

**ANALISIS PERKIRAAN UMUR PEMAKAIAN
TRANSFORMATOR DAYA PADA GARDU INDUK SEI ROTAN
MENGUNAKAN METODE PENUAAN THERMAL RELATIF**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian dari
Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Jurusan Pendidikan Teknik Elektro



Oleh :

Muhammad Ridho Afandi Damanik

5171230007

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI MEDAN**

MEDAN

2022

HALAMAN JUDUL

**ANALISIS PERKIRAAN UMUR PEMAKAIAN TRANSFORMATOR DAYA
PADA GARDU INDUK SEI ROTAN MENGGUNAKAN METODE PENUAAN
THERMAL RELATIF**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian dari

Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Jurusan Pendidikan Teknik Elektro



Oleh

Muhammad Ridho Afandi Damanik

5171230007

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

JURUSAN PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI MEDAN

MEDAN

2022

HALAMAN PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Mahasiswanya : Muhammad Ridho Afandi Damanik

NIM : 5171230007

Jurusan : Pendidikan Teknik Elektro

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Perkiraan Umur Pemakaian Transformator Daya
Pada Gardu Induk Sei Rotan Menggunakan Metode Penuaan
Thermal Relatif

Dengan ini menyatakan bahwa Skripsi/Tugas Akhir ini merupakan hasil karya sendiri dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan disuatu perguruan tinggi, dan dalam skripsi ini tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran, dan apabila kelak dikemudian hari ternyata pernyataan ini tidak benar (skripsi plagiat), maka saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar kesarjanaan dan atau sanksi lain sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Medan, Januari 2022

Yang membuat pernyataan

M. Ridho Afandi Damanik

NIM: 5171230007



HALAMAN PENGESAHAN SKRIPSI

**ANALISIS PERKIRAAN UMUR PEMAKAIAN TRANSFORMATOR DAYA
PADA GARDU INDUK SEI ROTAN MENGGUNAKAN METODE PENUAAN
THERMAL RELATIF**

MUHAMMAD RIDHO AFANDI DAMANIK
NIM. 5171230007

Dipertahankan didepan Panitia Penguji Skripsi
Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan
Tanggal 25 Januari 2022

PANITIA PENGUJI

Nama	Tanda Tangan	Tanggal
Prof. Dr. Harun Sitompul, M.Pd. (Ketua)
Dr. Salman Bintang, M.Pd. (Sekretaris)
Dr. Agus Junaidi, S.T., M.T. (Pembimbing)
Dr. Adi Sutopo, M.Pd., M.T. (Penguji)
Rudi Salman, S.T., M.T. (Penguji)
Marwan Affandi, S.T., M.T. (Penguji)

Medan, Januari 2022
Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Harun Sitompul
NIP. 196007051986011001

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI

Judul Penelitian : Analisis Perkiraan Umur Pemakaian Transformator Daya
Pada Gardu Induk Sei Rotan Menggunakan Metode Penuaan
Thermal Relatif

Nama : Muhammad Ridho Afandi Damanik

NIM : 5171230007

Jurusan : Pendidikan Teknik Elektro

Prodi : Teknik Elektro

Menyetujui:
Dosen Pembimbing Skripsi

Mengetahui:
Ketua Prodi Teknik Elektro

Dr. Agus Junaidi, S.T., M.T.
NIP. 197706172005011001

Dr. Adi Sutopo, M.Pd., M.T
NIP. 196402201991031002

Tanggal Ujian: _____

ABSTRAK

Transformator daya pada saat keadaan berbeban maka akan meningkatkan temperatur atau suhu pada transformator itu sendiri, tentunya pada bagian dalam belitan dan juga pada minyak isolasi yang ada didalam transformator. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh suhu minyak isolasi terhadap sisa umur pada transformator, kemudian batasan suhu tertinggi pada belitan minyak isolasi transformator dan mengetahui sisa umur transformator daya. Menurut standar IEC No 354 dan SPLN No 17 A Tahun 1979 batasan suhu tertinggi dari suhu titik panas pada belitan minyak isolasi transformator adalah sebesar 98°C . Umur suatu transformator daya ditentukan oleh beberapa keadaan, salah satu keadaan yang sangat mempengaruhi umur transformator adalah besarnya suhu ketika sedang beroperasi, suhu lingkungan juga sangat berpengaruh terhadap kenaikan suhu transformator, semakin tinggi suhu lingkungan maka akan semakin pendek pulak umur dari transformator. Umur normal transformator daya menurut standar IEEE tahun 1999 dan standar IEC 354 adalah selama 20 tahun. Pada penelitian ini dilakukan analisis perkiraan umur transformator daya dengan menggunakan metode penuaan termal relatif, yang dimana pada pelaksanaannya dengan mengukur suhu *top oil* atas pada bagian konservator dan juga suhu *hot spot* pada belitan transformator dan juga besar beban yang dihasilkan oleh transformator daya saat beroperasi. Penelitian ini dilakukan di Gardu Induk Sei Rotan pada Transformator Daya 3. Hasil penelitian pada transformator daya 3 merk Schneider ini diperoleh sisa umur transformator daya 3 di Gardu Induk Sei Rotan dapat bertahan selama 5,1 tahun. Dengan faktor beban sebesar 0,73 pu dan total suhu hot spot sebesar $110,1^{\circ}\text{C}$ dengan suhu lingkungan sebesar 30°C .

Kata Kunci: Sisa umur transformator, suhu *top oil* tangki konservator, suhu *hot spot* belitan.

ABSTRACT

When the power transformer is under load, it will increase the temperature or temperature in the transformer itself, of course on the inside of the winding and also on the insulating oil in the transformer. This study aims to determine the effect of the insulating oil temperature on the remaining life of the power transformer, then the highest temperature limit on the transformer insulating oil winding and determine the remaining life of the power transformer. According to the IEC standard No. 354 and SPLN No. 17 A of 1979, the highest temperature limit of the hot spot temperature in the transformer insulating oil winding is 98°C. The age of a power transformer is determined by several circumstances, one of the conditions that greatly affects the age of the transformer is the temperature when it is operating, the ambient temperature also greatly affects the temperature rise of the transformer, the higher the ambient temperature, the shorter the lifespan of the transformer. The normal life of a power transformer according to the IEEE standard of 1999 and the IEC standard 354 is 20 years. In this study, an analysis of the estimated life of the power transformer was carried out using the relative thermal aging method, which in practice measured the upper oil temperature on the conservator and also the hot spots on the transformer windings and also the large load generated by the power transformer when operating. This research was conducted at the Sei Rotan Substation on a triple power transformer. The result of the research on power transformer 3 with the Schneider brand found that the remaining life of power transformer 3 at the Sei Rotan substation can last for 5,1 years. With a load factor of 0,73 pu and the hottest total temperature of 110,1 °C with an ambient temperature of 30 °C.

Keywords: Remaining Transformer Life, the upper oil temperature in the conservator tank, winding hot spot temperature.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT, yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Penyusunan skripsi ini untuk memenuhi salah satu syarat untuk menyelesaikan program pendidikan Sarjana Stara 1 (S1) Teknik Elektro Universitas Negeri Medan. Dalam kesempatan ini penulis mengambil topik skripsi dengan judul “Analisis Perkiraan Umur Pemakaian Transformator Daya Pada Gardu Induk Sei Rotan Menggunakan Metode Penuaan *Thermal* Relatif”.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penyusunan Skripsi ini tidak sedikit kesulitan dan hambatan yang dialami penulis, baik dalam segi isi, penulisan maupun kata-katanya yang tidak tersusun secara baik, namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak akhirnya penulisan Skripsi ini dapat diselesaikan.

Dalam kesempatan ini penulis ingin dengan hati yang tulus dan ikhlas, penulis ingin menyampaikan rasa syukur dan terimakasih serta penghargaan yang tak terhingga sedalam-dalamnya kepada Yth:

1. Prof. Dr. Harun Sitompul, M.Pd. Dosen Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan.
2. Dr. Zulkifli Matondang, M.Si Wakil Dekan Bidang Akademik Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan.
3. Dr. Salman Bintang, M.Pd. Ketua Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Medan.
4. Amirhud Dalimunthe, S.T., M.Kom. Sekretaris Jurusan Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Medan.
5. Dr. Adi Sutopo, M.Pd., M.T sebagai Dosen Pembimbing Akademik dan Ketua Prodi Teknik Elektro.

6. Dr. Agus Junaidi, S.T., M.T. Dosen pembimbing skripsi yang telah banyak membantu, mengarahkan, memimbing dan memberi dorongan sampai skripsi ini terwujud.
7. Seluruh Dosen Pengajar, Staff dan tata usaha di Prodi Teknik Elektro Universitas Negeri Medan.
8. Kedua orang tua Ayah dan Ibu yang telah merawat dan menjaga saya selama ini dan memberikan begitu banyak dorongan dan motivasi selama ini. Doa dan dukunganmu selalu menyertai langkahku.
9. Kepada semua pihak yang telah berkenan memberikan bantuan dan dorongan serta kerja sama yang baik, sehingga laporan ini selesai dengan baik.

Akhir kata penulis mengucapkan Alhamdulillah, semoga Allah selalu menyertai langkah kita semua, Aamiin. Dan mudah-mudahan Skripsi ini dapat bermanfaat dan dapat menambah wawasan berfikir serta sebagai bahan referensi dan informasi yang bermanfaat bagi pengetahuan.

Medan, 26 Oktober 2021

Penulis

M.Ridho Afandi Damanik

NIM: 5171230007

THE
Character Building
UNIVERSITY

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Transformator.....	5
2.2 Prinsip Kerja Transformator	7
2.3 Konstruksi Transformator	8
2.4 Bagian-bagian Transformator dan Fungsinya	10
2.5 Relai <i>Winding Temperature</i>	14
2.6 Isolasi Kumputan Transformator Daya Tegangan Tinggi	14
2.7 Jenis Pendingin Transformator Daya	15

2.8 Fungsi Minyak Transformator	17
2.9 Rangkaian Ekuivalen Transformator	18
2.10 Keadaan Transformator Tanpa Beban	20
2.11 Keadaan Transformator Berbeban	21
2.12 Ketidakseimbangan Beban	22
2.13 Jenis Kegagalan Trafo Akibat Kontaminasi Minyak Isolasi	23
2.14 Faktor Beban	24
2.15 Pengaruh Pembebanan Transformator	25
2.16 Rasio Rugi-rugi	25
2.17 Thermovisi	26
2.18 Suhu Lingkungan	27
2.19 Dampak Suhu Minyak Isolasi	27
2.20 Laju Penuaan <i>Thermal</i> Relatif	30
2.21 Penelitian Yang Relevan	31
2.22 Kerangka Berfikir	32

BAB III METODOLOGI PENELITIAN 34

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	34
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	34
3.3 Diagram Alir Penelitian	35
3.4 Diagram Alir Perhitungan Metode <i>Thermal</i> Relatif	36
3.5 Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data	36
3.6 Prosedur Pengukuran Suhu <i>Top Oil</i> dan Suhu <i>Hot Spot</i>	38

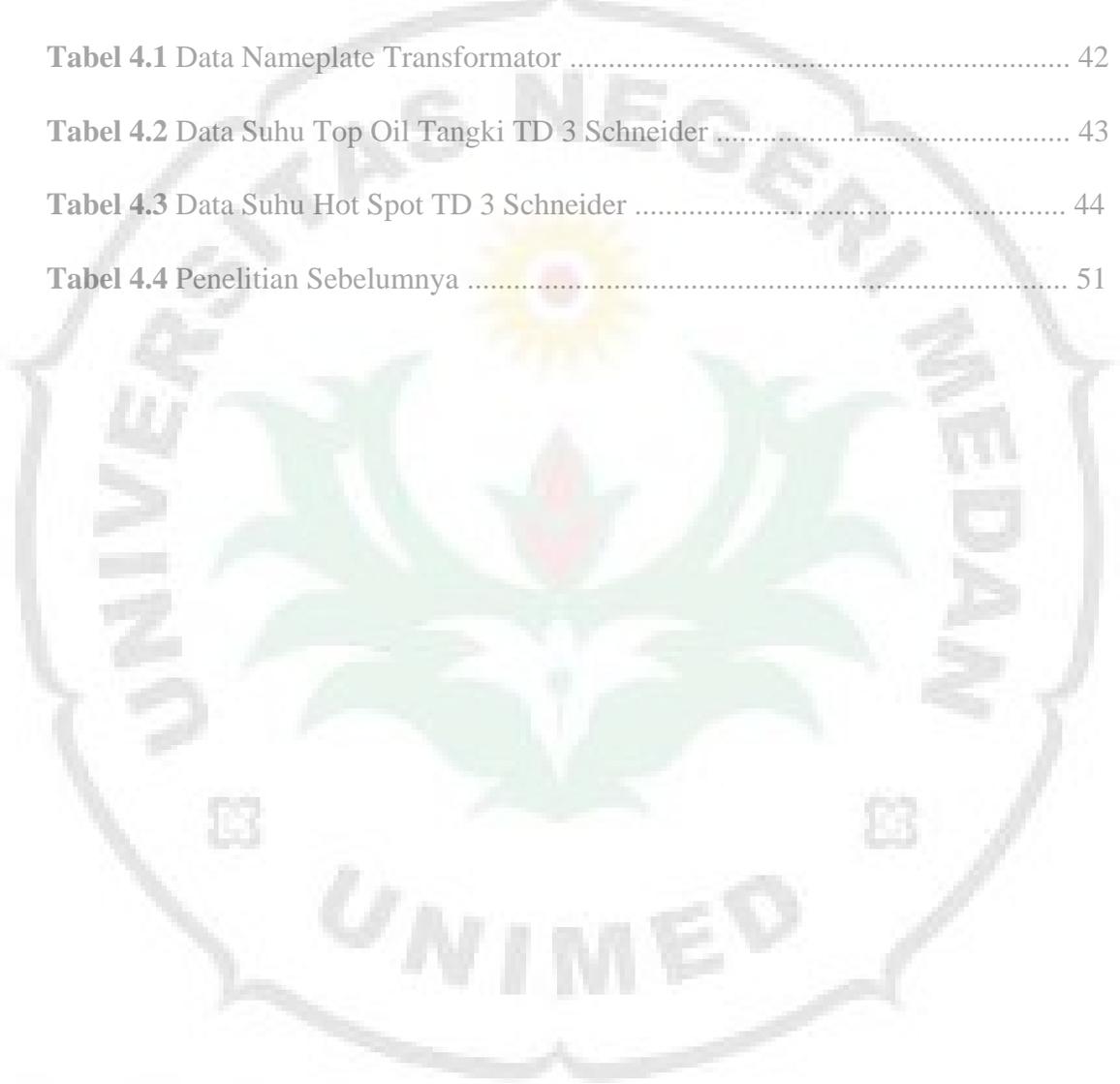
3.7 Teknik Analisis Data	38
BAB IV HASIL PENELITIAN	42
4.1 Deskripsi Hasil Penelitian	42
4.2 Analisis Data	45
4.3 Pembahasan	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	57

UNIVERSITAS NEGERI
MEDAN
UNIMED

THE
Character Building
UNIVERSITY

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Nameplate Transformator	42
Tabel 4.2 Data Suhu Top Oil Tangki TD 3 Schneider	43
Tabel 4.3 Data Suhu Hot Spot TD 3 Schneider	44
Tabel 4.4 Penelitian Sebelumnya	51



THE
Character Building
UNIVERSITY

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Transformator Daya	6
Gambar 2.2 Konstruksi Transformator Tipe Inti	9
Gambar 2.3 Konstruksi Transformator Tipe Cangkang.....	9
Gambar 2.4 Inti Besi	10
Gambar 2.5 Belitan Transformator	10
Gambar 2.6 Bushing	11
Gambar 2.7 Kipas Transformator Daya	12
Gambar 2.8 Konservator Transformator Daya	12
Gambar 2.9 Relai <i>Winding Temperature</i>	14
Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Transformator	18
Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Transformator Sederhana	19
Gambar 2.12 Rangkaian Ekivalen Trafo Sederhana Sisi Primer	20
Gambar 2.13 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban	21
Gambar 2.14 Rangkaian Ekivalen Trafo Tanpa Beban	21
Gambar 2.15 Vektor Transformator Tanpa Beban	21
Gambar 2.16 Transformator Dalam Keadaan Berbeban	21
Gambar 2.17 Rangkaian Ekivalen Trafo Berbeban	22
Gambar 2.18 Diagram Vektor Arus Seimbang dan Tidak Seimbang	23
Gambar 2.19 Shoot Thermovisi	26
Gambar 3.1 Gambar <i>Flowchart</i> Penelitian	35

Gambar 3.2 Gambar *Flowchart* Perhitungan 36

Gambar 4.1 Grafik Suhu Top Oil 43

Gambar 4.2 Grafik Suhu Hot Spot 44



THE
Character Building
UNIVERSITY

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Suhu Top Oil Trafo Daya 3	57
Lampiran 2 Data Suhu Hot Spot Trafo Daya 3	58
Lampiran 3 Dokumentasi Penelitian	59
Lampiran 4 Dokumentasi Hasil Pengukuran	60
Lampiran 5 Gambar Nameplate Trafo Daya 3	61
Lampiran 6 Surat Penugasan Dosen	62
Lampiran 7 Surat Izin Penelitian	63
Lampiran 8 Surat Balasan PLN	64
Lampiran 9 Data Beban PLN	65
Lampiran 10 Uji Tes Plagiat	66

THE
Character Building
UNIVERSITY

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik adalah sesuatu yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Keperluan terhadap tersedianya listrik kini sangat tinggi karena banyaknya peralatan elektronik rumah tangga juga pabrik-pabrik industri yang menggunakan tenaga listrik sebagai sumber tenaganya, sehingga dibutuhkan sebuah sistem tenaga listrik yang handal tetapi tetap hemat ataupun irit dalam pemakaiannya. Lalu dalam menunjang harapan energi yang tinggi perlu diimbangi pada pengembangan kualitas energi listrik pada penyalurannya.

