

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Untuk menunjang penelitian ini maka diperlukan berbagai referensi jurnal ilmiah dan buku penunjang keberhasilan penelitian, jurnal dan buku yang digunakan sebagai referensi pada penelitian ini diantaranya :

Penelitian pertama dilakukan oleh Saumi dan Firmawati (2025) yang berjudul “Prototipe Sistem Kontrol Suhu, Kelembaban, dan Debu Ruangan Secara Otomatis Berbasis Arduino Uno”. Penelitian ini mengembangkan sistem kontrol lingkungan menggunakan sensor DHT22 untuk mendeteksi suhu dan kelembapan serta sensor debu sebagai parameter tambahan. Sistem bekerja secara otomatis dengan mengaktifkan kipas ketika suhu melebihi 30°C dan humidifier saat kelembapan di bawah 60%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kondisi lingkungan secara otomatis dan responsif terhadap perubahan parameter. Penelitian ini relevan karena sama-sama menggunakan konsep pengendalian suhu dan kelembapan berbasis mikrokontroler (Saumi and Firmawati, 2025).

Penelitian kedua dilakukan oleh Sumarsono et al. (2025) dengan judul “Sistem Kontrol Suhu dan Kelembapan Udara Pada Kumbung Jamur Tiram Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno”. Penelitian ini bertujuan untuk mengotomatisasi kondisi lingkungan pada budidaya jamur tiram, di mana suhu optimal berada pada 16–30°C dan kelembapan 80–95%. Sistem yang dikembangkan menggantikan metode manual menjadi sistem otomatis berbasis sensor SHT10. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjaga kondisi lingkungan secara stabil dan meningkatkan efisiensi proses budidaya. Penelitian ini

mendukung pentingnya kontrol lingkungan yang presisi (Joko Sumarsono, Ida Ayu Widhiantari, 2025).

Penelitian ketiga dilakukan oleh Mubarak dan Syukron (2024) dengan judul “Pengembangan Alat Pendingin Otomatis Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno Dengan Sensor DHT22”. Penelitian ini merancang alat pengendali suhu dan kelembapan untuk kenyamanan ruangan dengan memanfaatkan sensor DHT22. Sistem ini mampu mendeteksi kondisi suhu dan kelembapan secara *real-time* dan mengaktifkan sistem pendingin secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alat dapat menjaga kestabilan suhu ruangan secara efektif. Penelitian ini memiliki kesamaan dalam hal penggunaan sensor dan sistem kontrol otomatis berbasis mikrokontroler (Mubarak and Syukron, 2025).

Penelitian keempat dilakukan oleh Ermawan et al. (2024) dengan judul “Rancang Bangun Sistem Monitoring Serta Kendali Suhu dan Kelembaban pada Ruang Server Berbasis Arduino”. Penelitian ini berfokus pada pengendalian suhu dan kelembapan pada ruang server yang membutuhkan kondisi lingkungan stabil untuk menjaga performa perangkat. Sistem menggunakan sensor DHT11 dan mengontrol AC serta dehumidifier secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan keandalan perangkat server dengan menjaga kondisi lingkungan tetap optimal. Penelitian ini relevan karena memiliki kesamaan objek berupa peralatan listrik yang sensitif terhadap suhu dan kelembapan (JA Ermawan, K Ismail, 2024).

Penelitian kelima dilakukan oleh Sari dan Wibowo (2025) dengan judul “Sistem Kendali Suhu Greenhouse Berbasis Arduino dengan Metode Experimen”. Penelitian ini mengembangkan sistem kendali suhu otomatis menggunakan metode eksperimen untuk menjaga kestabilan suhu pada greenhouse. Sistem menggunakan sensor DHT11 dan aktuator

berupa kipas serta sprinkler. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode eksperimen efektif dalam menjaga kestabilan suhu tanpa fluktuasi yang signifikan. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam metode kontrol yang dapat diterapkan untuk meningkatkan performa sistem pengendalian suhu dan kelembapan (Sari and Wibowo, 2025).

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian suhu dan kelembapan berbasis mikrokontroler telah banyak dikembangkan dan terbukti efektif dalam menjaga kondisi lingkungan pada berbagai bidang, seperti pertanian, ruangan server, dan sistem otomatis lainnya. Namun, penelitian yang secara khusus diterapkan pada current transformer di lingkungan PLTD, khususnya pada daerah pesisir dengan tingkat kelembapan tinggi, masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki kebaruan dalam penerapan sistem kontrol otomatis pada peralatan kelistrikan untuk meningkatkan keandalan dan umur pakai trafo arus.

2.2 Dasar Teori

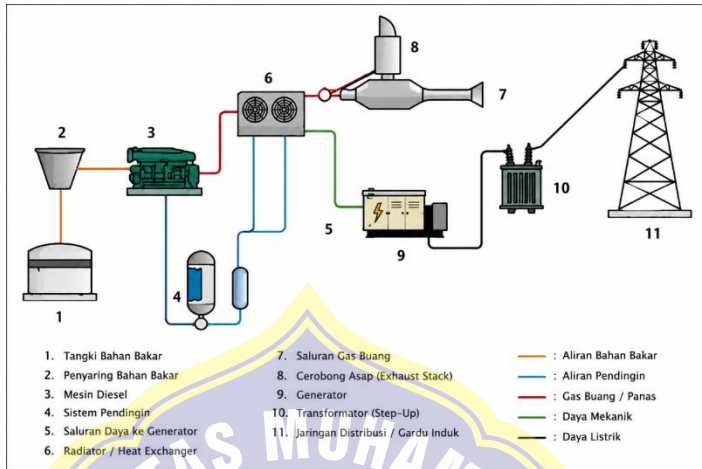
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD)

2.2.1.1 Pengertian PLTD

PLTD adalah instalasi pembangkit listrik yang menggunakan mesin diesel sebagai penggerak utama (Kartikasari, Insinyur and Mada, 2026). Mesin diesel bekerja berdasarkan prinsip siklus diesel dengan komponen utama berupa engine, generator, sistem bahan bakar, sistem pendingin, dan sistem pelumasan. Mesin diesel merupakan mesin pembakaran dalam (*internal combustion engine*) yang menggunakan prinsip penyalan kompresi (*compression ignition*) (Ahmad Yani, 2022). Berbeda dengan mesin bensin yang menggunakan busi sebagai pemicu pembakaran, mesin diesel memanfaatkan tekanan dan suhu tinggi hasil kompresi

udara untuk menyalakan bahan bakar. Pada siklus kerja mesin diesel, udara dimasukkan ke dalam silinder dan dikompresi hingga mencapai tekanan dan temperatur tinggi (sekitar 30–40 bar dan 600–700 °C). Ketika bahan bakar solar diinjeksikan ke ruang bakar pada akhir langkah kompresi, bahan bakar langsung terbakar akibat suhu tinggi tersebut. Pembakaran ini menghasilkan energi panas yang dikonversi menjadi energi mekanik melalui gerak piston, yang selanjutnya diubah menjadi energi listrik melalui generator.

