

**RANCANG BANGUN DAN ANALISIS SISTEM *MONITORING* SUHU
MINYAK TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN SERAT OPTIK**

(Skripsi)

Oleh :

IMANDO MANURUNG

2155031006



PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

BANDAR LAMPUNG

2025

ABSTRAK

RANCANG BANGUN DAN ANALISIS SISTEM *MONITORING* SUHU MINYAK TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN SERAT OPTIK

Oleh

IMANDO MANURUNG

Transformator merupakan salah satu elemen krusial dalam jaringan distribusi listrik yang memerlukan pemantauan rutin terhadap kondisi operasionalnya, terutama terkait suhu minyak isolasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem pemantauan suhu minyak transformator dengan memanfaatkan teknologi sensor berbasis serat optik. Serat optik dipilih karena memiliki keunggulan seperti ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik, kecepatan transmisi data yang tinggi, serta kepekaan terhadap perubahan optik akibat fluktuasi suhu. Sistem monitoring ini dikembangkan dengan menggunakan Arduino Uno R3 sebagai pusat pengendali, serta modul LDR yang berfungsi sebagai sensor intensitas cahaya yang dipengaruhi oleh perubahan viskositas dan indeks bias minyak seiring dengan peningkatan suhu. Tiga jenis sampel minyak dengan kondisi berbeda digunakan dalam pengujian untuk menilai tingkat akurasi sensor. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa sistem pemantauan suhu berbasis serat optik ini memberikan respons linier terhadap perubahan suhu, dengan sensitivitas yang bergantung pada kondisi masing-masing minyak. Temuan ini menunjukkan bahwa metode yang dikembangkan mampu memantau perubahan suhu dan kualitas minyak isolasi transformator secara *real-time* secara efektif.

Kata Kunci: transformator, suhu minyak, serat optik, viskositas, sensor optik, Arduino

ABSTRACT
DESIGN AND ANALYSIS OF TRANSFORMER OIL TEMPERATURE
MONITORING SYSTEM USING OPTIC FIBER

By

IMANDO MANURUNG

Transformers serve as essential elements within electrical power distribution networks, necessitating regular monitoring of their operational parameters, particularly the temperature of the insulating oil. This research focuses on the design and evaluation of a transformer oil temperature monitoring system utilizing fiber optic-based sensors. Fiber optics are selected for their immunity to electromagnetic interference, rapid data transmission capabilities, and heightened sensitivity to optical variations induced by temperature fluctuations. The monitoring system employs an Arduino Uno R3 as the central controller, coupled with an LDR module that measures light intensity changes resulting from variations in the oil's viscosity and refractive index. To assess sensor accuracy, three transformer oil samples under different conditions were examined. The experimental results reveal that the fiber optic-based system exhibits a linear response to rising temperatures, with sensitivity levels contingent upon the oil's condition. The findings validate the system's capability for real-time temperature detection and effective evaluation of transformer oil quality.

Keywords: transformer, oil temperature, fiber optic, viscosity, optical sensor, Arduino.

**RANCANG BANGUN DAN ANALISIS SISTEM *MONITORING* MINYAK
TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN SERAT OPTIK**

Oleh

IMANDO MANURUNG

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2025

Judul Skripsi

: RANCANG BANGUN DAN ANALISIS
SISTEM *MONITORING* SUHU MINYAK
TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN
SERAT OPTIK

Nama Mahasiswa : Imando Manurung

Nomor Pokok Mahasiswa : 2155031006

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Herman Halomoan S, S.T., M.T.
NIP. 197111301999031003

Ir. Noer Soedjarwanto, M.T
NIP. 196311141999031001

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro
Elektro

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001

Ketua Prodi Studi Teknik

Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

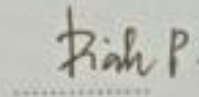
Ketua : Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.



Sekretaris : Ir. Noer Soedjarwanto, M.T



Penguji : Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T.



Bukan Pembimbing

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 1
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 19 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Imando Manurung

Npm : 2155031006

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi saya yang berjudul, "RANCANG BANGUN DAN ANALISIS SISTEM *MONITORING* SUHU MINYAK TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN SERAT OPTIK"

merupakan asli penelitian saya. Pada skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 Juni 2025



Imando Manurung
NPM.2155031006

Riwayat Hidup



Penulis lahir di Bandar Lampung, Lampung pada tanggal 04 Juni 2003. Penulis merupakan anak sulung dari pasangan Jamarosen Manurung, S.T. dan Melda Sinaga, S.Si. Riwayat Pendidikan penulis diawali dari TK Xaverius Way Halim Bandar Lampung (2008 – 2009), SD Xaverius 3 Way Halim Bandar Lampung (2009 – 2015), SMP Xaverius 4 Way Halim Bandar Lampung (2015 – 2018), SMAN 12 Bandar Lampung (2018 – 2021).

Penulis menjadi mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung pada tahun 2021, melalui jalur SMMPTN. Selama menjadi mahasiswa, penulis berkesempatan dan menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik 2023, dan menjadi asisten Praktikum Dasar Tenaga Listrik, Praktikum Mesin – mesin listrik, dan Praktikum Elektronika Daya. Penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi intra kampus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATRO) sebagai anggota minat dan bakat selama 1 periode dan anggota komunikasi dan informasi selama 1 periode. Penulis pernah melakukan kerja praktik pada PT. PLN (Persero) ULTG Pagelaran dan mengangkat judul “ Analisis Kelayakan *Capacitive Voltage Transformer* (CVT) Bay Penghantar Natar 1 Pada Gardu Induk Langkapura 150 Kv PT. PLN (Persero)” pada tahun 2024.

Halleluya, Terpujilah Tuhan Yesus Kristus

Karya ini kupersembahkan kepada

Kedua Orang Tua Terkasih

Jamarosen Manurung, S.T. dan Melda Sinaga, S.Si.

Beserta kedua adik terkasih

Ignasius Sahat Martahan Manurung & Maxwell Manurung

Yang senantiasa tiada henti memberikan semua hal terbaik demi putranya untuk
mencapai kesuksesan

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater

MOTTO

"Firman-Mu itu pelita bagi kakiku dan terang bagi jalanku."

(Mazmur 119 :105)

"Aku bersyukur kepada-Mu oleh karena kejadianku dahsyat dan ajaib; ajaib apa yang Kau Buat, dan jiwaku benar-benar menyadarinya."

(Mazmur 139 :14)

"Serahkanlah hidupmu kepada TUHAN dan percayalah kepada-Nya, dan Ia akan bertindak."

(Mazmur 37 :5)

"Hendaklah kamu selalu rendah hati, lemah lembut, dan sabar. Tunjukkanlah kasihmu dalam hal saling membantu."

(Efesus 4 :2)

"Rendahkanlah dirimu di hadapan Tuhan, dan Ia akan meninggikan kamu."

(Yakobus 4 : 10)

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat, karunia, dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul "**Rancang Bangun dan Analisis Sistem Monitoring Suhu Minyak Transformator Menggunakan Serat Optik**" ini sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini tidak akan berjalan dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Yesus Kristus yang telah memberikan kita nafas kehidupan kepada kita, semua sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
2. Kepada orang tua dan adik, yang selalu memberikan doa, dukungan dan kasih sayang kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.
3. Desta Charolyn Sose, yang memberikan semangat, motivasi, dan dukungan tukar pikiran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., Dosen Pembimbing yang telah membimbing, mengarahkan, serta memberikan masukan yang sangat berharga selama penyusunan skripsi ini.
7. Noer Soedjarwanto, Ir., M.T., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan masukan dan saran untuk penyempurnaan skripsi ini.
8. Dr. Eng. Diah Permata, S.T., M.T., selaku dosen penguji yang turut memberikan kritik dan saran yang membangun dalam proses penyusunan skripsi ini.
9. Seluruh dosen dan staf Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, bimbingan, serta bantuan selama penulis menempuh pendidikan.
10. Mahendra, Rijal, Serly sebagai teman sepembimbingan yang senantiasa memberikan dukungan dan semangat dalam penulisan skripsi ini.

11. TEAM ROGER (Agung, Pandu Okta, Tegar, Dapa, Akbar, Wahyu, Rafli)terimakasih sudah selalu memberikan kata kata sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Bapak Andry Asmara dan Pihak lainnya dalam PT . PLN (Persero) UPT Tanjung Karang, yang telah membantu dalam penyediaan bahan minyak isolasi transformator untuk penelitian dalam skripsi ini.
13. Rekan-rekan seperjuangan di Teknik Elektro 2021, khususnya sahabat-sahabat terdekat yang senantiasa memberikan dukungan, bantuan, dan kebersamaan selama masa perkuliahan dan penyusunan skripsi ini.
14. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, namun telah membantu secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan dan penyempurnaan di masa yang akan datang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta dapat menjadi referensi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya dalam bidang monitoring sistem suhu berbasis serat optik pada transformator.

Bandar Lampung, 19 Juni 2025
Penulis

Imando Manurung
NPM. 2155031006

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	2
DAFTAR ISI	15
DAFTAR GAMBAR	17
DAFTAR TABEL	18
BAB I PENDAHULUAN	19
1.1 Latar Belakang	19
1.2 Rumusan Masalah	20
1.3 Batasan Masalah	20
1.4 Tujuan Penelitian	20
1.5 Manfaat Penelitian	21
1.6 Sistematika Penulisan	21
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	23
2.1 Pemanasan pada Transformator	23
2.2 Sistem Pendingin Transformator	24
2.3 Pengukuran Suhu Minyak Isolasi	26
2.4 Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Isolasi	29
2.5 Penggunaan Serat Optik Untuk Mengukur Suhu	32
2.6 Mikrokontroler	35
BAB III METODE PENELITIAN	38
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2 Diagram Blok Perancangan Sistem	38
3.3 Metode Penelitian	42
3.4 Diagram Alir Penelitian	49
3.5 Diagram Alir Sistem	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	Error! Bookmark not defined.
4.1 Desain Pengukuran Suhu Minyak Isolasi	Error! Bookmark not defined.
4.2 Proses Pengolahan Data	Error! Bookmark not defined.
4.3 Hasil Percobaan	Error! Bookmark not defined.
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1 Kesimpulan	53

