BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunaan pendekatan kuantitatif, yaitu metode penelitian yang berfokus pada pengelolaan data numerik untuk menganalisis fenomena secara objektif. Pendekatan kuantitatif digunakan karena penelitian ini memerlukan perhitungan matematis dan pengukuran variable yang dapat dinyatakan dalam angka, seperti data beban transformator, suhu operasi, serta nilai susut umur yang dihitung menggunakan persamaan standar IEEE C57.91-2011.

Pendekatan kuantitatif memungkinkan peneliti untuk melakukan analisis terukur mengenai pengaruh beban kerja dan temperatur operasi terhadap umur pakai transformaator. Data yang digunakan bersidat numerik dan dianalisis secara sistematis menggunakan perhitungan model faktor percepatan penuaan agging acceleration factor), temperatur titik panas (hottest spot temperature), serta presentase susut umur trafo. Dengan pendekatan ini, hasil penelitian dapat disajikan secara objektif dan terukur, serta menghasilkan kesimpulan yang dapat dipertanggung jawabkan secara ilmiah karena berdasarkan data aktual dan perhitungan yang mengikuti standar teknik kelistrikan yang berlaku.

3.2 Waktu dan Lokasi Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan di salah satu perusahaan di Indonesia, jadwal penelitian dilakukan dari bulan februari 2025 sampai januari 2026 dan untuk pengambilan data dilakukan sebulan sekali.

3.3 Data Yang Dibutuhkan

Dalam penelitian analisis susut umur transformator berdasarkan standar IEEE C57.91-2011, proses pengumpulan data menjadi tahapan yang sangat penting karena menentukan ketepatan perhitungan kondisi termal dan estimasi umur pakai transformator. Data yang dikumpulkan harus dapat menggambarkan kondisi operasi transformator secara nyata, baik dari sisi teknis maupun lingkungan. Secara keseluruhan, data yang dikumpulkan dalam analisis umur transformator mencakup data beban, temperatur lingkungan, parameter termal transformator, data nameplate, informasi kondisi operasional, serta data hasil pemeliharaan. Data-data tersebut menjadi dasar dalam menghitung kenaikan suhu minyak, suhu hotspot,

percepatan penuaan, dan nilai susut umur (Loss of Life) sesuai metode perhitungan dalam standar IEEE C57.91-2011. Kualitas dan kelengkapan data yang diperoleh akan menentukan tingkat akurasi hasil analisis umur transformator dan rekomendasi yang diberikan.

3.4 Metode Pengumpulan Data

Analisis umur transformator atau loss of life (LOL) membutuhkan pendekatan penelitian yang sistematis, terstruktur, dan berbasis pada data kuantitatif. Dalam penelitian teknis seperti ini, metode menjadi unsur yang sangat penting untuk memastikan bahwa data yang diperoleh sesuai dengan tujuan analisis serta relevan dengan standar yang digunakan, yaitu IEEE C57.91-2011. Berikut adalah metode-metode utama yang digunakan dalam pengumpulan maupun analisis data pada penelitian analisis umur transformator.

1. Metode Observasi Lapangan

   Metode observasi lapangan merupakan metode dasar yang digunakan untuk memperoleh data nyata mengenai kondisi operasi transformator di lokasi penelitian. Melalui observasi, peneliti dapat melihat secara langsung bagaimana transformator bekerja dalam kondisi aktual, seperti suhu lingkungan, kondisi ruangan, sistem pendinginan, serta perilaku beban saat transformator beroperasi.

2. Metode Pencatatan Data Operasional

   Metode pencatatan data dilakukan untuk mengumpulkan data teknis transformator secara runtut dan sistematis. Data operasional yang dicatat merupakan data primer yang sangat dibutuhkan dalam perhitungan susut umur. Seperti data beban transformator, temperatur lingkungan, arus beban per phase.

3. Metode Studi Literatur

   Metode studi literatur digunakan untuk memperoleh landasan teoretis yang kuat dalam penelitian ini. Literatur yang dipelajari bukan hanya standar IEEE C57.91-2011, tetapi juga buku-buku teknik tenaga listrik, jurnal penelitian, dan publikasi ilmiah lain yang relevan.

