LAPORAN PRAKTIK KERJA LAPANGAN

ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR TRANSFORMATOR PADA PLN NUSANTARA POWER UP PAITON UNIT 9

Disusun oleh:

Aghnia Rahmanda Rozaqi	235060301111033
Akbar Syihabuddin	235060301111028
Akmal Raihan Setiawan	235060301111034
Bilqis Salsabila Ayesha	235060301111017
Miranda Ayudia Putri	235060301111044

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

2026

LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN PRAKTIK KERJA LAPANGAN

ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR TRANSFORMATOR PADA PLN NUSANTARA POWER UP PAITON UNIT 9

Disusun oleh:

Aghnia Rahmanda Rozaqi	235060301111033
Akbar Syihabuddin	235060301111028
Akmal Raihan Setiawan	235060301111034
Bilqis Salsabila Ayesha	235060301111017
Miranda Ayudia Putri	235060301111044

Laporan ini dibuat sebagai hasil Praktik Kerja Lapangan
yang telah dilaksanakan di:
PT PLN NUSANTARA POWER UP PAITON
(Periode: 5 Januari – 5 Maret 2026)

Telah diperiksa dan disetujui oleh
Departemen Teknik Elektro Universitas Brawijaya

Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya	Dosen Pembimbing Praktik Kerja Lapangan
Ir. Muhammad Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph. D.	**Prof. Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, M.S.**
NIP. 197412032000121001	NIP. 195807281987011001

Dipindai dengan CamScanner

LEMBAR PENGESAHAN
LAPORAN PRAKTIK KERJA LAPANGAN

ANALISIS SISTEM PROTEKSI GENERATOR TRANSFORMATOR PADA PLN NUSANTARA POWER UP PAITON UNIT 9

PT PLN NUSANTARA POWER UP PAITON
(Periode: 5 Januari – 5 Maret 2026)

Disusun oleh:

Aghnia Rahmanda Rozaqi	235060301111033
Akbar Syihabuddin	235060301111028
Akmal Raihan Setiawan	235060301111034
Bilqis Salsabila Ayesha	235060301111017
Miranda Ayudia Putri	235060301111044

Paiton, 23 Februari 2026
PT PLN NUSANTARA POWER UP PAITON

Mengetahui,	Mengetahui,
Asisten Manager Pemeliharaan	Pembimbing Lapangan
Sonny Sugiarto Karyadi	**Triyoega Poerbaya**
NID. 8711097JA	**NID. 8611490PT**

Dipindai dengan CamScanner

DAFTAR ISI

COVER i
LEMBAR PENGESAHAN ii
LEMBAR PENGESAHAN INSTANSI iii
DAFTAR ISI iv
DAFTAR GAMBAR vi
DAFTAR TABEL vii
BAB I 1
PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 2
1.3.1 Tujuan Umum 2
1.3.2 Tujuan Khusus 2
1.4 Manfaat 3
1.4.1 Manfaat Umum 3
1.4.2 Manfaat Khusus 4
1.5 Metodologi 4
1.6 Lokasi dan Jadwal Kerja 4
BAB II 6
DASAR TEORI 6
2.1 Generator Sinkron 6
2.2 Transformator Daya 7
2.3 Sistem Proteksi Generator Transformator 8
2.4 Relay Proteksi 9
2.5 Koordinasi Relay 12
2.6 Proses Produksi Listrik PLTU Paiton Unit 9 12
2.6.1 Proses Kebutuhan Bahan Bakar PLTU Paiton Unit 9 14
2.6.2 Siklus Umum PLTU Paiton Unit 9 17
2.6.3 Siklus Air dan Uap 17
2.6.4 Siklus Udara Pembakaran dan Gas Buang 22
2.6.5 Siklus Fly Ash and Bottom Ash (FABA) 23
2.7 Pola Kelistrikan pada Generator Transformator PLTU Paiton Unit 9 26
BAB III 28

METODOLOGI PELAKSANAAN PKL **28**

3.1 Lokasi PKL **28**

3.2 Teknik Pengambilan Data Dalam PKL **28**

3.3 Flowchart Pelaksanaan PKL **29**

3.4 Parameter Analisis **29**

BAB IV **31**

ANALISIS SISTEM PROTEKSI, HASIL DAN PEMBAHASAN **31**

4.1 Sistem Kelistrikan Unit 9 ..... **31**

4.2 Gambaran Umum Generator Transformator Unit 9 ..... **33**

4.3 Analisis Data Setting dan Pengujian Sistem Proteksi Generator Transformator . **36**

4.3.1 Analisis Setting Proteksi Tekanan Gas SF_6 GIS 500 kV 36

4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Tahanan Kontak Terminasi HV Generator Transformator 37

4.3.3 Analisis Hasil Pengujian Mechanical Trip Sistem Proteksi GT 39

4.3.4 Pengujian Proteksi Generator Transformator Panel C 41

4.3.5 Pengujian Proteksi Generator Transformator Panel D 48

4.4 Evaluasi Keandalan **57**

BAB V **60**

KESIMPULAN DAN SARAN **60**

5.1 Kesimpulan **60**

5.2 Saran **61**

DAFTAR PUSTAKA **62**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Generator Sinkron 6
Gambar 2.2 Transformator Daya 7
Gambar 2.3 Proses Produksi Listrik 13
Gambar 2.4 Siklus Bahan Bakar 14
Gambar 2.5 Siklus Air dan Uap 18
Gambar 2.6 Siklus Pengolahan Air 22
Gambar 2.7 Siklus Ash Handling System 24
Gambar 2.8 Proses Pembuatan Magnet 25
Gambar 2.9 Sistem Power Tegangan DC 26
Gambar 2.10 Sistem Pola Operasi Kelistrikan PJB Unit 9 PLTU Paiton Baru 26
Gambar 3.1 Flowchart Pelaksanaan PKL 31
Gambar 4.1 Sistem Pola Operasi Kelistrikan PJB Unit 9 PLTU Paiton Baru 38
Gambar 4.2 Spesifikasi Generator Transformator 34
Gambar 4.3 Hasil Pengujian Awal Sistem Generator Transformator (Metering and Power Supply Test) 41
Gambar 4.4 Hasil Pengujian Proteksi Diferensial Generator Transformator (87T) Pickup, Time, dan Harmonic Restraint Test. 42
Gambar 4.5 Hasil Pengujian Karakteristik Slope Proteksi Diferensial Generator 43
Gambar 4.6 Hasil Pengujian Proteksi Over Exitation (V/Hz) 44
Gambar 4.7 Hasil Pengujian MT Overload, Initial Cooling Protection (HV Side) dan MT Ground Fault Protection (LV A & B Side) 45
Gambar 4.8 Hasil Pengujian MT Voltage Controlled Overcurrent Protection (HV Side) 46
Gambar 4.9 Konfigurasi Logika Trip dan Pemetaan Output Proteksi GT Panel C 48
Gambar 4.10 Hasil Pengujian Relay Proteksi Generator Transformator RCS-985 (Metering Test dan Power Supply Test) 49
Gambar 4.11 Hasil Kalibrasi dan Pengujian Proteksi Differensial (87T) Relay Generator Transformator RCS 985 50
Gambar 4.12 Slope Test Proteksi Differensial 87T 51
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Proteksi Over Excitation (V/Hz) 53
Gambar 4.14 Hasil Pengujian MT Overload dan Initial Cooling Protection (HV side) 54
Gambar 4.15 Hasil Pengujian MT Ground Fault Protection 55
Gambar 4.16 Hasil Pengujian MT Voltage Controller Overcurrent Protection (HV side) 56
Gambar 4.17 Konfigurasi Logika Trip dan Pemetaan Output Proteksi GT Panel D 57

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Umum Generator Transformator 41
Tabel 4.4 Setting Proteksi Tekanan Gas SF_6 GIS 500 kV 43
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tahanan Kontak Terminasi HV Generator Transformator 45
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Mechanical Trip Sistem Proteksi GT TripAlarm 47

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang saat ini berkembang dengan pesat menyebabkan hampir semua alat-alat kehidupan sehari-hari banyak yang memanfaatkan energi listrik sehingga kebutuhan akan konsumsi listrik kian meningkat. Oleh karena itu untuk memenuhi kebutuhan tersebut di Indonesia sendiri dibangun beberapa pembangkit listrik yang tersebar di berbagai daerah di Indonesia. Salah satu pembangkit yang dibangun adalah PLTU Paiton yang menyediakan pasokan energi listrik di daerah Jawa dan Bali.

PLTU adalah pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar yang kemudian dikonversi menjadi listrik. Proses pengkonversian tersebut memerlukan beberapa komponen seperti generator, boiler, turbin uap, dan beberapa komponen pembantu lainnya. Hasil konversi energi tersebut (listrik) nantinya akan didistribusikan ke seluruh penjuru daerah. Namun seiring perkembangan zaman, jumlah kebutuhan energi listrik penduduk meningkat sehingga pembangkit listrik dapat mengalami kendala dan gangguan yang harus segera diatasi.

Mengenai permasalahan diatas, diharapkan dapat menjadi bahan pembelajaran khususnya bagi mahasiswa Teknik Elektro agar dapat lebih memahami tentang kinerja dari pembangkit listrik tenaga uap. Sarana untuk menambah wawasan dan pemahaman mahasiswa melalui kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL).

PKL adalah sarana bagi mahasiswa untuk menerapkan ilmu yang telah didapatkan ketika kegiatan perkuliahan pada dunia kerja. Melalui Praktik Kerja Lapangan mahasiswa diharapkan mampu mempersiapkan diri untuk memasuki dunia kerja sehingga mahasiswa dapat pengalaman praktis atau simulasi pembuktian secara langsung teori yang telah didapat di bangku perkuliahan. Sehingga diharapkan mahasiswa mendapat pengalaman dari permasalahan yang terjadi untuk menjadi sarjana yang kreatif, berwawasan luas, serta profesional. Pada umumnya dunia kerja

akan sangat selektif dalam memilih lulusan yang memiliki keahlian dan benar-benar profesional dengan spesifikasi perusahaan yang bersangkutan.

Generator Transformator merupakan salah satu komponen utama yang berperan penting dalam proses penyaluran daya dari unit pembangkitan ke sistem jaringan. Keandalan dan keamanan sistem dari Generator Transformator sangat menentukan keberlangsungan operasional pada seluruh unit. Melalui analisis terhadap sistem proteksi yang diterapkan, diharapkan dapat diperoleh pemahaman mengenai fungsi, prinsip kerja, serta peranan sistem proteksi dalam menjaga keandalan operasional pembangkit. Oleh karena itu, Penulis memilih judul "Analisis Proteksi Generator Transformator pada PLN Nusantara UP Paiton Unit 9".

1.2 Rumusan Masalah

1. Apa saja jenis proteksi yang digunakan pada Generator Transformator Unit 9 PLN Nusantara Power UP?
2. Bagaimana prinsip kerja dari proteksi pada Generator Transformator Unit 9 PLN Nusantara Power UP?
3. Bagaimana konfigurasi dan komponen sistem proteksi Generator Transformator Unit 9 PLN Nusantara Power UP?

1.3 Tujuan

1.3.1 Tujuan Umum

Tujuan umum pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan di PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton adalah:

1. Menjalin hubungan yang sinergis antara dunia kerja dan perguruan tinggi.
2. Memperoleh pengalaman kerja secara langsung di lingkungan industri pembangkitan tenaga listrik bertenaga uap.
3. Meningkatkan pemahaman dan keterampilan mahasiswa dalam mengaplikasikan teori yang diperoleh selama perkuliahan dalam praktik kerja lapangan.
4. Memahami sistem kerja pembangkit listrik tenaga uap, khususnya pada unit 9 PLTU Paiton.

1.3.2 Tujuan Khusus

Tujuan khusus pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan di PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton adalah:

1. Mengetahui konfigurasi dan komponen sistem proteksi Generator Transformator pada PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton.
2. Memahami prinsip kerja masing-masing peralatan proteksi yang digunakan pada Generator Transformator.
3. Menganalisis fungsi sistem proteksi dalam mengamankan Generator Transformator dari berbagai jenis gangguan.
4. Mengetahui jenis gangguan yang berpotensi terjadi pada Generator Transformator serta sistem proteksi yang bekerja untuk mengatasinya.
5. Memahami prosedur pengujian dan pemeliharaan sistem proteksi Generator Transformator yang diterapkan di PLN Nusantara Power UP Paiton Unit 9.

1.4 Manfaat

1.4.1 Manfaat Umum

Manfaat umum pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan di PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton adalah:

1. Mendukung perusahaan dalam upaya peningkatan
2. Menjadi sarana implementasi kerjasama antara universitas dengan PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton dalam mendukung kegiatan akademik.
3. Memberikan pengalaman kerja lapangan pada mahasiswa dalam lingkungan PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton.
4. Menjadi sarana bagi mahasiswa untuk mengaplikasikan ilmu yang diperoleh selama perkuliahan ke dalam dunia kerja.
5. Menambah wawasan dan pemahaman mahasiswa mengenai sistem kelistrikan pada PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton.

1.4.2 Manfaat Khusus

Manfaat umum pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan di PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton adalah:

1. Memberikan pemahaman mengenai sistem proteksi Generator Transformator yang diterapkan pada PLN Nusantara Power UP unit 9 PLTU Paiton.
2. Mengetahui fungsi dan prinsip kerja peralatan proteksi pada Generator Transformator dalam mengamankan peralatan dari berbagai jenis gangguan.
3. Menambah pengetahuan mengenai jenis gangguan yang dapat terjadi pada Generator Transformator.
4. Mengetahui prosedur pengujian dan pemeliharaan sistem proteksi Generator Transformator guna menjaga keselamatan operasi pembangit listrik.

1.5 Metodologi

Proses penulisan laporan Praktik Kerja Lapangan menggunakan analisa kualitatif deskriptif melalui data-data yang telah didapat. Agar mendapatkan informasi yang lebih akurat dilakukanlah cara sebagai berikut :

1. Metode Observasi

   Metode observasi dilakukan dengan melakukan pengamatan langsung yang didampingi oleh pengawas Perusahaan, dimana pada saat observasi pengawas Perusahaan menjelaskan terkait sistem yang bekerja dan penulis dapat menanyakan langsung terkait sistem yang ada pada PLTU.
2. Metode *Interview*

   Metode *interview* dilakukan dengan melakukan tanya jawab terhadap pegawai yang ahli dan berpengalaman pada bidang yang ditanyakan, sehingga informasi yang diperoleh dapat dipastikan valid dan benar.
3. Metode Studi Literatur

   Metode studi literatur dilakukan dengan membaca *manual book,* membaca jurnal, membaca buku yang terkait dan mendukung dalam penulisan laporan.

1.6 Lokasi dan Jadwal Kerja

1. Lokasi

Lokasi Praktik Kerja Lapangan dilaksanakan di Jl. Raya Surabaya – Situbondo No.Km. 142, Dusun Krajan, Sumberanyar, Kec. Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur 67291.

2. Jadwal Kerja

   Jadwal kerja pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan

   Tanggal : 05 Januari – 05 Maret 2026

   Tempat : PT PLN Nusantara Power UP Unit 9 PLTU Paiton

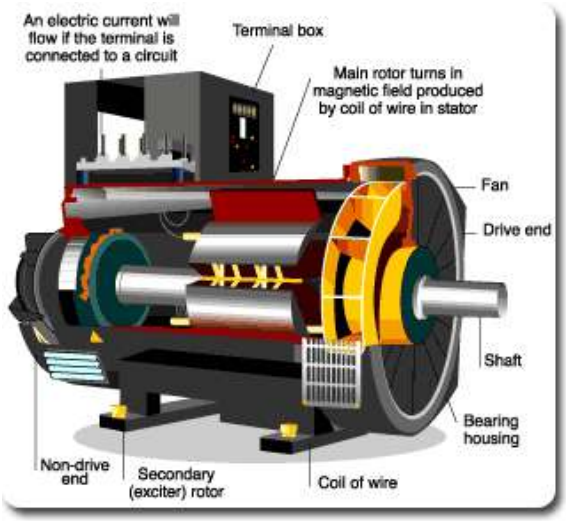
   Hari Kerja : Senin – Jum'at

   Jam Kerja : 08.00 – 16.00 WIB

BAB II
DASAR TEORI

2.1 Generator Sinkron

Generator sinkron merupakan mesin listrik bolak balik yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC) dengan frekuensi yang konstan yang nilai putaran stator dan rotornya sebanding. Energi mekanik diperoleh dari turbin yang diputar oleh uap bertekanan tinggi pada PLTU, kemudian diubah menjadi energi listrik melalui proses induksi elektromagnetik. Generator disebut sinkron karena kecepatan putaran rotor selalu sinkron dengan frekuensi sistem tenaga listrik yang dihasilkan. Bentuk fisik dari generator sinkron ditunjukkan pada Gambar 2.1 sebagai berikut.



Gambar 2.1 Generator Sinkron
(Sumber: Website edukasikini.com)

Pada generator sinkron, rotor menghasilkan medan magnet yang diputar oleh penggerak mula (prime mover), sedangkan stator terdiri dari lilitan jangkar tempat timbulnya tegangan induksi. Ketika rotor berputar, medan magnet akan memotong penghantar pada stator sehingga menghasilkan gaya gerak listrik (GGL). Besarnya frekuensi yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah kutub dan kecepatan putaran rotor sesuai persamaan:

$$f = \frac{P \times n}{120}$$

dengan:

- f = frekuensi (Hz)
- P = jumlah kutub
- n = putaran rotor (rpm)

Generator sinkron pada PLTU umumnya menghasilkan tegangan sekitar 20 kV sebelum dinaikkan menggunakan Generator Transformator menuju sistem transmisi tegangan tinggi. Karena generator merupakan peralatan utama pembangkit, maka diperlukan sistem proteksi yang andal untuk melindungi generator dari gangguan seperti hubung singkat, overload, over excitation, dan gangguan ground fault.

2.2 Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi untuk memindahkan energi listrik dari satu rangkaian ke rangkaian lain melalui prinsip induksi elektromagnetik tanpa mengubah frekuensi. Pada sistem tenaga listrik, transformator digunakan untuk menaikkan maupun menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik. Bentuk fisik dari transformator daya ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Gambar 2.2 Transformator Daya
(Sumber: Henan Fengyuan Power Technology)

Transformator terdiri dari tiga bagian utama, yaitu lilitan primer, lilitan sekunder, dan inti besi. Lilitan primer menerima energi listrik dari sumber, sedangkan lilitan sekunder

menyalurkan energi listrik ke beban. Inti besi berfungsi sebagai media jalur fluks magnet agar proses induksi elektromagnetik berlangsung secara efektif.

Berdasarkan fungsinya pada PLTU, transformator daya dibedakan menjadi beberapa jenis, antara lain Generator Transformator (GT), Unit Auxiliary Transformer (UAT), dan Standby Service Transformer (SST). Generator Transformator berfungsi menaikkan tegangan keluaran generator menuju sistem transmisi, sedangkan UAT dan SST digunakan untuk menyuplai kebutuhan peralatan bantu pembangkit.

Dalam pengoperasiannya, transformator menghasilkan rugi-rugi daya yang berubah menjadi panas. Oleh karena itu transformator dilengkapi sistem pendingin menggunakan minyak isolator, radiator, kipas, maupun pompa minyak untuk menjaga temperatur kerja tetap aman. Selain itu, transformator juga memerlukan sistem proteksi untuk mencegah kerusakan akibat gangguan internal maupun eksternal.

2.3 Sistem Proteksi Generator Transformator

Sistem proteksi merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk mendeteksi kondisi abnormal dan mengisolasi bagian yang mengalami gangguan. Menurut Anderson et al. (2022), sistem proteksi dirancang untuk mendeteksi gangguan secara cepat agar kerusakan tidak meluas ke peralatan lain. Sistem ini bekerja secara otomatis dengan memutus aliran pada peralatan yang terganggu melalui *circuit breaker* (CB) berdasarkan sinyal yang dikirimkan oleh relai proteksi. Tujuan utama dari penerapan sistem ini adalah untuk menjaga keandalan, keamanan, dan kontinuitas operasi sistem tenaga listrik, serta melindungi manusia dan peralatan dari bahaya akibat gangguan listrik seperti hubung singkat, beban lebih (*overload*), tegangan lebih (*overvoltage*), maupun kegagalan isolasi.

Untuk memenuhi tujuan tersebut, sebuah sistem proteksi yang baik harus memenuhi lima kriteria utama, yaitu:

1. **Selektivitas:** Mampu memisahkan bagian yang terganggu secara akurat tanpa memutus bagian sistem lainnya yang masih beroperasi normal.
2. **Keandalan (*Reliability*):** Harus bekerja dengan tepat ketika terjadi gangguan dan tidak gagal beroperasi.