5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian – bagian pada transformator distribusi	23
Gambar 2.2 Pemasangan termokopel tipe K pada tabung chamber	27
Gambar 2.3 Salah satu model perangkat OTI konvensional	28
Gambar 2.4 Wujud dari minyak isolasi berbahan nabati dalam gelas ukur	31
Gambar 2.5 Mikrokontroler jenis Arduino Uno R3 yang digunakan untuk sebagai proses konversi sinyal analog menjadi digital	35
Gambar 3.1 Rancangan model pengukuran suhu minyak isolasi dengan sensor optik	38
Gambar 3.2 Laptop digunakan untuk pengolahan data	38
Gambar 3.3 Mikrokontroler jenis Arduino Uno R3	39
Gambar 3.4 Modul LDR difungsikan menjadi tempat penerimaan (Receiver) cahaya laser ...	40
Gambar 3.5 Laser diode digunakan untuk sebagai sumber cahaya menuju fiber optik	40
Gambar 3.6 Penggunaan serat optik yang difungsikan menjadi sensor	41
Gambar 3.7 Penyediaan sampel minyak isolasi untuk memperbanyak variasi	42
Gambar 3.8 Sampel Minyak Isolasi NYNAS	43
Gambar 3.9 Skematik sensor optik yang didesain dengan Fritzzing	44
Gambar 3.10 Perancangan serat optik (core) yang dijepit dengan papan akrilik	45
Gambar 3.11 Sensor serat optik terendam dalam minyak isolasi	45
Gambar 3.12 Diagram Alir Penelitian	49
Gambar 3.13 Diagram Alir Sistem	51
Gambar 4.1 Rangkaian pengukuran suhu minyak Isolasi menggunakan sensor optik	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.2 Rangkaian Sistem alat ukur suhu berbasis sensor optik Arduino	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.3 Hasil pengukuran nilai ADC dan tegangan menggunakan serial	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.4 Grafik minyak isolasi sampel 1	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.5 Grafik perubahan tegangan terhadap kenaikan suhu pada minyak isolasi sampel 2	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.6 Grafik perubahan tegangan terhadap kenaikan suhu pada minyak isolasi sampel 3	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.7 Grafik gabungan tiga sampel minyak isolasi	Error! Bookmark not defined.

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil pengukuran tegangan keluaran sensor optik pada sampel 1 . **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.2 Hasil pengukuran Tegangan keluaran sensor optik pada minyak isolasi sampel 2 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.3 Data Hasil pengukuran Tegangan keluaran sensor optik
pada minyak isolasi sampel 3 **Error! Bookmark not defined.**

Tabel 4.4 Data Hasil pengukuran suhu sensor optik pada ketiga sampel minyak isolasi **Error! Bookmark not defined.**

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator adalah komponen penting dalam sistem pengiriman listrik yang berfungsi untuk menyesuaikan tingkat tegangan sesuai dengan kebutuhan pengguna. Salah satu hal yang sangat penting dalam menjalankan transformator adalah suhu minyak isolasi, karena memainkan peran besar dalam menjaga kinerja dan ketahanan transformator. Selain berfungsi mendinginkan, minyak transformator juga berperan sebagai pengisolasi listrik. Karena itu, memantau suhu minyak secara terus-menerus sangat penting untuk mencegah terjadinya panas berlebih yang bisa menyebabkan kerusakan permanen pada peralatan.

Suhu pada transformator bisa menunjukkan bagaimana kondisi keseluruhan alat tersebut. Kalau suhu minyak isolasinya naik, itu bisa mempercepat kerusakan atau penuaan pada bagian isolasinya. Suhu yang tinggi ini bisa muncul karena adanya titik panas di isolasi, gangguan di bagian bushing, atau karena aliran minyak yang kurang lancar, sehingga suhu di bagian atas dan bawah jadi berbeda jauh. Karena itu, penting untuk memantau suhu minyak isolasi secara langsung dan terus-menerus lewat sistem pemantauan online, supaya transformator tetap berjalan dengan aman.

Secara konvensional pengukuran suhu transformator dilakukan dengan alat ukur suhu tradisional, yang berfungsi untuk menunjukkan kondisi transformator sekaligus memberikan sinyal jika terjadi panas berlebih sebagai bagian dari sistem proteksinya. Namun, saat ini sudah banyak digunakan sensor suhu elektronik yang dinilai lebih akurat dibandingkan alat ukur lama.

Saat ini, teknologi pengukuran suhu pada transformator telah mengalami perkembangan signifikan melalui pemanfaatan sensor berbasis serat optik. Sensor jenis ini telah banyak diaplikasikan untuk mengukur suhu berbagai jenis fluida. Teknologi serat optik memungkinkan deteksi perubahan cahaya yang terjadi akibat pengaruh parameter fisik, organik, kimia, maupun faktor eksternal lainnya. Keunggulan utama dari sensor serat optik terletak pada kapasitas bandwidth yang tinggi, sehingga mendukung kecepatan transmisi data yang lebih baik dibandingkan kabel tembaga konvensional. Selain itu, sensor ini juga memiliki ketahanan terhadap gangguan elektromagnetik (EMI) dan interferensi frekuensi radio (RFI),

yang umumnya menjadi kendala dalam sistem komunikasi nirkabel..

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Mengetahui efek panas pada minyak isolasi transformator?
2. Seberapa akurat dan responsif sistem monitoring yang dirancang dalam mendeteksi perubahan suhu minyak pada transformator?
3. Bagaimana sistem kerja dari serat optik untuk mengidentifikasi keadaan buruknya minyak isolasi berdasarkan tegangan keluaran sensor optik?

1.3 Batasan Masalah

Adapun Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

4. Pengukuran berfokus kepada kondisi minyak yang sudah diketahui kondisinya dan tegangan keluaran sensor sebagai indikator kalibrasi. Tidak mengukur temperatur efek suhu belitan trafo.
5. Penelitian ini hanya akan fokus pada pengukuran suhu minyak transformator dan tidak memperhitungkan parameter lain efek tekanan, aliran, dan unsur eksternal lainnya.
6. Penelitian hanya memfokuskan pada pembacaan intensitas cahaya atau tegangan keluaran photodiode. Pengolahan data lebih lanjut, seperti analisis spektrum atau panjang gelombang cahaya, tidak dilakukan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

7. Mengembangkan sistem monitoring suhu minyak transformator yang menggunakan teknologi serat optik sebagai sensor suhu untuk meningkatkan akurasi pengukuran dan ketahanan terhadap lingkungan yang ekstrem.

8. Merancang dan mengimplementasikan mikrokontroler Arduino sebagai pusat pengendalian dan pengolahan data suhu dari sensor serat optik agar sistem dapat beroperasi secara otomatis dan efisien.
9. Menguji performa dan akurasi sistem monitoring dalam mendeteksi perubahan suhu minyak transformator secara real-time untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi operasional.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

10. Mengetahui bahwa sensor optik dapat memberikan informasi pada keadaan struktur minyak isolasi dari warna dan viskositas dari minyak isolasi transformator
11. Memahami hubungan antara tegangan dan kenaikan suhu minyak isolasi dari perubahan viskositas minyak isolasi tersebut.
12. Memberikan inovasi baru bahwa suhu dari suatu fluida dapat memberikan indikasi bahwa sifat optik dari minyak sudah mengalami kerusakan melalui perubahan tegangan dari sensor optik.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan Laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I PENDAHULUAN

Pada pendahuluan terdapat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, hipotesis dan sistematika penulisan.

BAB II TINJUAN PUSTAKA

Pada tinjauan pustaka berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian ini.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada metode penelitian terdapat waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, metode yang akan digunakan, serta diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil dan pembahasan terdapat hasil penelitian serta analisis hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V PENUTUP

Pada penutup terdapat rangkuman akhir atau kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan pembahasan serta saran untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

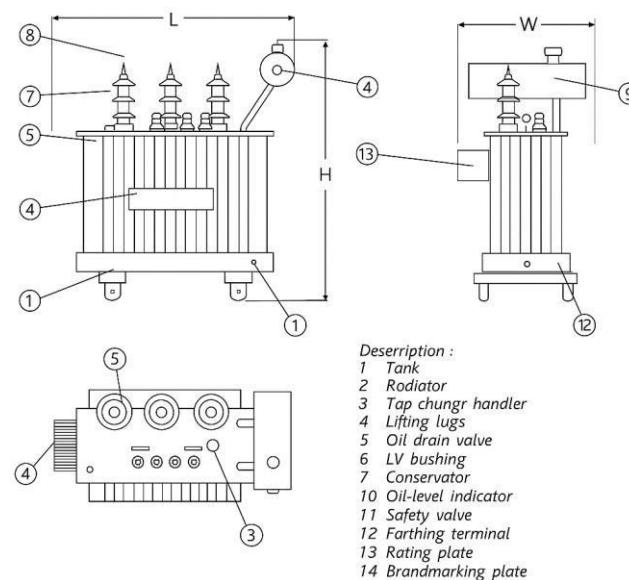
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Sistem isolasi pada transmisi tenaga listrik memegang peranan penting dalam menjaga kinerja dan keandalan peralatan listrik. Kualitas minyak isolasi sangat dipengaruhi oleh suhu dan tingkat viskositas (kekentalan) dari minyak itu sendiri. Oleh karena itu, untuk mempertahankan performa optimal minyak isolasi, diperlukan sistem pemantauan suhu yang mengandalkan parameter fisik minyak sebagai indikator. Pada penelitian ini, serat optik digunakan sebagai media pemantauan untuk mendeteksi suhu dan viskositas minyak isolasi pada transformator yang sedang mengalami proses pemanasan.

2.1 Pemanasan pada Transformator

Transformator merupakan salah satu komponen utama dalam sistem transmisi energi listrik. Dalam sistem transmisi dan distribusi, transformator berfungsi untuk menyesuaikan tingkat tegangan. Transformator distribusi (gambar 2.1) berperan dalam



Gambar 2.1 Bagian – bagian pada transformator distribusi [1]

menurunkan tegangan tinggi menjadi tegangan rendah sebelum dialirkan ke konsumen. Prinsip kerja transformator didasarkan pada arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada sisi primer, menghasilkan medan magnet yang kemudian

menginduksi tegangan pada lilitan primer dan sekunder. Pada pengoperasiannya, transformator distribusi diharapkan memiliki efisiensi kerja yang tinggi untuk memenuhi kebutuhan beban. Namun, efisiensi ini tidak sepenuhnya mencapai 100% karena adanya kerugian pada inti besi yang menyebabkan timbulnya panas pada transformator.

