

**ANALISA KELAYAKAN PMT 150KV NEW PORONG
BERDASARKAN *SHUTDOWN MEASUREMENT*
MENGUNAKAN *ROOT CAUSE ANALYSIS* (RCA)**

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PROGRAM STUDI TENIK ELEKTRO
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



Oleh :

NAMA : SALMA KARIMA

NIM : 30602200249

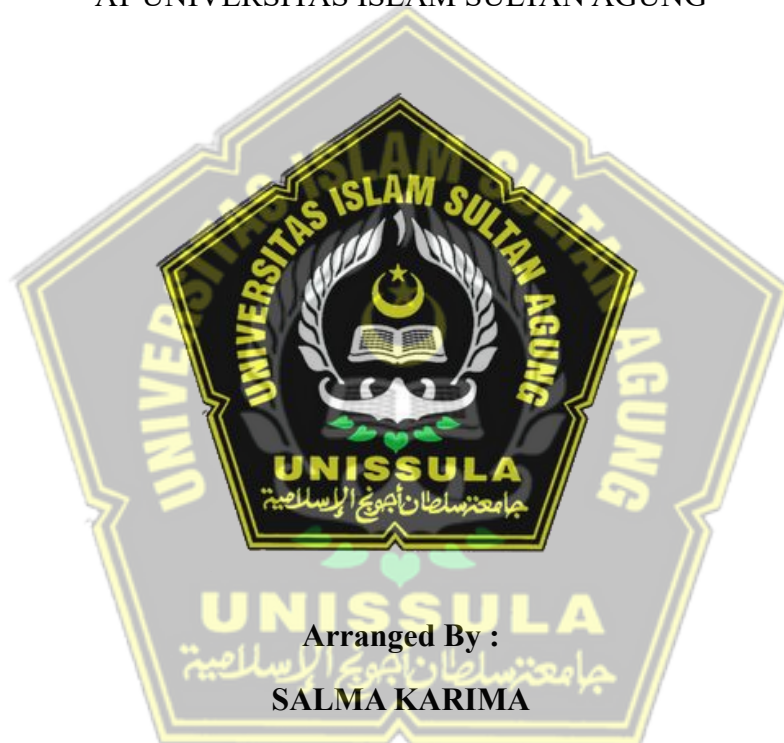
**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

FEASIBILITY ANALYSIS OF 150KV CIRCUIT BREAKER AT NEW PORONG BASED ON SHUTDOWN MEASUREMENT USING ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA)

FINAL PROJECT

SUGGESTED AS ONE OF THE REQUIREMENTS TO GET A BACHELOR'S DEGREE
IN A STUDY PROGRAM ELECTRICAL ENGINEERING
AT UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG



Arranged By :
SALMA KARIMA

30602200249

**ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KELAYAKAN PMT 150KV
NEW PORONG BERDASARKAN SHUTDOWN MEASUREMENT
MENGUNAKAN ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA)” ini disusun oleh:

Nama : SALMA KARIMA
NIM : 30602200249
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Jum'at
Tanggal : 15 Agustus 2025

Pembimbing I


Ir. Ida Widiastuti, M.T.
NIDN : 0005036501

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISA KELAYAKAN PMT 150KV NEW PORONG BERDASARKAN SHUTDOWN MEASUREMENT MENGGUNAKAN ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA)” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Jum'at

Tanggal : 15 Agustus 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Prof. Dr. Ir. H. Muhamad Haddin, M.T.

NIDN : 0618066301

Ketua

Munaf Ismail, S.T., M.T.

NIDN : 0613127302

Penguji I

Ir. Ida Widiastuti, M.T.

NIDN : 0005036501

Penguji II

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Salma Karima

NIM : 30602200249

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul "*Analisa Kelayakan PMT 150kV New Porong Berdasarkan Shutdown Measurement Menggunakan Root Cause Analysis (RCA)*", adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 05 Agustus 2025

Yang Menyatakan
Mahasiswa



Salma Karima

NIM. 30602200249

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Salma Karima

NIM : 30602200249

Fakultas : Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan Karya Ilmiah berupa Tugas Akhir dengan Judul: "**Analisa Kelayakan PMT 150kV New Porong Berdasarkan Shutdown Measurement Menggunakan Root Cause Analysis (RCA)**". Saya memberikan izin kepada Universitas Islam Sultan Agung untuk menggunakan karya saya untuk keperluan akademis serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan Universitas Islam Sultan Agung.

Semarang, 05 Agustus 2025

Yang Menyatakan
Mahasiswa



Salma Karima

NIM. 30602200249

KATA PENGANTAR



Alhamdulillah, segala puji syukur bagi Allah SWT atas berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya diberikan kesempatan untuk menuntut ilmu. Shalawat serta Salam semoga senantiasa tercurahkan kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW, semoga kelak kita mendapatkan syafaatnya. Penelitian ini diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi Strata Satu (S1) di Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang. Dalam penyusunan penelitian ini, banyak pihak memberikan bantuan baik moral dan material. Oleh karena itu saya menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. H. Gunarto, SH., M.Hum. selaku Rektor Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Ibu Dr. Ir. Novi Marlyana, ST., MT., IPU., ASEAN, Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
3. Ibu Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
4. Ibu Ir. Ida Widiastuti, M.T selaku Dosen Pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan kebijaksanaan telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi dalam penyusunan penelitian hingga selesai.
5. Seluruh Dosen jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah memberikan ilmu dan arahan selama masa perkuliahan.
6. Orang tua serta Kakak saya tercinta atas dukungan kepada saya berupa kasih sayang, keridhoan, doa, dan motivasi yang telah diberikan.
7. Segenap rekan kerja saya bidang Konstruksi & Renev UPT Probolinggo, ULTG Bangil, dan GI New Porong yang telah memberikan dukungan dan menyediakan data untuk keperluan penyusunan laporan tugas akhir ini.
8. Teman seperjuangan saya dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan hingga selesainya penelitian ini yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.

Semarang, 05 Agustus 2025

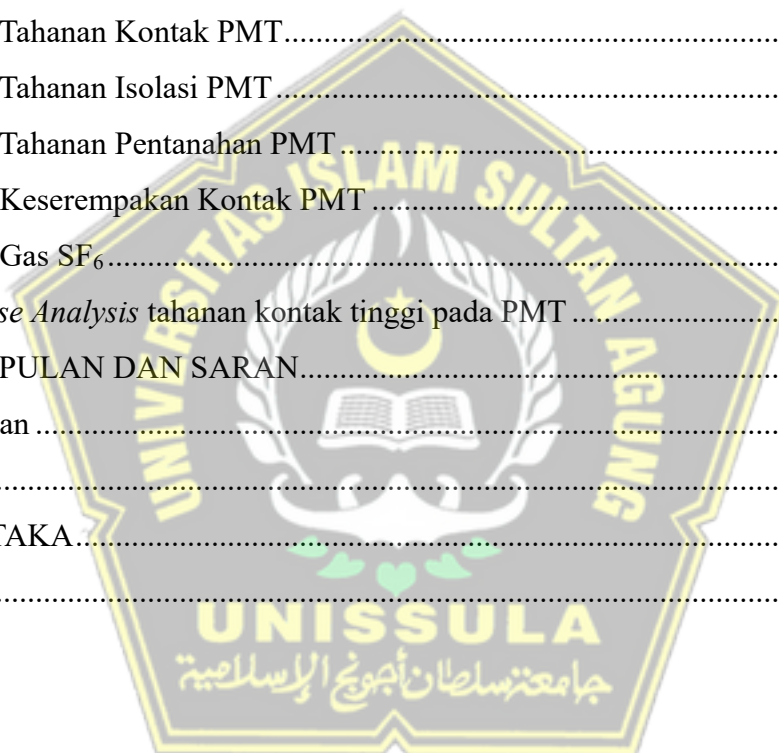
Penulis,

Salma Karima

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL (ENGLISH).....	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
ABSTRAK.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Pembatasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori.....	7
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2.2 Gardu Induk	8
2.2.3 Pemutus Tenaga	9
2.2.4 Kategori Pemutus Tenaga	10
2.2.5 Komponen pada PMT beserta fungsinya	11
2.2.6 Pemeliharaan pada PMT	13
2.2.7 Pengujian Tahanan Kontak PMT	14
2.2.8 Pengujian Tahanan Isolasi PMT	16
2.2.9 Pengujian Tahanan Pentanahan PMT	17
2.2.10 Pengujian Keserempakan Kontak	18

2.2.11 Pengujian Gas SF ₆ PMT	20
2.2.12 <i>Root Cause Analysis (RCA)</i>	22
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Lokasi Penelitian.....	25
3.2 Diagram Alir Penelitian	26
3.3 Langkah Penelitian.....	27
3.4 Data Penelitian	27
3.4.1 Nameplate PMT	27
3.4.2 Hasil Uji Pemeliharaan <i>Shutdownt Measurement</i>	28
BAB IV HASIL DAN ANALISA	31
4.1 Hasil Uji Tahanan Kontak PMT.....	31
4.2 Hasil Uji Tahanan Isolasi PMT	32
4.3 Hasil Uji Tahanan Pentanahan PMT	33
4.4 Hasil Uji Keserempakan Kontak PMT	33
4.5 Hasil Uji Gas SF ₆	35
4.6 <i>Root Cause Analysis</i> tahanan kontak tinggi pada PMT	35
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	41
5.1 Kesimpulan	41
5.2 Saran	42
DAFTAR PUSTAKA.....	43
LAMPIRAN.....	45



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 PMT <i>Single Pole</i>	11
Gambar 2. 2 PMT <i>Three Pole</i>	11
Gambar 2. 3 Pengujian Tahanan Kontak PMT	15
Gambar 2. 4 Pengujian Tahanan Isolasi PMT	17
Gambar 2. 5 Pengujian Tahanan Pentanahan PMT	18
Gambar 2. 6 Pengujian Keserempakan Kontak PMT	19
Gambar 2. 7 Pengujian Gas SF6 PMT	21
Gambar 2. 8 Fishbone diagram penyebab tahanan kontak tinggi	24
Gambar 3. 1 <i>Single Line Diagram</i> GI 150kV New Porong.....	25
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3. 3 Hasil Uji Shutdown Measurement.....	29
Gambar 3. 4 Hasil Uji Shutdown Measurement.....	30
Gambar 4. 1 Sistem Penggerak PMT Type 150-SFM-40B.....	36
Gambar 4. 2 Internal Sistem Penggerak PMT Type 150-SFM-40B.....	37



DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 <i>Nameplate</i> PMT Bay Kopel GI 150 kV New Porong.....	27
Tabel 4. 1 Hasil Uji Tahanan Kontak PMT	31
Tabel 4. 2 Hasil Uji Tahanan Isolasi PMT	32
Tabel 4. 3 Hasil Uji Tahanan Pentanahan PMT	33
Tabel 4. 4 Hasil Uji Keserempakan Kontak PMT	33
Tabel 4. 5 Δt Open Close.....	34
Tabel 4. 6 Hasil Uji Gas SF ₆	35
Tabel 4. 7 Prioritas Penggantian Peralatan Gardu Induk	39
Tabel 4. 8 Kondisi Teknis PMT	39



ABSTRAK

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan peralatan utama dalam sistem gardu induk yang bertugas memutuskan arus listrik baik dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. Keandalan PMT sangat dipengaruhi oleh kondisi kontak internal. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh temuan nilai tahanan kontak yang tidak normal pada fasa R PMT Bay Kopel GI 150 kV New Porong, yang mencapai $621,5 \mu\Omega$, diatas batas maksimal sebesar $50 \mu\Omega$ sesuai standar IEC 60694. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi penyebab kenaikan nilai tahanan kontak, mengevaluasi parameter teknis PMT berdasarkan pengujian *shutdown measurement*, serta menentukan kelayakan operasional peralatan. Pengujian *shutdown measurement* ini meliputi pengujian tahanan kontak, tahanan isolasi, tahanan pentanahan, keserempakan kontak, serta analisis kualitas gas SF₆. Untuk mengungkap akar permasalahan secara sistematis, metode Root Cause Analysis (RCA) diterapkan dengan bantuan visual dari fishbone diagram. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingginya tahanan kontak disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain kesalahan teknis dalam penyetelan stang penggerak tanpa referensi manual pabrikan, degradasi kontak akibat mekanisme operasi peralatan. Kenaikan nilai tahanan kontak mempengaruhi pemburukan kualitas gas SF₆ yang ditandai dengan kandungan SO₂ sebesar 14 ppmv (melebihi batas standar CIGRE <12 ppmv). Parameter pengujian lainnya, seperti tahanan isolasi, tahanan pentanahan dan keserempakan kontak, masih memenuhi standar. Berdasarkan keseluruhan evaluasi, kondisi PMT dinyatakan berada dalam kategori teknis sangat buruk dan masuk dalam prioritas P0 mengacu pada KepDir Nomor 149.K/DIR/2013 sehingga direkomendasikan untuk segera dilakukan penggantian peralatan guna mencegah gangguan sistem dan mempertahankan kontinuitas pasokan tenaga listrik.

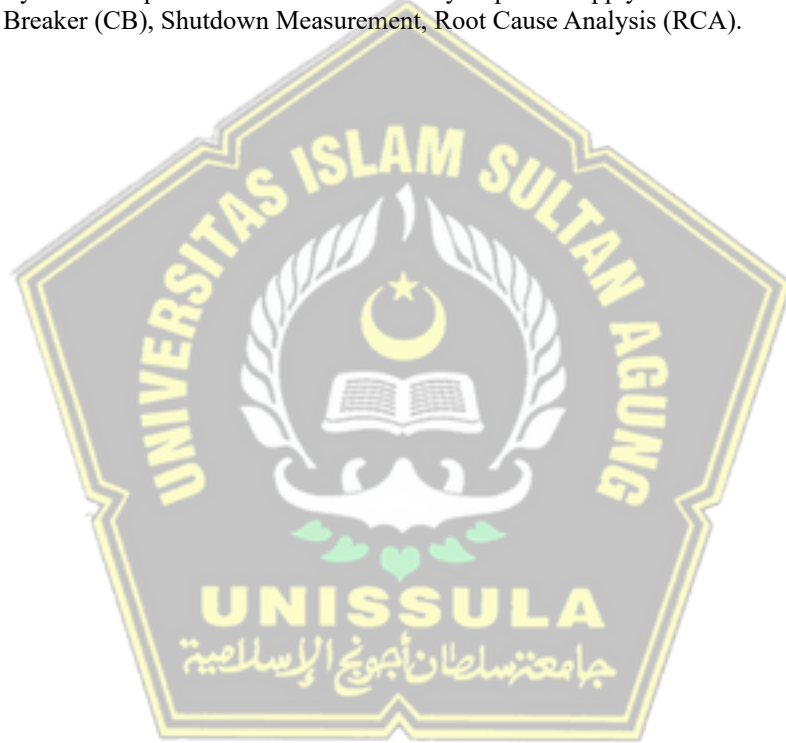
Kata kunci: Pemutus Tenaga (PMT), *Shutdown Measurement*, *Root Cause Analysis* (RCA).



