

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transformator daya merupakan elemen vital dalam sistem tenaga listrik, bertugas memastikan pengalihan daya yang efisien dari pembangkit listrik ke konsumen. Keandalan operasionalnya tidak hanya berdampak pada kestabilan jaringan listrik, tetapi juga pada efisiensi ekonomi secara keseluruhan. Namun, transformator daya terus menghadapi tekanan listrik, termal, dan mekanis selama masa operasionalnya, yang secara bertahap menyebabkan degradasi pada sistem isolasi [1].

Sistem isolasi, yang terdiri dari kertas dan minyak, memainkan peran penting dalam menjaga performa transformator daya. Proses penuaan isolasi kertas yang bersifat *irreversible* [2] sering kali menjadi indikator utama penurunan masa pakai transformator [3]. Meskipun isolasi kertas sulit untuk diinspeksi secara langsung, minyak transformator memberikan alternatif yang andal untuk memantau kondisi isolasi melalui parameter seperti kadar Furan, gas terlarut, kadar air, tegangan tembus, dan tingkat keasaman [4]. Minyak isolasi ini berfungsi sebagai isolator untuk mencegah terjadinya arus pendek antara komponen listrik dan sebagai pendingin untuk mengurangi panas yang dihasilkan selama transformator beroperasi.

Selama masa pakai, isolasi listrik transformator mengalami beberapa jenis tekanan (listrik, mekanis, termal, dan lingkungan), beberapa di antaranya saling terkait, yang terjadi di berbagai bagian struktur yang menurunkan performa isolasi. Seiring bertambahnya usia transformator daya, isolasi internalnya menurun dan meningkatkan risiko kegagalan. Degradasi/penuaan isolasi diakui sebagai salah satu penyebab utama kerusakan transformator. Bagian paling rentan dari sistem isolasi adalah kerentanan terhadap kadar air, oksigen, panas yang berlebihan, dan tekanan mekanis.

Analisis isolasi transformator sangat penting untuk menilai kondisi transformator saat baru dipakai dan setelah beberapa tahun digunakan. Evaluasi isolasi transformator daya mencakup teknik diagnostik berbasis listrik dan fisika-kimia [5]. Teknik diagnostik berbasis listrik digunakan untuk menilai kondisi

isolasi pada transformator yang sudah tua, sedangkan teknik diagnostik berbasis fisika-kimia menjadi perhatian layanan yang sedang digunakan. Pada penelitian ini, metode fisika-kimia digunakan untuk pemantauan kondisi dan untuk mengetahui kondisi degradasi isolasi pada transformator daya.

Salah satu metode yang digunakan untuk menilai kondisi isolasi yaitu dengan menghitung indeks isolasi berdasarkan data historis minyak transformator. Indeks ini memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat degradasi isolasi transformator. Dengan melakukan estimasi indeks isolasi, gangguan pada sistem dapat dicegah melalui perawatan yang lebih terencana dan prediktif.

Pada penelitian ini, transformator di PT. PLN (PERSERO) UPT Bandung sebagai salah satu unit yang mengelola infrastruktur kelistrikan, memerlukan analisis data yang dapat secara efektif mendeteksi dan memprediksi degradasi yang terjadi pada transformator daya, agar dapat mengoptimalkan kinerja dan memperpanjang umur operasionalnya. Analisis ini diperlukan untuk transformator yang mengalami degradasi isolasi akibat tekanan termal dan mekanis selama operasi jangka panjang. Kondisi degradasi pada isolasi tidak selalu terdeteksi dini karena kurangnya pemantauan berbasis data historis [5].

Selain itu, untuk mengetahui kondisi sistem isolasi transformator secara menyeluruh, dalam penelitian ini digunakan pendekatan perhitungan Indeks Kondisi Isolasi (ICI). ICI merupakan metode evaluasi yang menggabungkan beberapa parameter kualitas minyak isolasi, seperti kadar Furan, kadar air, tegangan tembus, kadar asam, *Interfacial Tension*, serta hasil analisis gas terlarut (DGA). Masing-masing parameter memiliki skor dan bobot tersendiri berdasarkan mekanisme degradasi tertentu seperti pirolisis, hidrolisis, kontaminasi, dan *discharge*. Melalui pendekatan ini, ICI mampu memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat kesehatan sistem isolasi transformator.

