

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transformator daya merupakan peralatan penting dan mahal dalam sistem kelistrikan. Peralatan ini diharapkan dapat dioperasikan selama bertahun-tahun dengan tetap menjaga keandalan dan kinerjanya untuk menyediakan sistem kelistrikan yang andal. Umumnya, transformator daya memiliki harapan hidup 40 tahun atau lebih. Namun, terkadang kegagalan transformator daya dapat terjadi lebih cepat dari yang seharusnya karena degradasi akibat kombinasi tekanan termal, listrik, kimia, mekanik, dan lingkungan. Saat transformator daya beroperasi, ia mengalami hal-hal yang mempercepat penuaan, seperti kadar air, suhu, dan oksidasi [1][2]. Oleh karena itu, penilaian transformator daya harus dilakukan untuk mengantisipasi kegagalan trafo secara tiba-tiba.

Kegagalan pada transformator daya bisa saja berasal dari dalam maupun luar transformator daya itu sendiri, dengan kegagalan internal yang sering kali muncul berupa *short circuit*, *winding displacement*, *winding looseness*, *partial discharge*, *through faults current (TFC)*, *arcing*, *overloading*, dan *overheating* [3]. Kegagalan-kegagalan tersebut dapat disebabkan oleh degradasi bahan isolasi, tekanan mekanis akibat arus gangguan, atau panas berlebih yang dihasilkan selama operasi. Selain itu, faktor eksternal seperti tegangan lebih, gangguan lingkungan, atau pemeliharaan yang kurang optimal juga dapat memperburuk kondisi transformator daya dan memicu kerusakan lebih lanjut.

Kondisi transformator daya ditentukan oleh kesehatan sistem isolasinya karena sistem isolasi transformator daya sangat penting dalam kinerja transformator daya [4]. Kegagalan isolasi transformator daya dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya adalah *fault factor*, *oil quality factor* dan *paper condition factor*. Ketiga faktor tersebut memiliki pengaruh besar pada sistem isolasi transformator daya.

Salah satu Metode yang digunakan untuk mengetahui kondisi kesehatan transformator daya yaitu *Health Index*. Metode *Health Index* merupakan metode yang dapat menggabungkan data hasil pengujian laboratorium, inspeksi lapangan, dan pengamatan operasi [5]. Metode ini melakukan penilaian dengan pendekatan

ilmiah secara objektif dan kumulatif [6],[7]. *Health index* berguna untuk mendeteksi dan mengukur degradasi jangka panjang pada transformator daya yang dapat menyebabkan kegagalan operasi pada transformator daya.

Penelitian tentang metode *Health Index* telah dilakukan oleh berbagai peneliti sebelumnya [8], [9], [10], [11]. Namun, laju kadar gas jarang digunakan sebagai parameter dalam analisis *health index* transformator daya. Penelitian yang dilakukan sebelumnya [8] masih menjadi rujukan utama dan paling banyak dikutip oleh peneliti lain dalam pengembangan metode *Health Index* yang baru. Metode tersebut kemudian dikembangkan dan dimodifikasi lebih lanjut untuk memberikan perhitungan yang lebih akurat dan relevan dengan berbagai populasi transformator daya. Selanjutnya, penelitian ini [9] mengadaptasi dan mengembangkan metode *health index* dari penelitian sebelumnya untuk diaplikasikan pada populasi transformator daya di Indonesia, dengan mempertimbangkan karakteristik operasional dan lingkungan lokal yang spesifik. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi metode *Health Index* sangat penting untuk memastikan relevansinya dalam berbagai kondisi transformator daya di seluruh dunia.