ABSTRACT

Circuit Breaker (PMT) is the main equipment in the substation system that functions as an electric current breaker under normal or abnormal conditions. The reliability of PMT is influenced by the condition of the internal contacts. This research is motivated by the abnormal condition of contact resistance value in the R phase of PMT Bay Kopel GI 150 kV New Porong, which reached 621.5 $\mu\Omega$. This value exceeded the maximum limit of 50 $\mu\Omega$ according to the IEC 60694 standard. This research aims to identify the cause of rising contact resistance value, evaluate the technical parameters of PMT based on shutdown measurement testing, and determine the operational feasibility of the equipment. Shutdown measurement testing items include testing contact resistance, insulation resistance, grounding resistance, contact simultaneity, and SF₆ gas quality analysis. The Root Cause Analysis (RCA) method is used to systematically analyze the root cause of the problem, by using a fishbone diagram. The results of the research indicate that the high contact resistance is caused by several factors, including technical errors in adjusting operating rod without reference to the manufacturer's manual, contact degradation due to the equipment's operating mechanism. The increase in contact resistance resulted in a deterioration of the SF₆ gas quality, indicated by an SO₂ content of 14 ppmv (exceeding the CIGRE standard limit of <12 ppmv). Other test parameters, such as insulation resistance, grounding resistance, and breaker test, still met standards. Based on the overall evaluation, the condition of the PMT was declared technically very poor and was categorized as P0, referring to Kepdir No. 149.K/DIR/2013. Therefore, it was recommended that the equipment be immediately replaced to prevent system disruption and maintain continuity of power supply.

Keywords: Circuit Breaker (CB), Shutdown Measurement, Root Cause Analysis (RCA).



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem kelistrikan terbagi menjadi beberapa segmen diantaranya, pembangkit listrik, transmisi, distribusi serta pelanggan. Energi listrik yang dihasilkan di pusat pembangkit disalurkan melalui subsistem transmisi, dimana gardu induk berperan sebagai titik krusial sebelum energi tersebut didistribusikan kepada pelanggan. Gardu induk adalah gabungan dari berbagai instalasi listrik yang berguna untuk mentransformasikan tenaga listrik dan sebagai penghubung jaringan transmisi satu dengan yang lain. Instalasi pada gardu induk meliputi berbagai peralatan diantaranya adalah peralatan Pemutus Tenaga (PMT) yaitu suatu saklar yang mampu mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. Jika PMT tidak bekerja saat terjadi gangguan, maka arus gangguan tersebut akan merusak peralatan yang lain serta dapat menimbulkan ketidakstabilan sistem tenaga listrik [1]. Setiap peralatan yang terdapat di gardu induk memiliki peranan penting, sehingga untuk menjaga keandalan tiap peralatan, dilakukan pemeliharaan rutin berupa *Shutdown Measurement*, atau pengujian dalam keadaan tidak bertegangan. Item pengujian pada peralatan Pemutus Tenaga (PMT) mencakup pengujian resistansi isolasi, resistansi kontak, resistansi pentanahan, keserempakan kontak serta kualitas gas SF₆ (kondisional) [1]. Rangkaian pengujian tersebut dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan dan keandalan Pemutus Tenaga (PMT).

Permasalahan yang muncul pada Pemutus Tenaga (PMT) GI 150kV New Porong saat *Shutdown Measurement* yang dilaksanakan pada tanggal 20 Juli 2023, adalah ditemukan nilai tahanan kontak PMT yang tinggi sebesar 621,5 $\mu\Omega$ pada PMT fasa R di Bay Kopel. Standar yang menjadi acuan nilai tahanan kontak PMT adalah $< 50 \mu\Omega$ Standar IEC 60694.

Tingginya hasil pengujian tahanan kontak pada PMT antara lain dapat disebabkan oleh kerusakan mekanis pada kontak PMT, frekuensi operasi PMT yang tinggi, arus pemutusan yang melampaui rating kemampuan PMT, kesalahan instalasi, serta kualitas material kontak PMT.

Dampak tahanan kontak yang tinggi pada rangkaian PMT pada saat I arus mengalir pada kondisi sistem operasi normal (*steady state*) akan menyebabkan kerugian teknis berupa P rugi-rugi daya (watt), dengan t waktu sehingga akan menimbulkan W energi (joule), energi ini berupa panas (*hotspot*). Panas tersebut akan semakin meningkat lagi ketika PMT memutus rangkaian (*open*) pada saat I arus semakin tinggi atau kondisi hubung

singkat. Panas yang tidak normal ini dengan berjalan waktu dan bertambah banyak jumlah operasi open dan close PMT akan menyebabkan reaksi kimia pada isolasi gas SF₆ berupa munculnya kandungan dekomposisi produk salah satunya SO₂ [2].

Dekomposisi produk ini bersifat korosif yang berpotensi merusak material pada peralatan sehingga akan mempengaruhi umur peralatan seperti kondisi kontak atau material logam di dalam chamber PMT [2]. Jika hal ini tidak ditindak lanjuti segera mungkin maka potensi gangguan lain yang jauh lebih besar akan muncul, seperti potensi PMT meledak, yang berakibat kebakaran dan terputusnya aliran listrik sehingga keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan terganggu

Solusi dari permasalahan yang timbul pada hasil uji *shutdown measurement* yaitu melakukan evaluasi nilai hasil pengujian pada PMT terhadap standar yang berlaku, serta dengan melakukan analisis akar penyebab permasalahan menggunakan Root Cause Analysis (RCA). Evaluasi nilai hasil pengujian dan analisa penyebab permasalahan PMT dipakai sebagai acuan evaluasi dalam menentukan rekomendasi terhadap kondisi pada PMT.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Bagaimana mengidentifikasi penyebab tingginya nilai tahanan kontak dari hasil uji Shutdown Measurement, menggunakan *Root Cause Analysis* (RCA).
- Mengetahui hasil uji *Shutdown Measurement* pada Pemutus Tenaga (PMT) di Bay Kopel Gardu Induk 150kV New Porong, terhadap standar masing masing pengujian.
- Bagaimana kelayakan kinerja PMT Bay Kopel Gardu Induk 150kV New Porong setelah dilakukan pengujian *shutdown measurement*.

1.3 Pembatasan Masalah

Penelitian ini, telah ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

- Penelitian pada tugas akhir ini berlokasi di GI 150kV New Porong yang beralamat pada Jl. By Pass Gempol, Legok, Gempol, Pasuruan, Jawa Timur.
- Penelitian ini hanya fokus membahas analisa kondisi peralatan Pemutus Tenaga (PMT) Bay Kopel di GI 150kV New Porong berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, dan tahanan pentanahan dan kualitas gas SF₆ terhadap standar yang ditetapkan pada masing-masing item pengujian

- c. Menggunakan RCA untuk mengidentifikasi penyebab utama tingginya nilai tahanan kontak pada PMT. Hal ini akan membantu untuk memfokuskan upaya perbaikan pada akar masalah, seperti kerusakan mekanis atau kualitas material yang buruk.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

- a. Memperoleh data hasil uji *Shutdown Measurement* pada PMT Bay Kopel di GI 150 kV New Porong
- b. Menganalisa kelayakan PMT berdasarkan hasil uji *Shutdown Measurement* pada PMT Bay Kopel di GI 150 kV New Porong
- c. Mengetahui kelayakan PMT berdasarkan hasil uji *Shutdown Measurement* pada PMT Bay Kopel di GI 150 kV New Porong
- d. Mengetahui penyebab tingginya nilai tahanan kontak pada PMT Bay Kopel di GI 150 kV New Porong

1.5 Manfaat

- a. Untuk membantu dalam mendeteksi secara dini kerusakan pada peralatan Pemutus Tenaga sebelum terjadi gangguan yang lebih besar
- b. Untuk mengetahui rekomendasi tindakan berdasarkan kondisi kelayakan Pemutus Tenaga
- c. Untuk membantu dalam merencanakan langkah preventif yang perlu dilakukan berdasarkan kondisi kelayakan Pemutus Tenaga
- d. Untuk meningkatkan pemahaman mengenai pentingnya kinerja peralatan Pemutus Tenaga dalam mendukung keandalan sistem tenaga listrik

1.6 Sistematika Penulisan

Merupakan gambaran garis besar mengenai pembahasan dari masing masing bab untuk memperjelas pemahaman terkait penelitian yang dilakukan. Sistematika penulisan dalam laporan ini ditulis sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat, serta sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Bab ini memaparkan mengenai jurnal penelitian terdahulu serta dasar teori yang digunakan untuk menunjang pembuatan penelitian ini.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memaparkan mengenai sistem model penelitian serta prosedur penelitian yang digunakan dalam menjawab rumusan masalah penelitian.

BAB IV : HASIL DAN ANALISA

Melakukan analisa terhadap hasil uji shutdown measurement pada PMT 150kv Bay Kopel GI New Porong, kemudian membandingkan masing masing hasil uji dengan standar yang ada.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menyajikan kesimpulan dan saran.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Analisa uji tahanan kontak PMT Bay Kuningan II 70kV di Gardu Induk Sunyaragi. Penelitian tersebut menggunakan metode penelitian berupa pengukuran tahanan kontak PMT. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa hasil pengujian nilai tahanan kontak PMT merk ASEA tahun 2018 pada fasa R,S,T adalah 110.6 $\mu\Omega$, 84.2 $\mu\Omega$, dan 86.9 $\mu\Omega$, dimana nilai pengujian tahanan kontak pada fasa R sudah tidak memenuhi standar pabrikannya yaitu $\leq 50 \mu\Omega$ maupun standar PLN yaitu $\leq 100 \mu\Omega$ sehingga dilakukan pemeliharaan overhaul (pembongkaran) pada PMT tersebut. Setelah dilakukan overhaul nilai tahanannya menurun menjadi 107.2 $\mu\Omega$, namun demikian hasilnya masih diatas standar yang berlaku sehingga dilakukan tindakan penggantian PMT dengan PMT Merk UNINDO. Hasil uji komisioning PMT merk UNINDO didapatkan nilai pengujian tahanan kontak PMT fasa R,S, dan T adalah 34.6 $\mu\Omega$, 36.0 $\mu\Omega$, dan 34.7 $\mu\Omega$, dimana hasil ujinya baik memenuhi standar pabrikan maupun standar dari PLN yaitu $\leq 50 \mu\Omega$ [3].

Evaluasi tahanan kontak PMT di GI 150kV Bandung Selatan berdasarkan Failure Mode Effect Analysis (FMEA). Penelitian dilakukan menggunakan akumulasi data nilai tahanan kontak dari tahun 2015-2019 diseluruh bay di GI 150kV Bandung Selatan, dimana ditemukan adanya peningkatan signifikan nilai tahanan kontak pada tahun 2019, khususnya di Bay IBT 1 sisi 150 kV dan Bay Cigareleng 1. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui penyebab peningkatan tahanan kontak, termasuk dengan menguji tingkat kemurnian gas SF₆ dan frekuensi operasi PMT. Hasilnya menunjukkan bahwa PMT pada Bay Cigareleng 1 berada dalam kondisi buruk, dengan nilai tahanan kontak masing-masing sebesar 88,74 $\mu\Omega$ dan tingkat kemurnian gas SF₆ hanya 96%, di bawah ambang batas yang direkomendasikan sebesar >97%. Selain itu, beberapa peralatan diketahui telah beroperasi melebihi usia kerja yang disarankan, yaitu lebih dari 20 tahun (22 tahun) [4].

Penelitian Analisa Kelayakan Pemutus Tenaga (PMT) 150 kV Berdasarkan Hasil Uji Tahanan Isolasi, Tahanan Kontak Dan Keserempakan Kontak Di Gardu Induk Singkawang. Tugas Akhir ini menganalisa kelayakan Pemutus Tenaga (PMT) 150kV Bay Bengkayang 1 dan Sambas 2 di Gardu Induk Singkawang berdasarkan tiga macam pengujian. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian tahanan isolasi, tahanan kontak, dan keserempakan

kontak. Diketahui standar nilai tahanan isolasi adalah 1 kV/ 1 M Ω (VDE catalogue 228/4). Standar nilai tahanan kontak menurut IEC 60694 adalah $R < 50 \mu\Omega$ dan nilai Δt berdasarkan referensi dari pabrikan ABB yaitu $\Delta t \leq 10$ mili detik. Berdasarkan data hasil pengujian diperoleh nilai tahanan isolasi diatas 150M Ω , nilai tahanan kontak dibawah 50 $\mu\Omega$, serta Δt keserempakan kontak dibawah 10ms. Hasil pengujian kemudian dibandingkan terhadap standar nilai yang ada. Evaluasi dari ke tiga pengujian yang telah dilakukan menyimpulkan bahwa PMT 150kV Bay Bengkayang 1 dan Sambas 2 di Gardu Induk Singkawang masih memenuhi standar kelayakan operasional [5].

Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV. Penelitian tersebut bertujuan untuk mengetahui kelayakan dan optimalitas PMT di Gardu Induk Rungkut 150kV dalam beroperasi. Penelitian ini membahas mengenai empat pengujian meliputi tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak dan tahanan pentanahan. Hasil pengujian tahanan isolasi secara keseluruhan nilainya berbeda tiap titik ukur, namun hasilnya masih sesuai standar yaitu $>150M\Omega$ (Standar SKDIR 0520). Dari hasil pengujian didapatkan nilai tahanan kontak dalam rentang antara 31.6 $\mu\Omega$ - 35.89 $\mu\Omega$, dimana hasil tersebut masih sesuai dengan standar yaitu $\leq 50 \mu\Omega$ (Standar IEC 60694). Hasil pengujian nilai tahanan pentanahan yang didapatkan adalah berkisar diantara 0.04 Ω - 0.11 Ω dimana standarnya adalah sebesar 1 Ω (Standar IEEE std 80 2000). Hasil pengujian keserempakan kontak diperoleh nilai tertinggi pengujian saat *open* sebesar 38.60 ms dan saat *close* sebesar 109,4 ms, dimana standar saat *open-close* adalah <120 ms. Hasil analisa pengujian secara keseluruhan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi PMT masih memenuhi batas standar yang ditetapkan [6].

Analisis Pengujian Pemutus Tenaga (PMT) Bay Punagaya Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Tallasa. Penelitian ini membahas terkait pengujian terhadap Pemutus Tenaga (PMT) pada Bay Punagaya di Gardu Induk Tallasa yang dilakukan selama pemeliharaan rutin dua tahunan. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk menilai apakah PMT masih berfungsi dengan baik dan layak digunakan. Pengujian dilakukan dengan mengevaluasi beberapa item pengujian meliputi, tahanan isolasi, tahanan kontak, keserempakan kontak, dan tahanan pentanahan. Nilai hasil uji berturut-turut yaitu $>150M\Omega$, $<75\mu\Omega$, $<120ms$ (*open* dan *close*), dan $<1\Omega$. Standar nilai tahanan isolasi adalah 1kV / 1M Ω . Standar nilai tahanan kontak pada PMT bay Punagaya yaitu 75 $\mu\Omega$. Standar nilai keserempakan kontak kondisi *open* dan *close* adalah 120ms. Standar nilai pentanahan

adalah $\leq 1\Omega$. Berdasarkan hasil keseluruhan pengujian dalam penelitian tersebut masih sesuai dengan standar yang berlaku [7].

Analisis Penyebab Kerusakan Transformator Menggunakan Metode RCA (Fishbone Diagram and 5-Why Analysis) di PT. PLN (Persero) Kantor Pelayanan Kiandarat. Penelitian ini mengidentifikasi akar penyebab kerusakan Transformator Distribusi dengan menggunakan metode Root Cause Analysis (RCA). Berdasarkan pada penelitian tersebut kerusakan yang terjadi pada transformator diakibatkan oleh faktor internal dan eksternal. Faktor internal tersebut diantaranya beban pelanggan yang melampaui kapasitas trafo, adanya kebocoran minyak isolasi serta ketidakseimbangan beban antar fasa. Sementara penyebab eksternal adalah akibat cuaca ekstrim atau petir. Rekomendasi yang diberikan yaitu melakukan penyeimbangan beban trafo, pemeliharaan secara berkala dan penambahan sistem proteksi [8].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik mencakup integrasi berbagai proses mulai dari terbentuknya sumber energi listrik, penyaluran, hingga pemanfaatan oleh masyarakat di berbagai sektor.

a. Pembangkit Energi Listrik

Pembangkit energi listrik merupakan sistem yang menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber energi. Setiap pembangkit menggunakan macam energi yang berbeda-beda diantaranya energi batu bara, gas, air, angin, matahari, nuklir dan lain lain. Sumber energi yang digunakan pada pembangkit kemudian ditransformasikan menjadi energi listrik melalui generator.

b. Transmisi

Penyaluran energi listrik dari pembangkit disalurkan melalui jaringan transmisi. Energi listrik yang dihasilkan pembangkit umumnya memiliki tegangan rendah. Sebagai efisiensi energi dalam penyaluran jarak jauh, maka level tegangan listrik akan dinaikkan oleh transformator pada gardu induk, sehingga menghasilkan nilai tegangan yang bervariasi meliputi Tegangan Ekstra Tinggi (TET), Tegangan Tinggi (TT), hingga Tegangan Menengah (TM), hal tersebut memiliki tujuan untuk meminimalkan adanya rugi-rugi daya selama penyaluran dari pembangkit ke pusat distribusi.

c. Distribusi

Melalui gardu induk tegangan listrik ditransformasi menjadi level tegangan yang lebih rendah sesuai dengan kebutuhan pelanggan di berbagai sektor, seperti industri, rumah tangga dan lain lain. Listrik yang telah ditransformasi tegangan operasinya akan disalurkan melalui jaringan distribusi. Energi listrik sangat berguna dalam menunjang kehidupan sehari-hari diantaranya untuk penerangan, kegiatan industri, komunikasi, transportasi listrik, dan sebagainya [9].

2.2.2 Gardu Induk

Gardu Induk (GI) terdiri dari rangkaian instalasi listrik yang berperan sebagai titik utama penerimaan listrik dari pembangkit untuk kemudian ditransformasikan level tegangannya dari tingkat tinggi menjadi lebih rendah, hal ini sebagai langkah penting untuk menyamakan tegangan listrik dengan kebutuhan jaringan distribusi lokal. Pengaturan tegangan bertujuan untuk memastikan bahwa listrik yang disalurkan ke berbagai sektor memiliki tingkat tegangan yang sesuai dan aman untuk di gunakan [9]. Sistem penyaluran listrik melalui gardu induk didukung oleh beberapa peralatan utama, di antaranya :

- a. Trafo Daya : Trafo daya berfungsi untuk mengatur aliran daya listrik dengan cara merubah tingkat tegangan baik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah maupun sebaliknya tanpa mengubah besaran frekuensinya [10].
- b. Trafo Arus : Perangkat ini biasa disebut *Current Transformer* (CT), yang memiliki fungsi utama untuk menurunkan nilai arus listrik, untuk digunakan sebagai metering arus dan proteksi di Gardu Induk [11].
- c. Trafo Tegangan : Trafo tegangan atau *Potential Transformer* (PT), berfungsi untuk memperkecil besaran tegangan listrik untuk digunakan sebagai sistem pengukuran dan proteksi di Gardu Induk [12].
- d. Pemutus Tenaga : Pemutus Tenaga (PMT) adalah perangkat *switching* yang berfungsi untuk menyalurkan dan memutus arus listrik baik saat sistem dalam kondisi normal maupun saat terjadi gangguan [1].
- e. Pemisah : Pemisah atau *Disconnecting Switch* (DS) berfungsi untuk memisahkan rangkaian listrik dalam kondisi bertegangan atau tidak bertegangan tanpa adanya arus beban [13].

- f. *Lightning Arrester* : *Lightning Arrester* (LA) berperan untuk memproteksi peralatan lain yang ada di Gardu Induk dari tegangan yang diakibatkan oleh surja hubung saat kondisi gangguan maupun surja petir [14].

2.2.3 Pemutus Tenaga

Pemutus Tenaga (PMT) merupakan perangkat *switching*, yang berfungsi untuk memutus atau mengalirkan arus beban dalam kondisi normal maupun saat kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*). Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu Pemutus Tenaga dalam sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:

- Dapat mengalirkan arus maksimum sistem secara kontinyu.
- Dapat mengalirkan dan memutus arus listrik dalam keadaan berbeban maupun saat terjadi hubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan baik pada keseluruhan sistem maupun pada peralatan pemutus tenaga itu sendiri.
- Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan waktu yang sangat cepat. Sehingga, arus tersebut tidak sampai merusak peralatan lain yang dapat mengakibatkan ketidakstabilan sistem.

PMT dilengkapi dengan berbagai komponen mekanis dan elektrik, salah satunya adalah *coil*. Komponen ini memegang peranan penting dalam mekanisme buka dan tutup kontak PMT. Secara prinsip, *coil* bekerja berdasarkan medan magnet. Ketika tegangan diberikan pada terminal *coil*, maka akan timbul arus listrik. Arus yang mengalir tersebut menghasilkan medan magnet, yang kemudian menggerakkan *rod* (batang penggerak). *Coil* memiliki batasan tegangan minimum agar dapat menggerakkan batang penggerak secara optimal. Jika tegangan yang diberikan berada di bawah nilai minimum tersebut, maka pergerakan *rod* akan melambat atau bahkan tidak bekerja dengan sempurna. *Rod* yang digerakkan *coil* selanjutnya akan menekan *pin spring*, yang kemudian meneruskan mekanisme pengoperasian PMT untuk melakukan perintah *close* (menutup) maupun *open* (membuka) [1]. Rangkaian *coil* pada PMT meliputi rangkaian *tripping* dan *closing coil*.

- Tripping coil (open coil)* : bertugas untuk membuka PMT saat terjadi gangguan seperti beban lebih (*overload*) maupun hubung singkat (*short circuit*), serta saat kondisi normal. Inisiasi *tripping coil* berasal dari fungsi kontrol atau *switch* pada panel kontrol. Pada kondisi gangguan, *tripping coil* mendapatkan inisiasi yang berasal dari sistem proteksi. Dimana sistem tersebut terintegrasi dengan suatu *relay* proteksi yang akan mengirimkan sinyal ke *tripping coil* sehingga proses tersebut menghasilkan medan

magnet yang menggerakkan kait mekanis (*mechanical latch*), sehingga pemutus tenaga terbuka dan arus listrik terputus.

- b. *Closing coil* : *Closing coil* dihubungkan dengan *switch* kontrol yang dioperasikan oleh operator. Ketika saklar tersebut diaktifkan, sinyal dikirim ke *closing coil* sehingga *coil* bekerja. Saat kondisi sudah aman untuk mengalirkan listrik kembali, *closing coil* akan mendapatkan inisiasi tegangan, dimana hal ini menimbulkan medan magnet yang menggerakkan kait mekanis ke arah yang berlawanan, sehingga pemutus tenaga menutup dan arus listrik dapat mengalir kembali. Pada bus penghantar rangkaian *closing coil* PMT terintegrasi pada sistem proteksi *autorecloser*, sehingga saat terjadi kondisi gangguan, PMT dapat secara otomatis *reclose* [1].

2.2.4 Kategori Pemutus Tenaga

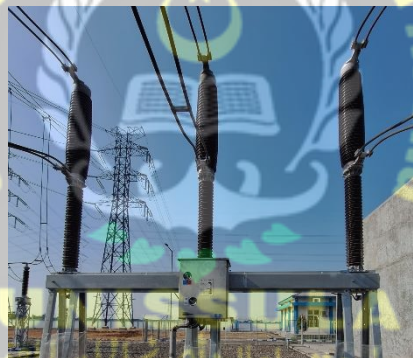
- a. PMT beroperasi menggunakan variasi tegangan yang berbeda, sesuai dengan kebutuhan, berikut ini klasifikasi PMT berdasarkan tegangan operasinya :
 1. PMT tegangan rendah (low voltage) beroperasi dalam rentang tegangan sebesar 0.1-1 kV.
 2. PMT tegangan menengah (medium voltage) bekerja dalam rentang tegangan 1-35 kV.
 3. PMT tegangan tinggi (high voltage) bekerja dalam rentang tegangan 35-245 kV.
 4. PMT tegangan extra tinggi (extra high voltage) bekerja dalam rentang tegangan ≥ 245 kV [1].
- b. Pemutus Tenaga (PMT) ditinjau dari jumlah mekanik penggeraknya :
 1. PMT *Single Pole*
 PMT jenis ini dilengkapi dengan mekanik penggerak pada masing masing *pole* secara terpisah, umumnya PMT ini dipasang pada bus penghantar tujuannya agar PMT dapat memutus dan mengalirkan listrik kembali (*reclose*) satu fasa secara otomatis, saat terjadi gangguan atau biasa disebut SPAR (*Single Pole Auto Reclose*).

Jenis PMT *Single Pole* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 PMT *Single Pole*

2. PMT *Three Pole* Jenis PMT ini hanya dilengkapi satu mekanik penggerak untuk ketiga fasanya sekaligus, dan dilengkapi dengan kopel mekanik untuk penghubung antar fasa. PMT ini biasanya dipasang pada bay transformator dan bay kopel [1]. Jenis PMT *Three Pole* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 PMT *Three Pole*

2.2.5 Komponen pada PMT beserta fungsinya

Komponen utama penyusun PMT antara lain sebagai berikut :

a. *Primary PMT*

Komponen ini memiliki sifat konduktif, dan berperan dalam menghantarkan arus listrik, serta mampu memutus arus beban saat kondisi normal maupun saat terjadi gangguan. Bagian ini mencakup *interrupter* yaitu tempat terjadinya proses membuka dan menutup PMT, serta terminal utama sebagai titik sambung antara PMT dan konduktor yang menghubungkan dengan peralatan lain.

b. *Dielectric PMT*

Komponen ini selain berfungsi sebagai isolasi, juga berfungsi dalam pemadaman busur api yang muncul ketika mekanisme kontak PMT bekerja. Adapun media yang digunakan sebagai pemadam busur api pada PMT antara lain :

1. Gas SF₆ (*Sulfur Heksafluorida*)

Dibandingkan udara, gas SF₆ menunjukkan kemampuan isolasi listrik yang lebih tinggi. Selain sebagai media isolasi yang baik, gas SF₆ juga berfungsi dalam pendinginan di bidang kelistrikan. PMT dengan kategori ini biasanya merupakan tipe tekanan tunggal (*single pressure type*). Selama mekanisme operasi membuka atau menutup PMT berlangsung, gas SF₆ akan ditekan kedalam suatu tabung yang melekat pada *moving contact*. Selama proses pemutusan arus berlangsung, pada bagian *nozzle* akan menekan gas SF₆ keluar, pada saat tersebut gas SF₆ akan menyerap panas dari busur api yang timbul, sehingga busur api dapat dipadamkan.

2. Minyak

Kategori PMT ini digunakan mulai dari tegangan menengah 6 kV sampai tegangan ekstra tinggi 425 kV dengan arus nominal (I) yang berkisar antara 400 A sampai dengan 1250 A. Berdasarkan volume minyak yang digunakan sebagai media isolasi dan pemadam busur api, PMT dibedakan menjadi tipe banyak minyak (*bulk oil*) dan tipe sedikit minyak (*small oil*).