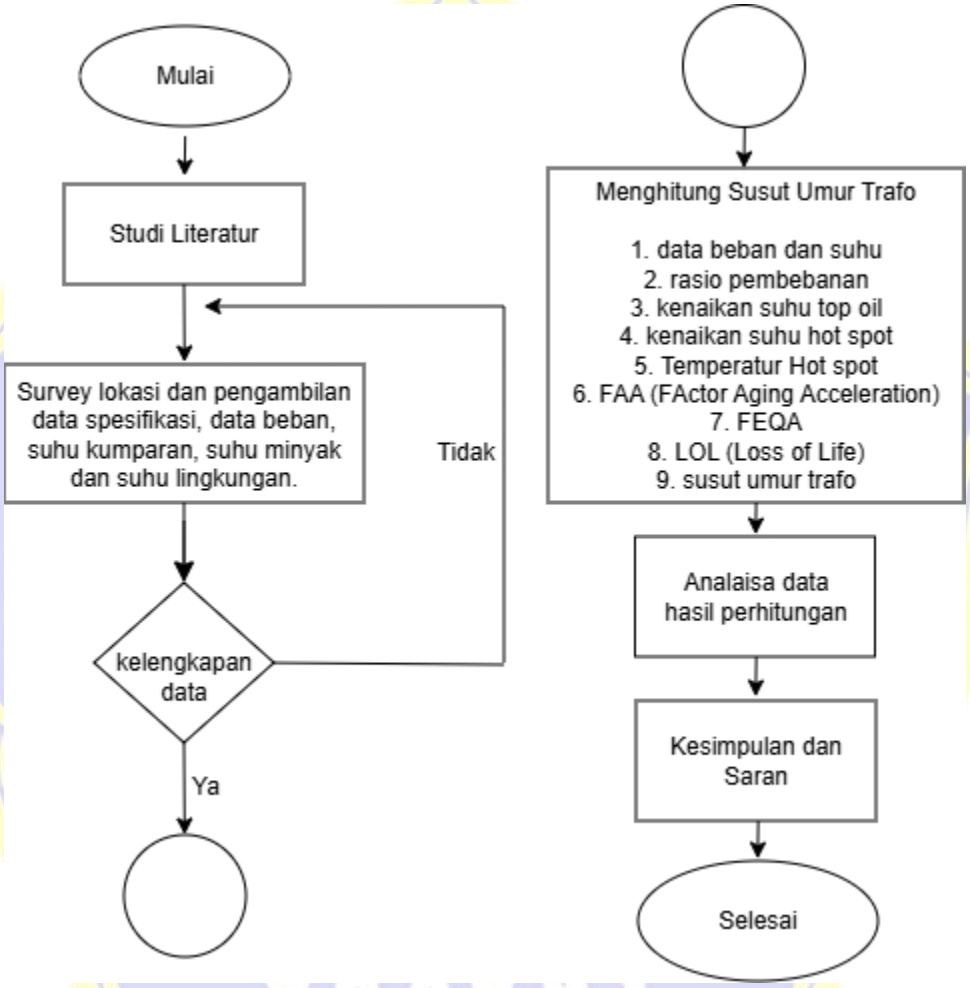
3.5 Metode Analisis Data

Metode analisis kuantitatif digunakan untuk menghitung umur transformator berdasarkan data numerik yang telah dikumpulkan. Metode ini merupakan inti dari penelitian dan dilakukan dengan mengacu ketat pada persamaan matematis yang terdapat dalam standar IEEE C57.91-2011. Proses analisis kuantitatif meliputi:

- Perhitungan Kenaikan Suhu Minyak (Top-Oil Rise)

- Perhitungan Kenaikan Suhu Hotspot (Hotspot Rise)
- Penentuan Suhu Hotspot Aktual (θ_HS)
- Perhitungan Faktor Percepatan Penuaan (FAA)
- Perhitungan Loss of Life (LOL)

3.6 Diagram Alur Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alur penelitian

Diagram alur penelitian disusun untuk menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis, berikut adalah urutan tahapan tahapan sesuai dengan gambar alur diagram diatas :

1. Mulai

Tahap awal penelitian dimulai dengan menentukan topik penelitian, yaitu analisis umur pakai transformator daya 2,5 MVA 6.6/0.4 kV 3 PHASE berdasarkan beban kerja dan temperatur operasi dengan mengacu pada standar IEEE C57.91-2011.