Parameter utama yang memengaruhi kinerja mesin diesel meliputi tekanan kompresi, efisiensi pembakaran, waktu penyemprotan bahan bakar, temperatur gas buang, serta konsumsi bahan bakar. Keseimbangan antar parameter tersebut akan menentukan besarnya daya keluaran dan efisiensi bahan bakar mesin secara keseluruhan (Kristanto, 2020). Untuk mempermudah dalam melakukan pemeliharaan mesin diesel para teknisi harus mempunyai dasar-dasar pengetahuan mengenai mesin diesel yang baik, agar setiap melakukan pemeliharaan para teknisi dapat memperlakukan setiap komponen yang berada dalam mesin, sesuai dengan konstruksinya.



Gambar 2.1 Pembangkit listrik tenaga diesel
 Sumber: Teknik Maintenance Workshop, Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD), 2019.

Dari gambar di tersebut dapat kita lihat bagian-bagian dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel, yaitu :

1. Tangki penyimpanan bahan bakar dengan kapasitas 2 x 50 KL.
2. Penyaring bahan bakar.
3. Tangki penyimpanan bahan bakar sementara (bahan bakar yang disaring).
4. Pengabut.
5. Mesin diesel kapasitas 875 kVA.
6. Turbo charger.
7. Penyaring gas pembuangan.
8. Tempat pembuangan gas (bahan bakar yang disaring).
9. Generator kapasitas 700 kW.
10. Trafo step up kapasitas 800kVA.
11. Saluran Transmisi.

2.2.1.2 Prinsip kerja PLTD

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) bekerja dengan prinsip mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar diesel menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan proses (Marhaini and Mardwita Arief Suranda, 2022). Proses ini melibatkan mesin diesel sebagai penggerak utama (prime mover) dan generator sebagai penghasil energi listrik. Secara umum, prinsip kerja PLTD dimulai dari proses pembakaran bahan bakar di dalam mesin diesel. Bahan bakar solar diinjeksikan ke dalam ruang bakar yang telah berisi udara bertekanan tinggi akibat proses kompresi. Udara yang dikompresi akan mengalami peningkatan suhu sehingga ketika bahan bakar disemprotkan, terjadi pembakaran secara spontan tanpa memerlukan percikan api (self ignition). Proses pembakaran ini menghasilkan energi panas yang sangat tinggi.

Energi panas tersebut kemudian diubah menjadi energi mekanik melalui gerakan piston di dalam silinder. Piston akan bergerak naik turun (gerak translasi) akibat tekanan hasil pembakaran (Sikki, 2024). Gerakan piston ini selanjutnya diteruskan ke poros engkol (*crankshaft*) sehingga menghasilkan gerak putar. Gerak putar dari poros engkol ini digunakan untuk memutar rotor generator yang terhubung secara langsung dengan mesin diesel. Ketika rotor berputar di dalam medan magnet stator, maka terjadi proses induksi elektromagnetik sesuai dengan prinsip hukum Faraday. Akibatnya, energi mekanik diubah menjadi energi listrik dalam bentuk arus listrik.

Listrik yang dihasilkan oleh generator kemudian disalurkan melalui sistem distribusi untuk digunakan oleh konsumen. Dalam proses ini, terdapat juga sistem pendukung seperti sistem pendingin (*cooling system*), sistem pelumasan (*lubrication system*), dan sistem bahan bakar (*fuel system*) yang berfungsi menjaga kinerja mesin tetap optimal dan stabil.

Secara ringkas, prinsip kerja PLTD dapat dijelaskan melalui tahapan berikut:

1. Bahan bakar diesel dibakar di dalam mesin → menghasilkan energi panas
2. Energi panas menggerakkan piston → menghasilkan energi mekanik
3. Energi mekanik memutar generator → menghasilkan energi listrik
4. Energi listrik disalurkan ke beban

Dengan demikian, kinerja PLTD sangat bergantung pada efisiensi proses pembakaran, kondisi mesin diesel, serta kestabilan sistem pendukungnya. Oleh karena itu, pemeliharaan dan pengendalian kondisi lingkungan, seperti suhu dan kelembapan, menjadi faktor penting untuk menjaga keandalan operasi PLTD.

2.2.1.3 Komponen utama PLTD

Sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) terdiri dari dua komponen utama, yaitu mesin diesel sebagai penggerak utama (*prime mover*) dan generator sebagai pembangkit listrik. Adapun bagian-bagian penting mesin diesel pembangkit meliputi (Sihombing, Erivianto and Dalimunthe, 2025):

1. Blok silinder (*Cylinder Block*)
Sebagai rumah bagi komponen utama seperti piston, connecting rod, dan crankshaft. Berfungsi menahan tekanan dan panas tinggi selama proses pembakaran.
2. Piston dan Ring Piston
Piston mengubah tekanan gas hasil pembakaran menjadi gaya mekanik linier, sedangkan ring piston menjaga kerapatan gas dan mengurangi kebocoran oli.
3. *Connecting Rod* (Batang Penghubung)

- Meneruskan gaya dari piston ke poros engkol (crankshaft).
4. **Crankshaft (Poros Engkol)**
Mengubah gerak linier piston menjadi gerak rotasi untuk memutar generator.
 5. **Sistem Bahan Bakar**
Meliputi *fuel pump*, *injector*, *fuel filter*, dan *fuel line*, berfungsi menyalurkan dan mengatur jumlah bahan bakar yang diinjeksikan ke ruang bakar sesuai kebutuhan daya.
 6. **Sistem Pelumasan**
Mengalirkan oli ke seluruh bagian mesin untuk mengurangi gesekan, pendinginan komponen, dan membersihkan kotoran logam halus.
 7. **Sistem Pendingin**
Menjaga suhu kerja mesin agar tetap optimal (biasanya 80–90°C) dengan mengalirkan air pendingin atau cairan radiator melalui jaket air di sekitar silinder.
 8. **Sistem Injeksi**
Bertugas menginjeksikan bahan bakar dengan tekanan tinggi dan waktu yang tepat agar pembakaran sempurna.
 9. **Generator (Alternator)**
Mengubah energi mekanik dari poros engkol menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik.
 10. **Panel Kontrol dan Proteksi**
Mengatur distribusi daya, sistem proteksi (*overload*, *overvoltage*, dan *overcurrent*), serta pengendalian otomatis *start–stop*.

2.2.1.4 Peran PLTD di daerah terpencil/pulau

Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) memiliki peran yang sangat penting dalam penyediaan energi listrik di daerah terpencil dan wilayah kepulauan. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan infrastruktur jaringan listrik utama yang umumnya

belum mampu menjangkau daerah-daerah tersebut (Ardin, 2025). Kondisi geografis Indonesia yang terdiri dari banyak pulau menjadikan PLTD sebagai salah satu solusi utama dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat. Salah satu peran utama PLTD adalah sebagai sumber energi listrik utama di daerah yang belum terhubung dengan jaringan listrik interkoneksi. Di wilayah terpencil atau pulau kecil, pembangunan jaringan transmisi dari pembangkit besar seringkali tidak ekonomis karena jarak yang jauh dan medan yang sulit. Oleh karena itu, PLTD menjadi pilihan yang lebih fleksibel karena dapat dibangun dalam skala kecil hingga menengah sesuai kebutuhan beban listrik setempat. Selain itu, PLTD juga berperan dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat di daerah terpencil. Ketersediaan listrik memungkinkan masyarakat untuk menjalankan berbagai aktivitas ekonomi, seperti usaha kecil dan menengah, perikanan, serta industri rumah tangga. Listrik juga mendukung sektor pendidikan dan kesehatan, misalnya untuk penerangan sekolah, penggunaan alat medis, serta akses terhadap teknologi informasi (Mawuntu *et al.*, 2024).