3. Udara Hembus (*Air Blast*)

Media pemadam busur api yang digunakan pada PMT kategori ini adalah menggunakan udara bertekanan tinggi, dimana udara akan dihembuskan kedalam ruang pemutus.

4. Hampa Udara (*Vacuum*)

Umumnya PMT ini digunakan pada tegangan menengah (24kV), PMT ini memanfaatkan ruang hampa sebagai pemadam busur api yang memiliki kemampuan dielektrik yang tinggi. PMT ini dilengkapi dengan komponen *Breaking chamber* atau ruang kontak utama yang terbuat dari bahan porselen, kaca atau plat baja yang memiliki sifat kedap udara.

c. *Driving Mechanism*

Bagian ini berperan dalam sistem penggerak pada PMT, jenis penggerak pada PMT dibagi menjadi 3 diantaranya :

1. Penggerak *Spring* : penggerak ini menggunakan sistem pegas

2. Penggerak Hidrolik : penggerak ini terdiri dari rangkaian mekanik, elektrik dan hidrolik yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk proses switching PMT.
3. Penggerak *Pneumatic* : penggerak ini terdiri dari gabungan rangkaian mekanik, elektrik dan udara bertekanan yang dirangkai sedemikian rupa sehingga dapat berfungsi sebagai penggerak untuk proses switching PMT.

d. *Secondary PMT*

Subsistem ini memiliki fungsi sebagai pengirim sinyal *trigger* untuk menginisiasi operasi pada subsistem mekanik, bagian dari subsistem ini diantaranya :

- Lemari mekanik atau kontrol : bagian ini digunakan untuk melindungi peralatan yang bertegangan rendah serta sebagai ruang penempatan untuk peralatan sekunder.
- Terminal dan *wiring* kontrol : pada bagian ini berfungsi sebagai pemberi sinyal *trigger* yang digunakan untuk menginisiasi mekanik penggerak PMT selama operasional PMT berlangsung [1] .

2.2.6 Pemeliharaan pada PMT

Pemeliharaan pada PMT mengacu pada fungsi dan kondisi peralatan dalam keadaan bertegangan maupun tidak diklasifikasikan sebagai berikut :

a. *In Service Inspection*

Jenis pemeliharaan ini meliputi pemeriksaan terhadap peralatan yang dilaksanakan dalam keadaan bertegangan (*online*) menggunakan lima panca indera dan alat bantu *metering* sederhana, proses pelaksanaannya dilakukan pada periode tertentu seperti harian, mingguan, bulanan, serta tahunan. Pemeriksaan yang dilakukan diantaranya seperti : pemeriksaan tekanan hidrolik, udara, atau SF₆ pada PMT; pemeriksaan suplai AC/DC pada lemari mekanik; pemeriksaan counter PMT, dll.

b. *In Service Measurement*

In Service Measurement yaitu pengukuran menggunakan alat ukur yang dilakukan pada periode tertentu dilaksanakan dalam keadaan peralatan bertegangan (*online*).

c. *Shutdown Measurement*

Pemeliharaan ini rutin dilakukan setiap periode 2 tahunan dalam kondisi peralatan tidak bertegangan, pada pemeliharaan tersebut dilakukan beberapa pengujian oleh petugas pemeliharaan yang ditujukan untuk mengetahui kondisi pada peralatan. Pengujian yang dilakukan meliputi :

1. Pengujian tahanan kontak PMT
2. Pengujian tahanan isolasi terminal
3. Pengujian tahanan pentanahan PMT
4. Pengujian waktu buka dan tutup PMT
5. Pengujian Keserempakan Kontak Buka fasa R,S,T
6. Pengujian Keserempakan Kontak Tutup fasa R,S,T
7. Pengujian kualitas gas SF₆ (*Conditional*)

Rangkaian Pemeliharaan *Shutdown Measurement* :

1. Persiapan pengujian meliputi pembebasan tegangan pada peralatan, mempersiapkan alat uji, dan melakukan membersihkan peralatan (permukaan isolator, box peralatan, terminal peralatan dll)
2. Melakukan pengujian sesuai dengan prosedur masing-masing pengujian
3. Pencatatan hasil pengujian
4. Evaluasi hasil uji dengan standar yang berlaku
5. Rekomendasi terhadap hasil uji, apabila hasil uji menunjukkan nilai yang tidak sesuai standar, maka lakukan pemeliharaan dan evaluasi ulang.
6. Penormalan sistem atau pemberian tegangan saat seluruh rangkaian pemeliharaan dan pengujian telah selesai dilakukan.

d. Conditional

Pemeliharaan ini dilaksanakan *secara conditional* seperti pasca terjadi gangguan, pemindahan peralatan yang diakibatkan oleh bencana alam, atau akibat anomali sistem setelah dilakukan pemeliharaan.

e. Overhaul

Merupakan pemeliharaan yang dilakukan minimal sekali setiap tiga tahun atau lebih berdasarkan *manual instruction* ketentuan pabrik atau ketentuan unit setempat [1].

2.2.7 Pengujian Tahanan Kontak PMT

Sebagian besar rangkaian tenaga listrik terdiri dari banyak yang menjadi tempat pertemuan fisik antar konduktor. Titik pertemuan tersebut menyebabkan suatu resistansi terhadap arus yang menyebabkan peningkatan suhu serta menimbulkan rugi-rugi daya. Nilai tahanan yang tinggi akan signifikan mempengaruhi rugi daya yang dihasilkan. Sambungan antar konduktor salah satunya terdapat pada kontak PMT sehingga dilakukan pengukuran tahanan kontak pada PMT untuk mengetahui nilai tahanan pada kontak tersebut. Nilai

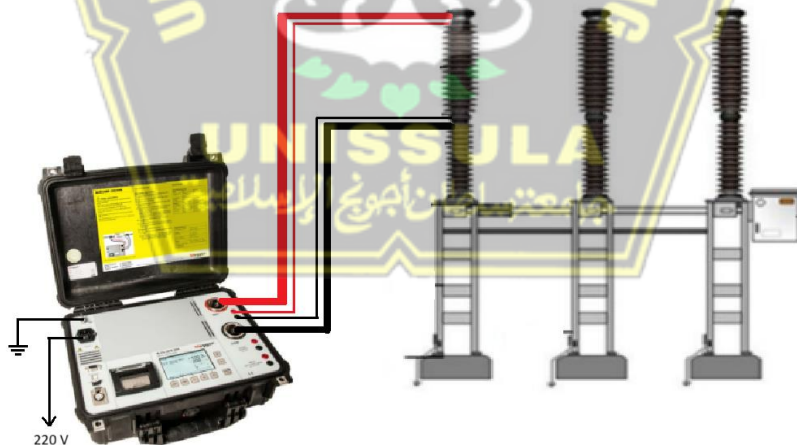
tahanan kontak pada PMT sesuai dengan kaidah Hukum Ohm, dimana penentuan nilai tegangan (V) maka digunakan persamaan (2.1)

$$V = I \times R \quad (2.1)$$

Jika V adalah tegangan (volt), dan I adalah arus (ampere), maka R adalah tahanan (Ω). Nilai tahanan akan mempengaruhi besarnya rugi daya yang dihasilkan pada suatu rangkaian listrik, dimana nilai rugi daya (P) dapat dihitung menggunakan persamaan (2.2)

$$P = I^2 \times R \quad (2.2)$$

Pengukuran tahanan kontak pada PMT menggunakan alat ukur mikro ohm meter. Prinsip kerja alat tersebut menggunakan kaidah hukum ohm, dimana alat ini terdiri dari kabel arus dan kabel tegangan. Alat tersebut akan menginjeksi arus (I) dengan pilihan rating yang bermacam macam, dimana rating arus harus disesuaikan dengan batasan PMT. Pengujian dilakukan saat kondisi PMT close, ketika kontak PMT yang mempunyai suatu tahanan diinject dengan arus maka, akan diperoleh nilai tegangan pada kontak tersebut yang kemudian ditransformasikan oleh alat menjadi nilai tahanan dengan satuan mikro ohm ($\mu\Omega$). Standar yang menjadi acuan nilai tahanan kontak yaitu $< 50 \mu\Omega$ (Standar IEC 60694) [1]. Rangkaian pengujian tahanan kontak pada PMT ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Pengujian Tahanan Kontak PMT

Rangkaian pengujian dilakukan dengan langkah - langkah berikut :

1. Memastikan peralatan PMT telah terbebas dari tegangan, menggunakan *volt detector*
2. Memasang *grounding* lokal disisi terminal PMT untuk membuang tegangan sisa

3. Sebelum melakukan pengukuran dilakukan pembersihan pada permukaan klem dengan menggunakan kertas pasir.
4. Penempatan rangkaian *probe* arus dan tegangan pada alat ukur dijepitkan pada terminal utama PMT, seperti pada Gambar 2.3.
5. Lakukan injeksi arus, dan catat hasil ukur tahanan kontak
6. Melepas *grounding* lokal [1].

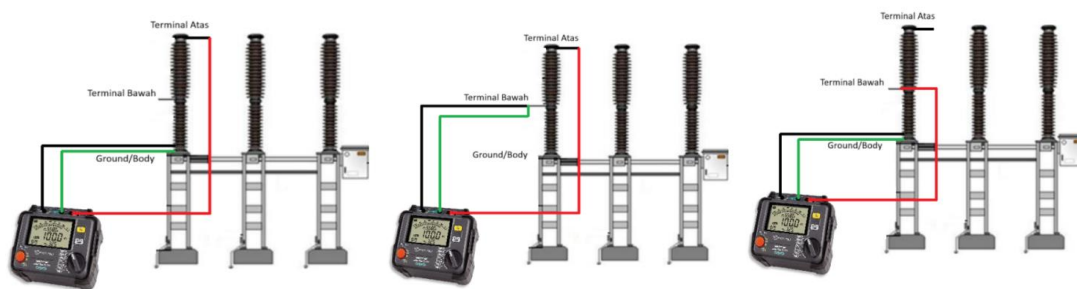
2.2.8 Pengujian Tahanan Isolasi PMT

Pengujian tahanan isolasi bertujuan untuk mengetahui besaran nilai arus bocor (*leakage current*) yang terjadi antara bagian yang bertegangan yaitu terminal atas dan terminal bawah dengan bagian yang tidak bertegangan yaitu *ground/body* [5]. Isolasi merupakan media yang berfungsi sebagai pemisah antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Adanya potensi kegagalan isolasi pada peralatan listrik mungkin terjadi, hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor seperti berkurangnya kekuatan dielektrik material isolasi, adanya partikel padat pada permukaan material isolasi yang terbentuk oleh proses pemanasan (*thermal stress*) serta faktor lingkungan seperti polutan, suhu dan kelembapan. Kegagalan isolasi mengakibatkan arus bocor, sehingga arus mengalir pada bagian yang tidak semestinya [1].

Pengujian dilakukan menggunakan alat *insulation tester*. Acuan standar tahanan isolasi PMT sesuai dengan VDE (*catalogue* 228/4) yaitu minimal $1\text{M}\Omega/\text{kV}$, serta kebocoran arus yang diijinkan setiap 1 kV adalah 1mA [5]. Sesuai dengan kaidah hukum ohm pada persamaan 2.1 diatas maka, Perhitungan arus I bocor dapat diperoleh dengan membagi tegangan V dengan nilai R, sesuai dengan persamaan (2.3).

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.3)$$

Pengujian tahanan isolasi dilakukan pada tiga titik pengukuran, yaitu antara terminal atas dengan *ground/body*, antara terminal atas dengan terminal bawah serta antara terminal bawah dengan *ground/body* secara berurutan ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 Pengujian Tahanan Isolasi PMT

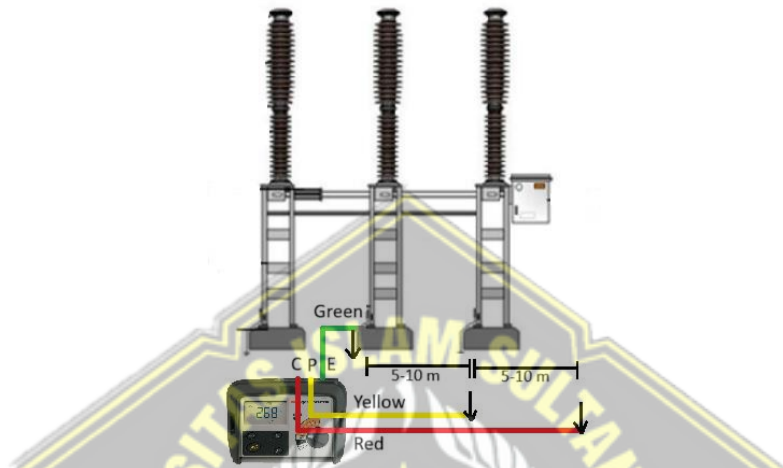
Saat pengujian tahanan isolasi perlu mempersiapkan beberapa hal antara lain :

1. Memastikan peralatan PMT sudah terbebas dari tegangan dengan menggunakan *volt detector*
2. Memasang *grounding* lokal disisi terminal PMT untuk membuang tegangan sisa
3. Melakukan pembersihan terhadap permukaan obyek yang akan diuji seperti *bushing isolator*, terminal PMT serta kabel *grounding* agar saat dilakukan pengujian mendapatkan nilai yang akurat.
4. Merangkai kabel alat uji sesuai dengan titik ukur yang sudah ditentukan dan melakukan pengukuran tahanan isolasi
5. Mencatat hasil ukur tahanan isolasi
6. Memasang kembali terminal atas dan bawah seperti semula
7. Melepas *grounding* lokal [1].

2.2.9 Pengujian Tahanan Pentanahan PMT

Nilai tahanan pentanahan dipengaruhi oleh kondisi tanah, pada tanah dengan kandungan air yang sedikit atau kering seperti, tanah cadas, dan kapur, cenderung memiliki nilai tahanan yang tinggi, dibandingkan dengan kondisi tanah yang basah [1]. Sistem pentanahan bertujuan untuk melindungi keselamatan manusia dari bahaya tegangan sentuh, tegangan langkah dan sengatan listrik serta mencegah kerusakan peralatan akibat surja petir maupun kondisi abnormal lainnya dengan cara menyalurkan arus listrik ke tanah (*ground*). Semakin kecil nilai tahanan pentanahannya maka semakin baik, artinya sistem pentanahan mampu mengalirkan arus listrik ke tanah secara efektif karena nilai hambatannya kecil [6]. Nilai yang menjadi acuan standar pentanahan pada PMT adalah $<1 \Omega$ (Standar IEEE std 80 : 2000) [1].

