22:00	97	1036	58	**22:00**	139	1457	117	**22:00**	146	1350	114
23:00	83	888	42	**23:00**	140	1420	115	**23:00**	148	1320	113

4.1.3 Data Pengukuran Transformator

Di bawah ini merupakan data pengukuran minyak puncak transformator IBT 1 Cibatu tanggal 22/09/2010-25/09/2010. Walaupun demikian data ini merupakan hasil pengukuran yang sudah merupakan data literatur PLN.

Tabel 4.3 Data Pengukuran Temperatur Minyak Puncak IBT 1 daerah Cibatu

Data Hasil Pengukuran Temperatur Minyak Puncak IBT1							
HARI I							
Waktu	5:23	7:17	8:23	9:37	11:20	16:53	19:43
Ambien Temp	23.9	27.4	29.2	31.4	34.2	24.5	24.8
Humidity	82.9	82.2	74.9	67.7	64.3	92.8	90.5
Fasa R IBT	5:39	7:32	8:46	9:53	11:23	17:07	19:55
Temp Top Oil	65	65	67	71	76	70	71
Fasa S IBT	5:36	7:29	8:38	9:48	11:31	17:05	19:53
Temp Top Oil	64	64	66	69	75	69	70
Fasa T IBT	5:34	7:27	8:36	9:48	11:29	17:03	19:51
Temp Top Oil	63	63	65	67	74	68	69
HARI II							
Waktu	5:32	7:11	9:25	11:09	13:15	15:25	17:10
Ambien Temp	23.8	25.6	28.4	31.0	33.2	30.0	25.4
Humidity	87.8	91.5	86.6	77.2	74.7	73.5	92.5
Fasa R IBT	5:47	7:25	9:45	11:23	13:28	15:46	17:25
Temp Top Oil	64	64	67	71	72	75	72
Fasa S IBT	5:45	7:23	9:38	11:21	13:27	15:44	17:23
Temp Top Oil	63	63	66	71	72	74	72
Fasa T IBT	5:43	7:21	9:36	11:19	13:25	15:42	17:21
Temp Top Oil	62	62	66	71	71	73	70
HARI III							
Waktu	5:40	7:21	9:08	11:16	13:24	15:12	19:26
Ambien Temp	24.3	25.6	29.2	32.0	31.7	28.0	26.1
Humidity	95.5	91.8	84.4	73.0	72.6	75.4	85.4
Fasa R IBT	5:53	7:38	9:22	11:30	13:36	15:26	19:31
Temp Top Oil	64	64	66	70	71	71	69
Fasa S IBT	5:52	7:36	9:20	11:28	13:35	15:24	19:37
Temp Top Oil	64	64	66	69	71	70	68
Fasa T IBT	5:30	7:31	9:18	11:26	13:34	15:22	19:35
Temp Top Oil	63	63	65	69	69	69	67

4.1.4 Data Temperatur Ambien tanggal 22/09/2010-25/09/2010

Tabel 4.4 Data Temperatur Ambien (selama 3 hari) IBT 1 daerah Cibatu

Pukul	θA	Pukul	θA	Pukul	θA
0:00	24.79	0:00	24.30	0:00	24.61
1:00	24.61	1:00	24.20	1:00	24.56
2:00	24.43	2:00	24.10	2:00	24.50
3:00	24.26	3:00	24.00	3:00	24.44
4:00	24.08	4:00	23.90	4:00	24.39
5:00	23.90	5:00	23.80	5:00	24.33
6:00	25.65	6:00	24.70	6:00	24.98
7:00	27.40	7:00	25.60	7:00	25.63
8:00	29.16	8:00	27.00	8:00	27.40
9:00	31.40	9:00	28.40	9:00	29.17
10:00	32.78	10:00	29.72	10:00	30.57
11:00	34.17	11:00	31.03	11:00	31.97
12:00	32.24	12:00	32.13	12:00	31.83
13:00	30.31	13:00	33.23	13:00	31.70
14:00	28.39	14:00	31.60	14:00	29.85
15:00	26.46	15:00	29.97	15:00	28.00
16:00	24.53	16:00	27.67	16:00	27.52
17:00	24.62	17:00	25.37	17:00	27.03
18:00	24.71	18:00	25.19	18:00	26.55
19:00	24.80	19:00	25.01	19:00	26.07
20:00	24.70	20:00	24.83	20:00	25.67
21:00	24.60	21:00	24.78	21:00	25.27
22:00	24.50	22:00	24.72	22:00	24.77
23:00	24.40	23:00	24.67	23:00	24.27

4.2. Perhitungan Temperatur Hotspot Transformator

Dengan menggunakan data-data di atas, maka dapat dilakukan perhitungan suhu hotspot transformator sebagai berikut.

Rasio *no load loss* dengan *full load loss* adalah :

$$R = \frac{420000\ W}{98000W} = 4{,}29$$

Perbandingan beban mula-mula dengan rating beban transformator berdasarkan test manufaktur transformator adalah :

$K_i = \frac{100\ MVA}{149\ MVA} = 0{,}67$

Temperatur kenaikan minyak transformator (*oil rise*) berdasarkan test manufaktur transformator adalah:

$\Delta\theta_{TO,R} = 53^{o}C$

Karena kelas pendingin transformator daya yang digunakan adalah tipe FA,maka nilai m=0.8 dan n=0.9, seperti dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 4.5 Nilai Eksponen m dan n berdasarkan Kelas Pendingin Transformator

Tipe pendingin	m	n
OA	0,8	0,8
FA	0,8	0,9
FOA / FOW – Tidak Langsung	0,8	0,9
FOA / FOW - Langsung	1,0	1,0

Temperatur gradien minyak puncak mula-mula

$\Delta\theta_{TO,I} = \Delta\theta_{TO,R}\left(\frac{K_i^2 R+1}{R+1}\right)^n$

$= 53 * \left(\frac{0.67^2 * 4.29+1}{4.29+1}\right)^{0.9} = 31{,}07\ ^{o}C$

Temperatur gradient hotspot pada rating beban berdasarkan tes

$\Delta\theta_{H,R} = 69{,}5°C - 53{,}0°C = 16{,}5°C$

Temperatur gradient hotspot mula-mula

$\Delta\theta_{H,i} = \Delta\theta_{H,R} \times K_i^{2m} = 16.5°C * 0.67^{2*0.8} = 8{,}01\ ^{o}C$

Perbandingan beban mula-mula dengan rating beban

$K_u = \frac{101\ MVA}{149.99} = 0.68$

Temperatur gradient hotspot pada kondisi steady state

$\Delta\theta_{H,u} = \Delta\theta_{H,R} \times K_u^{2m} = 16.5°C * 0.68^{2*0.8} = 8{,}81\ ^{o}C$

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Temperatur gradient minyak puncak steady state

$$\Delta\theta_{TO,U} = \Delta\theta_{TO,R}\left(\frac{K_u^2 R+1}{R+1}\right)^n = 53 * \left(\frac{0{,}68^2 * 4{,}29+1}{4{,}29+1}\right)^{0.9} = 33{,}28\ ^oC$$

Kapasitas termal transformator

$$C = 0{,}06 \times W_{CC} + 0{,}04 \times W_{TF} + 1{,}33 \times GO\ Wh/^0C$$

$$= 0{,}06 \times 253969.92 + 0{,}04 \times 30423.48 + 1{,}33 \times 13043.00$$

$$= 33802.33 Wh/^0C$$

Konstanta waktu minyak transformator Elin

$$\tau_{TO,R} = C \times \frac{\Delta\theta_{TO,R}}{P_{T,R}}$$

$$= 33802.33\ Wh/^0C \times \frac{53^0\ C}{538000\ W} = 3{,}33\ jam$$

Konstanta waktu termal minyak

$$\tau_{TO} = \tau_{TO,R} \times \frac{\Delta\theta_{TO,U}/\Delta\theta_{TO,R} - \Delta\theta_{TO,I}/\Delta\theta_{TO,R}}{(\Delta\theta_{TO,U}/\Delta\theta_{TO,R})^{1/n} - (\Delta\theta_{TO,I}/\Delta\theta_{TO,R})^{1/n}}$$

$$= 3{,}33 \times \frac{33{,}28/53 - 31{,}07/53}{(33{,}28/53)^{1/0{,}9} - (31{,}07/53)^{1/0{,}9}} = 3{,}17$$

Temperatur gradient dari temperatur minyak puncak

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,U} - \Delta\theta_{TO,i})(1 - e^{t/\tau TO}) + \Delta\theta_{TO,i}$$

$$= (33{,}28\text{-}31{,}07)\ (1\text{-}e^{1/3{,}33}) + 31{,}07$$

$$= 31{,}67\ ^oC$$

Temperatur gradient dari hotspot

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,U} - \Delta\theta_{H,J})\ (1 - e^{-t/\tau W}) + \Delta\theta_{H,J}$$

$$= (8{,}81 - 8{,}01)\ (1\text{-}e^{1/3{,}33}) + 8{,}01$$

$$= 8{,}23\ ^oC$$

Hotspot transformator adalah

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H$$

$$= 24{,}79\ ^oC + 31{,}67\ ^oC + 8{,}23\ ^oC$$

$$= 64{,}69\ ^oC$$

Tabel 4.6 Data Olahan Perhitungan Hotspot Transformator berdasarkan IEEE

Pukul	Perhitungan IEEE									Fasa R			Fasa S			Fasa T		
	ΔθTOi	ΔθHi	ΔθTOu	ΔθHu	τTO	ΔθH	ΔθTO	θTO	θHS,P	θTO,S	ΔθTO,S	θHS,S	θTO,S	ΔθTO,S	θHS,S	θTO,S	ΔθTO,S	θHS,S
0:00	31.07	8.01	33.28	8.81	3.17	8.23	31.67	56.46	64.69	70	45.21	78.23	69	44.21	77.23	67	42.38	75.39
1:00	31.40	8.14	33.59	8.93	3.16	8.36	31.99	56.60	64.96	69	44.39	77.36	68	43.39	76.36	66	41.72	74.69
2:00	31.72	8.27	33.88	9.05	3.16	8.48	32.31	56.74	65.22	68	43.57	76.48	67	42.57	75.48	66	41.07	73.98
3:00	32.04	8.39	34.17	9.16	3.16	8.60	32.62	56.87	65.48	67	42.74	75.60	66	41.74	74.60	65	40.41	73.27
4:00	32.35	8.51	34.46	9.27	3.15	8.72	32.92	57.00	65.72	66	41.92	74.72	65	40.92	73.72	64	39.76	72.55
5:00	32.65	8.63	35.06	9.51	3.15	8.87	33.30	57.20	66.07	65	41.10	73.87	64	40.10	72.87	63	39.10	71.87
6:00	33.29	8.88	35.66	9.75	3.14	9.12	33.94	59.59	68.70	65	39.35	74.12	64	38.35	73.12	63	37.35	72.12
7:00	33.94	9.13	37.27	10.39	3.13	9.48	34.85	62.25	71.73	65	37.60	74.48	64	36.60	73.48	63	35.60	72.48
8:00	35.66	9.81	40.36	11.60	3.11	10.30	36.96	66.11	76.41	67	37.84	77.30	66	36.84	76.30	65	35.84	75.30
9:00	39.01	11.11	42.56	12.46	3.09	11.48	39.99	71.39	82.87	71	39.60	82.48	69	37.60	80.48	67	35.60	78.48
10:00	41.41	12.03	44.83	13.35	3.07	12.40	42.36	75.14	87.54	74	40.72	85.90	72	39.22	84.40	71	37.72	82.90
11:00	43.90	13.00	44.08	13.06	3.06	13.01	43.95	78.12	91.13	76	41.83	89.01	75	40.83	88.01	74	39.83	87.01
12:00	43.07	12.68	43.34	12.77	3.07	12.70	43.15	75.39	88.09	75	42.56	87.50	74	41.56	86.50	73	40.56	85.50
13:00	42.26	12.37	42.61	12.49	3.07	12.40	42.36	72.68	85.07	74	43.29	86.00	73	42.29	85.00	72	41.29	84.00
14:00	41.47	12.06	41.90	12.21	3.08	12.10	41.59	69.98	82.07	72	44.01	84.50	71	43.01	83.50	70	42.01	82.50
15:00	40.69	11.76	41.20	11.93	3.08	11.80	40.83	67.29	79.09	71	44.74	83.00	70	43.74	82.00	69	42.74	81.00
16:00	39.92	11.46	40.60	11.70	3.09	11.52	40.11	64.64	76.17	70	45.47	81.52	69	44.47	80.52	68	43.47	79.52
17:00	39.27	11.21	40.00	11.46	3.10	11.28	39.47	64.09	75.37	70	45.71	81.61	69	44.71	80.61	68	43.71	79.61
18:00	38.62	10.95	39.40	11.23	3.10	11.03	38.83	63.54	74.57	71	45.96	81.70	70	44.96	80.70	69	43.96	79.70
19:00	37.96	10.70	38.84	11.01	3.11	10.78	38.20	63.00	73.79	71	46.20	81.78	70	45.20	80.78	69	44.20	79.78
20:00	37.36	10.47	38.28	10.79	3.11	10.55	37.61	62.31	72.87	70	45.60	80.85	69	44.60	79.85	68	43.60	78.85
21:00	36.75	10.23	37.71	10.57	3.12	10.32	37.02	61.62	71.94	70	45.00	79.92	69	44.00	78.92	68	43.00	77.92
22:00	36.14	9.99	37.15	10.34	3.12	10.09	36.42	60.92	71.01	69	44.40	78.99	68	43.40	77.99	67	42.40	76.99
23:00	35.53	9.76	36.58	10.12	3.13	9.85	35.82	60.22	70.08	68	43.80	78.05	67	42.80	77.05	66	41.80	76.05
0:00	34.92	9.52	36.01	9.89	3.13	9.62	35.22	59.52	69.14	68	43.20	77.12	67	42.20	76.12	66	41.20	75.12
1:00	34.31	9.28	35.44	9.67	3.14	9.38	34.62	58.82	68.20	67	42.60	76.18	66	41.60	75.18	65	40.60	74.18
2:00	33.70	9.04	34.86	9.44	3.15	9.15	34.02	58.12	67.27	66	42.00	75.25	65	41.00	74.25	64	40.00	73.25
3:00	33.09	8.80	34.29	9.21	3.15	8.91	33.41	57.41	66.33	65	41.40	74.31	64	40.40	73.31	63	39.40	72.31