Berdasarkan data historis yang diperoleh, beberapa transformator daya yang menjadi objek studi kasus di PT PLN ULTG Bandung Timur memiliki usia operasional mendekati atau bahkan melebihi 30 tahun. Transformator daya seringkali diperkirakan memiliki umur teknis sekitar 25 hingga 40 tahun, sesuai dengan standar IEC 60076-7 yang menetapkan bahwa umur transformator sangat dipengaruhi oleh kondisi isolasi kertas dan minyak. Setelah melewati umur tersebut, risiko kegagalan operasional akibat degradasi isolasi meningkat secara signifikan [12]. Degradasi ini dapat memengaruhi kinerja dan keandalan transformator daya dalam mendukung sistem kelistrikan. Oleh karena itu, evaluasi kondisi kesehatan transformator daya menjadi langkah penting untuk mengidentifikasi tingkat degradasi isolasi, mencegah potensi kegagalan, serta memastikan keberlanjutan operasional yang aman dan efisien.

Oleh karena itu, pengujian pada transformator daya berdasarkan analisis gas terlarut menjadi sangatlah penting. Penelitian ini mengamati Analisis Gas Terlarut (DGA), kondisi minyak, dan nilai Furan sebagai faktor *Health Index*. Oleh karena itu, laju kadar gas terlarut dimasukkan ke dalam analisis perhitungan indeks

kesehatan. Gas terlarut tersebut juga dianalisis menggunakan Metode *Duval Pentagon* [13],[14] , metode ini mendukung analisis mendalam untuk penilaian kondisi transformator. Hasilnya akan dipertimbangkan dalam menentukan skor indeks kesehatan transformator. Selain itu, parameter CO dan CO₂ yang umumnya ditempatkan dalam penentuan *fault factor* dipindahkan ke analisis *paper condition factor*. Tindakan ini dilakukan karena CO dan CO₂ diketahui terjadi akibat penuaan termal isolasi kertas yang terendam minyak [15]. Pendekatan yang diusulkan juga menggunakan standar terbaru IEEE C57.104-2019 untuk analisis DGA dan IEC 60.422-2024 untuk analisis minyak [16], [17].

1.2. Kajian Riset Terdahulu

Kajian riset terdahulu dilakukan untuk menegaskan keaslian penelitian, mencegah plagiarisme, memunculkan ide-ide baru, dan membandingkan dengan penelitian sebelumnya. Tabel 1.1 menyajikan referensi jurnal penelitian sebelumnya.

Tabel 1. 1 Kajian riset terdahulu.

NO	JUDUL	NAMA PENELITI	TAHUN
1	Penerapan Metode <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP) dalam Menentukan Bobot Faktor pada Transformers <i>Health Index</i> .	Dimas K. Hidayana,dkk	2024
2	Evaluasi Metode <i>Health Index</i> Untuk Menentukan Prioritas Pemeliharaan Gardu Distribusi.	Galuh Prawestri Citra Handani,dkk	2024
3	Analisis Prediksi Dan Kondisi Umur Transformator pada BAT GT 2.1 PLTGU Priok Menggunakan Metode <i>Health Index</i> .	Ahmad Rosyiddin,dkk	2023

NO	JUDUL	NAMA PENELITI	TAHUN
4	<i>Reliable Estimation for Health Index of Transformer Oil Based on Novel Combined Predictive Maintenance Techniques.</i>	Mohamed Badawi,dkk	2022
5	<i>Health index for power transformer condition assessment based on operation history and test data.</i>	Hong Guo,dkk	2022
6	<i>High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate</i>	Winanda Riga Tamma,dkk	2021

Penelitian [18] oleh Dimas K. Hidayan, dkk membahas penggunaan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan bobot dari health index transformator. Metode ini melibatkan penyusunan hierarki dan penilaian melalui perbandingan berpasangan yang dilakukan oleh teknisi dan insinyur berpengalaman. Fokus penelitian ini terletak pada empat parameter utama, yaitu kondisi oli, kegagalan, kondisi winding, dan kondisi kertas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor kondisi kertas mendapatkan bobot tertinggi sebesar 0,368, diikuti oleh kondisi isolasi winding sebesar 0,348. Hal ini menegaskan pentingnya kedua faktor tersebut dalam penilaian kesehatan transformator. Selain itu, penelitian ini juga mengukur konsistensi jawaban responden untuk memastikan validitas hasil, dengan hanya beberapa responden yang memenuhi kriteria konsistensi yang ditetapkan. Dengan demikian, metode AHP terbukti efektif dalam menguraikan masalah kompleks dan memberikan prioritas yang jelas dalam penilaian kesehatan transformator.

