

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator distribusi merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari jaringan distribusi primer ke jaringan distribusi sekunder secara kontinu dan andal. Keandalan transformator sangat menentukan kontinuitas penyaluran tenaga listrik kepada pelanggan sehingga setiap penurunan performa transformator berpotensi menyebabkan gangguan pelayanan maupun peningkatan biaya pemeliharaan. Oleh karena itu, kondisi sistem isolasi transformator perlu dipantau secara berkala untuk menjaga keandalan operasi dan memperpanjang umur pakainya. Sistem isolasi transformator umumnya terdiri atas isolasi padat berupa kertas selulosa dan isolasi cair berupa minyak transformator. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa degradasi sistem isolasi merupakan salah satu penyebab dominan kegagalan transformator, sedangkan perubahan karakteristik minyak transformator dapat dimanfaatkan sebagai indikator awal untuk mengevaluasi kondisi sistem isolasi tersebut [1],[2].

Minyak transformator memiliki fungsi ganda sebagai media isolasi listrik sekaligus media pendingin. Kualitas minyak yang baik memungkinkan transformator mempertahankan kekuatan dielektrik serta melepaskan panas dari belitan menuju sistem pendingin secara efektif. Selama masa operasi, minyak transformator mengalami pengaruh stres termal, elektris, dan oksidatif yang menyebabkan proses penuaan (*ageing*). Proses tersebut mengakibatkan perubahan sifat fisik dan kimia minyak, seperti meningkatnya kandungan air, terbentuknya sludge yang menyebabkan peningkatan kekeruhan, perubahan warna, serta penurunan kekuatan dielektrik [3]. Perubahan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kondisi minyak transformator dapat digunakan sebagai indikator awal untuk menilai kondisi internal transformator.

Salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap penurunan kualitas minyak transformator adalah kandungan air. Berdasarkan standar IEC 60422, kandungan air yang melebihi batas tertentu dapat menurunkan kekuatan dielektrik

minyak dan meningkatkan risiko kegagalan isolasi [4]. Kondisi tersebut umumnya dievaluasi melalui pengujian *Breakdown Voltage* (BDV), di mana standar IEC 60156 menetapkan bahwa minyak transformator dengan nilai BDV di bawah 30 kV belum memenuhi persyaratan sebagai media isolasi tanpa dilakukan perlakuan lebih lanjut [5]. Selain parameter kelistrikan tersebut, perubahan karakteristik fisik seperti tingkat kekeruhan juga dapat dimanfaatkan sebagai indikator awal adanya proses degradasi akibat pembentukan sludge maupun kontaminasi partikel

Dalam praktik pemeliharaan transformator di bengkel servis maupun fasilitas perawatan industri, evaluasi kualitas minyak masih didominasi oleh metode pengujian laboratorium, seperti uji *Breakdown Voltage* (BDV), pengukuran kadar air menggunakan metode Karl Fischer, serta analisis kimia minyak. Meskipun metode tersebut memiliki tingkat akurasi yang tinggi, pelaksanaannya memerlukan peralatan khusus, waktu pengujian yang relatif lebih lama, dan tidak selalu dapat dilakukan secara langsung pada lokasi *screening*. Akibatnya, teknisi sering membutuhkan informasi awal mengenai kondisi minyak sebelum memutuskan apakah sampel perlu menjalani pengujian laboratorium lebih lanjut. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya suatu sistem *screening* yang mampu memberikan informasi kondisi minyak secara cepat, praktis, dan objektif.