Pengujian tahanan pentanahan dilakukan dengan cara merangkai kabel pada alat uji *earth tester* seperti pada **gambar 2.7**. Alat uji *earth tester* dihubungkan pada tiga titik yaitu kabel warna hijau (P) dihubungkan pada kawat grounding PMT, sementara kabel warna merah (C) dan kuning (E) masing-masing dihubungkan pada batang besi yang ditanam sejajar. Ketiga kabel dirangkai berjarak 5-10 m [7] dimana rangkaian pengujian tahanan pentanahan sesuai yang dengan Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Pengujian Tahanan Pentanahan PMT

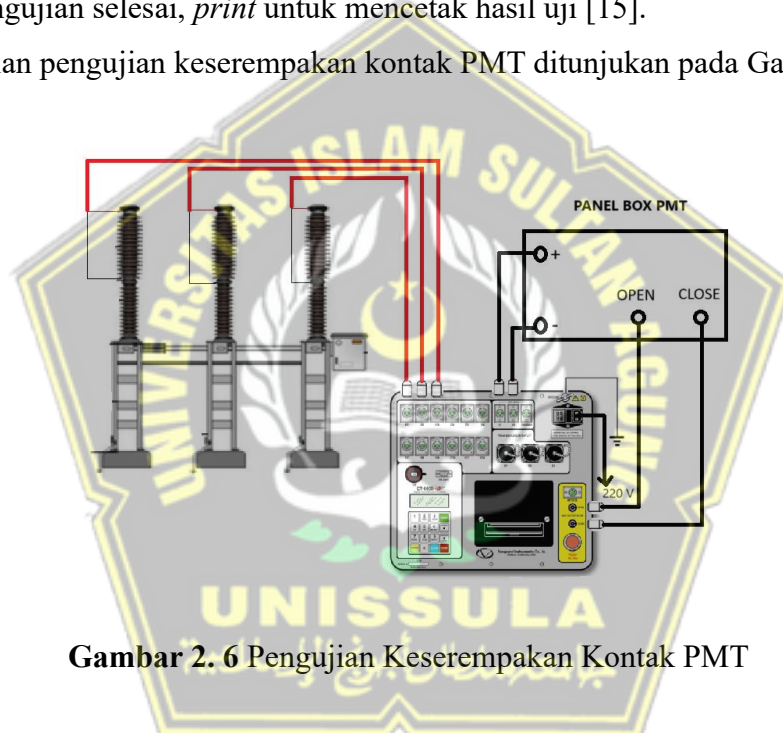
2.2.10 Pengujian Keserempakan Kontak

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui durasi kerja PMT secara individu, selain itu juga digunakan untuk mengetahui keserempakan kontak PMT saat menutup (*close*) atau membuka (*open*). Apabila ketiga fasa R, S dan T pada PMT tidak membuka (*open*) atau menutup (*close*) secara serempak, maka akan menimbulkan gangguan di dalam sistem tenaga listrik. PMT dengan jenis penggerak satu fasa (*single pole*) biasanya terdapat pada bay penghantar, hal ini bertujuan agar saat terjadinya gangguan satu fasa ke tanah PMT dapat *reclose*, atau biasa disebut dengan *Single Pole Auto Reclose* (SPAR). Ketika gangguan terjadi pada penghantar antar fasa atau ketiga fasa, maka PMT tersebut harus dapat memutuskan aliran arus listrik serempak tiga fasa sekaligus. Keserempakan membuka dan menutup pada PMT juga diterapkan untuk PMT dengan jenis penggerak tiga fasa (*three pole*). Pengujian keserempakan kontak PMT dilakukan menggunakan alat *breaker analyzer* dengan mempersiapkan beberapa hal seperti berikut :

1. Memastikan peralatan telah bebas dari tegangan menggunakan *volt detector*
2. Memasang *grounding* lokal pada PMT mengalirkan tegangan sisa ke tanah
3. Memasang *grounding* pada alat uji untuk menjaga keamanan alat uji dari kerusakan.

4. Menghubungkan tiga *contact input* pada alat uji ke masing masing fasa pada terminal atas dan bawah PMT menggunakan kabel penghubung.
5. Selanjutnya menghubungkan kontak *initiate* pada alat uji dengan terminal *tripping coil*, dan *closing coil*
6. Menghubungkan kontak positif/negatif alat ukur ke terminal positif dan negatif pada *box* kontrol PMT, serta menghidupkan alat dengan menghubungkan ke sumber tegangan AC.
7. Memilih metode pengujian *open* atau *close*, sesuai dengan yang dibutuhkan
8. Menekan dan menahan tombol *push to arm* dilanjutkan menekan tombol *start* hingga PMT bekerja.
9. Saat pengujian selesai, *print* untuk mencetak hasil uji [15].

Rangkaian pengujian keserempakan kontak PMT ditunjukan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Pengujian Keserempakan Kontak PMT

Standar acuan PMT Open adalah <50 ms sementara PMT close adalah <120 ms berdasarkan Standar IEC 62271 [1]. Keserempakan kontak PMT pada fasa R, S dan T dilihat dari nilai delta time (Δt) yaitu selisih waktu tertinggi dan terendah antar fasa ketika kontak PMT membuka dan menutup, perhitungan nilai delta time ditunjukkan pada persamaan (2.4) berikut :

$$\Delta t = t \text{ tertinggi} - t \text{ terendah} \quad (2.4)$$

Semakin kecil selisih waktunya maka semakin baik keserempakan kontak PMT dalam beroperasi. Batas nilai delta time (Δt) yaitu ≤ 10 ms [5].

2.2.11 Pengujian Gas SF₆ PMT

Gas SF₆ pada PMT berfungsi sebagai media pemadam busur api listrik. Selain itu gas SF₆ juga digunakan sebagai media isolasi antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan pada PMT. Saat terjadi pemutusan atau penghubungan arus listrik, maka akan terjadi gesekan antara kontak kontak yang akan lepas atau berhubungan. Akibat adanya beda potensial antara kontak tersebut maka akan membuat udara di sekitar kontak terionisasi dan menjadi konduktif sehingga dapat mengalirkan arus listrik dan menyebabkan terbentuknya busur api. Saat proses membuka atau menutup pada PMT, gas SF₆ akan ditekan kedalam suatu tabung yang menempel pada kontak bergerak (*moving contact*), dan kemudian akan ditiupkan melalui *nozzle* untuk memadamkan busur api, gas SF₆ akan menyerap panas dari busur api yang timbul. Seiring terjadinya pemutusan busur api, maka gas SF₆ akan mengalami perubahan karakteristik. Berikut ini macam pengujian karakteristik gas SF₆ yang biasa dilakukan :

1. Kemurnian (*Impurity*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan kandungan gas setelah mengalami penguraian sekian kali akibat pemadaman busur api. Standar nilai kemurnian gas SF₆ adalah diatas 97% (Standard CIGRE 234 TF.B3.02.01: 2003)

2. Kelembapan (*Moisture*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan kelembapan air yang terjadi akibat perubahan temperature. Standar nilai *moisture content* yaitu ≤ 3960 ppmv (Standard CIGRE 234 TF.B3.02.01: 2003)

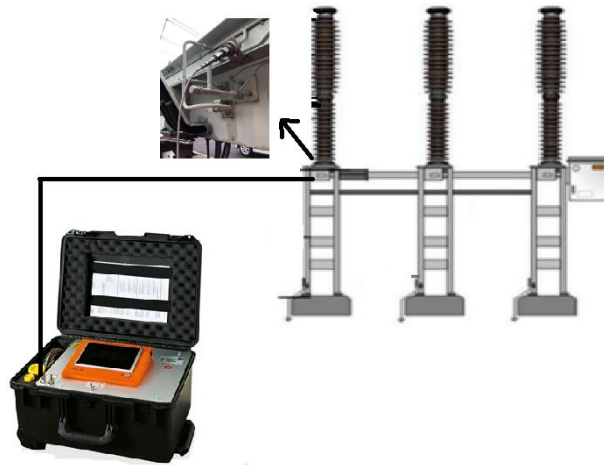
3. Dekomposisi Produk (*Decomposition Product*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui konsentrasi kandungan dekomposisi produk dalam ppm yaitu SO₂ (Sulfur Dioksida) dan HF (Hidrogen Flurida) yang muncul akibat adanya busur api dalam gas SF₆. standar nilai kandungan SO₂ dan HF adalah < 12 ppmv (Standard CIGRE 234 TF.B3.02.01: 2003).

4. Tekanan (*Pressure*)

Pengecekan tekanan gas SF₆ dilakukan agar dapat mengetahui apakah tekanan gas pada PMT tetap berada pada batas tekanan gas SF₆ yang ditetapkan, *block recloser*, *block close* atau *auto trip*. Pengecekan tekanan gas dapat diperiksa menggunakan alat ukur *pressure gauge/density* meter yang terpasang pada box PMT. Standar tekanan gas SF₆ sesuai dengan nameplate yang ada pada masing masing PMT [1].

Rangkaian pengujian kualitas gas SF₆ pada PMT ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Pengujian Gas SF₆ PMT

Proses pengujian gas SF₆ PMT dilakukan menggunakan alat *SF₆ Multi Analyzer* dengan mempersiapkan beberapa hal seperti berikut :

1. Pengujian dapat dilakukan dalam kondisi bertegangan maupun saat tidak bertegangan,
2. Sambungkan *nipple* alat uji ke *valve* tabung kompartemen gas SF₆ , pastikan sudah terhubung dengan baik dan tertutup rapat, sesuai yang ditunjukkan gambar 2.9
3. Hubungkan alat uji pada catu daya, pastikan ground pada alat sudah terpasang (diketanahkan)
4. Nyalakan alat uji dengan menekan tombol ON
5. Lakukan pengisian data (nama Bay) pada alat, kemudian tekan tombol “*measurement*” dan lanjutkan menekan tombol start (hijau)
6. Gas SF₆ yang di uji akan disimpan sementara di penyimpanan internal
7. Tunggu sampai muncul notifikasi “*measured data successfully stored*” yang artinya pengujian telah selesai, simpan hasil pengujian.
8. Setelah proses pengujian selesai maka gas akan dipompa kembali ke kompartemen gas SF₆ pada PMT, tekan tombol “*Pumping back*” dan tunggu hingga proses *pumping back* selesai.

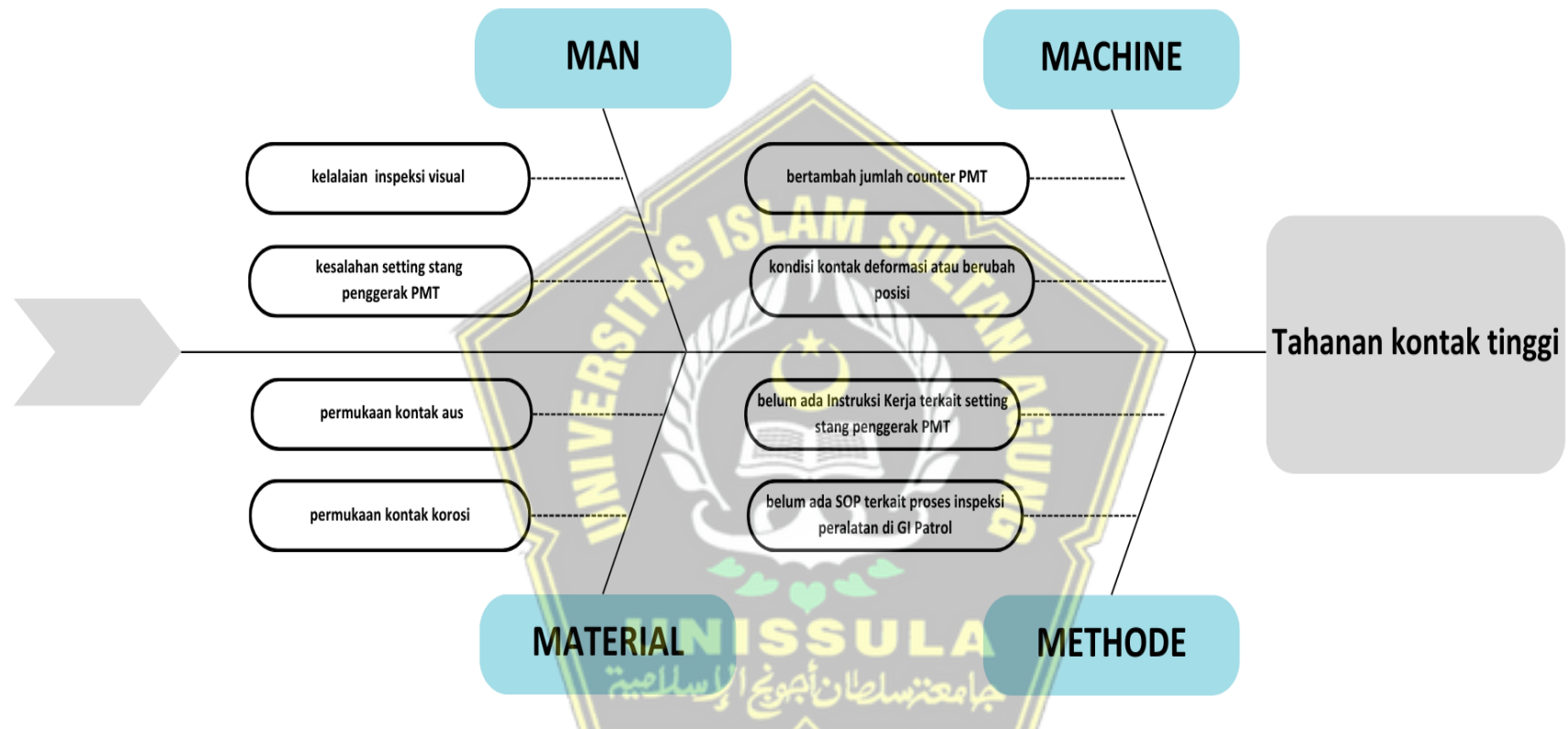
2.2.12 Root Cause Analysis (RCA)

Metode yang digunakan untuk mengetahui penyebab masalah yang muncul pada penelitian ini yaitu metode *Root Cause Analysis* (RCA) yang digunakan untuk penyelesaian permasalahan dan identifikasi faktor penyebab suatu masalah. Langkah-langkah metode RCA sebagai berikut :

- a. Melakukan pengumpulan data meliputi pengujian tahanan kontak PMT, tahanan isolasi PMT, tahanan pentanahan PMT, Keserempakan kontak PMT, dan Kualitas gas SF₆
- b. Melakukan identifikasi temuan masalah dari hasil uji *shutdown measurement* yang telah dibandingkan dengan standar yang berlaku pada masing-masing pengujian, dalam hal ini ditemukan nilai tahanan kontak PMT yang tinggi.
- c. Membuat diagram faktor penyebab nilai tahanan kontak tinggi meliputi empat faktor yaitu *Man, Material, Machine, dan Methode*.
- d. Mencari rekomendasi atau solusi perbaikan dari masalah yang terjadi.

