

**ANALISIS PENGARUH *ENDWINDING VIBRATION*
TERHADAP ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR #2
412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR DENGAN METODE
*CONDITION ASSESSMENT DIAGNOSTICS***

LAPORAN TUGAS AKHIR

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG



DISUSUN OLEH:

**HENDRA PRASETYAWAN
30602200087**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG 2023**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF ENDWINDING VIBRATION
ON THE STATOR WINDING ISOLATION OF GENERATOR
#2 412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR USING THE
CONDITION ASSESMENT DIAGNOSTICS METHOD**

FINAL PROJECT

*Proposed to complete the requirement to obtain a bachelor's degree (SI)
At Departement of Industrial Engineering, Faculty of Industrial
Technology, Universitas Islam Sultan Agung*



Arranged By:

**HENDRA PRASETYAWAN
30602200087**

**MAJORING OF ELECTRICAL ENGINEERING
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
SULTAN AGUNG ISLAMIC UNIVERSITY
SEMARANG 2023**

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH *ENDWINDING VIBRATION* TERHADAP ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR #2 412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR DENGAN METODE *CONDITION ASSESSMENT DIAGNOSTICS*” ini disusun oleh:

Nama : HENDRA PRASETYAWAN
NIM : 30602200087
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 30 Mei 2024

Pembimbing I


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

Mengetahui,

Ka. Program Studi Teknik Elektro



TEKNIK ELEKTRO
Jenny Putri Hapsari, ST., MT. 150724

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS PENGARUH *ENDWINDING VIBRATION* TERHADAP ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR #2 412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR DENGAN METODE *CONDITION ASSESSMENT DIAGNOSTICS*” ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Kamis
Tanggal : 30 Mei 2024

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, M.T
NIDN : 0628086501
Ketua

Ir. Ida Widiastuti, MT.
NIDN : 0005036501
Penguji I

Dr. Eka Nuryanto Budisusila, ST., M.T.
NIDN : 0619107301
Penguji II

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Hendra Prasetyawan
NIM : 30602200087
Jurusan : Teknik Elektro
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir yang diajukan dengan judul **“ANALISIS PENGARUH *ENDWINDING VIBRATION* TERHADAP ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR #2 412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR DENGAN METODE *CONDITION ASSESSMENT***

DIAGNOSTICS” adalah hasil karya sendiri, tidak pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di perguruan tinggi lain maupun ditulis dan diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam daftar pustaka. Tugas Akhir ini adalah milik saya segala bentuk kesalahan dan kekeliruan dalam Tugas Akhir ini adalah tanggung jawab saya.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab.

Semarang, Juni 2024

A QR code is positioned to the left of a handwritten signature in black ink. The signature is written over a pink rectangular stamp that contains the number '100' and some illegible text.

Hendra Prasetyawan

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Hendra Prasetyawan

NIM : 30602200087

Program Studi : Teknik Elektro

Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS PENGARUH *ENDWINDING VIBRATION* TERHADAP ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR #2 412 MVA PLTU TANJUNG AWAR-AWAR DENGAN METODE *CONDITION ASSESSMENT***

DIAGNOSTICS” dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai 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 pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, Juni 2024