3. **Kecepatan (*Speed*):** Gangguan harus segera diisolasi dalam waktu sesingkat mungkin untuk meminimalkan kerusakan peralatan dan menjaga kestabilan sistem.
4. **Sensitivitas:** Cukup peka untuk mendeteksi gangguan sekecil mungkin sesuai dengan daerah atau zona pengamanannya.
5. **Ekonomis:** Dirancang secara efisien dari segi biaya tanpa mengurangi tingkat keamanan sistem tenaga listrik.

Pada sistem Generator Transformator di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), sistem proteksi memiliki peran yang sangat krusial. Peralatan ini merupakan penghubung utama antara generator dan sistem transmisi, sehingga gangguan yang terjadi di area ini dapat mengakibatkan *trip* atau matinya unit pembangkit secara keseluruhan. Oleh karena itu, sistem proteksi di sini dikonfigurasikan secara khusus untuk melindungi generator, transformator, *busbar*, dan sistem *auxiliary* (peralatan bantu) dari berbagai jenis gangguan, baik yang bersifat elektrik maupun mekanik.

2.4 Relay Proteksi

Relay proteksi merupakan peralatan listrik yang berfungsi mendeteksi kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik dan memberikan perintah trip pada circuit breaker untuk memutus bagian sistem yang mengalami gangguan. Relay bekerja berdasarkan parameter tertentu seperti arus, tegangan, frekuensi, temperatur, maupun tekanan.

Pada sistem tenaga listrik modern, relay proteksi umumnya menggunakan teknologi digital atau numerical relay karena memiliki tingkat akurasi, kecepatan, dan fleksibilitas yang lebih baik dibanding relay elektromekanik. Salah satu relay yang digunakan pada sistem proteksi Generator Transformator adalah relay RCS-985.

Beberapa jenis relay proteksi yang umum digunakan pada Generator Transformator antara lain:

1. Relay Diferensial (87T)

   Relay diferensial merupakan proteksi utama transformator yang bekerja dengan membandingkan arus masuk dan arus keluar transformator. Pada kondisi normal atau gangguan eksternal, arus pada kedua sisi transformator akan relatif sama setelah dikompensasikan terhadap rasio transformasi CT. Apabila terjadi gangguan internal, akan timbul arus diferensial yang menyebabkan relay bekerja.

   Arus diferensial dihitung menggunakan:

$$I_d = |I_1 - I_2|$$

dimana:

- Id = arus diferensial (A)
- I1 = arus sisi primer (A)
- I2 = arus sisi sekunder (A)

Untuk meningkatkan stabilitas relay terhadap kesalahan CT dan arus inrush digunakan arus penahan (restraining current):

$$I_r = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

dimana:

- Ir = restraining current (A)

Karakteristik operasi relay diferensial dinyatakan dengan:

$$Slope = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

Semakin besar nilai slope, semakin tinggi kemampuan relay membedakan gangguan internal dan kondisi normal.

2. Relay Overcurrent (50/51)

Relay overcurrent digunakan untuk mendeteksi arus lebih akibat hubung singkat maupun beban berlebih. Relay akan bekerja apabila arus sistem melebihi nilai pickup yang telah ditentukan.

Besarnya Plug Setting Multiplier (PSM) dapat dihitung dengan:

$$PSM = \frac{I_f}{I_{pickup}}$$

dimana :

- PSM = Plug Setting Multiplier
- If = arus gangguan (A)
- Ipickup = arus pickup relay (A)

Untuk relay inverse IEC Standard Inverse, waktu operasi relay dapat dihitung menggunakan:

$$t = TMS \times \frac{0.14}{PSM^{0.02} - 1}$$

dimana:

- t = waktu operasi relay (s)
- TMS = Time Multiplier Setting

Semakin besar arus gangguan, semakin cepat relay bekerja.

3. Relay Ground Fault (50N/51N)

Relay ground fault digunakan untuk mendeteksi gangguan hubung tanah yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Relay bekerja dengan mengukur arus residual atau arus urutan nol.

Arus urutan nol dihitung menggunakan:

$$3I_0 = I_a + I_b + I_c$$
$$I_0 = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$$

dimana:

- I0 = arus urutan nol (A)
- Ia = arus fasa A (A)
- Ib = arus fasa B (A)
- Ic = arus fasa C (A)

Pada kondisi normal:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Namun ketika terjadi gangguan tanah, akan muncul arus residual sehingga relay memberikan perintah trip.

4. Relay Over Excitation (24)

Relay over excitation digunakan untuk melindungi inti transformator dari kondisi fluks magnet berlebih yang dapat menyebabkan pemanasan berlebihan dan kerusakan isolasi.

Besarnya rasio over excitation ditentukan oleh:

$$\frac{V}{f} \quad \text{atau} \quad \frac{V}{Hz} = \frac{V_{actual}}{f_{actual}}$$

dimana:

- Vactual = tegangan operasi (V)
- Factual = frekuensi operasi (Hz)

Persentase over excitation dapat dihitung menggunakan:

$$\%V/Hz = \frac{(V/f)_{actual}}{(V/f)_{rated}} \times 100\%$$

Jika nilai V/Hz melebihi batas setting relay, maka relay akan mengeluarkan alarm atau perintah trip untuk mencegah kerusakan inti transformator.

5. Relay Thermal Overload

Relay thermal overload digunakan untuk melindungi transformator dari kenaikan temperatur akibat pembebanan berlebih yang berlangsung dalam waktu tertentu. Hubungan rugi-rugi tembaga dengan arus dapat dinyatakan sebagai:

$$P_{cu} = I^2 R$$

dimana:

- Pcu = rugi-rugi tembaga (W)
- III = arus beban (A)
- RRR = resistansi belitan (Ω)

Kenaikan arus beban akan meningkatkan rugi-rugi tembaga sehingga temperatur belitan transformator meningkat. Relay thermal akan bekerja apabila temperatur melebihi batas aman operasi transformator.

Relay proteksi menjadi komponen penting dalam sistem proteksi karena menentukan kecepatan dan ketepatan respon terhadap gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik.

2.5 Koordinasi Relay

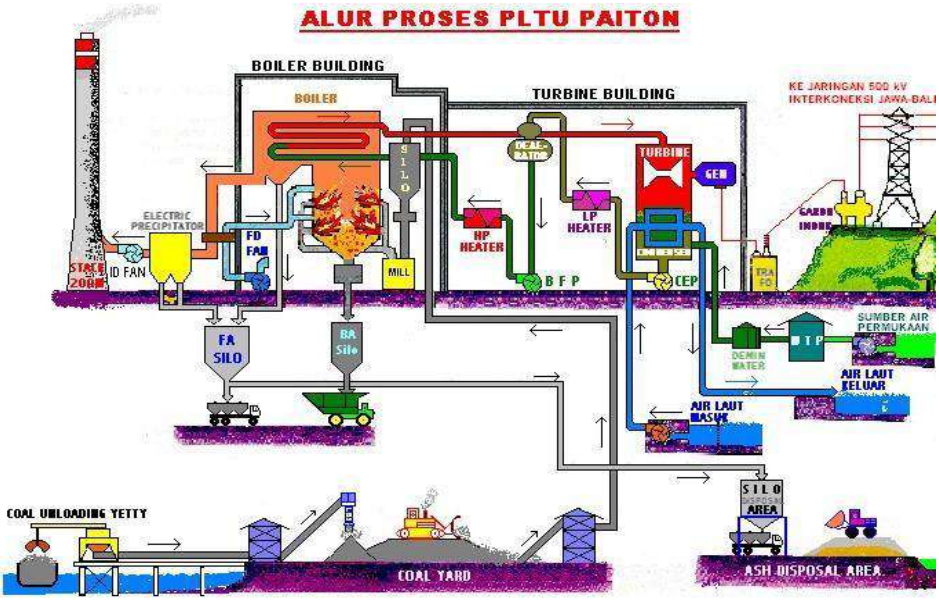
Koordinasi relay merupakan proses pengaturan setting relay proteksi agar sistem proteksi bekerja secara selektif dan terkoordinasi. Tujuan koordinasi relay adalah memastikan hanya peralatan yang mengalami gangguan saja yang diputus, sedangkan bagian sistem lainnya tetap beroperasi normal.

Dalam koordinasi relay, waktu kerja dan nilai setting antar relay harus diatur sedemikian rupa sehingga relay terdekat dengan titik gangguan bekerja lebih dahulu dibanding relay cadangan. Apabila relay utama gagal bekerja, maka relay cadangan akan mengambil alih untuk memutus gangguan.

Koordinasi relay sangat penting dalam sistem tenaga listrik karena dapat meningkatkan keandalan dan stabilitas operasi sistem. Kesalahan koordinasi relay dapat menyebabkan trip meluas (blackout) dan mengganggu kontinuitas penyaluran daya listrik. Oleh karena itu, proses pengujian dan kalibrasi relay diperlukan untuk memastikan setting relay sesuai dengan desain sistem proteksi yang telah ditentukan.

2.6 Proses Produksi Listrik PLTU Paiton Unit 9

Operasional pembangkitan energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) bertumpu pada prinsip konversi energi termal menjadi energi mekanik yang kemudian diubah menjadi energi listrik secara kontinu. S istem ini mengadopsi Siklus Rankine tertutup yang melibatkan berbagai peralatan mekanis dan elektrikal berskala besar yang bekerja secara sinkron di dalam area utama pembangkit. Guna memberikan pemahaman visual yang terstruktur mengenai interaksi antar-komponen dan alur fluida kerja dari hulu ke hilir, konfigurasi sistem mekanis tersebut dipetakan ke dalam diagram alir dokumen operasi. Alur keseluruhan dari proses konversi energi, penanganan bahan bakar, sirkulasi air-uap, hingga pengelolaan emisi gas buang pada PLTU Paiton Unit 9 secara skematis ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



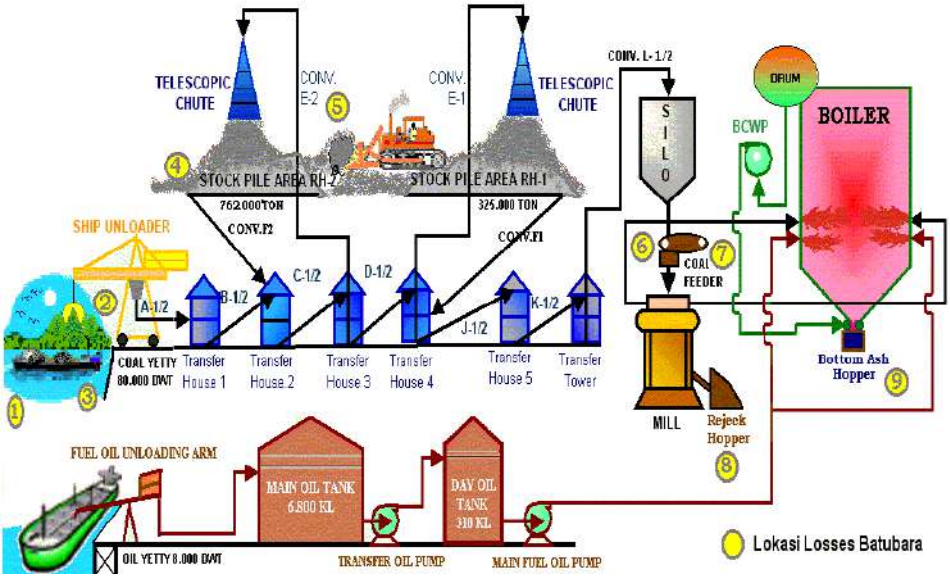
Gambar 2.3 Proses Produksi Listrik
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

Proses pembangkitan listrik pada PLTU Paiton Unit 9 merupakan sirkuit termodinamika terintegrasi yang diawali dengan manajemen bahan bakar, di mana batu bara dikonversi menjadi serbuk halus melalui unit penggilingan guna mengoptimalkan efisiensi pembakaran di dalam *boiler*. Energi termal yang dihasilkan kemudian digunakan untuk memanaskan air demineralisasi hingga mencapai fase uap superkritis bertekanan tinggi yang selanjutnya diekspansikan untuk memutar sudu-sudu turbin yang terkopel dengan generator, sehingga terjadi konversi energi mekanik menjadi energi listrik untuk didistribusikan ke jaringan transmisi nasional 500 kV Interkoneksi Jawa-Bali. Di sisi lain, uap sisa dari turbin akan menjalani proses kondensasi di unit kondensor menggunakan media air laut agar dapat disirkulasikan kembali ke *boiler*,

sementara emisi gas buang diproses melalui *Electrostatic Precipitator* (ESP) untuk mereduksi polutan partikulat sebelum dilepaskan ke atmosfer melalui cerobong, di mana seluruh tahapan ini membentuk satu kesatuan sistem yang berkesinambungan guna menjaga stabilitas serta efisiensi produksi energi.

2.6.1 Proses Kebutuhan Bahan Bakar PLTU Paiton Unit 9

Keandalan operasional boiler sangat bergantung pada kontinuitas dan kualitas pasokan bahan bakar yang dikelola sejak tahap hulu. Sistem penanganan bahan bakar ini mencakup rangkaian logistik yang kompleks, mulai dari proses pembongkaran di dermaga, penimbunan di area penyimpanan, hingga pemrosesan akhir sebelum masuk ke ruang bakar. Untuk memetakan seluruh tahapan logistik dan penyiapan bahan bakar secara terstruktur di PLTU Paiton Unit 9, alur proses mekanis tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Siklus Bahan Bakar

(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

Gambar 2.4 menunjukkan alur pengolahan bahan bakar di PLTU Paiton Unit 9, mulai dari penerimaan batubara hingga pembakaran di boiler. Narasi berikut menjelaskan tahapan proses sesuai dengan nomor urut pada gambar.

1. ***Ship Unloader*** (Nomor 1) Kapal tongkang membawa batubara ke dermaga PLTU. *Ship Unloader* memindahkan batubara dari kapal ke conveyor utama, memastikan pasokan batubara ke area *stockpile* tetap lancar. Proses ini dilakukan dengan hati-

hati untuk menjaga kontinuitas aliran bahan bakar dan mencegah kehilangan material, sekaligus memastikan keselamatan operator dan efisiensi bongkar muatan.

2. **Transfer Tower / *Conveyor* Awal** (Nomor 2) Batubara diteruskan melalui transfer tower dan conveyor ke *stockpile* area. Sistem ini juga melewati *magnetic* separator untuk menyaring logam atau benda asing yang ikut terbawa dalam batubara. Tahap ini menjaga kualitas bahan bakar, melindungi peralatan downstream, dan memastikan aliran tetap stabil menuju area penumpukan.
3. ***Stockpile* Area** (Nomor 3) Batubara ditumpuk di area *stockpile* sebagai cadangan sebelum masuk ke proses penggilingan. Fungsi *stockpile* adalah menjaga kontinuitas pasokan bahan bakar, memungkinkan pengaturan aliran ke tahap berikutnya, serta menjadi buffer saat terjadi gangguan pengiriman atau fluktuasi pasokan dari dermaga.
4. ***Conveyor* dan Transfer Tower Lanjutan** (Nomor 4) Dari *stockpile*, batubara diangkut melalui beberapa conveyor dan transfer tower tambahan menuju *silo* atau *crusher house*. Conveyor ini dilengkapi motor dan sistem kontrol otomatis untuk memastikan aliran batubara tetap stabil dan sesuai kapasitas, menjaga kualitas dan jumlah bahan bakar yang diteruskan ke boiler.
5. ***Silo*** (Nomor 5) Batubara disimpan sementara di silo sebelum masuk ke *coal feeder*. Silo berperan menjaga ketersediaan bahan bakar yang stabil, memungkinkan pengaturan aliran ke mill atau boiler, serta memastikan pasokan dapat dikontrol secara efektif untuk mendukung efisiensi proses pembakaran.
6. ***Coal Feeder*** (Nomor 6) Alat ini mengatur jumlah batubara yang dikirim ke mill. *Coal feeder* memastikan pasokan batubara ke penggilingan konsisten dan sesuai kebutuhan *boiler*, sehingga proses pembakaran berlangsung dengan efisiensi tinggi dan stabil, serta meminimalkan risiko kekurangan bahan bakar.
7. ***Mill*** (Nomor 7) Batubara digiling menjadi serbuk halus agar mudah terbakar di boiler. Partikel yang tidak memenuhi ukuran disalurkan ke hopper untuk dipisahkan. Proses ini menjaga kualitas bahan bakar, mengoptimalkan efisiensi pembakaran, dan mengurangi residu abu yang berpotensi mengganggu operasi boiler.
8. ***Boiler & Bottom Ash Hopper*** (Nomor 8) Serbuk batubara dibakar di boiler untuk menghasilkan panas yang memanaskan air menjadi uap. Bottom ash hopper menampung abu berat dari proses pembakaran. Uap yang dihasilkan kemudian

dialirkan ke turbin untuk memutar rotor dan menghasilkan energi listrik. Setiap tahap saling terhubung dan dirancang untuk menjaga efisiensi, keamanan, dan kontinuitas produksi listrik bagi sistem PLTU Paiton Unit 9.

Penanganan Batu bara (*Coal Handling*) merupakan unit yang menangani batubara mulai dari proses bongkar muat kapal (*ship unloading*) di dermaga Jetty, penyaluran ke stock pile area sampai penyaluran ke *bunker* unit (*Silo*).

a. *Unloading*

   Berfungsi untuk sebagai jembatan agar batubara yang diangkut oleh kapal tongkang dapat disalurkan dengan cara proses pada sistem unloading,kemudian dibongkar di *coal jetty ship unloader* (SU). Dari Ship unloader, batubara ditransportasikan menuju *Transfer Tower* 1 (TTI) menggunakan conveyor 1A dan 24 dengan melewati *Transfer Tower* (TTO). Pengangkutan batu bara ini juga menggunakan motor 6 KV sebanyak 2 buah yang Dimana digunakan pada conveyor A dan conveyor B. Di TTO, batubara akan melewati sebuah magnetic separator yang berfungsi untuk menangkap logam-logam yang terikut di dalam batubara. Di TTI, batubara ditransportasikan menuju coal yard dengan 2 jalur yang berbeda yaitu untuk kondisi normal operasi melalui stacker reclaimer menggunakan conveyor 6A dan dan untuk kondisi emergency melalui emergency coal pile menggunakan conveyor 7A.

b. *Coal Loading*, terdapat 2 mode yang digunakan PLTU Paiton Unit 9 dalam proses loading batubara, yaitu:

   1) Transportasi batubara dari coal jetty langsung menuju coal bunker (silo)

      Pada proses ini, batubara di TTI yang ditransportasikan dari coal jetty langsung diarahkan menuju crusher house dengan menggunakan conveyor 3A dan 38.Di dalam crusher house, bongkahan batubara dihancurkan hingga memiliki diameter 3 cm. Dari crusher house, batubara ditransportasikan menuju tripper dengan menggunakan conveyor 4A dan 48. Oleh tripper, batubara kemudian diarahkan menuju coal bunker (silo) dengan menggunakan conveyor SA dan 58.

   2) Transportasi batubara dari *coal yard* menuju *coal bunker* (silo)

      Terdapat 2 mode yang digunakan untuk proses loading dari coal yard, yaitu: menggunakan stacker reclaimer atau menggunakan reclaimer hopper untuk transportasi batubara dari coal yard menuju TTI. Untuk transportasi batubara

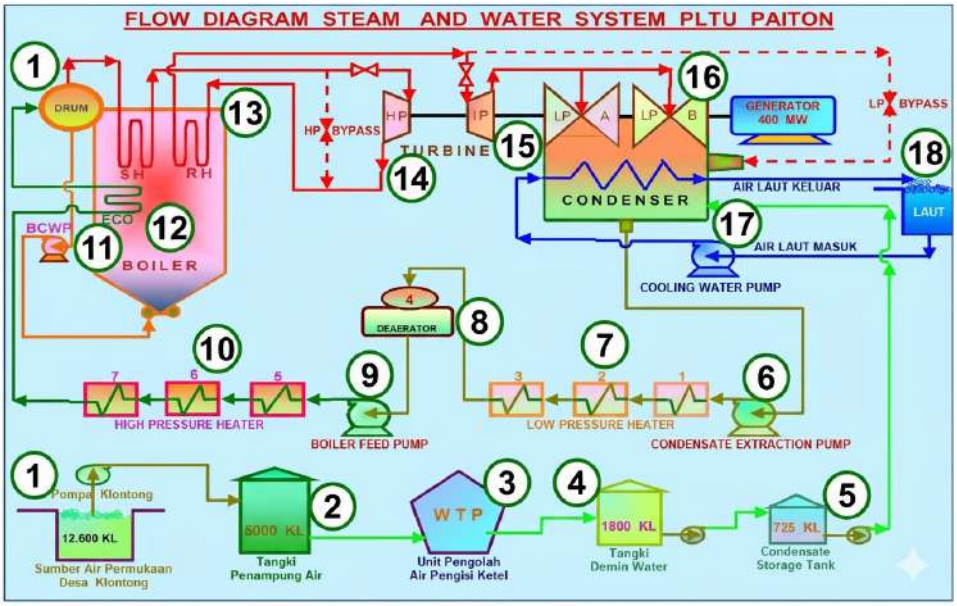
dari coal yard menuju TTI dengan stacker reclaimer menggunakan conveyor 6A dan untuk transportasi batubara dari coal yard menuju TTI dengan reclaimer hopper menggunakan conveyor &A. Untuk proses transportasi batubara dari TTI menuju *coal bunker* adalah sama dengan proses *loading* dari *coal jetty* langsung menuju *coal bunker*.