Selanjutnya, penelitian oleh Galuh Prawestri Citra Handan [19], dkk membahas metode penilaian kondisi gardu distribusi menggunakan metode scoring matrix untuk menentukan *Health Index*. Proses ini melibatkan pengumpulan data, pemberian skor, penentuan bobot, dan agregasi untuk menghasilkan nilai yang

mencerminkan kondisi gardu distribusi secara komprehensif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis scoring matrix dapat meningkatkan efisiensi manajemen aset dalam distribusi listrik di Indonesia. Selain itu, penelitian ini menekankan pentingnya penentuan bobot yang akurat dan validasi hasil untuk memastikan implementasi yang lebih luas dalam sistem manajemen aset. Kedepannya, diperlukan evaluasi hasil dan pengembangan lebih lanjut guna meningkatkan efektivitas pemeliharaan gardu distribusi.

Sementara itu, penelitian [4] oleh Ahmad Rosyiddin, dkk membahas analisis kondisi dan prediksi umur transformator BAT GT 2.1 di PLTGU Priok menggunakan metode *Health Index*. Metode ini mengintegrasikan data dari hasil pengujian laboratorium, inspeksi lapangan, dan pengamatan operasi untuk memberikan penilaian kesehatan transformator yang objektif dan kumulatif. Parameter yang dianalisis meliputi analisis gas terlarut (DGA), kualitas minyak, furan, dan kondisi tap changer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa transformator berada dalam kondisi baik dengan nilai *Health Index* sebesar 82%, yang mengindikasikan bahwa transformator masih dapat beroperasi secara optimal dan memiliki potensi umur yang panjang. Namun demikian, penelitian juga menemukan dua gas, yaitu hidrogen (H_2) dan karbon dioksida (CO_2), yang terdeteksi melebihi standar. Hal ini mengindikasikan adanya potensi gangguan berupa partial discharge. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan tindakan preventif seperti purifikasi minyak transformator dan pemantauan berkelanjutan untuk menjaga kinerja transformator dan mencegah kerusakan lebih lanjut.

Lebih lanjut, penelitian oleh Hung Guo [20], dkk mengusulkan pengembangan *Health Index* (HI) untuk penilaian kondisi transformator, dengan fokus pada transformator isolasi minyak-kertas. Metode yang digunakan mencakup penggabungan data operasional, hasil pengujian, dan faktor-faktor lingkungan untuk mengevaluasi kondisi transformator secara menyeluruh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai *Degree of Polymerization* (DP) dari kertas isolasi menurun seiring waktu, yang berdampak pada kekuatan mekanis dan kemampuan anti-korsleting transformator. Model HI yang diusulkan dalam penelitian ini memberikan penilaian yang lebih akurat mengenai kondisi transformator, serta membantu dalam pengambilan keputusan untuk pemeliharaan dan manajemen aset

transformator secara lebih efektif.