Dalam lima tahun terakhir, berbagai penelitian telah mengembangkan sistem pemantauan kualitas minyak transformator menggunakan sensor suhu, sensor kelembapan, sensor kapasitif, maupun pendekatan berbasis *Internet of Things* (IoT). Sensor suhu digunakan untuk memantau temperatur minyak yang berkaitan dengan proses degradasi termal [6], sedangkan *turbidity* sensor dimanfaatkan untuk *screening* perubahan tingkat kekeruhan akibat terbentuknya produk degradasi dan kontaminasi partikel [7]. Selain itu, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kelembapan relatif (*Relative Humidity*/sRH) pada ruang *headspace* memiliki hubungan dengan kondisi kandungan uap air dalam minyak transformator. Pada kondisi tertentu, peningkatan temperatur dapat mendorong pelepasan uap air dari minyak maupun isolasi padat menuju ruang *headspace*, sehingga nilai RH dapat dimanfaatkan sebagai indikator relatif kondisi kelembapan minyak [8]. Ketiga parameter tersebut dipilih karena mewakili tiga aspek utama kondisi minyak

transformator, yaitu kondisi termal, karakteristik fisik minyak, dan indikasi kelembapan.

Meskipun demikian, penelitian-penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada penggunaan satu parameter pengujian, menggunakan minyak baru atau sampel laboratorium, maupun dikembangkan sebagai sistem *online monitoring*. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya merepresentasikan kebutuhan *screening* terhadap minyak transformator yang telah digunakan di lapangan dengan tingkat degradasi yang beragam. Selain itu, belum banyak penelitian yang mengintegrasikan parameter suhu, tingkat kekeruhan, dan kelembapan relatif pada ruang *headspace* ke dalam satu sistem portabel yang divalidasi menggunakan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) sebagai metode referensi.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu sistem *screening* yang mampu memberikan informasi kondisi minyak transformator secara cepat sebelum dilakukan pengujian laboratorium yang lebih komprehensif. Sistem ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan metode pengujian standar, seperti uji *Breakdown Voltage* (BDV) maupun pengukuran kadar air secara langsung, melainkan sebagai alat bantu *screening* untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan.

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem *screening* kualitas minyak transformator berbasis multi-sensor yang mengintegrasikan sensor suhu DS18B20, *turbidity* sensor, dan sensor kelembapan SHT31. Data hasil pengukuran dari ketiga sensor diolah menggunakan algoritma *Rule-Based Classification* untuk menghasilkan klasifikasi kondisi minyak transformator secara cepat dan mudah dipahami. Hasil *screening* kemudian dibandingkan dengan hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) sebagai metode referensi untuk mengevaluasi kesesuaian kinerja sistem yang dikembangkan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif sistem *screening* yang praktis, portabel, dan mampu mendukung proses pengambilan keputusan pemeliharaan transformator secara lebih efektif.

1.2 Kajian Terdahulu

Penelitian mengenai evaluasi kualitas minyak transformator telah berkembang dengan berbagai pendekatan, mulai dari pengujian laboratorium menggunakan parameter listrik dan kimia hingga pemanfaatan sensor berbasis elektronik untuk mendukung proses pemantauan kondisi minyak transformator. Beragam pendekatan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi kualitas minyak transformator terus berkembang sebagai upaya meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik serta mendukung kegiatan pemeliharaan transformator.

Meskipun demikian, setiap penelitian memiliki fokus, metode, dan ruang lingkup yang berbeda. Sebagian penelitian lebih menitikberatkan pada pengujian laboratorium dengan tingkat akurasi tinggi, sedangkan penelitian lainnya mengembangkan sistem berbasis sensor yang umumnya masih menggunakan parameter tunggal atau ditujukan untuk kebutuhan monitoring. Oleh karena itu, kajian terhadap penelitian terdahulu diperlukan untuk mengidentifikasi pendekatan yang telah digunakan, mengevaluasi kelebihan dan keterbatasannya, serta menemukan celah penelitian yang menjadi dasar pengembangan sistem pada penelitian ini. Tabel 1.1 menyajikan ringkasan penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar dalam menentukan posisi serta kontribusi penelitian yang dikembangkan.

Tabel 1. 1 Kajian terdahulu.

