

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang Relevan

Banyak penelitian sejenis mengenai analisa kondisi transformator berdasarkan hasil perhitungan *Health Index*. Penelusuran dan melakukan review terkait relevansi dari penelitian sebelumnya terhadap penelitian yang akan dilakukan merupakan hal yang penting. Selain dapat digunakan sebagai referensi penelitian dan pembandingan, penelusuran dan review hasil penelitian sebelumnya juga dimaksudkan untuk memenuhi persyaratan etika penelitian ilmiah serta memperkuat hasil penelitian yang dilakukan. Penelitian yang relevan dalam penelitian ini sesuai dengan tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Penelitian yang Relevan

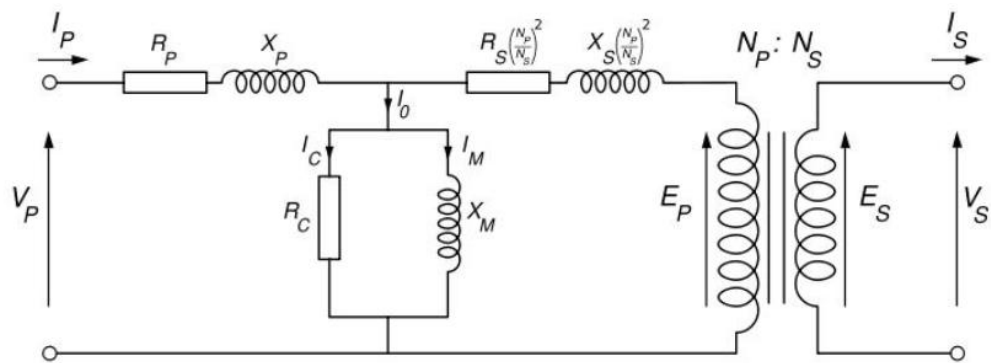
Data Penelitian yang Relevan	Metode	Hasil	Novelty
Judul: <i>Evaluation of in-service power transformer health condition for Inspection, Repair, and Replacement (IRR) maintenance planning in electric utilities</i> Tahun: 2021 Penulis: (Murugan & Raju, 2021)	- <i>Condition Index</i> dari 12 uji diagnostik dan <i>Importance Index</i> dari 5 faktor operasional (usia, riwayat beban, catatan pemeliharaan, riwayat gangguan, lokasi), dengan skema bobot & skor; - penggabungan CI dan II menjadi nilai <i>Health Index</i> ; - hasil HI digunakan untuk keputusan IRR. Studi kasus pada 21 transformator di utilitas Tamil Nadu.	HI mengelompokkan 21 unit transformator menjadi <i>poor/failed, fair, good</i> untuk memandukan keputusan IRR Contoh hasil klasifikasi: kelompok unit “ <i>good</i> ” memiliki HI sekitar 78–94% dan direkomendasikan dapat beroperasi normal sampai jadwal pemeliharaan berikutnya (dengan inspeksi). Kelompok “ <i>fair</i> ” memiliki HI sekitar 47,3–70% dan direkomendasikan <i>planned maintenance</i> untuk memperbaiki masalah yang terdeteksi pengujian kondisi.	Tidak hanya menghitung HI, tetapi menerapkan HI untuk menjadi sebuah keputusan IRR (<i>inspection/repair/replacement</i>) dengan prosedur yang rinci dan memasukkan kombinasi <i>condition</i> dan <i>importance</i> secara sistematis