PLTD juga memiliki keunggulan dalam hal kemudahan instalasi dan pengoperasian. Dibandingkan dengan pembangkit listrik lainnya, PLTD relatif lebih cepat dalam proses pembangunan dan dapat langsung dioperasikan setelah instalasi selesai. Hal ini sangat penting dalam kondisi darurat atau kebutuhan mendesak akan pasokan listrik, seperti pada daerah yang baru berkembang atau pasca bencana. Di samping itu, PLTD sering digunakan sebagai sumber listrik cadangan (*backup power*) untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik ketika terjadi gangguan pada sistem utama. Peran ini sangat penting untuk memastikan keandalan sistem kelistrikan, terutama di daerah yang memiliki keterbatasan sumber energi alternatif. Namun demikian, penggunaan PLTD di daerah terpencil juga

memiliki tantangan, seperti ketergantungan terhadap pasokan bahan bakar diesel yang harus didistribusikan secara rutin, serta biaya operasional yang relatif tinggi. Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu dan kelembapan yang tinggi, terutama di daerah pesisir dan pulau, dapat mempengaruhi kinerja peralatan listrik di dalam sistem PLTD. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan PLTD, salah satunya melalui penerapan sistem pengendalian kondisi lingkungan pada peralatan penting, seperti current transformer. Dengan pengendalian suhu dan kelembapan yang baik, diharapkan kinerja PLTD di daerah terpencil dapat tetap optimal dan berkelanjutan dalam memenuhi kebutuhan listrik masyarakat.

2.2.2 Current Transformer (Trafo Arus)

2.2.2.1 Pengertian Transformator Arus

Current Transformer (CT) merupakan transformator arus yang berfungsi untuk mengkonversi arus yang melewatinya dari level tinggi ke level rendah yang dapat dimanfaatkan untuk input alat metering maupun alat proteksi pada suatu jaringan sistem tenaga listrik (Oktaviyanti and Cahyono, 2026).



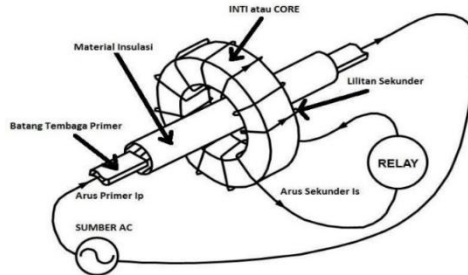
Gambar 2.2 Transformator Arus
Sumber: Dokumen Pribadi

Current Transformer merupakan komponen utama dalam sistim tenaga listrik, baik pada distribusi maupun pada pembangkitan. Dengan adanya current transformer, suatu peralatan ataupun jaringan dapat dimonitoring kondisinya melalui hasil pengukuan (metering) serta dapat dilindungi melalui proteksi apabila adanya gangguan yang menimbulkan arus yang sangat besar sebagai akibat short circuit (hubungan singkat) ataupun overload (kelebihan beban) dan lain sebagainya (Singkarak, 2025). Dari hal diatas, pemanfaatan output dari current transformer dapat dibagi atas 2 hal, yaitu :

- a. Metering, output dari Current Transformer digunakan sebagai input pada alat ukur.
- b. Proteksi, output dari Current Transformer digunakan sebagai input untuk alat proteksi yang nantinya akan mentrigger alat proteksi untuk bekerja apabila ada gangguan.

2.2.2.2 Prinsip Kerja Transformator Arus

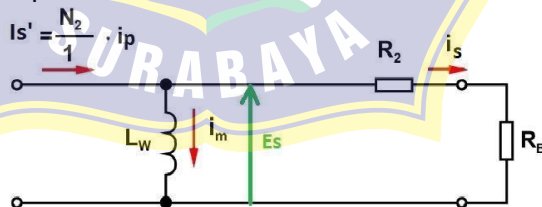
Arus yang mengalir pada sistem distribusi tegangan menengah ataupun tegangan rendah berkisar ratusan hingga ribuan ampere. Oleh karena itu, belitan primer dari transformator arus terbuat dari batangan tembaga dengan dimensi yang relatif besar agar mampu menahan arus yang mengalir secara terus-menerus disisi primer ataupun arus sesaat ketika terjadi kegagalan sistem. Karena terbuat dari batang tembaga yang cukup besar dan maksimal 2 lilitan untuk rasio ganda, maka impedansi disisi primer bisa diabaikan karena terlalu kecil dibandingkan impedansi sistem (Irsyam, 2023). Gambar dibawah ini adalah contoh sederhana dari transformator arus yang menggunakan batang tembaga lilitan tunggal sebagai belitan primer.



Gambar 2.3 Transformator Arus dengan Batang Tembaga Tunggal di Sisi Primer

Sumber: Trafo Instrumentasi, 2014

- Pada saat arus primer I_p mengalir pada lilitan primer, maka akan muncul medan magnet disekeliling lilitan primer tersebut.
- Medan magnet tersebut akan terkumpul lebih banyak pada inti atau core. Medan magnet yang berputar di dalam inti atau core menghasilkan perubahan *flux* primer dan memotong lilitan sekunder sehingga menginduksikan tegangan pada lilitan sekunder sesuai hukum faraday.
- Karena lilitan sekunder membentuk loop tertutup, maka akan mengalir arus sekunder I_s yang akan membangkitkan medan magnet untuk melawan *flux* magnet yang dihasilkan oleh belitan primer sesuai hukum lenz.



Gambar 2.4 Model Diagram Listrik Sederhana dari Transformator Arus

Sumber: Trafo Instrumentasi, 2016.

2.2.2.3 Fungsi Transformator Arus

Fungsi dari transformator arus adalah:

- a. Mengkonversi besaran arus pada sistem tenaga listrik dari besaran primer menjadi besaran sekunder untuk keperluan pengukuran sistem metering dan proteksi.
- b. Mengisolasi rangkaian sekunder terhadap rangkaian primer, sebagai pengamanan terhadap manusia atau operator yang melakukan pengukuran.
- c. Standarisasi besaran sekunder, untuk arus nominal 1A dan 5A.

Secara fungsi trafo arus dibedakan menjadi dua yaitu:

- a. Transformator arus pengukuran
 - Transformator arus pengukuran untuk metering memiliki ketelitian tinggi pada daerah kerja (daerah pengenalnya) 5% - 120% arus nominalnya tergantung dari kelasnya dan tingkat kejenuhan yang relatif rendah dibandingkan trafo arus untuk proteksi.
 - Penggunaan transformator arus pengukuran untuk Amperemeter, Watt-meter, VARh-meter, dan $\cos \varphi$ meter.
- b. Transformator arus proteksi.
 - Transformator arus untuk proteksi, memiliki ketelitian tinggi pada saat terjadi gangguan dimana arus yang mengalir beberapa kali dari arus pengenalnya dan tingkat kejenuhan cukup tinggi.
 - Penggunaan transformator arus proteksi untuk relai arus lebih (OCR dan GFR), relai beban lebih, relai diferensial, relai daya dan relai jarak.