No	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
1	Miznan Huda et al.	2022	<i>Screening</i> Kualitas Minyak Transformator Berbasis <i>Breakdown Voltage</i> , <i>Partial Discharge</i> , dan IoT
2	Hoppe K. Mubarak	2022	Analisis Pengaruh Proses Purifikasi terhadap Kualitas Minyak Transformator
3	Agus Siswanto et al.	2022	Analisis Kualitas Transformator Berdasarkan <i>Dissolved Gas Analysis</i> (DGA)

No	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian
4	Baratov et al.	2025	Capacitive Sensor System for <i>Measuring Moisture Content in Transformer Oil</i>
5	Markis et al.	2025	<i>Moisture Measurement in Transformer Oil Using Sensor-Based and Computational Modelling Approaches</i>

Penelitian mengenai kualitas minyak transformator telah dilakukan dengan berbagai pendekatan. Salah satunya adalah penelitian [11] yang mengembangkan sistem pemantauan kualitas minyak transformator berbasis pengukuran *Breakdown voltage* (BDV) dan *partial discharge* (PD) yang terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu minyak dari 24°C hingga 120°C menyebabkan penurunan signifikan nilai BDV yang mengindikasikan degradasi kualitas isolasi minyak transformator. Temuan tersebut menunjukkan bahwa suhu merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi kualitas minyak transformator. Meskipun demikian, penelitian tersebut lebih berfokus pada parameter listrik dan sistem *screening* online sehingga kurang sesuai untuk kebutuhan *screening* berbasis sifat fisik minyak.

Selain melalui parameter listrik, upaya peningkatan dan evaluasi kualitas minyak transformator juga dilakukan melalui proses purifikasi dan filtrasi. Penelitian [9] menunjukkan bahwa proses pemanasan dan penyaringan (*filtering*) mampu meningkatkan nilai tegangan tembus minyak hingga memenuhi standar IEC 60296, terutama melalui pengurangan kandungan air di dalam minyak. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kadar air merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas minyak transformator. Namun, penelitian ini lebih menitikberatkan pada proses perbaikan kualitas minyak dibandingkan pengembangan metode *screening* untuk menilai kualitas minyak sebelum dilakukan pemurnian.

Pendekatan lain yang banyak digunakan untuk mendiagnosis kualitas transformator adalah *Dissolved Gas Analysis* (DGA). Penelitian [10] menunjukkan

bahwa peningkatan konsentrasi gas terlarut tertentu, seperti hidrogen dan asetilena, dapat digunakan untuk mengidentifikasi gangguan termal maupun elektrik pada transformator. Metode ini mampu memberikan informasi diagnostik yang menunjukkan kesesuaian mengenai kualitas internal transformator. Akan tetapi, penerapan DGA masih memerlukan peralatan laboratorium khusus serta proses analisis yang relatif kompleks sehingga kurang praktis digunakan sebagai metode *screening* cepat di lapangan.

Seiring berkembangnya teknologi sensor, penelitian mulai mengarah pada pemanfaatan sensor fisik untuk memantau kualitas minyak transformator secara lebih sederhana. Penelitian [11] mengembangkan sistem sensor kapasitif untuk *screening* kandungan air dalam minyak transformator melalui perubahan permitivitas dielektrik akibat variasi kadar air. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan linier antara perubahan kapasitansi sensor dan konsentrasi air dalam minyak sehingga memungkinkan pemantauan kadar air secara *real-time*. Meskipun efektif, sistem tersebut hanya berfokus pada satu parameter yaitu kandungan air.

Untuk meningkatkan akurasi pengukuran, penelitian [12] kemudian mengombinasikan sensor kapasitif dengan parameter dielektrik seperti *breakdown voltage* (BDV), *dielectric loss factor* ($\tan \delta$), serta pemodelan komputasi menggunakan metode regresi dan *Artificial Neural Network* (ANN). Pendekatan tersebut mampu menghasilkan estimasi kadar air dengan tingkat akurasi yang tinggi dibandingkan metode referensi *Karl Fischer Titration*. Namun, sistem yang dikembangkan masih memerlukan proses pengukuran, kalibrasi, dan pengolahan data yang relatif kompleks sehingga kurang praktis diterapkan sebagai metode *screening* yang cepat dan sederhana.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu yang telah dibahas, dapat diketahui bahwa berbagai metode telah dikembangkan untuk mengevaluasi kualitas minyak transformator, baik melalui pengujian laboratorium maupun sistem berbasis sensor. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan yang berbeda, terutama dari aspek akurasi, kompleksitas peralatan, biaya, serta kemudahan penerapan di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan suatu metode yang mampu

memberikan informasi awal kualitas minyak transformator secara cepat, praktis, dan mudah digunakan sebagai alat *screening* . Perbandingan antara penelitian terdahulu dan penelitian yang diusulkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.2.