Root Cause Analysis dijelaskan menggunakan *fishbone diagram* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



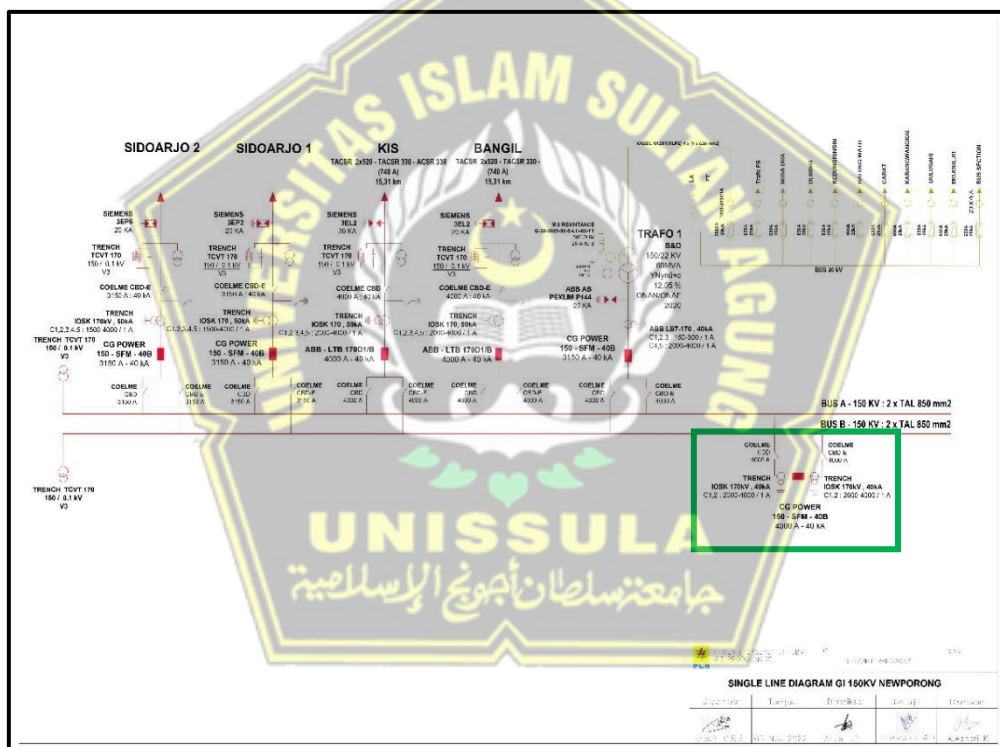


Gambar 2. 8 Fishbone diagram penyebab tahanan kontak tinggi

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

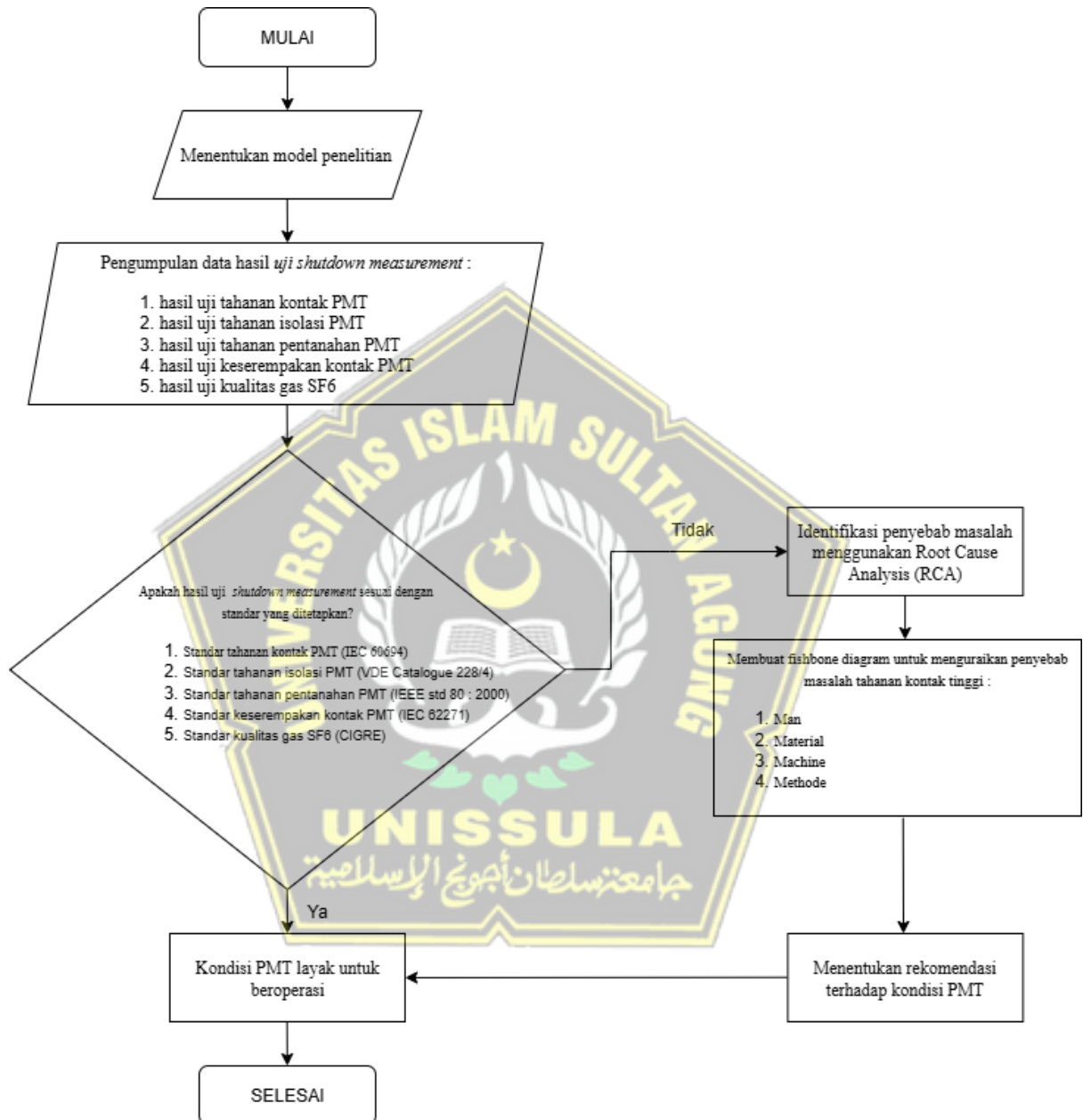
Penelitian ini berlokasi di Gardu Induk 150 kV New Porong yang beralamat di Jl. By Pass Gempol, Legok, Gempol, Pasuruan, Jawa Timur. Peralatan yang dipilih untuk diteliti adalah Pemutus Tenaga (PMT) 150kV pada Bay Kopel. Gardu Induk New Porong memiliki tegangan operasional 150/22kV, yaitu tegangan 150kV pada sisi primer transformator dan tegangan 22kV pada sisi sekunder transformator. Sistem kelistrikan pada GI 150kV New Porong di gambarkan dalam suatu *single line diagram*. *Single Line Diagram* GI 150kV New Porong ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1 *Single Line Diagram* GI 150kV New Porong

3.2 Diagram Alir Penelitian

Tahapan sistematis mengenai penelitian yang dilakukan diilustrasikan melalui flowchart yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

3.3 Langkah Penelitian

Langkah yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Menentukan lokasi penelitian, lokasi pada penelitian ini yaitu di Gardu Induk 150kV New Porong,
- Menentukan model penelitian sebagai gambaran awal objek yang akan diteliti sesuai dengan Gambar 3.1 yaitu gambar *single line diagram*,
- Melakukan studi literatur terkait topik penelitian yang dipilih,
- Melakukan pengumpulan data hasil uji pemeliharaan shutdown measurement meliputi hasil pengujian tahanan kontak PMT, tahanan isolasi PMT, tahanan pentanahan PMT, keserempakan kontak PMT dan kualitas gas SF₆ pada Bay Kopel di GI New Porong serta melakukan identifikasi masalah dari data yang didapatkan
- Melakukan identifikasi penyebab nilai tahanan kontak tinggi menggunakan metode RCA untuk menguraikan akar penyebab masalah dan rekomendasi yang tepat terhadap permasalahan yang ditemukan.

3.4 Data Penelitian

Data Penelitian ini menggunakan data pendukung diantaranya nameplate peralatan PMT, hasil pengujian pada pemeliharaan *shutdown measurement*, serta data Inspeksi visual pada PMT.

3.4.1 Nameplate PMT

Spesifikasi PMT bay Kopel GI 150kV New Porong ditunjukkan pada Tabel 3.1

Tabel 3. 1 Nameplate PMT Bay Kopel GI 150 kV New Porong

Merk	: CG POWER	Serial No	: X309746
Type	: 150 - SFM - 408	Year	: 2017
Rated Voltage	: 170 kV	Rated Lightning Impulse Withstand Voltage	: 750 KVP
Rated Frequency	: 50 Hz	Rated Short Circuit Breaking Current	: 40 kA
Rated Normal Current	: 4000 A	Rated Making Capacity	: 100 kAp

First Pole to Clear Factor	: 1.5	Rated Coil Voltage - Closing	: 110 VDC
Rated SF ₆ Gas Pressure	: 7 Kg/cm ² -g(AT 20°C)	Rated Short Time Current	: 40 kA/ 1 sec
Total Weight	: 220 Kg	Rated Coil Voltage-Tripping	: 110 VDC
Gas Weight	: 11 Kg	Motor Voltage	: 220 VAC

3.4.2 Hasil Uji Pemeliharaan *Shutdownt Measurement*

Data pengujian yang digunakan pada penelitian ini meliputi hasil uji tahanan kontak, tahanan isolasi, tahanan pentanahan, keserempakan kontak, serta kualitas gas SF₆ PMT Bay Kopel di GI 150 kV New Porong. Data hasil uji pemeliharaan *shutdown measurement* ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.



 PT PLN (PERSERO) UNIT INDUK TRANSMISI JAWA BAGIAN TIMUR DAN BALI UNIT PELAKSANA TRANSMISI PROBOLINGGO				HASIL PENGUJIAN / PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI, TAHANAN KONTAK DAN KESEREMPAKAN PMT				No. Dokumen : FC10.TJBTB.05 Edisi / Revisi : 01 / 00 Gardu Induk : GI NEW PORONG Lokasi / Unit kerja : UPT PROBOLINGGO Jenis Pekerjaan : RUTIN No. SPK / Kontrak : 0 Tgl. SPK / Kontrak : Tgl. Pelaksanaan : 20 JULI 2023						
DATA PERALATAN Merk : CG POWER Type : 150-SFM-408 Nomer serie : X309746 Tahun Buat : 2017				Breaking capacity : KA Arus nominal : 4000 Amp Tegangan kerja : 170 kV Media Isolasi/Pemadam : SF - 6 Jenis Mekanik : SPRING				Tekanan Gas / Udara : Bar Temperatur : °C Kelembapan : % Dipasang pada : BAY KOPEL 150 KV						
NO	URAIAN PENGUKURAN	KETERANGAN	ACUAN / STANDARD	DATA SEBELUMNYA			DATA SAAT INI			TINDAKAN	DATA TERAKHIR			KESIMPULAN
				R	S	T	R	S	T		R	S	T	
A. TAHANAN ISOLASI														
1	Terminal Atas - Ground	Tegangan Uji 5kV - 20kV	VDE (Catalogue 228/4) 1kV = 1MΩ	143.000	313.000	323.000	445.000	12.000	354.000					Normal
2	Terminal Bawah - Ground			41.500	262.000	391.000	441.000	698.000	510.000					Normal
3	Terminal Atas -- Terminal Bawah			333.000	695.000	593.000	649.000	152.000	567.000					Normal
	Alat uji tahanan isolasi		Merk	KYORITSU										
			Type	3125A										
			Nomor seri											
B. TAHANAN PENTANAHAN														
1	Koneksi Ground sambungan atas - ground	Pengujian tanpa melepas koneksi grounding	SK DIR 0520 < 1 Ω				-	-	-					-
2	Koneksi Ground sambungan bawah - ground			0,24	0,24	0,25	0,2	0,3	0,2					Normal
	Alat ukur tahanan pentanahan		Merk	MEGGER										
			Type	DET4T2										
			Nomor seri											
C. KEMURNIAN SF-6														
	STANDARD CIGRE			R	S	T	R	S	T	TINDAKAN	R	S	T	KESIMPULAN
1	Dew Point	< -5°C			-51,1			-39,2						Normal
2	Moisture Content	< 3960 ppmv			36,57			139						Normal
3	Purity	> 97% ; > 99,7% untuk gas SF6 baru			97,49			99,9						Normal
4	SO2 + SOF2	< 12 ppmv			0			14						terdapat kandungan SO2 melebihi standar
5	Presure	Sesuai Nameplate (bar abs)												
	Alat Uji Gas SF6		Merk	DILLO										
			Type	3-038R-R303										
			Nomor seri	2000018612										