2. Studi Literatur

   Tahap selanjutnya adalah studi literatur untuk memperoleh landasan teori yang mendukung penelitian. Literatur diperoleh dari buku, jurnal ilmiah, skripsi terdahulu, standar IEEE C57.91-2011, serta referensi lain yang berkaitan dengan transformator daya, temperatur operasi, pembebanan, proses penuaan isolasi, dan metode perhitungan susut umur transformator.

3. Survey lokasi dan pengambilan data

   Setelah memahami teori yang digunakan, dilakukan survei pada lokasi penelitian untuk memperoleh data yang dibutuhkan. Seperti, data spesifikasi transformator, data pembebanan transformator selama periode pembebanan, data suhu (suhu kumparan, suhu oil dan suhu lingkungan.

4. Pemeriksaan kelengkapan data

   Data yang telah diperoleh kemudian diperiksa kelengkapannya. Tahap ini bertujuan untuk memastikan seluruh parameter yang diperlukan dalam perhitungan sudah lengkap.

   - Tidak : Apabila data **belum lengkap**, maka proses kembali ke tahap pengumpulan data hingga seluruh data terpenuhi.
   - Ya : Apabila data **sudah lengkap**, maka penelitian dilanjutkan ke tahap perhitungan.

5. Menghitung susut umur trafo

   Tahap inti penelitian adalah melakukan analisis berdasarkan standar IEEE C57.91-2011. Perhitungan dilakukan secara berurutan sebagai berikut.

   a. Data beban dan suhu

      Data pembebanan dan temperatur operasi disusun sesuai periode pengamatan sebagai data awal dalam analisis.

   b. Menghitung rasio pembabanan

      Rasio pembebanan dihitung menggunakan persamaan:

$$K = \frac{S}{S_r}$$

c. Menghitung kenaikan temperatur top-oil (Top-Oil Rise)

Berdasarkan rasio pembebanan, dihitung kenaikan temperatur minyak bagian atas transformator menggunakan persamaan pada IEEE C57.91-2011. Dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\Delta\Theta_{TO} = \Delta\Theta_{TO,R}\,(\frac{K^2R+1}{R+1})^n$$

d. Menghitung kenaikan temperatur hot-spot

Selanjutnya dihitung kenaikan temperatur titik terpanas (hot-spot) pada belitan transformator. Berikut persamaannya :

$$\Delta\Theta_H = \Delta\Theta_{H,R}\,.K^m$$

e. Menghitung Temperatur Hot Spot

Temperatur hot-spot dihitung menggunakan persamaan :

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H$$

f. Menghitung FAA (Aging Acceleration Factor)

Nilai FAA menunjukkan seberapa cepat isolasi mengalami penuaan dibandingkan kondisi normal. Semakin tinggi temperatur hot-spot, maka nilai FAA semakin besar sehingga proses penuaan berlangsung lebih cepat. FAA dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$F_{AA} = \exp\left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\Theta_H + 273}\right)$$

g. Menghitung FEQA

FEQA menggambarkan tingkat penuaan rata-rata selama periode pengamatan. Dapat dihitung menggumakan persamaan berikut :

$$FEQA = \frac{\sum F_{AA,n}\,.\,\Delta t_n}{\Delta t_n}$$

h. Menghitung LOL

Loss of Life dihitung menggunakan nilai FEQA. Nilai LOL menunjukkan persentase umur isolasi yang telah terpakai selama periode operasi transformator. Semakin besar nilai LOL, semakin besar umur isolasi yang telah hilang.

$$\%\,Loss\,of\,Life = \frac{F_{EQA}\,.\,t\,.\,100}{180000}$$

i. Menghitung susut umur trafo

Tahap terakhir adalah menentukan besar susut umur serta mengestimasi sisa umur transformator berdasarkan hasil perhitungan LOL. Hasil ini digunakan untuk mengevaluasi kondisi transformator.