2.6.2 Siklus Umum PLTU Paiton Unit 9

1. Pertama, air diisikan ke boiler hingga memenuhi seluruh luas permukaan pemindah panas. Didalam boiler air ini dipanaskan dengan panas hasil pembakaran batubara sehingga berubah menjadi uap.
2. Kedua, uap bertekanan dan bertemperatur tertentu hasil produksi boiler diarahkan melalui pipa-pipa untuk memutar turbin sehingga menghasilkan energi mekanik berupa putaran.
3. Ketiga, putaran turbin menimbulkan medan magnet dalam kumparan generator, sehingga ketika turbin berputar dihasilkan energi listrik dari terminal output generator
4. Keempat, Uap sisa keluaran turbin masuk ke kondensor untuk didinginkan dengan air pendingin agar berubah kembali menjadi air yang disebut air kondensat. Air kondensat hasil kondensasi uap kemudian digunakan lagi sebagai air pengisi boiler.
5. Demikian siklus ini berlangsung terus menerus dan berulang.

2.6.3 Siklus Air dan Uap

Siklus air dan uap merupakan inti dari proses konversi energi termal menjadi energi mekanik penggerak mula pada sistem pembangkitan termal. Operasional siklus ini menerapkan prinsip sirkulasi tertutup guna mempertahankan kualitas fluida kerja, meminimalkan kehilangan massa air, serta mengoptimalkan efisiensi penyerapan kalor di dalam boiler. Pemahaman yang terstruktur mengenai tahapan perlakuan air baku, pemanasan awal, fase penguapan superkritis, ekspansi turbin, hingga proses kondensasi sangat penting untuk menjaga keandalan unit. Alur operasional terintegrasi dari keseluruhan elemen penukar panas dan pemompaan pada sistem air-uap PLTU Paiton Unit 9 secara skematis dipetakan pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Siklus Air dan Uap

(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai alur operasional Steam and Water System PLTU Paiton Unit 9 berdasarkan urutan penomoran pada diagram. Penjelasan ini disusun menggunakan terminologi teknis yang formal untuk kepentingan dokumentasi atau laporan teknis.

- Tahap Pengolahan dan Penyediaan Air (*Water Treatment System*)
  1. Ekstraksi Air Baku (*Raw Water Intake*)

     Proses dimulai dengan pengambilan air baku dari sumber air permukaan (Desa Klontong) menggunakan pompa transmisi. Air ini masih mengandung mineral, sedimen, dan mikroorganisme yang harus dihilangkan sebelum masuk ke sistem pembangkit.
  2. Tangki Penampung Air (*Raw Water Tank*)

     Air baku ditampung dalam tangki berkapasitas 5000 KL. Fungsi utama tangki ini adalah sebagai cadangan pasokan (*buffer*) untuk memastikan unit pengolahan air tetap beroperasi secara kontinu tanpa bergantung langsung pada fluktuasi debit sumber air.
  3. Unit Pengolah Air Pengisi Ketel (*Water Treatment Plant* - WTP)

     Pada tahap ini, air menjalani proses filtrasi, koagulasi, dan demineralisasi melalui penukar ion (*ion exchanger*). Tujuannya adalah menghasilkan air murni (air demin) dengan konduktivitas serendah mungkin guna mencegah

pembentukan kerak (*scaling*) dan korosi pada pipa-pipa boiler bertekanan tinggi.

4. Tangki Air Demin dan Tangki Penyimpanan Kondensat

   Tangki Air Demin mengalirkan air make-up untuk menutupi kekurangan air akibat *blowdown* atau kebocoran pada siklus. Tangki Penyimpanan Kondensat menampung kondensat berlebih dan menyuplainya kembali saat level hotwell turun, agar pasokan ke CEP tetap stabil.

- Tahap Pemanasan Awal dan Deaerasi (*Feedwater System*)

5. Pompa Ekstraksi Kondensat (*Condensate Extraction Pump* - CEP)

   Pompa ini bertugas mengalirkan air kondensat dari hotwell (penampung di bawah kondensor) menuju sistem pemanas. Air ini berada pada tekanan rendah dan harus dinaikkan tekanannya agar dapat mengalir melalui rangkaian penukar panas.

6. Pemanas Tekanan Rendah (Low Pressure Heater 1, 2, 3)

   Air kondensat melewati serangkaian pemanas tipe *shell and tube*. Media pemanasnya adalah uap ekstraksi yang diambil dari turbin tekanan rendah. Proses ini bertujuan meningkatkan efisiensi siklus dengan menaikkan suhu air sebelum memasuki deaerator.

7. Der Demin (*Demineralized Water Tank*)

   Air hasil olahan WTP disimpan dalam tangki khusus berkapasitas 1800 KL. Air ini merupakan stok utama yang akan digunakan untuk mengisi ulang siklus air-uap apabila terjadi penyusutan volume dalam siklus tertutup.

8. Tangki Penyimpanan Kondensat (*Condensate Storage Tank*)

   menampung kondensat berlebih dan menyuplainya kembali saat level hotwell turun, agar pasokan ke CEP tetap stabil.

9. Air demin dialirkan ke tangki penyimpanan akhir sebelum diinjeksikan ke dalam sistem utama melalui jalur pengisian kondensor, memastikan level air dalam siklus tetap stabil.

10. aerator

    Merupakan unit penukar panas tipe kontak langsung yang berfungsi utama untuk mengeliminasi gas-gas terlarut, terutama Oksigen (O2) dan Karbondioksida (CO2). Penghilangan gas ini sangat krusial untuk mencegah korosi pitting pada material logam boiler.

11. Pompa Air Pengisi Boiler (Boiler Feed Pump - BFP)

Merupakan jantung dari sistem air pengisi yang menaikkan tekanan air hingga melampaui tekanan operasional di dalam boiler. Pompa ini mendorong air menuju boiler melalui rangkaian pemanas tekanan tinggi.

12. Pemanas Tekanan Tinggi (High Pressure Heater 5, 6, 7)

    Air bertekanan tinggi kembali dipanaskan menggunakan uap ekstraksi dari turbin tekanan tinggi dan menengah. Pemanasan pada tahap ini dilakukan untuk meminimalisir kejutan termal (*thermal shock*) saat air masuk ke dalam boiler yang bersuhu sangat panas.

- Tahap Evaporasi dan Superheating (Boiler System)

13. Economizer (ECO)

    Air pengisi memasuki *Economizer* yang terletak di jalur gas buang boiler. Di sini, air menyerap panas sisa dari gas buang untuk menaikkan suhunya hingga mendekati titik jenuh, sehingga beban kerja di ruang bakar boiler menjadi lebih ringan.

14. Steam Drum dan Ruang Bakar (Boiler)

    Air masuk ke dalam *Steam Drum* dan dialirkan ke p ipa-pipa dinding boiler (*waterwalls*). Di dalam ruang bakar, terjadi perpindahan panas radiasi dan konveksi yang mengubah air menjadi campuran uap dan air. Uap kemudian dipisahkan dari air di dalam drum.

15. Superheater (SH)

    Uap jenuh dari drum dialirkan menuju rangkaian pipa *Superheater* yang terpapar panas sangat tinggi. Proses ini mengubah uap jenuh menjadi uap kering (*superheated steam*) yang memiliki entalpi tinggi, yang merupakan syarat utama untuk menggerakkan turbin tanpa merusak sudu-sudunya.

- Tahap Ekspansi Uap dan Pembangkitan Energi (Turbine & Generator)

16. Turbin Tekanan Tinggi (High Pressure Turbine - HP)

    Uap superkritis masuk ke Turbin HP dan mengekspansikan energinya untuk memutar sudu turbin. Setelah keluar dari Turbin HP, uap mengalami penurunan suhu dan tekanan, sehingga dikirim kembali ke boiler untuk dipanaskan ulang pada bagian Reheater (RH).

17. Turbin Tekanan Menengah (*Intermediate Pressure Turbine* - IP)

    Uap hasil pemanasan ulang dari *Reheater* masuk ke Turbin IP. Proses pemanasan ulang ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal siklus secara keseluruhan dan mencegah uap mengembun terlalu dini.

18. Turbin Tekanan Rendah (*Low Pressure Turbine* - LP) dan Generator

    Uap akhirnya masuk ke Turbin LP (A dan B) untuk mengekstraksi energi yang tersisa. Putaran mekanik dari seluruh poros turbin ini menggerakkan Generator untuk menghasilkan energi listrik dengan kapasitas nominal 400 MW.

- Tahap Kondensasi dan Pendinginan (Condensing System)

19. Pompa Air Pendingin (*Cooling Water Pump* - CWP)

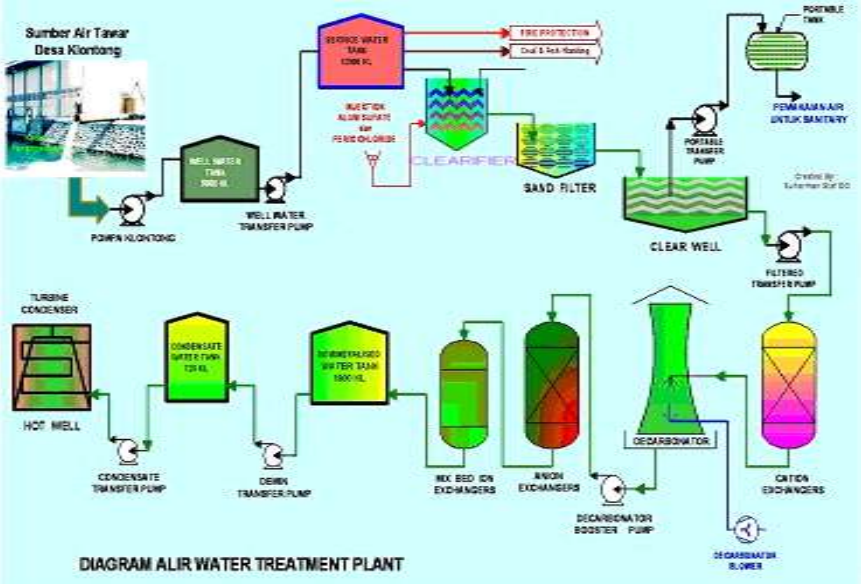
    Pompa ini mensirkulasikan air laut dalam volume besar menuju kondensor. Air laut bertindak sebagai media penyerap panas dalam sistem pertukaran panas.

20. Kondensor (Condenser)

    Uap bekas dari Turbin LP masuk ke kondensor dan bersentuhan dengan pipa-pipa yang berisi air laut dingin. Akibat perpindahan panas, uap akan mengalami kondensasi dan berubah fase kembali menjadi air (kondensat). Air laut yang telah menyerap panas kemudian dibuang kembali ke laut, sementara air kondensat dikumpulkan di hotwell untuk dipompa kembali menuju tahap nomor 6.

A. Siklus Air

Kebutuhan air pada PLTU Paiton Unit 9 menggunakan air laut yang diolah menjadi air tawar melalui sistem ***Reverse Osmosis (RO)***. Air laut dipompa menuju raw water storage tank dan disaring menggunakan membran bertekanan tinggi serta diinjeksi klorin untuk mencegah masuknya biota laut. Selanjutnya air diproses di demineralization plant untuk menghilangkan sisa mineral sehingga menjadi air demineralisasi yang digunakan sebagai *make up water* pada sistem pembangkit. Air tersebut kemudian dialirkan melalui beberapa peralatan seperti condensate polishing, heater, dan deaerator sebelum dipompa ke boiler hingga berubah menjadi uap di steam drum. Sementara itu, air laut dari kanal intake juga digunakan sebagai media pendingin kondensor untuk mendinginkan uap bekas turbin sebelum dialirkan kembali ke laut. Siklus Pengolahan Air ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 2.6 Siklus Pengolahan Air

(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

B. Siklus Uap

Uap dari bagian atas steam drum dialirkan ke turbin tekanan tinggi (HP) melalui superheater untuk dipanaskan hingga menjadi uap kering. Uap tersebut kemudian menggerakkan sudu-sudu turbin HP, lalu sisa uapnya dipanaskan kembali di reheater sebelum masuk ke turbin tekanan menengah (IP). Setelah menggerakkan turbin IP, uap selanjutnya mengalir ke turbin tekanan rendah (LP) untuk kembali memutar sudu turbin. Sisa uap dari turbin LP kemudian masuk ke kondensor untuk didinginkan menggunakan air laut hingga berubah kembali menjadi air dan ditampung di hotwell. Proses ini mengubah energi panas uap menjadi energi mekanik yang memutar turbin, kemudian diteruskan ke generator sehingga menghasilkan energi listrik di PLTU Paiton.

2.6.4 Siklus Udara Pembakaran dan Gas Buang

1. Udara Pembakaran

Udara pembakaran yang dihasilkan ada dua jenis, yaitu *Primary Air* (udara primer) dan *Secondary Air* (udara sekunder). Udara primer merupakan jenis udara yang dipasok oleh PA Fan yang dihembuskan menuju Pulverizer (Mill) kemudian bersama-sama dengan serbuk batubara dialirkan ke furnace untuk di bakar. Sebelum menuju pulverizer, udara primer akan terlebih dahulu melewati air preheater Pada air

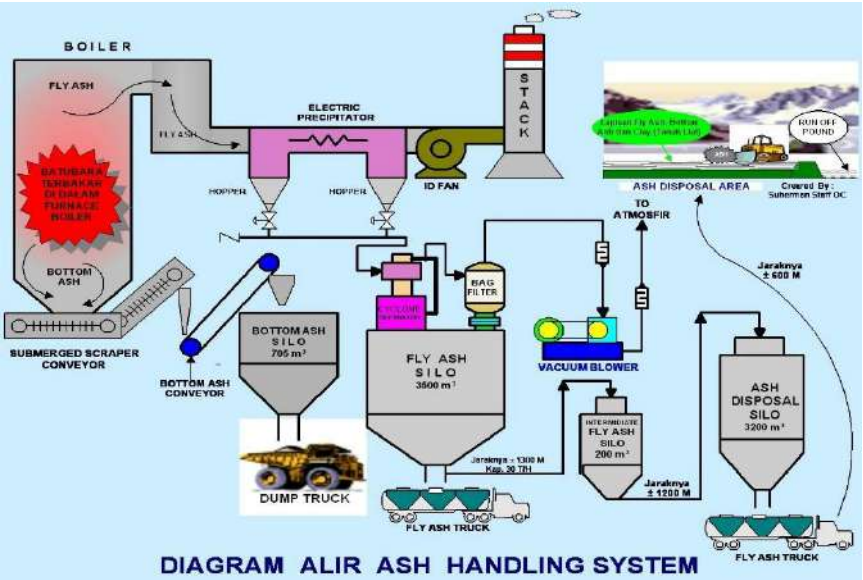
preheater, udara dipanaskan terlebih dahulu dengan memanfaatkan panas gas buang. Udara primer saja tidak cukup dalam memenuhi kebutuhan turbulensi untuk melakukan pencampuran bahan bakar secara sempurna atau memenuhi kebutuhan oksigen untuk pembakaran sempurna. Maka diperlukan pasokan udara sekunder yang dihasilkan oleh kerja FD Fan. Udara sekunder ini dihembuskan ke *windbox* (ruang bakar) yang nantinya akan melewati air preheater. Di dalam air preheater ini, udara sekunder dipanaskan bersama sama dengan udara primer dengan memanfaatkan panas dari gas buang.

2. Siklus Gas Buang

   Gas hasil yang diperoleh dari proses pembakaran pada furnace akan naik ke sisi atas ruang boiler melewati *Secondary Superheater* (SSH) dan *Secondary Reheater* (SRH). Pada saat gas buang melewati SSH dan SRH, gas buang tersebut akan memanaskan uap dari *Primary Superheater* (PSH) yang mengalir di dalam SSH dan ekstrak uap dari HP turbin yang mengalir di SRH. Gas buang selanjutnya akan turun ke sisi bawah boiler melewati PSH dan *economizer* dan mengalir menuju *Electrostatic Precipitator* (ESP) melewati air preheater. Proses mengalirnya gas buang ini dibantu oleh ID Fan, yang mana gas buang tersebut oleh ID Fan dialirkan menuju stack dan dibuang ke atmosfer. Selama melewati PSH dan *economizer*, gas buang tersebut akan memanaskan uap dari steam drum yang mengalir di dalam PSH dan air dari deaerator yang mengalir di dalam *economizer*. Di dalam air preheater, gas buang akan dimanfaatkan untuk memanaskan udara pembakaran (primer dan sekunder) dan di dalam ESP, partikel partikel padat (debu) yang terikut di dalam gas buang akan ditangkap oleh katoda-anoda yang terpasang di dalam ESP sehingga gas buang yang keluar dari stack memiliki kandungan debu yang sedikit.

2.6.5 Siklus *Fly Ash and Bottom Ash* (FABA)

Ash Handling (Unit Penanganan Abu) *Electrostatic Precipitator* atau (ESP) merupakan Penanganan Abu terbang di PLTU Paiton 9 yang digunakan untuk menangkap partikel-partikel seperti debu. *Electrostatic Precipitator* merupakan alat yang digunakan dalam suatu proses mengendapkan. Sedangkan *Electrostatic* adalah sebuah fenomena listrik dimana muatan listrik berpindah dari satu potensial tinggi ke potensial rendah tanpa adanya bagian yang bergerak. Untuk siklus *fly ash* dan *bottom ash* ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Siklus *Ash Handling System*

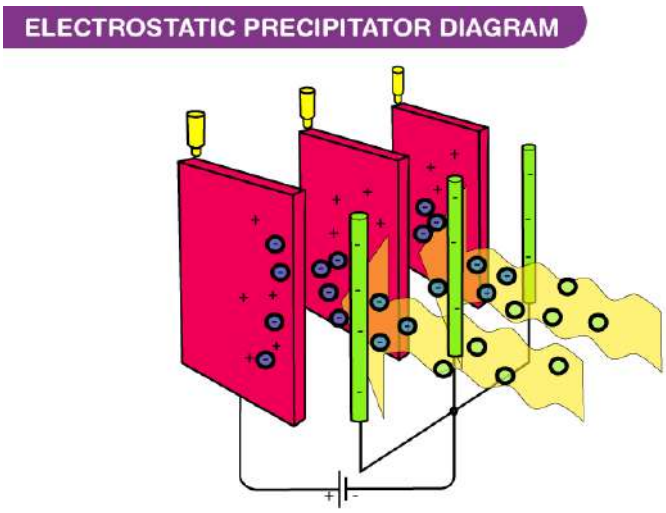
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

ESP secara garis besar terdiri dari 3 (tiga) komponen utama yang pertama adalah *Discharge Electrode* (DE) merupakan elektroda yang dialiri pulsa arus DC tegangan tinggi negatif (-) sehingga menghasilkan medan listrik negatif. Kedua *Collection Electrode* (CE) adalah yang dialiri pulsa arus DC tegangan tinggi Positif (+) elektroda yang ditanahkan dan yang terakhir adalah *Hammering Device* (HD) merupakan alat yang digunakan untuk melepaskan debu/partikel yang menempel pada *Collecting Electrode* dengan cara digetarkan (dipukul dengan motor listrik).