Gambar 3. 3 Hasil Uji Shutdown Measurement

 PT PLN (PERSERO) UNIT INDUK TRANSMISI JAWA BAGIAN TIMUR DAN BALI UNIT PELAKSANA TRANSMISI PROBOLINGGO			HASIL PENGUJIAN / PENGUKURAN TAHANAN ISOLASI, TAHANAN KONTAK DAN KESEREMPAKAN PMT			No. Dokumen : FC10.UJTB.05 Edisi / Revisi : 01 / 00 Gardu Induk : GI NEW PORONG Lokasi / Unit kerja : UPT PROBOLINGGO Jenis Pekerjaan : RUTIN No. SPK / Kontrak : 0 Tgl. SPK / Kontrak : Tgl. Pelaksanaan : 20 JULI 2023							
DATA PERALATAN Merk : CG POWER Type : 150-SFM-408 Nomer serie : X309746 Tahun Built : 2017			Breaking capacity : KA Arus nominal : 4000 Amp Tegangan kerja : 170 kV Media Isolasi/Pemadam : SF - 6 Jenis Mekanik : SPRING			Tekanan Gas / Udara : Bar Temperatur : °C Kelembapan : % Dipasang pada : BAY KOPEL 150 KV							
D. TAHANAN KONTAK	KETERANGAN	ACUAN / STANDART	DATA SEBELUMNYA			DATA SAAT INI			TINDAKAN	DATA TERAKHIR			KESIMPULAN
1	Kontak utama (Terminal Atas - Terminal Bawah)	ARUS UJI > 100 AMP-DC	R	S	T	R	S	T		R	S	T	Fasa R tahanan Kontak Tinggi
2	Konduktor atas - Terminal atas (Klem)		50,74	47,69	44,07	621,5	34,14	26,51					
3	Konduktor bawah - Terminal bawah (Klem)		< 50 µs										
Alat ukur tahanan Kontak			Merk			MEGGER							
			Type			MJOLNER 200							
			Nomor seri										
E. TEKANAN GAS/UDARA	KETERANGAN	ACUAN / STANDARD	DATA SEBELUMNYA			DATA SAAT INI			TINDAKAN	DATA TERAKHIR			KESIMPULAN
1	Tekanan Gas SF6	Sesuai Nameplate	R	S	T	R	S	T		R	S	T	Normal
2	Tekanan Udara		7,10			7,60							
F. WAKTU BUKA/TUTUP & KESEREMPAKAN KONTAK	KETERANGAN	ACUAN / STANDARD	DATA SEBELUMNYA			DATA SAAT INI			TINDAKAN	DATA TERAKHIR			KESIMPULAN
1	Open (.....ms)	<50 ms (IEC 62271)	R-S	S-T	T-R	R-S	S-T	T-R		R-S	S-T	T-R	Normal
2	Close (.....ms)	<120 ms (IEC 62271)	102,30	104,30	103,00	102,25	104,15	102,75					Normal
Deviasi (.....ms)													
3	Open (.....ms)	< Standar pabrikan atau < 10 ms (Kepdir 0520)	1,95	1,45	0,50	1,90	1,60	0,30					Normal
4	Close (.....ms)		2,00	1,30	0,70	1,90	1,40	0,50					Normal
Alat Uji Keserempakan Kontak			Merk			VANGUARD							
			Type			CT 6500							
			Nomor seri										
CATATAN : Nilai tahanan kontak PMT Fasa R tinggi, sudah dilaksanakan adjust jarak kontak tapi tidak menemukan hasil yang bagus sehingga PMT kopel tidak dioperasikan dan direncanakan penggantian dengan spek yang sama									PENGAWAS PEKERJAAN  Robert Sitanggang		PELAKSANA PEKERJAAN 1. Junaedi P 2. Safar		

Gambar 3. 4 Hasil Uji Shutdown Measurement

BAB IV HASIL DAN ANALISA

4.1 Hasil Uji Tahanan Kontak PMT

Hasil uji tahanan kontak pada PMT tahun 2022 dan 2023 ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Tahanan Kontak PMT

No.	Standar (IEC 60694)	Tahun 2022 ($\mu\Omega$)			Tahun 2023 ($\mu\Omega$)		
		R	S	T	R	S	T
1.	< 50 $\mu\Omega$	50,74	47,69	44,07	621,5	34,14	26,51

Mengacu pada tabel 4.1 diatas hasil pengujian tahanan kontak tertinggi selama 2 tahun berturut turut terdapat pada fasa R. Tahun 2022 nilai tahanan kontak fasa R menunjukkan nilai paling tinggi diantara fasa yang lain yaitu sebesar 50.74 $\mu\Omega$, sementara tahun 2023 nilai tahanan kontak fasa R sebesar 621.5 $\mu\Omega$. Nilai tersebut melebihi standar yang ditetapkan yaitu < 50 $\mu\Omega$ sesuai dengan standar IEC 60694.

Melalui pengujian tahanan kontak PMT dapat diketahui besarnya hambatan terhadap arus pada PMT akibat adanya sambungan antar kontak yang saling bertemu secara fisik, yaitu *fixed contact* dan *moving contact* didalam PMT. Sehingga aliran arus terhambat dan menimbulkan panas serta rugi-rugi daya [5].

4.2 Hasil Uji Tahanan Isolasi PMT

Nilai tahanan isolasi PMT yang diukur pada saat *shutdown measurement* disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Uji Tahanan Isolasi PMT

No.	Titik Ukur	Standar	Tahun 2022 (MΩ)			Tahun 2023 (MΩ)		
			R	S	T	R	S	T
1.	Atas - Ground	1MΩ/kV (Standar VDE catalouge 228/4)	143.000	313.000	323.000	445.000	12.000	354.000
2.	Bawah - Ground		415.000	262.000	391.000	441.000	698.000	510.000
3.	Atas - Bawah		333.000	695.000	593.000	649.000	152.000	567.000

Standar nilai tahanan isolasi pada PMT yaitu minimal 1MΩ/kV (Standar VDE catalouge 228/4), artinya PMT 150kV Bay Kopel di GI New Porong harus mempunyai nilai tahanan isolasi minimal sebesar 150MΩ. Hasil uji yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 4.2 nilai tahanan isolasi PMT masih diatas 150MΩ sehingga diketahui bahwa kualitas isolasi masih baik. Melalui hasil nilai tahanan isolasi yang diperoleh dapat dilakukan perhitungan nilai arus bocor, kebocoran arus yang diijinkan setiap 1 kV adalah 1mA (PUIL 2011)[16].

4.3 Hasil Uji Tahanan Pentanahan PMT

Tabel 4.3 berikut menyajikan hasil uji tahanan pentanahan PMT.

Tabel 4. 3 Hasil Uji Tahanan Pentanahan PMT

No.	Standar IEEE std 80 : 2000	Tahun 2022 (Ω)			Tahun 2023 (Ω)		
		R	S	T	R	S	T
1.	<1 Ω	0,25	0,24	0,25	0,20	0,30	0,20

Hasil uji pentanahan yang ditunjukkan pada tabel 4.3 diatas diketahui bahwa nilai pentanahan masih sesuai standar IEEE std 80 : 2000 yaitu <1 Ω hal ini menunjukkan bahwa sistem grounding yang terpasang pada PMT dalam kondisi baik. Nilai uji pentanahan PMT berkisar antara 0,20 Ω hingga 0,25 Ω .

4.4 Hasil Uji Keserempakan Kontak PMT

Hasil pengukuran keserempakan kontak PMT dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Hasil Uji Keserempakan Kontak PMT

No.	Mode Uji	Standar	Tahun 2022 (ms)			Tahun 2023 (ms)		
			R-S	S-T	T-R	R-S	S-T	T-R
1.	Open	Open : <50 ms Standar IEC 62271	28,00	26,05	27,50	28,05	26,15	27,75
2.	Close	Close : <120ms Standar IEC 62271	102,30	104,30	103,00	102,25	104,15	102,75

Dari hasil uji keserempakan kontak PMT pada Tabel 4.4 diatas, diketahui bahwa waktu operasi open dan close sesuai standar, dimana standar waktu *open* adalah <50 ms Standar IEC 62271 dan standar waktu *close* adalah <120 ms Standar IEC 62271. Keserempakan kontak PMT pada fasa R, S dan T dilihat dari nilai delta time (Δt) yaitu selisih waktu tertinggi dan terendah antar fasa ketika kontak PMT membuka dan menutup, dimana Δt yang diijinkan yaitu ≤ 10 ms sesuai ketentuan PT PLN SK DIR 114. Nilai Δt saat *open* dan *close* PMT masih sesuai standar yaitu ≤ 10 ms, nilai Δt ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Δt Open Close

No.	Mode Uji	Standar Δt (ms)	Tahun 2022 (ms)	Tahun 2022 (ms)
1.	<i>Open</i>	≤ 10 ms	1,95 ms	1,9 ms
2.	<i>Close</i>	≤ 10 ms	2 ms	1,9 ms

Sesuai dengan persamaan (2.3) diatas maka nilai Δt dapat dihitung sebagai berikut :

Tahun 2022

1. Δt Open = 28,00 - 26,05
 Δt Open = 1,95 s
2. Δt Close = 104,30 - 102,30
 Δt Close = 2 s

Tahun 2023

1. Δt Open = 28,05 - 26,15
 Δt Open = 1,90 s
2. Δt Close = 104,15 - 102,25
 Δt Close = 1,90 s

4.5 Hasil Uji Gas SF₆

Parameter pengujian kualitas gas SF₆ adalah meliputi *dew point*, *moisture content*, *purity*, serta *decomposition product*, dimana hasil pengukuran dari keempat parameter tersebut disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Uji Gas SF₆

No.	Jenis	Standar	2022	2023
1.	<i>Dew Point</i> (°C)	<-5 °C Standard CIGRE	-51,1	-39,2
2.	<i>Moisture Content</i> (ppmv)	≤3960 ppmv Standard CIGRE	36,57	139
3.	<i>Purity</i> (%)	>97% Standard CIGRE	97,49	99,9
4.	<i>Decomposition Product</i> (SO ₂) (ppmv)	<12 ppmv Standard CIGRE	0	14

Hasil uji kualitas gas SF₆ ditunjukkan pada tabel 4.6, pada tahun 2023 menunjukkan adanya kandungan dekomposisi produk (SO₂) yaitu sebesar 14 ppmv, melebihi standar yang ditentukan <12 ppmv (Standard CIGRE). Sementara untuk hasil uji kualitas gas SF₆ pada tahun 2022 masih sesuai dengan standar yang ditetapkan

4.6 Root Cause Analysis tahanan kontak tinggi pada PMT

Identifikasi faktor penyebab tahanan kontak tinggi adalah sebagai berikut :

1. *Man*

Faktor *man* berkaitan dengan sumber daya manusia, dimana faktor penyebabnya yaitu berupa :

- a. Kelalaian inspeksi berupa tidak dilakukannya pencatatan rutin counter PMT karena status GI 150 kV New Porong sebagai GI Patrol, dimana tidak ada operator GI yang bersiaga setiap hari di GI.

- b. Setelah ditemukan hasil tahanan kontak tinggi, dilakukan percobaan *setting* stang penggerak PMT, tetapi justru menyebabkan nilai tahanan kontak semakin tinggi, dikarenakan petugas pemeliharaan tidak membaca instruksi manual book PMT sebelumnya.

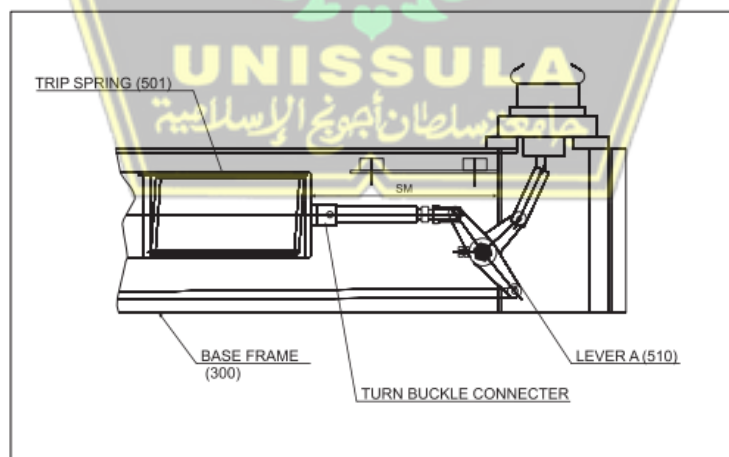
2. Material

Kemungkinan selanjutnya yaitu faktor material, dimana hal tersebut dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya :

- a. Kontak aus, karena kualitas material yang buruk, sementara peralatan tersebut masih tergolong baru
- b. Kontak korosi, disebabkan oleh pemburukan kualitas gas SF₆ yang ditunjukkan dengan adanya kandungan dekomposisi produk berupa gas SO₂ pada hasil uji gas SF₆, dimana kandungan gas tersebut muncul akibat adanya reaksi kimia saat proses operasi PMT sehingga gas SF₆ terurai menjadi dekomposisi produk salah satunya yaitu gas SO₂. Gas SO₂ bersifat korosif.

3. Methode

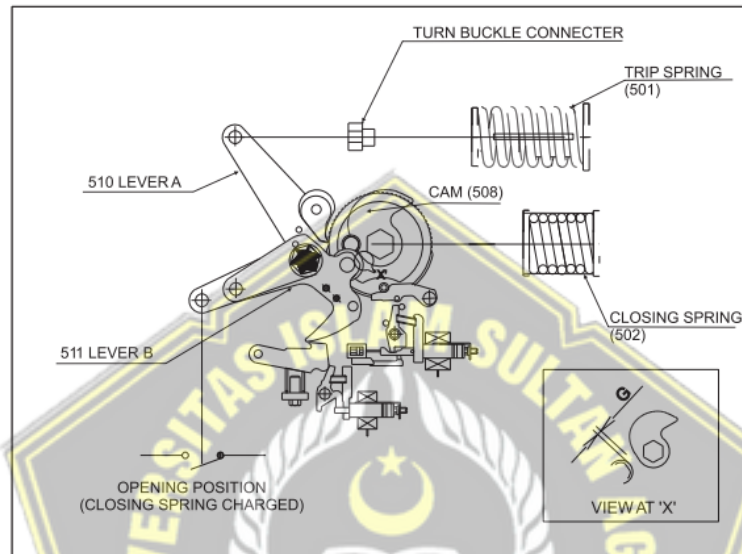
- a. Belum adanya Instruksi Kerja (IK) terkait setting terhadap stang penggerak PMT, sehingga proses *setting* penggerak dilakukan tanpa ada acuan jelas dan prosedur baku yang memperburuk kondisi PMT. Instruksi Kerja mengacu pada manual book yang ada. Gambar 4.1 menunjukkan mekanisme sistem penggerak PMT *type* 150-SFM-40B.