Peningkatan kualitas energi listrik bisa dilakukan dengan memperbaiki peralatan listrik yang digunakan. Salah satu peralatan yang penting untuk digunakan pada proses penyaluran energi listrik yaitu Transformator. Transformator adalah salah satu peralatan yang sangat penting dalam suatu sistem tenaga listrik. Fungsi utama dari Transformator adalah untuk penyaluran tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan yang rendah atau sebaliknya.

Transformator yang dipakai pada sistem tenaga mempunyai fungsi untuk menaikkan dan menurunkan tegangan yang sesuai dengan keperluan pelanggan. Pada pemakaian transformator dibutuhkan isolasi agar untuk mengisolasi antara bagian yang bertegangan dan bagian yang tidak bertegangan serta untuk mengisolasi bagian-bagian antara fasa yang bertegangan. Maka peralatan ini diusahakan agar tetap bekerja secara baik dan normal setiap saat penggunaannya dalam penyaluran tenaga.

Kinerja dari sebuah transformator sangat bergantung pada umur dan kualitas sistem isolasinya. Minyak transformator berfungsi sebagai isolasi dan juga pendingin. Selama transformator sedang beroperasi maka minyak transformator di dalamnya akan mengalami beban berupa medan listrik dan juga beban thermal yang berasal dari belitan maupun inti dari transformator (Iryanto, Irwan 2011:1). Adapun faktor yang mempengaruhi berkurangnya umur transformator pada isolasinya karena pengaruh

thermal yaitu suhu sekitar, suhu minyak trafo, cuaca, kelembaban udara, pengelolaan terhadap transformator dan juga pengaruh pembebanan terhadap transformator itu sendiri (Sigid, Purnama 2009:1). Penyebab kerusakan transformator lainnya adalah pada sisi sekunder transformator sering mengalami hubung singkat. Hubung singkat pada sistem tenaga listrik, secara umum terdiri atas hubung singkat simetris dan tidak simetris (Agus, 2021). Gangguan simetris menyebabkan kenaikan arus sistem mencapai 3 per unit atau lebih (Rahmaniar 2022). Gangguan akibat kejadian non-teknis seperti jaringan tertimpa pohon, konduktor mengalami gangguan kabel terbuka, dan tidak bekerjanya CB (*Circuit Breaker*) mengakibatkan transformator menjadi panas dan mengalami peningkatan suhu, termasuk peningkatan suhu akibat beban non-liner yang menimbulkan harmonisa pada input transformator (Rahmaniar, 2020)

Peningkatan beban transformator akan meningkatkan suhu minyak isolasi, salah satu kerugian dalam transformator pada saat kondisi suhu lebih adalah hilangnya umur isolasi (Janny Olly Wuwung, 2010:4). Pembebanan mengakibatkan peningkatan temperatur yang bisa menimbulkan panas pada traformator. Panas mengakibatkan terjadinya penguraian dari bahan-bahan transformator yang bisa mempercepat proses penuaan suatu tranformator (Muadzah Rahmat, 2017:1, Parlindungan Gultom, 2017:1).

Pada salah satu penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Muadzah Rahmat dalam penelitiannya yang berjudul “*Remaining Life Assessment* Transformator 150/20KV Dengan Metode Degradasi Isolasi”, pembahasan tentang perhitungan susut umur transformator karena kenaikan suhu minyak trafo. Pada Penelitian berikutnya yang dilakukan oleh Adie Satya Gianto dalam penelitiannya yang berjudul “Perhitungan Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Suhu Lingkungan” pembahasan tentang perhitungan umur transformator karena pengaruh suhu menggunakan perhitungan penuaan thermal relatif pada transformator distribusi.

Pada penelitian berikutnya yang dilakukan oleh Purnama Sigit dalam penelitiannya yang berjudul “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga” pembahasan tentang menganalisis pengaruh suhu sekitar dan

perubahan pembebanan transformator tenaga terhadap umur transformator Sedangkan pada penelitian ini membahas tentang sisa umur pemakaian transformator daya karena kenaikan suhu minyak dan hot spot atau titik panas karena pembebanan menggunakan metode perhitungan penuaan *thermal* relatif.

Maka dari itu perlu dilakukan perhatian yang lebih terhadap peralatan ini guna agar menjaga kestabilan serta kualitas dalam penyaluran energi listrik. Untuk itu diperlukan analisis mengenai kualitas isolasi minyak terhadap kenaikan suhu untuk dapat mengetahui kondisi transformator dan menentukan perkiraan sisa umur pemakaian transformator, maka penulis mengangkat judul Analisis Perkiraan Umur Pemakaian Transformator Daya Pada Gardu Induk PT.PLN Sei Rotan Menggunakan Metode Penuaan *Thermal* Relatif.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang terdapat pada penelitian yang akan dilakukan, ada beberapa permasalahan sebagai berikut:

1. Salah satu kerugian dalam transformator ketika kondisi suhu lebih adalah berkurangnya umur isolasi.
2. Faktor yang mempengaruhi berkurangnya umur trafo pada isolasinya karena pengaruh thermal yaitu suhu sekitar, suhu minyak trafo, cuaca, kelembaban udara, pengelolaan terhadap trafo dan pengaruh pembebanan.
3. Panas mengakibatkan terjadinya penguraian dari bahan-bahan transformator yang dapat mempercepat proses penuaan suatu transformator.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, perlu dilakukan pembatasan masalah dengan tujuan agar tidak keluar dari pokok permasalahan yang diteliti, maka batasan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Penelitian dilakukan pada Transformator Daya 3 Gardu Induk Sei Rotan
2. Objek suhu minyak transformator yaitu pada minyak atas yang terletak dibagian konservator karena sulit mengukur objek secara langsung.

3. Analisis perhitungan yang akan dilakukan adalah sirkulasi kenaikan suhu minyak dan kenaikan suhu hot – spot karena pembebanan.
4. Perhitungan perkiraan sisa umur transformator dengan metode penuaan thermal relatif.

1.4 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka dapat ditarik beberapa rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana pengaruh pembebanan pada transformator terhadap suhu minyak transformator?
2. Apa saja parameter yang digunakan dalam perhitungan sisa umur transformator?
3. Bagaimana menghitung perkiraan sisa umur transformator daya dengan metode penuaan thermal relatif?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pengaruh suhu minyak isolasi terhadap sisa umur pada transformator daya.
2. Mengetahui batasan suhu tertinggi dari suhu titik panas atau *hot spot* pada belitan minyak isolasi.
3. Mengetahui umur pemakaian transformator daya pada salah satu transformator daya Gardu Induk PLN Wilayah Sei Rotan dengan metode perhitungan penuaan thermal relatif.

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan terhadap peneliti dan pembaca terkait dengan kinerja dan pengaruh suhu minyak isolasi terhadap sisa umur pada transformator.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada PLN Gardu Induk wilayah Sei Rotan untuk melakukan peningkatan kinerja dalam manajemen perawatan serta kehandalan sistem.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan sebuah peralatan listrik yang bisa memindahkan juga mengalihkan energi listrik dari satu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lainnya, melewati suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator digunakan secara luas baik dalam bidang sistem tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaannya dalam sistem tenaga membolehkan dipilihnya tegangan yang pas dan juga irit dalam setiap kebutuhan misalnya, kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh. Transformator juga merupakan suatu alat magnetoelektrik yang sederhana, andal, dan efisien untuk mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis, dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder (Raisha, 2020:6).

Transformator dipakai untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan listrik sesuai dengan keperluan. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik yang hendak disalurkan ke pelanggan. Tegangan tinggi yang dinaikkan dengan transformator digunakan pada saluran transmisi, hal ini dibuat untuk menurunkan rugi-rugi yang terjadi pada saluran, dengan menambah tegangan maka rugi-rugi saluran bisa diperkecil. Setelah itu tegangan akan diturunkan pada gardu distribusi kemudian disalurkan ke konsumen (Ronaldo Saragih, 2017:5). Dalam bidang tenaga listrik tegangan tinggi, transformator digunakan untuk mengirim daya listrik jarak jauh. Sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk memisahkan satu rangkaian dari rangkaian yang lain, dan untuk menghambat arus searah atau mengalirkan arus bolak-balik anatara rangkaian.

Penggunaan transformator pada sistem penyaluran tenaga listrik dapat dibagi menjadi beberapa bagian yaitu (Muazzah Rahmat, 2017:6):

1. Trafo penaik tegangan (*Step up*) atau disebut trafo daya, untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Trafo penurun tegangan (*Step down*), dapat disebut trafo distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Trafo instrumen, untuk pengukuran yang terdiri dari trafo tegangan dan trafo arus, dipakai menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

Di dalam bentuk awal, inti trafo terdiri atas tiga macam, yaitu:

1. *Open Core* (inti terbuka)
2. *Close Core* (inti tertutup)
3. *Shell Core* (inti bentuk cangkang)

Dasarnya transformator terdiri atas kumparan primer juga kumparan sekunder yang kemudian dibelitkan di inti feromagnetik. Transformator yang merupakan fokus disini yaitu transformator daya. Desain transformator daya ada pada dua tipe, satu tipe inti (*core type*) kemudian kedua tipe cangkang (*shell type*). Tipe-tipe ini memakai inti berlaminasi juga terisolasi satu dengan yang lainnya, karena tujuannya untuk meminimalisir rugi-rugi arus Eddy (Ronaldo Saragih, 2017:6).



Gambar 2.1 Transformator Daya

2.2 Prinsip Kerja Transformator

Transformator terdiri dari dua buah kumparan, kumparan primer juga kumparan sekunder sifatnya induktif. Kumparan-kumparan tersebut terasingkan secara elektrik tetapi berhubungan juga secara magnetis dengan jalur yang memiliki reluktansi (*reluctance*) rendah. Apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka fluks bolak-balik akan muncul di dalam inti yang dilaminasi, karena kumparan tersebut membentuk jaringan tertutup maka mengalir arus primer. Akibat adanya fluks di kumparan primer tersebut maka di kumparan primer terjadi induksi (*self induction*) dan terjadi pula induksi di kumparan sekunder karena pengaruh induksi dari kumparan primer atau disebut sebagai induksi bersama (*mutual induction*) yang menyebabkan timbulnya fluks magnet di kumparan sekunder, maka mengalir arus sekunder jika rangkaian sekunder tersebut dibebani, sehingga energi listrik dapat ditransfer keseluruhan secara magnetisasi.

Perlu diingat bahwa hanya tegangan listrik arus bolak-balik yang dapat ditransformasikan oleh transformator, sedangkan dalam bidang elektronika, transformator digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban untuk menghambat arus searah sambil tetap melakukan atau mengalirkan arus bolak-balik antara rangkaian. Tujuan utama menggunakan inti pada transformator adalah untuk mengurangi reluktansi (tahanan magnetis) dari rangkaian magnetis (*common magnetic circuit*). (Rizky Syahputra, 2017).

Trafo terdiri dari dua gulungan kawat yang terasingkan satu dengan yang lainnya, yang dibelitkan pada inti yang sama. Daya listrik dipisahkan dari kumparan primer ke kumparan sekunder dengan perantaraan garis gaya magnet (*flux magnet*) yang ditimbulkan dari aliran listrik yang melewati kumparan primer. Agar bisa menimbulkan tegangan listrik di kumparan sekunder *flux magnet* yang dibangkitkan oleh kumparan primer harus berubah-ubah. Agar mencukupi, aliran listrik yang mengalir melalui kumparan primer harus aliran listrik bolak-balik. Saat kumparan primernya dikoneksi pada sumber listrik AC, pada kumparan primer timbul gaya gerak

magnet bersama yang juga bolak-balik. Dengan adanya gaya gerak magnet ini, di sekitar kumparan primer timbul flux magnet bersama yang juga bolak-balik.

Adanya flux magnet ini pada ujung-ujung kumparan sekunder yang bisa jadi sama, atau lebih tinggi, bahkan juga lebih rendah dari gaya gerak listrik primer. Hal ini bergantung pada perbandingan transformasi kumparan trafo tersebut. Kalau kumparan sekunder dikoneksikan pada beban, lalu dikumparan sekunder timbul arus listrik bolak-balik sekunder karena ada gaya gerak listrik induksi primer. Hal ini membuat timbulnya gaya gerak magnet dikumparan sekunder dan alhasil pada beban muncul tegangan sekunder. Penyatuan pada gaya gerak magnet induksi sekunder dan juga primer dinyatakan dengan induksi silang atau mutual induction (Zuhal, 1993).

Trafo memakai prinsip dari hukum induksi Faraday dan hukum Lorentz dalam menyalurkan daya, dimana arus bolak balik yang berjalan atau memutar inti besi maka inti besi tersebut akan berubah menjadi magnet. Jika magnet tersebut dikelilingi oleh belitan maka yang terjadi di kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda potensial. Arus yang mengalir pada belitan primer bisa mempengaruhi inti besi transformator sehingga didalam inti besi akan mengalir *flux magnet* dan *flux magnet* ini akan mempengaruhi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekundernya akan terdapat beda potensial (Pranata Sinuhaji, 2012).

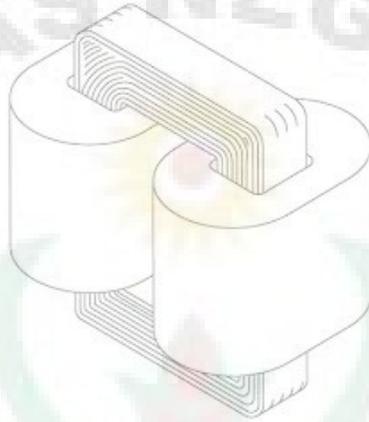
2.3 Konstruksi Transformator

Transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder yang dibelitkan pada inti ferromagnetik. Berdasarkan letak kumparan terhadap inti, transformator terdiri dari dua macam konstruksi, yaitu tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*shell type*). Kedua tipe ini menggunakan inti berlaminasi yang terisolasi satu sama lainnya, dengan tujuan untuk mengurangi rugi-rugi *eddy current*. (Rizky Syahputra, 2017:4- 5).

a. Tipe Inti (*Core From*)

Tipe inti dibentuk dari lapisan besi berisolasi berbentuk persegi dan kumparan transformatornya dibelitkan pada dua sisi persegi. Pada

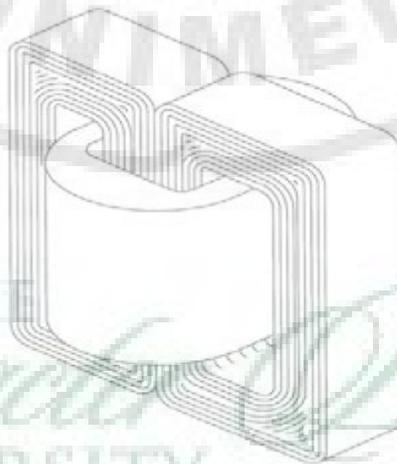
konstruksi tipe inti, kumparan mengelilingi inti besi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini.