Data Penelitian yang Relevan	Metode	Hasil	Novelty
Judul : <i>Assessment The Overall Health Condition of Transformer Using Health Index and Critical Index Approach: TNB Grid Case Study</i>	Mengintegrasikan metode <i>Health Index (HI)</i> dan <i>Criticality Index (CI)</i> untuk menilai “overall health” trafo dan memetakan tindakan pemeliharaan. HI dihitung dengan <i>scoring-weighting</i> dari parameter diagnostik; CI dihitung dari <i>probability of failure</i> dan <i>impact of failure</i> , lalu dikombinasikan dalam matriks keputusan strategi.	Diterapkan pada populasi besar 1256 trafo transmisi; hasil matriks menunjukkan 526 unit “good/normal” (operasi normal dan <i>routine maintenance</i>), 725 unit “moderate” (perlu frequent monitoring), dan 5 unit butuh urgent rectification; tidak ada yang masuk kondisi <i>fail</i> . CI mengidentifikasi 190 unit kritis dan 1066 non-kritis untuk membantu prioritas pekerjaan dan optimasi biaya O&M.	Bukan hanya menilai kondisi (HI), tapi menggabungkan kondisi dan tingkat kritikal risiko sehingga keputusan pemeliharaan menjadi “risk-based” untuk utilitas dengan jumlah trafo sangat banyak. Ini juga diimplemntasikan langsung ke strategi tindakan (<i>routine / scheduled rectification / urgent / replace-refurbish</i>).
Tahun : 2020			
Penulis : (Aman et al., 2020)			
Judul: <i>Condition Assessment of Power Transformers Based on Health Index Value</i>	Membandingkan 3 cara penilaian kondisi trafo pada 96 trafo: HI-1 (gabungan uji minyak fisikokimia, DGA, indikator penuaan selulosa, umur), Trafo Grade (multi-parameter termasuk inspeksi / OLTC/SFRA/vibration), dan HI-2 (algoritma baru berbasis <i>advanced oil diagnostics</i> dan faktor umur dengan bobot ulang).	HI-1 paling mendekati Trafo Grade; HI-2 terlalu “didominasi umur” (trafo tua cenderung diklasifikasi lebih buruk walau kondisi belum tentu).	Usulan HI-2 yang lebih sederhana (fokus data minyak/DGA dan penuaan selulosa), mengurangi bias umur, dan memakai penilaian berbasis <i>percentile</i> agar lebih stabil untuk trafo sangat muda/tua
Tahun: 2019			
Penulis: (Bohatyrewicz et al., 2019)			

2.2 Transformator Tenaga

Transformator merupakan peralatan listrik statis yang tersusun atas rangkaian magnetik dan dua atau lebih belitan. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk mengubah tingkat daya berupa arus dan tegangan pada sistem arus bolak-balik (AC) ke tingkat arus dan tegangan lain dengan frekuensi yang sama (IEC 60076-1, 2011). Prinsip kerja transformator mengacu pada hukum Ampere dan hukum

induksi Faraday, di mana perubahan arus listrik akan menimbulkan medan magnet, sedangkan perubahan fluks magnet akan menghasilkan tegangan induksi. Arus bolak-balik yang mengalir pada belitan primer akan menghasilkan fluks magnet yang mengalir melalui inti besi yang berada di antara belitan primer dan belitan sekunder. Fluks magnet tersebut kemudian menginduksi belitan sekunder sehingga pada ujung belitan sekunder timbul beda potensial atau tegangan induksi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian Elektrik Transformator

Sumber: <https://konversi.wordpress.com>

Dalam sistem tenaga listrik di Indonesia, transformator tenaga merupakan komponen utama yang berfungsi untuk mengatur level tegangan melalui proses *Step Up* dan *Step Down* tegangan. Transformator *Step Up* digunakan untuk meningkatkan tegangan *output* dari generator Pembangkit ke level tegangan transmisi guna mengurangi rugi-rugi daya selama penyaluran, sedangkan transformator *Step Down* berfungsi menyesuaikan tegangan ke level yang lebih rendah untuk unit distribusi dan pemanfaatan energi listrik pada masyarakat umum. Proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan hingga ke konsumen melibatkan beberapa tahapan transformasi tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem.

Transformator tenaga seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2 memiliki nilai ekonomi yang tinggi serta memegang peranan strategis dalam menjaga kontinuitas dan keandalan sistem penyaluran tenaga listrik. Oleh karena itu, transformator dituntut untuk memiliki kinerja yang stabil dan tingkat keandalan yang tinggi agar tidak menimbulkan gangguan pada sistem tenaga listrik. Secara umum, transformator tenaga dirancang untuk

beroperasi dalam jangka waktu panjang, yaitu sekitar 30 hingga 40 tahun atau bahkan lebih (Tamma et al., 2021). Untuk mendukung umur operasi tersebut, sistem isolasi transformator berperan penting dalam menjaga kondisi internal transformator dan mencegah terjadinya kegagalan listrik maupun termal yang dapat menurunkan tingkat kesehatan transformator.



Gambar 2.2 Transformator Tenaga

Sumber: Pauwels.com

2.2.1 Konstruksi Transformator Tenaga

Transformator tenaga tersusun atas beberapa komponen utama, antara lain inti besi, kumparan transformator, minyak transformator, bushing, tangki konservator, sistem pendinginan, dan tap changer. Seluruh komponen tersebut bekerja secara terpadu untuk menjamin kinerja dan keandalan transformator selama operasi (Sanjaya, 2025).

