

**ANALISIS KONDISI DAN PREDIKSI UMUR TRANSFORMATOR
DAYA DENGAN METODE *HEALTH INDEX***

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AKBAR YUSA PUTRA

NIM. 125060300111014

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2016

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISIS KONDISI DAN PREDIKSI UMUR TRANSFORMATOR
DAYA DENGAN METODE *HEALTH INDEX*

SKRIPSI

TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



AKBAR YUSA PUTRA
NIM. 125060300111014

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 1990021 1 001

Ir. Hery Purnomo, M.T.
NIP. 19550708 198212 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penulusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas didalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik disuatu perguruan tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi ini dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 2 Mei 2016

Mahasiswa

Materai 6000

Akbar Yusa Putra

NIM. 125060300111014



RINGKASAN

Akbar Yusa Putra, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Mei 2016. **Analisis Kondisi dan Prediksi Umur Transformator Daya dengan Metode Health Index**. Dosen Pembimbing : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Transformator merupakan salah satu peralatan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Fungsi utama transformator adalah sebagai penyalur daya atau tegangan, serta untuk mengubah level tegangan dari satu level tegangan ke level tegangan yang lain. Setiap transformator memiliki umur tersendiri, berkisar antara 20 sampai 35 tahun. Perkiraan umur transformator untuk beberapa tahun ke depan sangat diperlukan, agar dapat dilakukan tindakan yang dibutuhkan sesuai dengan kondisi transformator.

Penelitian mengenai analisis kondisi dan perkiraan umur transformator untuk beberapa tahun ke depan sangat diperlukan, agar dapat dilakukan tindakan yang dibutuhkan sesuai dengan kondisi transformator. Pada penelitian ini akan dijelaskan mengenai analisis kondisi dan prediksi umur pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling dengan menggunakan metode *health index*. *Health index* terdiri dari dua faktor, yaitu faktor historis dan faktor kondisi. Faktor historis terdiri dari 6 parameter, yaitu waktu operasi, pembebanan, inspeksi dan pemeliharaan, gangguan internal, lokasi, merk. Sedangkan faktor kondisi terdiri dari 7 parameter, yaitu pengujian tegangan tembus minyak, pengujian kadar air, *dissolved gas analysis*, pengujian tan δ , pengujian resistansi isolasi, pengujian resistansi belitan, dan pengujian *turn ratio*. Dari hasil perhitungan diperoleh nilai akhir faktor historis sebesar 2,56 dan faktor kondisi sebesar 3,5. Nilai akhir *health index* transformator IBT-1 adalah 3,12. Berdasarkan nilai *health index*, transformator IBT-1 berada dalam kondisi bagus dan diperkirakan dapat beroperasi selama 11-15 tahun ke depan.

Kata kunci: *health index*, faktor kondisi, faktor historis, prediksi umur transformator daya



SUMMARY

Akbar Yusa Putra, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya. May 2016. **Condition Assessment and Lifetime Prediction of Power Transformer using Health Index Method**. Academic Supervisor : Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T. dan Ir. Hery Purnomo, M.T.

Transformer is one of the most important component in power system. It is used primarily to transform power or voltage, and voltage level from one level to another. Transformer has its own lifetime, from 20 to 35 years in average. Lifetime prediction of transformer is needed, in order to decide necessary treatment based on transformer's condition.

The research for condition assessment and lifetime prediction of power transformer is needed, in order to decide preventive treatment based on transformer's condition. This research contains the explanation of condition assessment and lifetime prediction of IBT-1 power transformer in Sengkaling substation using *health index* method. There are 2 factors in this method, history factor and condition factor. History factor consists of 6 parameters, age, loading history, inspection and maintenance, internal fault, location, and manufacturer. In condition factor, there are 7 parameters, dielectric breakdown test, water content test, dissolved gas analysis, dissipation factor ($\tan \delta$) test, insulation resistance test, winding resistance test, and turn ratio test. Based on calculated data, IBT-1 power transformer shows the history factor weighted score of 2,56 and the condition weighted score of 3,5. Therefore the health index for IBT-1 is 3,12, which explains that the transformer is in good condition and predicted to operate for 11-15 years later.

Keyword : health index, condition factor, history factor, lifetime prediction of power transformer





UNIVERSITAS BRAWIJAYA



PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT dengan rahmat dan hidayah-Nya skripsi berjudul “Analisis Kondisi dan Prediksi Umur Transformator Daya dengan Metode *Health Index*” dapat terselesaikan. Dalam kesempatan ini diucapkan terima kasih kepada yang telah berkenan memberikan bantuan secara langsung maupun tidak langsung kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua dan Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. dan Bapak Ali Mustofa S.T., M.T. selaku Ketua Kelompok Dosen Keahlian Teknik Energi Elektrik dan Ketua Program Studi Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Drs. Ir. Moch Dhofir, M.T. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, kritik, dan saran yang telah diberikan.
4. Bapak Akhmad Zainuri, S.T, M.T. selaku dosen pembimbing akademik, beserta seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang selalu membantu selama perkuliahan.
5. Bapak Yanu selaku supervisor gardu induk Sengkaling dan Bapak Onny selaku staff PLN APP Kota Malang atas bantuan yang telah diberikan kepada dalam penggerjaan skripsi.
6. Keluarga tercinta Ayah Abdul Satar Yunus, Ibu Makarti Agungningtyas, dan kedua Kakak Ardian Yusa Prakasa dan Asty Dela Mareta atas dukungan dan doa yang diberikan kepada hingga terselesaiannya skripsi ini.
7. Seluruh teman-teman Voltage 2012, khususnya konsentrasi Teknik Energi Elektrik (POWER) yang telah berbagi pengalaman, ilmu, suka dan duka dari awal probinmaba hingga empat tahun menjalani perkuliahan.
8. Seluruh asisten dan pranata laboratorium komputasi dan jaringan yang turut andil memberikan dukungan dan motivasi dalam penggerjaan skripsi.
9. Seluruh teman-teman BK atas semua doa, dukungan, semangat, motivasi, dan kebersamaan yang telah diberikan kepada dalam penggerjaan skripsi.
10. Semua pihak yang telah membantu dan tidak bisa sebutkan satu persatu, terimakasih banyak atas semua bantuannya.

Pada akhirnya, disadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Malang, 2 Mei 2016

Penulis

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR ISI

PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Manfaat	3
1.6. Sistematika Pembahasan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Transformator	5
2.2. Bagian-Bagian Transformator	5
2.2.1. Bagian Utama Transformator	6
2.2.2. Peralatan Bantu	9
2.3. Umur Transformator	11
2.4. Health Index	13
2.4.1. Faktor Historis	18
2.4.2. Faktor Kondisi	20
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1. Studi Literatur	26
3.2. Pengambilan Data	26
3.3. Perhitungan dan Analisis Data	26
3.3.1. Perhitungan Data Faktor Historis	26
3.3.2. Perhitungan Data Faktor Kondisi	29
3.4. Perhitungan Nilai Health Index	32
3.4.1. Nilai Akhir Faktor Historis	32
3.4.2. Nilai Akhir Faktor Kondisi	33
3.4.3. Perhitungan Nilai <i>Health Index</i>	34

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1. Analisis dengan Metode Health Index	35
4.2. Transformator Daya	35
4.3. Data Historis	37
4.3.1.Waktu Operasi.....	37
4.3.2.Pembebanan	37
4.3.3.Inspeksi dan Pemeliharaan	39
4.3.4.Gangguan Internal	40
4.3.5.Lokasi	41
4.3.6.Merk	41
4.4. Data Kondisi	41
4.4.1.Pengujian Tegangan Tembus Minyak.....	41
4.4.2.Pengujian Kadar Air.....	44
4.4.3.Dissolved Gas Analysis.....	45
4.4.4.Pengujian Resistansi Isolasi	46
4.4.5.Pengujian Resistansi Belitan	48
4.4.6.Pengujian Perbandingan Belitan (<i>Turn Ratio</i>)	50
4.4.7.Pengujian Tan δ	54
4.5. Perhitungan Nilai Health Index	55
4.5.1. Nilai Akhir Faktor Historis	55
4.5.2. Nilai Akhir Faktor Kondisi	56
4.5.3. Perhitungan Nilai Health Index	57
BAB V PENUTUP	59
5.1. Kesimpulan	59
5.2. Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	65



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Transformator	5
Gambar 2. 2 Inti Besi Transformator.....	6
Gambar 2. 3 Kumparan Transformator	7
Gambar 2. 4 Bushing Transformator	7
Gambar 2. 5 Minyak Transformator.....	8
Gambar 2. 6 Tangki Konservator	9
Gambar 2. 7 Sistem Pendinginan ONAN.....	10
Gambar 2. 8 Tap Changer.....	10
Gambar 2. 9 Alat Pernapasan Silica Gel	11
Gambar 2. 10 Indikator Level Minyak Transformator	11
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 4. 1 Transformator IBT-1 Gardu Induk Sengkaling.....	35
Gambar 4. 2 Transformator hubungan Y-Y	36



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Hubungan antara <i>health index</i> dengan kondisi dan sisa umur transformator...	13
Tabel 2. 2	Faktor dan Parameter Pada <i>Health Index</i> dan Bobot Penilaianya.....	13
Tabel 2. 3	Sistem Penilaian Faktor Historis	16
Tabel 2. 4	Sistem Penilaian Faktor Kondisi	17
Tabel 2. 5	Konversi Nilai dalam Huruf ke Nilai dalam Angka.....	18
Tabel 2. 6	Hubungan kandungan gas pada minyak dan gangguan internal	21
Tabel 3. 1	Penilaian Parameter Waktu Operasi.....	27
Tabel 3. 2	Penilaian Parameter Pembelahan.....	27
Tabel 3. 3	Penilaian Parameter Inspeksi dan Pemeliharaan	28
Tabel 3. 4	Penilaian Parameter Gangguan Internal	28
Tabel 3. 5	Penilaian Parameter Lokasi	28
Tabel 3. 6	Penilaian Parameter Merk	29
Tabel 3. 7	Penilaian Parameter Pengujian Tegangan Tembus Minyak	29
Tabel 3. 8	Penilaian Parameter Pengujian Kadar Air	30
Tabel 3. 9	Rumus menentukan batas level standar gas	30
Tabel 3. 10	Penilaian Parameter Dissolved Gas Analysis.....	30
Tabel 3. 11	Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Isolasi	31
Tabel 3. 12	Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Belitan	31
Tabel 3. 13	Penilaian Parameter Pengujian Turn Ratio.....	32
Tabel 3. 14	Penilaian Parameter Pengujian Tan δ	32
Tabel 3. 15	Tabel Penilaian Faktor Historis	33
Tabel 3. 16	Penilaian Faktor Kondisi	34
Tabel 4. 1	Penilaian Parameter Waktu Operasi.....	37
Tabel 4. 2	Data Beban Tertinggi Tahun 2013	38
Tabel 4. 3	Penilaian Parameter Pembelahan.....	38
Tabel 4. 4	Pola pemeliharaan transformator gardu induk Sengkaling	39
Tabel 4. 5	Penilaian Parameter Inspeksi dan Pemeliharaan	39
Tabel 4. 6	Frekuensi gangguan internal tahun 2013.....	40
Tabel 4. 7	Penilaian Parameter Gangguan Internal	40
Tabel 4. 8	Penilaian Parameter Lokasi	41
Tabel 4. 9	Penilaian Parameter Merk	41
Tabel 4. 10	Data Spesifikasi Pengujian Tegangan Tembus Minyak	42
Tabel 4. 11	Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus Minyak	42
Tabel 4. 12	Data Spesifikasi Pengujian Tegangan Tembus Minyak	43
Tabel 4. 13	Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus Minyak	43
Tabel 4. 14	Penilaian Parameter Pengujian Tegangan Tembus Minyak	44
Tabel 4. 15	Hasil pengujian kadar air	44
Tabel 4. 16	Penilaian parameter pengujian kadar air	44
Tabel 4. 17	Data Hasil Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Batas Normal Gas	45
Tabel 4. 18	Penilaian Parameter <i>Dissolved Gas Analysis</i>	46
Tabel 4. 19	Hasil Pengujian R_1 dan R_{10}	46



Tabel 4. 20 Hasil Perhitungan PI dan Batas PI Minimal.....	47
Tabel 4. 21 Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Isolasi	47
Tabel 4. 22 Data pengukuran resistansi belitan sisi tegangan tinggi.....	48
Tabel 4. 23 Data pengukuran resistansi belitan sisi tegangan rendah	48
Tabel 4. 24 Nilai rata-rata resistansi belitan dan deviasi sisi tegangan tinggi.....	49
Tabel 4. 25 Nilai rata-rata resistansi belitan dan deviasi sisi tegangan rendah	49
Tabel 4. 26 Penilaian parameter pengujian resistansi belitan.....	50
Tabel 4. 27 Hasil Pengujian V_1 , V_2 , dan Perbandingan.....	51
Tabel 4. 28 Hasil Pengukuran Perbandingan Belitan dan Selisih	53
Tabel 4. 29 Penilaian Parameter Pengujian Perbandingan Belitan	54
Tabel 4. 30 Hasil pengujian $\tan \delta$ pada tangki transformator.....	54
Tabel 4. 31 Hasil pengujian $\tan \delta$ pada <i>bushing</i>	54
Tabel 4. 32 Penilaian parameter pengujian $\tan \delta$	55
Tabel 4. 33 Hasil penilaian parameter faktor historis.....	55
Tabel 4. 34 Hasil penilaian parameter faktor kondisi.....	56
Tabel 4. 35 Hasil penilaian parameter faktor historis dan faktor kondisi.....	57



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data resistansi isolasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling	66
Lampiran 2. Data pengujian tegangan tembus minyak isolasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling.....	67
Lampiran 3. Data pengujian tan δ transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling.....	68
Lampiran 4. Data pengujian perbandingan belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling	69
Lampiran 5. Data pengujian resistansi belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling	70
Lampiran 6. Data spesifikasi minyak transformator shell diala B	71
Lampiran 7. Data pengujian <i>dissolved gas analysis</i> transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling	72



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transformator merupakan salah satu peralatan yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Fungsi utama transformator adalah sebagai penyalur daya atau tegangan, serta untuk mengubah level tegangan dari satu level tegangan ke level tegangan yang lain. Transformator juga dapat dikatakan sebagai representasi dari sumber tegangan, karena jika transformator rusak maka akan berpengaruh besar terhadap sumber dan jaringan yang terhubung. Hal ini tentu merugikan kedua pihak, yaitu produsen dan konsumen listrik.

Setiap transformator memiliki umur tersendiri, berkisar antara 20 sampai 35 tahun. Hal ini dapat bergantung pada beberapa hal, seperti pembebanan pada transformator tersebut, kualitas minyak, dan frekuensi terjadinya gangguan. Perkiraan umur transformator untuk beberapa tahun ke depan sangat diperlukan, agar dapat dilakukan tindakan yang dibutuhkan sesuai dengan kondisi transformator, mengingat pentingnya komponen ini dalam sistem tenaga listrik.

Transformator terdiri dari bagian-bagian yang rumit dan tiap bagian tersebut membutuhkan penanganan sesuai dengan kebutuhan masing-masing. Transformator juga termasuk salah satu komponen sistem tenaga listrik yang mempunyai frekuensi gangguan cukup tinggi. Dampak yang ditimbulkan oleh gangguan pun bisa sangat berbahaya, bahkan sampai memicu ledakan. Hal ini dapat terjadi karena kurangnya informasi tentang kondisi transformator yang aktual dan akurat, sehingga dampak dari gangguan yang terjadi tidak dapat diprediksi dan diantisipasi. Informasi tentang kondisi transformator juga diperlukan untuk memprediksi umur transformator. Hal ini perlu dilakukan untuk menentukan tindakan yang ditempuh sesuai kondisi dan sisa umur transformator. Ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk memprediksi umur transformator, salah satunya adalah metode *health index*. *Health index* merupakan metode yang dapat memberikan data keadaan transformator dan memprediksi sisa umur transformator berdasarkan nilai *health index* akhir yang diperoleh. Metode ini menggabungkan data dari faktor historis dan kondisi untuk memprediksi umur transformator, dengan akurasi yang tinggi. Parameter-parameter yang termasuk dalam faktor historis yaitu, waktu operasi transformator, pembebanan, inspeksi dan pemeliharaan, gangguan internal, lokasi, dan merk. Adapun parameter yang termasuk faktor kondisi antara lain, pengujian tegangan tembus minyak isolasi, pengujian kadar air,

dissolved gas analysis, pengujian resistansi isolasi, pengujian resistansi belitan, pengujian *turn ratio*, dan pengujian tan δ transformator. *Health index* juga memiliki sistem penilaian yang sederhana dan berimbang, baik dari faktor kondisi maupun historis. Oleh karena itu *health index* merupakan suatu metode yang mempunyai akurasi tinggi dalam memprediksi umur transformator, namun tanpa menggunakan sistem penilaian yang rumit.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang terdapat pada latar belakang, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana kondisi transformator daya IBT -1 gardu induk Sengkaling dengan kapasitas 60 MVA, tegangan 150/70 kV berdasarkan data faktor historis dan faktor kondisi transformator.
2. Berapa umur transformator daya IBT-1 gardu induk Sengkaling gardu induk Sengkaling dengan menggunakan pendekatan *Health Index*, berdasarkan data tiap parameter pada faktor historis dan faktor kondisi.
3. Bagaimana tindakan preventif pada transformator daya IBT-1 gardu induk Sengkaling sesuai dengan standar kondisi transformator.