Gambar 2.2 Konstruksi Transformator tipe inti (*core form*)

b. Tipe Cangkang (*Shell form*)

Jenis konstruksi transformator yang kedua yaitu tipe cangkang yang dibentuk dari lapisan inti berisolasi, dan kumparan dibelitkan di pusat inti, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Konstruksi Transformator tipe cangkang (*Shell Form*)

2.4 Bagian – Bagian Transformator Dan Fungsinya

Transformator daya memiliki beberapa komponen penting untuk bisa beroperasi, antara lain sebagai berikut (Pranata Sinuhaji, 2012):

a. *Electromagnetic Circuit* (Inti besi)

Inti besi digunakan sebagai media jalannya *flux* yang timbul akibat induksi arus bolak balik pada kumparan yang mengelilingi inti besi sehingga bisa menginduksi kembali ke kumparan yang lain. Dibentuk dari lempengan-lempengan besi tipis berisolasi yang disusun dengan sedemikian rupa seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Inti Besi

b. *Current Carrying Circuit* (Winding)

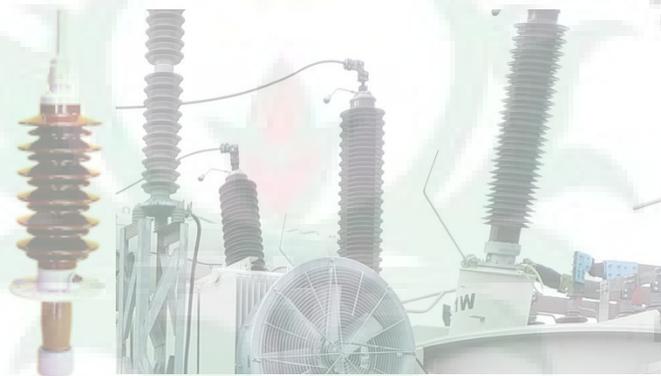
Belitan terdiri dari batang tembaga berisolasi yang mengelilingi inti besi, dimana saat arus bolak balik mengalir pada belitan tembaga tersebut, inti besi akan terinduksi dan menimbulkan *flux* magnetik. Contoh gambar belitan transformator ditunjukkan pada gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Belitan Transformator

c. Bushing

Bushing merupakan sarana penghubung antara belitan dengan jaringan luar, bushing terdiri dari sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator. Isolator tersebut berfungsi untuk sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan *body maintank* transformator. Terdapat fasilitas pada bushing yang dapat digunakan untuk menguji kondisi bushing yang kerap disebut sebagai *center cap*. Contoh gambar bushing ditunjukkan pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Bushing

Secara garis besar bushing dapat dibagi menjadi empat bagian utama yaitu isolasi, konduktor, klem koneksi, dan asesoris. Isolasi pada bushing terdiri dari dua jenis yaitu *oil impregnated paper* dan *resin impregnated paper*. Pada tipe *oil impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan minyak isolasi sedangkan pada tipe *resin impregnated paper* isolasi yang digunakan adalah kertas isolasi dan resin.

d. Pendingin Pada Trafo

Suhu pada transformator yang sedang beroperasi akan dipengaruhi oleh kualitas tegangan jaringan, losses, pada transformator itu sendiri dan juga suhu lingkungan. Suhu operasi yang tinggi akan mengakibatkan rusaknya isolasi kertas pada transformator. Oleh karena itu pendinginan yang efektif sangat diperlukan. Minyak isolasi transformator selain merupakan media isolasi juga berfungsi sebagai pendingin. Pada saat ketika minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh

minyak yang sesuai dengan jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip – sirip radiator. Adapun proses pendinginan ini bisa dibantu oleh adanya kipas (*pen*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 dibawah dan kegunaan pompa sirkulasi adalah untuk menambah performa efisiensi pendinginan.



Gambar 2.7 Kipas Trafo Daya 3 Gardu Induk Sei Rotan

e. Konservator (*Oil Preservation dan Expansion*)

Pada saat terjadi peningkatan suhu saat sedang operasi pada trafo daya, maka minyak pendingin ataupun isolasi akan bisa memuai sehingga volumenya bisa meningkat. Begitu juga sebaliknya ketika terjadi penurunan suhu pada saat sedang beroperasi, maka minyak akan menyusut dan juga volume minyak akan bisa turun. Tangki konservator berfungsi untuk menampung minyak cadangan dan uap/udara akibat pemanasan trafo karena arus beban. Konservator digunakan untuk menampung minyak pada saat ketika transformator mengalami kenaikan suhu. Contoh gambar konservator ditunjukkan pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Tangki Konservator Transformator Daya

Sejalan dengan naik turunnya volume daripada minyak dikonservator karena pemuain dan penyusutan minyak, volume udara didalamnya bisa bertambah dan juga bisa berkurang. Penambahan ataupun pembuangan udara didalam konservator tersebut akan berhubungan dengan udara luar. Supaya minyak isolasi trafo tidak terkontaminasi karena kelembaban dan juga oksigen dari luar, udara yang akan masuk kedalam tangki konservator akan difilter menggunakan *silicagel* yang ada ditrafo tersebut.

f. Tap Changer

Kestabilan tegangan pada suatu jaringan adalah salah satu hal yang dinilai sebagai kualitas tegangan. Transformator dituntut untuk memiliki nilai tegangan output yang stabil sedangkan besarnya tegangan input tidak selalu sama. Dengan mengubah banyaknya belitan pada sisi primer diharapkan akan dapat merubah rasio antara belitan primer dan sekunder oleh karena itu tegangan keluar sekundernya bisa disesuaikan terhadap keperluan sistem seberapapun tegangan yg masuk ke primernya, penyesuaian ratio belitan inilah yang disebut Tap changer.

Proses perubahan ratio belitan ini bisa dilakukan ketika pada saat transformator sedang dalam kondisi berbeban (*On load tap changer*) atau saat transformator tidak berbeban (*Off load tap changer*). Tipe *On Load Tap Changer* bisa bekerja secara manual ataupun otomatis dengan program yang tertanam pada control transformator tersebut. Namun, pada jenis *Off Load Tap Changer*, perubahan ratio belitan hanya bekerja secara manual.

Tap changer terdiri dari:

1. Saklar Putar
2. Saklar Pengalih
3. Dan tahanan Transisi

Aktifitas tap changer lebih dinamis dibandingkan dengan belitan utama dan inti besi, maka dari itu kompartemen antara belitan utama dengan tap changer dipisah. Saklar putar yaitu rangkaian mekanis yang terdiri dari terminal – terminal untuk bisa menentukan posisi tap atau ratio belitan primer. Saklar pengalih adalah rangkaian

mekanis yang dirancang sedemikian rupa untuk melakukan kontak ataupun melepaskan kontak dengan kecepatan yang tinggi. Tahanan transisi adalah tahanan sementara yang akan dilewati arus primer ketika sedang perubahan tap.

2.5 Relai *Winding Temperature*

Relai *Winding Temperature* bekerja apabila suhu kumparan trafo melebihi setting dari pada relay winding, besarnya kenaikan suhu adalah sebanding dengan faktor pembebanan dan suhu udara luar trafo. Urutan kerja relai suhu kumparan winding ini dibagi 2 tahap yaitu (Parulian Lumban Tobing, 2019; Hal 13):

1. Mengerjakan alarm (*winding temperature alarm*).
2. Mengerjakan perintah trip ke PMT (*winding temperature trip*).



Gambar 2.9 Relay Oil, HV, LV *Winding Temperature*

Relai *Oil Winding Temperature* bekerja apabila suhu minyak transformator melebihi setting dari pada relai tersebut. Besarnya kenaikan suhu adalah sebanding juga dengan faktor pembebanan dan suhu udara luar transformator. Kerja relai suhu minyak atau *oil* ini dibagi dua tahap yaitu:

1. Mengerjakan alarm (*oil temperature alarm*)
2. Mengerjakan perintah trip ke PMT (*oil temperature trip*)

2.6 Isolasi Kumparan Trafo Daya Tegangan Tinggi

Desain isolasi transformator daya, khususnya pada transformator daya bertegangan tinggi sangatlah rumit. Masing-masing komponen transformer, yaitu

belitan, elemen kumparan tegangan tinggi dan kumparan tegangan rendah harus diisolasi satu sama lain, elemen kumparan diisolasi juga terhadap inti dan gandar dibumikan. Dengan demikian isolasi trafo daya dapat dibagi tiga jenis, yaitu:

1. Isolasi minor, merupakan isolasi yang memisahkan belitan satu terhadap belitan lainnya didalam satu elemen kumparan.
2. Isolasi mayor, merupakan isolasi yang memisahkan kumparan tegangan tinggi terhadap bagian yang bertegangan rendah. Isolasi ini terdiri dari lagi isolasi utama, yang memisahkan kumparan tegangan tinggi dengan kumparan tegangan rendah dan isolasi gandar yang memisahkan belitan tegangan tinggi dengan gandar.
3. Isolasi fasa, merupakan isolasi antara tegangan tinggi dengan kumparan tegangan tinggi yang lain pada trafo tiga fasa.

Isolasi mayor, isolasi minor, dan isolasi fasa, ketiga isolasi tersebut dinamakan kumparan tegangan tinggi. Sebutan itu dibuat sebab kumparan tegangan tinggi adalah elektroda yang harus di isolasi terhadap bagian-bagian transformator yang bertegangan rendah. Bahan isolasi terbaik yg digunakan, baik untuk isolasi mayor ataupun isolasi minor yaitu minyak transformator yang dicampur ataupun digabungkan bersama dengan dielektrik padat (Tobing B.L, 2012, Ronaldo Saragih, 2017;12-13).

2.7 Jenis Pendingin Transformator Daya

Panas yang muncul didalam belitan maupun pada inti trafo saat sedang transformator dibebani jangan sampai berlebihan ataupun melewati batas yg telah ditentukan karena dapat merusak dan menurunkan tahanan isolasi belitan. Untuk mengatasi agar panas yang timbul tidak berlebihan maka digunakanlah minyak pendingin pada transformator. Selain menjadi pendingin, minyak isolasi transformatorpun juga fungsinya sebagai pemisah ataupun isolator. Selain dari pada itu pendinginan transformator bisa juga terjadi secara alamiah, yakni seperti udara yang di sekitaran transformator tersebut. Untuk mengurangi kenaikan suhu transformator yang berlebihan oleh karena itu diperlukan dengan alat atau sistem pendingin agar

mengirimkan panas tersebut keluar dari trafo. Media yang digunakan di sistem pendingin bisa berupa udara atau minyak ataupun juga air (Sigit Purnama, 2011:2).

Menurut jenis pendinginnya, transformator bisa dibedakan dan terdiri dari jadi dua jenis yaitu Transformator tipe kering dan juga Transformator terendam minyak (Janny Olly, 2010:3).

2.7.1 Transformator Tipe Kering

Trafo pada jenis ini yang gampang dalam pengoperasian ataupun pemakainannya, dikarenakan sistem pendinginannya secara alamiah dengan menggunakan ataupun memakai udara yang disekitar transformator jadi tidak memberatkan ataupun perlu biaya dalam perawatannya.

2.7.2 Transformator Terendam Minyak

Pada transformator ini terbagi atas tiga macam, diantaranya yaitu sebagai berikut:

1. Pendingin alami yaitu yg ini bekerja dengan sendirinya dan hanya dibantu dengan pemasangan radiator untuk sirkulasi minyaknya.
2. Pendinginan Udara yaitu dalam hal ini proses pendinginannya dibantu dengan pemasangan radiator dan kipas angin ataupun peniup.
3. *Forced Oil Circulation* : Pendinginan ini terbagi tiga yaitu *Natural Cooling* dengan sirkulasi minyak, *Airblast Cooling* dengan sirkulasi minyak, *Water Cooling* dengan sirkulasi minyak.

Sebagai lambang pengenal dalam jenis pendinginan pada transformator dikenal dengan 4 jenis lambang pengenal, diantaranya adalah sebagai berikut:

1. Transformator ONAN atau Minyak Alami Udara Alami merupakan transformator dengan minyak sebagai pendingin belitannya yang bersirkulasi secara alamiah dan udara juga sebagai pendingin luarnya yang bersirkulasi secara alamiah juga.

2. Transformator ONAF ataupun Minyak Alami Udara Paksa merupakan transformator dengan minyak sebagai pendingin belitannya yang bersirkulasi secara alamiah dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa ataupun buatan.
3. Transformator OFAF ataupun Minyak Paksa Udara Paksa merupakan transformator dengan minyak sebagai pendinginan belitannya yang bersirkulasi secara paksa atau buatan dan udara sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan.
4. Transformator OFWF ataupun Minyak Paksa Air Paksa merupakan transformator dengan minyak sebagai pendinginan belitannya yang bersirkulasi dengan cara paksa ataupun buatan dan air sebagai pendingin luar yang bersirkulasi secara paksa atau buatan (Janny Olney, 2010:3).

2.8 Fungsi Minyak Transformator

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

Fungsi minyak transformator pada peralatan tegangan tinggi, dapat dibagi menjadi beberapa bagian (Muadzzah Rahmat, 2017:16-17):

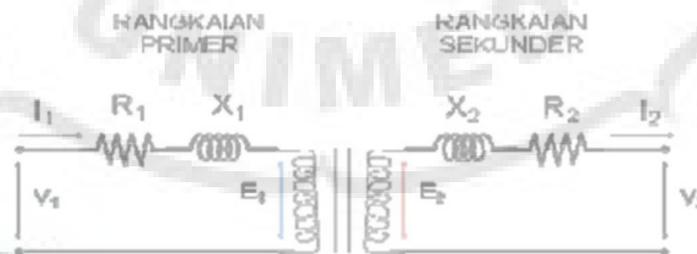
1. Minyak transformator berfungsi sebagai pendingin karena minyak transformator mampu menghantarkan panas dengan baik.
2. Minyak transformator yang baik harus bisa menjadi isolator atau pemisah tegangan antara bagian-bagian yang memiliki beda fasa. Hal ini dimaksudkan agar diantara bagian-bagian yang memiliki beda fasa tidak terjadi lompatan listrik (*flash over*) ataupun percikan listrik.

Minyak yang dipakai untuk merendam kumparan-kumparan dan inti dari trafo. Maka dari itu minyak transformator harus memenuhi persyaratan sebagai berikut (Sumardi Sadi):

1. Kekuatan Isolasi yang tinggi dan penyalur panas yang baik.
2. Berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi dan kemampuan pendinginan menjadi lebih baik.
4. Titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi padat.
6. Sifat kimia yang stabil.

2.9 Rangkaian Ekivalen Transformator

Rangkaian primer dan sekunder dibuat menjadi sebuah rangkaian yang disebut rangkaian ekivalent untuk mempermudah analisis dalam pengujian. Pada rangkaian ini rugi tembaga pada sisi sekunder diubah menjadi nilai ekivalennya dan dilihat dari arah primer.



Gambar 2.10 Rangkaian ekivalen transformator

$$\begin{aligned} \text{Rugi-rugi} &= I_2^2 \cdot R_2 \\ &= I_1^2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \cdot R_2 \end{aligned}$$

$$\text{Rugi-rugi} = I_1^2 \cdot a^2 \cdot R_2$$

a adalah rasio perbandingan lilitan kumparan sekunder terhadap kumparan primer sehingga resistansi sekunder didapatkan:

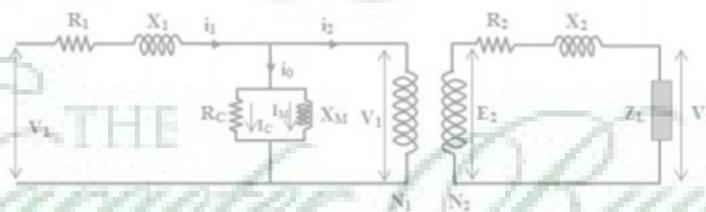
$$R'_2 = a^2 \cdot R_2$$

dan reaktansi sekunder didapatkan:

$$X'_2 = a^2 \cdot X_2$$

Rangkaian ekuivalen transformator praktis sama dengan transformator ideal, hanya saja ditambahkan rugi-rugi inti yaitu rugi hysteresis dan rugi arus pusar (*eddy current*). Rugi-rugi ini digambarkan sebagai induktansi dan resistansi yang terhubung secara paralel dengan kumparan primer, pada gambar dilambangkan sebagai X_m untuk induktansi dan R_m untuk resistansi.

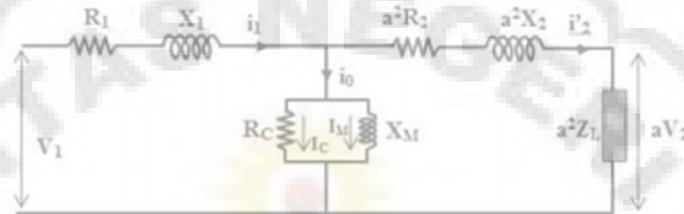
Selain memperhitungkan rugi-rugi inti, transformator praktis juga memasukkan unsur fluks bocor (*leakage flux*). Flux magnet bersama yang dihasilkan oleh arus pemagnet I_M , tidak seluruhnya tercakup oleh kumparan primer maupun kumparan sekunder. Dengan kata lain, terjadi flux magnet bocor baik pada kumparan primer maupun pada kumparan sekunder. Adanya flux magnet bocor pada kumparan primer dinyatakan oleh hambatan primer dan reaktansi primer, sedangkan pada kumparan sekunder dinyatakan oleh hambatan sekunder dan reaktansi sekunder. Dengan demikian rangkaian ekivalen trafo sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.11 (Yon Rijono, 1997:22-23).



Gambar 2.11 Rangkaian ekivalen transformator sederhana

Berdasarkan rangkaian transformator ideal di atas, apabila semua nilai parameter sekunder dinyatakan pada sisi rangkaian primer, harganya perlu dikalikan dengan

faktor a^2 . Berikut model rangkaian ekivalen sebuah transformator jika dilihat dari sisi primer. (Rizky Syahputra, 2017:7).