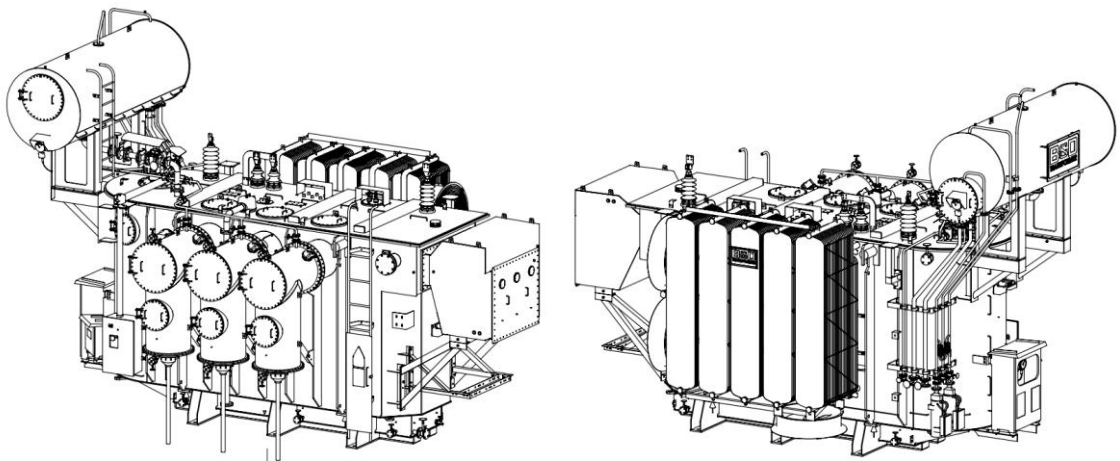
1. Inti besi berfungsi sebagai jalur fluks magnet yang dihasilkan oleh arus listrik pada kumparan. Inti ini dibuat dari lembaran baja silikon berisolasi untuk mengurangi rugi-rugi besi, khususnya akibat arus *eddy*, yang dapat meningkatkan temperatur transformator.

2. Kumparan transformator terdiri atas lilitan kawat berisolasi yang membentuk kumparan primer dan sekunder. Kumparan ini diisolasi terhadap inti besi dan antar kumparan menggunakan bahan isolasi padat, serta berperan sebagai elemen utama dalam proses transformasi tegangan dan arus listrik.
3. Minyak transformator berfungsi sebagai media isolasi dan pendingin. Minyak ini meningkatkan kekuatan dielektrik antar bagian bertegangan serta menyerap dan menyalurkan panas dari inti besi dan kumparan ke sistem pendinginan.
4. Bushing berfungsi sebagai penghubung konduktor bertegangan di dalam transformator dengan sistem jaringan di luar, sekaligus sebagai isolator terhadap badan tangki transformator yang terhubung ke tanah. Oleh karena itu, bushing harus memiliki kekuatan isolasi dan mekanik yang memadai.
5. Sistem pendinginan transformator berperan dalam mengendalikan kenaikan temperatur akibat rugi-rugi daya selama operasi. Pendinginan dilakukan melalui sirkulasi minyak dan pelepasan panas ke lingkungan menggunakan radiator, kipas, atau sistem pendinginan tambahan sesuai dengan kapasitas transformator.
6. Tangki konservator berfungsi sebagai penampung cadangan minyak transformator yang menyesuaikan perubahan volume minyak akibat kenaikan dan penurunan temperatur selama operasi. Keberadaan konservator membantu menjaga tekanan minyak di dalam tangki utama tetap stabil serta mencegah kontak langsung antara minyak transformator dengan udara luar, sehingga kualitas minyak dan sistem isolasi tetap terjaga.
7. *Tap changer* adalah peralatan pada transformator yang digunakan untuk mengatur rasio lilitan sehingga tegangan keluaran transformator dapat disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Pengaturan ini dilakukan dengan mengubah posisi tap pada kumparan transformator.