1.3. Batasan Masalah

Penyusunan penelitian ini dibatasi dengan hal-hal sebagai berikut :

1. Metode analisis yang digunakan adalah *Health Index*.
2. Transformator yang diteliti adalah transformator daya IBT-1 gardu induk Sengkaling dengan kapasitas 60 MVA, tegangan 150/70 kV.
3. Tidak melakukan pengujian secara langsung, data yang dianalisis berupa data sekunder yang diperoleh dari data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013 dan PLN APP Kota Malang.
4. Tidak membahas perencanaan pemeliharaan secara detail, hanya tindakan umum yang harus ditempuh tanpa menjelaskan secara detail mengenai prosedur pelaksanaan pemeliharaan.

1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kondisi transformator daya 1 gardu induk Sengkaling berdasarkan data faktor historis dan faktor kondisi, memprediksi umur

transformator, dan menentukan tindakan preventif yang akan diaplikasikan pada transformator sesuai dengan standar kondisi transformator.

1.5. Manfaat

Terdapat beberapa manfaat pada penelitian ini, yaitu bagi penulis dan pihak terkait yang bekerja di bidang kelistrikan, khususnya transformator. Manfaat bagi penulis adalah memberikan pengetahuan tentang kondisi transformator, perkiraan umur transformator, dan dapat menentukan tindakan yang perlu dilakukan pada transformator, serta dapat menyelesaikan syarat kelulusan berupa skripsi. Manfaat bagi pihak terkait adalah dapat memprediksi umur transformator dan menentukan tindakan yang harus ditempuh sesuai dengan standar kondisi transformator, sehingga efisiensi dan keandalan komponen meningkat.

1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- | | |
|----------------|--|
| BAB I | : Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika pembahasan hasil penelitian. |
| BAB II | : Berisi tujuan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan. |
| BAB III | : Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam penelitian ini meliputi metode pengambilan data, pengolahan data, dan analisis data. |
| BAB IV | : Berisi pembahasan dan analisis terhadap hasil evaluasi. |
| BAB V | : Berisi penutup yang terdiri dari kesimpulan dan saran. |





UNIVERSITAS BRAWIJAYA

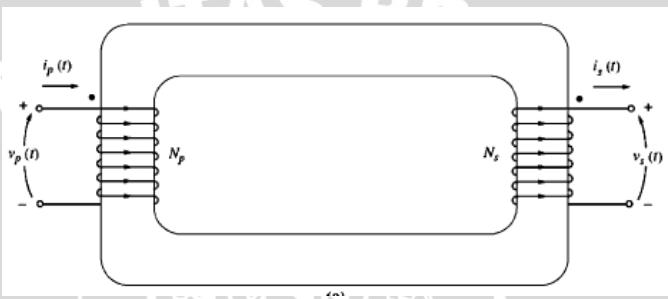


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Transformator

Transformator adalah suatu peralatan tenaga listrik yang menyalurkan dan mengubah daya listrik AC dari level tegangan tertentu ke level tegangan lain, dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Transformator merupakan peralatan statis karena tidak memiliki bagian yang bergerak atau berputar. Gambar rangkaian transformator dapat dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Transformator

Keterangan gambar :

- | | |
|-------|------------------------------------|
| V_p | : tegangan primer |
| V_s | : tegangan sekunder |
| I_p | : arus primer |
| I_s | : arus sekunder |
| N_p | : jumlah lilitan kumparan primer |
| N_s | : jumlah lilitan kumparan sekunder |

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan sumber (V_p), maka akan mengalir arus bolak balik I_p pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_p menimbulkan fluks magnit yang juga berubah-ubah pada inti. Akibat adanya fluks magnit yang berubah-ubah, kumparan sekunder terinduksi oleh fluks magnit sehingga mengalir arus I_s .

2.2. Bagian-Bagian Transformator

Secara umum transformator terdiri dari dua bagian, yaitu bagian utama dan peralatan bantu. Komponen yang termasuk bagian utama pada transformator adalah inti besi,

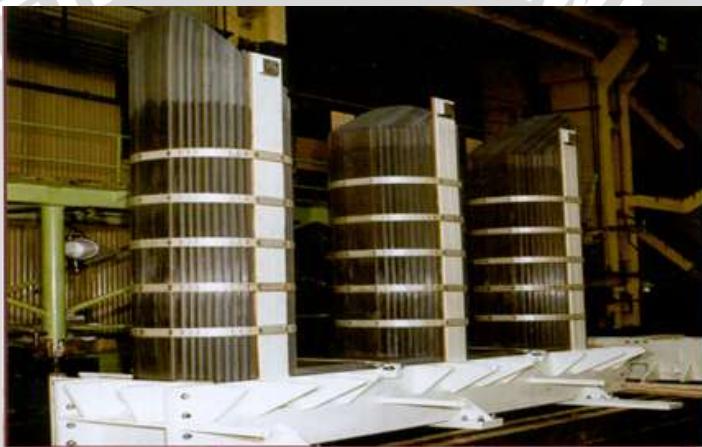


kumparan transformator, *bushing*, minyak transformator, dan tangki konservator. Sedangkan komponen yang termasuk peralatan bantu adalah pendingin, *tap changer*, alat pernapasan, dan indikator. Penjelasan lebih detail mengenai komponen transformator dijelaskan pada sub bab 2.2.1 dan 2.2.2.

2.2.1. Bagian Utama Transformator

1) Inti Besi

Inti besi merupakan tempat kumparan primer dan sekunder transformator, yang berfungsi untuk mempermudah jalan fluks yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Untuk mengurangi rugi-rugi akibat arus eddy, inti besi dilapisi besi tipis. Gambar 2.2 merupakan contoh inti besi transformator.

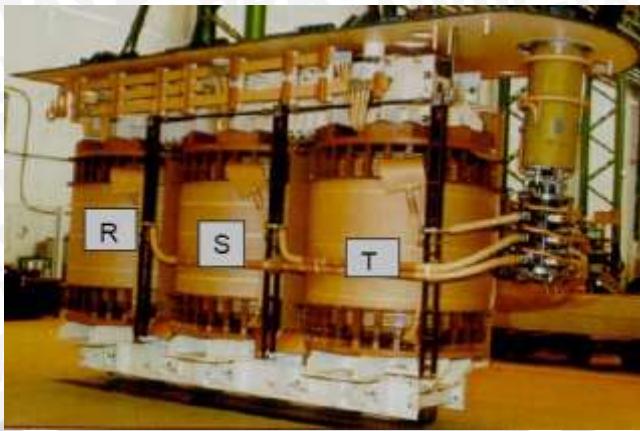


Gambar 2. 2 Inti Besi Transformator

Sumber : <http://gilalistrik.blogspot.co.id/2010/02/transformator-daya.html>

2) Kumparan Transformator

Transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder. Kumparan primer adalah kumparan yang terhubung langsung dengan sumber (masukan), sedangkan kumparan sekunder merupakan keluaran dari transformator dan jika dihubungkan dengan beban maka akan mengalir arus. Gambar 2.3 merupakan contoh kumparan transformator 3 fasa.



Gambar 2. 3 Kumparan Transformator

Sumber : <https://lumbanrajateddy.wordpress.com/2012/03/07/transformator/>

3) Bushing

Adalah isolator yang terletak di atas tangki transformator dan menghubungkan kumparan transformator dengan instalasi di luar transformator, misalnya dengan terminasi kabel atau saluran yang menuju ke pemutus tenaga. Dua jenis bushing yang paling umum adalah *solid porcelain bushing* dan *oil-filled condenser bushing*. Gambar 2.4 merupakan contoh *bushing* pada transformator.



Gambar 2. 4 Bushing Transformator

Sumber : <http://www.power-technology.com/html>

4) Minyak Transformator

Minyak transformator terbuat dari bahan kimia organik, merupakan senyawa atom-atom C dan H. Adapun fungsi dari minyak transformator adalah :

- Sebagai bahan isolasi
- Sebagai bahan pendingin
- Sebagai peredam busur listrik
- Pelarut gas yang timbul

Gambar 2.5 merupakan contoh minyak isolasi yang digunakan pada transformator.



Gambar 2. 5 Minyak Transformator

Sumber : <http://www.in.all.biz/>

5) Tangki Konservator

Tangki konservator mempunyai bentuk silindris dan letaknya berada di atas transformator, dihubungkan dengan sebuah pipa yang terhubung ke tangki utama transformator. Ketika transformator dibebani, suhu minyak akan meningkat sehingga volumenya juga akan bertambah. Adalah tangki konservator yang berfungsi untuk menampung pemuatan minyak transformator. Gambar 2.6 merupakan gambar dari tangki konservator pada transformator 3 fasa.



Gambar 2. 6 Tangki Konservator

Sumber : <http://www.pronalasia.com/>

2.2.2. Peralatan Bantu

1) Pendingin

Penyebab utama timbulnya panas pada transformator adalah akibat rugi-rugi tembaga. Meskipun ada faktor lain yang menyebabkan timbulnya panas seperti arus histerisis dan arus eddy, tetapi yang paling dominan adalah akibat rugi-rugi tembaga. Jika panas ini tidak segera diatasi, maka suhu transformator akan semakin meningkat dan dapat menyebabkan kerusakan pada isolasi kertas dan cairan. Ada beberapa metode pendinginan yang digunakan yaitu :

- Oil Natural Air Natural (ONAN)
- Oil Natural Air Forced (ONAF)
- Oil Forced Air Forced (OFAF)
- Oil Forced Water Forced (OFWF)
- Oil Directed Air Forced (ODAF)
- Oil Directed Water Forced (ODWF)

Gambar 2.7 merupakan contoh sistem pendinginan ONAN pada transformator 3 fasa.



Gambar 2. 7 Sistem Pendinginan ONAN

Sumber : <http://electrical-engineering-portal.com/>

2) Tap Changer (Perubah Tap)

Tap changer berfungsi untuk menjaga agar tegangan yang keluar dari transformator bernilai konstan. Hal ini dilakukan dengan mengubah perbandingan jumlah lilitan kumparan primer terhadap sekunder apabila terjadi perubahan beban yang menimbulkan perubahan tegangan keluaran pada transformator. Gambar 2.8 merupakan gambar *tap changer* pada transformator.



Gambar 2. 8 Tap Changer

Sumber : en.wikipedia.org

3) Alat Pernapasan

Ketika transformator dibebani, suhu minyak isolasi pada transformator akan meningkat, sehingga volumenya akan bertambah. Ketika volume minyak bertambah, udara di atas level minyak pada konservator akan keluar. Udara mengandung sedikit

atau lebih kelembaban dan ini dapat bercampur dengan minyak jika masuk ke transformator. Oleh karena itu udara perlu disaring dengan menggunakan *silica gel breather* yang terhubung dengan tangki konservator melalui pipa pernapasan. Gambar 2.9 merupakan contoh alat pernapasan *silica gel*.



Gambar 2. 9 Alat Pernapasan Silica Gel

Sumber : <http://www.electrical4u.com/>

4) Indikator

Untuk mengawasi selama transformator beroperasi, maka perlu adanya indikator yang dipasang pada transformator. Terdapat beberapa indikator pada transformator antara lain, indikator suhu minyak, indikator permukaan minyak, indikator sistem pendingin, indikator kedudukan tap, dan sebagainya.



Gambar 2. 10 Indikator Level Minyak Transformator

Sumber : <http://electrical-engineering-portal.com/>

2.3. Umur Transformator

Naiknya beban sistem sepanjang waktu, mengakibatkan naiknya beban transformator daya di gardu induk. Untuk itu diperlukan pemantauan serta evaluasi kondisi transformator yang beroperasi serta dilakukan langkah pemeliharaan dan perbaikan. Selain itu perkiraan

umur transformator juga sangat diperlukan untuk menjaga keandalan sistem. Hal-hal yang perlu diamati untuk memperkirakan umur transformator antara lain :

- Kenaikan beban yang dihadapi. Beban pada jaringan berubah sepanjang waktu. Beban puncaknya pada umumnya terus naik sehingga transformator suatu saat bisa mengalami pembebanan lebih dan perlu diganti.
- Gangguan pada jaringan distribusi. Bila transformator terhubung ke jaringan yang dilengkapi dengan *auto recloser* dan jumlah gangguan per tahun di jaringan tersebut tinggi, maka transformator akan mendapat surja tegangan sampai puluhan kali per tahun. Surja tegangan ini dapat mempengaruhi kekuatan isolasi transformator.
- Fluktuasi beban, hal ini dapat menyebabkan tegangan keluaran transformator berubah, sehingga *On Load Tap Changer* (OLTC) bekerja. Bekerjanya OLTC akan menimbulkan karbonisasi dalam minyak transformator dan dapat mengurangi kemampuan isolasinya.
- Jam operasi, perlu dicatat dan diperhatikan. Begitu pula dengan tahun pembuatannya karena hal ini berkaitan dengan tingkat teknologi pembuatannya.
- Pemeliharaan, perlu dipelajari terkait laporan-laporan pemeliharaan sebelumnya, sehingga dapat dianalisis penyebab dan solusi pada gangguan.
- Relai yang bekerja, perlu dianalisis untuk mengevaluasi kondisi transformator. Masing-masing relai mempunyai spesifikasi sendiri untuk mendeteksi gangguan tertentu, sehingga dari laporan yang ada dapat diketahui gangguan apa saja yang terjadi pada transformator.