Peningkatan suhu pada transformator juga dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan yang ekstrem. Selain itu, beban berlebih yang diterima transformator serta proses konversi arus listrik juga merupakan faktor umum yang memicu peningkatan suhu. Dampak dari kondisi ini antara lain penurunan kinerja transformator, berkurangnya umur operasional, serta menurunnya kualitas sistem isolasi akibat percepatan proses degradasi..

Penelitian yang dilakukan oleh Krestovel Alvian Kodoati, dkk. (2015) menganalisis pengaruh pembebanan pada penyulang. Hasil studi menunjukkan bahwa transformator distribusi mengalami beban hingga 100%, yang menyebabkan terbentuknya titik panas pada belitan mencapai suhu 98°C, dengan kondisi suhu lingkungan berkisar antara 20°C hingga 40°C. Berdasarkan hasil perhitungan, ditemukan bahwa umur pakai transformator berkurang antara 3 hingga 5 jam per hari. Jika dibandingkan dengan standar SPLN D3.002-1:2007, penurunan harian umur pakai transformator tidak boleh melebihi 24 jam [1].

Temuan dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberadaan titik panas dapat mempercepat penurunan umur pakai transformator dan mengurangi efisiensinya. Oleh karena itu, untuk meminimalkan risiko kerusakan akibat panas berlebih, diperlukan sistem pendinginan pada transformator.

2.2 Sistem Pendingin Transformator

Sistem pendinginan transformator memegang peran penting dalam menunjang efisiensi transmisi daya listrik. Transformator yang bekerja pada beban tinggi dan dalam jangka waktu yang lama akan menghasilkan panas yang cukup signifikan, sehingga kualitas sistem isolasi sebagai media isolator dapat menurun.

Suhu tinggi pada minyak isolasi dapat menyebabkan penurunan daya tahan isolasi, baik pada minyak itu sendiri maupun komponen lain dalam transformator. Hal ini dibuktikan melalui penelitian oleh Dedi Nugroho (2010) yang meneliti

Suhu tinggi memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai tegangan tembus minyak isolasi. Selain itu, keberadaan partikel-partikel di dalam minyak juga turut memengaruhi hasil pengujian tersebut. Berdasarkan pengamatan, pada suhu 30°C tegangan tembus minyak tercatat sebesar 59 kV. Namun, ketika suhu meningkat hingga 70°C, terjadi penurunan tajam pada tegangan tembus, yakni menjadi hanya 24,2 kV. Hal ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu secara langsung dapat menurunkan kemampuan isolasi listrik dari minyak. [2]. Oleh karena itu, diperlukan pemeliharaan berkala pada minyak isolasi untuk mencegah kegagalan isolasi akibat suhu tinggi.

Salah satu metode pendinginan transformator yang paling umum digunakan adalah melalui pemanfaatan minyak isolasi. Ketika transformator beroperasi pada beban maksimum, panas yang dihasilkan oleh belitan akan diserap oleh minyak isolasi di sekitarnya. Untuk mempercepat proses pelepasan panas dari minyak tersebut, sistem pendinginan biasanya dilengkapi dengan kipas guna meningkatkan efisiensi pendinginan.

Penelitian yang dilakukan oleh Apriliana dan Ulinuha Latifa (2024) menganalisis sistem pendinginan transformator step-up pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Sistem pendingin yang diterapkan merupakan tipe OFAF (Oil Forced Air Forced). Pada sistem ini, sirkulasi minyak dilakukan secara paksa menggunakan enam unit pompa, masing-masing dengan daya 2,2 kW. Proses pendinginan diperkuat oleh 16 unit kipas yang dilengkapi motor berdaya 1,5 kW per unit. Seluruh sistem pendinginan ini bekerja secara otomatis dan terintegrasi dengan Winding Temperature Indicator (WTI), di mana pompa akan aktif saat suhu mencapai 55°C dan berhenti ketika suhu turun hingga 45°C. Sementara itu, pengoperasian kipas dikendalikan oleh Oil Temperature Indicator (OTI) dengan rentang suhu pengaturan yang sama. Keberadaan sistem pendingin ini berperan penting dalam menjaga performa transformator tetap stabil dan optimal. [3].

Penggunaan minyak isolasi sebagai media pendingin sekaligus isolator telah diaplikasikan sejak lama. Mengingat fungsinya yang sangat vital, diperlukan sistem pemantauan suhu minyak isolasi secara berkala. Akumulasi panas berlebih dapat mempercepat penurunan usia pakai minyak isolasi dan menurunkan kemampuan isolasinya, sehingga berdampak pada menurunnya efisiensi kerja transformator.

2.3 Pengukuran Suhu Minyak Isolasi

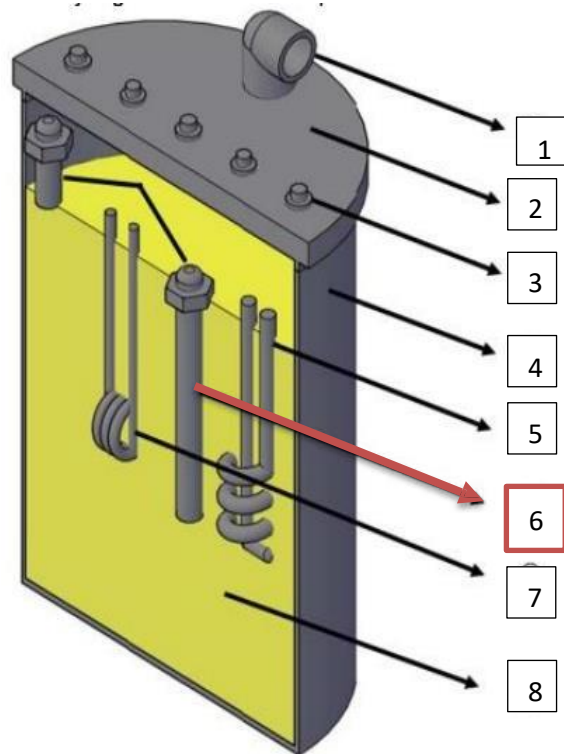
Pengukuran suhu minyak isolasi merupakan langkah penting dalam menjaga keandalan sistem transmisi tenaga listrik. Kenaikan suhu minyak isolasi menjadi indikator kapasitas beban transformator serta peningkatan suhu internal transformator. Berbagai peralatan dan metode telah dikembangkan untuk mengukur suhu minyak isolasi, di antaranya:

A. Termokopel

Termokopel terdiri dari dua jenis logam berbeda yang disambungkan pada salah satu ujungnya. Ketika sambungan tersebut dikenai pemanasan, ujung lainnya yang berada pada suhu referensi akan menghasilkan arus listrik dengan tegangan rendah (dalam skala miliVolt), yang merepresentasikan perubahan suhu. Tegangan yang dihasilkan ini selanjutnya dikonversi menjadi nilai suhu menggunakan acuan dari tabel standar kalibrasi. Beberapa jenis termokopel yang umum digunakan dalam industri meliputi:

1. Tipe K (*Chromel–Alumel*): cocok untuk suhu tinggi hingga 1.250°C.
2. Tipe J (*Iron–Constantan*): sesuai untuk pengukuran suhu menengah.
3. Tipe T (*Copper–Constantan*): stabil digunakan untuk suhu rendah.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Rahman Azis Prasajo, dkk., termokopel digunakan untuk mendeteksi perubahan suhu dalam proses penuaan minyak isolasi dengan media uji berupa minyak yang dipanaskan dalam ruang uji aluminium hingga mencapai suhu 150°C (gambar 2.2).



- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| 1. Pressure Valve | 5. Elemen heater |
| 2. Tutup tabung/chamber | 6. Thermocouple |
| 3. Terminal komponen | 7. Core carrier conductor |
| 4. Tabung | 8. Minyak isolasi transformator |

Gambar 2.2 Pemasangan termokopel tipe K pada tabung chamber [4]

Perangkat termokopel dipasang di dalam ruang uji (*chamber*) agar dapat secara langsung berinteraksi dan mengukur suhu minyak isolasi. Jenis termokopel yang digunakan dalam pengujian ini adalah tipe K. Sinyal listrik yang dihasilkan oleh termokopel digunakan sebagai referensi (*setpoint*) bagi elemen pemanas. Ketika suhu berada di bawah *setpoint*, elemen pemanas akan aktif; sedangkan jika suhu telah mencapai nilai pengujian, pemanas akan dimatikan. Pengaturan suhu ini dikendalikan dengan dua metode, yaitu sistem on/off atau pengaturan PID. Pemantauan suhu dilakukan selama 42 hari untuk meneliti proses penuaan kertas isolasi yang direndam dalam minyak mineral. Hasil pengujian menunjukkan bahwa termokopel mampu mempertahankan suhu pengujian pada 150°C dengan kestabilan $\pm 2^\circ\text{C}$ [4].

A. Thermography

Metode pengukuran suhu menggunakan thermography diterapkan sebagai bagian dari pendekatan pemeliharaan prediktif pada peralatan sistem transmisi listrik. Teknologi ini memanfaatkan kamera inframerah yang dapat mendeteksi keberadaan titik panas pada transformator tanpa memerlukan kontak fisik langsung dengan perangkat yang dipantau. Penelitian yang dilakukan oleh Subur Manullang, dkk. (2021), menggunakan kamera *thermography* untuk memantau area-area yang berpotensi mengalami peningkatan suhu. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa suhu harian dapat mencapai 83°C, yang disebabkan oleh beban operasi transformator serta pengaruh suhu lingkungan. Alat thermography ini berfungsi sebagai sistem deteksi dini untuk mengidentifikasi adanya gangguan titik panas, sehingga dapat membantu meningkatkan efisiensi kinerja transformator [5].

B. Oil Temperature Indicator (OTI)

Perangkat OTI berfungsi untuk memantau suhu minyak isolasi pada transformator. Pada versi konvensional, OTI menggunakan sistem analog dengan penunjuk jarum untuk menampilkan nilai parameter (gambar 2.3), namun memiliki kelemahan dalam hal kecepatan respons dan akurasi pengukuran. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Shafrida Sahrani, dkk. (2023), OTI diintegrasikan dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) melalui sistem *Data Acquisition* (DAQ) untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pemantauan suhu.