4:00	32.47	8.56	33.72	8.98	3.16	8.68	32.81	56.71	65.39	65	40.80	73.38	64	39.80	72.38	63	38.80	71.38
5:00	31.86	8.32	34.51	9.30	3.16	8.59	32.58	56.38	64.97	64	40.20	72.59	63	39.20	71.59	62	38.20	70.59
6:00	32.71	8.65	35.32	9.62	3.15	8.92	33.42	58.12	67.03	64	39.30	72.92	63	38.30	71.92	62	37.30	70.92
7:00	33.57	8.99	37.41	10.45	3.13	9.39	34.62	60.22	69.61	64	38.40	73.39	63	37.40	72.39	62	36.40	71.39
8:00	35.82	9.87	39.42	11.24	3.11	10.24	36.80	63.80	74.05	66	38.50	75.74	65	37.50	74.74	64	37.00	74.24
9:00	37.99	10.71	40.02	11.47	3.10	10.92	38.55	66.95	77.87	67	38.60	77.92	66	37.60	76.92	66	37.60	76.92
10:00	38.64	10.96	40.61	11.70	3.10	11.17	39.18	68.90	80.07	69	39.28	80.17	69	38.78	79.67	69	38.78	79.67
11:00	39.28	11.21	38.64	10.93	3.10	11.13	39.11	70.14	81.27	71	39.97	82.13	71	39.97	82.13	71	39.97	82.13
12:00	37.15	10.38	36.66	10.15	3.12	10.32	37.01	69.15	79.47	72	39.37	81.82	72	39.37	81.82	71	38.87	81.32
13:00	35.01	9.55	39.25	11.17	3.12	10.00	36.18	69.41	79.40	72	38.77	82.00	72	38.77	82.00	71	37.77	81.00
14:00	37.81	10.64	41.83	12.18	3.09	11.06	38.92	70.52	81.58	74	41.90	84.56	73	41.40	84.06	72	40.40	83.06
15:00	40.61	11.72	41.04	11.87	3.09	11.76	40.73	70.69	82.46	75	45.03	86.76	74	44.03	85.76	73	43.03	84.76
16:00	39.75	11.39	40.26	11.57	3.09	11.44	39.89	67.56	79.00	74	45.83	84.94	73	45.33	84.44	72	43.83	82.94
17:00	38.90	11.06	40.38	11.61	3.10	11.22	39.31	64.68	75.89	72	46.63	83.22	72	46.63	83.22	70	44.63	81.22
18:00	39.03	11.11	40.50	11.66	3.09	11.26	39.44	64.62	75.89	72	46.81	83.26	72	46.48	82.93	70	44.81	81.26
19:00	39.16	11.16	40.61	11.70	3.09	11.31	39.56	64.57	75.88	72	46.99	83.31	71	46.32	82.65	70	44.99	81.31
20:00	39.28	11.21	39.77	11.38	3.10	11.26	39.42	64.25	75.51	72	47.17	83.26	71	46.17	82.26	70	45.17	81.26
21:00	38.37	10.86	38.93	11.04	3.10	10.91	38.53	63.30	74.21	71	46.33	82.02	70	45.44	81.13	69	44.44	80.13
22:00	37.46	10.50	38.09	10.71	3.11	10.56	37.63	62.35	72.91	70	45.50	80.78	69	44.72	80.01	68	43.72	79.01
23:00	36.54	10.15	37.24	10.38	3.12	10.21	36.74	61.40	71.61	69	44.67	79.54	69	44.00	78.88	68	43.00	77.88
0:00	35.63	9.79	36.39	10.04	3.13	9.86	35.84	60.45	70.31	68	43.83	78.31	68	43.28	77.75	67	42.28	76.75
1:00	34.72	9.44	35.54	9.70	3.14	9.51	34.94	59.50	69.01	68	43.00	77.07	67	42.56	76.62	66	41.56	75.62
2:00	33.81	9.08	34.69	9.37	3.15	9.16	34.05	58.55	67.70	67	42.17	75.83	66	41.83	75.49	65	40.83	74.49
3:00	32.90	8.73	33.84	9.03	3.16	8.81	33.15	57.60	66.40	66	41.33	74.59	66	41.11	74.36	65	40.11	73.36
4:00	31.99	8.37	32.99	8.69	3.16	8.46	32.26	56.65	65.11	65	40.50	73.35	65	40.39	73.24	64	39.39	72.24
5:00	31.09	8.02	32.67	8.56	3.17	8.17	31.52	55.85	64.02	64	39.67	72.17	64	39.67	72.17	63	38.67	71.17
6:00	30.75	7.89	32.36	8.44	3.17	8.04	31.19	56.17	64.21	64	39.02	72.04	64	39.02	72.04	63	38.02	71.04
7:00	30.42	7.76	34.99	9.49	3.16	8.23	31.66	57.29	65.52	64	38.37	72.23	64	38.37	72.23	63	37.37	71.23
8:00	33.22	8.85	37.58	10.51	3.13	9.31	34.41	61.81	71.11	65	37.60	74.31	65	37.60	74.31	64	36.60	73.31
9:00	35.99	9.93	36.53	10.10	3.13	9.98	36.14	65.31	75.29	66	36.83	75.98	66	36.83	75.98	65	35.83	74.98

10:00	34.87	9.50	35.50	9.69	3.14	9.55	35.04	65.61	75.16	68	37.43	77.55	68	36.93	77.05	67	36.43	76.55
11:00	33.77	9.07	36.08	9.92	3.14	9.30	34.40	66.37	75.67	70	38.03	79.30	69	37.03	78.30	69	37.03	78.30
12:00	34.39	9.31	36.67	10.15	3.13	9.54	35.01	66.85	76.39	71	38.67	80.04	70	38.17	79.54	69	37.17	78.54
13:00	35.02	9.56	40.15	11.52	3.11	10.10	36.43	68.13	78.23	71	39.30	81.10	71	39.30	81.10	69	37.30	79.10
14:00	38.78	11.02	43.57	12.86	3.08	11.53	40.11	69.96	81.49	71	41.15	82.53	71	40.65	82.03	69	39.15	80.53
15:00	42.52	12.46	42.56	12.47	3.07	12.46	42.53	70.53	82.99	71	43.00	83.46	70	42.00	82.46	69	41.00	81.46
16:00	41.41	12.04	41.49	12.05	3.08	12.04	41.43	68.95	80.99	71	42.98	82.54	70	41.98	81.54	69	40.98	80.54
17:00	40.23	11.58	40.34	11.60	3.09	11.59	40.26	67.30	78.88	70	42.97	81.59	69	41.97	80.59	68	40.97	79.59
18:00	38.99	11.10	39.13	11.12	3.10	11.10	39.03	65.58	76.68	70	42.95	80.60	69	41.95	79.60	68	40.95	78.60
19:00	37.67	10.59	38.65	10.93	3.11	10.68	37.94	64.01	74.69	69	42.93	79.68	68	41.93	78.68	67	40.93	77.68
20:00	37.15	10.39	38.17	10.75	3.11	10.48	37.43	63.10	73.58	69	43.33	79.48	68	42.33	78.48	67	41.33	77.48
21:00	36.64	10.19	37.82	10.61	3.12	10.30	36.96	62.23	72.53	69	43.73	79.30	68	42.73	78.30	67	41.73	77.30
22:00	36.26	10.04	37.44	10.46	3.12	10.15	36.58	61.35	71.50	68	43.23	78.15	68	42.73	77.65	66	41.23	76.15
23:00	35.85	9.88	37.24	10.38	3.12	10.01	36.23	60.49	70.51	67	42.73	77.01	67	42.73	77.01	65	40.73	75.01

4.3 Analisis Karakteristik Hotspot Transformator

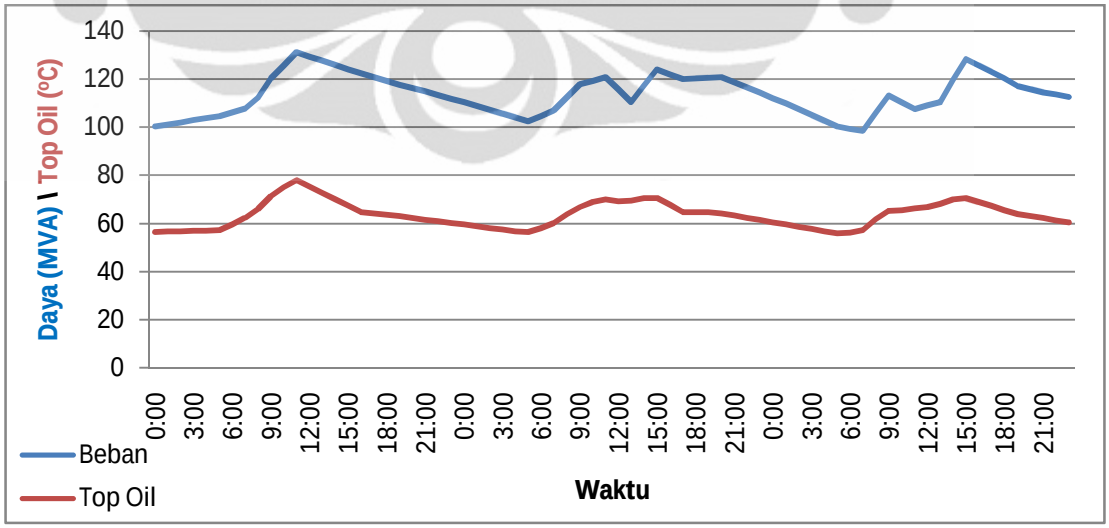
4.3.1 Analisis Kenaikan Beban

Analisis kenaikan beban ini merupakan analisis yang dilakukan untuk melihat hubungan yang terjadi antara kenaikan beban transformator dengan karakteristik hotspot transformator, yaitu hubungan kenaikan beban dengan beberapa parameter hotspot transformator, seperti kenaikan suhu *top oil*, kenaikan suhu ambien, serta kenaikan suhu hotspot transformator.

Pada perhitungan hotspot di atas, perhitungan dilakukan dengan menggunakan data pembebanan transformator daya pada daerah Cibatu. Di mana data transformator daya yang digunakan adalah data IBT 1. Data yang diolah merupakan data pembebanan selama 3 hari dengan masing-masing perubahan beban selama satu jam. Sehingga diperolah data sebanyak 72 nilai mulai dari hari I pukul 00:00 hingga hari III pukul 23:00. Di samping itu, dilakukan analisis pengaruh kenaikan beban terhadap parameter-parameter tersebut di atas dengan mengubah nilai data beban dengan menjaga parameter lainnya tetap.

4.3.1.1 Analisis Kenaikan Beban terhadap Temperatur Top Oil

Pengaruh perubahan kenaikan beban terhadap suhu top oil dapat dilihat pada grafik di bawah ini :



Gambar 4.1 Grafik daya dan suhu minyak puncak (*top oil*) terhadap waktu

Dari grafik di atas, dapat dilihat hubungan antara beban dengan suhu minyak puncak. Grafik tersebut menggambarkan pemakaian beban IBT 1 daerah Cibatu serta suhu minyak puncak selama 3 hari. Hari pertama dimulai pada pukul 00:00, di mana beban terendah terjadi. Pada saat yang bersamaan suhu minyak puncak juga berada pada titik terendah. Kemudian pada pukul 09:00 beban semakin bertambah seiring dengan beban yang dipikul transformator IBT 1 semakin bertambah,karena pada saat itu, aktivitas dengan penggunaan listrik mulai banyak. Saat itu juga suhu minyak puncak juga semakin bertambah karena suhu ambien dan beban yang semakin meningkat. Saat beban meningkat, maka loss trafo akan semakin tinggi setiap waktunya karena loss kumparan akan semakin besar sesuai dengan rumus I^2Rt. Inilah yang membuat nilai suhu puncak semakin meningkat. Di samping itu pertambahan suhu ambien pada waktu yang sama membuat nilai suhu top oil akan semakin tinggi sesuai dengan rumus $\theta_{TO} = \theta_A + \Delta\theta_{TO}$.

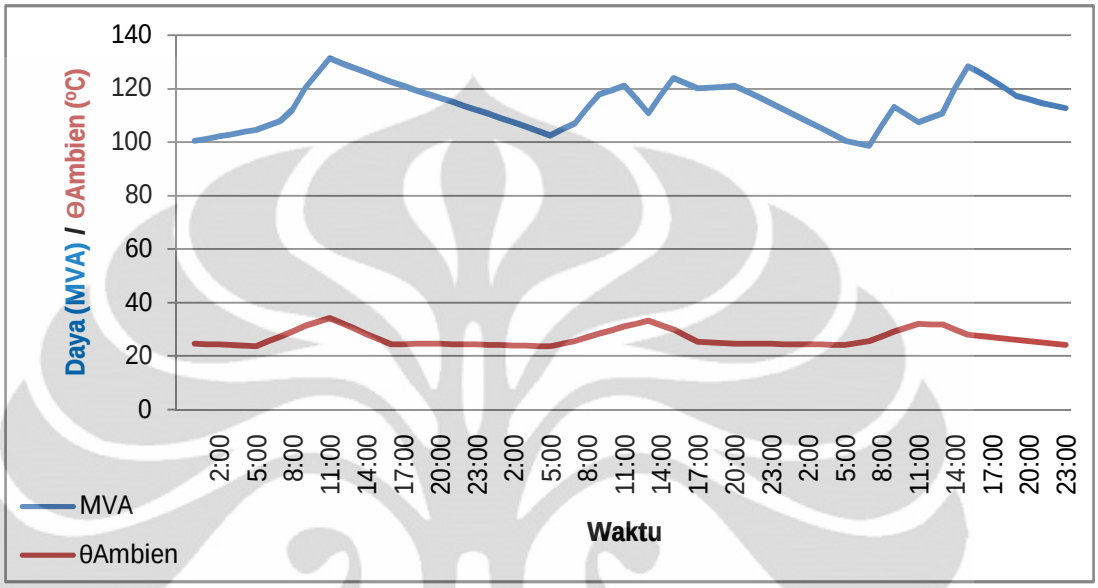
Pada pukul 12:00 beban mencapai puncaknya pada nilai 130MVA, sementara suhu minyak puncak juga semakin naik dan mencapa puncak sekitar kurang lebih 32^oC. ini disebabkan karena pemakaian listrik yang ditanggung transformator ini mencapai puncaknya,seperti pemakaian AC yang semakin banyak akibat suhu yang semakin tinggi. Hal ini juga didukung dengan kenaikan suhu ambien yang mencapai puncaknya. Setelah itu pemakaian beban dan suhu minyak puncak juga semakin turun hingga mencapai titik terendah pada pukul 05:00. Hal ini diakibatkan pemakaian listrik yang ditanggung transformator IBT 1 semakin berkurang. Demikian juga halnya dengan suhu ambien yang semakin turun akibat tidak adanya intensitas cahaya.