Pada penelitian ini, metode yang digunakan untuk memprediksi umur transformator adalah *health index* (HI). Nilai HI merupakan indikasi dari kondisi dan sisa umur transformator selama beberapa tahun ke depan. Hubungan antara nilai HI dengan kondisi dan umur transformator ditunjukkan pada Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Hubungan antara *health index* dengan kondisi dan sisa umur transformator

No.	Health Index	Kondisi Transformator	Sisa Umur Transformator
1.	3,4 – 4	Sangat Bagus	> 15 Tahun
2.	2,8 – 3,3	Bagus	11 – 15 Tahun
3.	2 – 2,7	Cukup Bagus	5 - 10 Tahun
4.	1,2 – 1,9	Buruk	3 - 4 Tahun
5.	0 – 1,1	Sangat Buruk	1 – 2 Tahun

Sumber : IEEE. Jahromi, A.N. dkk. 2009

2.4. Health Index

Health Index merupakan suatu metode yang menggabungkan hasil dari observasi operasional, inspeksi lapangan, dan tes pada laboratorium menjadi sebuah index yang objektif dan kuantitatif. Metode ini sangat bagus untuk mengatur aset dan mengidentifikasi kebutuhan investasi dan pemeliharaan. Secara umum faktor pada *health index* terbagi menjadi dua, yaitu faktor historis dan faktor kondisi. Masing-masing faktor memiliki beberapa parameter yang akan digunakan dalam perhitungan *health index*. Parameter-parameter pada faktor historis dan faktor kondisi ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Faktor dan Parameter Pada *Health Index* dan Bobot Penilaianya

Faktor		Bobot	Nilai
Historis	Waktu Operasi	4	
	Pembebatan	3	
	Inspeksi dan Pemeliharaan	4	
	Gangguan Internal	4	
	Lokasi	2	
	Merk	1	
	Bobot Total Historis	18	
Kondisi	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3	
	Pengujian Kadar Air	3	
	Dissolved Gas Analysis	3	
	Pengujian Tan δ	3	
	Pengujian Resistansi Isolasi	2	
	Pengujian Resistansi Belitan	2	
	Pengujian Turn Ratio	2	
	Bobot Total Kondisi	18	

Sumber : IEEE 978-1-4799-0545-4/13/\$31.00, 2013

Penilaian dari tabel di atas bukanlah nilai akhir, namun hanya faktor-faktor yang digunakan untuk menghitung nilai *Health Index* (HI). Meskipun faktor historis dan faktor kondisi mempunyai jumlah bobot total yang sama, namun dalam menghitung HI hasil faktor

kondisi lebih presisi dalam penilaian risiko. Oleh karena itu, faktor historis memiliki prosentase 40%, sedangkan faktor kondisi memiliki prosentase 60%. Perhitungan untuk menentukan nilai HI ditunjukkan pada persamaan (2-1).

$$HI = (0,4 \times NH) + (0,6 \times NK) \quad (2-1)$$

dengan :

HI : Nilai Health Index

NH : Nilai Akhir Faktor Historis

NK : Nilai Akhir Faktor Kondisi

Proses perhitungan dimulai dengan mengolah data dari faktor historis. Yang pertama adalah waktu operasi transformator. Parameter ini memiliki bobot tertinggi bersama dengan dua parameter lain yaitu inspeksi dan pemeliharaan dan gangguan internal. Ini menggambarkan bahwa waktu operasi transformator merupakan parameter penting dalam penentuan nilai *health index*. Parameter ini akan memperoleh nilai tertinggi (A) apabila transformator beroperasi antara 0-3 tahun, nilai B apabila beroperasi 4-10 tahun, nilai C untuk jangka waktu 11-20 tahun, dan akan memperoleh nilai terendah (D) apabila transformator telah beroperasi selama lebih dari 20 tahun. Jika telah dilakukan penilaian berdasarkan data, selanjutnya nilai dalam bentuk huruf dikonversi ke bentuk angka sesuai tabel 2.5. Setelah itu nilai dalam angka dikalikan dengan bobot yang dimiliki parameter waktu operasi transformator yaitu 4. Hasil yang diperoleh merupakan nilai akhir parameter waktu operasi transformator. Parameter kedua yaitu pembebanan, yang memiliki bobot cukup tinggi yaitu 3. Pembebanan dapat memberikan dampak besar terhadap kondisi transformator, bahkan jika dibebani penuh secara terus menerus dapat menyebabkan kenaikan susut umur pada transformator. Untuk menghitung nilai akhir parameter pembebanan, aspek penilaian terlebih dahulu dibagi menjadi 3 transformator dengan daya berbeda, yaitu transformator 20 MVA, 30 MVA, dan 60 MVA. Penilaian dihitung berdasarkan besar pembebanan yang diberikan pada transformator (dalam %). Masing-masing transformator mempunyai kriteria penilaian yang berbeda. Pada transformator 20 MVA, nilai tertinggi (A) akan didapat bila transformator dibebani kurang dari 60%, nilai B bila dibebani antara 60-65%, nilai C bila dibebani 66-70%, dan nilai D bila diberi beban lebih dari 70%. Untuk transformator 30 MVA, parameter pembebanan akan mendapat nilai A bila transformator dibebani kurang dari 50%, nilai B jika dibebani antara 50-60%, nilai C



jika diberi beban antara 61-70%, dan memperoleh nilai D jika dibebani lebih dari 70%. Sedangkan pada transformator 60 MVA, nilai A akan diperoleh jika transformator dibebani kurang dari 30%, nilai B jika dibebani antara 30-50%, nilai C jika diberi beban antara 51-70%, dan nilai D jika dibebani lebih dari 70%. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter pembebanan.

Parameter selanjutnya yaitu inspeksi dan pemeliharaan. Penilaian parameter ini didasarkan pada frekuensi dilaksanakannya inspeksi dan pemeliharaan. Hanya ada 2 kriteria penilaian untuk parameter ini, yaitu jika inspeksi dan pemeliharaan dilaksanakan satu kali dalam kurun waktu kurang dari sama dengan 12 bulan (A) dan satu kali dalam kurun waktu lebih dari 12 bulan (C). Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya, yaitu 4. Diperoleh nilai akhir parameter inspeksi dan pemeliharaan. Parameter keempat adalah gangguan internal. Kriteria penilaianya berdasarkan frekuensi terjadinya gangguan pada interval waktu tertentu. Jika tidak pernah terjadi gangguan, maka mendapat nilai A. Adapun mendapat nilai B jika gangguan terjadi 1 kali, nilai C untuk 2 kali, dan nilai D jika gangguan terjadi lebih dari 2 kali pada interval waktu tertentu. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya, yaitu 4. Diperoleh nilai akhir parameter gangguan internal. Parameter kelima adalah lokasi, yang memiliki bobot 2. Pada kriteria penilaian, nilai tertinggi adalah B, yaitu jika transformator beroperasi di daerah perkotaan dan D untuk transformator yang beroperasi di daerah industri. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter lokasi. Parameter yang terakhir adalah merk. Setelah nilai akhir semua parameter pada faktor historis diperoleh, nilai-nilai tersebut dijumlahkan dan dibagi dengan bobot total faktor historis. Hasil perhitungan adalah nilai akhir faktor historis. Sistem penilaian faktor historis ditunjukkan pada Tabel 2.3.



Tabel 2. 3 Sistem Penilaian Faktor Historis

Faktor Historis	A	B	C	D
Waktu Operasi (Tahun)	0-3	4-10	11-20	>20
Pembebanan (%)	20 MVA	<60	60-65	>70
	30 MVA	<50	50-60	>70
	60 MVA	<30	30-50	>70
Inspeksi (Bulan)	≤12		>12	
Gangguan Internal (kali)	0	1	2	>2
Lokasi		Perkotaan		Industri
Merk		Eropa	Asia	

Sumber : IEEE 978-1-4799-0545-4/13/\$31.00, 2013

Perhitungan selanjutnya yaitu faktor kondisi. Parameter pertama pada faktor kondisi adalah pengujian tegangan tembus minyak. Parameter ini memiliki bobot tertinggi bersama dengan 3 parameter lain (pengujian kadar air, *dissolved gas analysis*, dan pengujian tan δ). Pengujian tegangan tembus minyak dinilai berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika dapat melebihi standar tegangan tembus minyak. Nilai pada parameter ini berkisar antara 3 huruf, yaitu A, C, dan D. Nilai A jika dua hasil pengujian memuaskan, nilai C bila satu hasil pengujian memuaskan, dan nilai D jika tidak ada hasil pengujian yang memuaskan. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter pengujian tegangan tembus minyak. Parameter kedua adalah pengujian kadar air, yang juga memiliki bobot 3. Penilaian pada parameter ini berdasarkan jumlah hasil pengujian yang memuaskan, yaitu jika kadar air dalam minyak kurang dari 25 ppm. Kriteria penilaian parameter ini yaitu memperoleh nilai A jika kadar air dalam minyak kurang dari 25 ppm , dan D jika kadar air dalam minyak lebih dari 25 ppm. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter pengujian kadar air.

Parameter ketiga adalah *dissolved gas analysis*, dengan bobot penilaian 3. Kriteria penilaian berdasarkan jumlah gas yang melebihi batas standar. Nilai A jika tidak ada gas yang melebihi batas standar, nilai B jika satu gas melebihi batas standar, nilai C jika ada dua gas yang melebihi batas standar, dan nilai D jika lebih dari dua gas melebihi batas standar. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter *dissolved gas analysis*. Parameter keempat yaitu pengujian resistansi isolasi (megger). Kriteria penilaian berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan. Nilai A jika tiga hasil pengujian memuaskan, nilai C jika dua hasil pengujian memuaskan, dan nilai D jika hasil

pengujian yang memuaskan kurang dari sama dengan 1. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter pengujian resistansi isolasi. Parameter kelima yaitu pengujian resistansi belitan. Kriteria penilaian berdasarkan jumlah hasil pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan. Nilai A jika dua hasil pengujian memuaskan, nilai C jika satu hasil pengujian memuaskan, dan nilai D jika tidak ada hasil pengujian yang memuaskan. Parameter keenam yaitu pengujian *turn ratio*. Kriteria penilaian berdasarkan jumlah fasa yang hasilnya memuaskan. Nilai A jika tiga fasa menghasilkan data yang memuaskan, nilai C jika dua fasa memuaskan, dan nilai D jika kurang dari sama dengan satu fasa yang memuaskan. Setelah memperoleh nilai dalam huruf sesuai data, dikonversi ke dalam angka dan kemudian dikalikan dengan bobot penilaianya. Diperoleh nilai akhir parameter pengujian *turn ratio*. Parameter ketujuh adalah pengujian tan δ . Kriteria penilaian berdasarkan nilai tan δ yang terukur saat pengujian. Nilai A jika hasil pengujian tan $\delta \leq 0,1\%$, nilai B jika hasil pengujian tan δ antara 0,1%-0,5%, nilai C jika hasil pengujian tan δ antara 0,5%-1%, dan nilai D jika nilai pengujian $\geq 1\%$. Setelah nilai akhir semua parameter pada faktor kondisi diperoleh, nilai-nilai tersebut dijumlahkan dan dibagi dengan bobot total faktor kondisi. Hasil perhitungan adalah nilai akhir faktor kondisi. Sistem penilaian faktor kondisi ditunjukkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. 4 Sistem Penilaian Faktor Kondisi

Hasil Pengujian	A	B	C	D
Pengujian Tegangan Tembus Minyak (jumlah pengujian yang memenuhi standar)	Dua		Satu	Tidak Ada
Pengujian Kadar Air (jumlah kadar air dalam minyak)	<25 ppm			>25 ppm
<i>Dissolved Gas Analysis</i> (jumlah gas yang melebihi level normal)	Tidak Ada	Satu	Dua	Lebih
Pengujian Resistansi Isolasi (jumlah pengujian yang memenuhi standar)	Tiga		Dua	\leq Satu
Pengujian Resistansi Belitan (jumlah pengujian yang memenuhi standar)	Dua		Satu	Tidak Ada
Pengujian <i>Turn Ratio</i> (jumlah pengujian yang memenuhi standar)	Tiga		Dua	\leq Satu
Pengujian Tan δ (Nilai % Tan δ)	$\leq 0,1$	0,1-0,5	0,5-1	≥ 1

Sumber : IEEE 978-1-4799-0545-4/13/\$31.00, 2013

Setelah melakukan penilaian dalam bentuk huruf, untuk melakukan perhitungan faktor historis dan kondisi nilai huruf dikonversi ke dalam bentuk angka. Nilai angka masing-



masing faktor merupakan variabel dalam menghitung nilai akhir *health index* sesuai persamaan (2-1). Standar konversi nilai huruf ke angka ditunjukkan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Konversi Nilai dalam Huruf ke Nilai dalam Angka

Nilai (dalam huruf)	Nilai (dalam angka)	Level Risiko	Kondisi
A	4	Tidak Ada	Normal
B	3	Rendah	Cukup Normal
C	2	Sedang	Cukup Abnormal
D	1	Tinggi	Abnormal

Sumber : IEEE 978-1-4799-0545-4/13/\$31.00, 2013

2.4.1. Faktor Historis

Data historis merupakan aspek penting yang dapat digunakan untuk menggambarkan kinerja transformator dan memprediksi gangguan pada transformator. Adapun parameter-parameter yang termasuk dalam faktor historis yaitu :

- 1) Waktu operasi, yaitu waktu yang telah ditempuh transformator sejak pertama kali beroperasi. Umumnya transformator dapat beroperasi optimal sekitar 20-35 tahun. Namun jika dilakukan pemeliharaan yang efektif, transformator daya dapat beroperasi hingga 60 tahun.
- 2) Pembebanan, yaitu beban tertinggi yang pernah dialami transformator. Hal ini berdampak langsung terhadap probabilitas gangguan dan umur transformator. Jika transformator dibebani sesuai ratingnya untuk beberapa saat, temperatur belitan akan meningkat dan dapat menyebabkan timbulnya titik terpanas.

Berdasarkan publikasi **IEC-76**, transformator dirancang dengan syarat pelayanan antara lain bahwa untuk transformator dengan pendinginan udara maka suhu udara tidak boleh melampaui :

- 30°C rata-rata harian
- 20°C rata-rata tahunan

Selain itu suhu udaranya tidak boleh melebihi 40°C dan lebih rendah dari -25°C (pasangan luar) atau -5°C (pasangan dalam). Untuk transformator dengan pendinginan air, air pendingin tidak melebihi 25°C pada ceruknya (inlet).

Menurut SPLN 17-1979, suhu rata-rata tahunan bila dihitung dari suhu rata-rata bulanan (antara 24°C dan 27°C), mencapai sekitar $25,5^{\circ}\text{C}$. Dengan demikian jika sebuah transformator dioperasikan dengan beban penuh secara kontinu dan tak terputus, maka



transformator ini akan mengalami “kenaikan susut umur”, atau mengalami umur yang lebih pendek.

3) Inspeksi dan pemeliharaan. Pemeliharaan pada transformator daya harus dilakukan secara berkala untuk mengetahui perkembangan kondisi transformator dan mengantisipasi terjadinya gangguan. Jika pemeliharaan tidak dilakukan secara teratur, maka dapat menyebabkan terjadinya gangguan pada transformator. Perencanaan pemeliharaan juga merupakan salah satu kunci untuk mengoptimalkan umur transformator sampai batas waktu pemakaiannya. Jadi perencanaan pemeliharaan perlu dijadikan parameter penilaian dalam menganalisis kondisi dan memprediksi umur transformator.

4) Gangguan internal, yaitu akumulasi terjadinya gangguan yang terjadi pada periode waktu tertentu. Setiap gangguan dapat menyebabkan penurunan kinerja transformator, sehingga dapat mempersingkat umur transformator.

Secara umum gangguan yang terjadi di dalam transformator diklasifikasikan menjadi 4, yaitu :

- Busur api, dapat disebabkan oleh cara penyambungan konduktor yang tidak baik dan kerusakan isolasi antara inti baut
- Gangguan pada sistem pendingin.
- Arus sirkulasi pada transformator yang bekerja paralel
- Gangguan hubung singkat, contohnya yaitu hubung singkat antara fasa dengan tanah, hubung singkat antar fasa pada kumparan yang sama, dan gangguan pada terminal transformator.

Gangguan-gangguan ini akan menimbulkan dampak yang signifikan terhadap transformator, baik secara teknis maupun ekonomis. Oleh sebab itu frekuensi terjadinya gangguan internal perlu dipertimbangkan dalam analisis kondisi dan prediksi umur transformator.

5) Lokasi, yaitu tempat dimana transformator beroperasi. Dalam sistem penilaian *health index*, lokasi dibagi menjadi dua, yaitu lokasi perkotaan dan industri. Transformator yang beroperasi di daerah industri cenderung memiliki tingkat gangguan tertinggi, sedangkan transformator di daerah perkotaan memiliki tingkat gangguan yang lebih rendah. Oleh karena itu lokasi industri termasuk dalam kategori nilai yang lebih rendah.

- 6) Merk. Ada banyak sekali perusahaan pembuat transformator daya, seperti Unindo, ABB, Pauwels, dan lain-lain. Kualitas transformator dari masing-masing merk pun berbeda. Oleh karena itu merk dari sebuah transformator juga perlu dipertimbangkan dalam sistem penilaian *health index*.

2.4.2. Faktor Kondisi

Kondisi operasional transformator daya merupakan indikator yang sangat penting dan berpengaruh besar pada kondisi transformator. Faktor kondisi dapat diperoleh dari pengujian. Adapun parameter-parameter pada faktor kondisi yaitu :

- 1) Pengujian tegangan tembus minyak, yaitu pengujian yang dilakukan pada minyak transformator untuk mendeteksi air, kotoran dan partikel konduktif. Minyak yang diuji diambil dari tangki utama dan *on line tap changer*. Pengujian ini mengamati pada tegangan berapa percikan tembus diantara dua elektroda pada minyak terjadi. Semakin tinggi nilai tegangan tembus minyak, maka semakin bagus kualitas minyak tersebut.

Pengujian dilakukan dengan menaikkan tegangan diantara 2 elektroda secara perlahan. Umumnya peningkatan tegangannya sebesar 2 kV/s dan dilakukan pengambilan sampel sebanyak 3 sampai 6 kali. Pengujian tegangan tembus minyak mengacu pada standar IEC 156.