Gambar 4. 1 Sistem Penggerak PMT Type 150-SFM-40B

Mekanisme pengaturan penggerak sesuai dalam *manual book* adalah seperti berikut:

- a) Mekanisme penggerak ditunjukkan pada Gambar 4.1 yang ditandai simbol S.M, dimana dimensi panjangnya diukur dari ujung batang yang terhubung pada tuas A (510)
- b) Saat PMT dalam posisi *open* (501), ukur dan catat SM1
- c) Saat PMT dalam posisi *close* (502), ukur dan catat SM2
- d) Posisi *open* (501) dan *close* (502) ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4. 2 Internal Sistem Penggerak PMT Type 150-SFM-40B

- e) Jarak ideal mekanisme penggerak (S.M) lihat pada gambar 4.1 merupakan selisih dari ukuran S.M 1 dan S.M2. Dimana pada *manual book* ditetapkan standar ukuran S.M adalah 10cm [17].
 - f) Setiap pemeliharaan rutin pastikan kondisi sistem penggerak di cek secara rutin dan dilakukan pengaturan atau *adjustment*.
- b. Belum adanya SOP terkait proses inspeksi peralatan terhadap GI Patrol. Sehingga kegiatan inspeksi peralatan belum berjalan secara terstruktur, konsisten dan tercatat dengan baik, menyebabkan keterlambatan deteksi dini terhadap kondisi anomali pada peralatan. Sesuai dengan pedoman pemeliharaan peralatan yang tertuang pada KEPDIR 114.K/DIR/2010, pemeliharaan pada Pemutus Tenaga diklasifikasikan menjadi :
- a) *Visual Inpspection* : kegiatan inspeksi ini dilakukan saat peralatan dalam kondisi bertegangan dengan menggunakan 5 panca indera dan alat ukur sederhana. Inspeksi visual dilakukan secara periodik harian, mingguan, triwulan dan

tahunan, meliputi : pemeriksaan tekanan gas SF₆, pemeriksaan kondisi pegas pada sistem penggerak PMT, pemeriksaan fisik lemari mekanik, pemeriksaan rod mekanik penggerak PMT

- b) *On Line Monitoring* : kegiatan inspeksi ini dilakukan saat peralatan dalam keadaan bertegangan, menggunakan bantuan alat, seperti pengukuran suhu (*thermovisi*). Pengukuran suhu dapat dilakukan periodik mingguan dan bulanan.
- c) *Shutdown Measurement* : kegiatan ini merupakan pengukuran yang dilakukan pada periode 2 tahunan dalam keadaan peralatan tidak bertegangan.

Seluruh hasil inspeksi dapat dicatat dalam lembar inspeksi (manual/digital). Sehingga meskipun status GI Patrol, setiap peralatannya tetap harus dilakukan inspeksi secara rutin.

4. *Machine*

- a. Bertambahnya jumlah counter PMT dikarenakan proses manuver sistem untuk kebutuhan pemeliharaan, kebutuhan sistem dan operasi *open close* PMT saat gangguan.
- b. Akibat proses operasi PMT menyebabkan kontak mengalami deformasi dan berubah posisi dari yang seharusnya, sehingga kontak tidak terhubung dengan baik.

Rekomendasi terhadap kondisi PMT adalah sebagai berikut :

1. Penyusunan SOP yang mengatur secara khusus proses inspeksi peralatan di GI Patrol, untuk memastikan proses inspeksi berjalan secara terstruktur.
2. Penyusunan Instruksi Kerja (IK) terkait prosedur *setting* stang penggerak PMT dan perlu dilakukan training atau pelatihan secara rutin terhadap teknisi lapangan.
3. Mengadakan diskusi teknik ke pabrikan terkait permasalahan kualitas material PMT.
4. Dilakukan penggantian PMT berdasarkan kriteria penggantian peralatan gardu induk yang diatur pada KepDir Nomor 149.K/DIR/2013 dilakukan berdasarkan pada 3 hal yaitu :

a. Kondisi teknis

Kondisi teknis peralatan adalah suatu tingkat kondisi peralatan utama gardu induk yang masih beroperasi dan ditentukan berdasarkan hasil asesmen yaitu :

- Baik adalah suatu kondisi teknis peralatan dengan hasil asesmen yang masih memenuhi standar (kondisi normal)

- Buruk adalah suatu kondisi teknis peralatan dengan hasil asesmen yang belum memenuhi standar (kondisi normal)
 - Sangat buruk suatu kondisi teknis peralatan dengan hasil asesmen yang jauh dibawah memenuhi standar (kondisi normal)
- b. Usia operasi adalah usia peralatan utama gardu induk dihitung sejak tanggal operasi dan dinyatakan dengan tua dan sangat tua
- c. Tingkat resiko adalah kriteria yang mempertimbangkan probabilitas kerusakan dan dampaknya yang ditetapkan oleh PLN Unit dimana peralatan tersebut beroperasi.

Berdasarkan kriteria penggantian peralatan utama gardu induk diatas maka berikut ini prioritas penggantian peralatan utama gardu induk ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Priortitas Penggantian Peralatan Gardu Induk

Prioritas	Kondisi Teknis	Umur Operasi	Tingkat Resiko	Tindak Lanjut
P0	Sangat Buruk	Semua Kriteria	Semua Kriteria	Diganti Segera
P0	Buruk	Sangat Tua	Sangat Tinggi	Diganti Segera
P1	Buruk	Semua Kriteria	Semua Kriteria	Frekuensi asesmen dipercepat, Diganti maksimum 1 tahun

Justifikasi kondisi teknis peralatan utama gardu induk pada KepDir Nomor 149.K/DIR/2013 disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Kondisi Teknis PMT

No.	Peralatan Utama Gardu Induk	Kriteria	Satuan	Kondisi Teknis	
				Sangat Buruk	Buruk
1.	PMT	Tahanan Kontak	$\mu\Omega$	$> 100 \mu\Omega$	50 - 100 $\mu\Omega$

Berdasarkan hasil uji tahanan kontak PMT yang didapatkan yaitu $621,5 \mu\Omega$ maka kondisi tahanan kontak masuk pada kategori kondisi teknis sangat buruk $> 100 \mu\Omega$, maka sesuai dengan Tabel 4.7 diatas kondisi PMT 150kV Bay Kopel berada pada prioritas P0 dan diperlukan tindak lanjut penggantian segera, karena kondisi teknis yang sangat buruk.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Berdasarkan metode *Root Cause Analysis (RCA)*, ditemukan bahwa penyebab utama tingginya nilai tahanan kontak PMT pada fasa R di Bay Kopel GI 150 kV New Porong ($621,5 \mu\Omega$) disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor, antara lain: *man, method material, dan machine*.
2. Hasil uji *shutdown measurement* terhadap standar masing-masing pengujian dari seluruh parameter pengujian didapatkan :
 - a. Tahanan kontak PMT : berdasarkan hasil uji tahanan kontak PMT didapatkan nilai tahanan kontak fasa R sebesar $621,5 \mu\Omega$ dimana hasil tersebut melebihi standar yang ditetapkan $<50 \mu\Omega$ (IEC 60694).
 - b. Tahanan isolasi PMT semua titik ukur nilainya $>150 M\Omega$, artinya kualitas isolasi dalam kondisi baik sesuai dengan standar tahanan isolasi yaitu $1M\Omega/kV$ (VDE catalouge 228/4).
 - c. Tahanan pentanahan : Seluruh nilai pengukuran berada dalam rentang nilai $0,20 \Omega - 0,30 \Omega$, sehingga nilai tahanan pentanahan dinyatakan masih dalam batas standar yang ditetapkan yaitu $<1\Omega$ (Standar IEE Std 80 : 2000)
 - d. Kecerempakan kontak PMT : Nilai waktu *open* dan *close* memiliki selisih (Δt) masing masing $<10ms$, dimana hal tersebut sesuai dengan standar PT. PLN SK DIR 114.
 - e. Pengujian kualitas gas SF_6 : Berdasarkan hasil uji kualitas gas SF_6 pada tahun 2023 terjadi penurunan kualitas gas SF_6 khususnya pada parameter dekomposisi produk (SO_2) yaitu sebesar 14 ppmv, dimana nilai tersebut melebihi standar yaitu <12 ppmv (Standard CIGRE) yang mengindikasikan adanya reaksi kimia internal akibat paparan panas berlebih dan kerusakan kontak internal PMT.
3. Berdasarkan evaluasi keseluruhan hasil uji *shutdown measurement*, kondisi PMT masuk dalam kategori “sangat buruk” sesuai dengan klasifikasi kondisi teknis yang ditetapkan pada KepDir Nomor 149.K/DIR/2013, dimana kriteria nilai tahanan kontak PMT Pada Bay Kopel GI 150kV New Porong diatas $100 \mu\Omega$.

5.2 Saran

Rekomendasi terhadap kondisi PMT adalah sebagai berikut :

1. Dilakukan penggantian PMT berdasarkan kriteria penggantian peralatan gardu induk yang diatur pada KepDir Nomor 149.K/DIR/2013
2. Penyusunan SOP yang mengatur secara khusus proses inspeksi peralatan di GI Patrol, untuk memastikan proses inspeksi berjalan secara terstruktur.
3. Penyusunan Instruksi Kerja (IK) terkait prosedur *setting* stang penggerak PMT dan perlu dilakukan training atau pelatihan secara rutin terhadap teknisi lapangan.
4. Mengadakan diskusi teknik ke pabrikan terkait permasalahan kualitas material PMT.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN (Persero), “Buku Pedoman Pemutus Tenaga,” *Jakarta*, hal. 138, 2014.
- [2] PT PLN (PERSERO), “Pedoman Pemeliharaan Gas Insulated Substation (GIS),” *Pdm/Pgi/14:2014*, 2014.
- [3] R. Badruzzaman dan A. Stefanie, “Analysis of Contact Resistance Test for PMT Bay Kuningan II 70KV at Sunyaragi Substation,” *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 5, no. 2, hal. 116–138, 2021, doi: 10.21070/jeeeu.v5i2.1396.
- [4] B. Winantara dan B. Husodo, “Evaluasi Tahanan Kontak Pemutus Tenaga Tegangan Tinggi Di Gardu Induk 150 KV Bandung Selatan Berdasarkan Failure Mode Effect Analysis (FMEA),” *Jurnal Teknologi Elektro*, vol. 10, no. 2, hal. 103, 2019, doi: 10.22441/jte.v10i2.004.
- [5] A. Susanto, R. Kurnianto, dan M. Rajagukguk, “Analisa Kelayakan Pemutus Tenaga (Pmt) 150 Kv Berdasarkan Hasil Uji Tahanan Isolasi, Tahanan Kontak Dan Keserempakan Kontak Di Gardu Induk Singkawang,” *Fakultas Teknik Universitas Tanjungpura*, hal. 1–9, 2021.
- [6] Joko, A. Agung, dan F. Achmad, “Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV,” *Analisis Pengujian dan Pemeliharaan Dua Tahunan Pemutus Tenaga (PMT) Di Gardu Induk Rungkut 150 kV*, vol. 13, hal. 144–151, 2024.
- [7] A. Fikri, H. Rudito, dan Usman, “Analisis Pengujian Pemutus Tenaga (PMT) Bay Punagaya Dalam Pemeliharaan Dua Tahunan di Gardu Induk Tallasa,” *Jurnal.Poliupg.Ac.Id*, no. September, hal. 2–6, 2021, [Daring]. Tersedia pada: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/sntei/article/view/2813>
- [8] R. De Fretes, “Analisis Penyebab Kerusakan Transformator Menggunakan Metode RCA (Fishbone Diagram and 5-Why Analysis) Di PT. PLN (Persero) Kantor Pelayanan Kiandarat,” *Arika*, vol. 16, no. 2, 2022.
- [9] I. N. G. Adrama, I. W. Suriana, dan I. M. Asna, *Teknik Tegangan Tinggi Gardu Induk*. Yogyakarta: deepublish, 2024.
- [10] PT. PLN (Persero), “Buku Pedoman Trafo Tenaga,” *Buku Pedoman Pemeliharaan*

- Trafo Tenaga*, hal. 1–142, 2014.
- [11] PT. PLN (Persero), “Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus,” *Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Arus*, hal. 1–10, 2014.
- [12] PT. PLN (Persero), “Buku Pedoman Trafo Tegangan,” *Buku Pedoman Pemeliharaan Trafo Tegangan*, hal. 1, 2010.
- [13] PT PLN (PERSERO), “Buku Pedoman Pemeliharaan Pemisah (PMS),” *Buku Pedoman Pemeliharaan Pemisah (PMS)*, hal. 69, 2019.
- [14] PT PLN (PERSERO), “Buku Pedoman Pemeliharaan Lightning Arrester,” *Buku Pedoman Pemeliharaan Lightning Arrester*.
- [15] A. G. Firdaus dan R. Hidayat, “Analisa Pengujian Kelayakan PMT 150 kV Bay Mandirancan I Berdasarkan Parameter Breaker Analyzer di Gardu Induk Sunyaragi,” *Elektron : Jurnal Ilmiah*, vol. 13, hal. 17–24, 2021, doi: 10.30630/eji.0.0.217.
- [16] PUIL, “Puil 2011,” *DirJen Ketenagalistrikan*, vol. 2011, no. Puil, hal. 1–683, 2011.
- [17] CG POWER, “*Instructions, Installation & Maintenance Manual 170kV SF6 Gas Circuit Breaker Type 150-SFM-40B.*”