Gambar 2.3 Salah satu model perangkat OTI konvensional[6]

Perangkat yang digunakan dalam penelitian ini adalah OTI tipe *MESSKO BeTech* dengan sensor tipe TT. Alat ini mampu mengukur suhu dalam rentang 0°C hingga 150°C, dengan sinyal keluaran berupa arus 4–20 mA dan tegangan 0–5 V DC. Penelitian ini memanfaatkan *LoRaWAN Gateway* sebagai media pengiriman data jarak jauh. Prototipe sistem juga dilengkapi dengan komponen *Node-Red* yang berfungsi untuk mengirimkan peringatan jika suhu minyak isolasi terdeteksi melebihi 40°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa OTI yang diterapkan dalam sistem pemantauan suhu minyak isolasi ini memberikan akurasi pengukuran yang sebanding dengan OTI analog. Prototipe ini beroperasi hanya dengan daya sebesar 0,126 Watt. Integrasi IoT dalam sistem pemantauan suhu minyak isolasi ini membantu memperbaiki proses pengukuran dengan tingkat kesalahan yang sangat kecil [6].

Peningkatan suhu pada minyak isolasi mempengaruhi sifat fisiknya, khususnya viskositasnya. Viskositas minyak isolasi memiliki peran penting dalam sistem sirkulasi pendinginan transformator, karena berpengaruh pada kemampuan minyak dalam menyerap dan mengalirkan panas dari komponen transformator.

2.4 Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Isolasi

Perubahan suhu minyak isolasi dapat dipengaruhi oleh faktor internal maupun eksternal. Viskositas minyak berkorelasi langsung dengan suhu: semakin tinggi suhu, viskositas akan menurun sehingga memperbaiki kemampuan sirkulasi pendinginan, selama tetap berada dalam batas suhu yang direkomendasikan oleh standar.

Dalam penelitian Alfian Junaidi (2008), Hubungan antara suhu dan viskositas dianalisis dengan membandingkan dua jenis cairan, yaitu oli Mesran Super SAE 40 dan minyak isolasi transformator Diala B. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan suhu menyebabkan penurunan viskositas pada kedua jenis cairan tersebut, yang selanjutnya berkontribusi terhadap peningkatan nilai tegangan tembus. Namun, karena oli Mesran memiliki viskositas awal yang lebih tinggi, peningkatan tegangan tembus akibat kenaikan suhu berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan minyak Diala B. Temuan ini mengindikasikan bahwa minyak Diala B memiliki kemampuan sirkulasi yang lebih baik dan tetap mampu mempertahankan karakteristik isolasinya meskipun berada pada suhu tinggi. [7].

Dengan demikian, kenaikan suhu pada minyak isolasi menyebabkan penurunan kekentalan, sementara penurunan suhu justru meningkatkan viskositas. Minyak transformator berfungsi penting dalam menjaga suhu kerja transformator dengan peran ganda sebagai pendingin sekaligus isolator. Oleh karena itu, suhu minyak menjadi indikator penting dalam menilai kondisi operasi transformator. Jika suhu minyak terlalu tinggi, maka akan mempercepat degradasi kualitas minyak, menurunkan kemampuan isolasi, dan memperpendek umur transformator. Hubungan suhu dengan viskositas ini berkaitan dengan pergerakan molekul dalam minyak isolasi. Menurut penelitian Badaruddin dan Fery Agung Firdianto (2016), Kemampuan aliran minyak, yang ditunjukkan melalui viskositas kinematik, mencapai nilai maksimum sebesar 4,2 cSt pada suhu 20°C, dan menurun hingga kurang dari 2 cSt saat suhu meningkat menjadi 50°C. Viskositas kinematik merepresentasikan rasio antara tingkat kekentalan minyak terhadap pengaruh gaya gravitasi. Nilai viskositas kinematik yang tinggi menandakan minyak yang lebih kental, sehingga aliran pendinginan menjadi lebih lambat. Sebaliknya, jika viskositas terlalu rendah, hal tersebut dapat mempercepat degradasi minyak serta mengurangi efektivitas sistem isolasi pada transformator. [8]. Oleh sebab itu, diperlukan pengukuran viskositas yang akurat pada minyak isolasi transformator. Sebagai media isolasi cair, minyak mineral telah lama digunakan dalam sistem transmisi tenaga listrik karena harganya yang relatif murah dan ketersediaannya yang melimpah. Namun, penggunaan sumber daya tak terbarukan ini turut menimbulkan dampak lingkungan. Oleh sebab itu, minyak isolasi berbahan dasar nabati mulai dikembangkan karena sifatnya yang lebih ramah lingkungan serta memiliki titik nyala yang lebih tinggi. Meski demikian, terdapat perbedaan viskositas antara minyak mineral dan minyak nabati yang berpengaruh pada efektivitas sistem pendinginan transformator.

A. Pengujian Viskositas Minyak Nabati

Pengembangan minyak isolasi berbasis nabati telah banyak dilakukan dengan memanfaatkan bahan baku seperti minyak sawit (CPO), minyak jarak, serta minyak nabati lainnya. Meski memiliki kemampuan isolasi yang baik, minyak nabati memiliki kelemahan berupa viskositas yang relatif tinggi, kadar air yang cukup besar, dan tegangan tembus yang lebih rendah. Dalam penelitian

Rahmawati dkk. (2014), proses pembuatan minyak isolasi nabati umumnya dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu degumming, bleaching, deodorisasi, netralisasi, dan transesterifikasi.



Gambar 2.4 Wujud dari minyak isolasi berbahan nabati dalam gelas ukur[9]

Pengujian viskositas minyak jarak dilakukan sesuai dengan standar SPLN 49-1:1982 dan IEC 156. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan air dalam minyak jarak mencapai 2817,30 ppm, sementara standar IEC 156 menetapkan batas maksimum sebesar ≤ 40 ppm [9]. Temuan ini menunjukkan bahwa tingginya kadar air secara signifikan mempengaruhi penurunan viskositas dan menurunkan kemampuan minyak jarak sebagai media isolasi.

Kelebihan utama minyak isolasi nabati terletak pada tingginya titik nyala, namun masih diperlukan penelitian lanjutan untuk memastikan stabilitas minyak nabati dalam operasi isolasi dan pendinginan jangka panjang. Sebagai pembanding, minyak mineral digunakan karena telah lama diakui sebagai isolator yang baik.

B. Viskositas Pada Minyak Mineral

Minyak mineral telah menjadi bahan dasar utama dalam industri, berkat ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang baik sebagai isolator. Stabilitas viskositasnya menjadi faktor kunci dalam mempertahankan efektivitas pendinginan pada transformator demi menjaga performa operasionalnya. Salah satu jenis minyak isolasi berbasis mineral adalah Diala B. Dalam penelitian oleh Nirmalasari et al. (2022), dilakukan pengujian pengaruh viskositas terhadap

tegangan tembus pada minyak Diala B, baik dalam kondisi baru maupun bekas. Sampel dipanaskan untuk membandingkan pengaruh usia pakai minyak.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan suhu menurunkan viskositas. Pada minyak Diala B baru, viskositas turun dari 50,86 cSt pada suhu 28°C menjadi 22,26 cSt pada 88°C. Sementara itu, minyak Diala B bekas mengalami penurunan dari 51,41 cSt di 28°C menjadi 28,70 cSt di 88°C. Penurunan viskositas ini berkorelasi dengan peningkatan tegangan tembus. Untuk minyak baru, tegangan tembus meningkat dari 24,90 kV menjadi 46,43 kV, sementara pada minyak bekas meningkat dari 16,33 kV menjadi 37,26 kV. Dengan demikian, viskositas yang lebih rendah berkontribusi pada peningkatan kemampuan isolasi karena memperbaiki sirkulasi panas pada suhu tinggi [10].

Selain Diala B, jenis minyak isolasi mineral lainnya adalah NYNAS. Dalam penelitian Bhanunasmi Bahtiar Apta (2024), Penambahan nanopartikel dilakukan pada minyak isolasi NYNAS dengan tujuan untuk menstabilkan viskositasnya. Langkah ini menjadi penting mengingat minyak cenderung membentuk gelembung udara apabila terpapar suhu dan kelembapan tinggi, yang dapat berdampak pada penurunan tegangan tembus. Penambahan nanopartikel ferit (Fe_3O_4) berperan dalam memperbaiki distribusi medan listrik dan meningkatkan efisiensi pelepasan panas, sehingga mampu menurunkan risiko terjadinya pembakaran. Kehadiran nanopartikel ini terbukti mampu meningkatkan tegangan tembus hingga 10% melalui mekanisme pengikatan molekul air dalam minyak. Selain itu, penggunaan nanopartikel MgCl_2 dan NaCl juga memberikan pengaruh terhadap tegangan tembus karena sifat keduanya yang polar dan mudah larut dalam air, sehingga turut berperan dalam mengurangi kandungan kelembapan di dalam minyak isolasi. [11].

Viskositas merupakan indikator perubahan suhu, karena perubahan viskositas mencerminkan perubahan struktur fisik minyak akibat pergerakan molekulnya. Perubahan sifat optik akibat perubahan viskositas dapat dimanfaatkan untuk memonitor kondisi minyak sebagai media pengukur suhu.

2.5 Penggunaan Serat Optik Untuk Mengukur Suhu

Indeks bias merupakan salah satu parameter optik yang dapat dimanfaatkan untuk mengukur suhu suatu fluida. Pada minyak isolasi, peningkatan suhu menyebabkan viskositas menurun, yang secara bersamaan juga menurunkan nilai indeks bias.

Perubahan ini memengaruhi performa sistem optik dalam mendeteksi kondisi fluida.

Serat optik, yang tersusun dari material kaca atau polimer murni, memiliki kemampuan mentransmisikan data dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan kabel konvensional. Oleh karena itu, teknologi ini banyak digunakan dalam sistem komunikasi seperti jaringan internet, LAN, WAN, dan MAN. Prinsip kerja serat optik didasarkan pada fenomena pemantulan total internal, yang terjadi akibat perbedaan indeks bias antara inti (core) dan selubung luar (cladding) serat.

Teknologi serat optik juga dapat dimanfaatkan sebagai sensor melalui pengembangan sistem instrumentasi berbasis mikrokontroler. Salah satu penelitian oleh Febrielvianti et al. (2019), Pengembangan sensor kelembaban dilakukan dengan memanfaatkan serat optik berbasis polimer yang dilapisi material komposit $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ sebagai pengganti lapisan cladding pada sepanjang 1 hingga 5 cm bagian serat. Penambahan lapisan komposit ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan serat optik dalam menyerap uap air dari lingkungan sekitar. Dalam proses pengukuran, digunakan sinar laser sebagai sumber cahaya. Perubahan suhu maupun kelembaban akan memengaruhi intensitas cahaya yang diteruskan melalui serat, di mana penurunan intensitas tersebut akan diterima oleh fotodioda. Sinyal cahaya tersebut kemudian diubah menjadi sinyal listrik analog, yang selanjutnya dikonversi menjadi data digital oleh ADC pada mikrokontroler Arduino Uno. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengukuran suhu pada fluida cair dapat dilakukan melalui pemantauan perubahan indeks bias yang terjadi akibat pengaruh suhu dan kelembaban[12].