- 2) Kadar air. Kelembaban merupakan salah satu masalah utama pada minyak transformator, dimana terbentuk dari oksidasi dan pemanasan pada selulosa isolasi kertas. Kelembababan dapat mengurangi level isolasi pada minyak isolasi. Minyak dari tangki utama harus dites untuk mengetahui kadar airnya. Untuk lulus dalam pengujian kadar air, minyak harus mengandung kurang dari 25 ppm air.

- 3) *Dissolved Gas Analysis (DGA)*. DGA mendeteksi level gas pada minyak transformator. Gas-gas tersebut adalah H₂, CO₂, CO, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, dan C₃H₈. Gas-gas ini dapat digunakan untuk mendeteksi gangguan internal pada transformator daya. Kecuali karbon monoksida dan oksigen, semua gas-gas ini terbentuk dari degradasi minyak transformator. Ini merupakan salah satu penyebab utama berkurangnya umur transformator lebih cepat. Jika kandungan oksigen pada transformator tinggi maka akan terjadi oksidasi, yang menghasilkan lumpur yang akan mengendap pada dinding transformator. Hal ini akan mengakibatkan berkurangnya penyerapan udara luar, sehingga temperatur transformator meningkat. Karena memberikan dampak yang signifikan, maka



jumlah kandungan gas pada transformator perlu dibatasi. Tabel 2.6 menunjukkan hubungan antara kandungan gas pada minyak dan gangguan internal yang dapat terjadi pada transformator.

Tabel 2. 6 Hubungan kandungan gas pada minyak dan gangguan internal

Gas	Gangguan Internal
H ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆	Gangguan panas, pemanasan berlebih pada minyak
CO, CO ₂	Titik panas (pada selulosa)
H ₂ , CH ₄	Tembus parsial
H ₂ , C ₂ H ₂	Arcing

Sumber : IEEE 978-1-4799-0545-4/13/\$31.00, 2013

- 4) Resistansi isolasi, dilakukan dengan mengukur resistansi antara belitan menggunakan *Megger*. Resistansi diukur diantara belitan tegangan tinggi dan belitan tegangan rendah (H/L), belitan tegangan tinggi dan *ground* (H/G), dan antara belitan tegangan rendah dan *ground* (L/G). Pengukuran resistansi dilakukan pada menit pertama dan 10 menit setelahnya untuk menghitung *Polarization Index (PI)* sesuai dengan persamaan (2-2). Untuk dapat lulus dalam pengujian, PI harus lebih besar dari 1,25.

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (2-2)$$

dengan :

PI : Indeks polarisasi

R₁₀ : Resistansi menit ke-10

R₁ : Resistansi menit ke-1

Untuk melakukan pengukuran resistansi isolasi ada prosedur yang harus ditempuh, yaitu :

- Semua peralatan harus diisolasi
 - Pastikan tanki dan inti transformator terhubung dengan *ground*.
 - Putuskan semua *arrester*, sistem pendingin, instrumen pengukur atau sistem pengendali tegangan rendah yang tersambung dengan belitan.
 - Hubung singkat semua terminal belitan pada level tegangan yang sama secara bersamaan
 - Lakukan pengukuran resistansi 1 menit antar setiap belitan dan *ground*
- 5) Pengujian resistansi belitan, yaitu pengukuran pada belitan sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah saat rangkaian terbuka. Pengujian resistansi belitan juga dapat digunakan

untuk menentukan rugi-rugi (I^2R) pada transformator, menghitung temperatur belitan pada akhir pengujian kenaikan temperatur, dan untuk mendeteksi adanya kemungkinan gangguan pada transformator.

Untuk transformator yang terhubung Y, pengukuran resistansi diukur antara terminal *line* dan netral. Untuk transformator yang terhubung δ , pengukuran resistansi diukur antara terminal *line*. Nilai resistansi belitan dihitung dengan persamaan (2-3)

$$R = \frac{U}{I} \quad (2-3)$$

Dengan :

- R : Nilai resistansi belitan
- U : Tegangan pengujian (mV)
- I : Arus pengujian (A)

- 6) Pengujian *turn ratio*, yaitu pengukuran *turn ratio* antara belitan primer dan sekunder pada transformator untuk ketiga fasa dan 17 *tap*. Untuk mendapatkan hasil tes yang memuaskan, *error* pada tiap fasa harus kurang dari 0,5%. Perhitungan *turn ratio* secara teoritis ditunjukkan pada persamaan (2-4)

$$a = \frac{V_p}{V_s} \quad (2-4)$$

Dengan :

- a : Nilai *turn ratio*
- V_p : Tegangan sisi belitan primer
- V_s : Tegangan sisi belitan sekunder

Nilai *error* atau deviasi dihitung dengan membandingkan antara nilai *turn ratio* terukur dan nilai *turn ratio* teoritis. Perhitungan nilai deviasi ditunjukkan pada persamaan (2-5)

$$\text{Deviasi} = \frac{\text{Nilai turn ratio terukur} - \text{turn ratio teoritis}}{\text{turn ratio teoritis}} \quad (2-5)$$

- 7) Pengujian $\tan \delta$, yaitu untuk memonitor kondisi transformator. Parameter ini merupakan perbandingan antara rugi-rugi dielektrik dan kapasitas (VA), dinyatakan dalam %. $\tan \delta$ atau faktor disipasi dapat didefinisikan sebagai rasio antara komponen resistif dan kapasitif.

Ada beberapa mode tes yang digunakan pada pengujian $\tan \delta$ yaitu *Grounded Specimen Test* (GST) dan *Ungrounded Specimen Test* (UST). GST adalah metode



pengukuran dimana salah satu terminalnya terhubung dengan *ground*. Metode terbaru yang umum digunakan adalah GST-g, yaitu dengan *guard*. Hubungan ini memungkinkan untuk melakukan pengukuran pada multi komponen, *ground*, dan sistem isolasi.

Metode UST adalah sebuah metode tes dimana tidak ada terminal yang terhubung dengan *ground*. Metode ini secara otomatis memberikan hubungan *guard* yang dapat digunakan secara efektif untuk mengukur satu komponen diantara banyak komponen pada sistem isolasi.





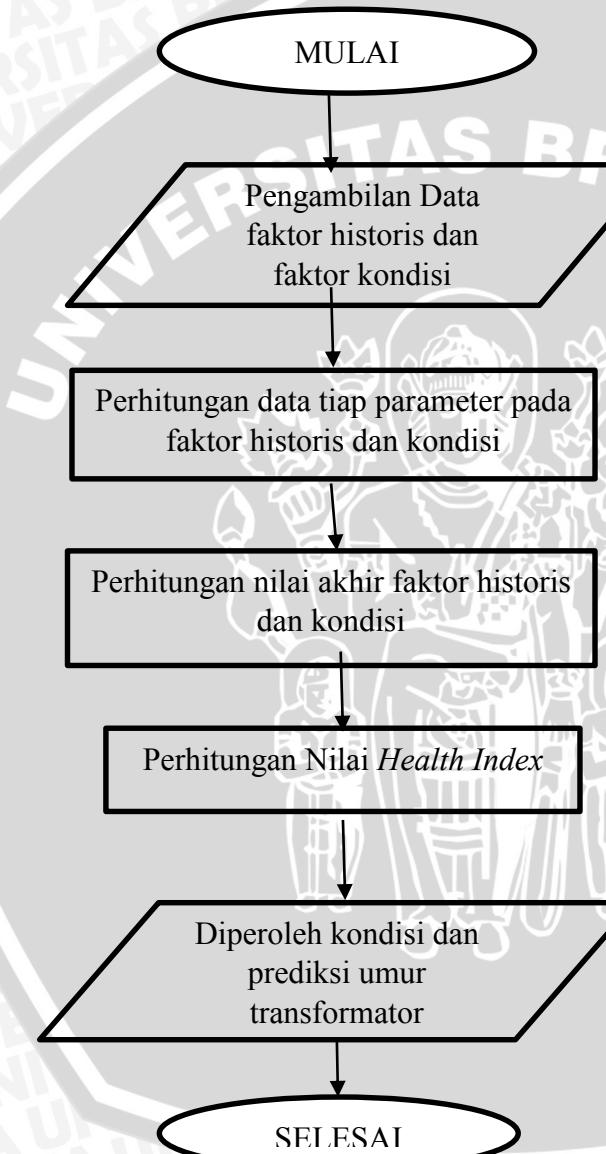
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini didasarkan pada usaha untuk memprediksi usia transformator dan tindakan yang harus ditempuh mengacu pada rumusan masalah pada bab sebelumnya. Langkah-langkah yang ditunjukkan pada diagram alir utama penelitian seperti pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.1. Studi Literatur

Studi literatur yang dilakukan pada penelitian ini bertujuan mencari teori-teori yang menunjang penelitian ini, melalui jurnal-jurnal yang memiliki studi kasus yang sejenis, buku-buku, maupun melalui internet. Teori yang dibutuhkan dalam penelitian ini antara lain:

1. Teori mengenai transformator
2. Faktor-faktor yang mempengaruhi umur transformator
3. Teori mengenai analisis kondisi dan perkiraan umur transformator
4. Teori mengenai metode yang digunakan yaitu *Health Index*

3.2. Pengambilan Data

Data yang diambil diperoleh dari PLN APP Kota Malang dan gardu induk Sengkaling. Data-data yang diperoleh akan dijadikan acuan untuk mengetahui kondisi transformator, menghitung nilai HI, memprediksi umur transformator, dan menentukan tindakan yang harus ditempuh.

3.3. Perhitungan dan Analisis Data

Untuk mengetahui kondisi transformator dan memprediksi umur transformator, maka perlu dilakukan perhitungan dan analisis data.

3.3.1. Perhitungan Data Faktor Historis

Data-data faktor historis yang telah diperoleh, yaitu umur transformator, pembebatan, inspeksi dan pemeliharaan, gangguan internal, lokasi, dan merk kemudian diklasifikasikan sesuai dengan nilai dalam huruf. Setelah itu nilai dalam huruf dikonversi ke nilai dalam angka untuk selanjutnya dikalkulasi sesuai bobot masing-masing faktor. Nilai dari masing-masing parameter kemudian dirata-rata untuk memperoleh hasil akhir nilai historis. Adapun tabel penilaian untuk masing-masing parameter pada faktor historis yaitu

1) Waktu Operasi

Parameter waktu operasi mempunyai empat kriteria penilaian, yaitu nilai A jika transformator telah beroperasi antara 0-3 tahun, nilai B jika beroperasi antara 4-10 tahun, nilai C jika beroperasi antara 11-20 tahun, dan nilai D jika transformator telah beroperasi lebih dari 20 tahun. Waktu operasi dihitung mulai saat transformator beroperasi secara normal pada gardu induk sampai waktu pengambilan data, yaitu tahun 2013. Tabel penilaian untuk parameter waktu operasi ditunjukkan pada Tabel 3.1.



Tabel 3. 1 Penilaian Parameter Waktu Operasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Waktu Operasi	4		A/B/C/D	1/2/3/4	

2) Pembebanan

Kriteria penilaian pada parameter pembebanan diklasifikasikan sesuai dengan yang telah dijelaskan pada bab 2. Nilai pembebanan dihitung dengan cara menghitung daya semu yang diterima transformator. Cara menghitung daya semu ditunjukkan pada persamaan (3-1).

$$S_{Beban} = \sqrt{3} V \cdot I \quad (3-1)$$

S : Daya Semu (VA)

V : Tegangan Sisi Sekunder (kV)

I : Arus Beban (Ampere)

Setelah nilai daya semu pembebanan dihitung, selanjutnya menghitung prosentase antara beban yang diterima transformator dan kapasitas transformator. Persamaan untuk menghitung prosentase pembebanan ditunjukkan pada persamaan (3-2).

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{S_{Beban}}{S_{Transformator}} \times 100\% \quad (3-2)$$

% Pembebanan : Prosentase pembebanan yang diterima transformator

S_{Beban} : Daya semu beban (MVA)

$S_{Transformator}$: Kapasitas Transformator (MVA)

% pembebanan adalah nilai akhir yang digunakan untuk penilaian pada parameter pembebanan. Nilai prosentase pembebanan diklasifikasikan sesuai kapasitas transformator dan diberi penilaian sesuai standar yang telah ditentukan. Tabel penilaian untuk parameter pembebanan ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Penilaian Parameter Pembebanan

No.	Parameter	Bobot	Kapasitas (MVA)	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pembebanan	3			A/B/C/D	1/2/3/4	



3) Inspeksi dan Pemeliharaan

Kriteria penilaian pada parameter inspeksi dan pemeliharaan berdasarkan frekuensi dilakukannya inspeksi dan pemeliharaan. Hanya ada dua nilai pada parameter ini, yaitu nilai A jika inspeksi dan pemeliharaan dilakukan minimal satu kali dalam kurun waktu kurang dari sama dengan 12 bulan dan nilai C jika satu kali dalam kurun waktu lebih dari 12 bulan. Tabel penilaian parameter inspeksi dan pemeliharaan ditunjukkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3. 3 Penilaian Parameter Inspeksi dan Pemeliharaan

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Inspeksi dan Pemeliharaan	4		A/C	2/4	

4) Gangguan Internal

Kriteria penilaian pada parameter gangguan internal berdasarkan frekuensi terjadinya gangguan dalam satu tahun. Tabel penilaian parameter gangguan internal ditunjukkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4 Penilaian Parameter Gangguan Internal

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Gangguan Internal	4		A/B/C/D	1/2/3/4	

5) Lokasi

Kriteria penilaian pada parameter lokasi berdasarkan tempat transformator beroperasi. Tabel penilaian untuk parameter lokasi ditunjukkan pada Tabel 3.5.

Tabel 3. 5 Penilaian Parameter Lokasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Lokasi	2		B/D	1/3	

6) Merk

Kriteria penilaian pada parameter merk berdasarkan tempat asal pabrikan pembuat transformator. Tabel penilaian untuk parameter merk ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3. 6 Penilaian Parameter Merk

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Merk	1		B/C	2/3	

3.3.2. Perhitungan Data Faktor Kondisi

Data-data faktor kondisi yang telah diperoleh, yaitu pengujian tegangan tembus minyak, pengujian kadar air, *dissolved gas analysis*, pengujian resistansi isolasi, pengujian resistansi belitan, pengujian *turn ratio*, dan pengujian tan δ , kemudian diklasifikasikan sesuai dengan nilai dalam huruf. Setelah itu nilai dalam huruf dikonversi ke nilai dalam angka untuk selanjutnya dikalkulasi sesuai bobot masing-masing faktor. Nilai dari masing-masing faktor kemudian dirata-rata untuk memperoleh hasil akhir nilai kondisi. Adapun tabel penilaian untuk masing-masing parameter yaitu

1) Pengujian Tegangan Tembus Minyak

Kriteria penilaian pada parameter ini berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika tegangan tembus lebih dari 40 kV. Tabel penilaian untuk parameter pengujian tegangan tembus minyak ditunjukkan pada Tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Penilaian Parameter Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3		A/C/D	1/2/4	

2) Pengujian Kadar Air

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika kadar air dalam minyak kurang dari 25 ppm. Tabel penilaian untuk pengujian kadar air ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3. 8 Penilaian Parameter Pengujian Kadar Air

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Kadar Air	3		A/D	1/4	

3) Dissolved Gas Analysis

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan jumlah gas yang kandungannya melebihi batas level standar. Rumus untuk menentukan batas level standar tiap gas ditunjukkan pada tabel 3.9.

Tabel 3. 9 Rumus menentukan batas level standar gas

Gas	Batas Normal (ppm)
H ₂ (Hidrogen)	<20n + 50
CO ₂ (Karbondioksida)	<100n + 1500
CO (Karbonmonoksida)	<25n + 500
CH ₄ (Metana)	<20n + 50
C ₂ H ₂ (Asetilena)	<5n + 10
C ₂ H ₄ (Etilena)	<20n + 50
C ₂ H ₆ (Etana)	<20n + 50

Dimana n adalah waktu operasi transformator saat pengambilan data *dissolved gas analysis*. Gas dikatakan sesuai standar apabila konsentrasi tidak melebihi batas level yang telah ditentukan. Tabel penilaian untuk parameter *dissolved gas analysis* ditunjukkan pada Tabel 3.10.