Sebagai bentuk validasi terhadap hasil perhitungan ICI, digunakan pula metode *Duval Triangle*, yaitu metode berbasis grafik segitiga yang digunakan untuk menginterpretasi hasil analisis gas terlarut dalam minyak isolasi. Dengan memetakan komposisi gas hidrokarbon tertentu ( $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ), *Duval Triangle* membantu mengidentifikasi jenis gangguan seperti *overheating*, arcing, atau

*discharges* lainnya yang mungkin terjadi di dalam trafo. Penggunaan *Duval Triangle* dalam penelitian ini bukan untuk menghitung nilai ICI, melainkan sebagai alat pendukung dalam mengkonfirmasi kondisi degradasi termal yang terjadi pada minyak trafo.

Secara umum, langkah-langkah dalam penelitian ini dimulai dari pengumpulan data historis pengujian kualitas minyak pada beberapa transformator di PT PLN (Persero) UPT Bandung, kemudian dilakukan klasifikasi dan pemberian skor berdasarkan parameter masing-masing. Setelah itu, dilakukan perhitungan ICI berdasarkan bobot tiap parameter. Terakhir, hasil komposisi gas DGA dianalisis menggunakan *Duval Triangle* untuk memperkuat interpretasi terhadap kondisi isolasi trafo. Dengan pendekatan ini, diharapkan hasil analisis lebih akurat dan dapat menjadi referensi penting dalam pengambilan keputusan pemeliharaan transformator.

Penelitian ini berfokus pada analisis degradasi transformator daya menggunakan data historis minyak transformator untuk memperkirakan indeks isolasi di PT PLN (PERSERO) UPT Bandung. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan solusi praktis dalam meningkatkan keandalan dan efisiensi pengelolaan aset transformator daya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan bagi pengelola sistem tenaga listrik dalam meningkatkan strategi pemeliharaan berbasis data serta memperpanjang umur operasional transformator daya.

## **1.2 Kajian Penelitian**

Dalam memeriksa penelitian sebelumnya untuk memvalidasi validitas penelitian yang akan dilakukan dan membantu meningkatkan literasi diskusi, Tabel 1.1 merupakan cantuman referensi utama dengan penelitian terkait.

Tabel 1. 1 Kajian penelitian

No.	Judul	Peneliti	Tahun
1.	<i>Dealing With Data Uncertainty for Transformer Insulation System Health Index</i>	Rahman, A	2021
2.	<i>Comprehensive Investigation on Service Aged Power Transformer Insulating Oil After Decades of Effective Performance in Field</i>	M. A. Mehmood	2020
3.	<i>Enhanced health index for power transformers diagnosis</i>	Da Silva, D.	2021
4.	<i>Reliable Estimation for Health Index of Transformer Oil Based on Novel Combined Predictive Maintenance Techniques</i>	Mohamed Badawi	2022

Referensi [6] melakukan penelitian tentang pengembangan model *Health Index* (HI) untuk sistem isolasi transformator daya yang mengatasi masalah ketidakpastian data seperti ketidakakuratan pengukuran, ketidaklengkapan, dan ketiadaan data diagnostik. Penelitian ini memperkenalkan konsep *Certainty Level* (CL) yang dihitung berdasarkan ketersediaan parameter kritis (seperti tegangan tembus, kandungan air, dan analisis gas terlarut) serta bobot pentingnya, sehingga memungkinkan evaluasi HI yang lebih andal meskipun terdapat data yang hilang.

Referensi [7] menyelidiki secara komprehensif minyak isolasi transformator daya yang telah digunakan dalam jangka waktu lama. Fokus utama penelitian adalah memahami bagaimana usia pelayanan memengaruhi sifat-sifat minyak isolasi setelah puluhan tahun penggunaan yang efektif di lapangan. Penelitian ini memberikan wawasan penting mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi

performa minyak isolasi, sehingga dapat membantu meningkatkan strategi pemeliharaan dan perawatan transformator.