2.2.2.4 Jenis Transformator Arus

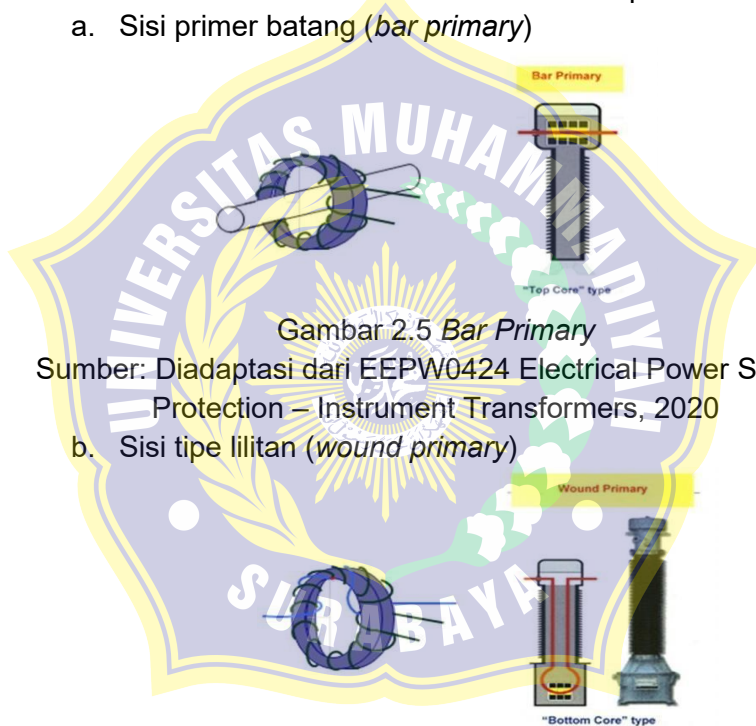
Jenis transformator arus menurut tipe konstruksi dan pasangannya.

Tipe Konstruksi:

- 1) Tipe cincin (*ring/window type*)
- 2) Tipe cor-coran cast resin (*mounded cast resin type*)
- 3) Tipe tangki minyak (*oil tank type*)
- 4) Tipe trafo arus bushing
- 5) Tipe Pasangan.
- 6) Pasangan dalam (*indoor*)
- 7) Pasangan luar (*outdoor*)

Jenis trafo arus berdasarkan konstruksi belitan primer

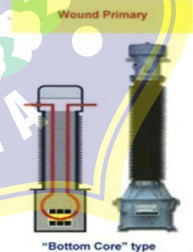
- a. Sisi primer batang (*bar primary*)



Gambar 2.5 *Bar Primary*

Sumber: Diadaptasi dari EEPW0424 *Electrical Power System Protection – Instrument Transformers*, 2020

- b. Sisi tipe lilitan (*wound primary*)



Gambar 2.6 *Wound Primary*

Sumber: Diadaptasi dari EEPW0424 *Electrical Power System Protection – Instrument Transformers*, 2020

1. Jenis Trafo Arus Berdasarkan Konstruksi Jenis Inti

- a) Trafo arus dengan inti besi

Trafo arus dengan inti besi adalah trafo arus yang umum digunakan pada arus yang kecil (jauh dibawah nilai nominal) terdapat kecenderungan kesalahan dan pada arus yang besar (beberapa kali nilai nominal) trafo arus akan mengalami saturasi.

b) Trafo arus tanpa inti besi

Trafo arus tanpa inti besi tidak memiliki saturasi dan rugi histerisis transformasi dari besaran primer ke besaran sekunder adalah linier di seluruh jangkauan pengukuran, contohnya adalah koil rogowski (coil rogowski).

2. Jenis Trafo Arus Berdasarkan Jenis Isolasi
Berdasarkan jenis isolasinya, trafo arus terdiri dari:

a) Trafo arus kering

Trafo arus kering biasanya digunakan di tegangan rendah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*).

b) Trafo arus cast resin

Trafo arus ini biasanya digunakan pada tegangan menengah, umumnya digunakan pada pasangan dalam ruangan (*indoor*), misalnya trafo arus tipe cincin yang digunakan pada kubikel penyulang 20 kV.

c) Trafo arus isolasi minyak

Trafo arus isolasi minyak banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe bushing yang digunakan pada pengukuran arus penghantar tegangan 70 kV dan 150 kV.

d) Trafo arus isolasi SF₆/compound

Trafo arus ini banyak digunakan pada pengukuran arus tegangan tinggi, umumnya digunakan pada

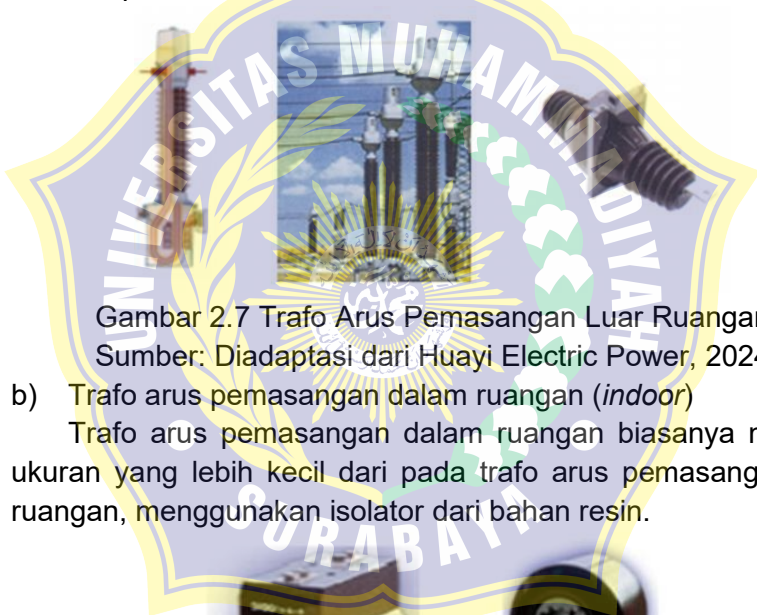
pasangan di luar ruangan (*outdoor*) misalkan trafo arus tipe *top-core*.

3. Jenis Trafo Arus Berdasarkan Pemasangan

Berdasarkan lokasi pemasangannya, trafo arus dibagi menjadi dua kelompok, yaitu:

a) Trafo arus pemasangan luar ruangan (*outdoor*)

Trafo arus pemasangan luar ruangan memiliki konstruksi fisik yang kokoh, isolasi yang baik, biasanya menggunakan isolasi minyak untuk rangkaian elektrik internal dan bahan keramik/porcelain untuk isolator eksternal.



Gambar 2.7 Trafo Arus Pemasangan Luar Ruangan

Sumber: Diadaptasi dari Huayi Electric Power, 2024

b) Trafo arus pemasangan dalam ruangan (*indoor*)

Trafo arus pemasangan dalam ruangan biasanya memiliki ukuran yang lebih kecil dari pada trafo arus pemasangan luar ruangan, menggunakan isolator dari bahan resin.



Gambar 2.8 Trafo Arus Pemasangan Dalam Ruangan

Sumber: Diadaptasi dari repositori ITPLN, 2021

2.2.2.5 Komponen Trafo Arus

Tipe cincin (ring/window type) dan tipe cor-coran cast resin (mounded cast resin type).



Gambar 2.9 CT Tipe Cincin

Sumber: Diadaptasi dari Beckhoff, 2022



Gambar 2.10 Komponen CT Tipe Cincin

Sumber: Diadaptasi dari Beckhoff, 2022

Keterangan Gambar:

1. Terminal utama (*primary terminal*)
2. Terminal sekunder (*secondary terminal*)
3. Kumparan sekunder (*secondary winding*)

CT tipe cincin dan cor-coran cast resin biasanya digunakan pada kubikel penyalang (tegangan 20 kV dan pemasangan indoor). Jenis isolasi pada CT cincin adalah Cast Resin.

