BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator daya merupakan salah satu komponen utama dalam sistem tenaga listrik, yang berfungsi untuk mentransfer daya listrik antara dua atau lebih sistem dengan tingkat tegangan yang berbeda. Dalam sistem kelistrikan industri, transformator berperan sangat vital karena kontinuitas dan kualitas penyaluran daya listrik sangat bergantung pada keandalan transformator tersebut. Kegagalan transformator dapat menimbulkan dampak signifikan, seperti gangguan operasional, penurunan produktivitas, bahkan kerugian ekonomi yang besar bagi industri. Oleh karena itu, keandalan (reliability) dan umur pakai (lifetime) transformator sangat berpengaruh terhadap efisiensi dan keamanan sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Dalam pengoperasiannya, transformator senantiasa mengalami pembebanan bervariasi sesuai kebutuhan sistem. Kondisi pembebanan ini sangat berpengaruh terhadap umur pakai transformator. Umur pakai transformator sangat ditentukan oleh kondisi termal yang terjadi selama masa operasinya. Peningkatan temperatur, baik akibat pembebanan berlebih (*overload*), suhu ambien yang tinggi, maupun pendinginan yang kurang efektif, dapat mempercepat degradasi material isolasi. Degradasi ini terutama terjadi pada isolasi kertas selulosa di dalam transformator yang terendam minyak. Kertas selulosa yang terpapar suhu tinggi secara terus-menerus akan mengalami penurunan kekuatan mekanik dan elektrikal, yang pada akhirnya menyebabkan berkurangnya umur operasi transformator. [1]

Penerapan beban yang melebihi nilai nominal pelat memiliki risiko tertentu. Meskipun penuaan dan kerusakan mekanis jangka panjang pada insulasi belitan telah menjadi dasar pembebanan transformator selama bertahun-tahun, diketahui bahwa terdapat faktor-faktor tambahan yang dapat meningkatkan risiko bagi transformator dengan nilai megavoltampere dan tegangan yang lebih tinggi.

Di dalam lingkungan industri, beban transformator tidak selalu stabil. Adanya variasi beban pada jam-jam puncak produksi menyebabkan transformator bekerja melebihi beban nominalnya (*overloading*). Selain itu, kondisi suhu ambien yang tinggi, terutama pada area tropis seperti Indonesia, semakin memperburuk kondisi termal transformator. Jika hal tersebut tidak dimonitor dengan baik, maka transformator akan mengalami percepatan

degradasi isolasi, peningkatan rugi-rugi panas, dan penurunan efisiensi, yang pada akhirnya memperpendek umur operasionalnya.

Untuk menjaga keandalan sistem kelistrikan industri, diperlukan suatu metode analisis yang dapat memperkirakan umur pakai transformator secara akurat berdasarkan kondisi aktual operasi. Salah satu metode yang telah terstandardisasi secara internasional adalah pendekatan berbasis **IEEE C57.91-2011**, yang menghubungkan antara besaran pembebanan, temperatur ambien, dan temperatur titik panas untuk menghitung *aging acceleration factor* serta *loss of life (LoL)* dari isolasi transformator. Dengan metode ini, umur efektif transformator dapat dihitung dan dibandingkan dengan umur desain (nominal life) sebesar ±180.000 jam atau sekitar 20 tahun.[2]

Standar ini dipilih karena menyediakan metode yang sistematis untuk menghitung temperatur top-oil, temperatur hot-spot, faktor percepatan penuaan (Aging Acceleration Factor/FAA), susut umur (Loss of Life/LOL), serta estimasi umur sisa transformator berdasarkan kondisi operasi aktual. Dengan demikian, analisis tidak hanya didasarkan pada umur kalender transformator, tetapi juga mempertimbangkan pengaruh nyata dari variasi beban dan temperatur selama pengoperasian. Selain itu, IEEE C57.91-2011 merupakan standar internasional yang banyak digunakan oleh peneliti maupun industri kelistrikan dalam mengevaluasi kemampuan pembebanan dan umur pakai transformator berpendingin minyak mineral. Penggunaan standar ini memungkinkan hasil penelitian memiliki dasar teoritis yang kuat, mudah dibandingkan dengan penelitian terdahulu, serta dapat dijadikan referensi dalam penyusunan strategi operasi dan pemeliharaan transformator agar risiko kegagalan akibat penuaan isolasi dapat diminimalkan.

Selain C57.91-2011 ada juga perhitungan umur pakai transfromator menggunakan standard IEC 60076-7. IEC 60076-7 adalah bagian dari standar internasional IEC 60076 yang secara khusus membahas tentang **model termal dan estimasi umur transformator daya**. Standar ini memberikan kerangka matematis untuk menghitung suhu minyak (top-oil temperature) dan suhu titik panas belitan (hot-spot temperature), yang merupakan parameter utama dalam menentukan kecepatan degradasi isolasi kertas. Dengan menggunakan persamaan berbasis hukum Arrhenius, IEC 60076-7 menjelaskan bagaimana suhu tinggi mempercepat proses penuaan kimia pada isolasi, sehingga memperpendek umur efektif transformator. Standar ini juga memperkenalkan konsep *Aging Acceleration Factor (FAA)* dan *Equivalent Aging Factor (FEQA)* untuk mengukur percepatan penuaan relatif terhadap

kondisi operasi normal, serta metode menghitung *Loss of Life (LoL)* sebagai indikator umur yang hilang akibat beban dan suhu tertentu.