Tabel 3. 10 Penilaian Parameter Dissolved Gas Analysis

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Dissolved Gas Analysis	3		A/B/C/D	1/2/3/4	



4) Pengujian Resistansi Isolasi

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika nilai *Polarization Index* (PI) lebih dari 1,25. Tabel penilaian untuk parameter pengujian resistansi isolasi ditunjukkan pada Tabel 3.11.

Tabel 3. 11 Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Isolasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Resistansi Isolasi	2		A/C/D	1/2/4	

5) Pengujian Resistansi Belitan

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan jumlah pengujian yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika kedua belitan transformator menghasilkan pengukuran sesuai yang diinginkan. Tabel penilaian untuk parameter pengujian resistansi belitan ditunjukkan pada Tabel 3.12.

Tabel 3. 12 Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Belitan

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Resistansi Belitan	2		A/C/D	1/2/4	

6) Pengujian Perbandingan Belitan (*Turn Ratio*)

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan jumlah fasa yang mendapatkan hasil memuaskan, yaitu jika deviasi pada tiap fasa kurang dari $\pm 0,5\%$.

Persamaan untuk menghitung *turn ratio* ditunjukkan pada persamaan (3-3)

$$a = \frac{V_p}{V_s} \quad (3-3)$$

a : Nilai perbandingan belitan

V_p : Tegangan pada belitan primer (volt)

V_s : Tegangan pada belitan sekunder (volt)



Jika deviasi antara nilai perbandingan belitan dan hasil pengukuran tidak ada yang melebihi 0,5%, maka transformator memperoleh nilai maksimal. Tabel penilaian untuk parameter pengujian perbandingan belitan ditunjukkan pada Tabel 3.13.

Tabel 3. 13 Penilaian Parameter Pengujian Turn Ratio

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Turn Ratio	2		A/C/D	1/2/4	

7) Pengujian Tan δ

Kriteria penilaian untuk parameter ini berdasarkan pada hasil pengujian yang terdiri dari 4 kriteria penilaian. Tabel penilaian untuk parameter pengujian tan δ ditunjukkan pada Tabel 3.14.

Tabel 3. 14 Penilaian Parameter Pengujian Tan δ

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Tan δ	3		A/B/C/D	1/2/3/4	

3.4. Perhitungan Nilai Health Index

3.4.1. Nilai Akhir Faktor Historis

Untuk menghitung nilai HI, nilai akhir faktor historis dan faktor kondisi yang telah diperoleh dikalikan dengan prosentase masing-masing, yaitu 40% untuk faktor historis dan 60% untuk faktor kondisi, sesuai persamaan (2-1).

Untuk menghitung nilai akhir faktor historis, nilai pada masing-masing parameter ditabulasi untuk memudahkan perhitungan. Ada 6 parameter pada faktor historis dengan bobot yang berbeda-beda. Tabulasi untuk hasil penilaian parameter faktor historis ditunjukkan pada Tabel 3.15.



Tabel 3. 15 Tabel Penilaian Faktor Historis

No.	Parameter	Bobot	Nilai Huruf	Nilai Akhir Parameter
1.	Waktu Operasi	4		
2.	Pembebanan	3		
3.	Inspeksi dan Pemeliharaan	4		
4.	Gangguan Internal	4		
5.	Lokasi	2		
6.	Merk	1		
Nilai Total		18		

Setelah tabulasi selesai dan diperoleh nilai akhir parameter, maka nilai akhir historis dapat dihitung dengan persamaan (3-3). Nilai akhir faktor historis akan digunakan untuk perhitungan nilai akhir *health index*.

$$NH = \frac{NA_{Total}}{Bobot_{Total}} \quad (3-4)$$

dengan :

NH : Nilai akhir faktor historis

NA_{total} : Nilai akhir parameter total

Bobot_{total}: Bobot total faktor historis

3.4.2.Nilai Akhir Faktor Kondisi

Faktor kondisi mempunyai prosentase yang lebih besar (60%) dari faktor historis dalam perhitungan nilai akhir *health index*. Hal ini menggambarkan bahwa parameter pada faktor kondisi sedikit lebih berpengaruh dari parameter pada faktor historis. Terdapat 7 parameter pada faktor kondisi dengan bobot yang berbeda-beda. Setelah melakukan pengujian dan penilaian pada tiap parameter, maka hasil penilaian ditabulasi dalam sebuah tabel faktor kondisi. Tabulasi untuk penilaian faktor kondisi ditunjukkan pada Tabel 3.16.

Tabel 3. 16 Penilaian Faktor Kondisi

No.	Parameter	Bobot	Nilai Huruf	Nilai Akhir Parameter
1.	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3		
2.	Pengujian Kadar Air	3		
3.	<i>Dissolved Gas Analysis</i>	3		
4.	Pengujian Tan δ	3		
5.	Pengujian Resistansi Isolasi	2		
6.	Pengujian Resistansi Belitan	2		
7.	Pengujian Turn Ratio	2		
Nilai Total		18		

Setelah diperoleh nilai akhir tiap parameter pada faktor kondisi, maka nilai akhir parameter total dapat dihitung dan kemudian dibagi dengan bobot total pada faktor kondisi untuk mendapatkan nilai akhir faktor kondisi mengacu pada persamaan (3-5). Nilai akhir faktor kondisi digunakan untuk perhitungan nilai akhir HI.

$$NK = \frac{NA_{Total}}{Bobot_{Total}} \quad (3-5)$$

dengan :

NK : Nilai akhir faktor kondisi

NA_{total} : Nilai akhir parameter total

Bobot_{total}: Bobot total faktor kondisi

3.4.3. Perhitungan Nilai *Health Index*

Setelah diperoleh nilai akhir faktor historis dan faktor kondisi, nilai akhir *health index* dapat dihitung. Untuk menghitung nilai akhir *health index*, maka terlebih dahulu nilai tiap parameter pada faktor historis dan faktor kondisi ditabulasi dengan mengacu pada tabel 2.2. Nilai akhir *health index* dapat dihitung dengan mengacu pada persamaan (2-1). Nilai *health index* yang diperoleh merupakan acuan untuk menganalisis kondisi dan memprediksi umur transformator.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisis dengan Metode Health Index

Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, ada 13 parameter yang digunakan sebagai acuan penilaian untuk menghitung nilai akhir *health index*. Parameter-parameter ini mencakup faktor historis dan faktor kondisi. Parameter pada faktor historis antara lain waktu operasi, pembebanan, inspeksi dan pemeliharaan, gangguan internal, lokasi, dan merk. Sedangkan parameter pada faktor kondisi adalah pengujian tegangan tembus minyak, pengujian kadar air, *dissolved gas analysis*, pengujian tan δ , pengujian resistansi isolasi, pengujian resistansi belitan, dan pengujian perbandingan belitan (*turn ratio*).

Bab ini akan membahas dan menganalisis data-data yang ada pada setiap parameter untuk kemudian diberikan nilai sesuai standar penilaian. Nilai-nilai pada setiap parameter inilah yang akan digunakan untuk perhitungan nilai akhir *health index*. Nilai akhir *health index* adalah acuan untuk analisis kondisi dan prediksi umur transformator.

4.2. Transformator Daya

Transformator yang digunakan pada penelitian ini adalah transformator daya yang merupakan jenis transformator penurun tegangan untuk menurunkan tegangan dari jaringan 150 kV ke 70 kV.

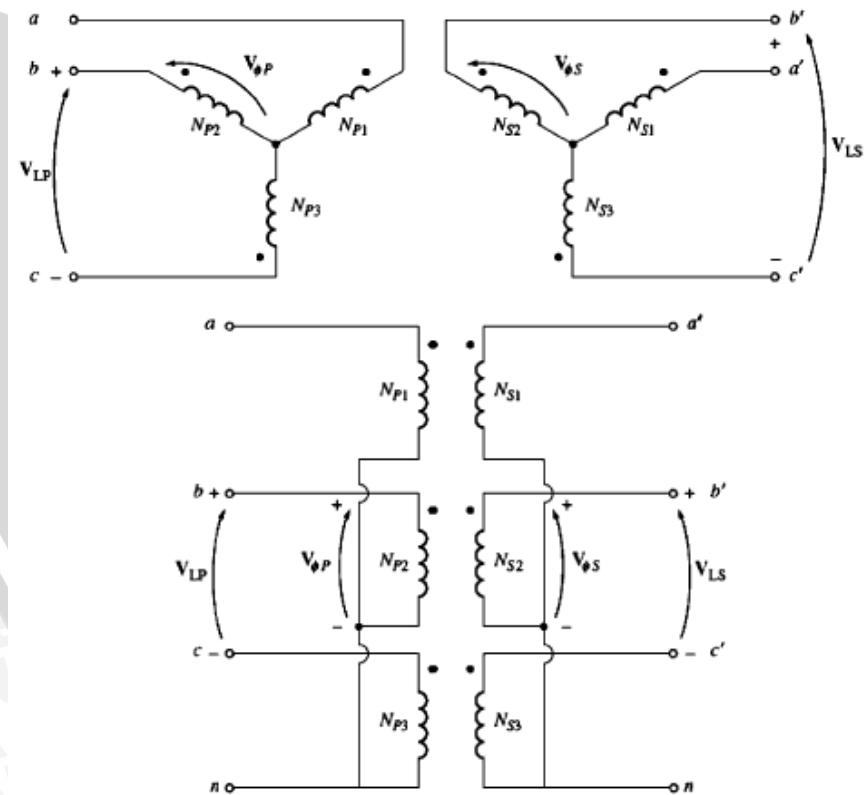


Gambar 4. 1 Transformator IBT-1 Gardu Induk Sengkaling

Data teknis transformator sebagai berikut :

Tipe	: Transformator PAUWELS type ORS.60/275, tahun 2008
Kapasitas	: 60 MVA
Rasio Arus	: 205,3/494,4 Amp
Tegangan Primer	: 150 kV
Tegangan Sekunder	: 70 kV
Impedansi	: 12,6 %
Tipe Pendingin	: ONAN/ONAF
Dipasang Pada	: TR BAY TRAFO I 150/70 KV – 60 MVA
Frekuensi	: 50 Hz

Transformator IBT-1 Gardu induk Sengkaling terhubung secara Y-Y pada tiap fasanya. Gambar rangkaian ekuivalen untuk hubungan Y-Y transformator ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Transformator hubungan Y-Y

Dimana :

$$V_p \text{ (Tegangan Primer)} = 150 \text{ kV}$$

$$V_s \text{ (Tegangan Sekunder)} = 70 \text{ kV}$$



4.3. Data Historis

4.3.1. Waktu Operasi

Parameter pada data historis yang pertama yaitu waktu operasi. Parameter ini didasarkan pada waktu saat transformator pertama kali dioperasikan. Sesuai sub bab 3.3.1 bagian waktu operasi, parameter waktu operasi mempunyai 4 kriteria penilaian, yaitu A, B, C, D.

Pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling, telah beroperasi sejak tahun 2009. Dengan mengacu pada data yang diambil pada tahun 2013, maka transformator telah beroperasi selama 4 tahun. Sesuai kriteria penilaian, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk dalam kategori waktu operasi antara 4-10 tahun, dengan nilai B dan konversi nilai angka 3. Penilaian untuk parameter waktu operasi diberikan pada Tabel 4.1. NA X bobot adalah nilai parameter waktu operasi yang digunakan untuk perhitungan nilai akhir *health index*.

Tabel 4. 1 Penilaian Parameter Waktu Operasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Waktu Operasi	4	Beroperasi sejak tahun 2009	B	3	12

4.3.2. Pembebanan

Parameter pembebanan didasarkan pada beban tertinggi yang pernah dicapai transformator selama periode waktu tertentu. Kriteria penilaian dibagi menjadi 3, yaitu untuk transformator berkapasitas 20 MVA, 30 MVA, dan 60 MVA.

Transformator IBT-1 di gardu induk Sengkaling mempunyai kapasitas 60 MVA, sehingga nilai $S_{\text{Transformator}}$ adalah 60 MVA dan termasuk dalam kategori transformator berkapasitas 60 MVA. Periode waktu pembebanan yang dipakai adalah selama tahun 2013. Sesuai persamaan (3-1) dan (3-2), maka perhitungan prosentase pembebanan pada bulan Januari tahun 2013 untuk transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling adalah :

$$S_{\text{Beban}} = \sqrt{3} \times V \times I$$

$$S_{\text{Beban}} = \sqrt{3} \times 70 \times 250$$

$$S_{\text{Beban}} = 30,31 \text{ MVA}$$



$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{S_{Beban}}{S_{Transformer}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Pembebanan} = \frac{30,31 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} \times 100\%$$

$$\% \text{ Pembebanan} = 50,46 \%$$

Dari perhitungan tersebut, nilai prosentase pembebanan pada bulan Januari 2013 untuk transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling adalah sebesar 50,46%. Nilai prosentase pembebanan sepanjang tahun 2013 ditunjukkan pada Tabel 4.2

Tabel 4. 2 Data Beban Tertinggi Tahun 2013

BULAN	AMP	MW	MVAR	% PEMBEBANAN
Januari	250	25	12	50,46
Februari	230	23	12	46,42
Maret	250	25	11	50,46
April	240	24	11	48,44
Mei	240	24	12	48,44
Juni	230	23	10	46,42
Juli	230	23	10	46,42
Agustus	220	22	9	44,40
September	245	24,5	10	49,45
Oktober	260	26	10,5	52,48
November	242	24	10	48,84
Desember	145	14,5	7	29,27

Sumber : PLN APP Kota Malang

Dari perhitungan prosentase pembebanan selama tahun 2013, pembebanan tertinggi terjadi pada bulan Oktober, yaitu sebesar 52,48% dari kapasitas transformator. Maka berdasarkan data dan tabel 3.2, untuk parameter pembebanan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai C dengan nilai angka 2. Penilaian parameter pembebanan ditunjukkan pada Tabel 4.3. NA x bobot adalah nilai parameter pembebanan yang digunakan untuk perhitungan nilai akhir *health index*.

Tabel 4. 3 Penilaian Parameter Pembebanan

No.	Parameter	Bobot	Kapasitas (MVA)	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pembebanan	3	60	Beban tertinggi = 52,53%	C	2	6



4.3.3. Inspeksi dan Pemeliharaan

Parameter inspeksi dan pemeliharaan mempunyai nilai bobot maksimal, yaitu 4. Penilaian parameter ini berdasarkan frekuensi pemeliharaan pada 12 bulan, apakah kurang dari satu kali atau lebih dari satu kali.

Pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling, pemeliharaan dilakukan setiap 2 tahun sekali. Untuk transformator dengan nomer ganjil, pemeliharaan dilaksanakan pada tahun ganjil, begitupun dengan transformator bernomor genap. Oleh karena itu transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk dalam kriteria penilaian pemeliharaan yang dilakukan satu kali pada kurun waktu lebih dari 12 bulan. Pola pemeliharaan transformator gardu induk Sengkaling 4 tahun terakhir ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Pola pemeliharaan transformator gardu induk Sengkaling

No	Transformator	Tahun Pemeliharaan			
		2011	2012	2013	2014
1	Transformator IBT-1				
2	Transformator IBT-2				
3	Transformator IBT-3				
4	Transformator IBT-4				

Sumber : Data Pemeliharaan Gardu Induk Sengkaling tahun 2013

Kotak yang diarsir hitam menandakan pelaksanaan pemeliharaan pada tahun tersebut dan kotak yang tidak diarsir menandakan tidak ada pemeliharaan. Jadi dapat disimpulkan untuk parameter inspeksi dan pemeliharaan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai C dengan nilai angka 2. Penilaian parameter inspeksi dan pemeliharaan ditunjukkan pada Tabel 4.5. NA x bobot adalah nilai akhir parameter inspeksi dan pemeliharaan yang digunakan untuk perhitungan nilai akhir *health index*.

Tabel 4. 5 Penilaian Parameter Inspeksi dan Pemeliharaan

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Inspeksi dan Pemeliharaan	4	Satu kali dalam 2 tahun	C	2	8

4.3.4. Gangguan Internal

Gangguan internal yaitu gangguan yang terjadi akibat adanya masalah pada transformator daya, bukan karena faktor lain seperti penyulang. Penilaian parameter ini berdasarkan terjadinya gangguan internal dalam satu tahun.

Pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling, gangguan yang sering terjadi karena disebabkan penyulang. Untuk gangguan internal, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling tidak pernah mengalami sama sekali selama tahun 2013. Frekuensi gangguan internal selama tahun 2013 ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Frekuensi gangguan internal tahun 2013

No	Bulan	Jumlah Gangguan
1	Januari	0
2	Februari	0
3	Maret	0
4	April	0
5	Mei	0
6	Juni	0
7	Juli	0
8	Agustus	0
9	September	0
10	Oktober	0
11	November	0
12	Desember	0

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Sehingga untuk parameter ini transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A, dengan nilai angka 4. Tabel penilaian untuk parameter gangguan internal sebagai berikut

Tabel 4. 7 Penilaian Parameter Gangguan Internal

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Gangguan Internal	4	0 dalam satu tahun	A	4	16



4.3.5.Lokasi

Parameter lokasi terbagi menjadi dua jenis, yaitu transformator yang beroperasi di lokasi perkotaan dan industri. Tiap lokasi mempunyai tingkat gangguan yang berbeda.

Transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk ke dalam transformator yang beroperasi di sektor industri. Oleh karena itu transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai D dengan nilai angka 1. Tabel penilaian parameter lokasi ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Penilaian Parameter Lokasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Lokasi	2	Industri	D	1	2

4.3.6.Merk

Parameter merk dibagi menjadi 2 kriteria, yaitu untuk merk transformator dengan pabrikan asal eropa, dan asia. Pembagian kriteria ini berdasarkan tingkat gangguan yang terjadi pada masing-masing merk.

Transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling bermerk Pauwels, dimana saat ini merk Pauwels telah diakuisisi oleh perusahaan asal India, Crompton Greaves Ltd. Jadi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk ke dalam kriteria pabrikan asal asia dan memperoleh nilai C dengan nilai angka 2. Tabel penilaian parameter merk ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Penilaian Parameter Merk

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Merk	1	Asia	C	2	2

4.4. Data Kondisi

4.4.1.Pengujian Tegangan Tembus Minyak

Penilaian parameter ini berdasarkan jumlah pengujian yang memuaskan, yaitu jika tegangan tembus berada di atas 40 kV. Pengujian tegangan tembus minyak dilakukan oleh pihak gardu induk Sengkaling saat pemeliharaan.

Pengujian tegangan tembus transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling mengacu pada standar IEC 156, baik untuk pengujian minyak pada tangki utama maupun OLTC. Pengujian dilakukan sebanyak 6 kali pada tangki utama dan tangki OLTC, kemudian hasil pengujian dirata-rata. Adapun tabel detail pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4. 10 Data Spesifikasi Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Data	Keterangan
1.	Tipe Minyak	Silikon
2.	Elektroda	Mushroom
3.	Gap Elektroda	2,5 mm
4.	Stirrer	Magnetik
5.	Frekuensi Pengujian	61,8 Hz
6.	Tegangan Maksimal	100 kV
7.	dV/dt Rate	2 kV/s
8.	Temperatur Minyak	32°C
9.	Dispersi s/x	0,13
10.	Standar Deviasi	7,98 kV

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Dengan spesifikasi sesuai Tabel 4.10, pengujian dilakukan sebanyak 6 kali. Hasil pengujian tegangan tembus minyak pada tangki utama transformator ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Pengujian	Hasil
1.	Pengujian 1	51,4 kV
2.	Pengujian 2	63,4 kV
3.	Pengujian 3	74,5 kV
4.	Pengujian 4	59,5 kV
5.	Pengujian 5	60,2 kV
6.	Pengujian 6	55,1 kV
Rata-rata		60,7 kV

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Dari hasil pengujian pada tangki utama transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling menunjukkan bahwa minyak pada tangki utama transformator mempunyai tegangan tembus 51,4 kV pada pengujian pertama, 63,4 kV pada pengujian kedua, 74,5 kV pada pengujian ketiga, 59,5 kV pada pengujian keempat, 60,2 pada pengujian kelima, dan 55,1 untuk pengujian keenam. Dari keenam pengujian tersebut diperoleh rata-rata tegangan tembus minyak transformator pada tangki utama adalah 60,7 kV.



Selain pada tangki utama transformator, pengujian tegangan tembus minyak juga dilakukan pada OLTC. Data spesifikasi untuk pengujian tegangan tembus minyak ditunjukkan pada Tabel 4.12

Tabel 4. 12 Data Spesifikasi Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Data	Keterangan
1.	Tipe Minyak	Silikon
2.	Elektroda	Mushroom
3.	Gap Elektroda	2,5 mm
4.	Stirrer	Magnetik
5.	Frekuensi Pengujian	61,8 Hz
6.	Tegangan Maksimal	100 kV
7.	dV/dt Rate	2 kV/s
8.	Temperatur Minyak	37°C
9.	Dispersi s/x	0,14
10.	Standar Deviasi	5,42 kV

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Pengujian tegangan tembus minyak pada OLTC juga dilakukan sebanyak 6 kali. Data hasil pengujian tegangan tembus minyak ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Data Hasil Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Pengujian	Hasil
1.	Pengujian 1	39 kV
2.	Pengujian 2	34,7 kV
3.	Pengujian 3	40 kV
4.	Pengujian 4	33,6 kV
5.	Pengujian 5	45 kV
6.	Pengujian 6	47,2 kV
Rata-rata		39,9 kV

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Hasil pengujian minyak transformator pada tangki OLTC adalah 39 kV pada pengujian pertama, 34,7 kV pada pengujian kedua, 40 kV pada pengujian ketiga, 33,6 pada pengujian keempat, 45 kV pada pengujian kelima, dan 47,2 kV pada pengujian keenam, sehingga diperoleh rata-rata tegangan tembus minyak transformator pada tangki OLTC sebesar 39,9 kV.

Dari hasil pengujian tersebut terlihat bahwa ada 8 pengujian tegangan tembus minyak yang memenuhi standar, sedangkan 4 lainnya tidak memenuhi. Jadi dapat disimpulkan bahwa transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A untuk parameter

pengujian tegangan tembus minyak, dengan nilai angka 4. Penilaian parameter pengujian tegangan tembus minyak ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14 Penilaian Parameter Pengujian Tegangan Tembus Minyak

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3	8 Pengujian memenuhi standar	A	4	12

4.4.2.Pengujian Kadar Air

Penilaian ini berdasarkan jumlah pengujian yang memenuhi persyaratan, yaitu jika kadar air dalam minyak transformator tidak melebihi 25 ppm.

Minyak yang digunakan pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling adalah minyak jenis shell diala B. Minyak transformator jenis ini mempunyai spesifikasi tersendiri pada beberapa aspek, seperti viskositas dan kadar air yang terkandung dalam minyak. Sesuai yang tercantum pada spesifikasi minyak transformator jenis shell diala B, kadar air yang terdapat pada minyak adalah sebesar 0,0016%. Tabel spesifikasi kadar air yang terkandung dalam minyak transformator ditunjukkan pada Tabel 4.15.

Tabel 4. 15 Hasil pengujian kadar air

No.	Aspek	Standar yang Digunakan	Spesifikasi
1.	Pengujian kadar air	IEC 184	0,0016%

Sumber : Shell Diala B Data Sheet

Sesuai standar konversi, 1% setara dengan 10.000 ppm. Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.15, dapat disimpulkan bahwa minyak transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling tidak melebihi 25 ppm ($0,0016\% = 16 \text{ ppm}$) . Jadi untuk parameter pengujian kadar air transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A dengan nilai angka 4. Tabel penilaian parameter pengujian kadar air ditunjukkan pada Tabel 4.16

Tabel 4. 16 Penilaian parameter pengujian kadar air

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Kadar Air	3	<25 ppm	A	4	12

4.4.3.Dissolved Gas Analysis

Dissolved gas analysis mendeteksi beberapa jenis gas yang terkandung dalam minyak transformator yang dapat memicu terjadinya gangguan, seperti Hidrogen (H_2), Karbondioksida (CO_2), Karbonmonoksida (CO), Metana (CH_4), Asetilena (C_2H_2), Etilena (C_2H_4), dan Etana (C_2H_6). Masing-masing gas harus berada dibawah level yang telah ditentukan dari hasil perhitungan rumus.

Transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling telah beroperasi selama 4 tahun. Mengacu pada rumus tabel 3.9, untuk waktu operasi 4 tahun ($n=4$) dapat dihitung batas normal kandungan gas-gas berikut :

$$\text{Kandungan gas } H_2 < 20n + 50 ; n = 4$$

$$\text{Kandungan gas } H_2 < 20(4) + 50$$

$$\text{Kandungan gas } H_2 < 130 \text{ ppm}$$

Jadi kandungan gas H_2 dalam minyak transformator tidak boleh lebih dari atau sama dengan 130 ppm berdasarkan pengujian *dissolved gas analysis*. Hasil perhitungan batas normal tiap gas ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Selanjutnya untuk mengetahui jumlah gas yang memenuhi persyaratan batas normal, data DGA transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling dicocokkan dengan hasil perhitungan batas normal tiap gas. Perbandingan antara batas normal gas dan konsentrasi gas terdeteksi ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17 Data Hasil Pengujian Dissolved Gas Analysis dan Batas Normal Gas

Gas	Batas Normal (ppm)	Konsentrasi Gas Terdeteksi (ppm)	Keterangan
Hidrogen (H_2)	130	20	Memenuhi
Karbondioksida (CO_2)	1900	392	Memenuhi
Karbonmonoksida (CO)	600	0	Memenuhi
Metana (CH_4)	130	172	Tidak Memenuhi
Asetilena (C_2H_2)	30	0	Memenuhi
Etilena (C_2H_4)	130	9	Memenuhi
Etana (C_2H_6)	130	109	Memenuhi

Dari Tabel 4.17 dapat disimpulkan bahwa 6 dari 7 gas yang terkandung pada minyak transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memenuhi syarat batas normal. Mengacu pada tabel 2.4, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk dalam klasifikasi satu gas

yang melewati batas normal. Jadi untuk parameter *dissolved gas analysis*, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai B dengan nilai angka 3. Penilaian parameter *dissolved gas analysis* diberikan pada Tabel 4.18

Tabel 4. 18 Penilaian Parameter *Dissolved Gas Analysis*

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Dissolved Gas Analysis	3	1 gas yang melewati batas normal	B	3	9

4.4.4.Pengujian Resistansi Isolasi

Pengujian resistansi isolasi dilakukan dengan alat yang biasa dikenal dengan *megger*. Ada tiga pengukuran yang dijadikan acuan penilaian, yaitu pengukuran antara belitan primer dan belitan sekunder, antara belitan primer dan *ground*, serta antara belitan sekunder dan *ground*. Penilaian parameter ini berdasarkan jumlah pengukuran yang memenuhi standar, yaitu jika *Polarization Index* (PI) lebih dari 1,25.

Sesuai aturan, pengukuran dilakukan saat menit 1 dan menit 10. Adapun data pengukuran resistansi isolasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling ditunjukka pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19 Hasil Pengujian R₁ dan R₁₀

Uraian Pengukuran	Menit 1 (kΩ)	Menit 10 (kΩ)
Primer – Sekunder	12.900	23.800
Primer – Ground	14.900	20.600
Sekunder - Ground	11.800	23.700

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkaling tahun 2013

Dari data pada Tabel 4.19 dapat dihitung nilai PI untuk masing-masing uraian pengukuran mengacu pada persamaan (2-2)

Nilai PI resistansi belitan primer – sekunder :

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1}$$

$$PI = \frac{23.800}{12.900}$$

$$PI = 1,84$$

Nilai PI resistansi belitan primer – ground :

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1}$$

$$PI = \frac{20.600}{14.900}$$

$$PI = 1,38$$

Nilai PI resistansi belitan sekunder – ground :

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1}$$

$$PI = \frac{23.700}{11.800}$$

$$PI = 2$$

Dari perhitungan di atas, diperoleh nilai PI untuk masing-masing jenis pengukuran.

Tabel hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 4.20.

Tabel 4. 20 Hasil Perhitungan PI dan Batas PI Minimal

Uraian Pengukuran	Batas PI minimal	PI	Keterangan
Primer – Sekunder	1,25	1,84	Memenuhi
Primer – Ground	1,25	1,38	Memenuhi
Sekunder – Ground	1,25	2	Memenuhi

Dari Tabel 4.20 dapat disimpulkan bahwa nilai PI untuk ketiga jenis pengukuran memenuhi batas PI minimal. Jadi untuk parameter pengukuran resistansi isolasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A dengan nilai angka 4. Penilaian parameter pengukuran resistansi isolasi diberikan pada Tabel 4.21.

Tabel 4. 21 Penilaian Parameter Pengujian Resistansi Isolasi

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Resistansi Isolasi	2	3 Jenis pengukuran memenuhi syarat	A	4	8

4.4.5.Pengujian Resistansi Belitan

Pengujian resistansi belitan dilakukan dengan metode volt-ampere dan sumber arus DC. Transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling terhubung secara Y-Y. Adapun temperatur saat pengujian adalah 31,7 °C. Data pengujian resistansi belitan untuk sisi tegangan tinggi ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22 Data pengukuran resistansi belitan sisi tegangan tinggi

TAP	FASA R-S			FASA S-T			FASA T-R		
	U (mV)	I (A)	R (Ohm)	U (mV)	I (A)	R (Ohm)	U (mV)	I (A)	R (Ohm)
1	7,0	5,8	1,20	6,7	5,5	1,21	6,8	5,6	1,20
2	6,9	5,8	1,18	6,6	5,5	1,18	6,7	5,7	1,18
3	6,8	5,8	1,16	6,5	5,6	1,16	6,6	5,7	1,16
4	6,7	5,8	1,14	6,4	5,6	1,14	6,5	5,7	1,14
5	6,5	5,8	1,11	6,3	5,6	1,11	6,4	5,7	1,11
6	6,4	5,9	1,09	6,2	5,6	1,09	6,3	5,7	1,09
7	6,3	5,9	1,07	6,1	5,6	1,07	6,2	5,8	1,07
8	6,2	5,9	1,04	6,0	5,7	1,05	6,1	5,8	1,04
9	6,1	5,9	1,02	5,8	5,7	1,02	5,9	5,8	1,02
10	6,3	5,9	1,07	6,1	5,6	1,07	6,2	5,7	1,07
11	6,2	5,9	1,05	6,0	5,7	1,05	6,1	5,8	1,05
12	6,1	5,9	1,02	5,9	5,7	1,02	5,9	5,8	1,02
13	6,0	5,9	1,00	5,8	5,7	1,00	5,8	5,8	1,00
14	5,9	6,0	0,98	5,7	5,7	0,98	5,7	5,8	0,98
15	5,8	6,0	0,96	5,5	5,8	0,96	5,6	5,8	0,96
16	5,6	6,0	0,93	5,5	5,8	0,93	5,5	5,9	0,93
17	5,5	6,0	0,91	5,3	5,8	0,91	5,4	5,9	0,91

Sumber : PLN APP Kota Malang

Tabel 4.22 merupakan hasil pengukuran resistansi belitan pada sisi tegangan tinggi di ketiga fasa dan 17 tap. Nilai resistansi diperoleh berdasarkan persamaan (2-3) . Hasil pengukuran untuk sisi tegangan rendah ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23 Data pengukuran resistansi belitan sisi tegangan rendah

FASA r-s			FASA s-t			FASA t-r		
U (mV)	I (A)	R (Ohm)	U (mV)	I (A)	R (Ohm)	U (mV)	I (A)	R (Ohm)
1346,6500	6,4918	0,2074	1405,9470	6,7735	0,2076	1411,5670	6,7912	0,2078

Sumber : PLN APP Kota Malang

Untuk dapat memenuhi kriteria penilaian, perbedaan hasil-hasil pengukuran tersebut tidak boleh lebih dari 0,5% untuk sisi tegangan tinggi dan 5% untuk tegangan rendah dari



hasil perhitungan rata-rata nilai resistansi dari ketiga fasa. Nilai rata-rata resistansi untuk ketiga fasa dan deviasinya ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24 Nilai rata-rata resistansi belitan dan deviasi sisi tegangan tinggi

TAP	RATA-RATA	FASA R-S		FASA S-T		FASA T-R	
		R (Ohm)	DEVIASI (%)	R (Ohm)	DEVIASI (%)	R (Ohm)	DEVIASI (%)
1	1,20	1,20	0,02	1,21	-0,07	1,20	0,04
2	1,18	1,18	0,03	1,18	-0,07	1,18	0,04
3	1,16	1,16	0,04	1,16	-0,08	1,16	0,04
4	1,14	1,14	0,04	1,14	-0,07	1,14	0,03
5	1,11	1,11	0,05	1,11	-0,06	1,11	0,02
6	1,09	1,09	0,04	1,09	-0,09	1,09	0,05
7	1,07	1,07	0,06	1,07	-0,12	1,07	0,06
8	1,05	1,04	0,04	1,05	-0,09	1,04	0,05
9	1,02	1,02	-0,04	1,0	-0,01	1,02	0,05
10	1,07	1,07	0,03	1,07	-0,07	1,07	0,03
11	1,05	1,05	0,03	1,05	-0,06	1,05	0,03
12	1,02	1,02	0,04	1,02	-0,07	1,02	0,04
13	1,00	1,00	0,04	1,00	-0,07	1,00	0,03
14	0,98	0,98	0,06	0,98	-0,06	0,98	0,01
15	0,96	0,96	0,04	0,96	-0,07	0,96	0,03
16	0,93	0,93	0,07	0,93	-0,10	0,93	0,04
17	0,91	0,91	0,04	0,91	-0,06	0,91	0,02

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.24 dapat dilihat bahwa dari ketiga fasa dan 17 tap tidak ada deviasi yang lebih dari 0,5% pada belitan sisi tegangan tinggi. Adapun hasil perhitungan nilai rata-rata dan deviasi pada belitan sisi tegangan rendah ditunjukkan pada Tabel 4.25.