2.2.2 Transformator Tipe *Gas Insulated Switch Gear (GIS)*

Pada dasarnya, transformator tipe GIS memiliki fungsi yang sama seperti halnya fungsi transformator tenaga pada umumnya yaitu mengubah level tegangan yang akan disalurkan. Transformator yang diaplikasikan pada sistem GIS dirancang dengan konfigurasi khusus pada bagian terminal tegangan tingginya (HV) agar kompatibel

dengan peralatan lain pada GIS yang berisolasi gas SF6. Salah satu ciri utama desain transformator GIS adalah penggunaan bushing tipe *oil-to-oil*. Berbeda dengan bushing pada transformator AIS (*Air Insulated Switchgear*) yang bertransisi dari minyak ke udara, bushing *oil-to-oil* memastikan bahwa seluruh konduktor tegangan tinggi tetap berada dalam media isolasi tertutup, sehingga lebih tahan terhadap polusi, kelembapan, dan gangguan eksternal. Pada ujung sambungan antara transformator dan GIS, dipasang komponen *Sealing End Cable* yang berfungsi untuk menghubungkan transformator dengan peralatan yang ada pada GIS. Adapun gambar transformator tipe GIS ditampilkan pada gambar 2.3 berikut:



Gambar 2.3 Transformator Tenaga Tipe GIS

Sumber: PLN

Dengan konstruksi seluruh konduktor tegangan tinggi / sisi primer tertutup dalam sebuah tubular terendam minyak, maka dalam pemeliharaannya transformator tipe GIS mengalami keterbatasan untuk memperoleh data hasil uji dalam pemeliharaan rutin terutama untuk proses asesmen dan penilaian *Health Index*. Hal tersebut dikarenakan konstruksi transformator GIS untuk dapat dilakukan pengujian lengkap terutama untuk pengujian elektris, memerlukan proses lebih panjang dan waktu untuk pengerjaan yang lebih lama dari transformator tipe AIS, dimana pada transformator tipe GIS sebelum pengujian perlu dilakukan drain minyak dan pembongkaran tubular agar bushing sebagai penghubung sisi luar dengan internal transformator dapat difungsikan sebagai koneksi

untuk pengujian elektrik seperti pengujian tangen delta, RDC, Tahanan Isolasi, SFRA dan lainnya. Pada transformator GIS sistem isolasi sebagai parameter utama dianalisa kondisinya melalui pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA), pengujian kualitas dan karakteristik minyak isolasi, Pengujian kandungan furan (penuaan isolasi kertas), sedangkan pengujian elektrik dilakukan pada kondisi-kondisi tertentu seperti untuk kebutuhan asesmen lengkap untuk data *First Year Inspection* maupun asesmen pasca transformator mengalami gangguan.

2.3 Sistem Isolasi Transformator Tenaga

Sistem isolasi pada transformator tenaga umumnya memanfaatkan isolasi kertas yang terendam dalam minyak isolasi. Metode ini terbukti efektif dalam meningkatkan ketahanan dan keandalan transformator selama operasi. Penggunaan kertas isolasi khusus yang tahan terhadap temperatur tinggi, bersama dengan minyak isolasi yang melapisi kumparan transformator, memberikan perlindungan tambahan terhadap pengaruh tegangan listrik yang tinggi. Selain berfungsi sebagai media pendingin untuk menurunkan panas yang dihasilkan selama pengoperasian, minyak isolasi juga berperan dalam mencegah degradasi material isolasi akibat paparan udara dan kelembapan. Kombinasi sistem isolasi kertas dan minyak ini memungkinkan transformator beroperasi secara aman dan efisien dalam jangka waktu yang panjang dengan risiko kerusakan yang minimal (Prasojo et al., 2024).

Secara umum, sistem isolasi pada transformator tenaga memiliki tiga fungsi utama (Tawil, 2025) Pertama, sistem isolasi berperan memisahkan bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan untuk mencegah aliran arus listrik yang tidak diinginkan, sehingga menjamin keselamatan dan keandalan operasi transformator. Kedua, isolasi antar kumparan berfungsi mencegah terjadinya hubungan singkat antar lilitan yang berdekatan, yang dapat menimbulkan arus lebih dan menyebabkan kerusakan pada transformator. Ketiga, sistem isolasi berfungsi mencegah terjadinya hubungan singkat ke tanah dengan menghindari loncatan listrik (*flashover*) akibat tegangan yang melebihi kekuatan dielektrik isolasi, baik melalui udara maupun permukaan isolasi. Transformator memerlukan pemeliharaan berkala dan pengujian yang efektif guna menjaga keandalan dan umur operasi.