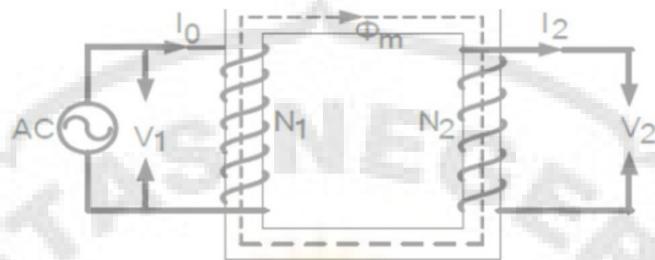
Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen transformator dilihat dari sisi primer

Keterangan:

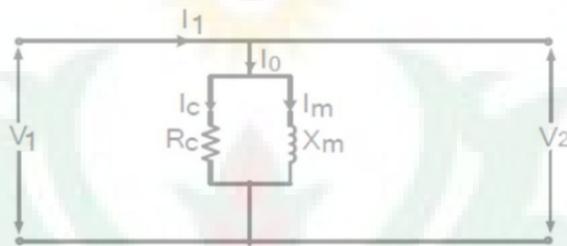
- | | |
|--------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| I_1 = Arus pada sisi primer (A) | X_1 = Reaktansi pada sisi primer (Ω) |
| I_2 = Arus pada sisi sekunder (A) | X_2 = Reaktansi pada sisi sekunder (Ω) |
| V_1 = Tegangan pada sisi primer (V) | I_c = Arus pada inti besi (A) |
| V_2 = Tegangan pada sisi sekunder (V) | I_M = Arus pemagnetan (A) |
| R_1 = Hambatan pada sisi primer (Ω) | X_M = Reaktansi pemagnetan (Ω) |
| R_2 = Hambatan pada sisi sekunder (Ω) | R_C = Hambatan inti besi (Ω) |

2.10 Keadaan Transformator Tanpa Beban

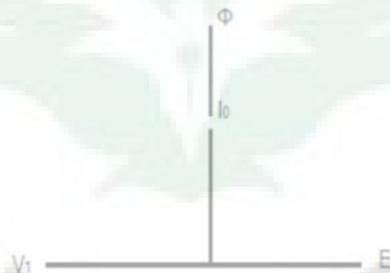
Transformator disebut tanpa beban jika kumparan sekunder dalam keadaan terbuka (*Open Circuit*). Dalam keadaan ini arus yang mengalir pada kumparan primer sangat kecil. Arus ini disebut arus primer tanpa beban atau arus penguat. Bila kumparan primer suatu transformator dihubungkan dengan sumber tegangan V_1 yang sinusoidal, akan mengalirkan arus primer yang juga sinusoidal dan dengan menganggap belitan N_1 reaktif murni. I_0 akan tertinggal 90° dari V_1 . Arus primer I_0 menimbulkan fluks yang sefasa dan juga berbentuk sinusoidal. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13, 2.14, 2.13 dan 2.15 (Zuhail, 1991:17).



Gambar 2.13 Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban



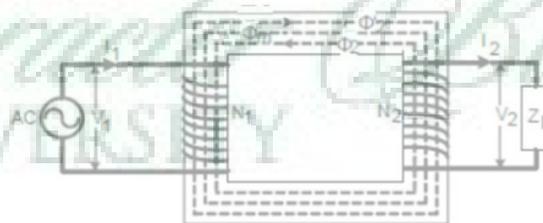
Gambar 2.14 Rangkaian Ekuivalen Dalam Keadaan Tanpa Beban



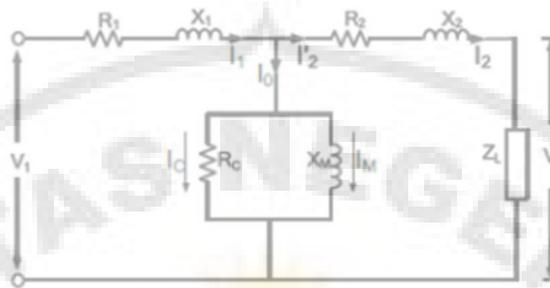
Gambar 2.15 Vektor Transformator Dalam Keadaan Tanpa Beban

2.11 Keadaan Transformator Berbeban

Apabila kumparan sekunder dihubungkan dengan beban Z_L , maka I_2 yang bolak-balik mengalir pada kumparan sekunder, dimana $I_2 = V_2/Z_L$ dengan $\cos \phi_2 =$ faktor kerja beban. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16 dan 2.17 (Zuhail 1991:21).



Gambar 2.16 Transformator Dalam Keadaan Berbeban



Gambar 2.17 Rangkaian Ekuivalen Transformator Dalam Keadaan Berbeban

Arus beban I_2 ini akan menimbulkan gaya gerak magnet (ggm) $N_2 I_2$ yang cenderung menentang fluks (Φ) bersama yang telah ada akibat arus pemagnetan (I_M).

2.12 Ketidakseimbangan Beban

Karya Fortescue membuktikan bahwa suatu sistem tak seimbang yang terdiri dari n fasor yang berhubungan dapat diuraikan menjadi n buah sistem dengan fasor seimbang yang dinamakan komponen-komponen simetris dari fasor aslinya. n buah fasor pada setiap himpunan komponennya adalah sama panjang, dan sudut diantara fasor yang bersebelahan dalam himpunan itu sama besarnya. Menurut teorema Fortescue, tiga fasor tak seimbang dari sistem tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga sistem fasor yang seimbang. Himpunan seimbang komponen itu adalah:

1. Komponen urutan-positif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang sama seperti fasor aslinya.
2. komponen urutan-negatif yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya, terpisah satu dengan yang lain dalam fasa sebesar 120° , dan mempunyai urutan fasa yang berlawanan dengan fasor aslinya.
3. komponen urutan nol yang terdiri dari tiga fasor yang sama besarnya dan dengan penggeseran fasa nol antara fasor yang satu dengan yang lain.

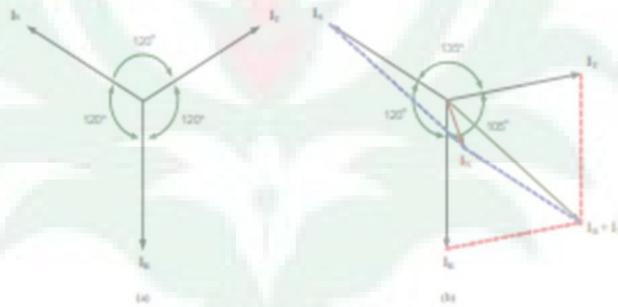
Yang dimaksud dengan keadaan seimbang adalah suatu keadaan di mana:

1. Ketika vektor arus / tegangan sama besar.
2. Ketika vektor saling membentuk sudut 120° antara satu sama lain.

Sedangkan yang dimaksud dengan keadaan tidak seimbang adalah keadaan dimana salah satu atau kedua syarat keadaan seimbang tidak terpenuhi. Ada tiga kemungkinan keadaan beban tidak seimbang, yaitu:

1. Ketika vektor sama besar tapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
2. Ketika vektor tidak sama besar tapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
3. Ketika vektor tidak sama besar dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

Adapun gambar diagram vektor arus dalam keadaan seimbang dan tidak seimbang dapat digambarkan sebagai berikut. Diagram vektor tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.18 dibawah ini:



Gambar 2.18 Diagram vektor arus dalam keadaan seimbang dan tidak seimbang

Penyebab ketidakseimbangan beban adalah keadaan tidak seimbang beban antara tiap-tiap fasa (fasa R, fasa S dan fasa T) pada beban beban satu fasa pada jaringan tegangan rendah. Akibat ketidakseimbangan beban tersebut munculah arus netral pada transformator. Arus netral yang mengalir di netral trafo ini menyebabkan terjadinya rugi-rugi, yaitu rugi-rugi akibat adanya arus netral padapenghantar netral trafo dan rugi-rugi akibat arus netral yang mengalir ke tanah. Dengan adanya rugi-rugi tersebut maka efisiensi trafo akan semakin rendah. (Mohamad Ali, Muhammad Taqiyyudin Alawy, Sugiono :12).

2.13 Jenis Kegagalan Pada Transformator Akibat Kontaminasi Minyak Isolasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi kegagalan transformator karena kontaminasi minyak isolasi pemburukan dari suatu minyak isolasi, diantaranya adalah sebagai berikut (Pranata Sinuhaji, 2012):

1. Terlalu Panas atau Panas yang berlebihan

Pada saat trafo yang sedang beroperasi kelebihan beban, maka akan menimbulkan panas yang berlebih dan juga bisa memperburuk isolasi. Berdasarkan hasil penelitian yang pernah dilakukan hasil DGA menunjukkan karbon monoksida dan karbon dioksida tinggi. Dalam kasus dengan suhu yang lebih hasil penelitian menunjukkan gas metana dan etilena berada pada tingkat yang lebih tinggi.

2. Korona

Korona merupakan terlepasnya muatan listrik dari permukaan konduktor. Modus terlepasnya muatan ini dalam skala yang besar sehingga bisa terlihat oleh mata telanjang, sedangkan dalam skala yang kecil tidak bisa terlihat oleh mata. Korona terjadi karena disebabkan kadar hidrogen yang tinggi pada minyak isolasi. Gas hidrogen adalah gas satu-satunya yang menghasilkan korona tapi terkadang gas hidrogen juga terbentuk akibat adanya reaksi kimia antara kandungan air yang berada dalam minyak logam.

3. Busur Api

Arcing atau busur api merupakan gangguan sangat berbahaya pada minyak isolasi dan juga transformator yang diakibatkan oleh gas asetilena pada minyak isolasi. Adapun gas-gas yang timbul karena gangguan ini adalah : H_2 , C_2H_2 , (C_2H_4 , C_2H_6 , CH_4), munculnya busur api dalam minyak isolasi ditandai dengan pembentukan gas-gas hidrogen dan asetilena sebagai gas-gas yang paling dominan. Bahan isolasi cair juga harus memiliki sifat tidak menimbulkan korosi, tidak mudah menyala, tidak beracun dan kestabilan kimia, disamping itu juga bahan isolasi harus memiliki nilai-nilai yang rendah untuk faktor kerugian, kerapatan dan kekentalan.

2.14 Faktor Beban

Faktor beban (K) adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata terhadap beban puncak yang tertinggi kemudian nanti akan dihitung perbandingannya untuk

periode harian, bulanan, dan juga tahunan. Dalam menghitung nilai faktor beban menggunakan persamaan 2.1 dibawah ini: (Muadzzah Rahmat, 2017).

$$K = \frac{\text{Beban Rata-rata}}{\text{Beban Puncak}} \dots\dots\dots (2.1)$$

2.15 Pengaruh Pembebanan Transformator

Ketika transformator dalam keadaan bertegangan dan belum dibebani akan timbul rugi-rugi yang bisa menimbulkan kondisi trafo tersebut panas, namun panas yang timbul kecil. Apabila transformator dibebani maka kumparan dan minyak di dalam trafo akan bertambah panas sesuai dengan kenaikan dari bebannya atau sebesar I^2R . Panas yang timbul pada kumparan trafo akan diteruskan secara konduksi pada minyak trafo yang fungsinya sebagai pendingin. Isolasi kumparan yang terdiri dari kertas kraft mempunyai batas panas yang diijinkan sesuai dengan kelas isolasi spesifikasi trafo. Demikian juga minyak isolasi trafo mempunyai batas panas yang diijinkan. Apabila batas nilai panas tersebut dilampaui maka isolasi akan rusak dan secara keseluruhan transformator tersebut akan rusak. Panas tersebut harus direduksi dengan memasang sistem pendingin pada trafo tersebut (Eko Harsono, 2012).

Standar pembebanan transformator daya menggunakan standar IEC yang telah ditetapkan menjadi standar PLN. Berdasarkan standar PLN tersebut, dijelaskan bahwa pada suhu titik-panas belitan sebesar 98°C , maka transformator daya akan mengalami pemburukan isolasi yang normal. Dengan kata lain bahwa transformator daya tidak akan mengalami kenaikan susut-umur jika suhu titik panas (*hot-spot temperature*) tidak melebihi nilai 98°C dan menurut standard IEEE tahun 1999 rata-rata umur transformator normal 20.55 tahun (180.000 jam).

2.16 Rasio Rugi-Rugi

Rasio rugi-rugi (R) merupakan perbandingan rugi tembaga pada kapasitas daya atau pada daya pengenalan terhadap rugi beban nol, yang dimana hasil dari perbandingan tersebut akan menjadi nilai rasio rugi-rugi. Dalam menghitung nilai rasio rugi-rugi

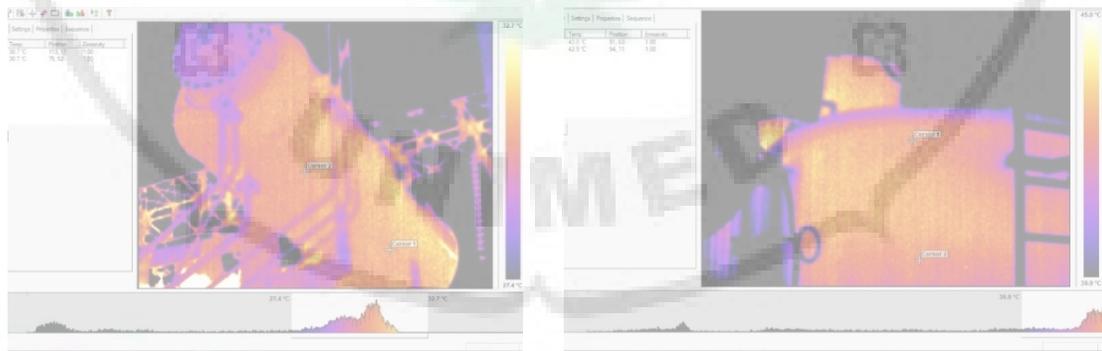
menggunakan persamaan 2.2 dibawah ini: (Ronaldo Saragih, 2017, Muadzah Rahmat, 2017).

$$R = \frac{\text{Rugi Tembaga pada daya pengenalan}}{\text{Rugi Beban Nol}} \dots\dots\dots (2.2)$$

2.17 Thermovisi

Salah satu tindakan pemeliharaan pada gardu induk adalah pengukuran suhu dengan menggunakan thermal imagers yang biasa disebut dengan pengukuran thermovisi. Thermovisi merupakan teknik mendeteksi atau mengetahui suhu panas dari jarak tertentu menggunakan alat infra merah.

Dalam pengertian lain Thermovisi ini adalah instrumen untuk memvisualisasikan dan mendeteksi suhu pada suatu objek yang ditangkap dan ditampilkan ke sebuah display dengan teknologi inframerah untuk mengetahui suhu panas pada sambungan terminal antar kabel konduktor dan mendapatkan nilai selisih suhu sambungan terhadap suhu konduktor.



Gambar 2.19 Shoot Saat Pengukuran Suhu Menggunakan Kamera Thermovisi

Gambar tersebut adalah salah satu pengukuran suhu tangki konservator dan *body* transformator atau *maintank* transformator yang bertujuan untuk mengetahui kondisi kenaikan suhu awal pada beban awal dipagi hari. Pengukuran tersebut diambil pada saat penelitian skripsi pukul 8.00 WIB pada tanggal 21 Desember 2021 di transformator 3 Gardu Induk Sei Rotan. Nilai suhu pada tangki konservator transformator daya sebesar 30,7°C dan nilai suhu pada *body* atau *maintank*

transformator daya sebesar 43,0 °C. Pengukuran ini menggunakan sinar inframerah yang dipancarkan oleh thermal imagers sehingga pada display thermal imagers dapat menunjukkan besar suhu dari alat yang diukur.

2.18 Suhu Lingkungan

Transformator daya yang digunakan di Indonesia, baik produksi dari lokal maupun produksi dari luar negeri, kebanyakan didesain untuk digunakan pada suhu lingkungan 20°C, sesuai dengan standar IEC. Sementara data dari Badan Meteorologi dan Geofisika menunjukkan bahwa Indonesia mempunyai suhu lingkungan rata-rata 30°C.

Suhu lingkungan merupakan suhu udara sekeliling transformator. Untuk transformator pasangan luar yang berpendingin udara, suhu lingkungan yang diambil adalah suhu udara dimana transformator tersebut ditempatkan. Jika suhu lingkungan berubah-ubah selama pembebanan, maka digunakan nilai suhu lingkungan efektif. Suhu lingkungan efektif (*weighted ambient temperature*) adalah suhu lingkungan yang konstan pada selang waktu tertentu yang menyebabkan penuaan yang sama dengan pengaruh suhu lingkungan yang berubah-ubah pada selang waktu tersebut (hari, bulan, tahun).

2.19 Dampak Suhu Minyak Isolasi

Peningkatan beban transformator akan meningkatkan suhu minyak isolasi, sehingga beban di atas *rating* perancangan menimbulkan resiko. Salah satu kerugian dalam transformator pada saat kondisi suhu lebih adalah hilangnya umur isolasi. Umur isolasi minyak ini didasarkan pada suhu, kadar air, dan kadar oksigen dari waktu ke waktu. Penggunaan minyak untuk meminimalkan dampak kelembaban dan oksigen pada umur isolasi. Oleh karena itu, studi umur transformator menggunakan suhu titik terpanas minyak memiliki hubungan yang berkaitan dengan menentukan umur transformator (Janny Olly, 2010:3-5).