Tabel 1. 2 Perbandingan metode evaluasi kualitas minyak transformator.

Penelitian	Keunggulan	Keterbatasan
BDV	Akurat	Tidak portabel
DGA	Diagnosis detail	Mahal
Karl Fischer	Akurat mengukur moisture	Pengujian laboratorium
Penelitian ini	<i>Screening</i> , portabel, multi-sensor	Belum menggantikan pengujian laboratorium

Berdasarkan Tabel 1.1 dapat dilihat bahwa metode *Breakdown Voltage* (BDV) memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam mengevaluasi kualitas minyak transformator, namun memerlukan peralatan khusus dan kurang praktis untuk digunakan di lapangan. Metode *Dissolved Gas Analysis* (DGA) mampu memberikan informasi diagnostik yang lebih rinci terkait gangguan internal transformator, tetapi membutuhkan biaya pengujian yang relatif tinggi. Sementara itu, metode *Karl Fischer Titration* memiliki kemampuan yang baik dalam mengukur kandungan air pada minyak transformator, namun hanya dapat dilakukan menggunakan peralatan laboratorium.

Berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini mengembangkan sistem *screening* kualitas minyak transformator berbasis multi-sensor yang mengintegrasikan parameter suhu, tingkat kekeruhan, dan kelembapan relatif (*Relative Humidity*/RH) pada ruang *headspace*. Ketiga parameter tersebut diproses menggunakan algoritma *Rule-Based Classification* untuk menghasilkan klasifikasi kondisi minyak transformator secara cepat dan mudah dipahami. Hasil klasifikasi kemudian divalidasi menggunakan pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) sebagai metode referensi, sehingga sistem yang dikembangkan diharapkan dapat menjadi alternatif alat bantu *screening* yang praktis dan portabel.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem *screening* kualitas minyak transformator berbasis multi-sensor fisik menggunakan parameter suhu, kekeruhan, dan kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) pada ruang *headspace*?
2. Bagaimana kesesuaian hasil *screening* kualitas minyak transformator berdasarkan parameter suhu, kekeruhan, dan kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) pada ruang *headspace* terhadap hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) sebagai metode referensi?

1.4 Tujuan dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Merancang sistem *screening* kualitas minyak transformator berbasis multi-sensor fisik menggunakan sensor suhu DS18B20, *turbidity* sensor, dan sensor kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) SHT31.
2. Mengevaluasi kesesuaian hasil *screening* kualitas minyak transformator berdasarkan parameter suhu, tingkat kekeruhan, dan kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) pada ruang *headspace* terhadap hasil pengujian *Breakdown Voltage* (BDV) sebagai metode referensi.

1.4.2 Manfaat

A. Manfaat Akademik

1. Memberikan referensi empiris mengenai penerapan pendekatan multi-sensor dalam *screening* kualitas minyak transformator.
2. Memberikan informasi ilmiah mengenai pemanfaatan metode *headspace* berbasis sensor kelembapan relatif (*Relative Humidity/RH*) sebagai indikator awal keberadaan uap air pada minyak transformator.
3. Menyediakan data pengukuran lapangan menggunakan minyak transformator yang telah digunakan dalam operasi, yang selama ini jarang digunakan pada penelitian terdahulu.