6. Analisa

   Hasil seluruh perhitungan kemudian dianalisis untuk mengetahui hubungan antara pembebanan, temperatur operasi, dan susut umur transformator. Analisis dilakukan dengan membandingkan kondisi operasi aktual terhadap batas yang direkomendasikan dalam IEEE C57.91-2011. Pada tahap ini juga dibahas pengaruh kenaikan beban terhadap temperatur hot-spot, nilai FAA, FEQA, LOL, serta estimasi umur pakai transformator.

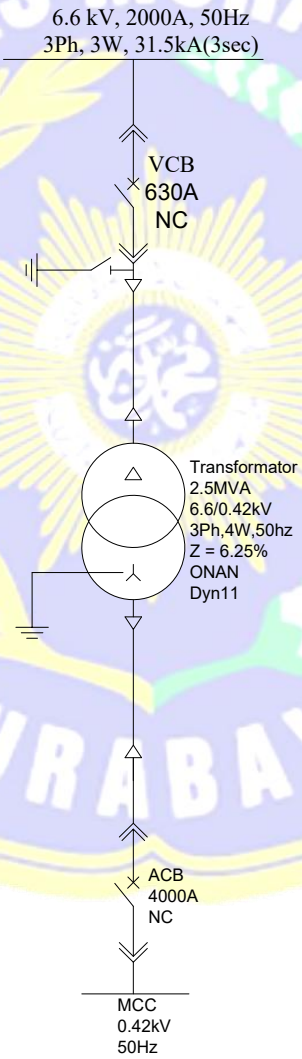
7. Kesimpulan dan saran

   Tahap terakhir adalah menyusun kesimpulan berdasarkan hasil analisis yang telah diperoleh. Kesimpulan berisi jawaban terhadap rumusan masalah mengenai pengaruh beban kerja dan temperatur operasi terhadap umur pakai transformator. Selain itu, diberikan saran yang dapat dijadikan masukan bagi perusahaan maupun penelitian selanjutnya, terutama terkait pengelolaan beban, pemantauan temperatur operasi, dan strategi pemeliharaan transformator agar umur pakainya dapat dipertahankan secara optimal.

8. Selesai

   Tahap ini menandai berakhirnya seluruh rangkaian penelitian setelah semua tujuan penelitian tercapai, hasil dianalisis, serta kesimpulan dan saran telah disusun.

3.7 Single Line Diagram Transformator



Gambar 3.2 Single Line Diagram

Single Line Diagram (SLD) tersebut menunjukkan sistem penyaluran tenaga listrik dari sisi tegangan menengah (6,6 kV) menuju sisi tegangan rendah (0,4 kV) melalui sebuah transformator daya berkapasitas 2,5 MVA. Bagian paling atas menunjukkan sumber listrik dari jaringan tegangan menengah dengan spesifikasi tegangan 6.6kV, Arus nominal 2000A, Frekuensi 50Hz. Di bawah sumber terdapat VCB (Vaccum Circuit Breaker) dengan spesifikasi kapasitas arus 630A. VCB berfungsi sebagai menghubungkan sumber dengan transformator, melindungi transformator dari gangguan hubung singkat, memutus arus saat terjadi gangguan, mengisolasi transformator saat dilakukan pemeliharaan. Kemudian komponen utama pada single line diagram tersebut adalah transformator kapasitas 2.5 MVA dengan tegangan primer 6.6kv dan tegangan sekunder 0.42kV. Pada sisi tegangan rendah terdapat ACB dengan kapasitas 4000A, yang berfungsi sebagai proteksi hubung singkat, pemutus utama saat pemeliharaan. Bagian paling bawah merupakan MCC Adalah panel distribusi utama yang menyalurkan daya listrik dari transformator ke berbagai beban seperti pompa, motor Listrik, kompreor, conveyor dll. Selain mendistribusikan daya, MCC juga berfungsi mengendalikan operasi motor melalui kontaktor, overload relay, dan sistem proteksi lainnya.