Lebih jauh, IEC 60076-7 menekankan pentingnya **monitoring real-time** terhadap suhu titik panas dan kondisi pendinginan untuk memperkirakan umur sisa transformator secara akurat. Standar ini tidak hanya berguna bagi produsen dalam merancang transformator yang tahan terhadap beban lebih, tetapi juga bagi operator sistem tenaga listrik dalam mengelola aset secara optimal. Dengan perhitungan umur berbasis suhu, operator dapat menentukan strategi operasi seperti pembatasan beban, pengaturan sistem pendingin, atau penjadwalan pemeliharaan agar transformator tetap beroperasi dalam batas aman. Pada akhirnya, IEC 60076-7 menjadi panduan penting untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik dengan memprediksi umur transformator secara kuantitatif dan berbasis data.

Berikut adalah tabel perbandingan antara C57.91-2011 dengan IEC 60076-7 :

Tabel 1.1 Perbandingan antara C57.91-2011 dengan IEC 60076-7

Aspek	IEEE C57.91-2011	IEC 60076-7
Cakupan	Transformator & step-voltage regulators, isolasi 55 °C & 65 °C	Transformator minyak-mineral
Fokus utama	Panduan praktis beban lebih & risiko	Model matematis penuaan isolasi
Konservatisme termal	Lebih konservatif saat pendinginan aktif	Lebih konservatif saat pendinginan gagal
Referensi standar	Terhubung ke banyak standar IEEE lain	Terhubung ke IEC 60076 seri
Kegunaan praktis	Memberi batasan operasional jelas	Memberi kerangka perhitungan umur

Dengan menggunakan standar IEEE C57.91-2011, umur pakai transformator dapat dihitung berdasarkan data historis beban dan temperatur operasi. Hasil perhitungan tersebut dapat memberikan gambaran mengenai tingkat *loss of life* (penurunan umur isolasi) transformator setiap periode waktu tertentu. Analisis ini dapat digunakan oleh pihak industri untuk menentukan strategi *preventive* maupun *predictive maintenance*, serta perencanaan penggantian transformator sebelum terjadi kegagalan.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini akan melakukan analisis terhadap **umur pakai transformator daya berdasarkan beban kerja dan temperatur operasi dengan mengacu pada standar IEEE C57.91-2011**. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman mengenai hubungan beban, suhu, dan laju penuaan transformator, serta menjadi dasar dalam perencanaan pengelolaan aset kelistrikan industri secara lebih efektif.

1.2 Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana cara menghitung *loss of life* (LoL) transformator berdasarkan data beban dan temperatur yang didapat dari perusahaan menggunakan standar IEEE C57.91-2011?
2. Bagaimana estimasi sisa umur (*remaining life expectancy*) transformator pada sistem kelistrikan industri berdasarkan hasil analisis termal dan pembebanan aktual?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan fokus, maka batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Analisis difokuskan pada transformator daya tipe **minyak (oil-immersed)** dengan sistem pendinginan **ONAN (Oil Natural Air Natural)** dengan kapasitas trafo 2500kVA dan tegangan 6.6kV
2. Data yang digunakan meliputi **beban transformator (%load)** dan **temperatur ambien (°C)** dalam periode waktu tertentu pada sistem kelistrikan industri.
3. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan matematis berdasarkan persamaan termal dalam **IEEE Std C57.91-2011**.
4. Faktor eksternal lain seperti kualitas minyak, kelembapan, tegangan lebih (*overvoltage*), atau gangguan mekanis tidak dibahas secara detail.
5. Umur nominal transformator diasumsikan sebesar **180.000 jam (±20 tahun)** sesuai dengan acuan standar IEEE.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menghitung *loss of life* transformator berdasarkan standar IEEE C57.91-2011 dengan menggunakan data operasional industri.
2. Menentukan estimasi umur sisa (*remaining life expectancy*) transformator berdasarkan kondisi operasi aktual untuk evaluasi kinerja dan rencana perawatan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain :

1. Memberikan gambaran kuantitatif mengenai pengaruh pembebanan dan temperatur terhadap penurunan umur isolasi transformator.
2. Menjadi dasar bagi perusahaan industri dalam menerapkan sistem pemeliharaan berbasis prediksi (*predictive maintenance*).
3. Menjadi referensi teknis bagi engineer dalam menentukan batas aman pembebanan transformator.
4. Membantu meningkatkan efisiensi pengoperasian dan keandalan sistem tenaga listrik industri.
5. Memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan kajian keandalan sistem tenaga listrik berbasis standar internasional IEEE.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun sebagai berikut :

- **BAB I PENDAHULUAN**
  Berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.
- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**
  Membahas teori-teori dasar tentang transformator daya, sistem pendinginan, karakteristik isolasi, konsep *thermal aging*, *loss of life*, serta uraian Standar IEEE C57.91-2011.
- **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
  Menjelaskan metode penelitian, data yang digunakan, parameter dan persamaan perhitungan, serta langkah-langkah analisis umur pakai transformator.
- **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**
  Menyajikan hasil perhitungan, analisis hubungan beban dan temperatur terhadap umur pakai, serta pembahasan implikasi hasil penelitian.
- **BAB V PENUTUP**
  Berisi kesimpulan dari hasil analisis dan saran untuk penelitian atau penerapan selanjutnya.

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH
SURABAYA