2.3.1 Isolasi Kertas Transformator Tenaga

Isolasi kertas merupakan salah satu komponen utama dalam sistem isolasi transformator tenaga yang biasanya digunakan bersama dengan minyak isolasi. Kertas isolasi pada transformator umumnya berbahan dasar selulosa, seperti *kraft paper* atau *pressboard*, yang memiliki struktur serat kuat, sifat dielektrik yang baik, serta kemampuan mekanik yang tinggi untuk menahan tegangan listrik dan tekanan mekanik dari kumparan transformator. Gambar 2.4 berikut merupakan pengaplikasian isolasi kertas pada internal transformator.



Gambar 2.4 Isolasi Kertas Pada Transformator Tenaga

Sumber: transformers-magazine.com

Selulosa dapat mengalami proses degradasi yang menghasilkan senyawa sederhana seperti glukosa dan fruktosa, sedangkan hemiselulosa dapat terurai menjadi xilosa, arabinosa, serta senyawa kimia lainnya. Senyawa glukosa dan fruktosa hasil degradasi selulosa yang bercampur dengan minyak transformator akan membentuk senyawa turunan yang dikenal sebagai furan. Sementara itu, xilosa dan arabinosa yang berasal dari hemiselulosa akan bereaksi dengan minyak dan menghasilkan senyawa furfural. Keberadaan senyawa furan dan furfural tersebut berperan dalam menurunkan kekuatan tembus listrik (*breakdown voltage*) sistem isolasi transformator, sehingga pengujian terhadap kandungan senyawa ini diperlukan untuk menilai kondisi isolasi transformator. Pada sistem isolasi kertas, senyawa selulosa berfungsi menahan tekanan elektron pada permukaan kertas. Minyak transformator akan meresap ke dalam pori-pori permukaan kertas melalui proses adhesi, yang menyebabkan terbentuknya ikatan selulosa

yang lebih panjang. Proses ini mengakibatkan rongga-rongga pada permukaan kertas terisi oleh struktur selulosa hasil pemanjangan ikatan, sehingga meningkatkan kemampuan isolasi kertas terhadap medan listrik (Prasojo et al., 2024).

2.3.2 Minyak Isolasi Transformator Tenaga

Pada transformator tenaga, minyak isolasi digunakan sebagai media yang berfungsi sebagai media isolasi dan media pendingin selama transformator tersebut beroperasi. Minyak transformator berfungsi untuk mengisolasi bagian-bagian konduktif agar tahan terhadap tegangan tinggi dan mencegah terjadinya lompatan muatan listrik (*arcing*), serta mengalirkan panas dari inti dan belitan ke radiator untuk didinginkan (Amali et al., 2022). Penggunaan minyak sebagai media isolasi telah menjadi hal umum pada transformator tenaga karena sifat dielektriknya yang tinggi, kemampuan pelumasan, kestabilan kimia, serta kemampuan daya serap panas yang baik. Berdasarkan sumber dan komposisinya, minyak isolasi pada transformator dapat dibedakan menjadi (Jayyid, 2024):

1. Minyak Mineral

Berasal dari penyulingan minyak bumi, banyak digunakan karena ketersediaannya dan biaya yang relatif rendah.

2. Minyak Ester Alami

Terbuat dari minyak nabati, memiliki biodegradabilitas tinggi dan titik nyala lebih tinggi, namun memiliki keterbatasan pada kestabilan oksidasi.

3. Minyak Ester Sintetik

Dihasilkan melalui proses kimia, memiliki stabilitas termal tinggi dan digunakan untuk aplikasi dengan kondisi ekstrim.

Minyak isolasi akan mengalami penurunan kualitas seiring berjalannya waktu akibat proses oksidasi: terbentuknya asam dan lumpur (*sludge*) yang mengganggu sirkulasi minyak, Penuaan Termal: paparan panas tinggi yang mempercepat kerusakan struktur kimia minyak dan Kontaminasi Air dan Partikel lain: mengurangi sifat dielektrik minyak. Degradasi minyak menghasilkan gas-gas seperti H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , CO , dan CO_2 yang dapat dianalisis untuk mengetahui jenis kerusakan.