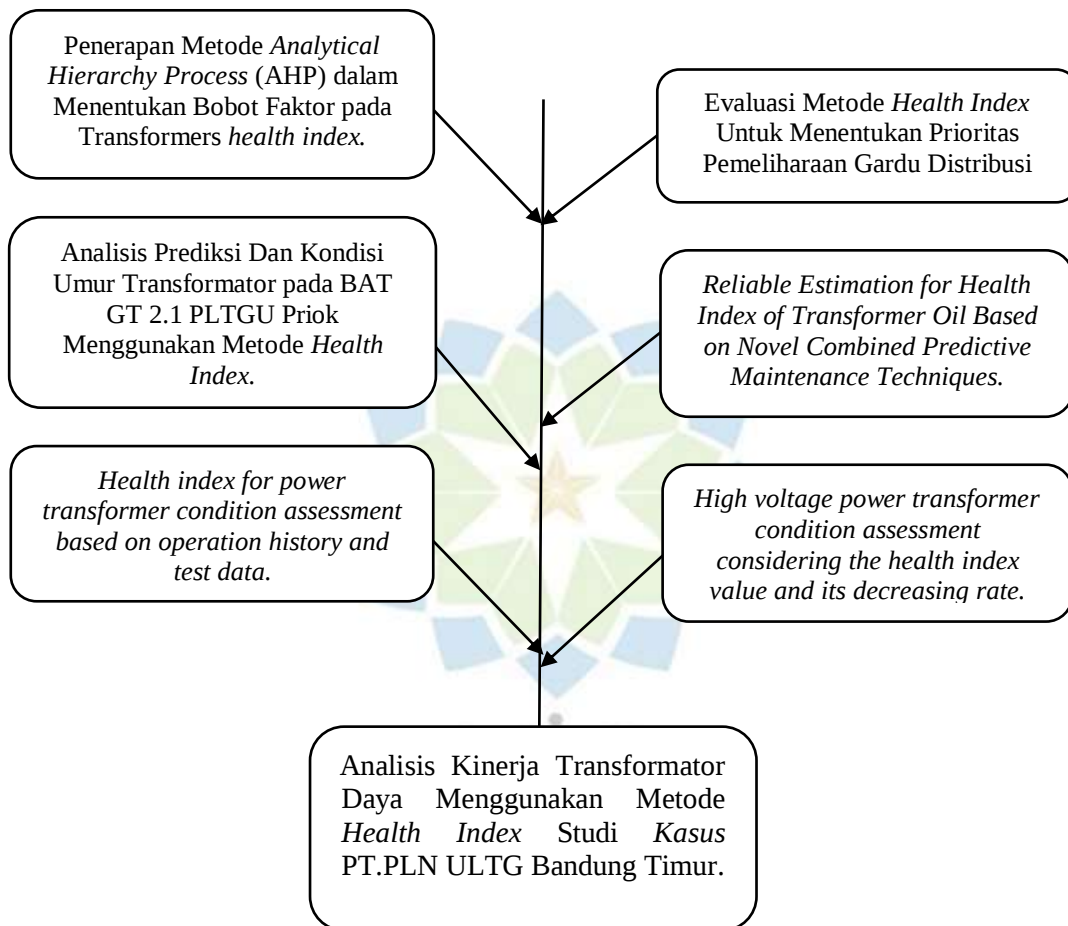
Penelitian oleh Mohamed Badawi [21], dkk membahas estimasi yang dapat diandalkan untuk indeks kesehatan minyak transformator dengan menggunakan teknik pemeliharaan prediktif yang inovatif. Metode yang digunakan meliputi analisis gas terlarut (DGA) dan pengujian sifat fisik minyak, seperti uji tegangan putus, pengukuran keasaman, dan kelembapan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik yang diusulkan memiliki akurasi lebih dari 91,5% dalam mengidentifikasi berbagai jenis kerusakan pada transformator, termasuk gangguan listrik dan thermal. Penelitian ini menyoroti pentingnya pemantauan kondisi isolasi minyak untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga dan mengurangi risiko kegagalan transformator.

Penelitian terakhir, penelitian oleh Winanda Riga Tamma [22], dkk membahas metode indeks kesehatan untuk penilaian kondisi transformator, dengan fokus pada nilai indeks kesehatan dan laju penurunannya. Metode yang digunakan melibatkan analisis data inspeksi dari 143 transformator yang sedang beroperasi dan 35 yang tidak beroperasi, termasuk pengukuran gas terlarut dan karakteristik dielektrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai indeks kesehatan cenderung menurun seiring bertambahnya usia transformator, dengan koefisien korelasi R^2 sebesar 0,631, yang mengindikasikan bahwa transformator yang lebih tua memiliki laju penurunan indeks kesehatan yang lebih tinggi, sehingga dapat membantu dalam strategi pemeliharaan untuk mencegah kegagalan mendadak.