Referensi [8] mengembangkan *Health Index* yang lebih canggih untuk diagnosis transformator daya. *Health Index* ini didasarkan pada berbagai parameter kinerja dan kondisi operasional transformator, seperti suhu, tekanan, dan kualitas minyak. Tujuan utamanya yaitu untuk meningkatkan akurasi diagnosis kondisi transformator dan memberikan informasi yang lebih jelas mengenai kapan waktu terbaik untuk melakukan pemeliharaan atau penggantian komponen.

Referensi [9] memperkenalkan metode estimasi yang andal untuk indeks kesehatan minyak transformator berdasarkan teknik prediktif pemeliharaan yang baru. Penelitian ini menggabungkan berbagai teknik pemeliharaan prediktif untuk menghasilkan pendekatan yang lebih komprehensif dalam mengevaluasi kondisi minyak transformator.

Persamaan penelitian ini dengan penelitian [6], [7], [8], dan [9] terletak pada fokus penelitiannya yaitu evaluasi dan pemeliharaan transformator daya dengan menganalisis kondisi minyak isolasi, yang merupakan elemen penting dalam menjaga kinerja transformator. Semua penelitian menggunakan teknik gas terlarut (DGA) untuk mendeteksi kerusakan melalui pengukuran parameter fisik dan zat-zat kimia yang ada pada minyak, seperti keasaman, kadar air, dan *breakdown voltage*. Selain itu, pendekatan pemeliharaan prediktif diterapkan untuk memproyeksikan kondisi masa depan transformator, dengan perhitungan indeks kesehatan untuk menilai tingkat degradasi dan usia layanan transformator, yang disebabkan oleh faktor-faktor stres termal dan listrik pada minyak isolasi. Penelitian-penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan perencanaan pemeliharaan transformator daya dengan menggunakan data diagnostik historis.

Perbedaan penelitian ini dari penelitian-penelitian lainnya yaitu penelitian ini berfokus pada analisis kondisi degradasi transformator daya di PT. PLN (PERSERO) UPT Bandung menggunakan data historis minyak untuk menghitung indeks isolasi. Sementara keempat penelitian itu lebih umum membahas metode analisis dan teknik untuk mendeteksi kerusakan pada transformator di berbagai

tempat, tanpa fokus pada satu lokasi tertentu. Penelitian ini juga lebih menekankan penerapan langsung di lapangan, sedangkan jurnal lainnya lebih berfokus pada teori dan teknik yang bisa digunakan secara global, seperti kombinasi berbagai metode untuk analisis gas dan pemeliharaan prediktif.

### **1.3 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang melakukan, berikut rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana menggunakan metode evaluasi *Insulation Condition Index* (ICI) untuk menilai tingkat kesehatan isolasi minyak pada transformator daya?
2. Bagaimana metode *Duval Triangle* memvalidasi nilai ICI dalam menganalisis degradasi sistem isolasi transformator daya?

### **1.4 Tujuan dan Manfaat**

Adapun tujuan dan manfaat melakukan penelitian ini yaitu:

#### **1.4.1. Tujuan**

Adapun tujuan pelaksanaan penelitian ini berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah penelitian ini yaitu:

1. Menggunakan metode evaluasi *Insulation Condition Index* (ICI) untuk mendapatkan nilai indeks dari minyak isolasi masing-masing transformator untuk menilai tingkat kesehatan isolasi pada transformator.
2. Menggunakan metode *Duval Triangle* untuk memvalidasi atau memperkuat hasil evaluasi kondisi isolasi terhadap nilai ICI.

#### **1.4.2. Manfaat**

Penelitian ini memiliki dua manfaat yang ingin didapatkan, yaitu:

##### **1. Manfaat Akademis**

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu di bidang teknik elektro, khususnya pada studi sistem isolasi transformator daya. Dengan mengintegrasikan metode penilaian kuantitatif seperti *Insulation Condition Index* (ICI) dan interpretasi *Duval Triangle*, penelitian ini memperkaya literatur mengenai pendekatan analitis dalam mendiagnosis kondisi transformator. Hasil

penelitian ini juga dapat dijadikan referensi oleh mahasiswa dan peneliti lain yang tertarik pada topik analisis kesehatan peralatan kelistrikan.