Dalam prosesnya Hasil pembakaran gas buang dari *Boiler* (flue gas) akan di hisap oleh ID Fan, Sebelum disalurkan ke cerobong atau *Stack* maka akan melalui system ESP yang merupakan suatu medan listrik yang terbentuk antara *discharge electrode* dengan *collector plate*, flue gas yang mengandung butiran debu pada awalnya bermuatan netral dan pada saat melewati medan listrik, partikel debu tersebut akan terionisasi sehingga partikel debu tersebut menjadi bermuatan negatif.selanjutnya Partikel debu yang telah bermuatan negatif (-) akan menempel pada pelat-pelat pengumpul (*collector plate*). Debu yang dikumpulkan di *collector plate* dipindahkan kembali secara periodik dari *collector plate* dengan cara digetarkan (*rapping*). Debu tersebut kemudian jatuh ke bak penampung, dan dipindahkan (*transport*) ke ash silo dengan cara dihembuskan (*vacuum*) Proses Pembentukan Medan Listrik:

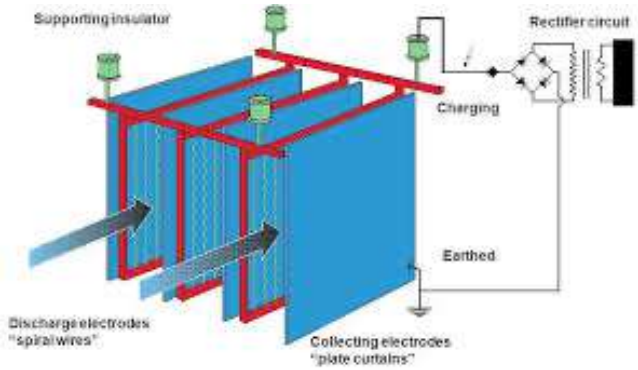
1. Pada dasarnya electrode terdiri dari dua jenis, yaitu *discharge electrode* yang bermuatan negatif (-) dan *collector plate electrode* bermuatan positif (+)

2. *Discharge electrode* nantinya akan diletakkan antara *collector plate* pada jarak tertentu (jarak antara *discharge electrode* dengan *collector plate*. Berdasarkan konfigurasi kedua jenis elektroda tersebut, terbentuk mekanisme kerja *Electrostatic Precipitator* (ESP) yang memanfaatkan gaya elektrostatik untuk memisahkan partikel debu dari aliran gas. Gambaran alur proses tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Proses Pembuatan Magnet
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

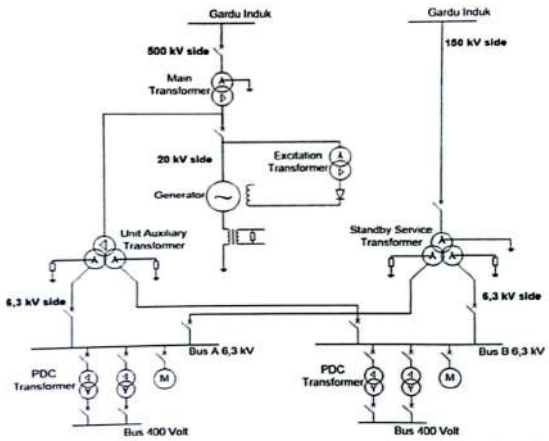
3. *Discharge electrode* diberi listrik arus searah (DC) dengan muatan minus, pada level tegangan antara 55-75 kV DC (sumber listrik awalnya adalah 380V AC, kemudian dinaikkan oich transformer menjadi sekitar 55-75 V dan diubah menjadi listrik DC oleh *rectifier*, diambil hanya potensial negatifnya saja).
4. *Collector plate* ditanahkan (*grounding*) agar dapat bermuatan positif.
5. Dengan demikian, pada saat *discharge electrode* diberi arus DC, maka medan listrik terbentuk pada ruang yang berisi tirai-tirai electrode tersebut dan partikel-partikel debu akan tertarik pada pelat-pelat tersebut, Gas bersih kemudian bergerak ke cerobong asap. Untuk itu, alur proses kerja sistem power tegangan DC dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Sistem Power Tegangan DC
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

2.7 Pola Kelistrikan pada Generator Transformator PLTU Paiton Unit 9

Keandalan penyaluran energi listrik yang dihasilkan oleh generator menuju jaringan transmisi nasional serta kontinuitas pasokan daya untuk kebutuhan internal pembangkit diatur melalui suatu sistem konfigurasi elektrikal yang terintegrasi. Sistem pola operasi kelistrikan ini dirancang guna memfasilitasi evakuasi daya bertegangan ekstra tinggi sekaligus menyediakan skema proteksi dan cadangan pasokan (*back-up*) daya yang fleksibel bagi motor-motor penggerak serta perangkat kontrol penunjang operasi unit. Efisiensi pembagian beban elektrikal, interkoneksi trafo-trafo utama, serta pemetaan distribusi tegangan menengah hingga tegangan rendah di PLTU Paiton Unit 9 secara skematis ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Sistem Pola Operasi Kelistrikan PJB Unit 9 PLTU Paiton Baru
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

Sebelum generator menghasilkan tegangan pada PLTU Paiton Unit 9, unit ini mendapatkan supply tegangan dari GITET melalui trafo SST (*Standby Service Transformer*). Dimana tegangan dari GITET (150 kV) di *step down* menjadi 6,3 kV. Tegangan dari trafo tersebut akan digunakan untuk melakukan start unit, untuk proses pembangkitan tenaga listrik. Setelah unit beroperasi dan generator sudah mengeluarkan tegangan sebesar 20 kV tegangan tersebut akan diteruskan ke trafo GT (*Generator Transformer*) dan di step up menjadi 500 kV untuk didistribusikan ke GITET.

Adanya kebutuhan untuk pemakaian sendiri guna untuk menjalankan peralatan listrik mendapatkan supply dari trafo UAT (*Unit Auxiliary Transformer*). Untuk mengubah power supply SST ke UAT dilakukan *change over* oleh operator setelah beban mencapai 10% dari beban maksimal (660 MW). Saat proses *shutdown* atau saat unit mengalami gangguan dan *trip power supply* berasal dari GT karena trafo ini berfungsi dua arah, yaitu saat unit beroperasi GT mensupply ke sistem jaringan (500 kV) dan apabila unit trip atau shutdown maka GT digunakan untuk memenuhi kebutuhan unit pada saat akan start up, sedangkan SST hanya stand by dan dipergunakan jika GT dalam perbaikan.

BAB III
METODOLOGI PELAKSANAAN PKL

3.1 Lokasi PKL

1. Lokasi

   Lokasi Praktik Kerja Lapangan dilaksanakan di PLN Nusantara Power UP Paiton Unit 9 yang terletak di Jl. Raya Surabaya – Situbondo No.Km. 142, Dusun Krajan, Sumberanyar, Kec. Paiton, Kabupaten Probolinggo, Jawa Timur 67291. PT. PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Paiton adalah sebuah perusahaan pembangkit listrik tenaga uap yang letaknya berada di daerah Paiton. PT. PLN Nusantara Power UP Paiton ini adalah gabungan dari unit 1, 2, dan 9.

2. Jadwal Kerja

   Jadwal kerja pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan

   Tanggal : 05 Januari – 05 Maret 2026

   Tempat : PT PLN Nusantara Power UP Unit 9 PLTU Paiton

   Hari Kerja : Senin – Jum'at

   Jam Kerja : 08.00 – 16.00 WIB

3.2 Teknik Pengambilan Data Dalam PKL

Pada pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PLTU Paiton Unit 9, pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang mendukung analisis sistem proteksi generator transformator. Teknik pengambilan data dilakukan melalui beberapa metode, yaitu:

1. **Observasi Lapangan**

   Metode observasi dilakukan dengan mengamati secara langsung kondisi operasional peralatan di lapangan, khususnya generator transformer, sistem proteksi, serta pola kelistrikan pembangkit. Observasi ini bertujuan untuk memahami prinsip kerja, fungsi peralatan, dan sistem operasi yang diterapkan di unit pembangkit.

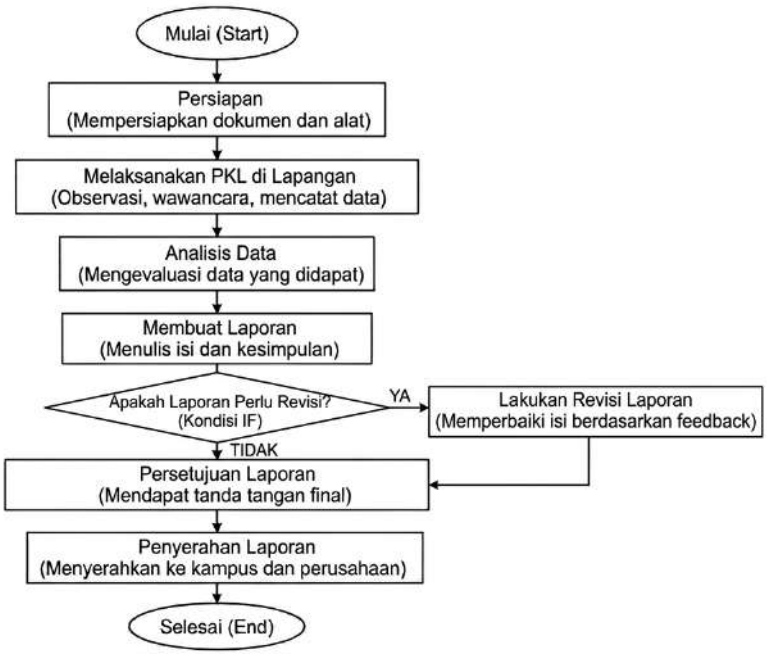
2. **Wawancara dan Diskusi**

   Pengumpulan data dilakukan melalui wawancara dan diskusi dengan engineer, operator, maupun pembimbing lapangan untuk memperoleh informasi terkait sistem proteksi transformator, prosedur operasi, serta mekanisme penanganan gangguan pada peralatan.

3. **Studi Dokumen**

Metode ini dilakukan dengan mempelajari dokumen teknis seperti data spesifikasi transformator, single line diagram, manual operasi, data proteksi, serta laporan teknis perusahaan yang berkaitan dengan objek kajian PKL.

3.3 Flowchart Pelaksanaan PKL



Gambar 3.1 Flowchart Pelaksanaan PKL

3.4 Parameter Analisis

Pada pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan (PKL), analisis dilakukan terhadap sistem proteksi generator transformator pada PLTU Paiton Unit 9. Parameter yang digunakan dalam analisis meliputi beberapa aspek berikut:

1. Spesifikasi Generator Transformator
   Analisis dilakukan terhadap spesifikasi teknis transformator meliputi kapasitas daya, level tegangan, jenis transformator, sistem pendinginan, jumlah belitan, serta konfigurasi hubungan transformator. Parameter ini digunakan untuk memahami karakteristik dasar transformator yang diamati.
2. Sistem Proteksi Elektrik
   Parameter analisis pada proteksi elektrik meliputi jenis relay proteksi yang digunakan, fungsi masing-masing relay, prinsip kerja proteksi, serta koordinasi proteksi dalam mendeteksi gangguan seperti arus lebih, gangguan diferensial, gangguan tanah, dan tegangan abnormal.
3. Sistem Proteksi Mekanik

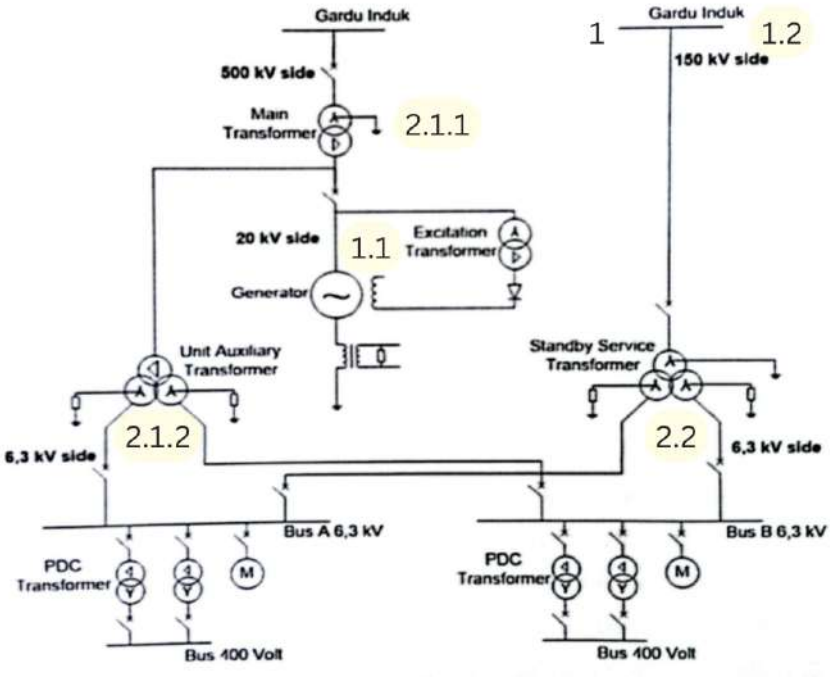
Analisis proteksi mekanik dilakukan berdasarkan perangkat proteksi yang terpasang pada transformator, seperti Buchholz relay, pressure relief device, oil temperature indicator (OTI), dan winding temperature indicator (WTI) untuk memantau kondisi internal transformator.

4. Kondisi Operasional Transformator
   Parameter ini mencakup kondisi operasi transformator berdasarkan hasil observasi lapangan, meliputi temperatur, sistem pendinginan, pembebanan, serta kondisi umum peralatan selama beroperasi.
5. Analisis Minyak Transformator (jika kamu bahas DGA/minyak)
   Parameter analisis mencakup kondisi minyak transformator melalui hasil pengujian seperti *Dissolved Gas Analysis* (DGA) untuk mengetahui indikasi gangguan internal berdasarkan kandungan gas terlarut.

BAB IV
ANALISIS SISTEM PROTEKSI, HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Sistem Kelistrikan Unit 9

Sebelum generator menghasilkan listrik di PLTU Paiton Unit 9, unit terlebih dahulu mendapat suplai tegangan dari GITET melalui *Standby Service Transformer* (SST) yang menurunkan tegangan dari 150 kV menjadi 6,3 kV untuk proses *start-up*. Setelah generator beroperasi dan menghasilkan tegangan sekitar 20 kV, listrik tersebut dinaikkan tegangannya oleh Generator Transformer (GT) menjadi 500 kV untuk disalurkan ke jaringan. Kebutuhan listrik internal pembangkit dipasok oleh *Unit Auxiliary Transformer* (UAT) setelah dilakukan change over dari SST ketika beban mencapai sekitar 10% dari kapasitas maksimum. Saat unit shutdown atau trip, suplai daya internal dapat berasal dari GT yang bersifat dua arah, sedangkan SST berfungsi sebagai cadangan jika GT mengalami gangguan atau perbaikan. Single line diagram pola kelistrikan PLTU Paiton Unit 9



Gambar 4.1 Sistem Pola Operasi Kelistrikan PJB Unit 9 PLTU Paiton Baru
(Sumber: Materi PT PLN NP UP Paiton)

Sistem pola kelistrikan Generator Transformator Unit 9 PLTU Paiton ditunjukkan pada Gambar 4.1. mempunyai dua siklus yaitu siklus pembangkitan listrik dari generator dan siklus listrik yang berasal dari GITET bila terjadi *trip* atau *blackout*. Pola kelistrikan dapat dilihat berdasarkan **gambar 4.1** :

1. Pembangkitan listrik (1.1)

   Energi listrik dibangkitkan oleh generator dengan tegangan keluaran sebesar 20 kV. Generator berfungsi mengubah energi mekanik dari turbin menjadi energi listrik yang kemudian disalurkan ke sistem kelistrikan pembangkit.
2. Step Up tegangan transmisi gardu induk (2.1.1)

   Pada saat unit mengalami trip, shutdown, atau blackout, suplai listrik pembangkit diperoleh dari Gardu Induk 150 kV. Sumber listrik ini digunakan untuk menjaga agar sistem auxiliary dan peralatan penting PLTU tetap dapat beroperasi.
3. Step Down tegangan untuk pemakaian PLN (2.1.1)

   Tegangan keluaran generator sebesar 20 kV kemudian dinaikkan oleh Main Transformer atau Generator Transformator menjadi 500 kV sebelum disalurkan menuju Gardu Induk dan sistem transmisi. Proses step up dilakukan untuk mengurangi rugi-rugi daya saat penyaluran energi listrik jarak jauh.
4. Penurunan tegangan untuk penggunaan PLTU (2.1.1)

   Sebagian daya dari generator disalurkan menuju Unit Auxiliary Transformer (UAT) untuk diturunkan tegangannya menjadi 6,3 kV. Tegangan ini digunakan untuk menyuplai kebutuhan peralatan bantu PLTU saat unit beroperasi normal.
5. Penurunan tegangan untuk penggunaan PLTU dari UAT (2.1.2)

   Sebagian daya dari generator disalurkan menuju Unit Auxiliary Transformer (UAT) untuk diturunkan tegangannya menjadi 6,3 kV. Tegangan ini digunakan untuk menyuplai kebutuhan peralatan bantu PLTU saat unit beroperasi normal.
6. Penerimaan Tegangan Listrik dari GITET bila terjadi *blackout* (1.2)

   Pada saat unit mengalami blackout, shutdown, atau generator tidak beroperasi, suplai listrik diperoleh dari Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 150 kV. Suplai ini digunakan untuk menjaga sistem auxiliary dan peralatan penting PLTU tetap beroperasi.
7. Distribusi daya melalui Bus A 6,3 kV (2.2)

Daya keluaran dari UAT kemudian disalurkan menuju Bus A 6,3 kV untuk menyuplai motor, pompa, fan, conveyor, dan berbagai peralatan auxiliary lainnya yang mendukung proses operasional PLTU.

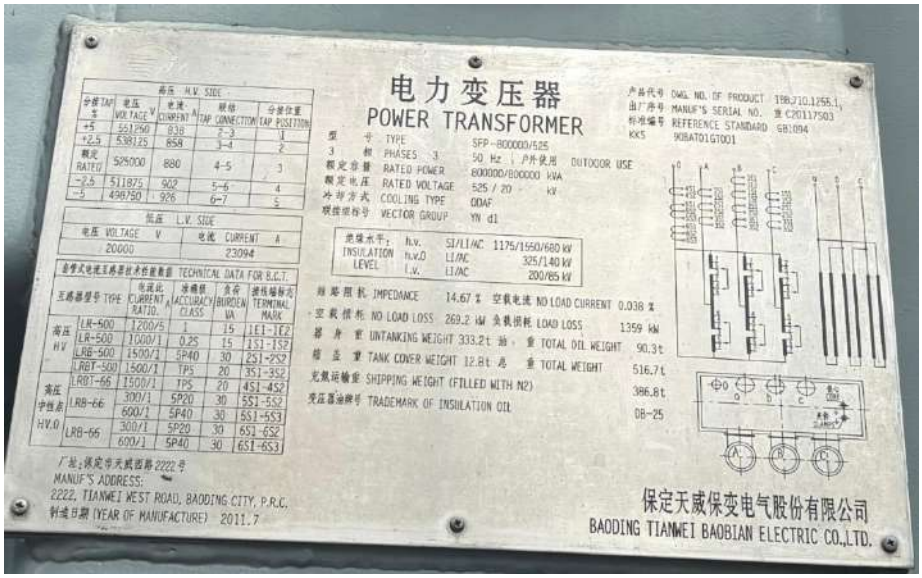
8. Penurunan tegangan melalui SST (3.2)

   Tegangan dari Gardu Induk 150 kV juga disalurkan menuju Standby Service Transformer (SST) untuk diturunkan menjadi 6,3 kV. Sistem ini digunakan sebagai sumber suplai cadangan bagi Bus B 6,3 kV ketika generator tidak beroperasi atau saat kondisi *start up* dan *blackout*.

4.2 Gambaran Umum Generator Transformator Unit 9

Generator Transformator (GT) Unit 9 di PLN Nusantara Power UP Paiton merupakan transformator daya utama yang berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran generator dari 20 kV menjadi 525 kV sebelum disalurkan ke sistem transmisi melalui Gas Insulated Switchgear (GIS) 500 kV dan diteruskan ke Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET). Transformator ini termasuk dalam kategori transformator daya ekstra tinggi (extra high voltage power transformer) dengan kapasitas besar, sehingga memiliki peran yang sangat vital dalam sistem pembangkitan.

Dalam konfigurasi sistem kelistrikan Unit 9, seluruh daya listrik yang dihasilkan oleh generator harus melewati Generator Transformator sebelum disalurkan ke jaringan transmisi. Dengan demikian, Generator Transformator menjadi titik penghubung utama antara sistem pembangkitan dan sistem interkoneksi tenaga listrik 500 kV. Gangguan yang terjadi pada peralatan ini tidak hanya berdampak pada transformator itu sendiri, tetapi juga berpotensi menyebabkan trip unit pembangkit secara keseluruhan dan mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke sistem.