Beban dan suhu ini kembali mengalami kenaikan pada pukul 06:00. Suhu dan beban ini mencapai puncaknya pada pukul 15:00. Pada hari ketiga kondisi ini juga terjadi di mana suhu dan beban terendah terjadi pada pukul 05:00-06:00 dan mencapai titik tertinggi pada pukul 15:00. Dari grafik tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa beban dan suhu minyak puncak memiliki hubungan yang linear satu sama lain. Hal ini disebabkan karena ketika suhu naik, maka pemaian listrik pun bertambah (seperti penggunaan AC), sehingga beban yang dipikul transformator IBT 1 juga bertambah.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

4.3.1.2 Analisis Kenaikan Beban terhadap Temperatur Ambien

Hubungan kenaikan beban dengan suhu ambien dapat kita lihat pada grafik di bawah ini :



Gambar 4.2 Grafik daya dan temperatur ambien terhadap waktu

Dari grafik di atas, dapat dilihat hubungan antara beban dengan suhu ambien. Grafik tersebut menggambarkan pemakaian beban IBT 1 daerah Cibatu serta suhu ambiennya selama 3 hari. Hari pertama dimulai pada pukul 00:00, di mana beban berada pada titik 100 MVA dan suhu sekitar 24 ^{o}C. Kemudian pada pukul 08:00 beban semakin bertambah seiring dengan beban yang dipikul transformator IBT 1 semakin bertambah,karena pada saat itu, aktivitas dengan penggunaan listrik mulai banyak. Saat itu juga suhu ambien juga semakin bertambah karena matahari mulai memiliki intensitas cahaya. Hingga akhirnya pada pukul 12:00 beban mencapai puncaknya pada nilai 130MVA, sementara suhu juga semakin naik dan mencapai puncak sekitar kurang lebih 32^{o}C. ini disebabkan karena pemakaian listrik yang ditanggung transformator ini mencapai puncaknya,seperti pemakaian AC yang semakin banyak akibat suhu yang semakin tinggi.

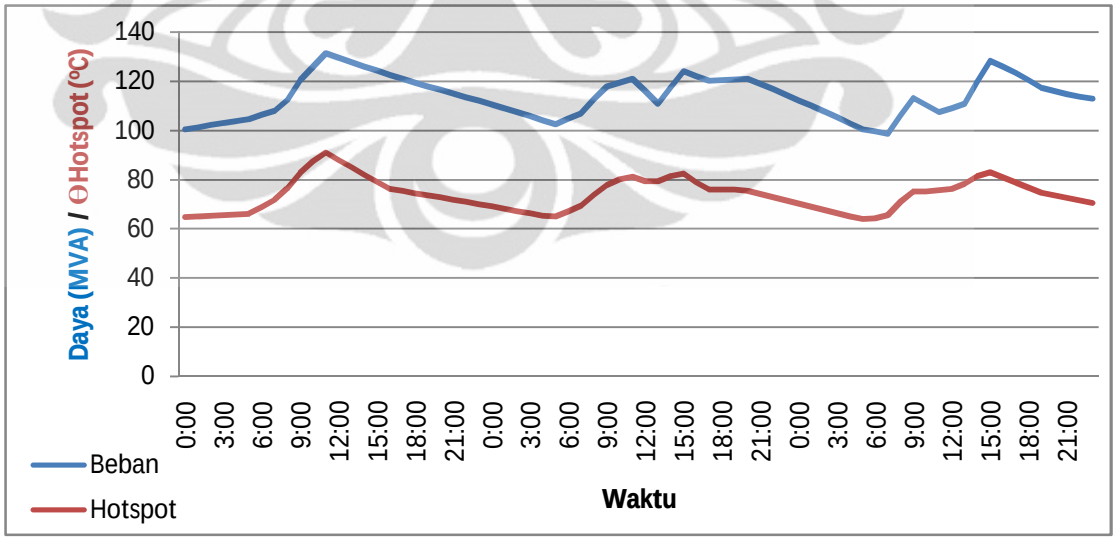
Setelah itu pemakaian beban semakin turun hingga mencapai titik terendah pada pukul 05:00. Hal ini diakibatkan pemakaian listrik yang ditanggung transformator IBT 1 semakin berkurang. Sementara suhu ambien turun hingga 24^{o}C

pada pukul 16:00, dan kemudian stabil di titik tersebut hingga pukul 06:00. Kemudian beban mulai naik kembali, di mana beban mencapai nilai sekitar 120MVA dan kemudian turun pada 110 MVA sebelum naik kembali hingga mencapai nilai puncak 124 MVA. Pada saat itu, suhu terus naik hingga titik puncak (33^{o}C) pada pukul 13:00 yang kemudian turun pada pukul 17:00 dan akhirnya stabil di titik 24^{o}C hingga pukul 06:00.

Pada hari ketiga kondisi tidak jauh berbeda. Di mana pada pagi hari beban dan suhu ambien naik dari titik terendahnya dan kemudian naik mencapai titik puncak dari siang hari hingga akhirnya turun kembali mencapai titik terendahnya. Walaupun terdapat sedikit perbedaan, namun secara umum dapat ditarik kesimpulan bahwa beban dan suhu ambien memiliki hubungan yang linear satu sama lain. Hal ini dapat kita lihat dimana pada suhu naik, maka pemakaian listrik pun bertambah (seperti penggunaan AC), sehingga beban yang dipikul transformator IBT 1 juga bertambah.

4.3.1.3 Analisis Kenaikan Beban terhadap Temperatur Hotspot Transformator

Grafik di bawah ini menggambarkan hubungan antara kenaikan beban dengan suhu hotspot.



Gambar 4.3 Grafik daya dan temperatur hotspot terhadap waktu

Grafik tersebut menggambarkan pemakaian beban IBT 1 daerah Cibatu serta suhu hotspot yang didapat dengan menggunakan perhitungan. Hari pertama dimulai pada pukul 00:00, di mana beban berada pada titik 100 MVA dan suhu hotspot transformator sekitar 65 ^{o}C. Kemudian pada pukul 08:00 beban semakin bertambah seiring dengan beban yang dipikul transformator IBT 1 semakin bertambah,karena pada saat itu, aktivitas dengan penggunaan listrik mulai banyak. Saat itu juga suhu hotspot transformator juga semakin bertambah karena pengaruh dari suhu top oil dan suhu ambien yang juga semakin bertambah. Hingga akhirnya pada pukul 12:00 beban mencapai puncaknya pada nilai 130MVA, sementara itu suhu hotspot juga mencapai puncak seiring dengan pertambahan beban ini. Hal ini juga ditandai dengan kenaikan suhu ambien dan suhu top oil seperti yang sudah dianalisis sebelumnya.

Setelah itu pemakaian beban semakin turun hingga mencapai titik terendah pada pukul 05:00. Hal ini diakibatkan pemakaian listrik yang ditanggung transformator IBT 1 semakin berkurang. Pada saat yang bersamaan suhu hotspot juga turun hingga mencapai titik terendah,mulai. Kemudian beban dan suhu hotspot transformator naik kembali hingga mencapai titik 120 MVA dan hotspot transformator mencapai 80^{o}C pada pukul 12:00. Setelah itu beban turun hingga 110 MVA dikarenakan pemakaian listrik yang berbeda antara hari I dan II. Suhu hotspot transformator juga turun walaupun tidak terlalu signifikan. Hal ini disebabkan suhu ambien tidak turun tetapi naik menuju puncak tertinggi. Mengingat bahwa $\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H$ ' maka walaupun beban turun mengakibatkan suhu top oil gradien turun, namun suhu hotspot tidak turun drastis karena suhu ambiennya juga naik.

Kemudian beban mulai naik kembali, di mana beban mencapai beban puncak sekitar 125MVA. Seiring dengan kenaikan tersebut, suhu hotspot transformator juga mengalami kenaikan akibat dari suhu top oil yang juga naik dan juga suhu ambien yang juga naik. Setelah itu barulah beban dan suhu hotspot transformator turun karena penggunaan listrik yang sudah semakin sedikit ditambah dengan suhu ambien yang semakin menurun. Hal ini terjadi mulai dari pukul 16:00 hingga pukul 06:00 pagi.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Pada hari ketiga hal yang sama pada hari kedua terjadi yaitu, beban naik kemudian turun sebelum akhirnya naik kembali hingga mencapai puncak 128 MVA pada pukul 15:00. Hal ini juga terjadi pada suhu hotspot transformator, dimana naik dan mencapai puncak pada suhu 83^{o}C pada waktu yang sama yaitu pukul 15:00. Setelah itu nilai beban dan suhu hotspot transformator turun hingga mencapai titik minimum pada waktu yang bersamaan pula.

Dari grafik tersebut kita dapat menarik kesimpulan bahwa beban dan kenaikan suhu hotspot transformator adalah berbanding lurus. Ketika beban transformator naik, maka loss kumparan trafo akan semakin tinggi. Dengan penambahan antara *loss* inti dan kumparan trafo bertambah, maka suhu tranfsormator yaitu suhu gradient minyak puncak dan suhu gradient hotspot pun akan semakin bertambah. Hal inilah yang menyebabkan suhu hotspot trafo juga akan semakin tinggi seiring dengan pertambahan beban.

4.3.2 Analisis Kenaikan Minyak Puncak (*top oil*)

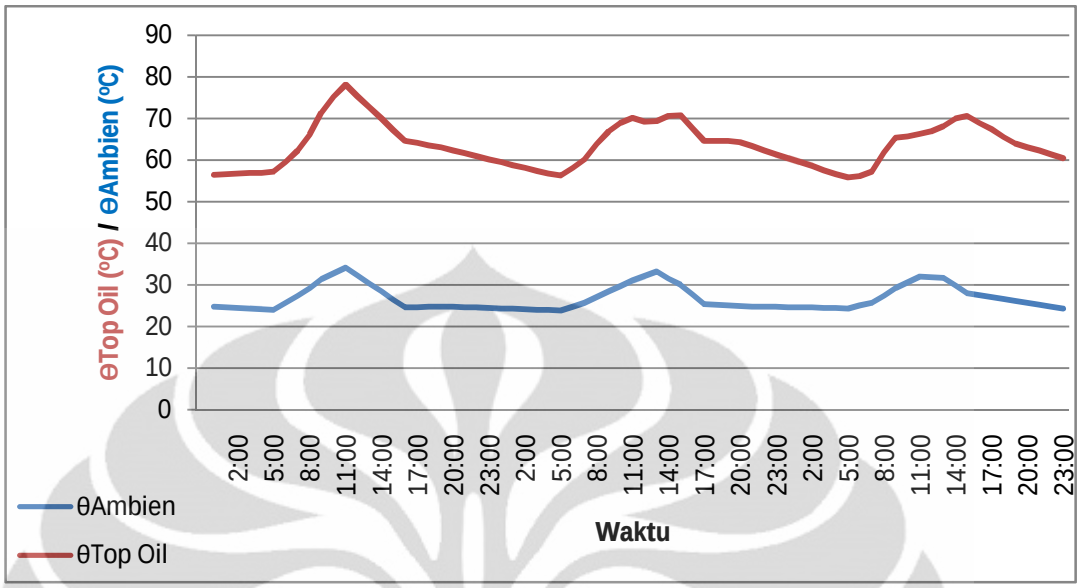
Kenaikkan temperatur top oil diperoleh dengan menggunakan dua cara, yaitu dengan menggunakan perhitungan dan pengukuran di lapangan. Di mana nilai perhitungan diperoleh dengan menggunakan parameter-parameter data yang sudah diolah sebelumnya, sementara data pengukuran diperoleh berdasarkan pengukuran langsung daerah titik puncak minyak dengan menggunakan sensor panas.

Pada analisis ini dibandingkan data suhu top oil dengan beberapa parameter hotspot, yaitu suhu ambien, hotspot transformator serta nilai suhu top oil antara metode perhitungan dengan metode pengukuran.

4.3.2.1 Analisis Kenaikan Minyak Puncak (*top oil*) dengan Suhu Ambien

Grafik di bawah ini akan menggambarkan hubungan kenaikan minyak puncak dengan suhu ambien.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011



Gambar 4.4 Grafik temperatur ambien dan minyak puncak terhadap waktu

Pada grafik tersebut kita dapat melihat hubungan antara suhu ambien (suhu ambien) dengan suhu minyak puncak (top oil). Secara umum, garis suhu ambien mengikuti pergerakan garis grafik suhu minyak puncak. Hal ini sesuai dengan rumus $\theta_{TO} = \theta_A + \Delta\theta_{TO}$. di mana ketika suhu ambien naik mengakibatkan suhu minyak puncak juga naik. Namun, suhu ambien tidak mutlak membuat kenaikan pada suhu minyak puncak karena masih dipengaruhi parameter suhu gradient minyak puncak. Di mana parameter ini dipengaruhi oleh beban, konstanta waktu minyak, konstanta termal minyak, dan lain-lain. Oleh karena itulah masih terdapat perbedaan sedikit pada grafik di atas.

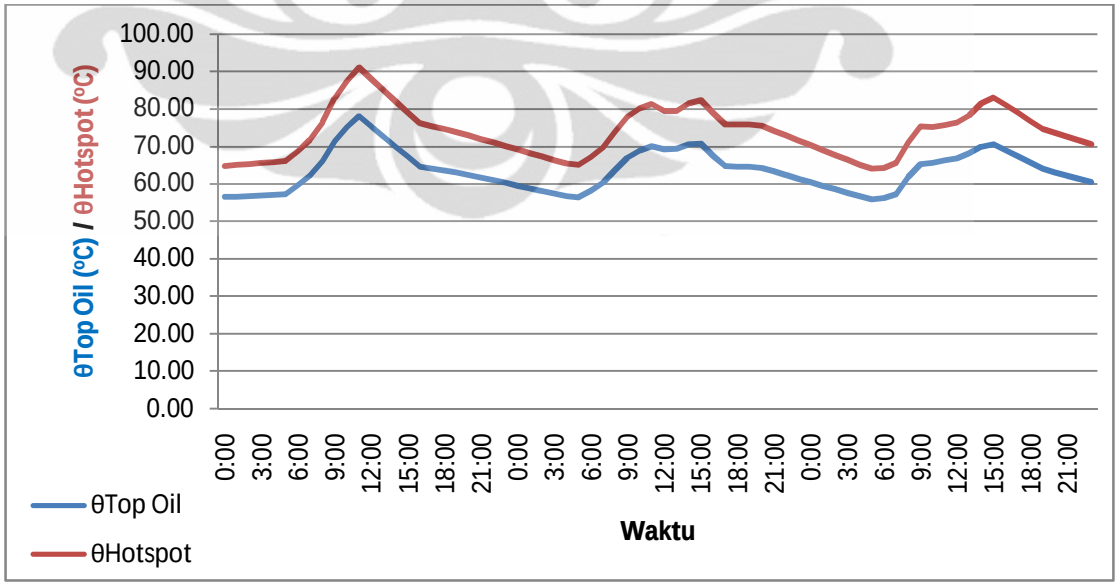
Seperti dapat kita lihat pada gambar, di mana pada pukul 00:00 hari I, suhu ambien turun sementara suhu minyak puncak mulai naik. Ini disebabkan karena pada saat itu beban daripada transformator memiliki tren yang juga naik. Kemudian, suhu ambien mulai naik pada pukul 06:00 dan mencapai puncak pada pukul 12:00. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat intensitas cahaya matahari, kecepatan angin dan tekanan angin pada saat itu. Demikian juga yang terjadi pada suhu minyak puncak, di mana minyak puncak mengalami kenaikan hingga mencapai titik maksimumnya. Selain dipengaruhi oleh suhu ambien, hal ini juga akibat kenaikan beban yang juga mengalami kenaikan hingga beban puncaknya.