2.19.1 Kenaikan Temperatur Minyak Atas

Suhu minyak atas atau suhu *top oil* adalah suhu dari minyak isolasi pada bagian atas tangki transformator.

Kenaikan awal suhu minyak atas atau *top oil* merupakan faktor arus beban yang ditetapkan dengan persamaan 2.3 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,R} \left(\frac{1+RK^2}{1+R} \right)^n \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan:

K = faktor beban

R = Rasio rugi-rugi (rugi tembaga pada daya pengenalan/rugi beban nol)

n = nilai eksponen minyak (sesuai standar IEC 0076)

= 0,9 (ONAN/ONAF) dan 1,0 (OFAF/OFWF)

$\Delta\theta_{TO,R}$ = Kenaikan suhu *top oil* awal ranting beban (rata-rata)

Kenaikan akhir suhu *top oil* secara langsung berkaitan dengan arus beban dan karakteristik termal transformator, yang mana ditetapkan dengan persamaan 2.4 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} - \Delta\theta_{TO,i}) \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_{TO}}} \right) + \Delta\theta_{TO,i} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan:

$\Delta\theta_{TO,u}$ = Kenaikan suhu *top oil* terbesar trafo saat beroperasi

$\Delta\theta_{TO,i}$ = Kenaikan suhu *top oil* awal

τ_{TO} = Konstanta *top oil* (Sesuai Standar IEC 0076)

= 3 (ONAN/ONAF) dan 2 (OFAF dan OFWF)

2.19.2 Kenaikan Temperatur Titik Panas

Suhu *hot spot* atau titik panas adalah suhu terpanas didalam belitan transformator. Lokasi belitan terpanas adalah tergantung pada desain fisik transformator. Panduan untuk Pembebanan menetapkan batas desain untuk suhu titik-panas normal menurut standar IEC No 354 yang telah ditetapkan menjadi standar PLN No 17 A Tahun 1979 sebesar 98⁰C dari berbagai suhu lingkungan. Karena suhu yang berlebihan dapat menyebabkan kerugian yang tidak bisa diterima dari umur isolasi.

Kenaikan awal suhu hot spot merupakan factor arus beban, ditetapkan dengan persamaan 2.5 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{H,i} = (\Delta\theta_{H,R})(K^{2y}) \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan:

K= Faktor beban

Y = Eksponen belitan (sesuai standar IEC 0076)

= 1,6 (ONAN/ONAF), 1,3 (OFWF) dan 2,0 (ODAF)

$\Delta\theta_{H,R}$ = kenaikan suhu titik panas ranting beban (rata-rata)

Kenaikan akhir suhu *hot spot* belitan tergantung pada beban transformator dan karakteristik termal transformator, ditetapkan dengan persamaan 2.6 dibawah ini:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,u} - \Delta\theta_{H,i})(1 - e^{-\frac{1}{\tau w}}) + \Delta\theta_{H,i} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan : $\Delta\theta_{H,u}$: kenaikan suhu titik panas terbesar trafo saat beroperasi

τw : Konstanta belitan (sesuai standar IEC 0076)

= 1 (ONAN/ONAF) dan 1 (OFWF/ODAF)

Suhu total titik panas atau hot spot tergantung juga pada suhu lingkungan dan juga dari total suhu minyak atas atau top oil, yang mana ditetapkan dengan persamaan 2.7 dibawah ini:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana: θ_H : total suhu titik panas

$\Delta\theta_H$: kenaikan akhir suhu titik panas belitan

$\Delta\theta_{TO}$: kenaikan akhir suhu top oil

θ_A : Suhu Lingkungan

2.20 Laju Penuaan Thermal Relatif

Penuaan atau pemburukan isolasi merupakan waktu terhadap suhu, kandungan air, oksigen dan asam, model yang ditampilkan pada standar ini hanya berdasarkan suhu isolasi sebagai parameter. Karena distribusi suhu tidak seragam, bagian yang beroperasi pada suhu tertinggi biasanya akan mengalami pemburukan paling besar sehingga laju penuaan berdasarkan pada titik panas belitan. Dalam perhitungan nilai umur transformator dengan metode laju penuaan thermal relatif dikenal faktor laju penuaan isolasi karena thermal yaitu suhu panas yang mana ditetapkan dengan persamaan 2.8 dibawah ini (Adi Satria, 2015:13, Purnama Sigid, 2011:6):

$$V = 2^{(\theta_H - 98)/6} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana: θ_H : total suhu *hot spot* atau titik panas

98°C : standar IEC yang telah ditetapkan menjadi standar PLN.

Susut umur yang disebabkan oleh operasi harian atau bulanan pada trafo sehingga menyebabkan penurunan kemampuan suatu bahan isolasi dikarenakan thermal yaitu suhu panas. Maka susut umur relatif dapat dihitung dengan persamaan 2.9 dibawah ini (Adi Satria, 2015:13):

$$t = \frac{V \times T}{\text{Periode waktu}} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana: t : konstanta waktu

V : nilai relatif dari umur pemakaian

T : periode pemakaian trafo = 24 Jam

Dari persamaan 2.8 dan persamaan 2.9 dengan rata-rata umur normal transformator 20.55 tahun menurut standard IEEE tahun 1999, maka sisa umur pemakaian sebuah transformator bisa ditentukan dengan memakai persamaan 2.10 dibawah ini (Adi Satrya, 2015:14):

$$L = \frac{1}{t} \times \text{rata-rata umur normal trafo} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana: L : pengurangan umur

t : konstanta waktu

20.55 tahun rata-rata umur trafo menurut standard IEEE

2.21 Penelitian Yang Relevan

Janny Olly Wuwung (2010), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul “Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu Pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak” dalam penelitian ini dapat diketahui seberapa besar harapan hidup (umur) transformator daya jika dibebani, dengan adanya kenaikan faktor beban akan meningkatkan faktor laju penuaan sehingga umur transformator akan berkurang

Purnama Sigid (2011), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul “Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo GTG 1.3 PLTGU Tambak Lorok Semarang)” dalam penelitian ini menyatakan bahwa semakin tinggi suhu setempat semakin pendek operasional dan semakin besar susut umur dari trafo daya yang dipengaruhi karena isolasi belitan transformator dan minyak transformator. Salah satu kerusakan ataupun kegagalan isolasi dari minyak transformator disebabkan karena perubahan suhu ataupun suhu sekitar di trafo jenis terendam minyak tersebut.

Muadzah Rahmat (2017), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul *Remaining Life Assessment* Transformator 150/20kv Dengan Metode Degradasi Isolasi penelitian ini menyimpulkan bahwa sisa umur transformator dari hasil perhitungan yaitu sekitar 11 tahun dengan faktor beban 0.72 pu, total suhu hot spot sebesar 169.2⁰C, dan suhu lingkungan sebesar 30⁰C.

Kurniawan (2016), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul "Studi Analisa Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Pada Gardu Induk Garuda Sakti" penelitian ini menyimpulkan bahwa beban memiliki pengaruh yang lebih besar dalam kenaikan temperatur *hot spot* trafo dibanding dengan temperatur lingkungan. Temperatur *hot spot* ketiga transformator gardu induk Garuda Sakti masih dalam kondisi batas aman yang ditetapkan oleh Publikasi IEC yaitu tidak melebihi 98°C selama 24 jam operasi.

Adi Satya Gianto (2015), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul "Perhitungan Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Suhu Lingkungan". Penelitian ini menyimpulkan bahwa suhu sekitar tempat dioperasikannya transformator sangat berpengaruh pada karakteristik thermal dan suhu titik panas belitan transformator. Makin tinggi suhu sekitar, maka makin tinggi pada suhu titik panas belitan transformator.

Ronaldo Saragih (2017), dalam penelitiannya tersebut yang berjudul "Analisis Kinerja Isolasi Transformator Tenaga Akibat Pengaruh Pembebanan (Studi Kasus Transformator Tenaga 3 Gardu Induk *Gas Insulated Switchgear* Listrik Medan)" penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin besarnya nilai pembebanan akan semakin besar susut umur dari transformator.

2.22 Kerangka Berfikir

Berdasarkan dari teori dan penelitian yang relevan maka yang menjadi kerangka berfikir pada penelitian ini adalah:

1. Faktor yang mempengaruhi kurangnya umur transformator

Perlu diketahui pada penelitian ini apa saja faktor yang mempengaruhi kurangnya umur transformator pada isolasinya karena pengaruh termal yaitu suhu sekitar, suhu minyak trafo, cuaca, kelembaban udara, pengelolaan terhadap transformator dan bisa juga karena pengaruh pembebanan trafo itu sendiri.

2. Pengaruh Suhu Minyak Isolasi dan Suhu *Hot Spot* atau titik panas pada trafo

Peningkatan beban pada trafo akan meningkatkan suhu minyak isolasi dan juga suhu titik panas belitan, panduan untuk pembebanan mengizinkan suhu titik panas sebesar 98°C Standar IEC No 354 dan SPLN No 17 A Tahun 1979 sehingga apabila beban diatas rating maka akan menimbulkan resiko yaitu hilangnya umur isolasi. Pada penelitian ini akan dianalisis sirkulasi kenaikan suhu minyak dan kenaikan suhu *hot spot* atau titik panas untuk mengetahui sisa umur transformator daya. Maka untuk menghitung sirkulasi kenaikan akhir suhu top oil dan titik panas belitan digunakan persamaan 2.4 dan 2.6. Kemudian untuk menentukan total suhu titik panas dalam belitan menggunakan persamaan 2.7. Lalu kemudian dihitung sisa umur trafonya dengan menggunakan persamaan 2,8, persamaan 2,9 dan persamaan 2.10.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat penelitian dilaksanakan di PT.PLN (Persero) Gardu Induk Sei Rotan di Jalan Sena, Kecamatan Batang Kuis, Medan Sumatera Utara. Penelitian ini dilaksanakan pada Semester Ganjil Tahun ajaran 2020/2021. Waktu Pelaksanaan mulai dari perencanaan judul skripsi sampai dengan penulisan laporan skripsi. Waktu penelitian ini dimulai dari tanggal 20-31 Desember tahun 2021.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan penelitian yang digunakan untuk penelitian ini yaitu:

1. Transformator Daya 3 Gardu Induk Sei Rotan 60 MVA
2. Kamera Irisys IRI4010

Berikut ini adalah gambar Kamera Irisys IRI4010 yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengukur suhu tangki konservator dan bodi luar belitan transformator yang ditunjukkan pada Gambar 3.1

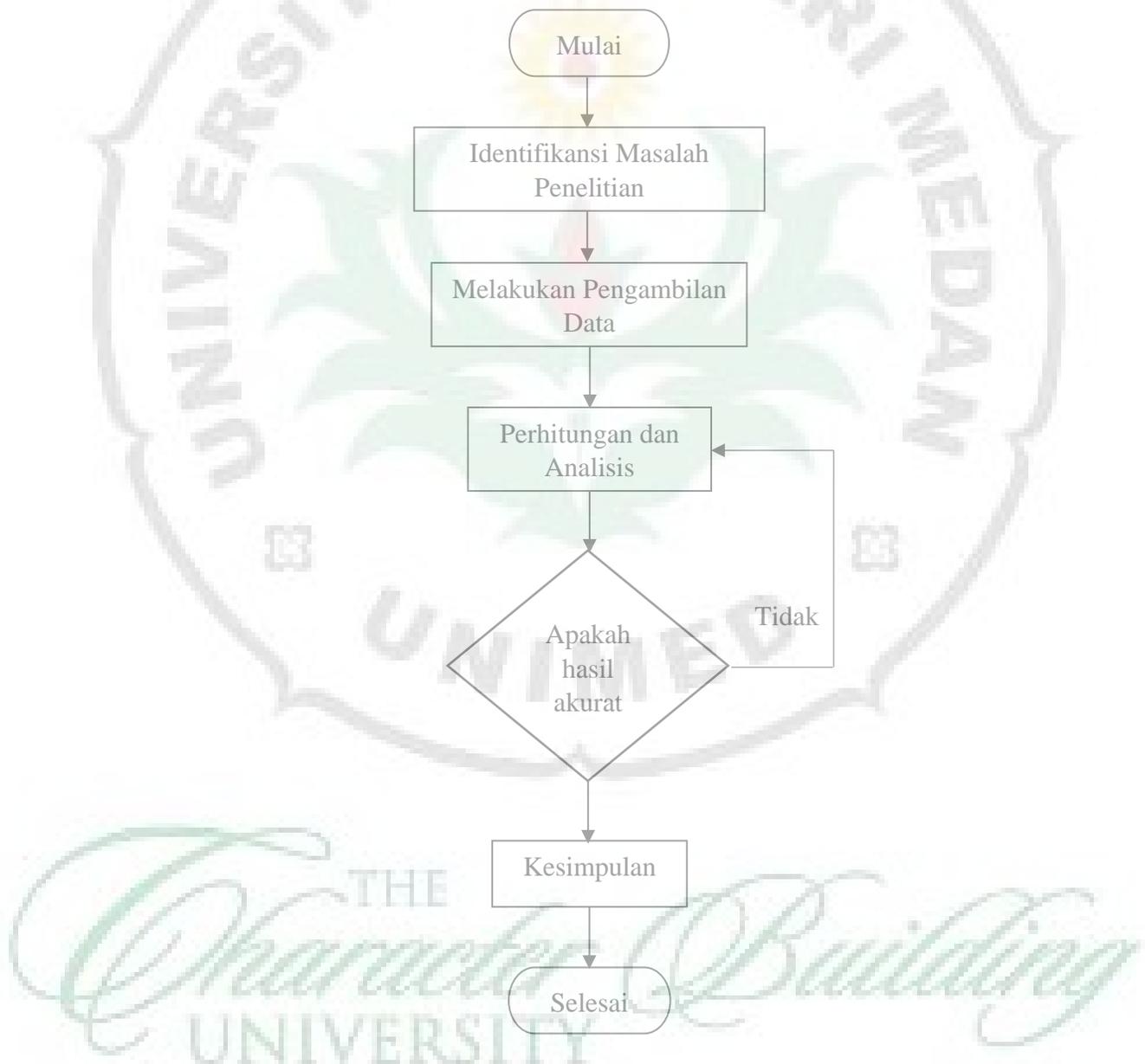


Gambar 3.1 Kamera Thermovisi Irisys IRI4010

3. Laptop
4. *Software* Microsoft Office Word

3.3 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan yang disusun secara sistematis. Secara garis besar tahapan-tahapan tersebut dapat dilihat pada diagram alir (Gambar 3.1) sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Analisis Perkiraan Sisa Umur Pemakaian Transformator Daya Gardu Induk

3.4 Diagram Alir Perhitungan Metode Thermal Relatif

Penelitian ini memiliki beberapa tahapan perhitungan menggunakan metode thermal relatif yang disusun secara sistematis. Secara garis besar tahapan-tahapan perhitungan tersebut dapat dilihat pada diagram alir (Gambar 3.2) sebagai berikut:



Gambar 3.2 Diagram Alir Perhitungan Metode Thermal Relatif

3.5 Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data

Teknik dan prosedur pengumpulan data pada penelitian ini diawali dengan membuat surat perizinan penelitian untuk meminta persetujuan izin penelitian kepada pihak PT. PLN (Persero) Gardu Induk Sei Rotan. Sebagai langkah awal penelitian teknik yang dilakukan yaitu dalam pengambilan data terlebih dahulu mencatat name plate transformator daya. Setelah memperoleh data-data yang diperlukan untuk penelitian maka pada tahap selanjutnya akan dilakukan perapihan data untuk

pengolahan lebih lanjut dengan mengecek kelengkapan data yang telah diperoleh. Adapun data-data yang diamati adalah:

a. Faktor Beban

Dalam menghitung nilai faktor beban yaitu dengan perbandingan antara besarnya beban rata-rata terhadap beban puncak, namun sebelum mencari nilai faktor beban terlebih dahulu menghitung nilai rata-rata beban dengan menjumlahkan semua nilai beban kemudian dibagi dengan banyaknya jumlah beban atau dengan rumus persamaan berikut: rata-rata beban = $\frac{\text{Jumlah Beban}}{\text{Banyak Beban}}$

Kemudian untuk beban puncak dilihat dari besar beban puncak tertinggi dari beban.

b. Rasio rugi-rugi

Dalam menghitung nilai rasio rugi-rugi yaitu dengan perbandingan antara rugi tembaga pada daya pengenal terhadap rugi beban nol dapat dihitung dengan persamaan 2.2.

c. Nilai Eksponen Minyak dan Belitan

Nilai eksponen minyak dan belitan berdasarkan standart IEC 0076 dengan jenis pendingin ONAN/ONAF yaitu 0,9 dan jenis pendingin OFAF/OFWF yaitu 1,0.

d. Konstanta Minyak dan Belitan

Konstanta minyak dan belitan berdasarkan standar IEC 0076 dengan jenis pendinginnya ONAN/ONAF yaitu 3 dan jenis pendingin OFAF/OFWF yaitu 2.

e. Suhu *Top Oil* dan Suhu *Hot Spot*

Pengukuran suhu minyak atas atau suhu *top oil* dan suhu titik panas atau *Hot Spot* dilakukan dengan menggunakan kamera Irisys IRI4010, yang dimana alat ukur ini adalah alat yang biasa digunakan oleh pihak PLN untuk mengukur suhu objek ataupun peralatan listrik yang ada di Switcyard. Objek pengukuran suhu minyak atas ini yaitu pada bagian tangki konservator pada transformator. Sementara untuk objek pengukuran suhu titik panas atau *hot spot* yaitu pada bagian *main tank* atau *body* transformator.