Tabel 4. 25 Nilai rata-rata resistansi belitan dan deviasi sisi tegangan rendah

Rata-rata	Fasa r-s		Fasa s-t		Fasa t-r	
	R (Ohm)	Deviasi (%)	R (Ohm)	Deviasi (%)	R (Ohm)	Deviasi (%)
0,20	0,20	0,09	0,20	0	0,20	-0,09

Dari hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 4.25 dapat dilihat bahwa dari ketiga fasa tidak ada deviasi yang melebihi 5% pada belitan sisi tegangan rendah.



Dari data hasil perhitungan tersebut dapat disimpulkan bahwa kedua belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memberikan hasil pengukuran sesuai standar, baik pada belitan sisi tegangan tinggi maupun sisi tegangan rendah. Jadi untuk parameter pengujian resistansi belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A dengan nilai angka 4. Penilaian parameter pengujian resistansi belitan diberikan pada Tabel 4.26.

Tabel 4. 26 Penilaian parameter pengujian resistansi belitan

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Resistansi Belitan	2	Hasil pengujian Belitan HV dan LV sesuai standar	A	4	8

4.4.6.Pengujian Perbandingan Belitan (*Turn Ratio*)

Pengujian perbandingan belitan dilakukan antara belitan primer dan belitan sekunder, pada ketiga fasa dan 17 tap. Pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling, tegangan untuk pengujinya adalah 40 volt. Tipe hubungan belitan transformatornya adalah Y – Y. Perhitungan perbandingan belitan tiap tap berdasarkan tegangan primer dan tegangan sekunder adalah sebagai berikut

Perbandingan Belitan tap 1 :

$$V_p = 165,750 \text{ Volt} ; V_s = 70 \text{ Volt}$$

$$a = \frac{V_p}{V_s}$$

$$a = \frac{165,750}{70}$$

$$a = 2,3679$$

Hasil perhitungan perbandingan belitan untuk 17 tap ditunjukkan pada Tabel 4.27



Tabel 4. 27 Hasil Pengujian V₁, V₂, dan Perbandingan

TAP	V1 (volt)	V2 (volt)	PERBANDINGAN BELITAN
1	165750	70000	2,3679
2	163500	70000	2,3357
3	161250	70000	2,3035
4	159000	70000	2,2714
5	156750	70000	2,2392
6	154500	70000	2,2071
7	152250	70000	2,1750
8	150000	70000	2,1428
9	147750	70000	2,1107
10	145500	70000	2,0785
11	143250	70000	2,0464
12	141000	70000	2,0142
13	138750	70000	1,9821
14	136500	70000	1,9500
15	134250	70000	1,9178
16	132000	70000	1,8857
17	129750	70000	1,8535

Sumber : PLN APP Kota Malang

Dari hasil perhitungan perbandingan belitan yang diperoleh, selanjutnya data hasil pengukuran tiap fasa dibandingkan dengan nilai perbandingan belitan pada masing-masing tap untuk memperoleh nilai prosentase deviasi antara hasil pengukuran dan nilai perbandingan belitan secara teoritis.

Deviasi (%) tap 1 fasa R:

$$\frac{\text{Hasil Pengukuran} - \text{Perbandingan Belitan}}{\text{Perbandingan Belitan}} \times 100\%$$

$$= \frac{2,3690 - 2,3679}{2,3679} \times 100\%$$

$$= 0,0464 \%$$

$$= 0,05\%$$

Fasa S :

$$\frac{\text{Hasil Pengukuran} - \text{Perbandingan Belitan}}{\text{Perbandingan Belitan}} \times 100\%$$



52

$$= \frac{2,3681 - 2,3679}{2,3679} \times 100\%$$

$$= 0,008\%$$

$$= 0,01\%$$

Fasa T :

$$\frac{\text{Hasil Pengukuran} - \text{Perbandingan Belitan}}{\text{Perbandingan Belitan}} \times 100\%$$

$$= \frac{2,3683 - 2,3679}{2,3679} \times 100\%$$

$$= 0,0168\%$$

$$= 0,02\%$$

Dari hasil perhitungan deviasi untuk tap 1 diperoleh bahwa deviasi pada fasa R sebesar 0,05%, fasa S sebesar 0,01%, dan fasa T sebesar 0,02%. Hasil perhitungan deviasi pada semua tap ditunjukkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4. 28 Hasil Pengukuran Perbandingan Belitan dan Selisih

Tap	Fasa	Hasil Pengukuran	Perbandingan Belitan	Deviasi (%)
1	R	2,3690	2,3679	0,05
	S	2,3681		0,01
	T	2,3683		0,02
2	R	2,3366	2,3357	0,04
	S	2,3364		0,03
	T	2,3365		0,03
3	R	2,3048	2,3035	0,05
	S	2,3040		0,02
	T	2,3042		0,03
4	R	2,2725	2,2714	0,05
	S	2,2720		0,03
	T	2,2723		0,04
5	R	2,2407	2,2392	0,06
	S	2,2399		0,03
	T	2,2400		0,03
6	R	2,2083	2,2071	0,05
	S	2,2077		0,03
	T	2,2079		0,04
7	R	2,1763	2,1750	0,06
	S	2,1756		0,03
	T	2,1762		0,06
8	R	2,1443	2,1428	0,07
	S	2,1437		0,04
	T	2,1438		0,04
9	R	2,1121	2,1107	0,07
	S	2,1116		0,04
	T	2,1119		0,06
10	R	2,0602	2,0785	0,08
	S	2,0797		0,05
	T	2,0798		0,06
11	R	2,0481	2,0464	0,08
	S	2,0477		0,06
	T	2,0479		0,07
12	R	2,0160	2,0142	0,08
	S	2,0155		0,06
	T	2,0159		0,08
13	R	1,9842	1,9821	0,11
	S	1,9836		0,08
	T	1,9837		0,08
14	R	1,9520	1,9500	0,10
	S	1,9515		0,08
	T	1,9518		0,09
15	R	1,9201	1,9178	0,11
	S	1,9197		0,09
	T	1,9198		0,10
16	R	1,8880	1,8857	0,12
	S	1,8878		0,11
	T	1,8877		0,11
17	R	1,8558	1,8535	0,12
	S	1,8553		0,09
	T	1,8557		0,11

Dari hasil perhitungan pada tabel 4.28 dapat disimpulkan bahwa selisih antara hasil pengukuran dan perbandingan belitan pada 17 tap dan 3 fasa tidak ada yang di atas 0,5%. Jadi untuk parameter perbandingan belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A dengan nilai angka 4. Penilaian parameter perbandingan belitan diberikan pada tabel 4.29.

Tabel 4. 29 Penilaian Parameter Pengujian Perbandingan Belitan

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Perbandingan Belitan	2	Semua tap dan fasa memenuhi	A	4	8

4.4.7.Pengujian Tan δ

Pengujian tan δ dilakukan pada transformator dan *bushing*. Ada 2 mode tes yang digunakan untuk menguji tan δ , yaitu *Grounded Specimen Test* (GST) dan *Ungrounded Specimen Test* (UST). Pengujian dengan mode GST dilakukan dengan menghubungkan salah satu terminal ke *ground*, sedangkan UST tidak dihubungkan ke *ground*. Hasil pengujian tan δ ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 30 Hasil pengujian tan δ pada tangki transformator

No.	Informasi	Mode Tes	f (Hz)	U (kV)	I (mA)	C (pF)	%TanDelta
1	CHG+CHL	GSTg-B	50	9,992	28,4	9054,3	0,95
2	CHG	GSTg-RB	50	9,996	10,2	3266,7	0,71
3	CHL	UST-R	50	9,984	18,1	5790,2	0,51
4	CLG+CLT	GSTg-R	50	10,006	23,6	7521,4	0,56
5	CLG	GSTg-RB	50	9,992	5,4	1731,5	0,69
6	CLT	UST-B	50	9,979	18,1	5790,3	0,53
7	CTG+CTH	GSTg-B	50	9,981	47,4	15119,9	0,75
8	CTG	GSTg-RB	50	9,969	47,0	15005,8	0,75
9	CTH	UST-R	50	9,992	0,3	113,5	0,70

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkalang tahun 2013

Dari Tabel 4.30 dapat dilihat bahwa nilai tan δ tertinggi pada transformator adalah 0,959274%. Hasil pengujian untuk tan δ pada *bushing* ditunjukkan pada Tabel 4.31.

Tabel 4. 31 Hasil pengujian tan δ pada *bushing*

No.	Informasi	Mode Tes	f (Hz)	U (kV)	I (mA)	C (pF)	% TanDelta
1	C1 Primer PH A	UST-R	50	10,007	0,72	230,4	0,76
2	C1 Primer PH B	UST-R	50	10,007	0,7	225,3	0,87
3	C1 Primer PH C	UST-R	50	9,989	0,71	226,232	0,89
4	C1 Sek PH A	UST-R	50	9,999	0,618	196,7	0,91
5	C1 Sek PH B	UST-R	50	10,014	0,6131	194,862	0,96
6	C1 Sek PH C	UST-R	50	9,989	0,6083	193,81	0,92
7	C1 N Sekunder	UST-R	50	9,999	0,6101	194,18	0,86

Sumber : Data pemeliharaan gardu induk Sengkalang tahun 2013



Dari hasil pengujian tan δ pada *bushing* dapat dilihat bahwa nilai tan δ tertinggi adalah 0,961583%. Dari kedua pengujian tan δ , yaitu pada tangki dan *bushing*, nilai tan δ terbesar adalah 0,961583%. Berdasarkan kriteria penilaian pada tabel 2.4, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling termasuk pada kategori nilai pengujian tan δ antara 0,5% - 1%. Jadi untuk parameter pengujian tan δ memperoleh nilai C dengan nilai angka 2. Penilaian parameter pengujian tan δ diberikan pada Tabel 4.32.

Tabel 4.32 Penilaian parameter pengujian tan δ

No.	Parameter	Bobot	Data	Nilai (Huruf)	Nilai (Angka) (NA)	NA x Bobot
1.	Pengujian Tan δ	3	$Pf_{max} = 0,961583\%$	C	2	6

4.5. Perhitungan Nilai Health Index

4.5.1. Nilai Akhir Faktor Historis

Untuk menghitung nilai HI, perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu pada masing-masing faktor. Faktor pertama yang akan dihitung adalah faktor historis. Faktor historis memiliki 6 parameter dengan bobot penilaian yang berbeda-beda. Perhitungan parameter-parameter faktor historis pada transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling menunjukkan hasil yang bervariasi. Untuk parameter waktu operasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai B, nilai C untuk parameter pembebanan, nilai C pada parameter inspeksi dan pemeliharaan, nilai A untuk parameter gangguan internal, nilai D pada parameter lokasi, dan nilai C untuk parameter merk. Hasil penilaian parameter pada faktor historis ditunjukkan pada Tabel 4.33.

Tabel 4. 33 Hasil penilaian parameter faktor historis

No.	Parameter	Bobot	Nilai Huruf	Nilai Akhir Parameter
1.	Waktu Operasi	4	B	12
2.	Pembebanan	3	C	6
3.	Inspeksi dan Pemeliharaan	4	C	8
4.	Gangguan Internal	4	A	16
5.	Lokasi	2	D	2
6.	Merk	1	C	2
Nilai Total		18		46

Sesuai standar penilaian yang telah ditentukan, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai total 46 untuk faktor historis. Selanjutnya perhitungan nilai akhir faktor historis sesuai dengan persamaan (3-4)

$$NH = \frac{NATotal}{BobotTotal}$$

$$NH = \frac{46}{18}$$

$$NH = 2,56$$

Sesuai hasil perhitungan, untuk faktor historis transformator 1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai akhir 2,56. Nilai ini digunakan untuk menghitung nilai akhir HI.

4.5.2. Nilai Akhir Faktor Kondisi

Faktor kedua yang dihitung untuk mendapatkan nilai akhir HI adalah faktor kondisi. Faktor kondisi terdiri dari 7 parameter yang menyangkut aspek teknis transformator. Setelah dilakukan pengujian dan perhitungan, diperoleh nilai masing-masing parameter pada faktor kondisi. Pada parameter tegangan tembus minyak, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai A, nilai A untuk pengujian kadar air, nilai B pada parameter *dissolved gas analysis*, nilai C untuk pengujian tan δ, serta nilai A untuk parameter pengujian resistansi isolasi, pengujian resistansi belitan, dan pengujian perbandingan belitan. Hasil penilaian parameter pada faktor kondisi ditunjukkan pada Tabel 4.34.

Tabel 4. 34 Hasil penilaian parameter faktor kondisi

No.	Parameter	Bobot	Nilai Huruf	Nilai Akhir Parameter
1.	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3	A	12
2.	Pengujian Kadar Air	3	A	12
3.	Dissolved Gas Analysis	3	B	9
4.	Pengujian Tan δ	3	C	6
5.	Pengujian Resistansi Isolasi	2	A	8
6.	Pengujian Resistansi Belitan	2	A	8
7.	Pengujian Perbandingan Belitan	2	A	8
Nilai Total		18		63

Sesuai standar penilaian yang telah ditentukan, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai akhir faktor kondisi sebesar 45. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai akhir faktor kondisi sesuai persamaan (3-5)



$$NK = \frac{N_{A\text{Total}}}{Bobot_{Total}}$$

$$NK = \frac{63}{18}$$

$$NK = 3,5$$

Sesuai hasil perhitungan, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai akhir faktor kondisi sebesar 3. Nilai ini digunakan untuk menghitung nilai akhir HI.

4.5.3. Perhitungan Nilai Health Index

Perhitungan nilai HI merupakan perhitungan yang terakhir. Nilai HI merupakan indikasi kondisi dan prediksi umur transformator selama beberapa tahun ke depan. Untuk menghitung nilai HI, terlebih dahulu dilakukan tabulasi penilaian tiap parameter untuk memudahkan perhitungan.