Setelah itu, suhu ambien mengalami penurunan hingga suhu tersebut stabil di 24^{o}C pada pukul 16:00 hingga pukul 06:00. Namun, suhu minyak puncak tidak stabil di satu titik, tetapi tetap turun hingga titik terendahnya pada suhu 58^{o}C pada pukul 05:00. Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, hal ini terjadi akibat penurunan beban yang juga menuju titik minimumnya. Itulah yang menyebabkan hal tersebut terjadi. Lalu, suhu minyak puncak dan suhu ambien kemudian naik menuju titik tertinggi dan kemudian turun lagi hingga menuju titik terendah. Demikian seterusnya yang terjadi pada hari berikutnya.

Dari grafik tersebut dapat kita simpulkan bahwa suhu minyak puncak sesuai dan berbanding lurus dengan suhu ambien. Walaupun suhu ambien tidak sepenuhnya mempengaruhi suhu minyak puncak karena lebih didominasi oleh perubahan beban.

4.3.2.2 Analisis Kenaikan Minyak Puncak (*top oil*) dengan Suhu Hotspot Transformator

Pada dasarnya, hotspot transformator merupakan penjumlahan antara suhu minyak puncak dengan kenaikan suhu hotspot transformator. Seperti yang terlihat pada rumus $\theta_H = \theta_{TO} + \Delta\theta_H$. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan dengan menggunakan grafik di bawah ini.



Gambar 4.5 Grafik temperatur minyak puncak dan hotspot terhadap waktu

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa suhu minyak puncak berbanding lurus dengan suhu hotspot transformator. Hal ini dapat kita lihat dari bentuk dan pergerakan kedua grafik tersebut. Ketika suhu minyak puncak mulai naik pada pukul 00:00, dapat dilihat bahwa suhu hotsppot transformator juga naik. Kemudian nilai suhu ambien naik terus hingga mencapai puncak di suhu 91 ^{o}C. hal ini juga berbanding lurus dengan suhu minyak puncak yang juga naik mencapai nilai maksimum di titik 78 ^{o}C pada waktu yang sama yaitu pukul 11:00. Kemudian nilai suhu hotspot transformator mulai turun hingga akhirnya mencapai titik terendahnya di titik 64^{o}C. Demikian juga dengan suhu minyak puncak yang juga turun mencapai nilai titik terendah di titik 56^{o}C.

Kondisi ini juga berlanjut pada hari kedua, di mana suhu minyak puncak naik dari titik terendah dan diikuti oleh suhu hotspot transformator yang juga menuju titik terendahnya. Keadaan ini berulang dan terjadi hingga pada hari yang ketiga, di mana suhu hotspot transformator selalu berbanding lurus dengan suhu minyak puncak. Hal ini menandakan bahwa suhu minyak puncak merupakan representasi dari suhu hotspot transformator itu sendiri. Di mana ketika suhu minyak puncak naik, maka suhu hotspot transformator juga naik dan ketika suhu minyak puncak turun maka suhu hotspot juga turun.

4.3.3 Analisis Kenaikan Temperatur Ambien

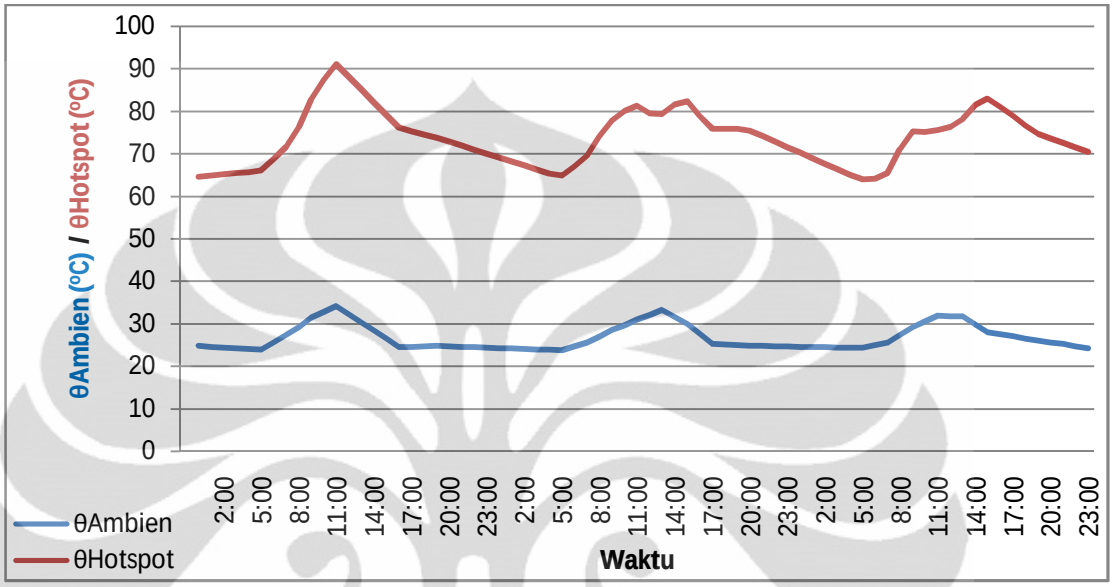
Suhu lingkungan atau suhu ambien merupakan salah satu parameter penting yang diamati pada tulisan ini. Terdapat tiga parameter suhu yang akan dibandingkan pada bagian ini

Pertama, merupakan suhu pada lokasi di mana transformator IBT berada. Maksudnya adalah bahwa suhu diperoleh dari nilai yang terdapat pada panel suhu transformator berada. Kedua, merupakan nilai suhu yang diperoleh dari data BMKG yang sudah dicatat. Terakhir merupakan nilai rata-rata kedua suhu di atas serta penambahan suhu sebesar 5-40 ^{0}C, dengan menjaga parameter lainnya tetap, untuk melihat efek langsung perubahan suhu terhadap perubahan nilai suhu hotspot transformator.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

4.3.3.1 Analisis Kenaikan Suhu Ambien dengan Suhu Hotspot Transformator

Pada grafik di bawah ini dapat kita lihat hubungan antara suhu ambien dengan suhuh hotspot transformator, yaitu :



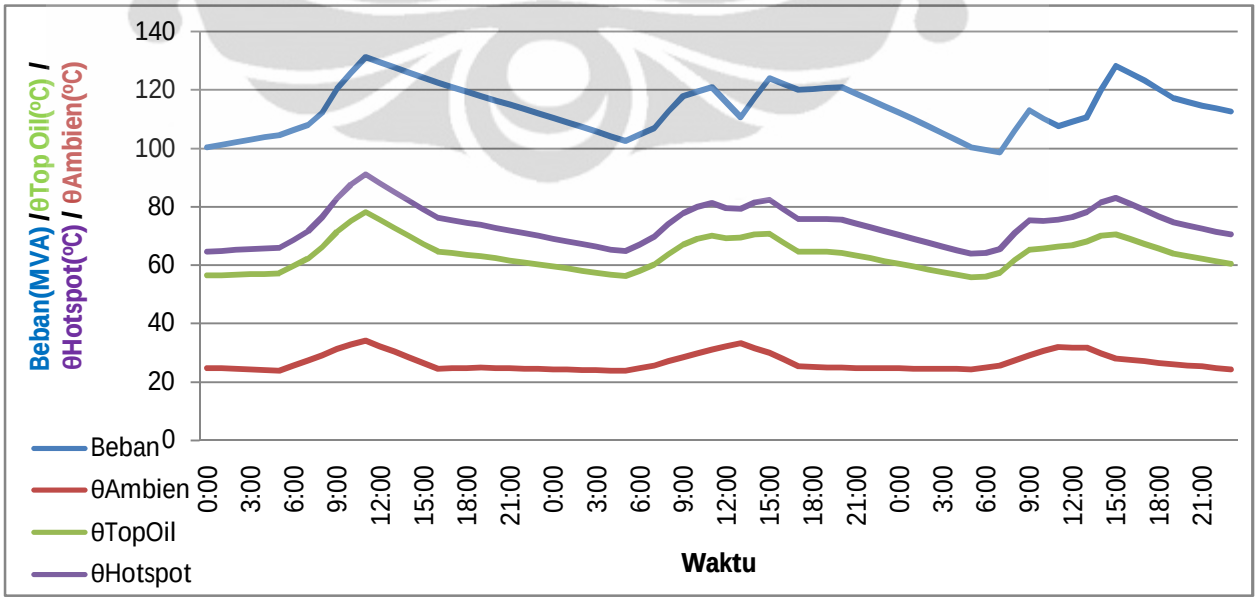
Gambar 4.6 Grafik temperatur minyak puncak dan hotspot terhadap waktu

Pada grafik di atas dapat dilihat hubungan antara suhu ambien dengan suhu hotspot transformator. Pada hari I, yaitu pukul 00:00 dapat dilihat bahwa suhu transformator mulai meningkat dari titik terendahnya yaitu 64^{o}C. Kemudian suhu ini meningkat terus hingga akhirnya mencapai puncak di titik 91^{o}C pada pukul 11:00. Berbeda dengan suhu ambien yang pada awalnya menurun dari 24^{o}C menuju 23^{o}C, hingga akhirnya naik menuju titik puncak pada 11:00 pukul 34^{o}C. Kemudian suhu hotspot ini kemudian turun yang diikuti oleh penurunan suhu ambien. Namun suhu hotspot transformator terus mengalami penurunan hingga akhirnya mencapai titik terendahnya,sementara suhu ambien tidak turun lagi tetapi stabil di titik 24^{o}C. Lalu, pada pukul 06:00 suhu ambien dan suhu hotspot transformator sama-sama naik menuju titik puncak. Namun, sebelum suhu hotspot transformator mencapai titik tertinggi,suhu ini turun sekitar 2^{o}C sampai akhirnya naik hingga titik puncak. Hal ini dipengaruhi oleh beban yang pada saat itu juga turun, sehingga nilai kenaikan minyak puncak menjadi naik.

Kondisi ini juga terjadi pada hari ketiga, di mana suhu hotspot transformator maupun suhu ambien naik setelah mencapai titik minimumnya. Tetapi terdapat sedikit perbedaan di mana ketika suhu ambien mulai turun, namun suhu hotspot masih naik. Hal ini dipengaruhi oleh beban yang dipikul transformator masih naik sehingga nilai dari suhu gradient minyak puncak dan gradient hotspot naik. Kondisi ini terjadi pada pukul 12:00. Pada pukul 13:00 dapat dilihat bahwa suhu ambien sudah mulai turun. Sementara itu suhu hotspot transformator masih naik hingga akhirnya mencapai titik maksimumnya di titik 83^{o}C pada pukul 15:00. Setelah itu kedua suhu ini akhirnya turun kembali sebelum nantinya naik kembali.

Walaupun demikian secara umum dapat dikatakan bahwa kenaikan suhu ambien berbanding lurus dengan kenaikan suhu hotspot transformator, karena ketika suhu ambien naik, maka suhuh hotspot transformator juga naik. Hal ini sesuai dengan rumus $\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta t_H$. tetapi, sebagai catatan diperoleh bahwa suhu ambien tidak terlalu dominan mempengaruhi kenaikan suhu hotspot transformator. Karena walaupun suhu ambien naik tetapi beban turun, maka suhu hotspot transformator cenderung turun.

4.3.4 Hubungan Beban, Temperatur Ambien, Top Oil dan Temperatur Hotspot Transformator



Gambar 4.7 Grafik beban,temperatur ambien,minyak puncak dan hotspot terhadap waktu

Pada grafik di atas dapat dilihat bahwa keempat grafik tersebut memiliki tren yang sama. Secara umum, dapat dilihat bahwa keempat parameter tersebut saling berbanding lurus. Di mana ketika salah satu grafik di atas naik, maka grafik lainnya ikut naik. Grafik paling atas merupakan grafik pemakaian beban, sementara grafik kedua dan ketiga merupakan grafik hotspot dengan grafik minyak puncak, dan terakhir merupakan grafik suhu ambien.

Walaupun demikian terdapat sedikit perbedaan antara grafik tersebut. Hal ini sangat jelas terlihat pada grafik beban dan grafik lainnya dengan grafik suhu ambien. Ketika grafik beban mulai turun dari keadaan puncaknya, maka semua grafik tersebut ikut turun hingga mencapai titik terendahnya, namun berbeda dengan suhu ambien yang stabil setelah turun dari titik puncaknya. Hal ini juga terjadi hingga grafik mulai naik dan turun kembali.

Kondisi tersebut dapat terjadi karena perubahan kenaikan beban memiliki peran yang sangat besar dalam perubahan nilai pada suhu minyak puncak dan suhu hotspot transformator. Jad, walaupun nilai dari suhu ambien turun, maka ketika beban naik, maka grafik minyak puncak dan hotspot transformator akan cenderung naik. Hal tersebut dapat jelas terlihat pada pukul 13:00, pada hari ketiga. Di mana saat itu suhu ambien sudah mulai turun dari titik tertingginya yaitu 32^{o}C, sementara suhu hotspot dan suhu minyak puncak masih naik, karena pada saat itu beban masih naik menuju titik puncaknya. Sehingga dapat disimpulkan bahwa beban memiliki pengaruh yang lebih besar atas kenaikan suhu hotspot transformator. Selain itu dapat disimpiulkan bahwa beban berbanding lurus dengan suhu ambien, suhu minyak puncak dan suhu hotspot transformator.