1. Kesalahan Trafo Arus

Pada trafo arus dikenal 2 jenis kesalahan, yaitu:

1) Kesalahan Perbandingan/Rasio

Kesalahan perbandingan/rasio trafo arus berdasarkan SPLN D3 014-1.2009. Transformer Arus 1. Hal 2 adalah kesalahan besaran arus karena perbedaan rasio pengenal trafo arus dengan rasio sebenarnya dinyatakan dalam :

$$\varepsilon = \frac{Kn \cdot I_s - I_p}{I_p} \times 100\% \dots \dots \dots (2.1)$$

Di mana :

ε = kesalahan rasio trafo arus (%)

Kn = pengenal rasio trafo arus (Faktor kali: 10, 20, 30, 40, 60 dst.)

I_p = arus primer aktual transformator arus (A)

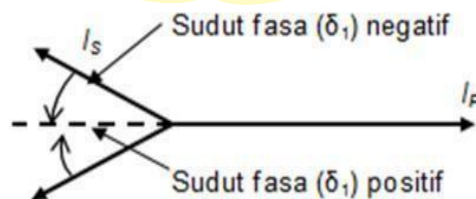
I_s = arus sekunder aktual transformator arus (A)

2) Kesalahan Sudut Fasa

Kesalahan sudut fasa adalah kesalahan akibat pergeseran fasa antara arus sisi primer dengan arus sisi sekunder. Kesalahan sudut fasa akan memberikan pengaruh pada pengukuran berhubungan dengan besaran arus dan tegangan, misalnya pada pengukuran daya aktif maupun daya reaktif, pengukuran energi dan relai arah. Pemeriksaan ini umumnya dilakukan pada saat komisioning atau saat investigasi. Batasan maksimum nilai kesalahan sudut fasa berdasarkan persentase pembebanan dan kelas CT metering.

Kesalahan sudut fasa dibagi menjadi dua nilai, yaitu:

- Bernilai positif (+) jika sudut fasa I_s mendahului I_p
- Bernilai negatif (-) jika sudut fasa I_s tertinggal I_p



Gambar 2.11 Kesalahan Sudut Transformator Arus

Sumber: Diadaptasi dari Buku Pedoman Trafo Arus, 2023

Tabel 2.1 Batas Kesalahan Transformator Arus Metering

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal				+/- % Pergeseran Fasa pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)			
	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60

Tabel 2.2 Batas Kesalahan Transformator Arus Metering

Kelas Ketelitian	+/- % Kesalahan Rasio Arus pada % dari Arus Pengenal					+/- % Pergeseran Fasa pada % dari Arus Pengenal Menit (1/60 derajat)			
	1	5	20	100	120	1	5	20	100
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30

2.2.2.6 Spesifikasi Transformator Arus

Transformator Arus umumnya selain digunakan sebagai media proteksi juga digunakan dalam sistem metering (pembacaan). Transformator arus dalam penggunaannya sangatlah kompleks sehingga CT itu sendiri dibuat dengan spesifikasi dan kelas yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan

sistem yang ada.

Spesifikasi pada CT antara lain:

- a. **Ratio CT**, rasio CT merupakan spesifikasi dasar yang harus ada pada CT, di mana representasi nilai arus yang ada di lapangan dihitung dari besarnya rasio CT. Misal CT dengan rasio 2000/5 A, nilai yang terukur di sekunder CT adalah 2,5 A, maka nilai aktual arus yang mengalir di penghantar adalah 1000 A. Kesalahan rasio ataupun besarnya presentasi Error (%error) dapat berdampak pada besarnya kesalahan pembacaan di alat ukur, kesalahan perhitungan tarif, dan kesalahan operasi sistem proteksi.
- b. **Burden** atau nilai maksimum daya (dalam satuan VA) yang mampu dipikul oleh CT. Nilai daya ini harus lebih besar dari nilai yang terukur dari terminal sekunder CT sampai dengan koil relay proteksi yang dikerjakan.
- c. **Class**, kelas CT menentukan untuk sistem proteksi jenis apakah core CT tersebut. Misal untuk proteksi arus lebih digunakan kelas 5P20, untuk kelas tarif metering digunakan kelas 0.2 atau 0.5, untuk sistem proteksi busbar digunakan Class X atau PX.
- d. **Kneepoint**, adalah titik saturasi/jenuh saat CT melakukan excitasi tegangan. Umumnya proteksi busbar menggunakan tegangan sebagai penggerak koilnya. Tegangan dapat dihasilkan oleh CT ketika sekunder CT diberikan impedansi seperti yang tertera pada Hukum Ohm. Kneepoint hanya terdapat pada CT dengan Class X atau PX. Besarnya tegangan kneepoint bisa mencapai 2000 Volt, dan tentu saja besarnya kneepoint tergantung dari nilai atau desain yang diinginkan.
- e. **Secondary Winding Resistance (RCT)**, atau impedansi dalam CT. Impedansi dalam CT pada umumnya sangat kecil, namun pada Class X nilai ini ditentukan dan tidak

boleh melebihi nilai yang tertera disana. Misal: $<2.5\Omega$, maka impedansi CT pada Class X tidak boleh lebih dari 2.5Ω atau CT tersebut dikembalikan ke pabrik untuk dilakukan penggantian.

2.2.3 Perpindahan Panas pada Sistem Pengendali Suhu dan Kelembapan

Perpindahan panas merupakan proses berpindahnya energi termal dari suatu benda atau ruang yang memiliki suhu lebih tinggi ke benda atau ruang lain yang memiliki suhu lebih rendah. Pada sistem pengendali suhu dan kelembapan otomatis pada *current trafo*, perpindahan panas menjadi prinsip dasar dalam proses pendinginan maupun pemanasan ruang panel. Dalam penelitian ini, mekanisme perpindahan panas yang dominan adalah konveksi dan radiasi.

Perpindahan panas konveksi terjadi pada saat kipas aktif untuk membuang panas dari dalam panel *current trafo*. Sementara itu, perpindahan panas radiasi terjadi pada saat lampu/heater aktif untuk meningkatkan temperatur di dalam panel, baik ketika suhu terlalu rendah maupun ketika kelembapan terlalu tinggi. Dengan memahami prinsip perpindahan panas tersebut, maka mekanisme kerja sistem pengendali otomatis dapat dijelaskan secara ilmiah dan sesuai dengan dasar teori perpindahan kalor.