Gambar 4.2 Spesifikasi Generator Transformator

(Sumber: Galeri foto pribadi)

Tabel 4.1 Data Umum Generator Transformator

No	Parameter	Nilai
1	Tipe Trafo	Step Up 2 belitan, SFP-800000/525
2	Kapasitas	800000 KVA
3	Tegangan HV	525 KV
4	Tegangan LV	20 KV
5	Arus Nominal HV	880 A
6	Arus Nominal LV	23904 A
7	Frekuensi	50 Hz
8	Jenis Pendingin	ODAF
9	Vector Group	YN d1
10	Impedansi	14,67%
11	Volume Minyak	90,3 t
12	Berat Trafo	516,7 t

Berdasarkan data spesifikasi tersebut, dapat dianalisis bahwa Generator Transformator Unit 9 beroperasi pada level daya dan tegangan yang sangat tinggi. Dengan kapasitas sebesar 800 MVA, transformator ini dirancang untuk menyalurkan daya dalam jumlah besar secara kontinu. Tegangan sisi HV sebesar 525 kV menunjukkan bahwa

transformator ini terhubung langsung dengan sistem transmisi tegangan ekstra tinggi, sehingga aspek isolasi dan proteksi menjadi sangat krusial.

Arus nominal pada sisi LV sebesar 23.094 A menunjukkan bahwa sisi generator membawa arus yang sangat besar. Kondisi ini menyebabkan rugi-rugi tembaga (I^2R losses) dan potensi pemanasan menjadi faktor yang harus diperhatikan dalam desain pendinginan dan sistem proteksi. Sistem pendingin yang digunakan adalah ODAF (Oil Directed Air Forced), yang menunjukkan bahwa sirkulasi minyak dilakukan secara terarah dan pendinginan udara dipaksakan menggunakan kipas untuk menjaga temperatur operasi tetap dalam batas aman.

Vector group YNd1 menunjukkan bahwa sisi HV terhubung bintang dengan netral dibumikan (Y grounded), sedangkan sisi LV terhubung delta dengan pergeseran sudut 30°. Konfigurasi ini memiliki implikasi langsung terhadap sistem proteksi diferensial, karena relay harus mengkompensasi pergeseran sudut fasa agar tidak terjadi kesalahan pengukuran arus diferensial.

Nilai impedansi sebesar 14,67% juga memiliki peranan penting dalam analisis sistem proteksi. Impedansi ini berfungsi sebagai pembatas arus gangguan internal maupun eksternal. Semakin besar nilai impedansi, maka arus hubung singkat yang mengalir akan relatif lebih kecil, namun tetap harus berada dalam rentang yang dapat dideteksi oleh sistem proteksi.

Selama pelaksanaan Praktik Kerja Lapangan, Unit 9 berada dalam kondisi overhaul, sehingga Generator Transformator tidak beroperasi dalam kondisi berbeban. Kondisi ini dimanfaatkan untuk melakukan inspeksi dan pengujian sistem proteksi secara menyeluruh, baik proteksi elektrik maupun proteksi mekanik. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh sistem pengaman berada dalam kondisi siap operasi sebelum unit kembali disinkronkan dengan sistem transmisi.

Berdasarkan peran strategis Generator Transformator dalam sistem pembangkit serta tingginya risiko gangguan yang dapat terjadi akibat level tegangan dan daya yang besar, maka sistem proteksi yang diterapkan harus memiliki tingkat keandalan, sensitivitas, dan selektivitas yang tinggi. Oleh karena itu, pembahasan pada sub bab berikutnya akan

difokuskan pada konfigurasi sistem proteksi Generator Transformator Unit 9 serta evaluasi hasil pengujian yang dilakukan selama kegiatan pemeliharaan.

4.3 Analisis Data Setting dan Pengujian Sistem Proteksi Generator Transformator

Pada sub bab ini, pembahasan difokuskan pada analisis teknis terhadap data setting dan hasil pengujian sistem proteksi Generator Transformator Unit 9 yang diperoleh selama kegiatan Praktik Kerja Lapangan. Data yang dianalisis meliputi:

1. Setting Proteksi Tekanan Gas SF_6 pada GIS 500 kV
2. Hasil Pengujian Tahanan Kontak Terminasi HV Generator Transformator
3. Hasil Pengujian Trip Sistem Proteksi Generator Transformator

Analisis dilakukan untuk menilai kesesuaian hasil pengujian terhadap standar teknis serta mengevaluasi kesiapan sistem proteksi sebelum unit kembali beroperasi.

4.3.1. Analisis Setting Proteksi Tekanan Gas SF_6 GIS 500 kV

Gas Insulated Switchgear (GIS) 500 kV pada sistem transmisi Unit 9 menggunakan gas sulfur hexafluoride (SF_6) sebagai media isolasi utama sekaligus media pemadam busur api. Gas SF_6 memiliki kekuatan dielektrik yang tinggi dan stabilitas kimia yang baik, sehingga sangat efektif digunakan pada sistem tegangan ekstra tinggi (EHV).

Tekanan gas SF_6 merupakan parameter kritis dalam pengoperasian GIS. Penurunan tekanan gas dapat mengurangi kekuatan isolasi dan meningkatkan risiko terjadinya flashover, partial discharge, maupun kegagalan isolasi internal. Oleh karena itu, sistem proteksi tekanan gas dirancang dalam beberapa level pengamanan untuk menjamin keandalan dan keselamatan operasi.

Tabel 4.4 Setting Proteksi Tekanan Gas SF_6 GIS 500 kV

Jenis Proteksi	Fasa R (bar)	Fasa S (bar)	Fasa T (bar)
Alarm Level 1	7,3	7,3	7,2
Trip Level 2	7,0	7,0	6,9
Reset Alarm Stage 2	5,0	5,0	5,0

Berdasarkan Tabel 4.5, sistem proteksi tekanan gas SF_6 dibagi menjadi tiga tingkatan pengamanan, yaitu Alarm Level 1, Trip Level 2, dan Reset Alarm Stage 2.

Alarm Level 1 diatur pada kisaran 7,2–7,3 bar. Level ini berfungsi sebagai peringatan dini apabila terjadi penurunan tekanan gas secara bertahap akibat kebocoran minor atau perubahan temperatur. Dengan adanya alarm awal ini, operator memiliki waktu untuk melakukan inspeksi dan tindakan preventif sebelum kondisi menjadi lebih kritis.

Trip Level 2 diatur pada kisaran 6,9–7,0 bar. Pada level ini, sistem akan mengaktifkan proteksi trip untuk mencegah pengoperasian breaker dalam kondisi tekanan tidak aman. Selisih antara setting alarm dan trip sebesar ±0,3 bar menunjukkan adanya margin proteksi yang cukup untuk memberikan jeda respons operasional. Margin ini penting untuk menghindari trip mendadak akibat fluktuasi tekanan sementara, namun tetap menjamin keamanan peralatan.

Reset Alarm Stage 2 diatur pada 5,0 bar untuk seluruh fasa. Nilai ini menunjukkan batas tekanan minimum sebelum sistem dapat dinormalisasi kembali setelah dilakukan pengisian atau perbaikan kebocoran gas. Penyeragaman nilai reset pada seluruh fasa menunjukkan konsistensi desain sistem monitoring tekanan.

Perbedaan nilai setting antar fasa relatif kecil, dengan deviasi maksimum sebesar 0,1 bar. Perbedaan ini masih dalam batas toleransi teknis dan tidak menunjukkan indikasi ketidakseimbangan signifikan pada sistem tekanan gas.

Secara keseluruhan, konfigurasi setting proteksi tekanan gas SF_6 pada GIS 500 kV telah menerapkan prinsip proteksi berlapis (*layered protection*), yaitu peringatan dini (*alarm*) diikuti pengamanan sistem (*trip*) apabila kondisi semakin memburuk. Dengan demikian, sistem proteksi tekanan gas dinilai telah memenuhi aspek keamanan operasional dan keandalan sistem transmisi tegangan ekstra tinggi.

4.3.2 Analisis Hasil Pengujian Tahanan Kontak Terminasi HV Generator Transformator

Pengujian tahanan kontak pada terminasi sisi *High Voltage* (HV) Generator Transformator dilakukan sebagai bagian dari kegiatan preventive maintenance untuk memastikan kualitas sambungan konduktor tetap dalam kondisi optimal. Sambungan

pada sisi HV merupakan titik kritis karena berfungsi sebagai jalur utama penyaluran daya dari generator menuju sistem transmisi melalui transformator penaik tegangan. Peningkatan nilai tahanan kontak dapat menyebabkan rugi-rugi daya (I^2R losses) dan pemanasan lokal (hot spot) pada titik sambungan. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat mempercepat degradasi isolasi, merusak material konduktor, serta menurunkan keandalan transformator. Oleh karena itu, pengujian dilakukan menggunakan micro-ohmmeter untuk mengukur tahanan kontak dalam satuan mikro-ohm (μΩ), baik sebelum maupun sesudah dilakukan tindakan perbaikan atau pengencangan ulang sambungan.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tahanan Kontak Terminasi HV Generator Transformator

Fasa R

Test Point	Sebelum (μΩ)	Sesudah (μΩ)
TP 1	24	23
TP 2	54	41
TP 3	135	96

Fasa S

Test Point	Sebelum (μΩ)	Sesudah (μΩ)
TP 1	26	24
TP 2	42	32
TP 3	133	104

Fasa T

Test Point	Sebelum (μΩ)	Sesudah (μΩ)
TP 1	32	23
TP 2	77	41
TP 3	155	96

Berdasarkan hasil pengujian pada ketiga fasa, terlihat adanya penurunan nilai tahanan kontak setelah dilakukan tindakan pemeliharaan. Pada Fasa R, nilai tahanan tertinggi sebelum perbaikan terdapat pada TP 3 sebesar 135 μΩ dan menurun menjadi 96 μΩ setelah perbaikan. Penurunan ini menunjukkan adanya perbaikan kualitas sambungan, kemungkinan melalui pengencangan baut atau pembersihan permukaan kontak.

Pada Fasa S, nilai tahanan kontak pada TP 3 juga mengalami penurunan dari 133 μΩ menjadi 104 μΩ. Sedangkan pada Fasa T, penurunan paling signifikan terjadi pada TP 2, yaitu dari 77 μΩ menjadi 40 μΩ, serta pada TP 3 dari 155 μΩ menjadi 104 μΩ.

Penurunan nilai tahanan kontak ini menunjukkan bahwa tindakan preventive maintenance yang dilakukan efektif dalam memperbaiki kualitas sambungan konduktor. Nilai sesudah perbaikan menjadi lebih seragam antar fasa dan antar test point, yang mengindikasikan kondisi mekanis sambungan telah membaik.

Secara teknis, nilai tahanan kontak yang stabil dan seimbang antar fasa sangat penting untuk mencegah ketidakseimbangan arus dan pemanasan berlebih pada satu titik tertentu. Ketidakseimbangan yang signifikan dapat menyebabkan distribusi arus tidak merata dan mempercepat degradasi peralatan.

Dengan demikian, berdasarkan hasil pengujian sebelum dan sesudah pemeliharaan, dapat disimpulkan bahwa kondisi terminasi HV Generator Transformator Unit 9 dalam keadaan baik dan layak operasi. Kegiatan preventive maintenance yang dilakukan terbukti mampu menurunkan nilai tahanan kontak dan meningkatkan keandalan sistem penyaluran daya.

4.3.3 Analisis Hasil Pengujian *Mechanical Trip* Sistem Proteksi GT

Pengujian *mechanical trip* sistem proteksi Generator Transformator dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh fungsi proteksi bekerja sesuai dengan logika desain dan setting yang telah ditentukan. Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi selektivitas, keandalan, serta respon sistem proteksi terhadap berbagai kondisi operasi.

No	Test Circuit	Indication	Result
1	*Relay Bucholz*	Trip	Proteksi Trip Bekerja
2	*Pressure Relief Valve*	Trip	Proteksi Trip Bekerja
3	*Oil Temperature*	Trip	Proteksi Trip Bekerja
4	*Winding Temperature Indicator*	Trip	Proteksi Trip Bekerja

Tabel 4.6 Hasil Pengujian *Mechanical Trip* Sistem Proteksi GT Trip**Alarm**

No	Test Circuit	Indication	Result
1	*Relay Bucholz*	Alarm	Alarm Bekerja
2	*Pressure Relief Valve*	Alarm	Alarm Bekerja
3	*Oil Temperature*	Alarm	Alarm Bekerja
4	*Winding Temperature Indicator*	Alarm	Alarm Bekerja

Berdasarkan Tabel 4.6, pengujian difokuskan pada proteksi mekanik yang meliputi Relay Bucholz, Pressure Relief Valve, Oil Temperature, dan Winding Temperature Indicator, baik pada fungsi alarm maupun trip. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh perangkat proteksi mekanik memberikan respon trip sesuai parameter yang telah ditentukan. Pada saat dilakukan simulasi gangguan yang merepresentasikan kondisi abnormal seperti pembentukan gas internal, kenaikan tekanan, serta peningkatan suhu minyak dan belitan, masing-masing perangkat menunjukkan indikasi trip dengan keterangan "Proteksi Trip Bekerja". Hal ini membuktikan bahwa sistem proteksi mampu mendeteksi gangguan secara tepat dan mengirimkan perintah pemutusan sesuai dengan batas setting operasional yang telah ditetapkan.

Selain fungsi trip, pengujian pada mode alarm juga menunjukkan hasil yang sesuai, dimana seluruh peralatan memberikan indikasi "Alarm Bekerja". Kondisi ini menegaskan bahwa sistem proteksi tidak hanya bekerja pada level pemutusan, tetapi juga menyediakan peringatan dini sebelum mencapai kondisi kritis. Dengan demikian, baik fungsi alarm maupun trip telah bekerja sesuai parameter dan logika desainnya, sehingga sistem proteksi mekanik Generator Transformator Unit 9 dapat dinyatakan andal, selektif, dan siap mendukung keamanan serta kontinuitas operasi pembangkit.

4.3.4 Pengujian Proteksi Generator Transformator Panel C

Sistem proteksi pada *Generator Transformer* (GT) memerlukan pengujian awal yang menyeluruh untuk memastikan seluruh komponen berfungsi secara optimal. Pengujian ini sangat penting dilakukan guna memeriksa kesiapan perangkat dalam mengukur parameter listrik serta memastikan stabilitas pasokan daya utama. Tahapan dan cakupan dari proses pengujian awal sistem proteksi GT ini dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Descriptions

Merk / type : NANJING NARI-RELAYS ELECTRIC / RCS-985 (Multiple Relay)
Serial number/Panel : 7547090600201 / PRC85-61C
Ratio CT HV side GT : 1500/ 1 A Ratio CT Generator side : 28000/ 5 A
Ratio CT HV side UAT : 5000/ 1 A Ratio CT Netral HV side GT : 600/ 1 A
Ratio PT HV side GT : 500/ 0.11 kV Ratio PT LV side GT : 20/ 0.11 kV
S Nominal GT : 800 MVA --> Ie (sekunder) = 0.616 Ie HV = 4.124 Ie Gen = 4.619 Ie UAT

Current Injection :
I_HV side MT = 1ID 1,2,3,4
I_Generator side = 1ID 8,9,10,11
I_HV side UAT = 1ID 22,23,24,25
I0_HV netral side MT = 1ID 67,68

Voltage Injection :
U_HV side MT = 1UD 15,16,17,18
U_LV side MT = 1UD 7,8,9,10
U0_LV side MT = 1UD 25,26

Metering Test

Test Input		Injection Value	Result				*Acceptance Value	Result
			Phasa A	Phasa B	Phasa C	Phasa Angel		
U_HV side MT	(V)	63.51	109.88	109.91	109.71	120	109.45 - 110.55	Voltage : OK
U_LV side MT	(V)	63.51	109.42	109.53	109.4	120	109.45 - 110.55	Voltage : OK
U0_LV side MT	(V)	10	10.02				9.5 - 10.5	Voltage : OK
I0_HV netral side MT	(A)	1	0.99				0.95 - 1.05	Current : OK
I_HV side MT	(A)	1	0.99	0.99	0.99	120	4.97 - 5.02	Current : OK
I_Generator side	(A)	5	4.98	4.99	4.98	120	4.97 - 5.02	Current : OK
I_HV side UAT	(A)	5	4.99	5	4.99	120	4.97 - 5.02	Current : OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985G Generator Protection Instruction Manual"
Note :

Power Supply Test

No	Object	Result			*Acceptance Value		Result
		Volt (V)	Ripple (mV)	Ripple (%)	Volt	Ripple (%)	
1	DC Power Supply (ZD27 - ZD32)	114.7	15	0.013	88 - 132	<1	OK
2	DC Power Supply for BI (ZD29 - ZD34)	115.3	20	0.017	88 - 132	<1	OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985G Generator Protection Instruction Manual"
Note :

Gambar 4.3 Hasil Pengujian Awal Sistem Generator Transformator (*Metering and Power Supply Test*)

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan data tersebut, pengujian mencakup pengecekan rasio CT/PT, pengujian metering, serta kestabilan catu daya relay. Hasil pengujian menunjukkan nilai injeksi arus dan tegangan masih dalam rentang toleransi yang ditetapkan, serta ripple tegangan suplai DC berada jauh di bawah batas maksimum. Hal ini membuktikan bahwa sistem pengukuran dan suplai relay dalam kondisi baik, sehingga proteksi relay dapat bekerja dengan akurat dalam mendeteksi kondisi gangguan pada GT.

Pengujian proteksi diferensial pada Generator Transformer (GT) dilakukan untuk memastikan keandalan, selektivitas, serta stabilitas sistem dalam merespons berbagai kondisi arus gangguan maupun arus operasional normal. Proses ini sangat krusial guna menguji kemampuan relay dalam membedakan antara gangguan internal yang berbahaya dengan kondisi transien eksternal. Ilustrasi dan skema dari rangkaian serta kurva karakteristik pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5.