3.6 Prosedur Pengukuran Suhu *Top Oil* dan Suhu *Hot Spot*

Langkah-langkah proses pengukuran suhu *Top Oil* dan suhu *Hot Spot*

1. Masukkan kartu memori/*sd card* pada slot memori dikamera
2. Tekan tombol untuk menyalakan kamera
3. Tunggu sampai proses startup atau loading selesai
4. Arahkan kamera pada objek tangki konservator dan *maintank*
5. Kemudian mengatur fokus dengan memutar fokus ring pada kamera
6. Tekan tombol save untuk menyimpan gambar
7. Setelah selesai melakukan pengukuran matikan kamera
8. Kemudian jalankan perangkat lunak atau aplikasi FLIR Tools pada komputer (Install jika belum ada dikomputer atau laptop)
9. Ambil memori *sd card* pada kamera lalu gunakan *card rider* untuk mengkoneksikan memori dengan komputer
10. Pindahkan gambar yang telah diambil ke FLIR Tools untuk kemudian dilakukan analisa dan membuat laporan.

3.7 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang akan dilakukan dalam penelitian ini dilakukan melalui perhitungan sebagai berikut:

3.7.1 Perhitungan Faktor Beban dan Rasio Rugi-rugi

Untuk perhitungan awal yaitu menghitung faktor beban dan rasio rugi-rugi untuk parameter perhitungan kenaikan awal suhu *top oil* dan *hot spot* menggunakan persamaan 2.1 dan persamaan 2.2 dibawah ini.

- a. Faktor Beban (K)

$$K = \frac{\text{Beban Rata-rata}}{\text{Beban Puncak}} \dots\dots\dots(2.1)$$

- b. Rasio Rugi-rugi (R)

$$R = \frac{\text{Rugi Tembaga pada daya pengenalan}}{\text{Rugi Beban Nol}} \dots\dots\dots(2.2)$$

3.7.2 Analisis Perhitungan Kenaikan Awal *Top Oil* dan *Hot Spot*

Perhitungan ini dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter berupa faktor beban, rasio rugi-rugi, eksponen minyak dan belitan, kenaikan suhu minyak atas ketika beban awal dan kenaikan titik panas ketika beban awal.

- a. Kenaikan awal suhu top oil atau minyak atas dapat dihitung dengan persamaan 2.3 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{TO,i} = \Delta\theta_{TO,R} \left(\frac{1+RK^2}{1+R} \right)^n \dots\dots\dots(2.3)$$

dimana: $\Delta\theta_{TO,R}$: kenaikan suhu *top oil* awal ranting beban (rata-rata)

R : rasio rugi-rugi $\left(\frac{\text{rugi beban tembaga pada kapasitas daya}}{\text{rugi beban nol}} \right)$

K : faktor beban $\left(\frac{\text{beban rata-rata}}{\text{beban puncak}} \right)$

n : nilai eksponen minyak

- b. Kenaikan awal suhu *hot spot* dapat dihitung dengan persamaan 2.5 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{H,i} = (\Delta\theta_{H,R})(K^{2y}) \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana: $\Delta\theta_{H,R}$: kenaikan suhu titik panas awal ranting beban (rata-rata)

K : faktor beban

y : eksponen belitan

3.7.3 Analisis Perhitungan Kenaikan Suhu *Top Oil* dan *Hot Spot*

Dalam perhitungan ini parameter yang digunakan berupa perhitungan dari kenaikan awal *top oil* dan *hot spot* kemudian konstanta *top oil* dan hot spot.

- a. Kenaikan suhu top oil dapat dihitung dengan persamaan 2.4 dibawah ini:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} - \Delta\theta_{TO,i}) \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau_{TO}}} \right) + \Delta\theta_{TO,i} \dots\dots\dots(2.4)$$

dimana: $\Delta\theta_{TO,u}$: kenaikan suhu *top oil* terbesar trafo saat beroperasi

$\Delta\theta_{TO,i}$: kenaikan suhu *top oil* awal

e : nilai euler 2,718

τ_{TO} : konstanta *top oil*

- b. Kenaikan suhu hot spot belitan dapat dihitung dengan persamaan 2.6 dibawah ini:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,u} - \Delta\theta_{H,i})(1 - e^{-\frac{1}{\tau_w}}) + \Delta\theta_{H,i} \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana: $\Delta\theta_{H,u}$: kenaikan suhu titik panas terbesar trafo saat beroperasi

$\Delta\theta_{H,i}$: kenaikan awal suhu

e : nilai euler 2,718

τ_w : konstanta belitan

3.7.4 Analisis Perhitungan total suhu *Hot Spot*

Suhu hot spot tergantung juga pada suhu lingkungan dan pada suhu top oil dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.7 dibawah ini:

$$\theta_H = \theta_A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana: θ_H : total suhu titik panas dalam belitan

$\Delta\theta_{TO}$: kenaikan akhir suhu *top oil*

$\Delta\theta_H$: kenaikan akhir suhu *hot spot*

θ_A : Suhu Lingkungan

3.7.5 Menentukan Faktor Laju Penuaan Termal Relatif, susut umur trafo dan sisa umur pemakaian transformator

- a. Menentukan Faktor Laju Penuaan Thermal Relatif yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8 dibawah ini:

$$V = 2^{(\theta_H - 98)/6} \dots\dots\dots(2.8)$$

dimana: θ_H : total suhu titik panas dalam belitan

98°C : standart suhu titik panas belitan

- b. Kemudian menentukan Susut Umur yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9 dibawah ini:

$$t = \frac{V \times T}{\text{Periode waktu}} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana: t : konstanta waktu

V : nilai relatif dari umur pemakaian

T : periode pemakaian trafo = 24 jam

- c. Setelah itu menghitung sisa umur transformator dengan persamaan 2.10 dibawah ini:

$$L = \frac{1}{t} \times \text{rata-rata umur normal trafo} \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana : L : pengurangan umur

t : konstanta waktu

rata-rata umur normal trafo menurut standard IEEE 20,55 tahun

BAB IV HASIL PENELITIAN

4.1 Deskripsi Hasil Penelitian

Pada penelitian ini pengukuran dilakukan pada transformator daya 3 merk Schneider Electric di Gardu Induk Sei Rotan. Waktu penelitian ini dilakukan pada hari Senin tanggal 20 sampai dengan tanggal 31 desember 2021. Pengukuran suhu dilakukan saat waktu beban awal pagi pada pukul 8:00 WIB, beban naik pada pukul 10:00 WIB, beban puncak siang pada pukul 14:00 WIB, beban puncak malam pada pukul 20:00 WIB dan beban turun pada pukul 22:00 WIB. Data-data dari transformator daya 3 ditunjukkan pada tabel 4.1 sebagai berikut.

4.1.1 Data Nameplate Transformator Daya 3 Gardu Induk Sei Rotan

Tabel 4.1 Data Nameplate Tranformator Daya Schneider Electric

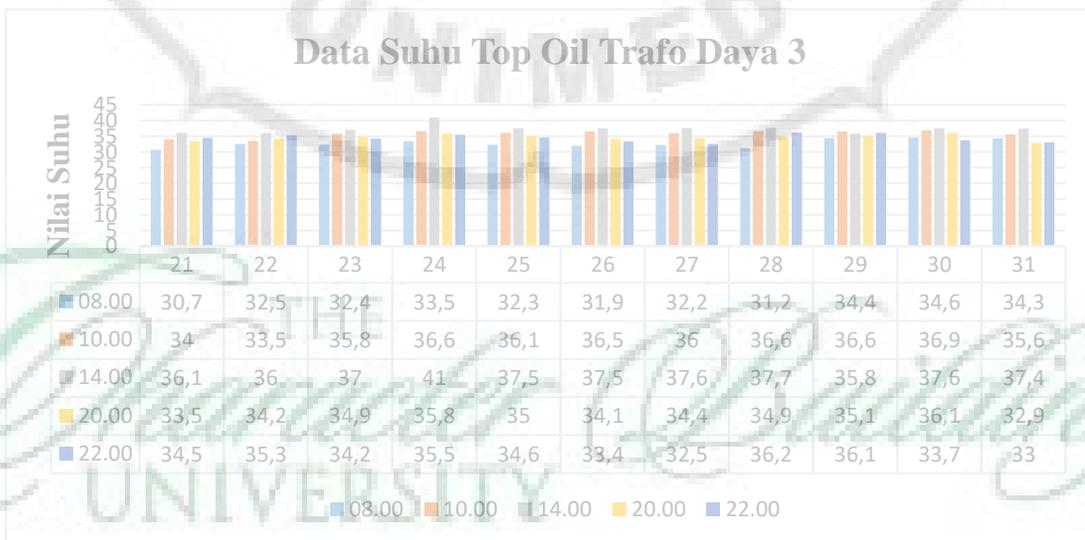
Data Spesifikasi Trafo Daya 3	
Merk	Schneider Electric
Kapasitas Daya	60 MVA
Tegangan Primer	150 KV
Tegangan Sekunder	20 KV
Frekuensi	50 HZ
Pendingin	ONAN/ONAF
Rugi Tembaga/Inti Trafo	115 KW
Rugi Beban Nol	30 KW
Winding Temperatur Belitan Alarm	106 °C
Winding Temperatur Belitan Trip	124 °C
Oil Temperatur Trip	105 °C
Nilai Eksponen Minyak (n) = 0,9	Konstanta Top Oil = 3
Nilai Eksponen Belitan (y) = 1,6	Konstanta Belitan = 1

4.1.2 Data Suhu Top Oil Transformator Daya 3 Schneider

Berikut ini merupakan data suhu *top oil* atau minyak atas pada tangki konservator transformator daya 3 yang diukur menggunakan alat thermovisi mulai pada tanggal 21-31 desember saat waktu atau jam-jam tertentu yaitu dipagi hari pukul 8.00 dan pukul 10.00, kemudian siang pada pukul 14.00, malam pada pukul 20.00 dan pukul 22.00 WIB.

Tabel 4.2 Data Suhu Minyak Atas Tangki Transformator Daya 3 Schneider

Jam	Suhu Top Oil (Minyak Atas Tangki Konservator) °C Tanggal 21-31										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
08.00	30,7	32,5	32,4	33,5	32,3	31,9	32,2	31,2	34,4	34,6	34,3
10.00	34	33,5	35,8	36,6	36,1	36,5	36	36,6	36,6	36,9	35,6
14.00	36,1	36	37	41	37,5	37,5	37,6	37,7	35,8	37,6	37,4
20.00	33,5	34,2	34,9	35,8	35	34,1	34,4	34,9	35,1	36,1	32,9
22.00	34,5	35,3	34,2	35,5	34,6	33,4	32,5	36,2	36,1	33,7	33
Rata-rata	35										
Tertinggi	41										



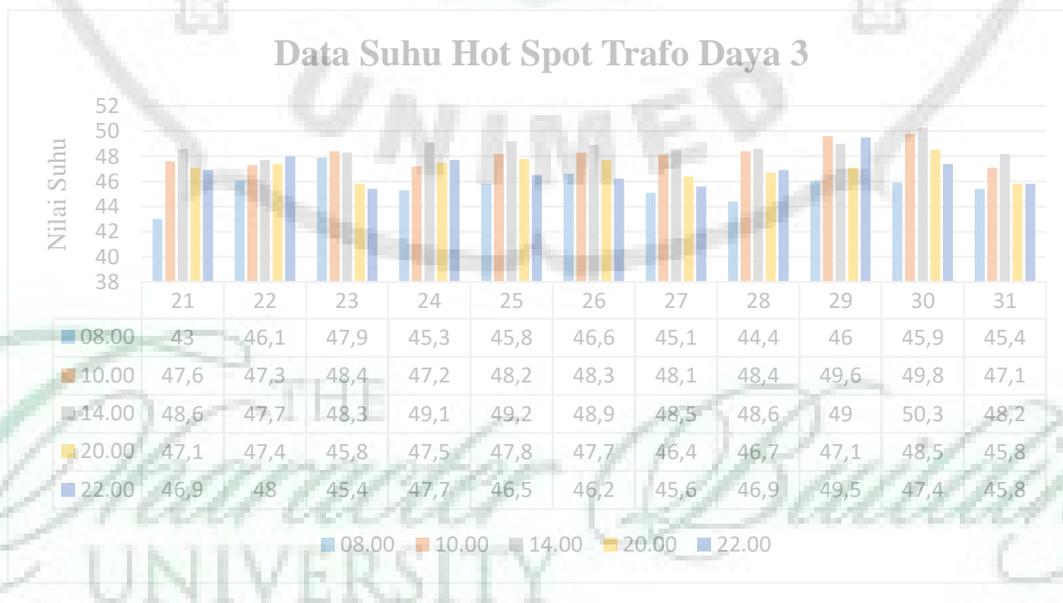
Gambar 4.1 Grafik Suhu Minyak Atas Trafo Daya 3

4.1.3 Data Suhu *Hot Spot* Transformator Daya 3 Schneider

Berikut ini merupakan data suhu *hot spot* pada transformator daya 3 yang diukur juga menggunakan alat *thermovisi* pada tanggal yang sama dengan data suhu *top oil* diatas dan pada pukul yang sama pula yaitu pada pukul 8.00 dan pukul 10.00, kemudian siang pada pukul 14.00, malam pada pukul 20.00 dan pukul 22.00 WIB.

Tabel 4.3 Data Suhu Titik Panas Transformator Daya 3 Schneider

Jam	Suhu Hot Spot (Titik Panas) Di Dalam Belitan $^{\circ}\text{C}$ Tanggal 21-31										
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
08.00	43	46,1	47,9	45,3	45,8	46,6	45,1	44,4	46	45,9	45,4
10.00	47,6	47,3	48,4	47,2	48,2	48,3	48,1	48,4	49,6	49,8	47,1
14.00	48,6	47,7	48,3	49,1	49,2	48,9	48,5	48,6	49	50,3	48,2
20.00	47,1	47,4	45,8	47,5	47,8	47,7	46,4	46,7	47,1	48,5	45,8
22.00	46,9	48	45,4	47,7	46,5	46,2	45,6	46,9	49,5	47,4	45,8
Rata-rata	47,3										
Tertinggi	50,3										



Gambar 4.2 Grafik Suhu Hot Spot Trafo Daya 3

4.2 Analisis Data Penelitian

4.2.1 Data Dari Perhitungan Faktor Beban dan Perbandingan Rugi

a. Faktor Beban (K) (per Unit)

Nilai faktor beban adalah perbandingan antara besarnya beban rata-rata terhadap beban puncak yang tertinggi kemudian dihitung perbandingannya untuk periode harian, bulanan, dan tahunan. Dalam penelitian ini yang akan dihitung adalah untuk periode bulanan, yaitu menggunakan persamaan 2.1.

Sebelum menghitung faktor beban terlebih dahulu menghitung atau mencari nilai rata-rata dari data beban transformator daya 3 gardu induk sei rotan pada bulan Desember dengan menghitung:

$$\text{Rata-rata beban} = \frac{\text{Jumlah Beban}}{\text{Banyak Beban}}$$

$$\text{Rata-rata beban} = \frac{21212,2}{744}$$

$$\text{Rata-rata beban} = 28,5 \text{ MW}$$

Setelah mendapatkan nilai rata-rata beban kemudian menghitung faktor beban dengan menggunakan rumus persamaan dibawah ini:

Faktor Beban Per Unit

$$K = \frac{\text{Beban Rata-rata}}{\text{Beban Puncak}}$$

$$K = \frac{28,5}{39}$$

$$K = 0,73 \text{ pu}$$

Jadi nilai faktor dari perhitungan perbandingan beban rata-rata dengan beban puncak pada bulan Desember adalah sebesar 0,73 pu dengan beban rata-rata sebesar 28,5 MW dan beban puncaknya yaitu sebesar 39 MW.

b. Nilai Rasio Rugi-rugi (R)

Rasio rugi-rugi untuk transformator daya yaitu perbandingan rugi tembaga pada kapasitas daya terhadap daya rugi beban nol. Berdasarkan data yang didapat dari transformator 3 Gardu Induk Sei Rotan bahwa besar daya rugi beban nol yaitu 38 MW dan rugi tembaga pada daya pengenalnya atau kapasitas daya 60 MVA yaitu sebesar 115 MW dan hasil perhitungannya yang didapat yaitu menggunakan persamaan 2.2.