2.2.3.1 Perpindahan Panas Konveksi pada Proses Pendinginan oleh Kipas

Perpindahan panas konveksi adalah perpindahan kalor yang terjadi antara permukaan benda dengan fluida yang bergerak di sekitarnya, baik berupa udara maupun cairan. Pada penelitian ini, fluida yang dimaksud adalah udara di dalam box panel *current trafo*. Ketika suhu di dalam panel meningkat

melewati batas set point, sistem akan menyalakan kipas. Kipas tersebut menyebabkan udara di sekitar komponen bergerak sehingga panas dari permukaan komponen listrik, dinding panel, dan udara panas di dalam box dapat dipindahkan keluar. Dengan demikian, suhu di dalam panel dapat diturunkan kembali menuju rentang ideal. Secara umum, laju perpindahan panas secara konveksi dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T^\infty) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

Q = laju perpindahan panas konveksi (W)

h = koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = luas permukaan perpindahan panas (m^2)

T_s = suhu permukaan benda atau komponen ($^\circ C$)

T^∞ = suhu fluida/udara di sekitarnya ($^\circ C$)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya kalor yang dipindahkan secara konveksi dipengaruhi oleh koefisien konveksi, luas permukaan, dan selisih suhu antara permukaan benda dengan udara sekitarnya. Semakin besar selisih suhu antara komponen yang panas dengan udara di sekitarnya, maka semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi. Dalam penelitian ini, perpindahan panas konveksi terjadi pada saat sensor DHT membaca suhu melebihi batas atas, kemudian Arduino mengaktifkan relay sehingga kipas menyala. Saat kipas bekerja, aliran udara di dalam panel meningkat dan panas dari komponen *current trafo* maupun udara panas di dalam panel dipindahkan ke udara yang bergerak. Proses ini termasuk konveksi paksa (forced convection) karena perpindahan panas dibantu oleh gerakan udara yang dihasilkan kipas. Secara fisik, proses pendinginan pada sistem ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Sensor mendeteksi kenaikan suhu di dalam panel.

2. Ketika suhu mencapai batas *ON* kipas, Arduino memberikan perintah kepada relay untuk menyalakan kipas.
3. Kipas mengalirkan udara sehingga udara panas di dalam panel terdorong keluar dan digantikan oleh udara yang lebih sejuk.
4. Panas dari komponen dan udara di dalam panel berpindah ke aliran udara melalui mekanisme konveksi.
5. Setelah suhu turun hingga batas *OFF*, kipas dimatikan kembali.

Dengan demikian, fungsi kipas pada penelitian ini tidak hanya sebagai aktuator pendingin, tetapi juga sebagai media untuk meningkatkan perpindahan panas secara konveksi agar suhu *current trafo* tetap berada pada kondisi aman dan stabil.

2.2.3.2 Perpindahan Panas Radiasi pada Proses Pemanasan oleh Lampu/Heater

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan kalor dalam bentuk gelombang elektromagnetik tanpa harus melalui media perantara secara langsung. Setiap benda yang memiliki temperatur di atas nol mutlak akan memancarkan energi panas dalam bentuk radiasi. Pada penelitian ini, perpindahan panas radiasi dimanfaatkan pada lampu/heater yang berfungsi menaikkan suhu di dalam panel *current trafo*. Lampu/heater digunakan pada dua kondisi, yaitu:

1. Ketika suhu di dalam panel berada di bawah batas minimum, sehingga diperlukan pemanasan untuk menaikkan suhu ke rentang ideal; dan
2. Ketika kelembapan berada di atas batas maksimum, sehingga lampu/heater dinyalakan untuk meningkatkan suhu udara di dalam panel dan membantu menurunkan kelembapan relatif.

Secara teoritis, laju perpindahan panas radiasi dapat dinyatakan dengan persamaan Stefan–Boltzmann:

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \dots \dots \dots (2.3)$$

Keterangan:

Q = laju perpindahan panas radiasi (W)

ϵ = emisivitas permukaan benda

σ = konstanta Stefan–Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$)

A = luas permukaan radiasi (m^2)

T1= temperatur sumber panas/lampu (K)

T2= temperatur lingkungan atau permukaan penerima panas (K)

Dari persamaan tersebut dapat dipahami bahwa besarnya panas radiasi dipengaruhi oleh emisivitas permukaan, luas permukaan pemancar, dan perbedaan temperatur absolut pangkat empat antara sumber panas dan lingkungan sekitarnya.

Semakin tinggi temperatur lampu/heater dibandingkan temperatur lingkungan panel, maka energi panas yang dipancarkan akan semakin besar. Pada penelitian ini, lampu/heater berfungsi sebagai sumber panas yang memancarkan energi termal ke udara dan komponen di sekitarnya. Ketika sensor mendeteksi suhu terlalu rendah atau kelembapan terlalu tinggi, Arduino akan mengaktifkan relay sehingga lampu/heater menyala. Panas yang dipancarkan lampu/heater akan menaikkan suhu di dalam panel. Kenaikan suhu ini memiliki dua manfaat utama, yaitu:

1. Menjaga suhu panel tetap berada pada batas ideal, dan
2. Membantu menurunkan kelembapan relatif di dalam panel.

Hubungan antara suhu dan kelembapan relatif cukup erat. Ketika udara dipanaskan, kemampuan udara untuk menampung uap air meningkat. Akibatnya, nilai kelembapan relatif dapat menurun meskipun kandungan uap air di udara tidak berubah secara signifikan. Oleh karena itu, pada penelitian ini lampu/heater tidak hanya berfungsi sebagai pemanas ketika

suhu terlalu rendah, tetapi juga sebagai alat bantu pengendali kelembapan ketika nilai RH melebihi batas atas.

Mekanisme kerja pemanasan pada sistem ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Sensor membaca suhu di bawah set point atau kelembapan melebihi batas atas.
2. Arduino mengaktifkan relay sehingga lampu/heater menyala.
3. Lampu/heater memancarkan energi panas ke ruang panel melalui mekanisme radiasi.
4. Panas dari lampu/heater meningkatkan temperatur udara di dalam panel.
5. Kenaikan suhu menyebabkan kelembapan relatif menurun dan kondisi panel kembali menuju rentang ideal.
6. Ketika suhu atau kelembapan telah kembali ke batas OFF, lampu/heater dimatikan.

Dengan demikian, penerapan perpindahan panas radiasi pada penelitian ini sangat penting karena mendukung dua fungsi utama sekaligus, yaitu pemanasan saat suhu rendah dan pengurangan kelembapan saat RH terlalu tinggi.

2.2.3.3 Keterkaitan Konveksi dan Radiasi dengan Sistem Pengendali Otomatis *Current Trafo*

Pada sistem pengendali suhu dan kelembapan *current trafo*, perpindahan panas konveksi dan radiasi bekerja secara terintegrasi dengan sensor, Arduino, relay, dan aktuator. Sensor DHT berfungsi membaca kondisi suhu dan kelembapan di dalam panel secara real-time. Data tersebut kemudian diproses oleh Arduino untuk dibandingkan dengan nilai set point yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil pembacaan sensor, sistem akan menentukan aktuator mana yang harus diaktifkan.

Jika suhu panel meningkat melebihi batas atas, maka kipas akan menyala dan perpindahan panas yang dominan adalah konveksi paksa, yaitu pelepasan panas dari panel ke udara yang digerakkan oleh kipas. Sebaliknya, jika suhu panel terlalu rendah atau kelembapan terlalu tinggi, maka lampu/heater akan menyala dan perpindahan panas yang dominan adalah radiasi panas dari lampu/heater ke ruang panel. Kedua mekanisme tersebut bekerja saling melengkapi untuk menjaga kondisi lingkungan *current trafo* tetap berada dalam rentang yang aman. Dengan adanya penerapan prinsip perpindahan panas ini, sistem pengendali otomatis tidak hanya bekerja berdasarkan logika ON/OFF, tetapi juga memiliki dasar termal yang jelas. Kipas berperan dalam mempercepat pelepasan panas dari panel, sedangkan lampu/heater berperan dalam meningkatkan temperatur panel serta membantu mengurangi kelembapan berlebih. Oleh karena itu, teori perpindahan panas konveksi dan radiasi menjadi landasan penting dalam perancangan dan analisis sistem pengendali suhu dan kelembapan otomatis pada *current trafo* PLTD Gili Ketapang.