## 2. Manfaat Praktis

Penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh industri pembangkit listrik, khususnya UPT Bandung atau unit-unit pemeliharaan lainnya, untuk menilai kondisi transformator secara lebih menyeluruh melalui data kualitas minyak. Evaluasi ini dapat membantu dalam menentukan strategi pemeliharaan preventif maupun prediktif. Selain itu, metode ini juga dapat diterapkan di sektor industri kelistrikan lain yang menggunakan transformator daya, seperti di pembangkit, industri manufaktur besar, maupun perusahaan utilitas swasta.

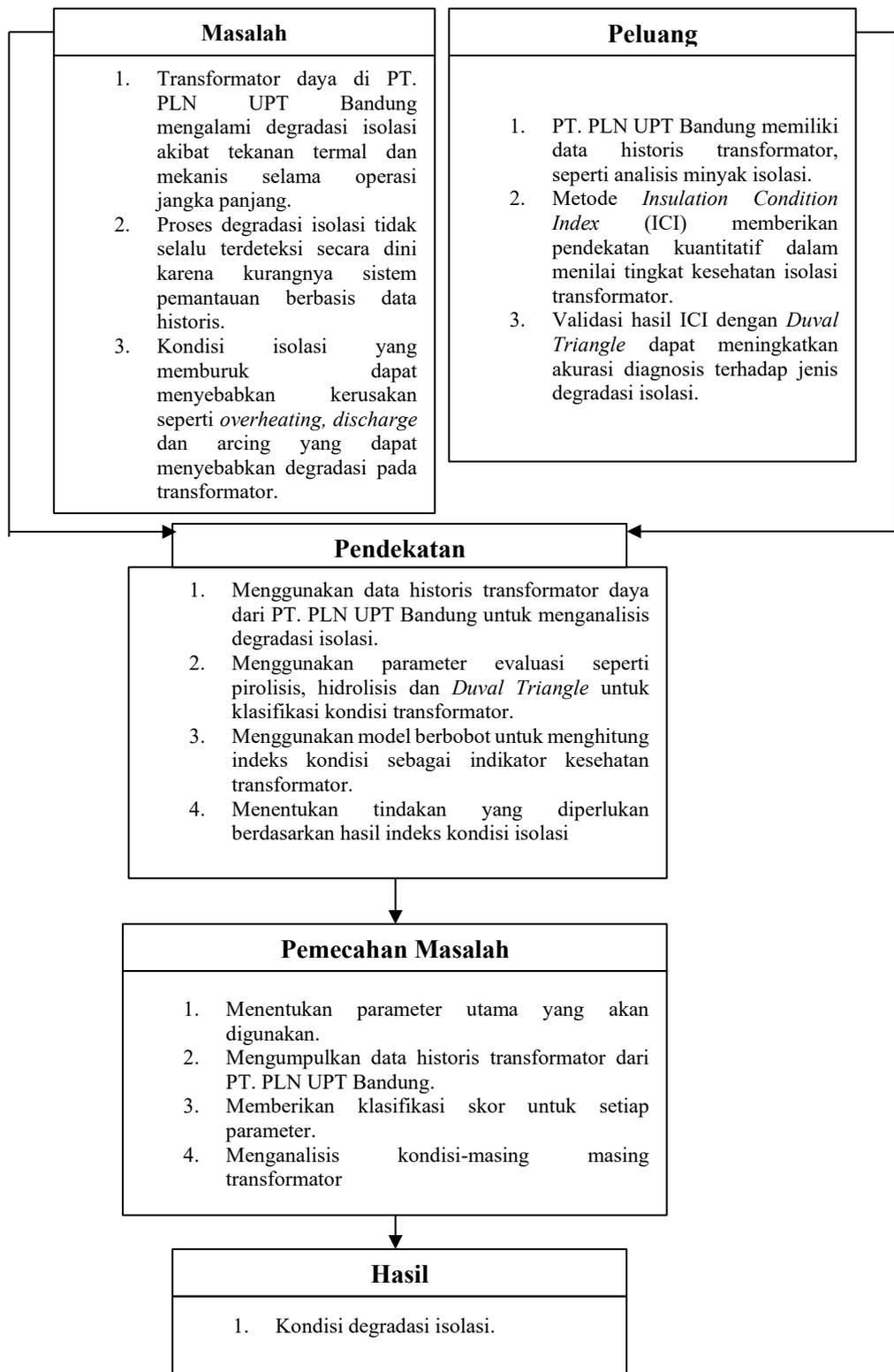
### 1.5 Batasan Masalah

Masalah yang berhubungan dengan fokus penelitian ini sangat luas, oleh karena itu penulis membatasi metode masalah berupa:

1. Penelitian ini berfokus pada parameter spesifik dari minyak isolasi transformator yaitu tingkat Furan, DGA, kadar air, kadar asam, tegangan tembus, *Interfacial Tension*, tingkat keasaman dan warna minyak.
2. Penelitian ini hanya menggunakan data historis minyak pada transformator yang ada di PT. PLN (PERSERO) UPT Bandung dengan rentang waktu 2021-2024.

### 1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir adalah suatu alur logis yang menggambarkan hubungan antara masalah penelitian, tujuan, dan metode yang akan digunakan untuk mencapai solusi. Kerangka ini membantu merumuskan hipotesis atau asumsi dasar yang ingin diuji, serta menunjukkan bagaimana penelitian akan dilakukan untuk mencapai tujuan yang ditetapkan. Dengan adanya kerangka berpikir, peneliti dapat memastikan bahwa penelitian berjalan sistematis dan fokus pada masalah yang telah dirumuskan.. Oleh karena itu, dalam menguraikan gagasan-gagasan penelitian, dikembangkan suatu kerangka berpikir pada tugas akhir yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Kerangka berfikir

## **1.7 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan merupakan tahapan-tahapan penyusunan dalam penulisan tugas akhir yang terdiri dari 6 bab, diantaranya sebagai berikut.

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berupa pendahuluan menjelaskan mengenai permasalahan berupa latar belakang, penelitian terdahulu, rumusan masalah, tujuan, manfaat akademis dan praktis, batasan masalah, kerangka berpikir dan sistematika penulisan.

### **BAB II TEORI DASAR**

Bab ini menjelaskan tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian sebelum melakukan penelitian analisis kondisi degradasi transformator daya dan estimasi indeks isolasi berdasarkan data historis minyak.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan tentang metode atau jadwal penelitian berupa tahapan-tahapan ketika melakukan penelitian menganalisis kondisi degradasi transformator daya mulai dari pengumpulan data, teknik menganalisis data dan jadwal penelitian.

### **BAB IV PERHITUNGAN NILAI INDEKS ISOLASI**

Bab ini menyajikan proses perhitungan nilai *Insulation Condition Index* (ICI) dari masing-masing transformator yang diteliti. Dalam bab ini dijelaskan mengenai data historis minyak transformator, pemilihan dan klasifikasi parameter degradasi, pembobotan skor untuk tiap mekanisme degradasi (pirolisis, hidrolisis, kontaminasi, dan *discharge*), hingga perhitungan akhir nilai ICI. Selain itu, bab ini juga memaparkan pengolahan data menggunakan metode *Duval Triangle* sebagai validasi untuk mendeteksi potensi jenis kerusakan pada transformator.

### **BAB V HASIL DAN ANALISIS**

Bab ini membahas hasil dari analisis data yang telah diperoleh, meliputi evaluasi parameter degradasi seperti kadar Furan, kadar air, kadar asam, *Interfacial Tension* (IFT), tegangan tembus (BDV), dan DGA. Data ini kemudian dianalisis berdasarkan klasifikasi mekanisme degradasi untuk masing-masing transformator. Selanjutnya, nilai ICI yang telah dihitung diinterpretasikan untuk menilai kondisi isolasi transformator, serta hasil analisis zona kerusakan berdasarkan *Duval Triangle* dijelaskan sebagai bentuk validasi dari metode yang digunakan.

## **BAB VI KESIMPULAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang menjawab rumusan masalah serta mencerminkan pencapaian tujuan penelitian. Selain itu, disajikan pula saran-saran untuk penelitian selanjutnya maupun rekomendasi tindakan yang dapat dilakukan oleh pihak terkait dalam rangka pemeliharaan dan peningkatan keandalan transformator daya berdasarkan hasil analisis yang diperoleh.