Rasio Rugi-rugi

$$R = \frac{\text{Rugi Tembaga pada daya pengenal}}{\text{Rugi Beban Nol}}$$

$$R = \frac{115}{30}$$

$$R = 3,8$$

4.2.2 Analisis Perhitungan Suhu *Top Oil*

Dalam mengetahui kenaikan total suhu minyak atas terlebih dahulu perlu melakukan perhitungan kenaikan awal suhu *top oil* ($\Delta\theta_{TO,i}$) lalu kemudian menghitung kenaikan total suhu ($\Delta\theta_{TO}$) dari minyak atas pada tangki konservator.

A. Kenaikan Awal Suhu Minyak Atas

Menghitung kenaikan awal suhu *top oil* atau minyak atas ($\Delta\theta_{TO,i}$) dengan jenis pendingin transformator daya (ONAN/ONAF) memerlukan parameter-parameter berupa faktor beban, rasio rugi-rugi, nilai eksponen minyak dan suhu *top oil* ketika beban awal. Maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.3 dan hasil perhitungannya didapat:

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

$$\Delta\theta_{TO,i} = 35 \text{ } ^\circ\text{C} \left(\frac{1+3,8 (0,73)^2}{1+3,8} \right)^{0,9}$$

$$\Delta\theta_{TO,i} = 35\text{ }^{\circ}\text{C} \left(\frac{3}{4,8}\right)^{0,9}$$

$$\Delta\theta_{TO,i} = 35\text{ }^{\circ}\text{C} (0,63)$$

$$\Delta\theta_{TO,i} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan hasil perhitungan maka didapat hasil nilai kenaikan awal suhu *top oil* adalah sebesar 22 °C.

B. Kenaikan Akhir Suhu Minyak Atas

Selanjutnya setelah menghitung kenaikan suhu awalnya kemudian dihitung kenaikan akhir suhu *top oil* nya ($\Delta\theta_{TO}$), dihitung dengan menggunakan persamaan 2.4. Dalam perhitungan ini diperlukan beberapa parameter-parameter berupa nilai kenaikan awal suhu *top oil*, nilai konstanta *top oil* dan suhu *top oil* terbesar saat transformator beroperasi yaitu sebesar 50°C. Maka hasil perhitungan yang didapat yaitu:

$$\Delta\theta_{TO} = (\Delta\theta_{TO,u} - \Delta\theta_{TO,i}) (1 - e^{-\frac{1}{\tau_{TO}}}) + \Delta\theta_{TO,i}$$

$$\Delta\theta_{TO} = (50^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}) (1 - e^{-\frac{1}{3}}) + 22^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{TO} = 28^{\circ}\text{C} (0,28) + 22^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{TO} = 7,8^{\circ}\text{C} + 22^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_{TO} = 29,8^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kenaikan suhu *top oil* maka kenaikan akhir dari suhu *top oil* atau suhu minyak atas pada konservator adalah sebesar 29,8°C.

4.2.3 Analisis Perhitungan Suhu *Hot Spot*

Dalam melakukan perhitungan total suhu *hot spot* (θ_H), maka terlebih dahulu perlu dilakukan perhitungan kenaikan awal suhu *hot spot* ($\Delta\theta_{H,i}$) dan kemudian melakukan perhitungan suhu *hot spot* akhir ($\Delta\theta_H$).

A. Kenaikan Awal Suhu *Hot Spot*

Menghitung kenaikan awal suhu *hot spot* ($\Delta\theta_{H,i}$) dengan jenis pendinginnya (ONAN/ONAF) memerlukan parameter-parameter berupa faktor beban, nilai eksponen belitan dan suhu awal belitan ketika beban awal. Maka dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.5 dan hasil perhitungannya didapat:

$$\Delta\theta_{H,i} = (\Delta\theta_{H,R})(K^{2y})$$

$$\Delta\theta_{H,i} = (47,3^{\circ}\text{C})(0,73^{2(1,6)})$$

$$\Delta\theta_{H,i} = (47,3^{\circ}\text{C})(0,73^{(3,2)})$$

$$\Delta\theta_{H,i} = (47,3^{\circ}\text{C})(0,36)$$

$$\Delta\theta_{H,i} = 17^{\circ}\text{C}$$

B. Kenaikan Akhir Suhu *Hot Spot*

Kemudian selanjutnya menentukan kenaikan akhir dari suhu *hot spot* dengan menggunakan persamaan 2.6 yang memerlukan parameter-parameter berupa nilai konstanta belitan dan suhu *hot spot* terbesar ($\Delta\theta_{H,u}$) pada transformator daya gardu induk sei rotan saat beroperasi yaitu sebesar 70°C , maka hasil perhitungan yang didapat yaitu:

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,u} - \Delta\theta_{H,i}) (1 - e^{-\frac{1}{\tau w}}) + \Delta\theta_{H,i}$$

$$\Delta\theta_H = (70^{\circ}\text{C} - 17^{\circ}\text{C}) (1 - e^{-\frac{1}{1}}) + 17^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_H = (53^{\circ}\text{C})(0,63) + 17^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_H = 33,3^{\circ}\text{C} + 17^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta\theta_H = 50,3^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kenaikan suhu *hot spot* maka hasil dari kenaikan akhir suhu *hot spot* adalah sebesar $50,3^{\circ}\text{C}$

C. Total Suhu *Hot Spot* Belitan

Suhu titik panas atau *hot spot* belitan tergantung pada suhu lingkungan dan juga dari kenaikan akhir suhu minyak atas atau *top oil* juga kenaikan akhir dari suhu titik panas yang mana dapat dihitung dengan persamaan 2.7. Hasil dari perhitungannya yaitu:

$$\theta_{\text{H}} = \theta_{\text{A}} + \Delta\theta_{\text{TO}} + \Delta\theta_{\text{H}}$$

$$\theta_{\text{H}} = 30^{\circ}\text{C} + 29,8^{\circ}\text{C} + 50,3^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{\text{H}} = 110,1^{\circ}\text{C}$$

Berdasarkan hasil perhitungan kenaikan suhu minyak atas atau *top oil* dan perhitungan kenaikan suhu titik panas atau *hot spot* maka didapat masing-masing hasil dari kenaikan nilai suhunya yaitu nilai pada kenaikan suhu *top oil* adalah sebesar $29,8^{\circ}\text{C}$ kemudian nilai pada kenaikan suhu *hot spot* adalah sebesar $50,3^{\circ}\text{C}$ kemudian suhu lingkungan rata-rata dan juga standar dari IEEE adalah sebesar 30°C . Sehingga total temperatur *hot spot* atau suhu titik panas belitan adalah sebesar $110,1^{\circ}\text{C}$.

4.2.4 Analisis Perhitungan Sisa Umur Transformator

Berdasarkan hasil perhitungan suhu *hot spot* dapat ditentukan sisa umur dari transformator 3 Gardu Induk Sei Rotan, dengan total suhu titik panas belitan yang didapat dari perhitungan sebesar $107,6^{\circ}\text{C}$ dengan jenis pendingin ONAN/ONAF, maka hasil dari perhitungan umur transformator dapat dihitung dengan persamaan 2.8 dan 2.9 yaitu:

Faktor Laju Penuaan Termal Relatif (V)

$$V = 2^{(\theta_{\text{H}} - 98)/6}$$

$$V = 2^{(110,1 - 98)/6}$$

$$V = 2^{12,1/6}$$

$$V = 2^2$$

Susut Umur Transformator

$$t = \frac{\text{Nilai relatif dari umur pemakaian (V) x Periode Pemakaian (T)}}{\text{Periode Waktu}}$$

$$t = \frac{2^2 \times 24}{24}$$

$$t = 4$$

Selanjutnya menghitung sisa umur transformator dengan persamaan 2.10, maka sisa umur dari transformator yaitu:

$$L = \frac{1}{t} \times \text{rata-rata umur transformator normal}$$

$$L = \frac{1}{4} \times 20,55 \text{ tahun standar IEEE}$$

$$L = 0,25 \times 20,55$$

$$L = 5,1 \text{ Tahun}$$

Hasil perhitungan maka sisa umur transformator daya 3 merek *Schneider Electric* dengan jenis pendingin ONAN/ONAF pada Gardu Induk Sei Rotan adalah 5,1 Tahun. Dari analisis data yang didapat bahwa semakin besar nilai total suhu *hot spot* maka sisa umur transformator daya bisa semakin pendek umurnya. Hal tersebut disebabkan karena nilai faktor beban, jenis pendingin yang digunakan dan juga suhu puncak yang pernah dicapai atau suhu tertinggi pada suhu *top oil* dan suhu *hot spot* nya.

4.3 Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis data penelitian yang telah dihasilkan akan diketahui apakah hasil dari analisis data penelitian sudah sesuai dengan tujuan penelitian. Tabel 4.4 memperlihatkan perbandingan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya sebagai berikut.

Tabel 4.4 Penelitian sebelumnya mengenai umur transformator

No	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
1.	Ronaldo Saragih (Tahun 2017)	Analisis Kinerja Isolasi Transformator Tenaga Akibat Pengaruh Pembebanan	Berdasarkan hasil penelitian semakin besar nilai pembebanan maka semakin besar susut umur suatu transformator dan sebaliknya. Untuk pembebanan sebesar 100%, 90%, dan 80%. Nilai susut umur terbesar diperoleh pada pembebanan 100% yaitu sebesar 483% dan yang terkecil pada pembebanan 80% yaitu sebesar 39%.
No	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
2.	Adi Satya Gianto (Tahun 2015)	Perhitungan Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Suhu Lingkungan	Suhu udara sekitar tempat dioperasikannya transformator sangat berpengaruh pada karakteristik termal dan suhu titik panas belitan transformator. Makin tinggi suhu sekitar, maka makin tinggi pada suhu titik panas belitan transformator.
No	Peneliti	Judul	Hasil Penelitian
3	Kurniawan (Tahun 2016)	Studi Analisa Pengaruh Pembebanan Dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Pada Gardu Induk Garuda Sakti	Suhu hotspot ketiga transformator gardu induk Garuda Sakti masih dalam batas aman yang ditetapkan oleh publikasi IEC yaitu tidak melebihi 98°C selama 24 jam operasi. Beban memiliki pengaruh yang lebih besar dalam kenaikan temperatur hotspot transformator dibandingkan dengan temperatur lingkungan.

4.3.1 Kenaikan Suhu Total Titik Panas Belitan (*Hot Spot*)

Menurut Standar IEC No 354 yang juga telah menjadi standar Pembangkit Listrik Negara (PLN) saat ini (SPLN No 17 A Tahun 1979), sebuah transformator akan mengalami umur yang normal pada kondisi suhu *hot spot* 98°C pada pembebanan yang terus menerus dengan suhu sekitar (*ambient temperature*) 20°C. Apabila transformator tersebut mengalami suhu *hot spot* yang lebih besar dari 98°C, susut umurnya akan semakin cepat (besar) sehingga dapat memperpendek umur dari yang diharapkan.

Berdasarkan hasil perhitungan analisis kenaikan suhu minyak atas atau suhu *top oil* dan kenaikan suhu titik panas belitan atau suhu *hot spot* pada transformator daya 3 merek *schneider electric* yang ada di Gardu Induk Sei Rotan hasil dari perhitungan penjumlahan kenaikan suhu akhir minyak atas ditambahkan dengan kenaikan akhir suhu titik panas belitan dan juga ditambahkan dengan suhu lingkungan jadi total suhu *hot spot* belitan ataupun titik panas belitan sebesar 110,1°C dengan nilai faktor beban 0,73 pu dan suhu lingkungan rata-rata sebesar 30°C. Berdasarkan hasil data penelitian tersebut maka suhu *hot spot* belitan transformator daya 3 Gardu Induk Sei Rotan melebihi standart yang ditentukan oleh standart IEC No 354 dan standar SPLN No 17 A Tahun 1979.

4.3.2 Sisa Umur Transformator Daya

Menurut Standar IEEE Tahun 1999 rata-rata umur normal transformator adalah selama 20,55 tahun. Dan menurut standart IEC 354 juga standart PLN pun menetapkan umur transformator 20 tahun. Transformator daya mengalami kenaikan susut umur dan memperpendek umur transformator dari yang dihapkan jika suhu titik panas belitannya tidak melebihi 98°C.

Mengacu daripada kedua standart tersebut bahwa hasil penelitian dan perhitungan perkiraan sisa umur transformator daya 3 Gardu Induk Sei Rotan melebihi suhu standart yang telah ditetapkan oleh IEC No 354 dan SPLN No 17 A Tahun 1979 sehingga sisa umur transformator daya tersebut kurang lebih 5,1 Tahunan lagi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian skripsi ini maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil analisis perhitungan bahwa besarnya nilai suhu *hot spot* atau suhu titik panas belitan pada transformator daya 3 Schneider Gardu Induk Sei Rotan semakin tinggi nilai beban atau jika faktor beban lebih dari 1 saja maka akan semakin tinggi pula nilai suhu titik panas pada belitan dan akan semakin memperpendek umur dari transformator daya tersebut.
2. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan sisa umur dari transformator daya 3 Gardu Induk Sei Rotan yaitu sekitar 5,1 tahun dengan nilai faktor beban sebesar 0,73 pu, dengan suhu lingkungan sebesar 30°C dan total suhu *hot spot* atau suhu titik panas belitan sebesar 110,1°C.
3. Parameter-parameter yang digunakan dalam menghitung sisa umur transformator yaitu faktor beban, nilai rasio rugi-rugi, kenaikan akhir suhu *top oil* atau suhu minyak atas pada tangki konservator transformator, kenaikan akhir suhu titik panas atau *hot spot* pada belitan dan juga parameter yang terakhir yaitu suhu lingkungan.

5.2 Saran

1. Apabila ingin mendapatkan umur transformator yang maksimum atau sesuai dengan standar yang diharapkan, maka agar ditingkatkan lagi perhatiannya terhadap transformator tersebut, paling tidak menghidupkan pen atau kipas pada saat beban puncak siang hari demi untuk mengurangi pengaruh panas dari lingkungan terik saat beban puncak siang hari. Juga sebaiknya kepada produsen agar mendesain trafo yang beroperasi terhadap suhu sekitar yang sesuai dengan suhu yang ada di Indonesia yaitu 30°C.
2. Pemeliharaan untuk transformator daya 3 di Gardu Induk Sei Rotan agar tetap dilakukan secara berkala sesuai dengan yang ditetapkan oleh pabrik atau panduan pemeliharaan yang ada, agar transformator tetap dapat beroperasi dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adie Satrya Gianto, 2015. Perhitungan Pernurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Suhu Lingkungan. Ejournal. Jurusan Teknik Elektro. Fakultas Teknik Industri. Universitas Tri Sakti.
- Agus Junaidi, Rahmaniar, Rudi Salman, Joni S. Rambey dkk", Modelling and Simulation of Symmetricala Unsymmetrical Faults on 14 Bus Ieee-Power Systems", Journal of theoretical and Applied Information Technology 31st October 2021. Vol.99. No 20. Issn: 1992-8645, pp 4704-4714
- Cristian Siahaan. 2018. *Assessment* Model Penuaan Transformator Daya Sesuai Standar *IEC/IEEE* Dan Penentuan Nilai Ekonomis Dengan Metode Tingkat Tahunan.
- Ekosurya Harsono, Agung. 2012. "Analisa Pengaruh Pembebanan Transformator Terhadap Kandungan Gas Terlarut Minyak Isolasi". Skripsi. Universitas Diponegoro.
- Janny Olly Wuwung. 2010. Pengaruh Pembebanan Terhadap Kenaikan Suhu Pada Belitan Transformator Daya Jenis Terendam Minyak. Fakultas Teknik. Universitas Sam Ratulangi.
- Kurniawan, Firdaus. 2016. Studi Analisa Pengaruh Pembebanan dan Temperatur Lingkungan Terhadap Susut Umur Transformator Daya Pada Gardu Induk Garuda Sakti. Ejournal. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Riau.
- Muadzah Rahmat, 2017, Remaining Life Assessment Transformator 150/20kv Dengan metode Degradasi Isolasi Aplikasi Gardu Induk Titi Kuning, Skripsi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara.
- Parulian Lumban Tobing, 2019, Studi Analisa Sistem Proteksi Trafo 150KV Daya 60 MVA Menggunakan Rele Differensial Pada Gardu Induk Tebing Tinggi, S ripsi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas HKBP Nommensen.

Rahmaniar, Agus J, Rudi Salman, dkk, 2020 , "Modelling and Simulation of Reduce Harmonic Distortion in Non-linear Loads" *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal* Vol. 5, No. 5, 364-369 (2020).

Rahmaniar, Abd Hakim dkk. 2022, " Symmetrical Faults: Model dan Simulasi Analisis Gangguan Hubung Singkat Simetris Sistem Interkoneksi Tenaga Listrik Menggunakan Teknologi Komputerf", Monograf, Polmed Press. ISBN 978-623-5963-09-9

Raisha Uchrowi, 2020, Analisis Pengaruh Beban Tak Seimbang Terhadap Arus Netral Pada Transformator Distribusi Di Gardu Trafo II Universitas Negeri Medan, Skripsi, Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan.

Ronaldo Saragih, 2017, Analisis Kinerja Isolasi Transformator Tenaga Akibat Pengaruh Pembebanan Studi Kasus Transformator Tenaga 3 Gardu Induk Gas Insulated Switchgear Listrik Medan, Skripsi, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara.