4.4 Analisis Perhitungan dengan Pengukuran

4.4.1 Analisis Temperatur Minyak Puncak dengan Metode Pengukuran dan Perhitungan

Dengan membandingkan metode perhitungan maka diperoleh error:

$$\%\epsilon = \frac{\theta TO_{pengukuran} - \theta TO_{perhitungan}}{\theta TO_{pengukuran}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{70 - 56.46}{56.46} \; x \; 100\% = 23.98\%$$

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

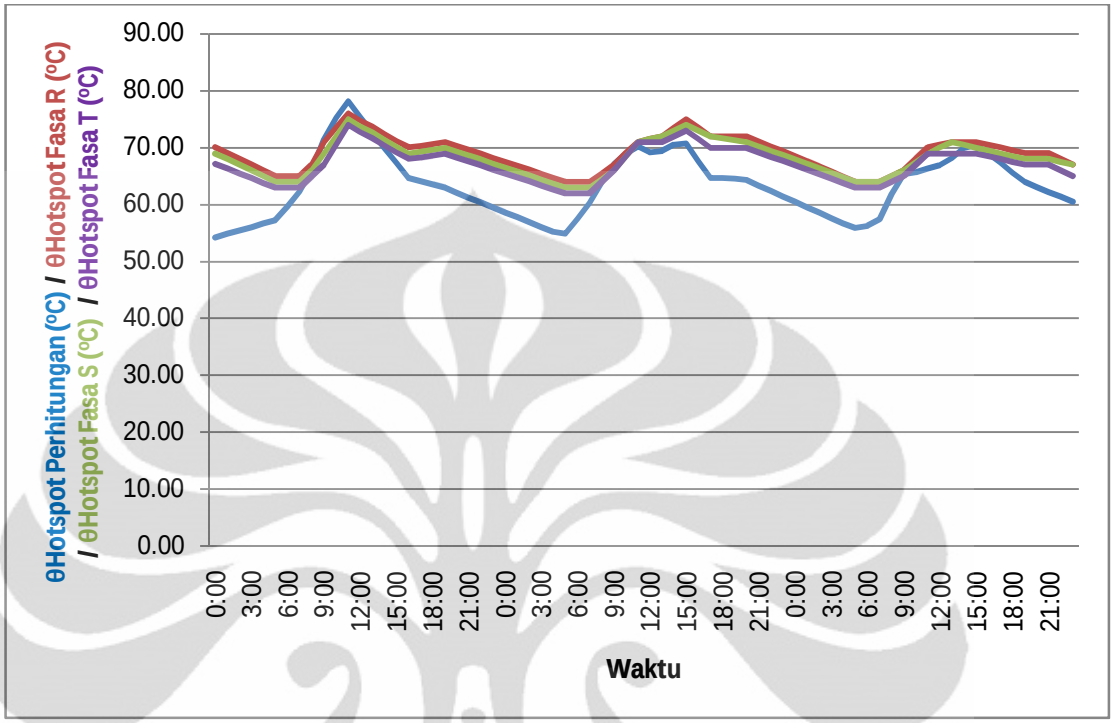
Dengan menggunakan perhitungan tersebut diperoleh nilai-nilai sebagai berikut :

Tabel 4.7 Data Olahan Perbandingan Minyak Puncak Pengukuran dan Perhitungan

Pukul	IEEE	Pengukuran					
		Fasa R	%E	Fasa S	%E	Fasa T	%E
	θTO	**θTO,S**		**θTO,S**		**θTO,S**	
0:00	56.46	70	23.98%	69	22.21%	67	18.96%
1:00	56.60	69	21.90%	68	20.13%	66	17.19%
2:00	56.74	68	19.84%	67	18.08%	66	15.43%
3:00	56.87	67	17.80%	66	16.05%	65	13.70%
4:00	57.00	66	15.79%	65	14.04%	64	11.99%
5:00	57.20	65	13.63%	64	11.88%	63	10.13%
6:00	59.59	65	9.09%	64	7.41%	63	5.73%
7:00	62.25	65	4.42%	64	2.81%	63	1.21%
8:00	66.11	67	1.34%	66	0.17%	65	1.68%
9:00	71.39	71	0.55%	69	3.35%	67	6.15%
10:00	75.14	74	2.19%	72	4.18%	71	6.18%
11:00	78.12	76	2.71%	75	3.99%	74	5.27%
12:00	75.39	75	0.78%	74	2.11%	73	3.43%
13:00	72.68	74	1.27%	73	0.10%	72	1.48%
14:00	69.98	72	3.47%	71	2.04%	70	0.61%
15:00	67.29	71	5.81%	70	4.33%	69	2.84%
16:00	64.64	70	8.29%	69	6.74%	68	5.20%
17:00	64.09	70	9.74%	69	8.18%	68	6.62%
18:00	63.54	71	11.21%	70	9.64%	69	8.06%
19:00	63.00	71	12.69%	70	11.10%	69	9.52%
20:00	62.31	70	12.82%	69	11.21%	68	9.61%
21:00	61.62	70	12.96%	69	11.33%	68	9.71%
22:00	60.92	69	13.10%	68	11.46%	67	9.82%
23:00	60.22	68	13.25%	67	11.59%	66	9.93%
0:00	59.52	68	13.41%	67	11.73%	66	10.05%
1:00	58.82	67	13.57%	66	11.87%	65	10.17%
2:00	58.12	66	13.74%	65	12.02%	64	10.30%
3:00	57.41	65	13.91%	64	12.17%	63	10.43%
4:00	56.71	65	14.09%	64	12.32%	63	10.56%
5:00	56.38	64	13.51%	63	11.74%	62	9.97%
6:00	58.12	64	10.12%	63	8.40%	62	6.68%
7:00	60.22	64	6.28%	63	4.61%	62	2.95%

8:00	63.80	66	2.66%	65	1.09%	64	0.31%
9:00	66.95	67	0.08%	66	1.41%	66	1.41%
10:00	68.90	69	0.15%	69	0.58%	69	0.58%
11:00	70.14	71	1.23%	71	1.23%	71	1.23%
12:00	69.15	72	3.40%	72	3.40%	71	2.68%
13:00	69.41	72	3.73%	72	3.73%	71	2.29%
14:00	70.52	74	4.23%	73	3.52%	72	2.10%
15:00	70.69	75	6.09%	74	4.68%	73	3.26%
16:00	67.56	74	8.80%	73	8.06%	72	5.83%
17:00	64.68	72	11.32%	72	11.32%	70	8.23%
18:00	64.62	72	11.41%	72	10.90%	70	8.32%
19:00	64.57	72	11.51%	71	10.47%	70	8.41%
20:00	64.25	72	12.06%	71	10.50%	70	8.95%
21:00	63.30	71	12.33%	70	10.93%	69	9.35%
22:00	62.35	70	12.62%	69	11.37%	68	9.77%
23:00	61.40	69	12.92%	69	11.83%	68	10.20%
0:00	60.45	68	13.23%	68	12.31%	67	10.65%
1:00	59.50	68	13.55%	67	12.80%	66	11.12%
2:00	58.55	67	13.87%	66	13.30%	65	11.59%
3:00	57.60	66	14.21%	66	13.82%	65	12.08%
4:00	56.65	65	14.55%	65	14.35%	64	12.59%
5:00	55.85	64	14.59%	64	14.59%	63	12.80%
6:00	56.17	64	13.94%	64	13.94%	63	12.16%
7:00	57.29	64	11.71%	64	11.71%	63	9.96%
8:00	61.81	65	5.16%	65	5.16%	64	3.55%
9:00	65.31	66	1.06%	66	1.06%	65	0.47%
10:00	65.61	68	3.65%	68	2.88%	67	2.12%
11:00	66.37	70	5.47%	69	3.97%	69	3.97%
12:00	66.85	71	5.47%	70	4.72%	69	3.22%
13:00	68.13	71	4.21%	71	4.21%	69	1.28%
14:00	69.96	71	1.49%	71	0.77%	69	1.37%
15:00	70.53	71	0.67%	70	0.75%	69	2.17%
16:00	68.95	71	2.25%	70	0.80%	69	0.65%
17:00	67.30	70	4.02%	69	2.53%	68	1.04%
18:00	65.58	70	5.98%	69	4.46%	68	2.93%
19:00	64.01	69	7.80%	68	6.24%	67	4.67%
20:00	63.10	69	9.35%	68	7.77%	67	6.18%
21:00	62.23	69	10.88%	68	9.27%	67	7.67%
22:00	61.35	68	10.85%	68	10.03%	66	7.59%
23:00	60.49	67	10.75%	67	10.75%	65	7.45%

Dari perhitungan di atas dapat diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar 4.8 Grafik perbandingan minyak pengukuran dan perhitungan terhadap waktu

Secara rata-rata, grafik perhitungan memiliki nilai di bawah nilai pengukuran, baik fasa R, S, dan T, walaupun nilai maksimum antara perhitungan dengan pengukuran tidak jauh berbeda. Faktor penting penyebab perbedaan ini adalah nilai suhu minyak puncak transformator yang diperoleh dengan melakukan perhitungan menggunakan data yang ada pada hari yang sama, sementara nilai untuk pengukuran merupakan akumulasi nilai dari hari-hari sebelumnya. Akibatnya adalah panas yang timbul oleh pembebanan serta suhu ambien pada hari sebelumnya akan memberikan efek pada pengukuran.

Faktor inilah yang mengakibatkan suhu hotspot transformator dengan menggunakan perhitungan jauh lebih kecil dibandingkan dengan suhu hotspot transformator dengan menggunakan pengukuran. Namun walaupun demikian error yang terjadi masih dapat ditoleransi karena nilai rata-rata error yang terjadi masih berkisar antara 8-9%.

4.4.2 Analisis Temperatur Hotspot Transformator dengan Metode Pengukuran dan Perhitungan

Dengan membandingkan metode perhitungan maka diperoleh error:

$$\%\epsilon = \frac{\theta Hpengukuran - \theta Hperhitungan}{\theta Hpengukuran} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{78.23 - 64.69}{64.69} \; x \; 100\%$$

$$= 20.93\%$$

Dengan menggunakan perhitungan tersebut diperoleh nilai-nilai seperti tertera pada tabel berikut berikut :

Tabel 4.8 Data Olahan Perbandingan Temperatur Hotspot Pengukuran dan Perhitungan

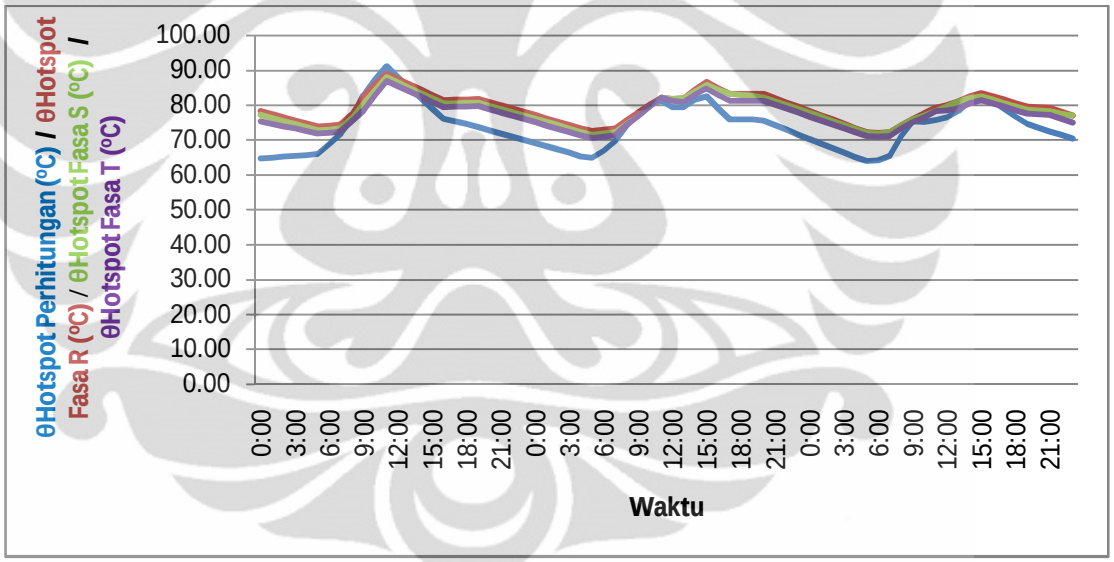
Pukul	IEEE	Pengukuran					
		Fasa R	%E	Fasa S	%E	Fasa T	%E
	θTO	θTO,S		θTO,S		θTO,S	
0:00	64.69	78.23	20.93%	77.23	20.93%	75.39	16.55%
1:00	64.96	77.36	19.08%	76.36	19.08%	74.69	14.98%
2:00	65.22	76.48	17.26%	75.48	17.26%	73.98	13.43%
3:00	65.48	75.60	15.47%	74.60	15.47%	73.27	11.90%
4:00	65.72	74.72	13.70%	73.72	13.70%	72.55	10.40%
5:00	66.07	73.87	11.80%	72.87	11.80%	71.87	8.77%
6:00	68.70	74.12	7.88%	73.12	7.88%	72.12	4.97%
7:00	71.73	74.48	3.84%	73.48	3.84%	72.48	1.05%
8:00	76.41	77.30	1.16%	76.30	1.16%	75.30	1.46%
9:00	82.87	82.48	0.47%	80.48	0.47%	78.48	5.30%
10:00	87.54	85.90	1.88%	84.40	1.88%	82.90	5.30%
11:00	91.13	89.01	2.32%	88.01	2.32%	87.01	4.52%
12:00	88.09	87.50	0.67%	86.50	0.67%	85.50	2.94%
13:00	85.07	86.00	1.09%	85.00	1.09%	84.00	1.26%
14:00	82.07	84.50	2.95%	83.50	2.95%	82.50	0.52%
15:00	79.09	83.00	4.95%	82.00	4.95%	81.00	2.42%
16:00	76.17	81.52	7.04%	80.52	7.04%	79.52	4.41%
17:00	75.37	81.61	8.28%	80.61	8.28%	79.61	5.63%
18:00	74.57	81.70	9.55%	80.70	9.55%	79.70	6.87%
19:00	73.79	81.78	10.83%	80.78	10.83%	79.78	8.12%
20:00	72.87	80.85	10.96%	79.85	10.96%	78.85	8.22%

21:00	71.94	79.92	11.10%	78.92	11.10%	77.92	8.32%
22:00	71.01	78.99	11.24%	77.99	11.24%	76.99	8.42%
23:00	70.08	78.05	11.39%	77.05	11.39%	76.05	8.53%
0:00	69.14	77.12	11.54%	76.12	11.54%	75.12	8.65%
1:00	68.20	76.18	11.70%	75.18	11.70%	74.18	8.77%
2:00	67.27	75.25	11.87%	74.25	11.87%	73.25	8.90%
3:00	66.33	74.31	12.04%	73.31	12.04%	72.31	9.03%
4:00	65.39	73.38	12.22%	72.38	12.22%	71.38	9.16%
5:00	64.97	72.59	11.73%	71.59	11.73%	70.59	8.65%
6:00	67.03	72.92	8.77%	71.92	8.77%	70.92	5.79%
7:00	69.61	73.39	5.43%	72.39	5.43%	71.39	2.56%
8:00	74.05	75.74	2.29%	74.74	2.29%	74.24	0.26%
9:00	77.87	77.92	0.07%	76.92	0.07%	76.92	1.22%
10:00	80.07	80.17	0.13%	79.67	0.13%	79.67	0.50%
11:00	81.27	82.13	1.06%	82.13	1.06%	82.13	1.06%
12:00	79.47	81.82	2.96%	81.82	2.96%	81.32	2.33%
13:00	79.40	82.00	3.26%	82.00	3.26%	81.00	2.00%
14:00	81.58	84.56	3.66%	84.06	3.66%	83.06	1.82%
15:00	82.46	86.76	5.22%	85.76	5.22%	84.76	2.80%
16:00	79.00	84.94	7.52%	84.44	7.52%	82.94	4.99%
17:00	75.89	83.22	9.65%	83.22	9.65%	81.22	7.01%
18:00	75.89	83.26	9.72%	82.93	9.72%	81.26	7.08%
19:00	75.88	83.31	9.79%	82.65	9.79%	81.31	7.16%
20:00	75.51	83.26	10.26%	82.26	10.26%	81.26	7.61%
21:00	74.21	82.02	10.52%	81.13	10.52%	80.13	7.97%
22:00	72.91	80.78	10.79%	80.01	10.79%	79.01	8.35%
23:00	71.61	79.54	11.08%	78.88	11.08%	77.88	8.75%
0:00	70.31	78.31	11.37%	77.75	11.37%	76.75	9.16%
1:00	69.01	77.07	11.68%	76.62	11.68%	75.62	9.59%
2:00	67.70	75.83	12.00%	75.49	12.00%	74.49	10.03%
3:00	66.40	74.59	12.32%	74.36	12.32%	73.36	10.48%
4:00	65.11	73.35	12.66%	73.24	12.66%	72.24	10.95%
5:00	64.02	72.17	12.73%	72.17	12.73%	71.17	11.17%
6:00	64.21	72.04	12.19%	72.04	12.19%	71.04	10.64%
7:00	65.52	72.23	10.24%	72.23	10.24%	71.23	8.71%
8:00	71.11	74.31	4.49%	74.31	4.49%	73.31	3.08%
9:00	75.29	75.98	0.92%	75.98	0.92%	74.98	0.41%
10:00	75.16	77.55	3.18%	77.05	3.18%	76.55	1.85%
11:00	75.67	79.30	4.80%	78.30	4.80%	78.30	3.48%
12:00	76.39	80.04	4.78%	79.54	4.78%	78.54	2.82%