2.3.3 Karakteristik Fisik Minyak Isolasi

Karakteristik fisik minyak isolasi, meliputi kejernihan, viskositas, massa jenis, titik nyala, dan titik tuang, secara langsung memengaruhi kinerja dan keandalan transformator. Oleh karena itu, pemantauan dan pengujian rutin terhadap parameter-parameter tersebut sangat diperlukan untuk memastikan sistem isolasi transformator tetap berfungsi secara optimal. Minyak isolasi yang digunakan pada transformator tenaga dengan kualitas baik memiliki beberapa karakteristik fisik utama yang perlu diperhatikan (Hardityo, 2008), yaitu sebagai berikut.

- a. Kejernihan minyak isolasi dapat dievaluasi berdasarkan warna visualnya. Minyak isolasi yang berkualitas baik memiliki tampilan jernih, bersih, serta bebas dari endapan atau kotoran. Selama transformator beroperasi, minyak isolasi berfungsi sebagai media yang melarutkan partikel atau suspensi hasil degradasi yang terbentuk di dalam transformator. Seiring dengan meningkatnya jumlah partikel terlarut tersebut, warna minyak isolasi cenderung menjadi lebih gelap, yang menandakan penurunan kualitas minyak seperti pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Warna pada Minyak Isolasi Transformator

Sumber: lumbanrajateddy.wordpress.com

- b. Viskositas menggambarkan tingkat kekentalan minyak isolasi dan merupakan parameter penting yang memengaruhi kinerjanya. Minyak isolasi dengan viskositas rendah memiliki kemampuan sirkulasi yang lebih baik sehingga proses

pendinginan inti dan belitan transformator dapat berlangsung secara optimal. Berdasarkan standar yang berlaku, minyak isolasi baru diharapkan memiliki nilai viskositas kurang dari 18 cSt. Pengujian viskositas umumnya dilakukan pada minyak baru untuk memastikan efektivitasnya dalam sistem pendinginan transformator.

- c. Massa jenis minyak isolasi didefinisikan sebagai perbandingan antara massa minyak pada suhu 15,56°C dengan massa air pada volume yang sama. Minyak isolasi transformator harus memiliki massa jenis yang lebih rendah dibandingkan air agar partikel-partikel kontaminan yang terdapat di dalam minyak dapat mengendap dengan cepat. Massa jenis yang rendah berperan dalam menjaga kebersihan minyak serta mendukung kinerja sistem isolasi transformator secara keseluruhan.
- d. Titik nyala merupakan temperatur minimum di mana uap minyak dapat menyala ketika terkena sumber api. Minyak isolasi baru disyaratkan memiliki titik nyala tidak kurang dari 135°C, sedangkan untuk minyak bekas nilai titik nyala tidak boleh kurang dari 130°C. Pengujian titik nyala dilakukan untuk menentukan tingkat keamanan dan stabilitas minyak selama pengoperasian. Minyak dengan titik nyala rendah mengindikasikan adanya kandungan senyawa volatil yang mudah terbakar, yang dapat menyebabkan peningkatan penguapan, berkurangnya volume minyak, serta peningkatan nilai viskositas.
- e. Titik tuang adalah suhu terendah di mana minyak isolasi masih mampu mengalir. Parameter ini digunakan untuk menilai kesesuaian minyak isolasi terhadap jenis peralatan dan kondisi lingkungan operasinya. Semakin rendah nilai titik tuang, semakin baik kualitas minyak isolasi, karena minyak tetap dapat digunakan pada lingkungan bersuhu rendah tanpa mengalami penurunan fungsi.

2.3.4 Karakteristik Elektrik Minyak Isolasi

Minyak isolasi transformator yang berkualitas baik harus memenuhi sejumlah karakteristik kelistrikan agar mampu menjalankan fungsinya secara optimal, antara lain:

- a. Tegangan tembus merupakan kemampuan minyak isolasi dalam menahan tegangan listrik hingga mencapai batas tertentu tanpa mengalami kegagalan atau kerusakan dielektrik. Nilai tegangan tembus yang rendah umumnya disebabkan oleh adanya kontaminasi, seperti kandungan air, kotoran, atau partikel-partikel asing lainnya. Keberadaan air dan partikel tersebut dapat menurunkan nilai tegangan tembus secara signifikan. Oleh karena itu, minyak isolasi yang berkualitas baik dituntut memiliki nilai tegangan tembus yang tinggi agar mampu menjamin keandalan sistem isolasi serta mendukung kinerja transformator secara optimal.
- b. Tahanan jenis menggambarkan tingkat resistansi listrik minyak isolasi terhadap aliran arus listrik. Nilai tahanan jenis yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi yang bersifat konduktif, seperti partikel logam atau senyawa lain yang dapat menghantarkan listrik. Semakin besar kandungan kontaminan konduktif di dalam minyak, maka nilai tahanan jenisnya akan semakin menurun. Minyak isolasi transformator yang berkualitas baik harus memiliki nilai tahanan jenis yang tinggi untuk memastikan kemampuan isolasi listrik yang maksimal.
- c. Faktor disipasi dielektrik merupakan parameter yang menunjukkan besarnya rugi daya pada minyak isolasi akibat adanya kebocoran arus listrik. Nilai faktor disipasi dielektrik yang tinggi mengindikasikan adanya kontaminasi atau produk degradasi (*deterioration products*) di dalam minyak. Faktor ini mencerminkan tingkat rugi dielektrik minyak isolasi, di mana peningkatan nilainya dapat disebabkan oleh kandungan air, hasil oksidasi, koloid bermuatan, logam alkali, maupun senyawa lainnya. Faktor disipasi dielektrik memiliki keterkaitan dengan nilai tahanan jenis, sehingga nilai faktor disipasi dielektrik yang tinggi umumnya menunjukkan nilai tahanan jenis minyak yang rendah.

Minyak isolasi transformator yang berkualitas harus memiliki nilai tegangan tembus dan tahanan jenis yang tinggi serta faktor disipasi dielektrik yang rendah. Ketiga parameter tersebut saling berkaitan dan menjadi indikator utama dalam menilai kemampuan minyak isolasi untuk berfungsi sebagai media isolasi yang andal dan efektif pada transformator tenaga.

2.3.5 Karakteristik Kimia Minyak Isolasi

Minyak isolasi transformator yang berkualitas baik memiliki karakteristik kimia tertentu yang berpengaruh langsung terhadap kinerja serta ketahanan operasionalnya. Karakteristik kimia minyak isolasi transformator meliputi beberapa parameter berikut:

- a. Kadar asam merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk menilai kualitas minyak isolasi. Seiring dengan bertambahnya umur pemakaian minyak, kandungan asam cenderung mengalami peningkatan. Perbedaan kondisi lingkungan dan durasi pengoperasian transformator juga dapat menyebabkan variasi kadar asam pada minyak isolasi. Selain itu, terjadinya tekanan termal atau pemanasan berlebih dapat mempercepat pembentukan senyawa asam. Peningkatan kadar asam ini berbanding lurus dengan usia pemakaian minyak transformator, sehingga diperlukan pemantauan secara berkala untuk mencegah terjadinya degradasi minyak yang berlebihan.
- b. Stabilitas oksidasi menunjukkan kemampuan minyak isolasi dalam menahan terjadinya reaksi oksidasi selama masa operasinya. Proses oksidasi pada minyak isolasi dapat menghasilkan senyawa asam serta zat padat atau pengotor yang berdampak negatif terhadap kinerja transformator. Senyawa asam berpotensi menyebabkan korosi pada bagian logam transformator, sedangkan zat padat atau pengotor dapat meningkatkan viskositas kinematik minyak, menghambat proses perpindahan panas, dan menurunkan efisiensi sistem pendinginan. Oleh karena itu, minyak isolasi yang baik harus memiliki stabilitas oksidasi yang tinggi serta kecenderungan pelarutan yang rendah guna meminimalkan pembentukan senyawa-senyawa yang merugikan.
- c. Kadar air dalam minyak isolasi memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kekuatan dielektrik minyak. Keberadaan air dalam bentuk partikel halus atau tetesan dapat menurunkan kemampuan isolasi minyak secara drastis, terutama apabila bercampur dengan kotoran atau serat. Kandungan air yang tinggi dapat menyebabkan penurunan nilai tegangan tembus dan tahanan jenis minyak isolasi. Selain itu, peningkatan suhu operasi transformator dapat mempercepat perpindahan uap air dari isolasi kertas ke dalam minyak, yang selanjutnya memperburuk kualitas minyak isolasi. Oleh karena itu, semakin rendah kadar air

dalam minyak isolasi, semakin baik kualitas isolasinya, sehingga nilai kadar air harus dijaga serendah mungkin untuk menjamin kinerja transformator yang optimal.

Karakteristik kimia minyak isolasi, yang meliputi kadar asam, stabilitas oksidasi, dan kadar air, sangat memengaruhi tingkat keandalan serta umur operasi transformator. Oleh sebab itu, pengujian dan pemantauan rutin terhadap parameter-parameter tersebut sangat diperlukan untuk menjaga kualitas minyak isolasi dan mencegah kerusakan yang dapat berdampak pada kinerja transformator secara keseluruhan.