B. Manfaat Praktis

1. Memberikan perangkat *screening* yang dapat digunakan teknisi untuk menilai kualitas minyak transformator sebelum dilakukan pengujian laboratorium.
2. Mendukung proses pengambilan keputusan pemeliharaan, seperti filtrasi, pengujian lanjutan, atau tindakan perawatan lainnya, berdasarkan indikasi hasil pembacaan sensor.
3. Mempercepat proses *screening* lapangan karena teknisi dapat melihat indikasi awal kualitas minyak secara langsung melalui hasil pembacaan sensor.
4. Berpotensi menjadi alat bantu dalam mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi (*Condition-Based Maintenance/CBM*) pada proses servis transformator.

1.5 Batasan Masalah

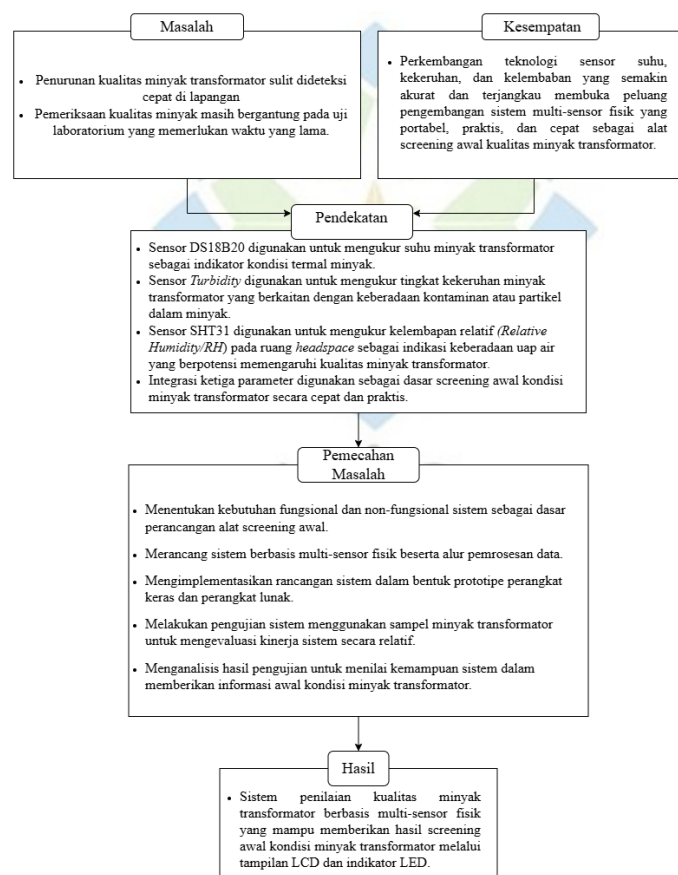
Penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

1. Parameter yang dikaji dibatasi pada tiga variabel, yaitu suhu sampel minyak transformator, tingkat kekeruhan minyak, dan indikasi keberadaan uap air pada ruang *headspace*. Parameter lain seperti viskositas, kandungan gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis/DGA*), dan kandungan asam tidak dianalisis secara langsung.
2. Jenis sensor yang digunakan dibatasi pada DS18B20 (suhu), *turbidity* sensor (kekeruhan), dan SHT31 (kelembapan *headspace*). Sensor alternatif dengan fungsi serupa tidak dibahas.
3. Pengukuran suhu menggunakan sensor DS18B20 dilakukan terhadap sampel minyak yang diambil dari transformator yang sedang beroperasi. Pengukuran dilakukan setelah sampel minyak dikeluarkan dari transformator pada saat proses *screening*, sehingga nilai yang diperoleh merupakan suhu sampel minyak pada saat pengukuran dan tidak dimaksudkan untuk merepresentasikan secara langsung suhu minyak di dalam tangki transformator saat beroperasi.