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

13:00	78.23	81.10	3.67%	81.10	3.67%	79.10	1.11%
14:00	81.49	82.53	1.28%	82.03	1.28%	80.53	1.18%
15:00	82.99	83.46	0.57%	82.46	0.57%	81.46	1.84%
16:00	80.99	82.54	1.91%	81.54	1.91%	80.54	0.56%
17:00	78.88	81.59	3.43%	80.59	3.43%	79.59	0.89%
18:00	76.68	80.60	5.12%	79.60	5.12%	78.60	2.51%
19:00	74.69	79.68	6.68%	78.68	6.68%	77.68	4.01%
20:00	73.58	79.48	8.02%	78.48	8.02%	77.48	5.30%
21:00	72.53	79.30	9.34%	78.30	9.34%	77.30	6.58%
22:00	71.50	78.15	9.31%	77.65	9.31%	76.15	6.51%
23:00	70.51	77.01	9.23%	77.01	9.23%	75.01	6.39%

Dengan menggunakan data pada tabel di atas maka diperoleh grafik di bawah ini



Gambar4.9 Grafik perbandingan temperatur hotspot pengukuran dan perhitungan terhadap waktu

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa nilai antara suhu hotspot transformator dengan menggunakan metode perhitungan dan pengukuran adalah berbanding lurus. Hal ini dapat terlihat pada grafik, di mana saat grafik perhitungan naik mencapai puncak, maka grafik pengukuran juga mencapai puncaknya.

Secara rata-rata, grafik perhitungan memiliki nilai di bawah nilai pengukuran, baik fasa R, S, dan T, walaupun nilai maksimum antara perhitungan dengan pengukuran tidak jauh berbeda. Sama halnya dengan suhu minyak puncak faktor penting penyebab perbedaan ini adalah nilai hotspot transformator yang diperoleh dengan melakukan perhitungan menggunakan data yang ada pada hari yang sama, sementara nilai untuk pengukuran merupakan akumulasi nilai dari hari-hari sebelumnya. Akibatnya adalah panas yang timbul oleh pembebanan serta suhu ambien pada hari sebelumnya akan memberikan efek pada pengukuran.

Hal inilah yang mengakibatkan suhu hotspot transformator dengan menggunakan perhitungan jauh lebih kecil dibandingkan dengan suhu hotspot transformator dengan menggunakan pengukuran. Namun walaupun demikian error yang terjadi masih dapat ditoleransi karena nilai rata-rata error yang terjadi masih berkisar antara 6-8%.

4.5 Persentase Kenaikan Temperatur Hotspot terhadap Perubahan Parameter Hotspot

4.5.1 Variasi Beban dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap

Pada analisis ini akan dilakukan perbandingan antara data sebelumnya dengan data yang bebannya divariasikan. Hal ini dilakukan untuk melihat persentase perubahan kenaikan hotspot transformator dengan variasi perubahan beban yang diberikan.

Dalam analisis ini data yang diambil adalah beberapa sampel data dari data di atas.

Beban awal = 100 MVA

Beban akhir = 110 MVA

$$\%\epsilon = \frac{\text{Beban akhir} - \text{Beban awal}}{\text{Beban awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{110 - 110}{100} \; x \; 100\%$$

$$= 10\%$$

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

Pada kondisi kenaikan beban 10 %, maka perubahan hotspot yang diperoleh adalah

Hotspot awal = 64.69 ^{o}C

Hotspot akhir = 69.97 ^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Hotspot akhir} - \text{Hotspot awal}}{\text{Hotspot awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{69.97 - 64.69}{64.69} \; x \; 100\%$$

$$= 8.2\%$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama maka diperoleh nilai perubahan hotspot untuk perubahan beban sebesar 20% , 30%, 40% dan 50%.

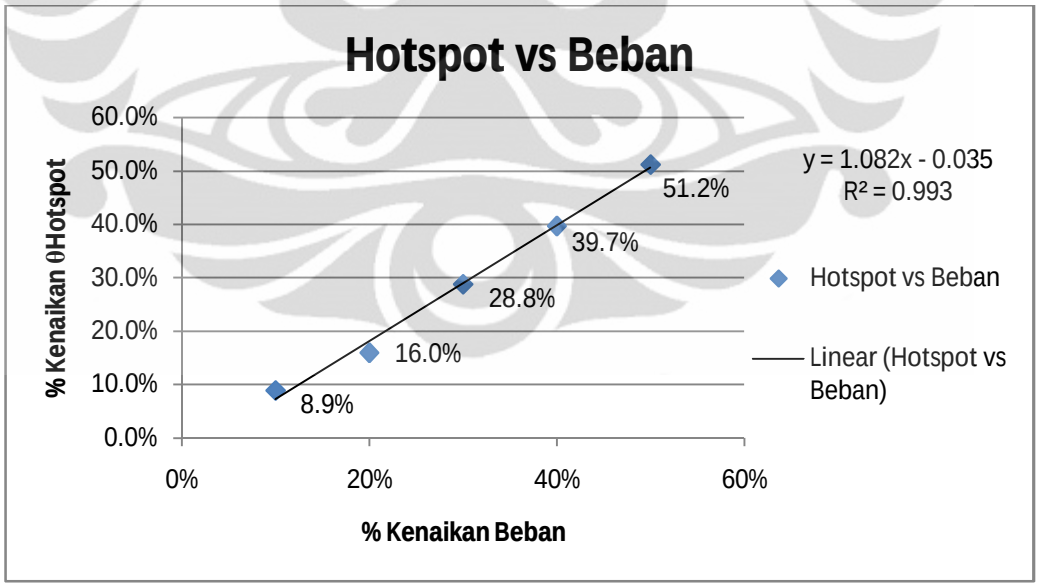
Tabel 4.9 Data Olahan Persentase Perbahan Beban terhadap Perubahan Hotspot

Sebelum		Sesudah		%Perubahan		Sesudah		%Perubahan		Sesudah		%Perubahan		Sesudah		%Perubahan		Sesudah		%Perubahan	
MVA	**θHS**	**MVA**	**θHS**	**%E**	**%E**	**MVA**	**θHS**	**%E**	**%E**	**MVA**	**θHS,P**	**%E**	**%E**	**MVA**	**θHS,P**	**%E**	**%E**	**MVA**	**θHS,P**	**%E**	**%E**
100	64.7	110	70.0	10%	8.2%	121	75.6	20%	16.8%	131	81.7	30%	26.3%	141	88.2	40%	36.3%	151	95.0	50%	46.8%
101	65.0	111	70.3	10%	8.3%	122	75.9	20%	16.9%	132	82.3	30%	26.6%	142	88.8	40%	36.7%	152	95.7	50%	47.4%
102	65.2	112	70.7	10%	8.4%	123	76.2	20%	16.9%	133	82.8	30%	26.9%	143	89.4	40%	37.1%	153	96.5	50%	47.9%
103	65.5	113	71.0	10%	8.4%	124	76.6	20%	16.9%	134	83.3	30%	27.2%	144	90.0	40%	37.5%	155	97.2	50%	48.4%
104	65.7	114	71.3	10%	8.5%	125	76.9	20%	17.0%	135	83.8	30%	27.5%	145	90.6	40%	37.9%	156	97.9	50%	48.9%
105	66.1	115	71.8	10%	8.6%	126	77.3	20%	17.0%	136	84.5	30%	27.8%	147	91.4	40%	38.4%	157	98.8	50%	49.5%
106	68.7	117	74.6	10%	8.5%	128	80.1	20%	16.5%	138	87.6	30%	27.5%	149	94.8	40%	38.0%	159	102.3	50%	49.0%
108	71.7	119	77.8	10%	8.5%	130	83.3	20%	16.1%	140	91.4	30%	27.4%	151	98.8	40%	37.8%	162	106.7	50%	48.8%
112	76.4	124	83.1	10%	8.7%	135	88.4	20%	15.6%	146	97.8	30%	28.0%	157	105.9	40%	38.6%	169	114.5	50%	49.8%
120	82.9	132	90.3	10%	9.0%	144	95.4	20%	15.1%	156	106.8	30%	28.9%	169	115.9	40%	39.8%	181	125.4	50%	51.3%
126	87.5	138	95.6	10%	9.2%	151	100.4	20%	14.7%	164	113.4	30%	29.6%	176	123.2	40%	40.8%	189	133.5	50%	52.5%
131	91.1	145	99.6	10%	9.3%	158	104.3	20%	14.5%	171	118.3	30%	29.9%	184	128.6	40%	41.1%	197	139.4	50%	53.0%
130	88.1	143	96.3	10%	9.4%	155	101.1	20%	14.8%	168	114.6	30%	30.1%	181	124.7	40%	41.5%	194	135.2	50%	53.5%
128	85.1	141	93.1	10%	9.5%	153	98.0	20%	15.2%	166	111.0	30%	30.4%	179	120.7	40%	41.9%	192	131.1	50%	54.1%
126	82.1	139	89.9	10%	9.6%	151	94.9	20%	15.6%	164	107.3	30%	30.8%	176	116.9	40%	42.4%	189	126.9	50%	54.7%
124	79.1	137	86.7	10%	9.7%	149	91.7	20%	16.0%	162	103.7	30%	31.1%	174	113.0	40%	42.9%	186	122.9	50%	55.3%
122	76.2	135	83.6	10%	9.8%	147	88.7	20%	16.4%	159	100.2	30%	31.6%	171	109.3	40%	43.5%	184	118.9	50%	56.1%
121	75.4	133	82.7	10%	9.7%	145	87.8	20%	16.5%	157	98.9	30%	31.2%	169	107.8	40%	43.0%	181	117.1	50%	55.4%
119	74.6	131	81.7	10%	9.6%	143	86.9	20%	16.5%	155	97.6	30%	30.8%	167	106.2	40%	42.5%	179	115.4	50%	54.8%
118	73.8	130	80.8	10%	9.5%	142	86.0	20%	16.5%	153	96.3	30%	30.4%	165	104.7	40%	41.9%	177	113.7	50%	54.1%
116	72.9	128	79.7	10%	9.4%	140	84.9	20%	16.6%	151	94.8	30%	30.2%	163	103.1	40%	41.6%	175	111.9	50%	53.6%

115	71.9	127	78.6	10%	9.3%	138	83.9	20%	16.6%	150	93.4	30%	29.9%	161	101.5	40%	41.1%	173	110.1	50%	53.1%
114	71.0	125	77.5	10%	9.2%	136	82.9	20%	16.7%	148	92.0	30%	29.6%	159	99.9	40%	40.7%	170	108.3	50%	52.5%
112	70.1	123	74.8	10%	6.8%	134	78.8	20%	12.4%	146	85.3	30%	21.8%	157	91.1	40%	30.0%	168	97.2	50%	38.7%
131	91.1	145	99.6	10%	9.8%	158	104.3	20%	17.0%	171	118.3	30%	32%	184	128.6	40%	43.5%	197	139.4	50%	56.1%
100	64.7	110	70.0	10%	6.8%	121	75.6	20%	12.4%	131	81.7	30%	22%	141	88.2	40%	30.0%	151	95.0	50%	38.7%
115	74.6	127	81.3	10%	8.9%	138	86.5	20%	16.0%	150	96.2	30%	29%	161	104.4	40%	39.7%	173	113.0	50%	51.2%

Tabel di atas merupakan table perubahan nilai hotspot dengan perubahan nilai beban sebesar 10%, 20%,30%, 40% dan 50%. Hal ini dilakukan untuk melihat persentase perubahan hotspot transformator dengan perubahan nilai beban dari data semula. Dari perhitungan yang dilakukan diperoleh bahwa untuk setiap kenaikan 10% dari beban semula, maka kenaikan hotspot transformator adalah sekitar 10.2% dari keadaan semula. Dalam hal ini, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai beban akan sangat berpengaruh terhadap perubahan nilai hotspot transformator.

Di bawah ini merupakan grafik hubungan antara persentase kenaikan beban dengan persentase perubahan hotspot transformator.



Gambar 4.10 Grafik perubahan beban terhadap perubahan hotspot

Dari grafik tersebut diperoleh hubungan garis y = 1.082x – 0.035. Di mana y=perubahan hotspot dan x=perubahan beban.

4.5.2 Variasi Temperatur Ambien dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap

Pada analisis ini dilakukan perbandingan antara data sebelumnya dengan data suhu ambien yang divariasikan. Hal ini dilakukan untuk melihat persentase perubahan kenaikan hotspot transformator dengan variasi suhu ambien yang diberikan. Di bawah ini merupakan tabel hasil perhitungan dengan perubahan suhu ambien.