2.2.4 Suhu

2.2.4.1 Pengertian suhu

Suhu merupakan suatu besaran fisika yang menyatakan derajat panas atau dinginnya suatu benda atau lingkungan. Suhu menggambarkan tingkat energi kinetik rata-rata dari partikel-partikel penyusun suatu zat. Semakin tinggi suhu suatu benda, maka semakin besar energi kinetik partikel-partikel di dalamnya, sehingga gerakan partikel menjadi lebih cepat. Sebaliknya, pada suhu rendah, energi kinetik partikel menurun dan pergerakannya menjadi lebih lambat. Dalam konteks teknik dan kelistrikan, suhu menjadi parameter penting karena

berpengaruh langsung terhadap sifat fisik dan kinerja material, terutama bahan konduktor dan isolator. Peningkatan suhu yang berlebihan dapat menyebabkan perubahan karakteristik material, seperti peningkatan resistansi pada penghantar dan penurunan kekuatan isolasi pada bahan isolator. Suhu biasanya diukur menggunakan alat yang disebut termometer atau sensor suhu (misalnya DHT11, DHT22, atau sensor lainnya dalam sistem elektronik). Dalam sistem kontrol otomatis, suhu digunakan sebagai variabel utama untuk menentukan tindakan pengendalian, seperti mengaktifkan kipas atau sistem pendingin.

2.2.4.2 Satuan suhu

Suhu memiliki beberapa satuan yang umum digunakan, baik dalam sistem internasional maupun dalam kehidupan sehari-hari. Satuan-satuan tersebut antara lain:

1. Celcius (°C)

Merupakan satuan suhu yang paling umum digunakan di Indonesia dan sebagian besar negara di dunia. Skala ini didasarkan pada titik beku air (0°C) dan titik didih air (100°C) pada tekanan atmosfer normal.

2. Kelvin (K)

Merupakan satuan suhu dalam Sistem Internasional (SI). Skala Kelvin dimulai dari nol mutlak (0 K), yaitu kondisi di mana tidak ada energi panas sama sekali. Hubungan antara Celcius dan Kelvin adalah:

$$K = ^\circ C + 273$$

3. Fahrenheit (°F)

Digunakan di beberapa negara seperti Amerika Serikat. Pada skala ini, titik beku air adalah 32°F dan titik didih air adalah 212°F.

4. Reamur (°R)

Merupakan satuan suhu yang jarang digunakan saat ini. Pada skala Reamur, titik beku air adalah 0°R dan titik didih air adalah 80°R .

Dalam bidang teknik kelistrikan, satuan yang paling sering digunakan adalah Celcius ($^{\circ}\text{C}$) dan Kelvin (K), karena keduanya lebih sesuai untuk analisis ilmiah dan teknis.

2.2.4.3 Pengaruh suhu terhadap peralatan listrik

Suhu memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap kinerja dan keandalan peralatan listrik. Beberapa pengaruh suhu terhadap peralatan listrik antara lain:

1. **Peningkatan Resistansi Penghantar**
Pada konduktor logam, kenaikan suhu akan menyebabkan peningkatan resistansi listrik. Hal ini dapat mengakibatkan penurunan efisiensi dan peningkatan rugi-rugi daya (losses).
2. **Penurunan Kualitas Isolasi**
Material isolator pada peralatan listrik sangat sensitif terhadap suhu tinggi. Jika suhu melebihi batas tertentu, maka sifat isolasi dapat menurun, sehingga meningkatkan risiko kebocoran arus atau bahkan kegagalan isolasi.
3. **Overheating (Panas Berlebih)**
Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan overheating pada peralatan seperti trafo, motor listrik, dan panel listrik. *Overheating* dapat mempercepat kerusakan komponen dan mengurangi umur pakai peralatan.
4. **Percepatan Penuaan Material**
Suhu tinggi dapat mempercepat proses degradasi material, seperti penuaan isolasi dan korosi pada bagian logam. Hal ini menyebabkan peralatan menjadi lebih cepat rusak.
5. **Gangguan Kinerja Sistem**

Fluktuasi suhu yang tidak terkendali dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem listrik, bahkan dapat memicu gangguan atau trip pada sistem proteksi.

Oleh karena itu, pengendalian suhu menjadi hal yang sangat penting, terutama pada peralatan listrik yang bekerja secara terus-menerus seperti pada PLTD.

2.2.4.4 Batas suhu aman pada trafo

Trafo (transformator), termasuk current transformer, memiliki batas suhu operasi tertentu yang harus dijaga agar tetap bekerja secara optimal dan aman. Batas suhu ini umumnya ditentukan berdasarkan standar internasional dan jenis isolasi yang digunakan. Secara umum, batas suhu aman pada trafo adalah sebagai berikut:

1. Suhu Operasi Normal

Trafo biasanya dirancang untuk bekerja pada suhu sekitar 30°C hingga 40°C (suhu lingkungan), dengan kenaikan suhu (temperature rise) tertentu akibat beban.

2. Kenaikan Suhu Maksimum (*Temperature Rise*)

Kenaikan suhu pada lilitan trafo umumnya dibatasi sekitar 55°C hingga 65°C di atas suhu lingkungan, tergantung pada kelas isolasi yang digunakan.

3. Batas Suhu Isolasi

- Kelas A: maksimum sekitar 105°C
- Kelas B: maksimum sekitar 130°C
- Kelas F: maksimum sekitar 155°C
- Kelas H: maksimum sekitar 180°C

4. Suhu Berbahaya

Jika suhu trafo melebihi batas yang diizinkan, maka dapat terjadi:

- Kerusakan isolasi
- Penurunan performa

- c. Risiko kegagalan trafo (failure)
- d. Potensi kebakaran

Dalam praktiknya, untuk menjaga keamanan dan keandalan, suhu trafo sebaiknya dijaga agar tidak melebihi batas yang direkomendasikan oleh pabrikan. Oleh karena itu, sistem pengendalian suhu otomatis sangat diperlukan untuk menjaga kondisi trafo tetap stabil, terutama pada lingkungan dengan suhu tinggi seperti di PLTD daerah pesisir.

2.2.5 Kelembapan

2.2.5.1 Pengertian kelembapan

Kelembapan merupakan salah satu parameter penting dalam kondisi lingkungan yang menunjukkan jumlah kandungan uap air yang terdapat di dalam udara. Secara umum, kelembapan menggambarkan tingkat kebasahan udara akibat adanya uap air yang tercampur di dalamnya. Semakin tinggi kandungan uap air di udara, maka semakin tinggi pula tingkat kelembapannya. Dalam ilmu fisika dan teknik, kelembapan sangat berkaitan dengan suhu udara. Udara yang lebih panas memiliki kemampuan menampung uap air lebih banyak dibandingkan udara yang lebih dingin. Oleh karena itu, perubahan suhu akan mempengaruhi nilai kelembapan. Hubungan ini menjadi sangat penting dalam sistem pengendalian lingkungan, karena perubahan kecil pada suhu dapat menyebabkan perubahan signifikan pada kelembapan.