Setelah melakukan studi literatur dari berbagai macam penelitian terdahulu yang sesuai dengan topik penelitian yang akan diangkat, maka penelitian ini melakukan analisis kondisi tranfomator menggunakan metode *Health Index* untuk penilaian kondisi transformator, yang mempertimbangkan nilai dan laju penurunan *Health Index*. Data pengujian dari transformator 150 kV yang beroperasi, dengan analisis faktor-faktor seperti gas terlarut, kondisi minyak, dan usia operasional. Selain itu penelitian ini mengintegrasikan analisis *Duval Pentagon* untuk menentukan jenis kerusakan berdasarkan gas terlarut, serta memperbarui batasan nilai gas untuk meningkatkan sensitivitas analisis.

Penelitian ini merujuk pada enam (6) referensi yang relevan dengan topik yang diteliti. Beberapa topik yang berkaitan ini diantaranya adalah mengetahui

kondisi transformator dan gardu distribusi untuk mendukung manajemen aset yang efisien dan keandalan sistem tenaga menggunakan metode analitis dan prediktif seperti AHP, scoring matrix, dan *Health Index*. Hubungan antar penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 1.1



Gambar 1. 1 Hubungan penelitian.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang diajukan, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana kinerja transformator menggunakan metode health index yang melibatkan laju kadar gas (*Decreasing Rate*) berdasarkan parameter *oil quality factor*, *faults factor*, dan *paper condition factor*?

1.4. Tujuan dan Manfaat

1.4.1. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis kinerja transformator daya menggunakan metode *Health Index* yang melibatkan laju kadar gas (*Decreasing Rate*) berdasarkan parameter *oil quality factor*, *faults factor*, dan *paper condition factor*.

1.4.2. Manfaat

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat dirasakan oleh bidang akademis dan bidang praktis, baik dalam aspek akademik maupun aplikatif.

1. Manfaat penelitian ini di bidang akademis adalah memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode *Health Index* dengan mempertimbangkan laju kadar gas terlarut (*Decreasing Rate*) dan analisis parameter CO serta CO₂ pada kondisi kertas.
2. Manfaat praktis yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah membantu meningkatkan keandalan transformator daya melalui evaluasi kesehatan yang lebih akurat untuk mendukung keputusan pemeliharaan preventif.