4. Metode *screening* menggunakan pendekatan *headspace* alami, yaitu pengukuran uap air pada ruang gas sampel minyak transformator yang diambil dari transformator bertegangan dan diuji secara offline, tanpa perlakuan pemanasan buatan.
5. Pengukuran kelembapan *headspace* menggunakan sensor SHT31 tidak digunakan untuk menentukan kadar air absolut dalam minyak transformator, melainkan sebagai indikator relatif keberadaan uap air antar sampel minyak pada kualitas pengujian yang sama.
6. Pengujian sistem dilakukan menggunakan jumlah sampel minyak transformator yang terbatas sesuai dengan sampel yang tersedia pada penelitian ini.
7. Pengambilan data sensor *headspace* dilakukan setelah sampel didiamkan dalam wadah tertutup selama 5 menit untuk memberikan waktu stabilisasi pembacaan sensor sebelum pencatatan data.
8. Pengujian dilakukan pada sampel minyak transformator yang masih digunakan pada transformator distribusi dan memiliki kualitas fisik yang bervariasi. Minyak transformator baru maupun minyak sintetis tidak menjadi fokus pada penelitian ini.
9. Hasil pengukuran sistem hanya digunakan sebagai informasi *screening* kualitas minyak transformator dan bukan sebagai pengganti pengujian laboratorium seperti *Breakdown Voltage (BDV)*, *water content test*, maupun analisis kimia minyak transformator lainnya.
10. Output sistem dibatasi pada tampilan numerik melalui LCD dan indikator status menggunakan LED tanpa dilengkapi fitur penyimpanan data, komunikasi nirkabel, maupun sistem *Internet of Things (IoT)*.
11. Lingkup penelitian hanya mencakup kinerja alat, interpretasi pembacaan sensor, dan klasifikasi kualitas minyak transformator berdasarkan parameter yang digunakan, tanpa melakukan analisis kegagalan transformator secara menyeluruh.

1.6 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir ini menjadi landasan sistematis dalam menuntun proses penelitian agar berjalan secara terstruktur, terarah, dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai. Gambar 1.1 menunjukkan kerangka berpikir penelitian yang diawali dari identifikasi masalah, yaitu sulitnya *screening* cepat kualitas minyak transformator di lapangan, masih bergantungnya pemeriksaan pada pengujian laboratorium yang memerlukan waktu lama, serta belum tersedianya alat *screening* berbasis multi-parameter fisik minyak. Permasalahan ini menjadi dasar utama perlunya pengembangan sistem *screening* yang lebih praktis dan efisien.



Gambar 1. 1 Kerangka berpikir penelitian.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini disusun untuk memudahkan pembaca memahami alur penelitian secara keseluruhan. Adapun struktur penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini memuat latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, kerangka berpikir, serta sistematika penulisan. Pada bab ini juga disajikan kajian penelitian terdahulu yang digunakan untuk membangun dasar pemikiran, mengidentifikasi posisi penelitian, serta merumuskan celah penelitian yang akan dikaji.

BAB II Teori Dasar

Bab ini membahas teori, konsep, dan prinsip dasar yang mendukung penelitian, meliputi minyak transformator, degradasi minyak, parameter fisik minyak transformator, sensor yang digunakan, serta konsep metode *headspace*. Pembahasan pada bab ini berfungsi sebagai landasan teoritis dalam perancangan dan analisis sistem yang dikembangkan.

BAB III Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi pendekatan penelitian, tahapan penelitian, kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak, perancangan sistem, serta prosedur pengujian yang digunakan dalam penelitian.

BAB IV Perancangan dan Implementasi Sistem

Bab ini membahas proses perancangan dan implementasi sistem *screening* kualitas minyak transformator berbasis multi-sensor fisik. Pembahasan meliputi perancangan perangkat keras, perancangan perangkat lunak, diagram blok sistem, flowchart sistem, desain mekanik, wiring diagram, serta implementasi sistem yang telah direalisasikan.

BAB V Pengujian dan Analisis

Bab ini menyajikan hasil pengujian sistem menggunakan sampel minyak transformator serta analisis terhadap data hasil pengujian. Pembahasan meliputi evaluasi kinerja sensor, hasil *screening* kualitas minyak transformator, serta analisis hubungan antar parameter pengukuran yang digunakan dalam sistem.

BAB VI Penutup

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran untuk pengembangan penelitian dan sistem pada masa yang akan datang.