MT Protection Calibration

1. MT Differential Protection (87T)

 # Setting :

I_Pkp_PcntDiff	:	0.30 Ie
I_InstDiff	:	4.5Ie
Slope1_PcntDiff	:	0.1
Slope2_PcntDiff	:	0.7
k_Harm_PcntDiff_Tr	:	0.15
TrpLog_Diff_Tr	:	187F

 # Terminal Injeksi :

I_HV side MT	=	1ID 1,2,3,4
I_Generator side	=	1ID 8,9,10,11
I_HV side UAT	=	1ID 22,23,24,25

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection (A)			Ir (Ie)	Id (Ie)	Time (ms)	*Acceptance		Result
	HV MT side	Gen side	HV UAT side				Id (Ie)	Time (ms)	
Balance Condition (No Trip action)									
IA	0.616 < 0°	4.124 < 150°	-	1.00	0.00	No trip	0	No Trip	Id = OK Time = OK
IB	0.616 < 240°	4.124 < 30°	-						
IC	0.616 < 120°	4.124 < 270°	-						
IA	0.616 < 0°	-	4.615 < 150°	1.00	0.00	No trip	0	No Trip	Id = OK Time = OK
IB	0.616 < 240°	-	4.615 < 30°						
IC	0.616 < 120°	-	4.615 < 270°						
Percent Diff (Op_PcntDiff action)									
IA	0.186 < 0°	-	-	0.15	0.29	29	0.285 - 0.315	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	0.186 < 240°	-	-						
IC	0.186 < 120°	-	-						
IA	-	1.245 < 0°	-	0.15	0.30	29.2	0.285 - 0.315	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	-	1.245 < 240°	-						
IC	-	1.245 < 120°	-						
IA	-	-	1.452 < 0°	0.16	0.31	29.4	0.285 - 0.315	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	-	-	1.452 < 240°						
IC	-	-	1.452 < 120°						
Instant Diff (Op_InstDiff action)									
IA	2.74 < 0°	-	-	2.22	4.45	29.4	4.275 - 4.725	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	2.74 < 240°	-	-						
IC	2.74 < 120°	-	-						
IA	-	18.49 < 0°	-	2.24	4.46	29.4	4.275 - 4.725	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	-	18.49 < 240°	-						
IC	-	18.49 < 120°	-						
IA	-	-	20.7 < 0°	2.24	4.48	31.4	4.275 - 4.725	≤ 50 ms	Id = OK Time = OK
IB	-	-	20.7 < 240°						
IC	-	-	20.7 < 120°						
Phase	Injection (A)			Ir (Ie)	Id (Ie)	Time (ms)	*Acceptance		Result
	HV side		Gen & UAT Side				2nd Harm	Time (ms)	
	Fundamental	2nd Harm							
Restrain 2nd harmonic for Inrush Test									
IA	1.0 < 0°	15 %	-	0.81	1.62	No trip	> 15 %	No Trip	2nd Harm = OK Time = OK
IB	1.0 < 240°	15 %	-						
IC	1.0 < 120°	15 %	-						
IA	1.0 < 0°	14 %	-	0.81	1.62	34.8	< 15 %	≤ 50 ms	2nd Harm = OK Time = OK
IB	1.0 < 240°	14 %	-						
IC	1.0 < 120°	14 %	-						

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.4 Hasil Pengujian Proteksi Diferensial Generator Transformator (87T) *Pickup, Time, dan Harmonic Restraint Test.*

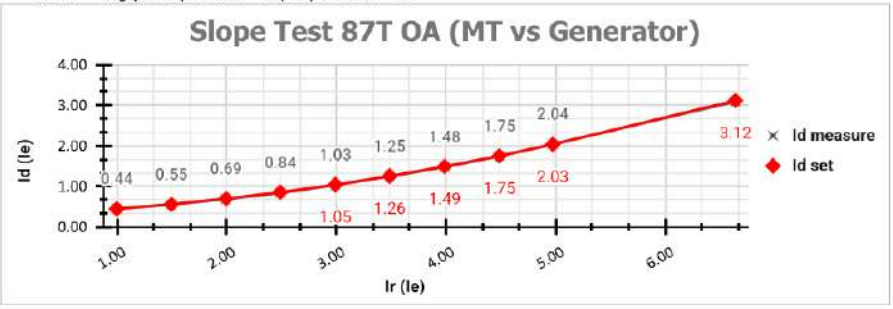
(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

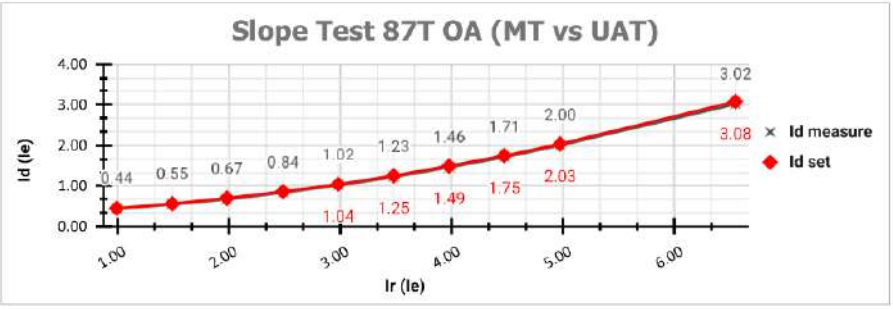
B. SlopeTest

Phase	Injection (A)		Ir measure (Ie)	Id measure (Ie)	Id set (Ie)	Error Id (Ie)	*Acceptance Id (Ie)	Result
	Gen / UAT Side	MT Side						
HV side MT vs Generator side slope Test								
I_A, B, C	3.196 < 150°	0.75 < 0°	1.00	0.44	0.45	0.00	0.43 - 0.47	Id = OK
I_A, B, C	5.030 < 150°	1.09 < 0°	1.49	0.55	0.56	0.01	0.53 - 0.59	Id = OK
I_A, B, C	6.804 < 150°	1.44 < 0°	1.99	0.69	0.70	0.01	0.66 - 0.73	Id = OK
I_A, B, C	8.530 < 150°	1.79 < 0°	2.49	0.84	0.86	0.02	0.82 - 0.90	Id = OK
I_A, B, C	10.20 < 150°	2.16 < 0°	2.99	1.03	1.05	0.01	0.99 - 1.10	Id = OK
I_A, B, C	11.83 < 150°	2.53 < 0°	3.48	1.25	1.26	0.01	1.19 - 1.32	Id = OK
I_A, B, C	13.40 < 150°	2.91 < 0°	3.99	1.48	1.49	0.02	1.42 - 1.57	Id = OK
I_A, B, C	14.93 < 150°	3.30 < 0°	4.49	1.75	1.75	0.01	1.67 - 1.84	Id = OK
I_A, B, C	16.39 < 150°	3.69 < 0°	4.97	2.04	2.03	0.01	1.93 - 2.14	Id = OK
I_A, B, C	21.00 < 150°	5.04 < 0°	6.64	3.09	3.12	0.03	2.96 - 3.28	Id = OK
HV side MT vs HV side UAT slope Test								
I_A, B, C	3.570 < 150°	0.75 < 0°	1.00	0.44	0.45	0.00	0.43 - 0.47	Id = OK
I_A, B, C	5.620 < 150°	1.09 < 0°	1.49	0.55	0.56	0.01	0.53 - 0.59	Id = OK
I_A, B, C	7.610 < 150°	1.43 < 0°	1.98	0.67	0.70	0.02	0.66 - 0.73	Id = OK
I_A, B, C	9.550 < 150°	1.79 < 0°	2.49	0.84	0.86	0.02	0.82 - 0.90	Id = OK
I_A, B, C	11.42 < 150°	2.15 < 0°	2.98	1.02	1.04	0.02	0.99 - 1.10	Id = OK
I_A, B, C	13.24 < 150°	2.52 < 0°	3.48	1.23	1.25	0.03	1.19 - 1.32	Id = OK
I_A, B, C	15.00 < 150°	2.90 < 0°	3.98	1.46	1.49	0.03	1.41 - 1.56	Id = OK
I_A, B, C	16.70 < 150°	3.28 < 0°	4.47	1.71	1.75	0.04	1.66 - 1.83	Id = OK
I_A, B, C	18.34 < 150°	3.68 < 0°	4.97	2.00	2.03	0.03	1.93 - 2.14	Id = OK
I_A, B, C	23.26 < 150°	4.96 < 0°	6.54	3.02	3.08	0.06	2.93 - 3.24	Id = OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note : Pengujian slope 1 di Ir < 6Ie, Slope 2 di Ir > 6Ie





Gambar 4.5 Hasil Pengujian Karakteristik Slope Proteksi Diferensial Generator (Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan pengujian pickup dan waktu kerja pada Gambar 4.4, relay tidak mengalami trip saat kondisi seimbang dan dapat bekerja sesuai setting saat arus diferensial melewati batas dengan waktu respons yang masih dalam rentang parameternya. Uji harmonic restraint juga menunjukkan relay tetap stabil terhadap arus inrush. Sementara itu, pengujian slope pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa nilai arus diferensial terukur mengikuti karakteristik kurva yang telah ditetapkan, baik dalam pengujian MT-Generator maupun MT-UAT. Hasil keseluruhan ini membuktikan bahwa proteksi diferensial bekerja secara selektif, stabil, dan sesuai standar, sehingga

mampu mengamankan transformator dari gangguan internal tanpa terjadi kesalahan operasi akibat gangguan eksternal.

Sistem proteksi Over Excitation (V/Hz) berfungsi melindungi transformator dari kondisi kelebihan fluks akibat tegangan terlalu tinggi atau frekuensi rendah, yang dapat memicu pemanasan berlebih pada inti besi. Detail mengenai pelaksanaan dan rangkaian pengujian fungsi pengamanan ini dapat dilihat pada Gambar 4.6.

2. MT Over Excitation Protection

 # Setting :

k_Alm_OvExc_Tr	:	1.1	t0_InvOvExc_Tr	:	1.0 s	k4_InvOvExc_Tr	:	1.25
t_Alm_OvExc_Tr	:	2 s	k1_InvOvExc_Tr	:	1.4	t4_InvOvExc_Tr	:	10 s
k_OvExc1_Tr	:	1.3	t1_InvOvExc_Tr	:	2.0 s	k5_InvOvExc_Tr	:	1.2
t_OvExc1_Tr	:	5.0 s	k2_InvOvExc_Tr	:	1.35	t5_InvOvExc_Tr	:	30 s
k_OvExc2_Tr	:	N/A	t2_InvOvExc_Tr	:	5 s	TrpLog_OvExc1_Tr	:	1867
t_OvExc2_Tr	:	N/A	k3_InvOvExc_Tr	:	1.3	TrpLog_OvExc2_Tr	:	-
k0_InvOvExc_Tr	:	1.45	t3_InvOvExc_Tr	:	7	TrpLog_InvOvExc_Tr	:	1867

 # Terminal Injeksi :

Terminal side : 1UD 15,16,17,18

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection			Time (ms)	*Acceptance		Result
	Voltage (V)	Freq. (Hz)	V/f		V/f	Time (s)	
Over Excitation Alarm Test (Alm_OvExc_Tr Action)							
A	69.8 < 0°	50	1.099	2.0356	1.072 - 1.127	1.94 - 2.06	V/f = OK Time = OK
B	69.8 < 240°						
C	69.8 < 120°						
A	63.51 < 0°	45.46	1.100	2.0372	1.072 - 1.127	1.94 - 2.06	V/f = OK Time = OK
B	63.51 < 240°						
C	63.51 < 120°						
Over Excitation 1 Test (Op_OvExc1_Tr Action)							
A	82.4 < 0°	50	1.297	5.0674	1.267 - 1.332	4.9 - 5.1	V/f = OK Time = OK
B	82.4 < 240°						
C	82.4 < 120°						
A	63.51 < 0°	38.4	1.302	5.0840	1.267 - 1.332	4.9 - 5.1	V/f = OK Time = OK
B	63.51 < 240°						
C	63.51 < 120°						
Inverse Over Excitation Test (Op_InvOvExc_Tr Action)							
A	92.0 < 0°	50	1.449	1.0710	1.413 - 1.486	1.0 - 1.1	V/f = OK Time = OK
B	92.0 < 240°						
C	92.0 < 120°						
A	88.9 < 0°	50	1.400	1.9326	1.365 - 1.435	1.9 - 2.1	V/f = OK Time = OK
B	88.9 < 240°						
C	88.9 < 120°						
A	85.72 < 0°	50	1.350	4.7366	1.316 - 1.383	4.91 - 5.09	V/f = OK Time = NOT OK ***(1)***
B	85.72 < 240°						
C	85.72 < 120°						
A	82.55 < 0°	50	1.300	6.9268	1.267 - 1.332	6.89 - 7.11	V/f = OK Time = OK
B	82.55 < 240°						
C	82.55 < 120°						
A	79.37 < 0°	50	1.250	9.8888	1.218 - 1.281	9.86 - 10.14	V/f = OK Time = OK
B	79.37 < 240°						
C	79.37 < 120°						
A	76.2 < 0°	50	1.200	28.5732	1.17 - 1.23	29.66 - 30.34	V/f = OK Time = NOT OK ***(2)***
B	76.2 < 240°						
C	76.2 < 120°						

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note : Hasil pengujian saat FYI menunjukkan nilai waktu trip sudah mengalami pergeseran dari nilai toleransi yang diijinkan --> ***(1)*** t (FYI) = 4.647 s, ***(2)*** t (FYI) = 27.538 s

Gambar 4.6 Hasil Pengujian Proteksi *Over Exitation* (V/Hz)

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa relay dapat mendeteksi kenaikan rasio V/Hz dan merespons sesuai setting waktu kerja, meskipun beberapa nilai mendekati batas toleransi. Secara umum, proteksi Over Excitation masih berfungsi dengan baik dan andal dalam menjaga keamanan transformator.

Sistem proteksi Overload & Initial Cooling serta Ground Fault sangat penting untuk menjaga transformator dari beban lebih dan gangguan tanah. Pengujian kedua sistem proteksi ini dilakukan untuk memastikan ketepatan arus pickup dan waktu responsnya terhadap kondisi abnormal. Detail visual mengenai hasil pengujian proteksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.7.

3. MT Overload & Initial cooling Protection (HV Side)

 # Setting :

I_Alm_OvLd_Tr : 0.68 A
t_Alm_OvLd_Tr : 0.5 s
TrpLog_OvLd_Tr : -
I_InitCool_OvLd_Tr : 0.41A
t_InitCool_OvLd_Tr : 9 s
TrpLog_InitCool_ST : -

 # Terminal Injeksi :

I_HV side MT = 1ID 1,2,3,4

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection (A)		Time (s)	*Acceptance		Result
	HV Side	LV Side		Current (A)	Time (s)	
Overload Alarm Test HV side						
IA	0.68 < 0°	-	0.5214	0.663 - 0.697	0.455 - 0.545	Current = OK Time = OK
IB	0.68 < 240°	-				
IC	0.68 < 120°	-				
Initial Cooling Test HV Side						
IA	0.41 < 0°	-	9.0158	0.399 - 0.420	8.87 - 9.13	Current = OK Time = OK
IB	0.41 < 240°	-				
IC	0.41 < 120°	-				

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

4. MT Ground Fault Protection (LV A & B Side)

 # Setting :

I_ROC1_Tr : 2.51 A
t_ROC11_Tr : 2 s
TrpLog_ROC11_Tr : 0027
t_ROC12_Tr : 2.5 s
TrpLog_ROC12_Tr : 187F
V_Alm_ROV_LVS_Tr : 10 V
t_Alm_ROV_LVS_Tr : 1 s

 # Terminal Injeksi :

I0_HV netral side MT = 1ID 67,68
U0_LV side MT = 1UD 25,26

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection		Time (s)	*Acceptance		Result
	Current (A)	Voltage (V)		Injection	Time (s)	
ROC1 Test at stage 1 (Op_ROC11_Tr action)						
Io	2.5	-	2.0252	Current = 2.44 - 2.57 A	1.94 - 2.06	Current = OK Time = OK
ROC1 Test at stage 2 (Op_ROC12_Tr action)						
Io	2.5	-	2.5254	Current = 2.44 - 2.57 A	2.43 - 2.56	Current = OK Time = OK
ROV Alarm Test (Alarm_Alm_ROV_LVS_Tr action)						
Uo	-	9.97	1.022	Voltage = 9.75 - 10.25 V	0.95 - 1.05	Voltage= OK Time = OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.7 Hasil Pengujian *MT Overload*, *Initial Cooling Protection* (HV Side) dan *MT Ground Fault Protection* (LV A & B Side)
(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan pengujian tersebut, proteksi Overload (sisi HV) mencatat arus pickup 0,68 A dan waktu kerja 0,52 s, sementara initial cooling mencatat ±9,01 s, di mana keduanya masih berada dalam batas toleransi. Pada pengujian Ground Fault, tahap ROC1 dan ROC2 menunjukkan arus pickup 2,5 A dengan waktu operasi ±2,02 s dan ±2,52 s, serta ROV alarm pada tegangan ±9,97 V yang seluruhnya sesuai rentang standar. Hasil ini membuktikan bahwa kedua fungsi proteksi tersebut bekerja optimal, responsif, dan sesuai dengan setting yang ditentukan.

Sistem proteksi Voltage Controlled Overcurrent (VCOC) berfungsi untuk mengamankan jaringan dengan mengintegrasikan sensor tegangan dan arus agar relay dapat mendeteksi gangguan secara lebih selektif. Pengujian ini penting untuk memastikan relay mampu membedakan antara arus beban tinggi normal dan arus gangguan berdasarkan penurunan tegangan sistem. Karakteristik respons dan hasil pengujian sistem ini dapat dilihat pada Gambar 4.8.

5. MT Voltage Controlled Overcurrent Protection (HV Side)

 # Setting :

V_NegOV_VCE_Tr : 4.45 V
Vpp_VCE_Tr : 60V = 34.64 Vl-n
I_OC1_Tr : 0.82 A
t_OC11_Tr : 1.1 s
TrpLog_OC11_Tr : 187F

 # Terminal Injeksi :

U_HV side MT = 1UD 15,16,17,18
U_LV side MT = 1UD 7,8,9,10
I_HV side MT = 1ID 1,2,3,4

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection			Time (s)	*Acceptance		Result
	Current (A)	Voltage (V)	U2 (V)		Injection	Time (s)	
OC1 Test at Undervoltage (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	0.0 < 0°	-	1.1226	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 0 - 38.1 V	1.049 - 1.151	Current = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	0.0 < 240°					
C	0.82 < 120°	0.0 < 120°					
Voltage Controlled Test at Undervoltage HV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	34.5 < 0°	-	1.1232	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 37.23 - 38.96 V	1.049 - 1.151	Voltage = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	34.5 < 240°					
C	0.82 < 120°	34.5 < 120°					
Voltage Controlled Test at Undervoltage LV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	34.5 < 0°	-	1.1230	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 37.23 - 38.96 V	1.049 - 1.151	Voltage = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	34.5 < 240°					
C	0.82 < 120°	34.5 < 120°					
Voltage Controlled Test at Negative OV HV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	40 < 0°	4.43	1.1228	Current : 0.799 - 0.840 A U2 : 4.338 - 4.561 V	1.049 - 1.151	U2 = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	53.3 < 240°					
C	0.82 < 120°	40 < 120°					
Voltage Controlled Test at Negative OV LV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	40 < 0°	4.47	1.1226	Current : 0.799 - 0.840 A U2 : 4.338 - 4.561 V	1.049 - 1.151	U2 = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	53.4 < 240°					
C	0.82 < 120°	40 < 120°					

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.8 Hasil Pengujian MT Voltage Controlled Overcurrent Protection (HV Side)

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan pengujian tersebut, arus pickup tercatat sekitar 0,82 A dengan waktu kerja ±1,12 s, di mana nilai ini telah memenuhi rentang toleransi standar (0,799–0,840 A dan 1,049–1,151 s). Pengujian pada kondisi undervoltage, negative voltage, serta kombinasi tegangan sisi HV dan LV juga menunjukkan hasil yang tetap berada dalam batas aman. Secara keseluruhan, fitur voltage restraint pada relay arus lebih ini bekerja dengan baik dan responsif sesuai parameter yang ditentukan.

Konfigurasi logika trip dan pemetaan keluaran proteksi pada GT Panel C dirancang untuk mengintegrasikan komponen proteksi yang aktif dengan kontak trip (TJ) menuju komponen eksekusi seperti Circuit Breaker (CB) atau valve. Pengaturan jalur ini sangat krusial untuk memastikan sinyal perintah pemutusan dapat tersalurkan tanpa kegagalan saat sistem mendeteksi kondisi abnormal. Detail mengenai pemetaan hubungan logika dan terminal keluaran proteksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.9.

A. Enable Trip Logic & Element Protection

NO	Enable Trip Logic	Enable Element Protection
1	187F	Diff_Tr, OC11_Tr, ROC12_Tr, MechRly1
2	0027	ROC11_Tr
3	1867	OvExc1_Tr, InvOvExc_Tr

B. Enable Trip Logic & Contact trip (TJ) Element

NO	Enable Trip Logic	Trip Elemen (Contact trip TJ-)															
		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	187F	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑
2	0027	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
3	1867	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☑	☑

C. Function Test Contact Trip Protection

NO	Trp Output Name	Equipment Terminal Number	Wiring Connector Number	Target trip	Action Trip Element	Test Trip (Yes/No)	Note
1	Trp Output 1 (TJ1)	1A3 - 1A5	1PD1 - 1TLP1 (2)	BO_TrpHVS_1A	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A7 - 1A9	1PD3 - 1TLP2 (2)	BO_TrpHVS_1B		Yes	
		1A11 - 1A13	1PD5 - 1TLP3 (2)	BO_TrpHVS_1C		Yes	
		1A15 - 1A17	spare	spare		-	
2	Trp Output 2 (TJ2)	1A19 - 1A21	1PD7 - 1TLP4 (2)	BO_TrpHVS_2A	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A23 - 1A25	1PD9 - 1TLP5 (2)	BO_TrpHVS_2B		Yes	
		1A27 - 1A29	1PD11 - 1TLP6 (2)	BO_TrpHVS_2C		Yes	
		1B1 - 1B3	spare	spare		-	
3	Trp Output 3 (TJ3)	1A2 - 1A4	1PD13 - 1TLP7 (2)	BO_Off_Valve1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A6 - 1A8	1PD15 - 1TLP8 (2)	BO_Off_Valve2		Yes	
		1A10 - 1A12	spare	spare		-	
		1A14 - 1A16	spare	spare		-	
4	Trp Output 4 (TJ4)	1A18 - 1A20	1PD17 - 1TLP9 (2)	BO_TrpFSS1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A22 - 1A24	1PD19 - 1TLP10 (2)	BO_TrpFSS2		Yes	
5	Trp Output 5 (TJ5)	1A26 - 1A28	1PD21 - 1TLP11 (2)	BO_InitBFP_1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B2 - 1B4	1PD23 - 1TLP12 (2)	BO_InitBFP_2		Yes	note 1
		1B6 - 1B8	1PD25 - 1TLP13 (2)	BO_InitBFP_3		Yes	note 2
		1B10 - 1B12	spare	spare		-	
6	Trp Output 6 (TJ6)	1B5 - 1B7	1PD27 - 1TLP14 (2)	BO_TrpGCB1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B9 - 1B11	1PD29 - 1TLP15 (2)	BO_TrpGCB2		Yes	
		1B13 - 1B15	spare	spare		-	
7	Trp Output 11 (TJ11)	1B14 - 1B16	1PD39 - 1TLP20 (2)	BO_TrpLVS1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B18 - 1B20	1PD43 - 1TLP22 (2)	BO_InitTransfer_LVS1		Yes	
8	Trp Output 12 (TJ12)	1B22 - 1B24	1PD41 - 1TLP21 (2)	BO_TrpLVS2	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B26 - 1B28	1PD47 - 1TLP24 (2)	BO_InitTransfer_LVS2		Yes	

Note :

(1) Terminal 1PD23 dan 1ND23 tidak ada kabel keluar. Saat normal operasi link BO_InitBFP_2 tidak di enable

(2) Terminal 1PD25 dan 1ND25 tidak ada kabel keluar. Saat normal operasi link BO_InitBFP_3 tidak di enable

Gambar 4.9 Konfigurasi Logika Trip dan Pemetaan Output Proteksi GT Panel C

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan hasil pengujian, seluruh fungsi trip diferensial GT telah terhubung dengan benar ke terminal keluaran yang ditentukan. Ketika terjadi gangguan internal, relay terbukti mampu mengirimkan sinyal trip secara tepat dan cepat ke sistem pemutus tenaga. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi antara setting relay, wiring panel, serta jalur proteksi telah bekerja optimal dan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.