Sigid, Purnama. 2011. Analisa Pengaruh Pembebanan Terhadap Susut Umur Transformator Tenaga (Studi Kasus Trafo GTG PLTGU Tambak Lorok Semarang, Ejournal, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

Siregar, Rizky Syahputra. 2017. Perhitungan Arus Netral.Rugi-rugi, dan Efisiensi Transformator Distribusi 3 Fasa 20 kV/400V Di PT PLN (Persero) Rayon Medan Timur Akibat Ketidakseimbangan Beban. Skripsi, tidak diterbitkan, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara, Medan.

Yustinus, Pranata Sinuhaji. 2012. "Analisis Keadaan Minyak Isolasi Transformator Daya 150 kv Menggunakan Metode Dissolved Gas Analysis (DGA) Dan Fuzzy Logic Pada Gardu Induk Wilayah Sidoarjo". Skripsi. Universitas Jember.

Zuhal. 1993. Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Jakarta: Penerbit Gramedia Pustaka Utama.



THE
Character Building
UNIVERSITY

LAMPIRAN

Lampiran 1

Data Suhu Top Oil atau Minyak Atas Satuan $^{\circ}\text{C}$

Tanggal	Pukul				
	8:00	10:00	14:00	20:00	22:00
21-31					
21	30,7	34	36,1	33,5	34,5
22	32,5	33,5	36	34,2	35,3
23	32,4	35,8	37	34,9	34,2
24	33,5	36,6	41	35,8	35,5
25	32,3	36,1	37,5	35	34,6
26	31,9	36,5	37,5	34,1	33,4
27	32,2	36	37,6	34,4	32,5
28	31,2	36,6	37,7	34,9	36,2
29	34,4	36,6	35,8	35,1	36,1
30	34,6	36,9	37,6	36,1	33,7
31	34,3	35,6	37,4	32,9	33

THE
Character Building
 UNIVERSITY

Lampiran 2

Data Suhu Hot Spot Satuan $^{\circ}\text{C}$

Tanggal 21-31	Pukul				
	8:00	10:00	14:00	20:00	22:00
21	43	47,6	48,6	47,1	46,9
22	46,1	47,3	47,7	47,4	48
23	47,9	48,4	48,3	45,8	45,4
24	45,3	47,2	49,1	47,5	47,7
25	45,8	48,2	49,2	47,8	46,5
26	46,6	48,3	48,9	47,7	46,2
27	45,1	48,1	48,5	46,4	45,6
28	44,4	48,4	48,6	46,7	46,9
29	46	49,6	49	47,1	49,5
30	45,9	49,8	50,3	48,5	47,4
31	45,4	47,1	48,2	45,8	45,8

THE
Character Building
 UNIVERSITY

Lampiran 3

Dokumentasi Penelitian Pagi, Siang dan Malam Hari Dan Alat Ukur Thermovisi



Gambar 1. Pengukuran Suhu Bodi luar Belitan Transformator pada Siang Hari



Gambar 2. Pengukuran Suhu Tangki Konservator Transformator



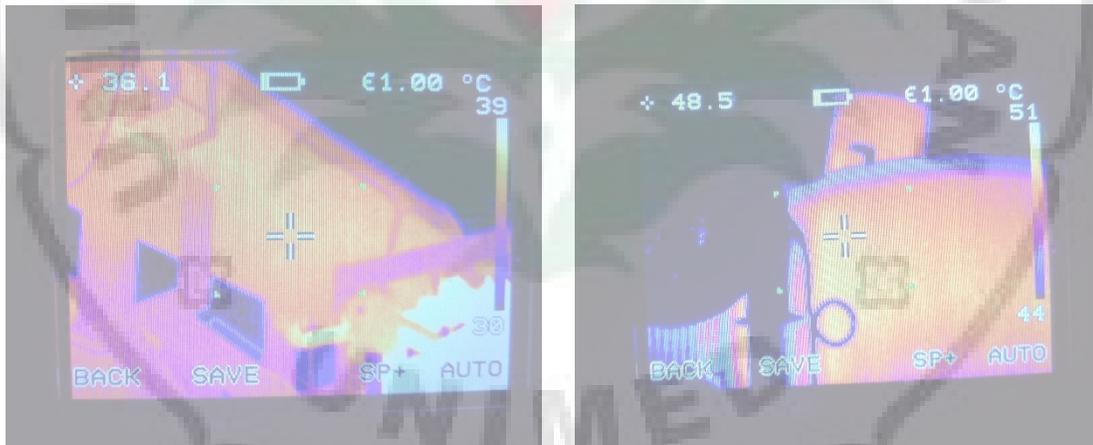
Gambar 3. Pengukuran Suhu Bodi luar Belitan Transformator pada Malam Hari

Lampiran 4

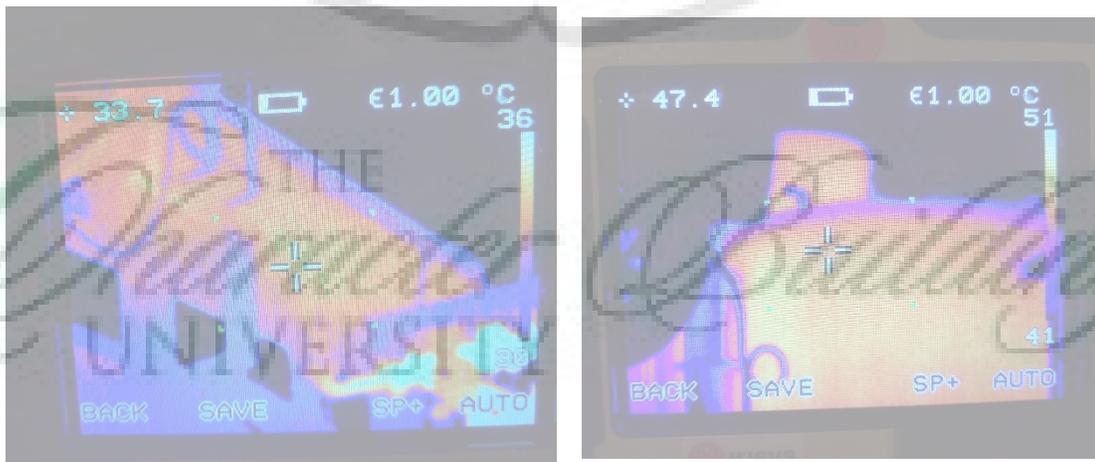
Dokumentasi Hasil Pengukuran Suhu Menggunakan Alat Ukur Thermovisi



Gambar 4. Proses Pengukuran Suhu Pada Siang Hari Pukul 14:00 WIB



Gambar 5. Proses Pengukuran Suhu Pada Malam Hari Pukul 20:00 WIB



Gambar 6. Proses Pengukuran Suhu Pada Malam Hari Pukul 22:00 WIB

Lampiran 5

Gambar Nameplate Transformator Daya 3 Schneider Gardu Induk Sei Rotan



Gambar 7. Nameplate Transformator Daya 3 Schneider GI Sei Rotan

Lampiran 6

Surat Penugasan Dosen Pembimbing Skripsi



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
 UNIVERSITAS NEGERI MEDAN
FAKULTAS TEKNIK
 Jalan Willem Iskandar Psr.V-Kotak Pos No.1589-Medan 20221
 Telepon (061) 6625971,Fax. (061) 6614002-6613319
 Laman : www.ft.unimed.ac.id

Nomor : 388/UN33.5.6/PT/2021
 Lamp : -
 Hal : Penugasan Dosen Pembimbing Skripsi
 Kepada Yth. : Dr. Agus Junaidi, ST, MT.
 Di
 Tempat

Ketua Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Medan Memberi Tugas Kepada Saudara, Untuk Membimbing Mahasiswa Tersebut di Bawah Ini:

Nama : Muhammad Ridho Afandi Damanik
 NIM : 5171230007
 Jurusan : Pendidikan Teknik Elektro
 Program Studi : Teknik Elektro S-1
 Dalam pelaksanaan penulisan : Skripsi

Hal-hal yang berkaitan dengan pelaksanaan bimbingan yang meliputi Judul, Jadwal, dan batasan penyelesaian tugas sepenuhnya kami serahkan pada saudara sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian Surat Penugasan ini kami sampaikan untuk dilaksanakan, atas perhatian dan kerjasama yang baik kami ucapkan terima kasih.

Mengetahui,
 dan Dekan
 Wakil Dekan Bidang Akademik

Dr.Zulkifli Marondang M.Si.
 NIP.196807131993031003

Medan, 22 Februari 2021
 Ketua Jurusan Pend. T. Elektro

Dr.Salman Bintang.M.Pd.
 NIP.196806151993031001

Lampiran 7

Surat Izin Penelitian di Gardu Induk Sei Rotan



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN
RISET, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI MEDAN

FAKULTAS TEKNIK

Jalan Willem Iskandar Psr.V-Kotak Pos No.1589-Medan 20221

Telepon (061) 6625971,Fax. (061) 6614002-6613319

Laman : www.ft.unimed.ac.id

Nomor : ~~4600~~ /UN33.5.1/PG/2021 Medan, 26 November 2021
Lamp. : -
Hal : Permohonan Izin Penelitian

Kepada Yth. : Manager PT. PLN (Persero)
UPI3B Sumatera Utara
Jl. Listrik No.12 Medan

di
Tempat

Sehubungan dengan penulisan Skripsi. Dengan hormat kami mohon kesediaan Saudara untuk memberikan izin kepada mahasiswa kami melaksanakan Penelitian di **PT. PLN (Persero) UPI3B ULTG Sei Rotan**.

Nama : Muhammad Ridho Afandi Damanik
NIM : 5171230007
Jurusan : Pendidikan Teknik Elektro
Program Studi : Teknik Elektro (S1)

Judul Skripsi : "Analisis perkiraan umur pemakaian transformator daya pada Gardu Induk PT. PLN (Persero) UPI3B ULTG Sei Rotan menggunakan metode penuaan *Thermal* relatif"

Demikian kami sampaikan, atas bantuan dan kerjasama yang baik kami sampaikan banyak terima kasih.



Tembusan :
1. Ketua Jurusan Pend. Teknik Elektro
2. Arsip

Lampiran 8

Surat Izin Balasan Dari PT.PLN

Nomor : 1904/SDM.02.04/C24060000/2021
 Lampiran : 1 Set
 Sifat : Segera
 Hal : Permohonan Ijin Penelitian

10 Desember 2021



UIP3B SUMATERA
UPT MEDAN

Kepada

Yth. Dekan
 Bidang Akademik
 Universitas Negeri Medan
 Fakultas Teknik
 Jl. Willem Iskandar Psr.V
 Medan 20221

Menunjuk Surat dari Universitas Negeri Medan Jurusan Pendidikan Teknik Elektro alamat Jl. Willem Iskandar Psr.V Medan 20221 Nomor : 4689/UN33.5.1/PG/2021 pada Tanggal 26 Nopember 2021 Perihal Permohonan Izin Penelitian atas Nama :

No	Nama Mahasiswa	Nim	Program Studi
1.	Muhammad Ridho A.Damanik	5171230007	Pendidikan Teknik Elektro

Dengan ini kami mengijinkan melaksanakan Penelitian di ULTG Sei Rotan dimulai tanggal 20 Desember 2021 sampai dengan tanggal 31 Desember 2021 dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Mengisi Daftar hadir.
2. Menjaga Etika, sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan dan ULTG Sei Rotan
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomodasi
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak honorarium dan konsumsi biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan
6. Menunjukkan hasil swab/PCR test atau Antigen yang masih berlaku sebelum memuali pelaksanaan Penelitian ke MULTG dan Pejabat K3L setempat
7. Mengikuti Protokol Kesehatan yang berlaku
8. Peserta Penelitian tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
9. Menyerahkan copy laporan hasil Penelitian setelah selesai dilaksanakan
10. Untuk laporan Penelitian izin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Sei Rotan.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih

MANAGER UNIT PELAKSANA TRANSMISI
MEDAN,



ARDIANSYAH

Jam	DATA BEBAN TRANSFORMATOR TENAGA III (60 MVA) SCHNEIDER (MW) TANGGAL 21-31																														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
00.00	30	28	27,5	28	26	28,5	30,6	28,5	28	28	28,5	30	31,5	31	33	25,5	30	25,5	28	30,5	28,5	31	32,5	31	31	31	32	32	33	33	27,5
01.00	29	29	27	25	27	25,5	27,5	29	27	27	27	27,5	29	30	29	32	24,5	29	24	25	29,5	26,5	30	31,5	30	31	29	31	30,5	30,5	32
02.00	27	27	26	25	27	25	25,5	27	27	27	24	27,5	28	30	29	31	24	28	24	25	28	25,5	29,5	30	29	30,5	27	29	30,5	30,5	30,5
03.00	27	24	25	24	25	25	25	26	25,5	25	24	26	28	28,5	28	31	22	27	23	24	28	23,5	28	30	29	29,5	26	26	28,5	28	30,5
04.00	27	24	25	24	25	25	24,5	26	25,5	25	24	26	28	28,5	28	31	22	27	23	24	28	23,5	28	30	29	29,5	25	26	28,5	28	30,5
05.00	28	25	27	25	26	26	26	29	26	27	27	27,5	29	30	29	31	24	29	24	25	29	24	29	30	29	29,5	29	27,5	29	29	31
06.00	29	28,5	27	26,5	29	25,5	28	28	25	32	26	26,5	30	31,5	32	32	30	29	25	30	30	28	32	30	30	30,5	29	28	30,5	31	31
07.00	26,5	25,5	26	24,5	26	25	26	26	24,5	30	25	25,5	27,5	28,5	30	30	29,5	28	25,3	27	28	27	30	27,5	27	27,5	28	27	27,5	28	30
08.00	24,5	24,5	26	25	24,5	23	23,5	25	24	25	25	25	27,5	27,5	28	29	28,5	27	25,3	27	27	26,5	27	27	25,5	24	27	27	27	28	28
09.00	24,5	24,5	25	25	23	23	24,5	25	25	25	25	26	27,5	27,5	28	29	29,5	26,5	25,3	25	27	27	27	27	25	25	29,5	27	27	29	28
10.00	25	24,5	25	24,5	22	24,5	25	25	25	25	25	26	27	28,5	29	29	29,5	26	24,5	26	27	27	28	29	25	25	29,5	28	28	29	27,5
11.00	25	24	25	24,5	21	24,5	25	25	25	24,5	25	24,5	27	28,5	29	29	29,5	25,5	24,5	25	27	27	28	29	25	25	29,5	28	28	28	27,5
12.00	24,5	24	25	23,5	20	23,5	24	25	21	24	24	24,5	26	27,5	28	27	26	25	23	25	27	26	27	28	24	25	26,5	29	26,5	27	25
13.00	25	24,5	25	23,5	20	24,5	23,5	24	21	24	25	26,5	26	27,5	29	28	27,5	24,5	23	26	27	27,5	28	28	24,5	25	30	29	26,5	28	25
14.00	26	25,5	25	23	20	25	25	25	24	24,5	25,5	26,5	29	29	30	29	27,5	24	22,5	28	28,5	28,5	29	29	25	25	30	30	29	29,5	25
15.00	26	25,5	25	23	20	25	25	25	24	24,5	25	26,5	29	28,5	30	29	28	24	22,5	28	28,5	28,5	28	29	25	25	30	31	29	28,5	25
16.00	27	26	25	23	20	26	25,5	25	30	25	25,5	26,5	30	28,5	29,5	29	28	24	22,5	29	28	28,5	28	29	25	25	30	31	29	28	25
17.00	27	28,5	25	25	20	26	26	25	30	25	25,5	28	30	29	29,5	29	28	24	25	29	28	28,5	28	29	25	25	31	31	29	28	25
18.00	33	32	32,5	30	27	30	32	31,5	30,5	29	28,5	33	34	32	31	32,5	31	29,5	29	32	31,5	29	32	30	28,5	26,5	34	34,5	31	30	29
19.00	34,5	36	33,5	34	30	33,5	35	34,5	32,5	33	33,5	34	36,5	39	39	37,5	35	30,6	34	36	35,5	35	37	36	35	34,5	37	37	38	37	32,5
20.00	34,5	36	33,5	34	30	33,5	35	34,5	35	34	32	34	36	39	39	37,5	35	29,5	34	36	35,5	36	37	37	35	34,5	37	37	38	37	32,5
21.00	34,5	36	32	33	30	33,5	35	33	35	33	31,5	34	35,5	37	38	37,5	35	29,5	34	35	35,5	36	37	37	35	34	36	36	36	37	32,5
22.00	32	33	30,5	31	29	32	33	32,5	33	32	30,5	34	35,5	35	37	33,5	33	29	32	34	31,5	25	36	35	33	33	35	35,5	35	36	30,5
23.00	31	30	29,5	30	27,5	29,5	32	30,5	30	30	30,5	31,5	34	33	35	28	32	26,5	29	33	29,6	33	34,5	33	32	32	34	33	34	34,5	29
Rata-rata	28,5																														
Tertinggi	39																														