Suhu ambien awal = 24.79 ^{o}C

Suhu ambien akhir = 27.27^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Suhu akhir} - \text{Suhu awal}}{\text{Suhu awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{27.27 - 24.79}{24.79} \; x \; 100\%$$

$$= 10\%$$

Pada kondisi kenaikan beban 10 %, maka perubahan hotspot yang diperoleh adalah

Hotspot awal = 64.69 ^{o}C

Hotspot akhir = 67.17 ^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Hotspot akhir} - \text{Hotspot awal}}{\text{Hotspot awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{67.17 - 64.69}{64.69} \; x \; 100\%$$

$$= 3.8\%$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama maka diperoleh nilai perubahan hotspot untuk perubahan suhu ambien sebesar 20% , 30%, 40% dan 50%. Di bawah ini merupakan tabel data perhitungan yang diperoleh yaitu :

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

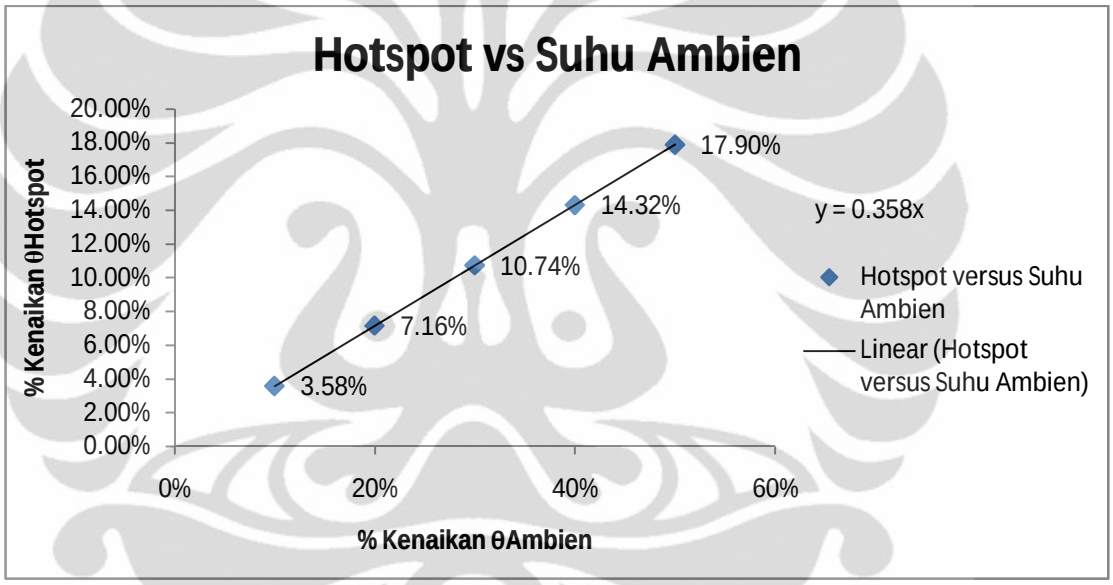
Tabel 4.10 Data Olahan Persentase Perubahan Suhu Ambien terhadap Perubahan Hotspot

Pukul	θA	θHS,P	1.1θA	θHS,P	%E	1.2θA	θHS,P	%E	1.3θA	θHS,P	%E	1.4θA	θHS,P	%E	1.5θA	θHS,P	%E
0:00	24.79	64.69	27.27	67.17	3.8%	29.75	69.65	7.7%	32.23	72.13	11.5%	34.70	74.60	15.3%	37.18	77.08	19.2%
1:00	24.61	64.96	27.07	67.42	3.8%	29.53	69.88	7.6%	31.99	72.34	11.4%	34.46	74.80	15.2%	36.92	77.27	18.9%
2:00	24.43	65.22	26.88	67.67	3.7%	29.32	70.11	7.5%	31.76	72.55	11.2%	34.21	75.00	15.0%	36.65	77.44	18.7%
3:00	24.26	65.48	26.68	67.90	3.7%	29.11	70.33	7.4%	31.53	72.75	11.1%	33.96	75.18	14.8%	36.38	77.60	18.5%
4:00	24.08	65.72	26.49	68.13	3.7%	28.89	70.53	7.3%	31.30	72.94	11.0%	33.71	75.35	14.7%	36.12	77.76	18.3%
5:00	23.90	66.07	26.29	68.46	3.6%	28.68	70.85	7.2%	31.07	73.24	10.9%	33.46	75.63	14.5%	35.85	78.02	18.1%
6:00	25.65	68.70	28.22	71.27	3.7%	30.78	73.83	7.5%	33.35	76.40	11.2%	35.91	78.96	14.9%	38.48	81.53	18.7%
7:00	27.40	71.73	30.14	74.47	3.8%	32.88	77.21	7.6%	35.62	79.95	11.5%	38.36	82.69	15.3%	41.10	85.43	19.1%
8:00	29.16	76.41	32.07	79.33	3.8%	34.99	82.24	7.6%	37.90	85.16	11.4%	40.82	88.08	15.3%	43.74	90.99	19.1%
9:00	31.40	82.87	34.54	86.01	3.8%	37.68	89.15	7.6%	40.82	92.29	11.4%	43.96	95.43	15.2%	47.10	98.57	18.9%
10:00	32.78	87.54	36.06	90.82	3.7%	39.34	94.10	7.5%	42.62	97.38	11.2%	45.90	100.66	15.0%	49.18	103.9	18.7%
11:00	34.17	91.13	37.58	94.55	3.7%	41.00	97.96	7.5%	44.42	101.4	11.2%	47.83	104.80	15.0%	51.25	108.2	18.7%
12:00	32.24	88.09	35.46	91.32	3.7%	38.69	94.54	7.3%	41.91	97.76	11.0%	45.14	100.99	14.6%	48.36	104.2	18.3%
13:00	30.31	85.07	33.34	88.11	3.6%	36.38	91.14	7.1%	39.41	94.17	10.7%	42.44	97.20	14.3%	45.47	100.2	17.8%
14:00	28.39	82.07	31.23	84.91	3.5%	34.06	87.75	6.9%	36.90	90.59	10.4%	39.74	93.43	13.8%	42.58	96.27	17.3%
15:00	26.46	79.09	29.11	81.74	3.3%	31.75	84.38	6.7%	34.40	87.03	10.0%	37.04	89.68	13.4%	39.69	92.32	16.7%
16:00	24.53	76.17	26.99	78.62	3.2%	29.44	81.07	6.4%	31.89	83.53	9.7%	34.35	85.98	12.9%	36.80	88.43	16.1%
17:00	24.62	75.37	27.08	77.83	3.3%	29.55	80.30	6.5%	32.01	82.76	9.8%	34.47	85.22	13.1%	36.93	87.68	16.3%
18:00	24.71	74.57	27.18	77.04	3.3%	29.65	79.52	6.6%	32.12	81.99	9.9%	34.60	84.46	13.3%	37.07	86.93	16.6%
19:00	24.80	73.79	27.28	76.27	3.4%	29.76	78.75	6.7%	32.24	81.23	10.1%	34.72	83.71	13.4%	37.20	86.19	16.8%
20:00	24.70	72.87	27.17	75.34	3.4%	29.64	77.81	6.8%	32.11	80.28	10.2%	34.58	82.75	13.6%	37.05	85.22	16.9%
21:00	24.60	71.94	27.06	74.40	3.4%	29.52	76.86	6.8%	31.98	79.32	10.3%	34.44	81.78	13.7%	36.90	84.24	17.1%
22:00	24.50	71.01	26.95	73.46	3.5%	29.40	75.91	6.9%	31.85	78.36	10.4%	34.30	80.81	13.8%	36.75	83.26	17.3%
23:00	24.40	70.08	26.84	72.52	3.5%	29.28	74.96	7.0%	31.72	77.40	10.4%	34.16	79.84	13.9%	36.60	82.28	17.4%
MAX	34.17	91.13	37.58	94.55	3.8%	41.00	97.96	7.7%	44.42	101.4	11.5%	47.83	104.80	15.3%	51.25	108.2	19.2%
MIN	23.90	64.69	26.29	67.17	3.2%	28.68	69.65	6.4%	31.07	72.13	9.7%	33.46	74.60	12.9%	35.85	77.08	16.1%
RATA2	26.70	74.61	29.37	77.28	3.6%	32.04	79.95	7.2%	34.71	82.62	10.7%	37.39	85.29	14.3%	40.06	87.96	17.9%

Tabel di atas merupakan tabel perubahan nilai hotspot dengan perubahan suhu ambien sebesar 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Hal ini dilakukan untuk melihat persentase perubahan hotspot transformator dengan perubahan nilai suhu ambien dari data semula. Dari perhitungan yang dilakukan diperoleh bahwa untuk setiap kenaikan 10% dari beban semula, maka kenaikan hotspot transformator adalah sekitar 3.58%.

Dalam hal ini, dapat disimpulkan bahwa perubahan nilai suhu ambien memiliki pengaruh yang lebih kecil atas perubahan nilai suhu hotspot transformator bila dibandingkan dengan perubahan beban. Hal ini sesuai dengan analisis sebelumnya bahwa ketika suhu ambien naik, tetapi beban turun, maka suhu hotspot transformator cenderung naik oleh karena pengaruh perubahan beban lebih besar dari pengaruh perubahan suhu ambien.

Di bawah ini merupakan grafik hubungan antara persentase kenaikan suhu ambien dengan persentase perubahan hotspot transformator.



Gambar 4.11 Grafik perubahan suhu ambien terhadap perubahan hotspot

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa hubungan antara suhu hotspot transformator dengan suhu ambien adalah linear. Fungsi grafik di atas adalah y= 0.0358x, di mana y=perubahan hotspot dan x=perubahan suhu ambien.

4.5.3 Variasi Temperatur Minyak Puncak dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap

Suhu minyak puncak awal = 24.79 ^{o}C

Suhu minyak puncak akhir = 27.27^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Suhu akhir} - \text{Suhu awal}}{\text{Suhu awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{62.11 - 56.46}{56.46} \; x \; 100\%$$

$$= 10\%$$

Pada kondisi kenaikan beban 10 %, maka perubahan hotspot yang diperoleh adalah

Hotspot awal = 64.69 ^{o}C

Hotspot akhir = 67.17 ^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Hotspot akhir} - \text{Hotspot awal}}{\text{Hotspot awal}} \; x \; 100\%$$

$$= \frac{70.33 - 64.69}{64.69} \; x \; 100\%$$

$$= 8.7\ \%$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama maka diperoleh nilai perubahan hotspot untuk perubahan minyak puncak sebesar 20% , 30%, 40% dan 50%. Di bawah ini merupakan tabel data perhitungan yang diperoleh yaitu :

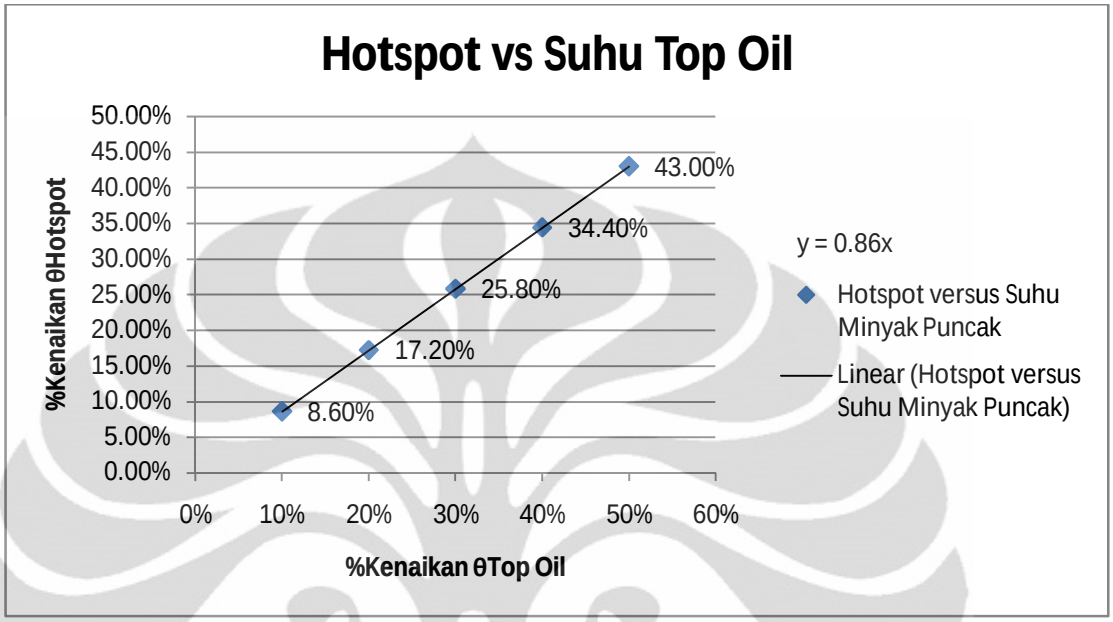
Tabel 4.11 Data Olahan Persentase Perubahan Suhu Minyak Puncak terhadap Perubahan Hotspot

Pukul	θTO	θHS,P	1.1θTO	θHS,P	%E	1.2θTO	θHS,P	%E	1.3θTO	θHS,P	%E	1.4θTO	θHS,P	%E	1.5θTO	θHS,P	%E
0:00	56.46	64.69	62.11	70.33	8.7%	67.75	75.98	17.5%	73.40	81.63	26.2%	79.04	87.27	34.9%	84.69	92.92	43.6%
1:00	56.60	64.96	62.27	70.62	8.7%	67.93	76.28	17.4%	73.59	81.94	26.1%	79.25	87.60	34.9%	84.91	93.26	43.6%
2:00	56.74	65.22	62.42	70.90	8.7%	68.09	76.57	17.4%	73.77	82.25	26.1%	79.44	87.92	34.8%	85.11	93.59	43.5%
3:00	56.87	65.48	62.56	71.16	8.7%	68.25	76.85	17.4%	73.94	82.54	26.1%	79.62	88.22	34.7%	85.31	93.91	43.4%
4:00	57.00	65.72	62.70	71.42	8.7%	68.40	77.12	17.3%	74.10	82.82	26.0%	79.80	88.52	34.7%	85.50	94.22	43.4%
5:00	57.20	66.07	62.92	71.79	8.7%	68.64	77.52	17.3%	74.37	83.24	26.0%	80.09	88.96	34.6%	85.81	94.68	43.3%
6:00	59.59	68.70	65.54	74.66	8.7%	71.50	80.62	17.3%	77.46	86.58	26.0%	83.42	92.54	34.7%	89.38	98.50	43.4%