Pada cairan ataupun minyak ketika suhu fluida meningkat, molekul-molekulnya bergerak lebih bebas, sehingga viskositas menurun, dan indeks bias pun ikut menurun. Pendekatan serupa digunakan dalam penelitian Muhammad Yunus et al. (2018) Salah satu pendekatan yang digunakan untuk mengukur suhu adalah dengan memanfaatkan viskositas oli melalui metode hamburan balik (backscattering). Sistem sensor ini terdiri dari pemancar (transmitter) dan penerima (receiver), di mana cahaya dari laser diode berwarna merah dengan panjang gelombang 950 nm diarahkan ke permukaan oli. Cahaya yang dipantulkan oleh permukaan oli kemudian ditangkap oleh fotodetektor dan dikonversi menjadi sinyal tegangan melalui Optical Power Meter (OPM) Thorlabs PM100D.

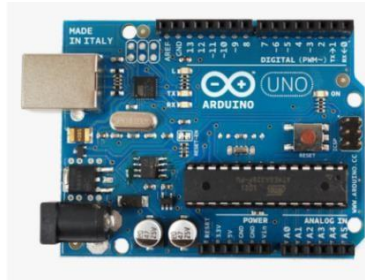
Variabel yang diuji dalam percobaan meliputi tingkat kekentalan oli (berkisar antara 270 hingga 350 mPa.s), jarak antara sensor dan cairan (0–1,2 cm), jarak antara transmitter dan receiver (1–3 cm), serta panjang serat optik yang dikupas cladding-nya (1–3 cm). Dari hasil pengujian diketahui bahwa serat optik tanpa lapisan cladding menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi karena intensitas interaksi cahaya dengan medium meningkat. Selain itu, semakin tinggi viskositas oli, maka nilai indeks bias juga meningkat, yang menyebabkan rugi-rugi daya cahaya yang dipantulkan menjadi lebih kecil [13]. Oleh karena itu, viskositas oli dapat digunakan sebagai indikator suhu.

Penelitian oleh Hazura Haroon et al. (2021) ini juga memanfaatkan serat optik jenis *single mode* berbahan dasar polimer (*Polymer Optical Fiber*), yang dikombinasikan dengan mikrokontroler untuk mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital. Hasil pengujian menunjukkan adanya hubungan linear antara kenaikan suhu dengan keluaran optik, yaitu sebesar 0,00973 dBm/°C atau setara dengan 0,14797 nW/°C. Selain itu, terjadi peningkatan tegangan keluaran sebesar 0,00110 V/°C. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan suhu yang menyebabkan perubahan viskositas pada fluida turut memengaruhi indeks biasnya, yang kemudian berdampak langsung terhadap performa optik sistem sensor [14].

Pemilihan metode pengupasan (insiasi) pada serat optik menjadi faktor kunci dalam keberhasilan pembuatan sensor optik, dengan dua terminal yaitu transmitter dan receiver. Pengupasan cladding pada bagian tengah serat yang tercelup ke dalam minyak memungkinkan interaksi langsung antara core serat optik dan media cair seperti minyak isolasi.

Perubahan indeks bias yang terjadi antara minyak isolasi dan serat optik menjadi landasan utama pengembangan sistem sensor optik. Dengan memanfaatkan perubahan intensitas cahaya akibat fluktuasi indeks bias, serat optik dapat berfungsi sebagai sensor suhu, di mana sinyal analog yang dihasilkan kemudian dikonversi menjadi sinyal digital menggunakan mikrokontroler.

2.6 Mikrokontroler



Gambar 2. 5 Mikrokontroler jenis Arduino Uno R3 yang digunakan untuk sebagai proses konversi sinyal analog menjadi digital[14]

Dalam proses pemantauan berbasis sensor optik, diperlukan perangkat pendukung, salah satunya adalah mikrokontroler yang berperan sebagai pusat pengendali sistem. Hazura Haroon et al. (2021) Dalam penelitiannya, dirancang sebuah sensor optik untuk mengukur suhu fluida dengan menggunakan Arduino Uno R3 (lihat Gambar 2.5) sebagai unit pengendali utama. Arduino menyediakan tegangan input sebesar 5 volt untuk mengaktifkan LED, sekaligus menerima sinyal keluaran dari sensor. Cahaya yang dipancarkan melewati serat optik diterima oleh fotodioda tipe IF-D91, kemudian sinyal analog yang dihasilkan diperkuat dan dikonversi menjadi tegangan analog oleh rangkaian IC LM358, sebelum diteruskan ke pin analog A0 pada Arduino Uno R3.

Seluruh pengaturan dan pemrograman sistem dilakukan melalui perangkat lunak Arduino IDE. Tegangan analog dalam rentang 0–5 volt dikonversi menjadi nilai digital oleh ADC internal Arduino dengan rentang pembacaan 0–1023. Arduino tidak hanya bertugas mengolah data dari sensor, tetapi juga mengatur perangkat output seperti pemancar (transmitter) dan penerima (receiver), serta dapat digunakan sebagai penyedia tegangan referensi untuk sensor LDR bila diperlukan.

Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan modul mikrokontroler ESP8266-01 yang berfungsi untuk mengirimkan data secara nirkabel. Dengan dukungan koneksi WiFi, ESP8266-01 memungkinkan pengiriman data ke server atau platform *cloud*, sehingga data pengukuran dapat dipantau secara real-time [14].

Implementasi penggunaan mikrokontroler juga diterapkan dalam penelitian Bambang Winardi (2017), yang memanfaatkan Arduino Mega 2560 untuk membangun sistem monitoring suhu pada transformator tenaga 150/20 kV. Dalam

sistem ini, data suhu dari sensor LM35 diterima oleh mikrokontroler, diolah, dan digunakan untuk mengaktifkan sistem alarm serta pendingin otomatis sesuai batas suhu yang telah ditentukan. Sistem ini dilengkapi dengan LED indikator, kipas pendingin otomatis, serta buzzer yang dikendalikan Arduino, dan terhubung ke software VTScada melalui ethernet shield guna menampilkan data suhu secara real-time pada antarmuka HMI. Metode ini meningkatkan efisiensi dan akurasi pengawasan, serta memungkinkan pemantauan suhu transformator secara jarak jauh oleh operator gardu [15].

Dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem pemantauan suhu yang presisi dan real-time dalam instalasi kelistrikan, peran mikrokontroler dan sistem kendali digital menjadi sangat penting dalam pengembangan otomasi industri. Salah satu contoh penerapan teknologi tersebut terdapat dalam penelitian Afandy et al. (2024), yang merancang sistem monitoring suhu untuk pendingin transformator tiga fasa pada Electric Arc Furnace (EAF). Sensor RTD PT100 digunakan sebagai pengukur suhu, dengan pemrosesan data yang dikendalikan oleh *Programmable Logic Controller* (PLC) Siemens, berperan sebagai unit pengolah dan pengumpul

data. Selain itu, sistem mendukung transmisi data berbasis IoT menggunakan perangkat V-box, serta terhubung dengan antarmuka SCADA-Web yang memungkinkan visualisasi suhu secara real-time. Penggunaan mikrokontroler atau PLC dalam penelitian ini memberikan keunggulan berupa akurasi tinggi, respon sistem yang cepat, serta integrasi data yang efektif, sehingga menjadi referensi penting dalam pengembangan sistem pemantauan suhu berbasis sensor digital [16].

Pemilihan metode pemantauan serta komponen sistem yang sesuai akan sangat mempengaruhi ketepatan pengukuran, kecepatan respon sistem, serta efektivitas perlindungan transformator dari risiko kerusakan akibat suhu berlebih. Oleh sebab itu, pada bagian selanjutnya akan dijelaskan secara rinci mengenai rancangan metodologi penelitian yang mencakup perancangan sistem, pemilihan komponen, hingga tahapan pengambilan serta analisis data sebagai dasar pengembangan sistem monitoring suhu berbasis serat optik dan mikrokontroler.

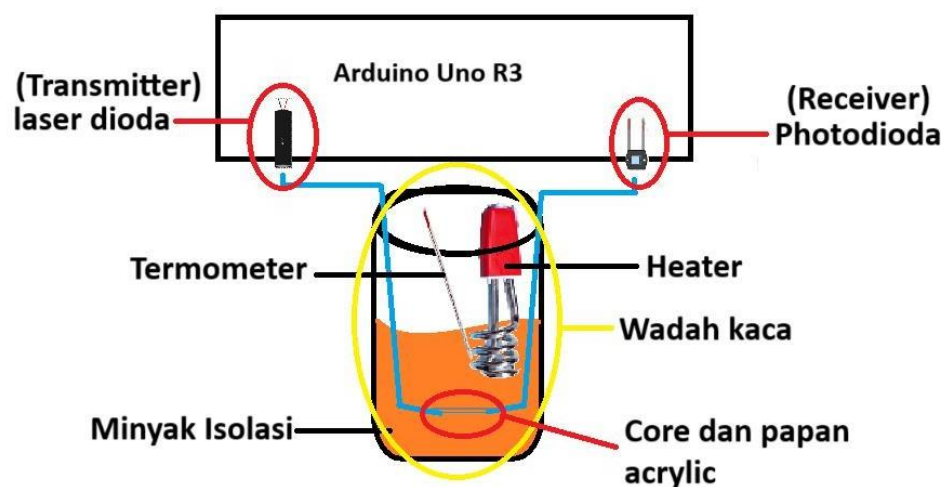
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dilaksanakan di Laboratorium Terpadu Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Lampung

3.2 Diagram Blok Perancangan Sistem



Gambar 3.1 Rancangan model pengukuran suhu minyak isolasi dengan sensor optik

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini terdiri dari beberapa bagian adalah sebagai berikut :

3.1.1 Laptop



Gambar 3.2 Laptop digunakan untuk pengolahan data

Laptop digunakan untuk melakukan pengolahan data, penyimpanan data, perancangan rangkaian elektronik dan pemrograman industri serta ESP8266-01. langkah pertama yang diambil oleh penulis ialah melakukan perancangan rangkaian elektronik ini menggunakan aplikasi *Fritzzing*. Kemudian laptop digunakan penulis untuk pengolahan data menggunakan *Excel*. Kemudian setelah alat sudah dirangkai sesuai dengan rancangan sensor ini diperlukannya untuk melakukan kalibrasi sensor dan Iot menggunakan aplikasi *Arduino IDE*.