1.5. Batasan Masalah

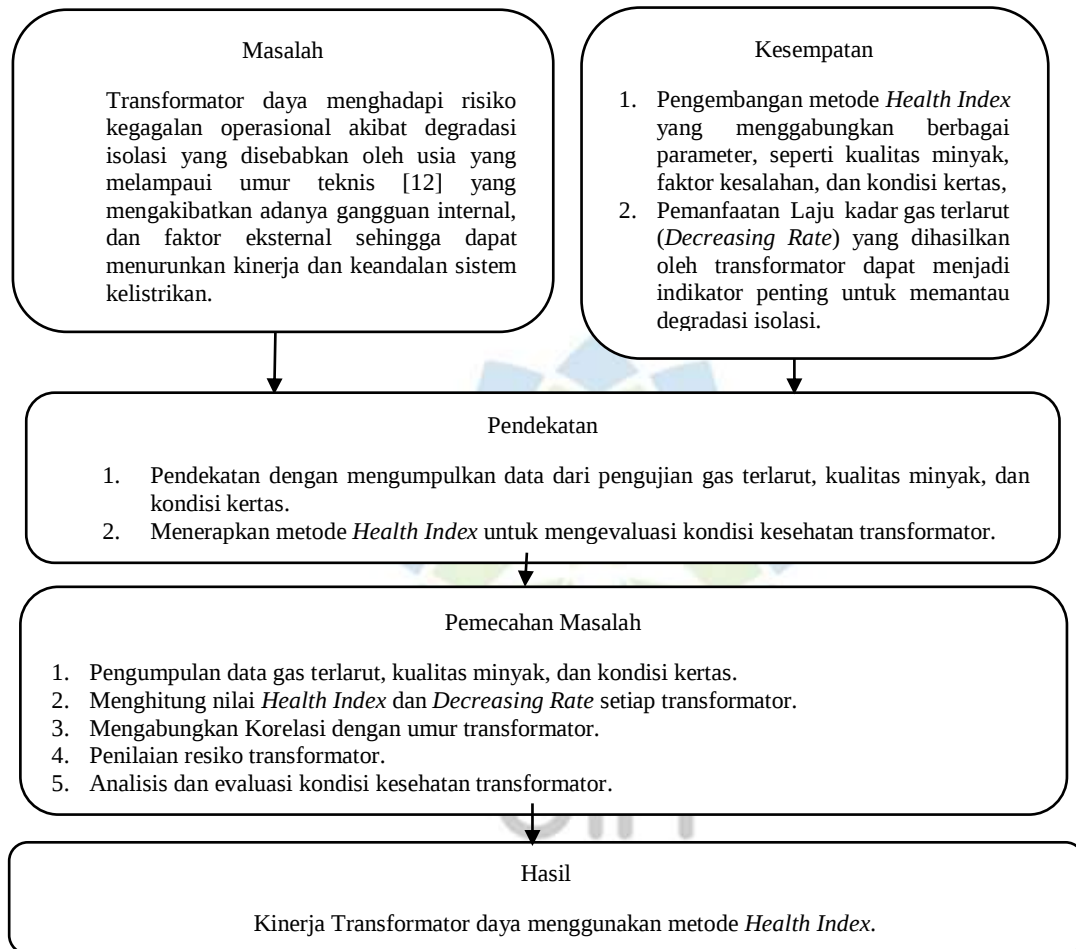
Masalah penelitian ini sangat luas, sehingga perlu dibatasi agar hasil penelitiannya lebih spesifik. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Parameter health index yang digunakan yaitu *oil quality factor*, *faults factor*, dan *paper condition factor*.
2. Metode DGA konvensional yang digunakan adalah *duval pentagon method*, metode *Total Dissolved Combustible Gas* (TDCG) dan metode *Rogers Ratio*.
3. Tidak membahas pemeliharaan transformator daya.
4. Tidak membahas proteksi transformator daya.

1.6. Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir memuat jalan pemikiran yang berisi penjabaran

sistematis mengenai informasi dari masalah penelitian yang diperkirakan mampu diselesaikan melalui pendekatan maupun analisisnya. Kerangka berpikir pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 1.1.



Gambar 1. 2 Kerangka berpikir.

1.7. Sistematika Penulisan

Tugas akhir ini disusun dengan enam bab yang masing-masing memiliki penguraian spesifik. Setiap bab dalam tugas akhir ini dijelaskan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini meliputi latar belakang, kajian riset terdahulu, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, kerangka berpikir, dan sistematika penulisan.

BAB II TEORI DASAR

Bab ini berisi tinjauan pustaka atau penjelasan tentang seluruh aspek yang terkait dengan penelitian, yaitu teori tentang transformator daya, sistem pendinginan pada transformator daya, *Disssolved Gas Analysis* (DGA), metode-metode pada *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dan teori mengenai *Health Index*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi diagram alir serta tahapan-tahapan untuk pemecahan masalah yang terdapat pada penelitian dengan sistematis agar hasil yang didapatkan bisa sesuai dengan harapan.

BAB IV PERHITUNGAN HEALTH INDEX

Bab ini berisi tentang perhitungan *Health Index* (HI) menggunakan metode konvensional dan metode baru untuk setiap parameter HI yaitu *oil quality factor*, *faults factor*, dan *paper condition factor*.

BAB V HASIL DAN ANALISIS

Bab ini merupakan bab hasil dan analisis yang dirangkum untuk memberikan gambaran menyeluruh tentang kondisi transformator. Analisis ini mencakup identifikasi kebutuhan pemeliharaan, tindakan perbaikan, atau bahkan pergantian transformator yang sudah tidak layak digunakan.

BAB VI PENUTUP

Bab penutup ini berisi kesimpulan dari penelitian dan beberapa saran dari penelitian yang diajukan untuk penelitian selanjutnya