4.3.5 Pengujian Proteksi Generator Transformator Panel D

Proses verifikasi dan kalibrasi parameter instrumen sangat penting untuk memastikan akurasi pembacaan serta kesiapan operasional relay proteksi pada Generator Transformer (GT). Pengujian ini berfokus pada validasi konfigurasi sensor arus dan tegangan, akurasi pengukuran fasa, serta stabilitas pasokan daya utama dari sistem.

Detail konfigurasi, titik injeksi, dan tabel hasil verifikasi ini dapat dilihat pada Gambar 4.10.

Descriptions

Merk / type : NANJING NARI-RELAYS ELECTRIC / RCS-985 (Multiple Relay)
Serial number/Panel : 7547090600201 / PRC85-61C
Ratio CT HV side GT : 1500/ 1 A Ratio CT Generator side : 28000/ 5 A
Ratio CT HV side UAT : 5000/ 1 A Ratio CT Netral HV side GT : 600/ 1 A
Ratio PT HV side GT : 500/ 0.11 kV Ratio PT LV side GT : 20/ 0.11 kV
S Nominal GT : 800 MVA --> Ie (sekunder) = 0.616 Ie HV = 4.124 Ie Gen = 4.619 Ie UAT

Current Injection :
I_HV side MT = 2ID 1,2,3,4
I_Generator side = 2ID 8,9,10,11
I_HV side UAT = 2ID 22,23,24,25
I0_HV netral side MT = 2ID 67,68

Voltage Injection :
U_HV side MT = 2UD 15,16,17,18
U_LV side MT = 2UD 7,8,9,10
U0_LV side MT = 2UD 25,26

Metering Test

Test Input		Injection Value	Result				*Acceptance Value	Result
			Phasa A	Phasa B	Phasa C	Phasa Angel		
U_HV side MT	(V)	63.51	110.16	110.24	110.26	120	109.45 - 110.55	Voltage : OK
U_LV side MT	(V)	63.51	110.26	110.28	110.26	120	109.45 - 110.55	Voltage : OK
U0_LV side MT	(V)	10	10.04				0.95 - 1.05	Voltage : OK
I0_HV netral side MT	(A)	1	0.99				0.95 - 1.05	Current : OK
I_HV side MT	(A)	1	0.99	0.99	0.99	120	4.97 - 5.02	Current : OK
I_Generator side	(A)	5	4.96	4.96	4.96	120	4.97 - 5.02	Current : OK
I_HV side UAT	(A)	5	4.97	4.98	4.97	120	4.97 - 5.02	Current : OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985G Generator Protection Instruction Manual"
Note :

Power Supply Test

No	Object	Result			*Acceptance Value		Result
		Volt (V)	Ripple (mV)	Ripple (%)	Volt	Ripple (%)	
1	DC Power Supply (ZD27 - ZD32)	114.7	15	0.013	88 - 132	<1	OK
2	DC Power Supply for BI (ZD29 - ZD34)	115.3	20	0.017	88 - 132	<1	OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985G Generator Protection Instruction Manual"
Note :

Gambar 4.10 Hasil Pengujian Relay Proteksi Generator Transformator RCS-985 (*Metering Test dan Power Supply Test*)
(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan data pengujian tersebut, konfigurasi rasio CT dan VT pada sisi generator, UAT, serta sistem netral telah teruji melalui Metering Test dengan hasil seluruh fasa berstatus "OK" sesuai rentang toleransi manual pabrikan RCS-985. Selain itu, pada Power Supply Test, catu daya DC (110–115 V) menunjukkan tingkat ripple tegangan yang sangat rendah (<1% ripple). Dengan hasil pengujian metering dan suplai daya yang memenuhi batas penerimaan ini, relay proteksi dinyatakan berfungsi normal dan layak operasi.

Sistem proteksi diferensial (87T) pada relay Generator Transformer dirancang untuk mendeteksi gangguan internal secara cepat sekaligus menjaga stabilitas sistem saat terjadi kondisi transien eksternal. Pengujian komprehensif pada fungsi ini sangat krusial untuk memastikan bahwa relay dapat membedakan antara arus gangguan sejati

dengan fenomena normal seperti arus surja (inrush current). Parameter operasional dan metode evaluasi fungsi proteksi diferensial ini dapat dilihat pada Gambar 4.11.

MT Protection Calibration

1. MT Differential Protection (87T)

 # Setting :

I_Pkp_PcntDiff	:	0.30 Ie
I_InstDiff	:	4.5Ie
Slope1_PcntDiff	:	0.1
Slope2_PcntDiff	:	0.7
k_Harm_PcntDiff_Tr	:	0.15
TrpLog_Diff_Tr	:	187F

 # Terminal Injeksi :

I_HV side MT	=	2ID 1,2,3,4
I_Generator side	=	2ID 8,9,10,11
I_HV side UAT	=	2ID 22,23,24,25

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak T33 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection (A)			Ir (Ie)	Id (Ie)	Time (ms)	*Acceptance		Result
	HV MT side	Gen side	HV UAT side				Id (Ie)	Time (ms)	
Balance Condition (No Trip action)									
IA	0.616 < 0°	4.124 < 150°	-	1.00	0.00	No trip	0	No Trip	Id = OK Time = OK
IB	0.616 < 240°	4.124 < 30°	-						
IC	0.616 < 120°	4.124 < 270°	-						
IA	0.616 < 0°	-	4.637 < 150°	1.00	0.00	No trip	0	No Trip	Id = OK Time = OK
IB	0.616 < 240°	-	4.637 < 30°						
IC	0.616 < 120°	-	4.637 < 270°						
Percent Diff (Op_PcntDiff action)									
IA	0.195 < 0°	-	-	0.16	0.31	29.2	0.285 - 0.315	Time ≤ 25ms at 2*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	0.195 < 240°	-	-						
IC	0.195 < 120°	-	-						
IA	-	1.252 < 0°	-	0.15	0.30	38.6	0.285 - 0.315	Time ≤ 25ms at 2*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	-	1.252 < 240°	-						
IC	-	1.252 < 120°	-						
IA	-	-	1.452 < 0°	0.16	0.31	29.8	0.285 - 0.315	Time ≤ 25ms at 2*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	-	-	1.452 < 240°						
IC	-	-	1.452 < 120°						
Instant Diff (Op_InstDiff action)									
IA	2.74 < 0°	-	-	2.22	4.45	29.6	4.275 - 4.725	Time ≤ 20 ms at 1.5*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	2.74 < 240°	-	-						
IC	2.74 < 120°	-	-						
IA	-	18.56 < 0°	-	2.25	4.49	30	4.275 - 4.725	Time ≤ 20 ms at 1.5*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	-	18.56 < 240°	-						
IC	-	18.56 < 120°	-						
IA	-	-	20.7 < 0°	2.51	4.48	30.8	4.275 - 4.725	Time ≤ 20 ms at 1.5*I_pkp	Id = OK Time = OK
IB	-	-	20.7 < 240°						
IC	-	-	20.7 < 120°						
Phase	Injection (A)			Ir (Ie)	Id (Ie)	Time (ms)	*Acceptance		Result
	HV side		LV A & LV B Side				Id (Ie)	Time (ms)	
	Fundamental	2nd Harm							
Restrain 2nd harmonic for Inrush Test									
IA	1.0 < 0°	15 %	-	0.81	1.62	No trip	> 15 %	No Trip	2nd Harm = OK Time = OK
IB	1.0 < 240°	15 %	-						
IC	1.0 < 120°	15 %	-						
IA	1.0 < 0°	14 %	-	0.81	1.62	35.4	< 15 %	≤ 50 ms	2nd Harm = OK Time = OK
IB	1.0 < 240°	14 %	-						
IC	1.0 < 120°	14 %	-						

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.11 Hasil Kalibrasi dan Pengujian Proteksi Differensial (87T) Relay Generator Transformator RCS 985

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan data tersebut, pengujian pada relay RCS-985 ini meliputi kondisi seimbang (balance condition), diferensial persentase, diferensial instan, serta uji penahanan harmonisa ke-2. Melalui metode injeksi arus pada sisi HV, generator, dan UAT, nilai arus diferensial (Id), arus restrain (Ir), serta waktu operasi yang dihasilkan terbukti memenuhi kriteria manual pabrikan. Hasilnya menunjukkan bahwa relay tidak trip pada kondisi normal, bekerja akurat saat terjadi gangguan, dan berhasil menahan

trip akibat inrush current, sehingga proteksi diferensial dinyatakan berfungsi dengan baik dan sesuai spesifikasi.

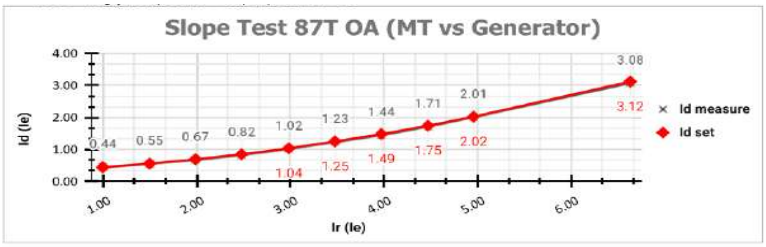
Pengujian Slope Test pada proteksi diferensial (87T) sangat penting untuk memverifikasi akurasi karakteristik operasi relay dalam memetakan hubungan antara arus diferensial (Id) dan arus penahan (Ir). Pengujian ini memastikan sistem proteksi memiliki keseimbangan yang tepat antara sensitivitas terhadap gangguan internal dan ketahanan terhadap gangguan eksternal pada sisi MT-Generator maupun MT-UAT. Detail visual mengenai grafik karakteristik dan kurva setting hasil pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 4.12.

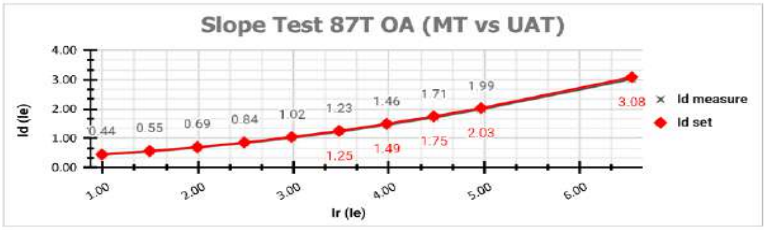
B. SlopeTest

Phase	Injection (A)		Ir measure (Ie)	Id measure (Ie)	Id set (Ie)	Error Id (Ie)	*Acceptance Id (Ie)	Result
	Gen / UAT Side	MT Side						
HV side MT vs Generator side slope Test								
I_A, B, C	3.196 < 150°	0.75 < 0°	1.00	0.44	0.45	0.00	0.43 - 0.47	Id = OK
I_A, B, C	5.030 < 150°	1.09 < 0°	1.49	0.55	0.56	0.01	0.53 - 0.59	Id = OK
I_A, B, C	6.804 < 150°	1.43 < 0°	1.99	0.67	0.70	0.02	0.66 - 0.73	Id = OK
I_A, B, C	8.530 < 150°	1.78 < 0°	2.48	0.82	0.86	0.03	0.81 - 0.90	Id = OK
I_A, B, C	10.20 < 150°	2.15 < 0°	2.98	1.02	1.04	0.03	0.99 - 1.10	Id = OK
I_A, B, C	11.83 < 150°	2.52 < 0°	3.48	1.23	1.25	0.02	1.19 - 1.31	Id = OK
I_A, B, C	13.40 < 150°	2.89 < 0°	3.97	1.44	1.49	0.04	1.41 - 1.56	Id = OK
I_A, B, C	14.93 < 150°	3.28 < 0°	4.47	1.71	1.75	0.03	1.66 - 1.83	Id = OK
I_A, B, C	16.39 < 150°	3.67 < 0°	4.96	2.01	2.02	0.02	1.92 - 2.12	Id = OK
I_A, B, C	21.00 < 150°	5.03 < 0°	6.63	3.08	3.12	0.04	2.96 - 3.28	Id = OK
HV side MT vs HV side UAT slope Test								
I_A, B, C	3.570 < 150°	0.75 < 0°	1.00	0.44	0.45	0.00	0.43 - 0.47	Id = OK
I_A, B, C	5.620 < 150°	1.09 < 0°	1.49	0.55	0.56	0.01	0.53 - 0.59	Id = OK
I_A, B, C	7.610 < 150°	1.44 < 0°	1.99	0.69	0.70	0.01	0.66 - 0.73	Id = OK
I_A, B, C	9.550 < 150°	1.79 < 0°	2.49	0.84	0.86	0.02	0.82 - 0.90	Id = OK
I_A, B, C	11.42 < 150°	2.15 < 0°	2.98	1.02	1.04	0.02	0.99 - 1.09	Id = OK
I_A, B, C	13.24 < 150°	2.52 < 0°	3.48	1.23	1.25	0.03	1.19 - 1.32	Id = OK
I_A, B, C	15.00 < 150°	2.90 < 0°	3.98	1.46	1.49	0.03	1.41 - 1.56	Id = OK
I_A, B, C	16.70 < 150°	3.28 < 0°	4.47	1.71	1.75	0.04	1.66 - 1.83	Id = OK
I_A, B, C	18.34 < 150°	3.67 < 0°	4.97	1.99	2.03	0.04	1.93 - 2.13	Id = OK
I_A, B, C	23.26 < 150°	4.96 < 0°	6.54	3.02	3.08	0.06	2.93 - 3.24	Id = OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note : Pengujian slope 1 di Ir < 6Ie, Slope 2 di Ir > 6Ie





Gambar 4.12 Slope Test Proteksi Differensial 87T

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan data pengujian tersebut, variasi injeksi arus tiga fasa dilakukan dengan peningkatan nilai Ir secara bertahap untuk membandingkan nilai Id measure terhadap Ide set. Hasilnya menunjukkan nilai error Id yang sangat kecil dan seluruh parameter berada dalam rentang toleransi (acceptance value). Hal ini diperkuat oleh grafik yang memperlihatkan titik pengukuran secara konsisten mengikuti kurva linier setting relay. Kesesuaian ini membuktikan bahwa fungsi slope bekerja sesuai desain, mampu menjaga stabilitas sistem agar tidak trip akibat gangguan eksternal di luar zona proteksi, sekaligus tetap sensitif dalam mengamankan gangguan internal transformator.

Fungsi MT Over Excitation Protection berperan penting dalam melindungi generator dan transformator dari kondisi over-fluxing yang dipicu oleh lonjakan rasio tegangan terhadap frekuensi (V/Hz) di atas batas aman. Pengujian dilakukan melalui metode secondary injection pada terminal relay guna memverifikasi akurasi pembacaan parameter serta memastikan waktu kerja sistem proteksi tetap sinkron tanpa mengganggu operasional sistem utama. Grafik karakteristik kurva dan tabel parameter hasil pengujian proteksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.13.

2. MT Over Excitation Protection

 # Setting :

k_Alm_OvExc_Tr	:	1.1	t0_InvOvExc_Tr	:	1.0 s	k4_InvOvExc_Tr	:	1.25
t_Alm_OvExc_Tr	:	2 s	k1_InvOvExc_Tr	:	1.4	t4_InvOvExc_Tr	:	10 s
k_OvExc1_Tr	:	1.3	t1_InvOvExc_Tr	:	2.0 s	k5_InvOvExc_Tr	:	1.2
t_OvExc1_Tr	:	5.0 s	k2_InvOvExc_Tr	:	1.35	t5_InvOvExc_Tr	:	30 s
k_OvExc2_Tr	:	N/A	t2_InvOvExc_Tr	:	5 s	TrpLog_OvExc1_Tr	:	1867
t_OvExc2_Tr	:	N/A	k3_InvOvExc_Tr	:	1.3	TrpLog_OvExc2_Tr	:	-
k0_InvOvExc_Tr	:	1.45	t3_InvOvExc_Tr	:	7	TrpLog_InvOvExc_Tr	:	1867

 # Terminal Injeksi :

Terminal side : 2UD 15,16,17,18

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection			Time (ms)	*Acceptance		Result
	Voltage (V)	Freq. (Hz)	V/f		V/f	Time (s)	
Over Excitation Alarm Test (Alm_OvExc_Gen Action)							
A	69.8 < 0°	50	1.099	2.0302	1.072 - 1.127	1.94 - 2.06	V/f = OK Time = OK
B	69.8 < 240°						
C	69.8 < 120°						
A	63.51 < 0°	45.47	1.100	2.0474	1.072 - 1.127	1.94 - 2.06	V/f = OK Time = OK
B	63.51 < 240°						
C	63.51 < 120°						
Over Excitation 1 Test (Op_OvExc1_Gen Action)							
A	82.8 < 0°	50	1.304	5.0668	1.267 - 1.332	4.9 - 5.1	V/f = OK Time = OK
B	82.8 < 240°						
C	82.8 < 120°						
A	63.51 < 0°	38.4	1.302	5.0766	1.267 - 1.332	4.9 - 5.1	V/f = OK Time = OK
B	63.51 < 240°						
C	63.51 < 120°						
Inverse Over Excitation Test (Op_InvOvExc_Gen Action)							
A	92.0 < 0°	50	1.449	1.0776	1.413 - 1.486	1.0 - 1.1	V/f = OK Time = OK
B	92.0 < 240°						
C	92.0 < 120°						
A	88.9 < 0°	50	1.400	1.9670	1.365 - 1.435	1.9 - 2.1	V/f = OK Time = OK
B	88.9 < 240°						
C	88.9 < 120°						
A	85.72 < 0°	50	1.350	4.8038	1.316 - 1.383	4.91 - 5.09	V/f = OK Time = NOT OK ***(1)***
B	85.72 < 240°						
C	85.72 < 120°						
A	82.55 < 0°	50	1.300	6.9374	1.267 - 1.332	6.89 - 7.11	V/f = OK Time = OK
B	82.55 < 240°						
C	82.55 < 120°						
A	79.37 < 0°	50	1.250	9.8756	1.218 - 1.281	9.86 - 10.14	V/f = OK Time = OK
B	79.37 < 240°						
C	79.37 < 120°						
A	76.2 < 0°	50	1.200	28.4262	1.17 - 1.23	29.66 - 30.34	V/f = OK Time = NOT OK ***(2)***
B	76.2 < 240°						
C	76.2 < 120°						

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note : Hasil pengujian saat FYI menunjukkan nilai waktu trip sudah mengalami pergeseran dari nilai toleransi yang diijinkan --> ***(1)*** t (FYI) = 4.672 s, ***(2)*** t (FYI) = 27.949 s

Gambar 4.13 Hasil Pengujian Proteksi *Over Excitation* (V/Hz)

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Berdasarkan data tersebut, pengujian Over Excitation Alarm (batas ~1,1 pu, tunda ±2 s) dan Over Excitation Trip tahap pertama (batas ~1,3 pu, tunda ±5 s) menunjukkan nilai pickup serta waktu operasi relay yang masih berada dalam rentang toleransi pabrikan dengan status "OK". Pada pengujian Inverse Over Excitation, variasi nilai V/f yang lebih tinggi berhasil membuktikan karakteristik kurva inverse, di mana waktu trip menjadi semakin cepat seiring meningkatnya nilai V/f. Meskipun terdapat beberapa titik deviasi waktu trip yang melewati batas toleransi sehingga ditandai "NOT OK", secara keseluruhan sistem proteksi pada Generator Transformator Panel D ini dinilai

bekerja sesuai setting dan karakteristiknya untuk menjaga keandalan operasi jangka panjang.