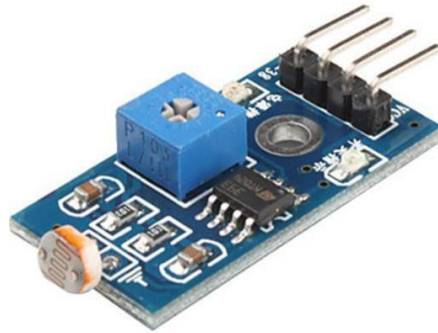
3.1.2 Mikrokontroller



Gambar 3.3 Mikrokontroller jenis Arduino Uno R3

Arduino Uno R3 ini diprogram dengan app Arduino IDE. Tugas dari mikrokontroler ini yaitu sebagai pusat pengendalian dari seluruh komponen. Pengaturan pada Arduino meliputi sebagai *supply* dari *laser diode* dengan gelombang 650 nm, kemudian membaca tegangan analog yang berasal dari modul LDR yang dihasilkan dari proses transmisi sinyal cahaya melalui fiber optik yang sudah dikupas pada titik tengahnya dan tercelup minyak isolasi. Pada Arduino terjadi proses pengubahan atau konversi data berupa tegangan analog menjadi data digital untuk dikirimkan menuju LCD 16 x 2 kemudian dikarenakan Arduino ini memiliki sistem ADC 10 bit sehingga dapat diartikan pengubahan informasi dari tegangan analog yang masuk ke dalam pin A0 ini akan diubah menjadi sinyal analog dengan rentang tegangan 0 -5 V dan menjadi nilai digital 0 – 1023. Nilai dari ADC ini nantinya sebagai indikator untuk mengetahui bahwa hubungan dengan kenaikan suhu dari minyak isolasi.

3.1.3 Receiver



Gambar 3.4 Modul LDR difungsikan menjadi tempat penerimaan (Receiver) cahaya laser

Pada bagian transmitter ini menggunakan modul LDR yang merupakan sensor cahaya. Dalam modul LDR ini bekerja menggunakan perubahan resistansi seiring adanya cahaya yang mengenai sensor. Pada LDR ini terdapat 4 pin yang terdiri dari VCC, *Ground*, D0, dan A0. Pin A0 pada output modul LDR digunakan untuk input pada Arduino R3. Output ini merupakan hasil dari pembagian tegangan trimpot pada modul. Ketika pin A0 sensor LDR dihubungkan ke A0 Arduino R3 maka pada Arduino akan membaca sinyal analog berupa tegangan yang menghasilkan nilai ADC dari 0 sampai 1023.

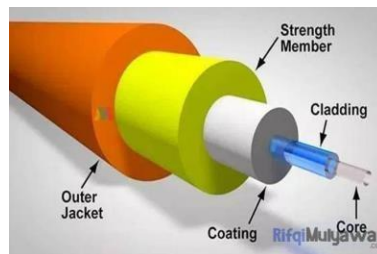
3.1.4 Transmitter



Gambar 3.5 Laser diode digunakan untuk sebagai sumber cahaya menuju fiber optik

laser dioda merah dapat disebut sebagai source karena perannya sebagai sumber cahaya dalam sistem yang melibatkan transmisi optik. Ketika dialiri arus listrik, laser dioda merah memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu, biasanya sekitar 620–750 nm, yang termasuk dalam spektrum cahaya tampak. Sebagai sumber cahaya, LED merah menghasilkan gelombang elektromagnetik (*foton*) yang stabil dan efisien, sehingga sering digunakan dalam berbagai aplikasi seperti sistem optik, sensor, dan komunikasi berbasis cahaya. Dalam rangkaian yang melibatkan, laser diode merah berfungsi sebagai sumber sinyal optik yang ditransmisikan melalui media seperti udara atau serat optik.

3.1.5 Serat Optik



Gambar 3.6 Penggunaan serat optik yang difungsikan menjadi sensor

Pada penelitian ini serat optik digunakan sebagai media transmisi sinyal cahaya. Hal ini didukung bahwa serat optik tidak dapat terpengaruh oleh adanya MRI dan EMI. Jenis serat optik yang digunakan adalah tipe G 652 D serat optik diletakkan dan ditenggelamkan di dalam minyak isolasi tetapi menyisakan di bagian sisi transmitter dan receiver. Titik bagian Tengah dari serat optik terdapat pengupasan sepanjang 1 – 3 mm dengan tujuan untuk mengetahui suhu minyak isolasi transformator berdasarkan indeks bias yang terjadi karena interaksi antara *core* serat optik dengan viskositas minyak isolasi. Penelitian ini memiliki cara kerja yaitu Ketika *transmitter* memberikan cahaya ke dalam serat optik menuju receiver yang sebelumnya pada titik tengah serat optik yang sudah dikupas akan berinteraksi dengan minyak isolasi. Kemudian pada receiver akan menerima sinyal cahaya berdasarkan tegangan yang berasal dari resistansinya pada modul LDR. Hasil dari pengujian ditampilkan dengan yaitu dengan internal terdapat LCD 16 x 2.

3.1.6 Minyak Isolasi



Gambar 3.7 Penyediaan sampel minyak isolasi untuk memperbanyak variasi pengukuran

Minyak isolasi pada penelitian ini adalah berupa minyak isolasi berbahan mineral. Minyak akan dipanaskan menggunakan heater dengan variabel suhu yang sudah ditentukan. Minyak isolasi akan diukur suhunya menggunakan termometer dan melihat tegangan keluaran sensor optik dalam tampilan *Serial Monitor* pada *Arduino IDE*. Indeks bias pada *core* serat optik akan berinteraksi dengan indeks bias pada minyak isolasi. Hasil tegangan keluaran dan nominal ADC merupakan perhitungan yang berasal dari sistem konversi sinyal analog menjadi sinyal digital pada mikrokontroler Arduino Uno R3.

3.3 Metode Penelitian

Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Litratur

Langkah awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah dengan memahami segala aspek yang menjadi bahan dasar pengetahuan. Studi Literatur yang berkaitan dengan penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Minyak isolasi
- b. Viskositas minyak Isolasi
- c. Pengukuran menggunakan fiber optik
- d. Kalibrasi alat ukur sensor suhu

2. Sampel minyak isolasi untuk pengujian

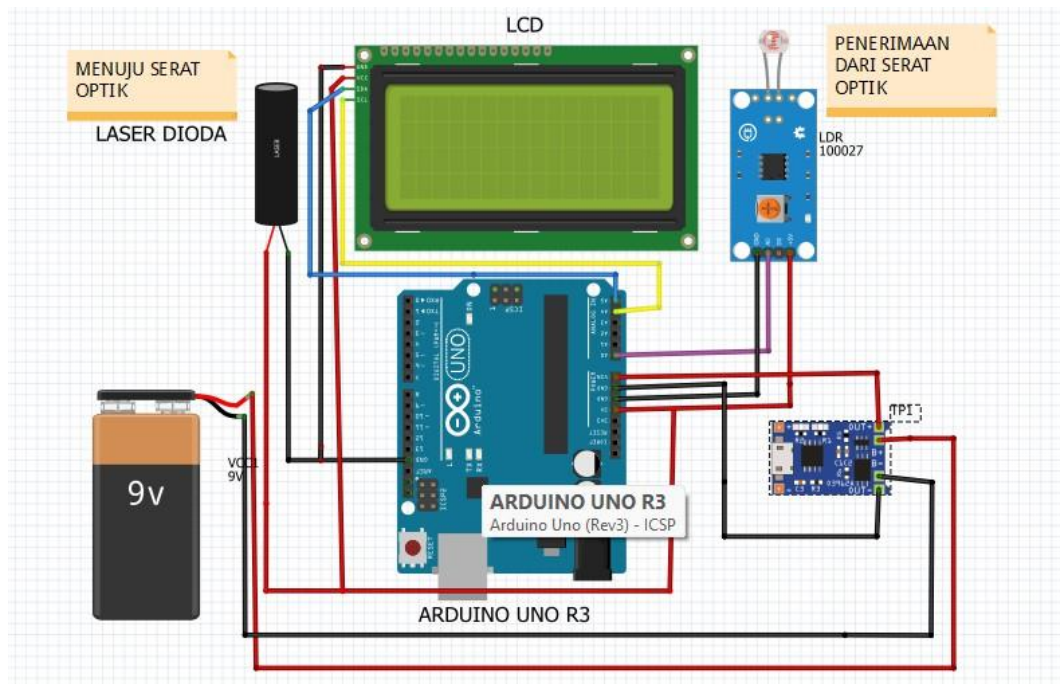


Gambar 3.8 Sampel Minyak Isolasi NYNAS

Sampel minyak diperlihatkan pada gambar 3.8 pada penelitian ini terlebih dahulu menyediakan sampel minyak isolasi dengan merk NYNAS didapat dari PLN UPT Tanjung Karang sebanyak 3 sampel, dengan rincian 2 sampel minyak isolasi berusia 5 tahun dan 10 tahun didapat dari GI Sribawono dan minyak isolasi yang masih berusia 2 tahun didapat dari GI 275 / 150 kV. Sebagai berikut :

1. Minyak mineral kondisi baru sudah terpakai (warna putih)
2. Minyak mineral kondisi masih terpakai dan masih sesuai standar tetapi ada zat pengotor (cokelat terang)
3. Minyak mineral kondisi masih terpakai sudah dekat titik jenuh (cokelat gelap).

Kemudian dipanaskan dari suhu 30 sampai 70 °C dengan kenaikan interval 5 °C secara bertahap sesuai dengan suhu kerja minyak isolasi transformator. Pemilihan suhu terendah 30 °C dikarenakan sesuai dengan suhu kerja pada transformator.