Kelembapan biasanya diukur menggunakan alat yang disebut hygrometer atau sensor kelembapan seperti DHT11, DHT22, atau sensor lainnya yang mampu membaca nilai kelembapan dalam bentuk persentase (%). Nilai kelembapan ini sangat penting dalam berbagai bidang, termasuk pertanian, industri, serta sistem kelistrikan. Dalam konteks peralatan listrik, kelembapan menjadi faktor kritis karena dapat mempengaruhi

sifat isolasi dan keandalan sistem. Lingkungan dengan kelembapan tinggi berpotensi menyebabkan penurunan kualitas isolasi, munculnya korosi, serta meningkatkan risiko gangguan listrik. Oleh karena itu, pengendalian kelembapan sangat diperlukan, terutama pada peralatan sensitif seperti trafo arus di lingkungan PLTD. Selain itu, kelembapan juga berkaitan erat dengan fenomena kondensasi, yaitu perubahan uap air menjadi cair akibat penurunan suhu. Fenomena ini sangat berbahaya bagi sistem kelistrikan karena dapat menyebabkan terbentuknya air pada permukaan komponen listrik.

2.2.5.2 Jenis-jenis kelembapan (relatif, absolut)

Kelembapan udara dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, namun yang paling umum digunakan dalam bidang teknik adalah kelembapan absolut dan kelembapan relatif.

1. Kelembapan Absolut (*Absolute Humidity*)

Kelembapan absolut adalah jumlah uap air yang terkandung dalam suatu volume udara tertentu, tanpa memperhatikan suhu udara tersebut. Besaran ini biasanya dinyatakan dalam satuan gram per meter kubik (g/m^3). Kelembapan absolut memberikan informasi mengenai massa uap air yang sebenarnya ada di dalam udara. Sebagai contoh, jika dalam 1 m^3 udara terdapat 10 gram uap air, maka kelembapan absolutnya adalah 10 g/m^3 . Nilai ini tidak dipengaruhi secara langsung oleh perubahan suhu, namun dalam praktiknya akan berubah jika terjadi penambahan atau pengurangan uap air di udara. Kelembapan absolut lebih banyak digunakan dalam kajian ilmiah dan analisis termodinamika, karena memberikan nilai yang pasti mengenai kandungan uap air.

2. Kelembapan Relatif (*Relative Humidity*)

Kelembapan relatif adalah perbandingan antara jumlah uap air yang terdapat di udara dengan jumlah maksimum uap air yang dapat ditampung oleh udara pada suhu tertentu. Nilai ini dinyatakan dalam persen (%). Kelembapan relatif merupakan jenis kelembapan yang paling sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari dan dalam sistem pengendalian lingkungan. Hal ini karena nilai kelembapan relatif memberikan gambaran seberapa jenuh udara terhadap uap air. Sebagai contoh:

- a. Kelembapan relatif 100% berarti udara sudah jenuh dan tidak dapat menampung uap air tambahan
- b. Kelembapan relatif 50% berarti udara masih dapat menampung uap air hingga dua kali lipat
- c. Kelembapan relatif sangat dipengaruhi oleh suhu. Jika suhu turun sementara kandungan uap air tetap, maka kelembapan relatif akan meningkat dan berpotensi mencapai titik jenuh yang menyebabkan kondensasi.

Dalam sistem kontrol suhu dan kelembapan, parameter yang digunakan umumnya adalah kelembapan relatif karena lebih representatif terhadap kondisi lingkungan yang dirasakan oleh peralatan.

2.2.5.3 Dampak kelembapan terhadap peralatan listrik

Kelembapan yang tinggi dapat memberikan dampak negatif yang signifikan terhadap peralatan listrik, terutama pada sistem yang bekerja secara terus-menerus seperti pada PLTD. Beberapa dampak tersebut antara lain:

1. Penurunan Kualitas Isolasi

Uap air yang tinggi dapat diserap oleh material isolasi, sehingga menurunkan kemampuan isolasi dalam menahan arus listrik. Hal ini dapat menyebabkan kebocoran arus atau bahkan hubungan singkat (*short circuit*).

2. **Korosi pada Komponen Logam**
Kelembapan tinggi mempercepat proses oksidasi pada logam, yang menyebabkan korosi. Korosi dapat merusak konektor, terminal, dan bagian logam lainnya sehingga mengganggu kinerja sistem.
 3. **Terjadinya Arus Bocor (Leakage Current)**
Permukaan peralatan yang lembap dapat menjadi media penghantar listrik, sehingga memungkinkan terjadinya arus bocor yang berbahaya.
 4. **Penurunan Umur Peralatan**
Kombinasi antara kelembapan tinggi dan suhu dapat mempercepat degradasi material, sehingga umur pakai peralatan menjadi lebih pendek.
 5. **Gangguan Operasional Sistem**
Kelembapan yang tidak terkendali dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem, gangguan proteksi, serta kegagalan fungsi peralatan listrik.
 6. **Munculnya Jamur dan Kotoran**
Lingkungan lembap dapat memicu pertumbuhan jamur pada komponen isolasi, yang dapat mengganggu performa dan kebersihan sistem.
- Oleh karena itu, pengendalian kelembapan menjadi sangat penting dalam menjaga keandalan dan keamanan peralatan listrik.

2.2.5.4 Risiko kondensasi

Kondensasi adalah proses perubahan uap air di udara menjadi cairan akibat penurunan suhu hingga mencapai titik embun (dew point). Fenomena ini terjadi ketika udara yang mengandung uap air mengalami pendinginan sehingga tidak mampu lagi menahan uap air dalam bentuk gas. Dalam sistem kelistrikan, kondensasi merupakan salah satu risiko paling

berbahaya yang disebabkan oleh kelembapan tinggi. Beberapa risiko kondensasi antara lain:

1. Terbentuknya Air pada Permukaan Peralatan
Kondensasi menyebabkan terbentuknya titik-titik air pada permukaan komponen listrik, seperti trafo, panel, dan kabel.
2. Hubungan Singkat (*Short Circuit*)
Air yang terbentuk dapat menjadi penghantar listrik dan menyebabkan hubungan singkat antar komponen.
3. Kerusakan Isolasi
Air dapat meresap ke dalam bahan isolasi dan merusaknya, sehingga menurunkan kemampuan isolasi secara permanen.
4. Peningkatan Risiko Korosi
Adanya air mempercepat proses korosi pada bagian logam, yang dapat merusak struktur dan koneksi listrik.
5. Gangguan Kinerja Sistem
Kondensasi dapat menyebabkan sistem bekerja tidak stabil, bahkan dapat menyebabkan kegagalan total pada peralatan.
6. Risiko Keselamatan
Kondensasi meningkatkan risiko sengatan listrik dan kebakaran, terutama jika terjadi pada peralatan bertegangan tinggi.

Fenomena kondensasi sangat sering terjadi di daerah dengan kelembapan tinggi seperti wilayah pesisir dan pulau, termasuk lingkungan PLTD Gili Ketapang. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengendalian suhu dan kelembapan yang efektif untuk mencegah terjadinya kondensasi. Dengan adanya sistem pengendali otomatis, kondisi lingkungan dapat dijaga agar tidak mencapai titik embun, sehingga risiko kondensasi dapat diminimalisir dan keandalan peralatan listrik dapat tetap terjaga.