2.4 Metode Perhitungan *Health Index*

Kesehatan transformator merupakan aspek krusial yang perlu dipantau secara berkelanjutan guna meminimalkan risiko kegagalan peralatan. Transformator pada umumnya dirancang untuk memiliki umur layanan yang panjang, namun degradasi material, kondisi operasi, serta faktor lingkungan dapat menyebabkan penurunan kinerja dan memicu kegagalan lebih dini dari yang diperkirakan. Oleh karena itu, diperlukan metode penilaian kondisi yang mampu menggambarkan tingkat kesehatan transformator secara menyeluruh. Metode perhitungan *health index* merupakan salah satu pendekatan komprehensif yang banyak digunakan untuk tujuan tersebut. Metode ini menyajikan cara yang praktis dengan mengintegrasikan hasil observasi operasional, data inspeksi, serta hasil pengujian lapangan dan laboratorium menjadi suatu nilai kuantitatif yang merepresentasikan kondisi keseluruhan transformator (Jahromi et al., 2009). Nilai *health index* memberikan manfaat signifikan bagi pengelolaan aset, khususnya dalam penentuan prioritas peralatan, penyusunan strategi manajemen aset, serta perencanaan kebutuhan investasi. Selain itu, *health index* dapat digunakan sebagai dasar dalam penetapan rencana pemeliharaan yang lebih tepat sasaran karena mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. Berbagai studi melaporkan bahwa penerapan metode *health index* mampu mendukung upaya pencegahan kerusakan transformator serta membantu menentukan waktu pemeliharaan berdasarkan tingkat kesehatannya (Tamma et al., 2021).

Tingkat ketelitian perhitungan *health index* sangat dipengaruhi oleh kelengkapan dan relevansi parameter yang digunakan. Idealnya, penilaian dilakukan menggunakan parameter yang komprehensif. Namun, pada kondisi tertentu perhitungan tetap dapat dilakukan meskipun data yang tersedia terbatas. Pemilihan parameter tersebut harus didasarkan pada kajian ilmiah yang memadai agar nilai *health index* yang dihasilkan tetap mencerminkan kondisi transformator secara representatif dengan biaya yang minimal dan proses yang efisien (Benhmed et al., 2018). Penilaian kondisi transformator umumnya dilakukan melalui kombinasi pengujian elektrik, inspeksi fisik, dan analisis minyak untuk memperoleh indikasi terjadinya degradasi dari berbagai sisi. Parameter yang sering digunakan mencakup pengukuran resistansi isolasi, inspeksi visual rutin pada tangki, radiator, kipas, bushing, serta komponen aksesoris lain, pemeriksaan anomali suhu dengan termovisi, analisis gas terlarut melalui DGA, pengujian kualitas minyak isolasi, pengukuran faktor disipasi ($\tan \delta$) dan kapasitansi, serta rangkaian pengujian pada peralatan utama seperti tap-changer, bushing, arus eksitasi dan *core-to-ground test*, *turns ratio test* dan resistansi belitan, hingga pengujian reaktansi bocor dan uji terkait lainnya. Di samping pengujian rutin tersebut, terdapat pula pengujian yang sifatnya tidak selalu dilakukan berkala namun penting untuk kondisi tertentu, seperti pengujian kandungan furan untuk menilai penuaan kertas isolasi, pengukuran partial discharge untuk mendeteksi aktivitas pelepasan listrik dini, frequency response analysis untuk indikasi pergeseran mekanis pada inti/belitan, serta peninjauan riwayat pembebanan dan pemeliharaan sebagai dasar analisis tren jangka panjang.

Penentuan nilai *health index* dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh parameter yang digunakan dalam penilaian. Selanjutnya, setiap parameter diberikan bobot sesuai tingkat pengaruhnya terhadap kesehatan transformator. Parameter yang memiliki kontribusi lebih besar terhadap degradasi atau risiko kegagalan transformator akan memperoleh bobot yang lebih tinggi dibandingkan parameter lainnya. Sehubungan dengan peran dominan sistem isolasi terhadap kinerja dan keandalan transformator, perhitungan *health index* setidaknya perlu memasukkan parameter-parameter yang berkaitan dengan kondisi media isolasi.