Gambar 3.9 Skematik sensor optik yang didesain dengan Fritzing

3. Perancangan Rangkaian Pengujian

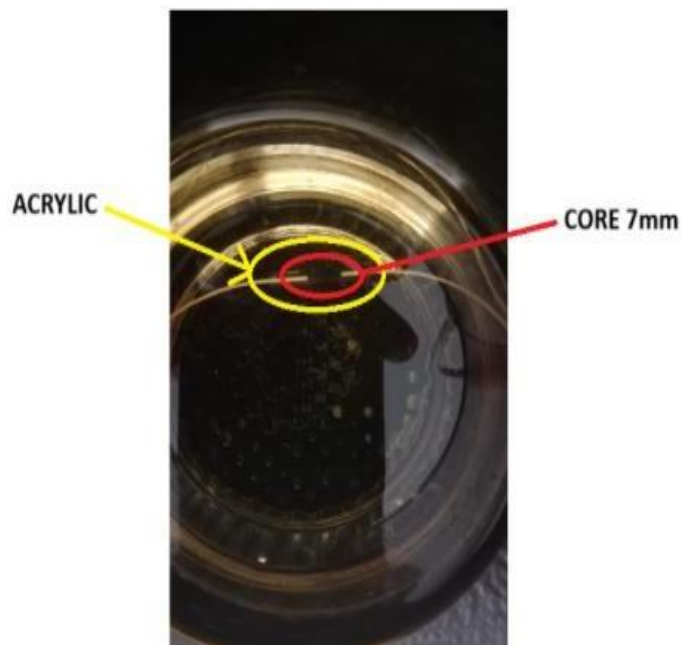
Mengawali alat ukur suhu ini yaitu melakukan perancangan (gambar 3.9) rangkaian elektronik penulis melakukan perancangan alat yang terdiri dari mikrokontroler dan perangkat lainnya dalam sistem ini menggunakan sumber DC 5V menggunakan adaptor yang diturunkan dari sumber AC 220V Penggunaan laser dioda sebagai pengirim sinyal cahaya yang akan diteruskan oleh serat optik lalu pada sisi penerima *Receiver* menggunakan modul LDR, dengan mengubah energi cahaya menjadi energi Listrik. Pada pin A0 merupakan bagian output yang akan masuk ke A0 Arduino Uno R3, pada Arduino Uno R3 ini membaca nilai tegangan yang masuk melalui pembacaan nilai ADC kemudian nilai ADC diubah dengan menggunakan persamaan kalibrasi. Untuk mengetahui tingkat kewaspadaan dalam monitoring minyak isolasi ini terdapat perangkat *Buzzer*.

4. Perancangan sensor suhu menggunakan serat optik



Gambar 3. 10 Perancangan serat optik (core) yang dijepit dengan papan akrilik

Perancangan serat optik yaitu menggunakan bahan serat optik dengan jenis *single mode*. Langkah perancangan bagian *sensing* berupa pengupasan *cladding* dari *core* bagian sisi tengah serat optik sepanjang 1- 7 mm kemudian pada bagian *sensing* diapit oleh 2 potong papan *acrylic* sepanjang 4,7 Cm kemudian direkatkan dengan lem tanpa mengenai bagian *core* yang sudah dikupas (gambar 3.10).



Gambar 3.11 Sensor serat optik terendam dalam minyak isolasi

Serat optik di bentuk mirip dengan huruf U dengan terdiri dari dua terminal transmitter dan receiver, dengan bagian Tengah saja yang tercelup ke dalam wadah

minyak isolasi transformator (gambar 3.11)

5. Pemrograman mikrokontroler

Pemograman diperlukan untuk menjalani sistem mikrokontroler Arduino Uno R3 dimana merupakan pusat pengendalian dari sistem sensor ini. Pembuatan program sensor alat ini menggunakan app *Arduino IDE* dengan menggunakan bahasa C atau C++. Program code untuk Arduino akan ditampilkan pada bagian lampiran oleh penulis.

6. Pengukuran suhu minyak isolasi

Setelah perancangan alat sensor suhu sudah jadi, maka pengukuran dilakukan untuk sensor suhu ini dapat bekerja sesuai dengan standar, Penerapan perbandingan ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil keluaran sensor dengan nilai dari alat sensor standar dengan cara mengukur langsung ke dalam minyak isolasi kemudian dimasukan ke dalam persamaan matematis. pengukuran dalam penelitian ini menggunakan metode perbandingan dan simulasi. Kalibrasi

dilakukan dengan mengukur ADC dan tegangan output pada modul LDR yang secara bersamaan diukur juga suhu yang diuji menggunakan termometer digital. Kemudian menggunakan persamaan kalibrasi untuk mencari nilai pengukuran suhu minyak isolasi yang telah dibentuk dalam bentuk tabel. Minyak isolasi dipanaskan menggunakan *heater* dengan suhu *real time* dengan interval 5°C dari 30°C sampai 70°C, pada setiap kenaikan suhu ini nantinya akan diukur tegangan keluar dari modul LDR menuju A0 Arduino R3, yang kemudian hasil data dan grafik menentukan model linear pada kenaikan suhunya. Proses pengukuran ini dilakukan pada ketiga kondisi minyak isolasi.

Persamaan untuk melakukan kalibrasi yaitu pada persamaan (4)

$$T = m V_{adc} + b \quad (4)$$

dengan,

T	= suhu
$ADC\ Value$	= nilai adc
m	= factor skala
b	= nilai deviasi
V_{adc}	= tegangan adc (V)

V_{ref} = tegangan referensi Arduino (4.99 V)

Metode perbandingan digunakan untuk mencari nilai dengan cara membandingkan nilai sensor suhu dengan alat ukur suhu standar, perbandingan dapat menggunakan persamaan (5).

$$b = S_{suhu} - S_{ref} \quad (5)$$

Kemudian untuk mencari nilai dari faktor skala (M) menggunakan persamaan (6) dan untuk mencari nilai adc (V_{adc}) dapat menggunakan persamaan (7).

$$M = \frac{\Delta T}{\Delta V} \quad (6)$$

(7)

Dengan,

ΔT
suhu = perubahan

ΔV
tegangan = perubahan

$$V_{adc} = \frac{ADC \text{ value} \times V_{ref}}{1023}$$

Dari hasil persamaan tersebut dapat menjadi bahan setting kalibrasi dari sensor tersebut.

7. Pengujian Perubahan Suhu minyak isolasi

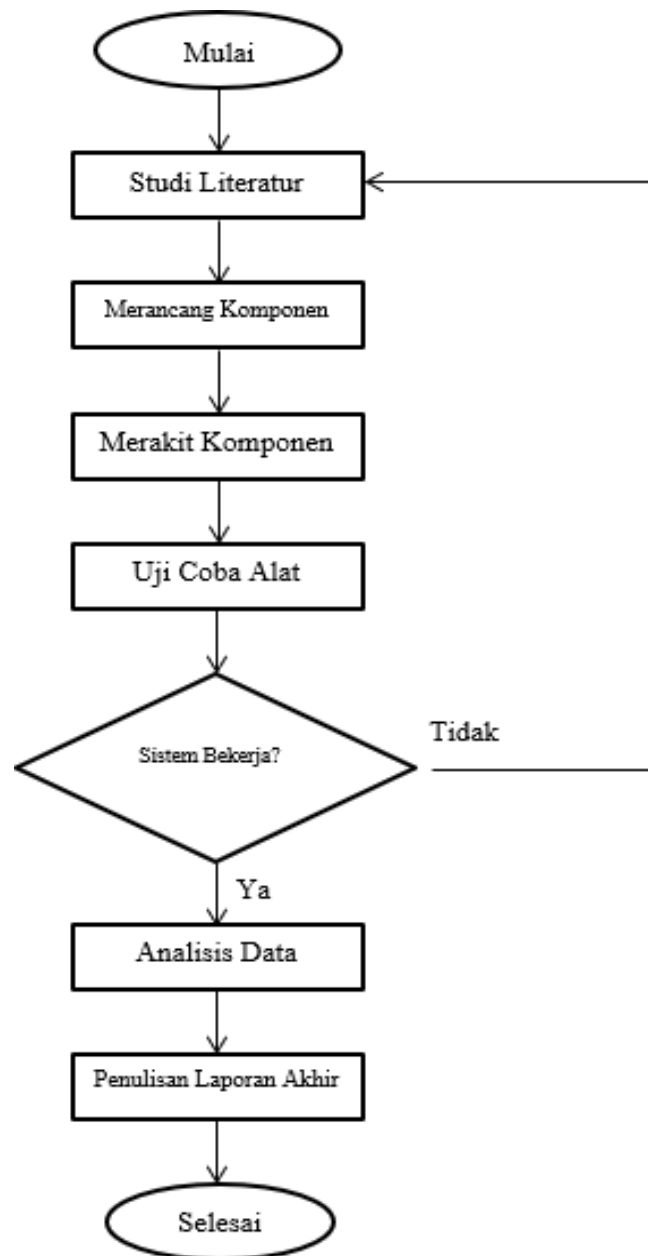
Minyak isolasi dipanaskan menggunakan *heater* dengan suhu bertahap yaitu dari suhu 30 sampai 70 dengan kenaikan interval 5°C. Pengujian ini dilakukan 5 kali pada masing – masing sampel minyak isolasi. Kenaikan suhu minyak isolasi transformator akan mempengaruhi viskositasnya hal ini mengubah transmisi cahaya dalam serat optik perubahan ini ditangkap oleh modul LDR yang dikonversikan dari tegangan menjadi sinyal analog. suhu minyak isolasi transformator. Perubahan suhu minyak isolasi ini diukur juga dengan termometer digital khusus cairan.

8. Analisis dan Penulisan Laporan

Tahap analisis dan penulisan laporan dilakukan untuk mengetahui data hasil yang diolah untuk mendapat suatu pembahasan berdasarkan hasil data yang didapat yang sesuai dengan tujuan penelitian yang dilakukan. Hasil penelitian ini merupakan hasil tanggung jawab penulis terhadap tugas akhir yang dilakukan.