Sistem proteksi Overload dan Initial Cooling berfungsi mencegah kerusakan termal pada transformator akibat beban lebih dengan mengaktifkan alarm dan sistem pendingin. Hasil pengujian dan batas parameter untuk fungsi pengamanan ini dapat dilihat pada Gambar 4.14.

3. MT Overload & Initial cooling Protection (HV Side)

 # Setting :

I_Alm_OvLd_Tr	: 0.68 A	I_InitCool_OvLd_Tr	: 0.41A
t_Alm_OvLd_Tr	: 0.5 s	t_InitCool_OvLd_Tr	: 9 s
TrpLog_OvLd_Tr	: -	TrpLog_InitCool_ST	: -

 # Terminal Injeksi :

I_HV side MT = 2ID 1,2,3,4

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection (A)		Time (s)	*Acceptance		Result
	HV Side	LV Side		Current (A)	Time (s)	
Overload Alarm Test HV side						
IA	0.68 < 0°	-	0.5206	0.663 - 0.697	0.455 - 0.545	Current = OK Time = OK
IB	0.68 < 240°	-				
IC	0.68 < 120°	-				
Initial Cooling Test HV Side						
IA	0.41 < 0°	-	9.0164	0.399 - 0.420	8.87 - 9.13	Current = OK Time = OK
IB	0.41 < 240°	-				
IC	0.41 < 120°	-				

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.14 Hasil Pengujian MT *Overload* dan *Initial Cooling Protection (HV side)*
(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Data menunjukkan arus pickup alarm sebesar 0,68 A dengan waktu kerja 0,52 s, serta waktu kerja initial cooling sebesar ±9,01 s. Karena seluruh hasil ini masih berada dalam rentang toleransi yang ditentukan, fungsi proteksi beban lebih dan pendinginan awal dinyatakan bekerja akurat sesuai setting.

Sistem proteksi Ground Fault berfungsi untuk mendeteksi arus bocor ke tanah dan tegangan residual abnormal demi mencegah kerusakan isolasi pada transformator. Grafik respons waktu serta parameter detail dari hasil pengujian gangguan tanah ini dapat dilihat pada Gambar 4.15.

4. MT Ground Fault Protection

 # Setting :

I_ROC1_Tr	: 2.51 A	V_Alm_ROV_LVS_Tr	: 10 V
t_ROC11_Tr	: 2 s	t_Alm_ROV_LVS_Tr	: 1 s
TrpLog_ROC11_Tr	: 0027		
t_ROC12_Tr	: 2.5 s		
TrpLog_ROC12_Tr	: 187F		

 # Terminal Injeksi :

I0_HV netral side MT = 2ID 67,68 U0_LV side MT = 2UD 25,26

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection		Time (s)	*Acceptance		Result
	Current (A)	Voltage (V)		Injection	Time (s)	
ROC1 Test at stage 1 (Op_ROC11_Tr action)						
Io	2.51	-	2.0254	Current = 2.44 - 2.57 A	1.94 - 2.06	Current = OK Time = OK
ROC1 Test at stage 2 (Op_ROC12_Tr action)						
Io	2.51	-	2.5256	Current = 2.44 - 2.57 A	2.43 - 2.56	Current = OK Time = OK
ROV Alarm Test (Alarm_Alm_ROV_LVS_Tr action)						
Uo	-	9.98	1.0224	Voltage = 9.75 - 10.25 V	0.95 - 1.05	Voltage= OK Time = OK

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.15 Hasil Pengujian *MT Ground Fault Protection*

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Hasil pengujian tahap pertama dan kedua menunjukkan arus injeksi sebesar 2,51 A dengan waktu operasi relay yang sesuai standar standar. Selain itu, pengujian tegangan residual (Uo) juga menghasilkan nilai yang tetap berada dalam batas toleransi. Hal ini menandakan bahwa fungsi proteksi ground fault bekerja secara akurat dan responsif dalam mengamankan sistem.

Sistem proteksi Voltage Controlled Overcurrent (VCOC) menggabungkan parameter arus dan tegangan agar relay dapat mendeteksi gangguan secara lebih selektif. Rangkaian pengujian beserta visualisasi kurva karakteristik dari fungsi proteksi ini dapat dilihat pada Gambar 4.16.

5. MT Voltage Controlled Overcurrent Protection (HV Side)

 # Setting :

V_NegOV_VCE_Tr : 4.45 V
Vpp_VCE_Tr : 60V = 34.64 Vl-n
I_OC1_Tr : 0.82 A
t_OC11_Tr : 1.1 s
TrpLog_OC11_Tr : 187F

 # Terminal Injeksi :

U_HV side MT = 2UD 15,16,17,18
U_LV side MT = 2UD 7,8,9,10
I_HV side MT = 2ID 1,2,3,4

 # Terminal Tes Contact :

1PD13 - 1TLP7(2) --> Kontak TJ3 di set enable

A. Pick Up & Time Test

Phase	Injection			Time (s)	*Acceptance		Result
	Current (A)	Voltage (V)	U2 (V)		Injection	Time (s)	
OC1 Test at Undervoltage (Op_OC11_Tr action)							
A	0.82 < 0°	0.0 < 0°	-	1.1230	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 0 - 38.1 V	1.049 - 1.151	Current = OK Time = OK
B	0.82 < 240°	0.0 < 240°					
C	0.82 < 120°	0.0 < 120°					
Voltage Controlled Test at Undervoltage HV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.85 < 0°	34.6 < 0°	-	1.1272	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 37.23 - 38.96 V	1.049 - 1.151	Voltage = OK Time = OK
B	0.85 < 240°	34.6 < 240°					
C	0.85 < 120°	34.6 < 120°					
Voltage Controlled Test at Undervoltage LV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.85 < 0°	34.5 < 0°	-	1.1266	Current : 0.799 - 0.840 A Voltage : 37.23 - 38.96 V	1.049 - 1.151	Voltage = OK Time = OK
B	0.85 < 240°	34.5 < 240°					
C	0.85 < 120°	34.5 < 120°					
Voltage Controlled Test at Negative OV HV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.85 < 0°	40 < 0°	4.5	1.1266	Current : 0.799 - 0.840 A U2 : 4.338 - 4.561 V	1.049 - 1.151	U2 = OK Time = OK
B	0.85 < 240°	53.5 < 240°					
C	0.85 < 120°	40 < 120°					
Voltage Controlled Test at Negative OV LV (Op_OC11_Tr action)							
A	0.85 < 0°	40 < 0°	4.47	1.1272	Current : 0.799 - 0.840 A U2 : 4.338 - 4.561 V	1.049 - 1.151	U2 = OK Time = OK
B	0.85 < 240°	53.4 < 240°					
C	0.85 < 120°	40 < 120°					

*Acceptance value berdasarkan dokumen "RCS985A Generator Protection Instruction Manual"

Note :

Gambar 4.16 Hasil Pengujian *MT Voltage Controller Overcurrent Protection* (HV side)

(Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Data menunjukkan arus pickup sebesar 0,82 A dengan waktu kerja ±1,12 s, yang mana telah memenuhi nilai batas toleransi standar. Pengujian pada kondisi undervoltage, negative voltage, serta kombinasi sisi HV dan LV juga menghasilkan nilai yang aman, sehingga fungsi voltage restraint terbukti bekerja baik dalam membedakan kondisi gangguan berdasarkan level tegangan sistem.

Sistem pemetaan logika trip dan interlocking pada GT Panel D dirancang untuk memastikan sinyal perintah pemutusan tersalurkan ke pemutus tenaga tanpa kegagalan saat terjadi gangguan. Detail visual mengenai daftar pemetaan kontak dan matriks logika trip ini dapat dilihat pada Gambar 4.17.

A. Enable Trip Logic & Element Protection

NO	Enable Trip Logic	Enable Element Protection
1	187F	Diff_Tr, OC11_Tr, ROC12_Tr, MechRly1
2	0027	ROC11_Tr
3	1867	OvExc1_Tr, InvOvExc_Tr

B. Enable Trip Logic & Contact trip (TJ) Element

NO	Enable Trip Logic	Trip Elemen (Contact trip TJ-)															
		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
1	187F	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
2	0027	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☑	☐	☐	☑	☑	☑
3	1867	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☐	☐	☑	☑	☐	☐	☑	☑	☑

C. Function Test Contact Trip Protection

NO	Trp Output Name	Equipment Terminal Number	Wiring Connector Number	Target trip	Action Trip Element	Test Trip (Yes/No)	Note
1	Trp Output 1 (TJ1)	1A3 - 1A5	2PD1 - 2TLP1 (2)	BO_TrpHVS_1A	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A7 - 1A9	2PD3 - 2TLP2 (2)	BO_TrpHVS_1B		Yes	
		1A11 - 1A13	2PD5 - 2TLP3 (2)	BO_TrpHVS_1C		Yes	
		1A15 - 1A17	spare	spare		-	
2	Trp Output 2 (TJ2)	1A19 - 1A21	2PD7 - 2TLP4 (2)	BO_TrpHVS_2A	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A23 - 1A25	2PD9 - 2TLP5 (2)	BO_TrpHVS_2B		Yes	
		1A27 - 1A29	2PD11 - 2TLP6 (2)	BO_TrpHVS_2C		Yes	
		1B1 - 1B3	spare	spare		-	
3	Trp Output 3 (TJ3)	1A2 - 1A4	2PD13 - 2TLP7 (2)	BO_Off_Valve1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A6 - 1A8	2PD15 - 2TLP8 (2)	BO_Off_Valve2		Yes	
		1A10 - 1A12	spare	spare		-	
		1A14 - 1A16	spare	spare		-	
4	Trp Output 4 (TJ4)	1A18 - 1A20	2PD17 - 2TLP9 (2)	BO_TrpFSS1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1A22 - 1A24	2PD19 - 2TLP10 (2)	BO_TrpFSS2		Yes	
5	Trp Output 5 (TJ5)	1A26 - 1A28	2PD21 - 2TLP11 (2)	BO_InitBFP_1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B2 - 1B4	2PD23 - 2TLP12 (2)	BO_InitBFP_2		Yes	note 1
		1B6 - 1B8	2PD25 - 2TLP13 (2)	BO_InitBFP_3		Yes	note 2
		1B10 - 1B12	spare	spare		-	
6	Trp Output 6 (TJ6)	1B5 - 1B7	2PD27 - 2TLP14 (2)	BO_TrpGCB1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B9 - 1B11	2PD29 - 2TLP15 (2)	BO_TrpGCB2		Yes	
		1B13 - 1B15	spare	spare		-	
7	Trp Output 11 (TJ11)	1B14 - 1B16	2PD39 - 2TLP20 (2)	BO_TrpLVS1	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B18 - 1B20	2PD43 - 2TLP22 (2)	BO_InitTransfer_LVS1		Yes	
8	Trp Output 12 (TJ12)	1B22 - 1B24	2PD41 - 2TLP21 (2)	BO_TrpLVS2	Diff_Tr (GT Differential)	Yes	
		1B26 - 1B28	2PD47 - 2TLP24 (2)	BO_InitTransfer_LVS2		Yes	

Note :

(1) Terminal 2PD23 dan 2ND23 tidak ada kabel keluar. Saat normal operasi link BO_InitBFP_2 tidak di enable

(2) Terminal 2PD25 dan 2ND25 tidak ada kabel keluar. Saat normal operasi link BO_InitBFP_3 tidak di enable

Gambar 4.17 Konfigurasi Logika Trip dan Pemetaan *Output* Proteksi GT Panel D (Sumber: Data PT PLN NP UP Paiton Unit 9)

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa seluruh konfigurasi pada Panel D ini telah sesuai dengan nilai parameter yang ditetapkan, sama seperti hasil pada Panel C. Keterangan "Yes" pada data membuktikan bahwa fungsi trip dan sistem pengunci (interlocking) bekerja dengan baik, sehingga sistem proteksi dinyatakan siap beroperasi untuk mengamankan GT dari kerusakan.

4.4 Evaluasi Keandalan

Evaluasi keandalan sistem proteksi Generator Transformator Unit 9 dilakukan berdasarkan hasil pengujian proteksi elektrik, proteksi mekanik, pengujian tahanan kontak, serta verifikasi setting proteksi yang telah dilakukan selama kegiatan overhaul. Evaluasi ini

bertujuan untuk mengetahui tingkat kesiapan sistem proteksi dalam menjaga keamanan dan kontinuitas operasi Generator Transformator sebelum unit kembali dioperasikan.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, seluruh fungsi proteksi menunjukkan kinerja yang sesuai dengan parameter dan *acceptance value* yang telah ditetapkan. Pada sistem proteksi mekanik, perangkat Buchholz Relay, Pressure Relief Valve (PRV), Oil Temperature Indicator (OTI), dan Winding Temperature Indicator (WTI) berhasil memberikan respon alarm maupun trip sesuai logika operasi yang dirancang. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi indikasi gangguan internal transformator seperti pembentukan gas, kenaikan tekanan, maupun peningkatan temperatur secara tepat dan cepat.

Dari sisi proteksi elektrik, pengujian relay diferensial (87T) pada Panel C dan Panel D menunjukkan bahwa relay mampu membedakan kondisi normal dan kondisi gangguan internal dengan baik. Pengujian *slope characteristic*, *harmonic restraint*, serta *percent* differential menunjukkan hasil yang sesuai dengan setting relay dan standar pabrikan. Kondisi ini membuktikan bahwa proteksi diferensial memiliki tingkat selektivitas yang tinggi, sehingga dapat mengamankan transformator dari gangguan internal tanpa menyebabkan trip yang tidak diperlukan akibat gangguan eksternal maupun arus inrush transformator.

Pengujian proteksi Over Excitation (V/Hz), Overload Protection, Ground Fault Protection, dan Voltage Controlled Overcurrent Protection juga menunjukkan hasil yang berada dalam rentang toleransi yang ditetapkan. Nilai pickup, waktu operasi, serta karakteristik kerja relay masih sesuai dengan setting yang direncanakan. Meskipun pada beberapa titik pengujian Over Excitation ditemukan deviasi kecil terhadap waktu operasi, secara keseluruhan fungsi proteksi masih bekerja sesuai karakteristik desain dan tidak mempengaruhi kinerja sistem secara signifikan.

Selain sistem proteksi, hasil pengujian tahanan kontak terminasi sisi HV Generator Transformator menunjukkan adanya penurunan nilai tahanan kontak setelah dilakukan pemeliharaan. Penurunan nilai tahanan kontak ini mengindikasikan perbaikan kualitas sambungan konduktor sehingga dapat mengurangi rugi-rugi daya, meminimalkan potensi *hot spot*, serta meningkatkan keandalan sistem penyaluran daya pada transformator.

Berdasarkan aspek keandalan (reliability), seluruh perangkat proteksi berhasil bekerja sesuai fungsi yang direncanakan selama pengujian. Dari aspek selektivitas (*selectivity*), relay mampu mengidentifikasi gangguan sesuai zona proteksinya tanpa menimbulkan operasi yang tidak diinginkan. Dari aspek kecepatan (*speed*), seluruh waktu operasi relay masih berada dalam batas toleransi standar sehingga gangguan dapat diisolasi dengan cepat. Sementara dari aspek sensitivitas (*sensitivity*), relay mampu mendeteksi perubahan parameter gangguan pada nilai pickup yang telah ditentukan.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem proteksi Generator Transformator Unit 9 PLTU Paiton berada dalam kondisi baik, andal, dan siap dioperasikan kembali setelah kegiatan overhaul. Sistem proteksi yang diterapkan telah memenuhi prinsip dasar proteksi tenaga listrik yaitu *reliability*, *selectivity*, *speed*, dan *sensitivity*, sehingga mampu memberikan perlindungan yang efektif terhadap Generator Transformator serta mendukung kontinuitas operasi pembangkit.

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan kegiatan kerja praktik PT. PLN Nusantara Paiton UP Paiton Unit 9, kami dapat menyimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Program Kerja Praktik adalah kegiatan yang berguna bagi mahasiswa dalam mengenal alur kerja dunia industri/perusahaan. Dalam pelaksanaan kerja praktik mahasiswa dituntut untuk aktif dalam segala hal seperti bertanya kepada pembimbing lapangan dan studi dalam menerima instruksi dari pembimbing lapangan.
2. PT. PLN Nusantara Paiton UP Paiton Unit 9 merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga uap yang terletak di Paiton dengan kapasitas 660 MW.
3. Secara umum pemeliharaan adalah kegiatan yang dilakukan untuk memelihara atau menjaga suatu peralatan dan mengadakan perbaikan. penyesuaian yang dilakukan agar performa peralatan tersebut pada kondisi optimal sehingga terdapat keandalan suatu keadaan operasi produksi sesuai dengan hasil yang direncanakan.
4. PT. PLN Nusantara Paiton UP Paiton Unit 9 melakukan pemeliharaan yang berdasarkan sifatnya terbagi menjadi pemeliharaan jangka pendek atau rutin yang terdiri dari preventive maintenance, predictive maintenance, dan corrective maintenance. Sedangkan untuk jangka panjangnya biasa dikenal dengan overhaul/inspection.
5. Hal-hal yang dilakukan sebelum memulai pekerjaan yaitu: menentukan jadwal, mengisi Permit to Work (PTW), mengisi Work Order (WO), membaca Instruksi Kerja (IK), menggunakan Alat Pelindung Diri (APD). dan koordinasi dengan operator terkait.
6. Analisa hasil pengujian proteksi Generator Transformator

   Berdasarkan hasil analisa pengujian proteksi GT, dapat disimpulkan bahwa sistem proteksi pada unit 9 telah bekerja dengan baik dan sesuai dengan fungsi yang dirancang. Hal ini ditunjukkan dari hasil pengujian berbagai elemen proteksi seperti diferensial, *overcurrent, ground fault,* serta logika trip yang seluruhnya memberikan respon dalam batas toleransi standar dan sesuai dengan nilai *setting* yang sesuai. Selain itu, pengujian jalur trip, pemetaan terminal, serta fungsi *interlocking* menunjukkan bahwa hubungan antara *relay* proteksi dan peralatan pemutus bekerja dengan baik sehingga ketika terdapat gangguan tindakan pengamanan diberikan dengan cepat dan sesuai. Dengan

demikian sistem proteksi GT dinilai siap untuk beroperasi dalam menjaga keandalan sistem pembangkit serta meminimalkan potensi kerusakan peralatan akibat adanya gangguan.

5.2 Saran

Berikut adalah beberapa saran yang kami ajukan dalam permasalahan yang terjadi saat melakukan kerja praktik:

1. Sebaiknya dari perusahaan memfasilitasi peminjaman alat pelindung diri (APD) untuk perlindungan selama kerja praktik.
2. Mahasiswa yang kerja praktik sebaiknya kritis dan aktif bertanya kepada pembimbing ataupun teknisi di PLTU Paiton sehingga memperoleh ilmu yang baru dan semoga bermanfaat untuk kedepannya.
3. Sebaiknya untuk sistem kerja praktik selanjutnya, mahasiswa kerja praktik membuat rencana jadwal kegiatan harian agar proses pembuatan laporan kerja praktik lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

Abu-Siada, A. & Islam, S., 2021. Power transformer condition monitoring and assessment: A review. *Energies*, 14(21), pp.1–23.

Harlow, J.H., 2012. *Electric Power Transformer Engineering*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press.

IEC, 2021. *IEC 60076-1: Power transformers – Part 1: General*. Geneva: International Electrotechnical Commission.

IEEE, 2022a. *IEEE Std C57.12.00-2022: Standard for general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers*. New York: IEEE.

IEEE, 2022b. *IEEE Std C57.106-2022: Guide for acceptance and maintenance of insulating mineral oil in electrical equipment*. New York: IEEE.

Islam, S.M. & Ledwich, G., 2021. Recent advances in transformer modeling and analysis in power systems. *IEEE Access*, 9, pp.145233–145248.

Wang, M., Vandermaar, A.J. & Srivastava, K.D., 2022. Transformer reliability and life assessment in modern power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 37(3), pp.2024–2032.

Anderson, P. M., Henville, C. F., Rifaat, R., Johnson, B., & Meliopoulos, S. (2022). Power system protection (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.