Berdasarkan perhitungan semua parameter pada faktor kondisi dan faktor historis, maka berdasarkan Tabel 2.2 hasil penilaian pada tiap parameter ditunjukkan pada Tabel 4.35

Tabel 4. 35 Hasil penilaian parameter faktor historis dan faktor kondisi

	Faktor	Bobot	Nilai
Historis	Waktu Operasi	4	12
	Pembebatan	3	6
	Inspeksi dan Pemeliharaan	4	8
	Gangguan Internal	4	16
	Lokasi	2	2
	Merk	1	2
	Bobot Total Historis	18	46
Kondisi	Pengujian Tegangan Tembus Minyak	3	12
	Pengujian Kadar Air	3	3
	Dissolved Gas Analysis	3	9
	Pengujian Tan δ	3	6
	Pengujian Resistansi Isolasi	2	8
	Pengujian Resistansi Belitan	2	8
	Pengujian Perbandingan Belitan	2	8
	Bobot Total Kondisi	18	63

Seperti ditunjukkan pada tabel 4.35, nilai total untuk faktor historis adalah nilai total faktor historis dibagi dengan bobot total historis, hasilnya sebesar 2,56, sedangkan untuk faktor kondisi nilainya adalah 3,5. Untuk menghitung nilai akhir HI, perhitungan mengacu pada persamaan (2-1). Perhitungan untuk nilai akhir HI transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling sebagai berikut



$$HI = (0,4 \times NH) + (0,6 \times NK)$$

$$HI = (0,4 \times 2,56) + (0,6 \times 3,5)$$

$$HI = 3,12$$

Sesuai dengan hasil perhitungan, maka dapat disimpulkan bahwa nilai *Health Index* transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling adalah 3,12. Hasil ini dijadikan acuan dalam menganalisis kondisi transformator dan memprediksi umur transformator selama beberapa tahun ke depan. Mengacu pada tabel 2.1, nilai *health index* 3,12 termasuk dalam kategori kondisi bagus, dengan perkiraan transformator dapat bekerja secara optimal hingga 11-15 tahun ke depan. Kondisi ini masih tergolong wajar, karena saat pengambilan data transformator masih beroperasi selama 4 tahun. Dari perhitungan semua parameter ada beberapa parameter yang dapat memengaruhi kondisi transformator secara signifikan, contohnya parameter pembebanan. Beban tertinggi yang diterima transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling terbilang cukup tinggi dan melebihi pembebanan ideal, sehingga dapat menghambat kinerja transformator beberapa tahun ke depan. Namun dengan nilai *health index* sebesar 3,12, transformator masih dapat bekerja dengan baik selama 11-15 tahun ke depan, dengan catatan jika tidak terjadi gangguan yang dapat memperburuk kondisi transformator.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilaksanakan pada penelitian ini, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Berdasarkan data faktor historis dan faktor kondisi, transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling memperoleh nilai akhir faktor historis sebesar 2,56 dan nilai akhir faktor kondisi sebesar 3,5. Dari nilai akhir kedua faktor tersebut diperoleh nilai akhir *health index* (HI) sebesar 3,12. Dari nilai HI tersebut dapat disimpulkan bahwa transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling dalam kondisi bagus.
2. Berdasarkan nilai HI yaitu sebesar 3,12 dapat diprediksi bahwa transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling dapat beroperasi dengan baik dalam kurun waktu 11-15 tahun ke depan, terhitung dari tahun 2013.
3. Perlu dilakukan tindakan preventif pada beberapa parameter. Untuk parameter pada faktor historis yang tidak memperoleh nilai maksimal adalah waktu operasi, pembebanan, inspeksi dan pemeliharaan, lokasi, dan merk. Dari lima parameter ini yang dapat dilakukan tindakan preventif yaitu pada parameter pembebanan dan inspeksi dan pemeliharaan. Untuk mengoptimalkan kinerja transformator selama beberapa tahun ke depan sebaiknya pemeliharaan dilakukan setidaknya satu kali selama kurang dari sama dengan 12 bulan. Untuk mengoptimalkan parameter *dissolved gas analysis* maka temperatur minyak perlu dipantau agar tidak terlalu panas dan tetap berada pada suhu normal. Sedangkan untuk mengoptimalkan parameter tan δ sebaiknya kualitas bahan isolasi perlu diperhatikan. Usia, kelembaban, dan kotoran yang mengendap merupakan hal-hal yang perlu diperhatikan pada bahan isolasi untuk mengeoptimalkan nilai tan δ .





5.2. Saran

1. Data pengujian perlu disertai perhitungan secara teoritis agar dapat diuji keakuratannya baik secara praktis maupun teoritis.
2. Ketersediaan data perlu ditingkatkan. Beberapa pengujian perlu dilakukan secara berkala, seperti pengujian resistansi belitan, pengujian perbandingan belitan, dan pengujian tan δ agar kondisi transformator dapat diidentifikasi secara akurat.
3. Perlu diadakan penelitian untuk transformator daya dengan data parameter berbeda, seperti waktu operasi, merk, lokasi, dan pembebanan untuk mengetahui dampak dari data tiap parameter secara variatif.



DAFTAR PUSTAKA

- Asfani,D.A.,Candra,A.M.,Hernanda,S.I.G.N. 2014. Diagnosis Transformator Daya Menggunakan Metode Indeks Kesehatan Transformator. *JURNAL TEKNIK POMITS Vol. 1, No. 1.*
- Chapman,J.S. 2005. *Electric Machinery Fundamentals 4th Edition*. New York: McGraw-Hill
- IEC 60076-1. 2000-04. *International Standard Power Transformers*. International Electrotechnical Commission. Geneva, Switzerland
- Iwanusiw, W. 2010. Insulation Power Testing of Power Transformers. *Eltel Industries, Bangalore, India.*
- Jahromi,A.N.,Piercy,R.,Cress,S.,Service,J.R.R.,Fan.W. 2009. An Approach to Power Transformer Asset Management Using Health Index. *IEEE Electrical Insulation Magazine. Vol. 25, No.2*
- Lachman,M.F. 2012. Understanding Power Transformer Factory Test Data. *Doble Engineering Company*
- Meng, Lee Wai & SEAH (PTE) LTD. 2002. The Measurement of Dissipation Factor for the Detection of the Deterioration of Electrical Insulation in Transformers, Motors, and Cables. *The Singapore Engineer.*
- PT. PLN (PERSERO). 2013. *Pemeliharaan 2 Tahun BAY TRF IBT-1 150/70 kV – 60 MVA*. Malang: .
- Shell Global. 2005. *Shell Diala Oil B Electrical insulating oil*. Shell Diala Oil B PDS v01.
- Taengko, Kittanut. 2013. Risk Assessment for Power Transformers in PEA Substations using Health Index. *IEEE*





UNIVERSITAS BRAWIJAYA





UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN



Lampiran 1. Data resistansi isolasi transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling

Lampiran 2. Data pengujian tegangan tembus minyak isolasi transformator IBT-1 garu induk Sengkaling

Lampiran 4. Data pengujian perbandingan belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling

TEST CERTIFICATE

P PAUWELS
ENERGY IS OUR BUSINESS
PT PAUWELS TRAFICO ASIA

Transformation Ratio										WI No.	WI-10-0401	
										Issue date	01 June 2008	
										Version	01	Revision no.
Serial No. : 3011070061					Contract /PO No. : 003.PJI/ 611/ RJTB/ 2008					Standard		
Customer : PT. PLN (Persero)					Type : ORF 60/275					IEC 60076 - 1		
60	MVA	150 / 70	kV	50	Hz	YNyn0(d1)	CONN.	3	PHASE			
										Instrument	Transformer Turn Ratio Meter	
										Brand	Tetfax	
										Type	2795	
										Serial No.	155561	
										Accuracy	0.1%	
										Due date	Feb. 2009	
TAPPING POS	PRIMARY (VOLTS)	SECONDARY (VOLTS)	THEORY	MEASURED				DEVIATION				
				U - N / u - n	V - N / v - n	W - N / w - n	%	%	%			
1	165750	70000	2.368	2.361	2.361	2.361	-0.29	-0.29	-0.29			
2	163500	70000	2.336	2.329	2.328	2.329	-0.29	-0.33	-0.29			
3	161250	70000	2.304	2.297	2.297	2.297	-0.29	-0.29	-0.29			
4	159000	70000	2.271	2.265	2.265	2.265	-0.28	-0.28	-0.28			
5	156750	70000	2.239	2.233	2.233	2.233	-0.28	-0.28	-0.28			
6	154500	70000	2.207	2.201	2.201	2.201	-0.28	-0.28	-0.28			
7	152250	70000	2.175	2.169	2.169	2.169	-0.28	-0.28	-0.28			
8	150000	70000	2.143	2.138	2.138	2.138	-0.23	-0.23	-0.23			
9	147750	70000	2.111	2.105	2.105	2.105	-0.27	-0.27	-0.27			
10	145500	70000	2.079	2.074	2.074	2.074	-0.22	-0.22	-0.22			
11	143250	70000	2.046	2.041	2.041	2.041	-0.27	-0.27	-0.27			
12	141000	70000	2.014	2.009	2.009	2.009	-0.26	-0.26	-0.26			
13	138750	70000	1.982	1.981	1.982	1.982	-0.04	-0.03	-0.02			
14	136500	70000	1.950	1.950	1.950	1.950	0.00	-0.01	0.01			
15	134250	70000	1.918	1.918	1.918	1.918	0.01	0.00	0.01			
16	132000	70000	1.886	1.886	1.886	1.886	0.02	0.01	0.03			
17	129750	70000	1.854	1.854	1.854	1.854	0.03	0.02	0.03			
18	127500	70000	1.821	1.822	1.822	1.822	0.04	0.03	0.04			
Remark : Phase Displacement [Vector Group] Conform to Specification												
Witnessed by,				PLN LITBANG				Date of test : 24 November 2008				
1. HARYO LUKITO				PLN P3B/JB RJTB				Tested by				
2. MARMUN				PLN P3B/JB RJTB								
3. SUBAGYO, PW				PLN P3B/JB RJTB								
4. TEGUH SUWARYO				PLN P3B/JB RJTB								
5. SUPARNO				PT. HASTA KARYA PERDANA								

Lampiran 5. Data pengujian resistansi belitan transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling**TEST CERTIFICATE**

PAUWELS
 ENERGY IS OUR BUSINESS
 PT PAUWELS TRAFO ASIA

Winding Resistance									WI No.	WI-10-0301	
Subline			Issue date	01 June 2004							
			Version	01	Revision no.	01					
Serial No. : 3011070081			Contract /PO No. : 003.PJI 611/ R.JTB/ 2008						Standard:		
Customer : PT. PLN (Persero)			Type	CRF 60/275						IEC 60076-1	
60	MVA	150/70	kV	50	Hz	YNyn0(d1)	CONN.	3	PHASE		
Instrument	Digital Multimeter			P. Supply	12 x 12 VDC , 65 Ah						
Brand	Yokogawa			Brand	ROCKET						
Type	7562			Type	ES 65 - 12 , Rechargeable battery						
Serial No.	27 WH 0074 , 27 WH 0075			V. Resistor	0 - 7.5 Ohm , 18.5 Amp						
Due date	May 2009			Brand	PERK - ROTHERDAM						
				Serial No.	C. 75337						
HV Side (150 kV)									01=	31.7 °C	
TAPPING POS	PHASE	U - V		PHASE	V - W		PHASE	W - U			
		U (mV)	I (A)		R (Ohm)	I (A)		R (Ohm)	U (mV)	I (A)	R (Ohm)
1	7.0524	5.8336	1.2089	6.7430	5.5729	1.2100	6.8780	5.6907	1.2086		
2	6.9381	5.8497	1.1861	6.6346	5.5879	1.1873	6.7723	5.7102	1.1860		
3	6.8233	5.8657	1.1632	6.5293	5.6064	1.1646	6.6638	5.7288	1.1632		
4	6.7101	5.8841	1.1404	6.4233	5.6267	1.1416	6.5539	5.7471	1.1404		
5	6.5926	5.8972	1.1179	6.3203	5.6474	1.1191	6.4482	5.7662	1.1183		
6	6.4814	5.9199	1.0948	6.2145	5.6689	1.0963	6.3379	5.7891	1.0948		
7	6.3738	5.9429	1.0725	6.1149	5.6911	1.0745	6.2290	5.8078	1.0726		
8	6.2628	5.9673	1.0495	6.0064	5.7156	1.0609	6.1152	5.8269	1.0495		
9	6.1414	5.9943	1.0245	5.8851	5.7463	1.0241	5.9850	5.8470	1.0236		
10	6.3622	5.9231	1.0741	6.1177	5.6899	1.0752	6.2137	5.7848	1.0741		
11	6.2518	5.9464	1.0514	6.0132	5.7138	1.0524	6.1088	5.8101	1.0514		
12	6.1428	5.9727	1.0285	5.9084	5.7363	1.0296	5.9979	5.8316	1.0285		
13	6.0311	5.9981	1.0055	5.8028	5.7644	1.0067	5.8868	5.8537	1.0057		
14	5.9207	6.0231	0.9830	5.7012	5.7930	0.9841	5.7720	5.8689	0.9835		
15	5.8056	6.0475	0.9600	5.5975	5.8246	0.9610	5.6560	5.8910	0.9601		
16	5.6917	6.0703	0.9376	5.5025	5.8584	0.9392	5.5465	5.9135	0.9379		
17	5.5756	6.0960	0.9146	5.3976	5.8051	0.9156	5.4310	5.9366	0.9148		
18	5.4480	6.1234	0.8897	5.2549	5.9455	0.8889	5.3008	5.9635	0.8889		
LV Side (70 kV)											
TAPPING POS	PHASE	U - V		PHASE	V - W		PHASE	W - U			
		U (mV)	I (A)		R (Ohm)	U (mV)		I (A)	R (Ohm)	U (mV)	I (A)
1346.6500	6.4918	0.2074	1405.9470	6.77350	0.2076	1411.5670	6.79210	0.2078			
Witnessed by,											
1. HARYO LUKITO	PLN LITBANG				Date of test : 24 November 2008						
2. MARMUN	PLN P3BJB RJTB				Tested by :						
3. SIJABAGO PW	PLN P3BJB RJTB										
4. TEGUH SUWARYO	PLN P3BJB RJTB										
5. SUPARNO	PT. HASTA KARYA PERDANA										



Lampiran 6. Data spesifikasi minyak transformator shell diala B

Properties	Unit	Method		Specification		Typical
		ASTM	Other	Min	Max	
API Gravity 15.56°C	-	D-4052		27.2		31.2
Density @ 20°C	kg/l	D-4062			0.892	0.866
Appearance (visual)	-	Visual		Clear & Bright		C&B
Pour Point	°C	D-97	ISO 3016		-30	-34
Flash PMCC	°C	D-93	ISO 2719	143		146
Kinematic Viscosity 20°C -15°C 40°C	cSt	D-445			40	21
	cSt	D-445			800	182
	cSt	D-445			16.5	9.102
Neutralisation Number	mg KOH/g	D-974	IEC 296		0.03	<0.01
Corrosive Sulphur (19 hrs)	-	D-1275	ISO 5662	non-corrosive		NC
Inhibitor Content	%wt	D-2666	IEC 666	none detected		ND
Dielectric Strength	KV	D-877		30		52
Electric Strength	KV		IEC 156	60		84
Power Factor 100°C		D-924	IEC 247		0.003	0.0016
Interfacial Tension 77°F	mN/m	D-971		40		45
Silver Corrosion	-		ASE 3163	non-corrosive		NC
Water (Karl Fisher)	%wt	D-1533	IEC 184		0.003	0.0016
PCB Content	ppm	D-4053		<1		<1



Lampiran 7. Data pengujian *dissolved gas analysis* transformator IBT-1 gardu induk Sengkaling



PT. PLN (PERSERO) P3B
REGION JAWA-TIMUR DAN BALI
UNIT PELAYANAN TRANSMISI MALANG

**HASIL ANALISA GAS TERLARUT DALAM MINYAK TRAFO DENGAN " GAS CHROMATOGRAF
SAMPAI THN : 2012**

NO.	GARDU INDUK	NO. MERK	DAVA RATIO (MVA / kV)	ABEL IEEE LIMITS (Kondisi Level)	Konsentrasi Gas Terdeteksi ppm (v/v)				Tanggal Peng 13				
					GAS								
					Kond. 1	Kond. 2	Kond. 3	Kond. 4					
1	SENGKALING (BARU)	1 POUWELL5	60	150/70									
				100	700	1800	> 1800	Hydrogen (H ₂)	62	90	20	20	
				120	400	1000	> 1000	Nitrogen (N ₂)	1.580.930	582.242	1.032.430	1.169.410	79
				350	570	1400	> 1400	Methane (CH ₄)	1	56	1	42	1
				2500	4.000	10.000	> 10.000	Carbon Monoxide (CO)	0	112	2.502	0	
				50	100	200	> 200	Carbon Dioxide (CO ₂)	900	623	2.585	519	3
				65	100	150	> 150	Ethylene (C ₂ H ₄)	0	3	24	0	
				35	50	80	> 80	Ethane (C ₂ H ₆)	43	93	9	77	1
				720	1.920	4.630	> 4.630	Acetylene (C ₂ H ₂)	0	0	0	0	
					Total Dissolved Combustible Gases (TDCG)	104	354			2.556	139	3	

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