3.4 Diagram Alir Penelitian

Adapun Tahapan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir penelitian adalah sebagai berikut :



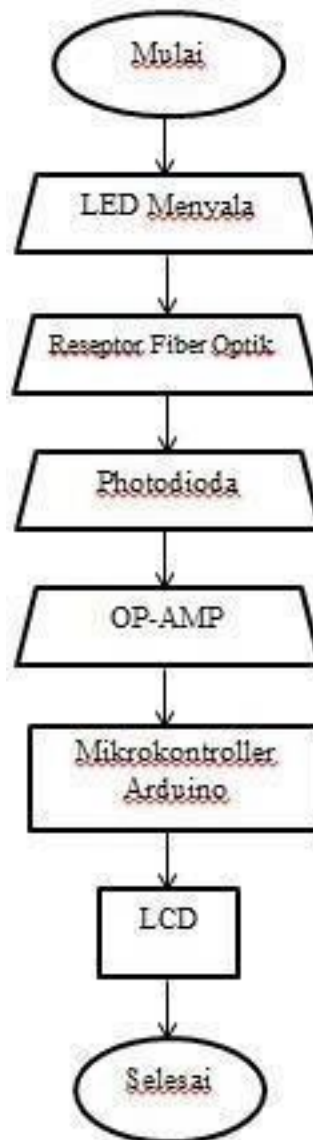
Gambar 3.12 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini memiliki peta dalam alir penelitian ditampilkan pada gambar 3.10 diawali dengan melakukan studi literatur merupakan tahap dasar yang memiliki kaitan dengan penelitian ini. Lalu dilakukannya tahap merancang alat apabila, terdapat gangguan dalam pengukuran maka akan dilakukan perbaikan

system, namun jika dapat berjalan lancar maka tahap selanjutnya adalah pengambilan data, kemudian hasil data dilakukan menganalisa dan membahas data pada penulisan laporan akhir saat ini.

3.5 Diagram Alir Sistem

dalam diagram alir sistem yang ditampilkan pada gambar 3.2 adalah sebagai berikut :



Gambar 3.13 Diagram Alir Sistem

Proses pemantauan suhu diawali dengan penyediaan sumber daya listrik yang berasal dari adaptor 5V atau baterai, yang berfungsi memberi suplai daya ke seluruh komponen sistem, termasuk LED, fotodioda, penguat operasional (op-amp), mikrokontroler Arduino, serta modul LCD apabila digunakan. Setelah sistem dinyalakan, LED akan mulai memancarkan cahaya dengan panjang gelombang tertentu, misalnya 650 nm, yang berfungsi sebagai sumber cahaya utama dalam proses pengukuran. Cahaya tersebut kemudian diarahkan ke serat optik berbahan polimer (*Polymer Optical Fiber/POF*), yang berperan sebagai elemen sensor suhu. Serat optik ini akan merespons perubahan suhu lingkungan dengan memengaruhi intensitas cahaya yang diteruskan ke ujung penerima.

Cahaya yang keluar dari serat optik diterima oleh fotodioda, yang berfungsi sebagai transduser untuk mengubah intensitas cahaya menjadi arus listrik kecil. Sinyal Listrik ini kemudian diperkuat oleh op-amp, seperti LM358, sehingga menghasilkan tegangan yang cukup besar untuk diolah oleh mikrokontroler. Tegangan keluaran dari op-amp diteruskan ke mikrokontroler, dalam hal ini Arduino, yang membaca dan mengolah data menjadi informasi suhu. Data suhu yang dihasilkan dapat ditampilkan dalam LCD.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terhadap rancang bangun sistem monitoring suhu minyak transformator menggunakan sensor fiber optik, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Sistem monitoring suhu minyak isolasi transformator berbasis fiber optik berhasil dirancang dan diuji dengan menggunakan Arduino Uno R3 sebagai pusat kendali, laser diode sebagai sumber cahaya, serta modul LDR sebagai penerima intensitas cahaya. Sistem ini mampu mendeteksi perubahan suhu pada minyak transformator berdasarkan perubahan viskositas dan indeks bias.
2. Sensor fiber optik menunjukkan karakteristik linier terhadap perubahan suhu. Kenaikan suhu pada minyak isolasi menyebabkan penurunan viskositas, yang berdampak pada perubahan intensitas cahaya yang diterima oleh LDR. Hal ini menyebabkan tegangan keluaran sensor meningkat secara linier, sehingga sistem mampu memberikan pembacaan suhu secara akurat.
3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan output sensor meningkat seiring kenaikan suhu pada semua jenis minyak isolasi yang diuji (usia 2, 5, dan 10 tahun). Minyak isolasi sampel 1 menunjukkan peningkatan dari 0,6702 V hingga 0,7766 V, minyak 5 tahun dari 0,7366 V hingga 0,8408 V, dan minyak sampel 3 dari 0,7014 V hingga 0,7492 V. Sistem ini dapat digunakan untuk memantau kualitas minyak transformator secara tidak langsung melalui parameter suhu dan perubahan indeks bias, sehingga dapat menjadi alat bantu yang efektif untuk mendeteksi awal degradasi minyak isolasi.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dan peningkatan akurasi serta efisiensi sistem monitoring suhu berbasis fiber optik ini, diperlukan saran untuk penelitian selanjutnya :

4. Penggunaan sensor optik berbasis serat optik dapat dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan modul IoT agar hasil pengukuran dapat dipantau secara daring dan terintegrasi dengan sistem monitoring pusat.
5. Untuk hasil pengukuran yang lebih akurat dan stabil, disarankan penggunaan sensor cahaya yang memiliki sensitivitas lebih tinggi dibandingkan modul LDR, seperti photodiode dengan penguatan optik.
6. Pengujian sistem dapat ditingkatkan dengan menambahkan variasi minyak isolasi dari jenis dan merek yang berbeda, termasuk perbandingan antara minyak mineral dan minyak nabati sebagai bahan alternatif ramah lingkungan.
7. Untuk keperluan kalibrasi dan peningkatan akurasi, sistem sebaiknya dibandingkan langsung dengan sensor suhu standar industri seperti RTD (Resistance Temperature Detector) atau termokopel digital bersertifikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bambang Winardi, 2017 Perancangan Monitoring Suhu Transformator Tenaga 150 / 20 Kv Berbasis Arduino Mega 2560, Transmisi, 19, (3), Juli 2017, e-ISSN 2407–6422, 122
- [2] Moh. Afandy, 2024 Abdul Haris Mubarak, Muhammad Ikbil Rianto Sistem Monitoring Suhu pada Pendingin Trafo 3 Phasa Electric Arc Furnace (EAF) , Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering Volume 6 Nomor 2 Juli 2024
- [3] Rahmawati, Sri Agustina, Monang R Malau, 2014 Evaluasi Kandungan Air Terhadap Tegangan Tembus Pada Minyak Jarak Yang Telah Melalui Proses Transesterifikasi Sebagai Alternatif Minyak Transformator, Mikrotiga, Vol 1, No. 3 November 2014
- [4] Jumardin, Jumiati Ilham, 2019 Sardi Salim, Studi Karakteristik Minyak Nilam Sebagai Alternatif Pengganti Minyak Transformator, Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering (JJEED), Volume 1 Nomor 2 Juli 2019
- [5] Nirmalasari, Diki Ariwinoto, Lanto M. Kamil Amali, Ade Irawaty Tolago, 2022 Pengaruh Viskositas Dan Kadar Air Terhadap Breakdown Isolasi Minyak Transformator Shell Diala B, Electrictsan Volume 11 Nomor 2 Periode November 2022, PP 47-52
- [6] Bhanunasmi Bahtiar Apta, 2024 Pengaruh Kelembaban Terhadap Karakteristik Tegangan Tembus Minyak Mineral Nynas Nytro Libra Berpengisi Fe₃O₄, MgCl₂, Dan NaCl, Palembang, November 2024
- [7] Miznan Huda Basyaruddin, Abdul Syakur, Munawar Agus Riyadi, 2022 Sistem Pengukuran Kualitas Isolasi Minyak Trafo Dengan Metode Parameter Ukur Breakdown Voltage Dan Partial Discharge Berbasis Internet Of Things (Iot), TRANSIENT, VOL. 11, NO. 4, Desember 2022
- [8] Subur Manullang, Albertus Siregar, Johan Hadi, 2021 Studi Analisa Temperatur Minyak Transformator, JURNAL TEKNOLOGI ENERGI UDA Volume 10, Nomor 1, Maret 2021: PP 40-48
- [9] Alfian Junaidi, 2008 Pengaruh Perubahan Suhu Terhadap Tegangan Tembus Pada Bahan Isolasi Cair, Teknoin, Volume 13, Nomor 2, Desember 2008, PP 1-5
- [10] Badaruddin, Fery Agung Firdianto, 2016 Analisa Minyak Transformator Pada Transformator Tiga Fasa Di Pt X, Jurnal Teknologi Elektro, Universitas Mercu Buana, Vol.7 No.2 Mei 2016

- [11] Eka Suci Ariyanti, Agus Mulyono 2010 Otomatisasi Pengukuran Koefisien Viskositas Zat Cair Menggunakan Ultrasonik, Jurnal Neutrino Vol. 2, No. 2 April 2010
- [12] Febrielviyanti, Harmadi, Dahyunir Dahlan, dan Yetria Rilda, 2019 Rancang Bangun Sensor Kelembaban Udara menggunakan Plastic optical Fiber (POF) dengan cladding TiO₂-SiO₂ dan Data Transmisi, JURNAL FISIKA DAN APLIKASINYA, VOLUME 15, NOMOR 1, 2019
- [13] Muhammad Yunus, A. Arifin, 2018 Karakterisasi Sensor Kekentalan Oli Berbasis Serat Optik Plastik Menggunakan Metode Back Scattering, POSITRON Vol. 8, No. 1 (2018), PP. 31-36
- [14] Nila Wulan Sari, Ahmad Marzuki, Riyatun, 2012 Sensor Fiber Optik Dari Bahan Fiber Optik Polimer Untuk Pengukuran Refractive Index Larutan Gula, Indonesian Journal of Applied Physics, April 2012 Vol.2 No.1 halaman 30
- [15] Muhammad Yunus, 2023 U-bend optical Fiber to Determine Characteristics of pH Sensor, Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika, Vol. 11, No. 01, Januari 2023
- [16] Supriyana, Muh. Toifur, 2017 Studi Penentuan Indeks Bias Cairan Pada Suhu Secara Kontinu Berbasis Difraksi Cahaya Berbantuan Software Logger Pro, Jurnal Ilmiah Teknosains, Vol. 3 No. 2 November 2017, PP. 123-131
- [17] Nasrullah Idris, Sarina, Maswati, Devi Susilayani, 2017 Pengembangan Alat Ukur Indeks Bias Menggunakan Prisma Berongga dari Lembaran Kaca Komersial Biasa dan Laser He-Ne untuk Pengujian Kualitas Minyak Goreng, Risalah Fisika Vol. 1 no. 2 (2017) PP . 39-46
- [18] Hazura Haroon, 2021 Siti Khadijah Idris, Anis Suhaila Mohd Zain, Hanim Abdul Razak, Fauziyah Salehuddin, Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, Vol. 10, No. 1, February 2021, pp. 357-364