7:00	62.25	71.73	68.47	77.95	8.7%	74.70	84.18	17.4%	80.92	90.40	26.0%	87.15	96.63	34.7%	93.37	102.85	43.4%
8:00	66.11	76.41	72.72	83.02	8.7%	79.33	89.64	17.3%	85.95	96.25	26.0%	92.56	102.86	34.6%	99.17	109.47	43.3%
9:00	71.39	82.87	78.53	90.01	8.6%	85.67	97.15	17.2%	92.81	104.29	25.8%	99.95	111.43	34.5%	107.09	118.57	43.1%
10:00	75.14	87.54	82.66	95.06	8.6%	90.17	102.57	17.2%	97.69	110.09	25.8%	105.20	117.60	34.3%	112.71	125.11	42.9%
11:00	78.12	91.13	85.93	98.94	8.6%	93.74	106.75	17.1%	101.55	114.56	25.7%	109.36	122.38	34.3%	117.17	130.19	42.9%
12:00	75.39	88.09	82.93	95.63	8.6%	90.47	103.17	17.1%	98.01	110.71	25.7%	105.54	118.25	34.2%	113.08	125.79	42.8%
13:00	72.68	85.07	79.94	92.34	8.5%	87.21	99.61	17.1%	94.48	106.88	25.6%	101.75	114.14	34.2%	109.01	121.41	42.7%
14:00	69.98	82.07	76.97	89.07	8.5%	83.97	96.07	17.1%	90.97	103.07	25.6%	97.97	110.06	34.1%	104.96	117.06	42.6%
15:00	67.29	79.09	74.02	85.82	8.5%	80.75	92.55	17.0%	87.47	99.28	25.5%	94.20	106.01	34.0%	100.93	112.74	42.5%
16:00	64.64	76.17	71.11	82.63	8.5%	77.57	89.09	17.0%	84.03	95.56	25.5%	90.50	102.02	33.9%	96.96	108.49	42.4%
17:00	64.09	75.37	70.50	81.78	8.5%	76.91	88.19	17.0%	83.32	94.60	25.5%	89.73	101.01	34.0%	96.14	107.42	42.5%
18:00	63.54	74.57	69.90	80.93	8.5%	76.25	87.28	17.0%	82.61	93.64	25.6%	88.96	99.99	34.1%	95.32	106.34	42.6%
19:00	63.00	73.79	69.31	80.09	8.5%	75.61	86.39	17.1%	81.91	92.69	25.6%	88.21	98.99	34.2%	94.51	105.29	42.7%
20:00	62.31	72.87	68.54	79.10	8.6%	74.77	85.33	17.1%	81.01	91.56	25.7%	87.24	97.79	34.2%	93.47	104.02	42.8%
21:00	61.62	71.94	67.78	78.10	8.6%	73.94	84.26	17.1%	80.10	90.42	25.7%	86.26	96.59	34.3%	92.43	102.75	42.8%
22:00	60.92	71.01	67.01	77.10	8.6%	73.10	83.19	17.2%	79.20	89.28	25.7%	85.29	95.38	34.3%	91.38	101.47	42.9%
23:00	60.22	70.08	66.24	76.10	8.6%	72.27	82.12	17.2%	78.29	88.14	25.8%	84.31	94.16	34.4%	90.33	100.19	43.0%
MAX	78.12	91.13	85.93	98.94	8.7%	93.74	106.75	17.5%	101.55	114.56	26.2%	109.36	122.38	34.9%	117.17	130.19	43.6%
MIN	56.46	64.69	62.11	70.33	8.5%	67.75	75.98	17.0%	73.40	81.63	25.5%	79.04	87.27	33.9%	84.69	92.92	42.4%
RATA2	64.13	74.61	70.54	81.02	8.6%	76.96	87.44	17.2%	83.37	93.85	25.8%	89.78	100.26	34.4%	96.20	106.68	43.0%

Tabel di atas merupakan tabel perubahan nilai hotspot dengan perubahan suhu minyak puncak (top oil) sebesar 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Hal ini dilakukan untuk melihat persentase perubahan hotspot transformator akibat perubahan suhu minyak puncak. Dari perhitungan yang dilakukan diperoleh bahwa untuk setiap kenaikan 10% dari beban semula, maka kenaikan hotspot transformator adalah sekitar 8.6%. Dari persentase tersebut dapat dilihat bahwa suhu minyak puncak dan beban memiliki pengaruh yang hampir sama. Oleh karena itu ketika minyak puncak naik dan suhu ambien turun, maka suhu hotspot transformator akan cenderung naik. Hal ini sesuai dengan analisis sebelumnya pada grafik perubahan suhu minyak puncak terhadap suhu hotspot transformator.

Di bawah ini merupakan grafik hubungan antara persentase kenaikan suhu ambien dengan persentase perubahan hotspot transformator.



Gambar 4.12 Grafik perubahan suhu minyak puncak terhadap perubahan hotspot

Dari grafik di atas dapat dilihat bahwa hubungan antara suhu hotspot transformator dengan suhu minyak puncak adalah linear. Fungsi grafik di atas adalah y=– 0.86x, di mana y=perubahan hotspot dan x=perubahan suhu minyak puncak.

4.5.4 Variasi Tipe Pendingin Transformator dengan Menjaga Parameter lainnya Tetap

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui tipe pendingin yang menghasilkan nilai suhu hotspot transformator yang paling kecil. Untuk itu dilakukan perhitungan dengan mengganti konstanta m dan n sesuai dengan kelas pendingin masing-masing. Di bawah ini merupakan tabel perhitungan hotspot sesuai dengan kelas pendingin transformator masing-masing.

Kelas pendingin awal OA ; m=0.8 dan n=0.8

Kelas pendingin akhir FA ; m=0.8 dan n=0.9

Hotspot awal = 66.57^{o}C

Hotspot akhir = 64.69 ^{o}C

$$\%\epsilon = \frac{\text{Hotspot akhir} - \text{Hotspot awal}}{\text{Hotspot awal}} \; x \; 100\%$$

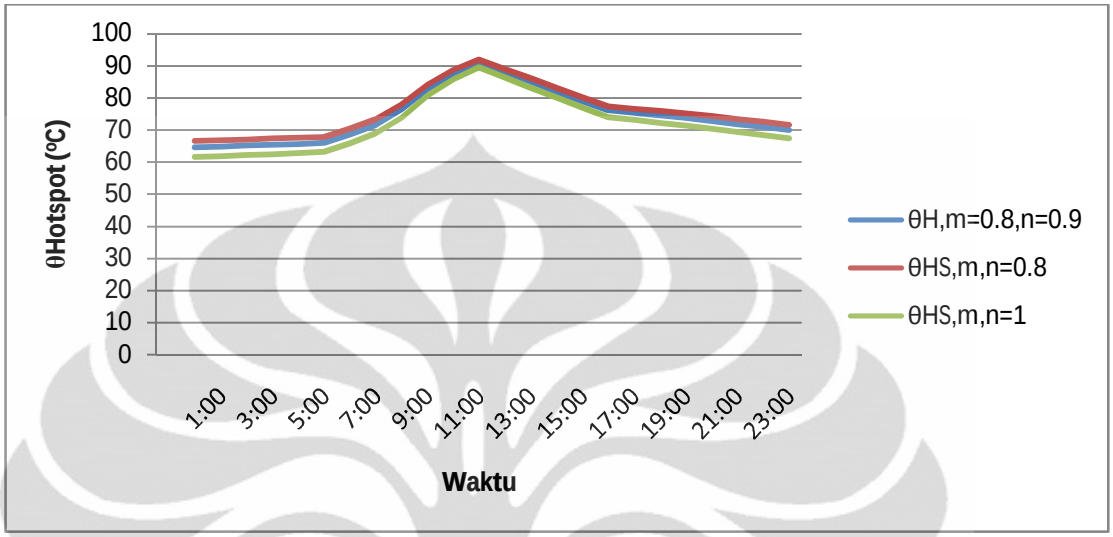
$$= \frac{66.57 - 64.69}{64.69} \; x \; 100\% = 2.9\%$$

Dengan menggunakan perhitungan tersebut maka didapat nilai pada tabel berikut :

Tabel 4.12 Data Olahan Persentase Perubahan Eksponen Kelas Pendingin Transformator terhadap Perubahan Hotspot

		m=0.8 dan n=0.9					m=0.8 dan n=0.8					m=1 dan n=1				
Pukul	**MVA**	**θA**	**ΔθH**	**ΔθTO**	**θTO**	**θHS,P**	**ΔθH**	**ΔθTO**	**θTO**	**θHS,P**	**%E**	**ΔθH**	**ΔθTO**	**θTO**	**θHS,P**	**%E**
0:00	100	24.79	8.23	31.67	56.46	64.69	8.72	33.06	57.85	66.57	2.90%	7.43	29.37	54.16	61.59	4.79%
1:00	101	24.61	8.36	31.99	56.60	64.96	8.84	33.37	57.98	66.82	2.87%	7.56	29.72	54.33	61.89	4.73%
2:00	102	24.43	8.48	32.31	56.74	65.22	8.96	33.67	58.10	67.07	2.83%	7.69	30.05	54.49	62.18	4.67%
3:00	103	24.26	8.60	32.62	56.87	65.48	9.08	33.97	58.22	67.30	2.79%	7.82	30.38	54.64	62.45	4.61%
4:00	104	24.08	8.72	32.92	57.00	65.72	9.19	34.25	58.33	67.53	2.75%	7.94	30.70	54.78	62.72	4.56%
5:00	105	23.90	8.87	33.30	57.20	66.07	9.34	34.63	58.53	67.87	2.72%	8.10	31.11	55.01	63.11	4.48%
6:00	106	25.65	9.12	33.94	59.59	68.70	9.58	35.23	60.88	70.46	2.56%	8.36	31.79	57.44	65.80	4.23%
7:00	108	27.40	9.48	34.85	62.25	71.73	9.94	36.13	63.53	73.47	2.43%	8.74	32.77	60.17	68.91	3.93%
8:00	112	29.16	10.30	36.96	66.11	76.41	10.75	38.18	67.33	78.08	2.18%	9.61	35.06	64.21	73.82	3.39%
9:00	120	31.40	11.48	39.99	71.39	82.87	11.86	41.01	72.41	84.27	1.69%	10.88	38.37	69.77	80.66	2.67%
10:00	126	32.78	12.40	42.36	75.14	87.54	12.73	43.24	76.02	88.75	1.38%	11.89	40.99	73.77	85.66	2.15%
11:00	131	34.17	13.01	43.95	78.12	91.13	13.26	44.60	78.77	92.03	0.99%	12.57	42.76	76.92	89.49	1.80%
12:00	130	32.24	12.70	43.15	75.39	88.09	12.97	43.86	76.10	89.07	1.10%	12.23	41.87	74.11	86.33	2.00%
13:00	128	30.31	12.40	42.36	72.68	85.07	12.68	43.12	73.44	86.12	1.23%	11.89	40.99	71.30	83.19	2.21%
14:00	126	28.39	12.10	41.59	69.98	82.07	12.40	42.40	70.79	83.19	1.36%	11.56	40.13	68.52	80.08	2.43%
15:00	124	26.46	11.80	40.83	67.29	79.09	12.13	41.69	68.15	80.28	1.50%	11.24	39.29	65.75	76.99	2.65%
16:00	122	24.53	11.52	40.11	64.64	76.17	11.86	41.02	65.55	77.42	1.64%	10.93	38.50	63.03	73.97	2.89%
17:00	121	24.62	11.28	39.47	64.09	75.37	11.63	40.42	65.04	76.67	1.73%	10.67	37.80	62.42	73.09	3.03%
18:00	119	24.71	11.03	38.83	63.54	74.57	11.39	39.82	64.53	75.93	1.82%	10.40	37.10	61.81	72.21	3.17%
19:00	118	24.80	10.78	38.20	63.00	73.79	11.16	39.23	64.03	75.20	1.91%	10.13	36.41	61.21	71.35	3.31%
20:00	116	24.70	10.55	37.61	62.31	72.87	10.94	38.68	63.38	74.32	1.99%	9.88	35.77	60.47	70.35	3.45%
21:00	115	24.60	10.32	37.02	61.62	71.94	10.72	38.11	62.71	73.44	2.08%	9.64	35.12	59.72	69.36	3.59%
22:00	114	24.50	10.09	36.42	60.92	71.01	10.50	37.55	62.05	72.55	2.17%	9.39	34.47	58.97	68.36	3.73%
23:00	112	24.40	9.85	35.82	60.22	70.08	10.28	36.98	61.38	71.66	2.26%	9.14	33.82	58.22	67.36	3.87%

Dengan menggunakan data tabel di atas diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar 4.13 Grafik perbandingan eksponen kelas pendingin transformator terhadap perubahan hotspot

Dari grafik tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan perhitungan diperoleh nilai hotspot transformator terkecil saat eksponen m dan n bernilai masing-masing 1. Sebaliknya hotspot paling tinggi terjadi saat eksponen m dan n bernilai masing-masing 0.8. Hal ini berarti bahwa transformator dengan kelas pendingin FOA / FOW secara langsung merupakan kelas pendingin yang paling baik sementara kelas pendingin OA merupakan kelas pendingin terburuk.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

BAB 5

KESIMPULAN

1. Kenaikan beban sebesar 10% mengakibatkan suhu hotspot trafo mengalami kenaikan sebesar 10.2%
2. Kenaikan suhu lingkungan sebesar 10% mengakibatkan suhu hotspot trafo mengalami kenaikan sebesar 3.58%
3. Kenaikan suhu minyak puncak sebesar 10% mengakibatkan kenaikan suhu hotspot trafo sebesar 8.6 %
4. Beban dan suhu minyak puncak memiliki pengaruh yang lebih besar dalam kenaikan suhu hotspot trafo jika dibandingkan dengan suhu lingkungan. Sehingga walaupun suhu lingkungan mengalami penurunan, tetapi beban dan suhu minyak puncak mengalami kenaikan, maka suhu hotspot trafo akan mengalami kenaikan..
5. Tipe kelas pendingin trafo FOA / FOW secara langsung merupakan kelas pendingin yang paling baik sementara kelas pendingin OA merupakan kelas pendingin terburuk. Hal ini terbukti dengan nilai hotspot yang dihasilkan, yaitu FOA/FOW secara langsung menghasilkan 3.43% lebih dari kecil dari OA, sementara FOA/FOW tidak langsung menghasilkan 2.04% lebih kecil dari OA.

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

DAFTAR PUSTAKA

Chapman, Stphen J. 2002. Electric Machinery and Power System Fundamentals. Mc Graw Hill. New York.

Girgis, S. Ramsis dkk. 2002. Calculation of Core Hot-Spot Temperature in Power and Distribution Transformers . IEEE.

Hardityo, Rahmat. 2008. Deteksi Dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode Analisis Gas terlarut. Universitas Indonesia.

Heathcote, Martin J. CEng, FIEE. 1998. The J&P Transformer Book. Massachussets: Johnson & Phillips Ltd.

James, Harlow H. 2007.Electric Power Transformer Engineering. CRC Press.

Nordman, Hasse dan Susa Dejan. 2009. A Simple Model for Calculating Transformer Hot-Spot Temperature. IEEE.

Sigid, Purnama. Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok Semarang). Universitas Diponegoro, 2009.

PT PLN (Persero) P3B. 2003. Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga.

Rhamdani, Deni. 2008. Pengaruh Frekuensi Resonansi Terhadap Rating Tegangan Transformator Tegangan Tinggi. Universitas Indonesia.

Winders, John J . 2002. Power Transformers Priciples and Applications. Newyork : Marcel dekker.

http://winartosst.blogspot.com/2008/09/perpindahan-panas.html

Studi pengaruh ..., Andigan D. Sitompul, FT UI, 2011

DAFTAR ACUAN

[1] James, Harlow H. Electric Power Transformer Engineering. CRC Press, 2007.

[2] HarditYo, Rahmat. Deteksi Dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode Analisis Gasterlarut. Universitas Indonesia. 2008

[3] PT PLN (Persero) P3B. Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga. 2003.

[4] Rhamdani, Deni. Pengaruh Frekuensi Resonansi Terhadap Rating Tegangan Transformator Tegangan Tinggi. Universitas Indonesia. 2008

[5] Girgis, S. Ramsis dkk. Calculation of Core Hot-Spot Temperature in Power and Distribution Transformers . IEEE. 2002

[6] Sigid, Purnama. Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok Semarang). Universitas Diponegoro, 2009.