Yang Menyatakan

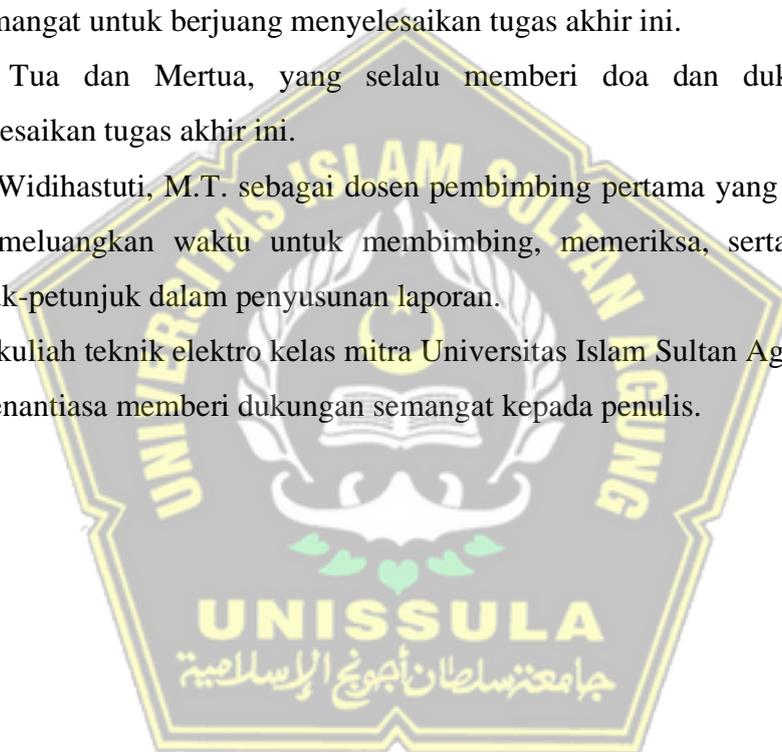


Hendra Prasetyawan

HALAMAN PERSEMBAHAN

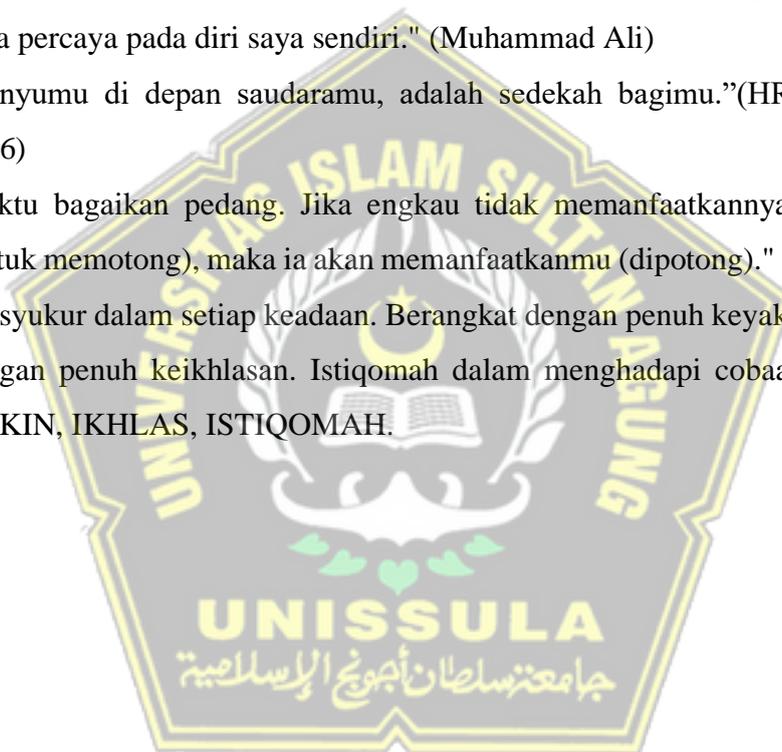
Alhamdulillah, segala puji Allah SWT dengan kemurahan ridho-Nya, skripsi ini dapat ditulis dengan baik dan lancar hingga selesai. Dengan ini akan kupersembahkan skripsi ini kepada :

1. Lania Khanza Wahyuningtyas dan bilhaqqi Khafa Aranza yang selalu memberi doa dan semangat untuk berjuang menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Orang Tua dan Mertua, yang selalu memberi doa dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ir. Ida Widiastuti, M.T. sebagai dosen pembimbing pertama yang telah bersedia untuk meluangkan waktu untuk membimbing, memeriksa, serta memberikan petunjuk-petunjuk dalam penyusunan laporan.
4. Rekan kuliah teknik elektro kelas mitra Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang senantiasa memberi dukungan semangat kepada penulis.



HALAMAN MOTTO

1. “Hai orang-orang yang beriman, mintalah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan (mengerjakan) salat, sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar” (QS Al Baqarah ayat 153)
2. "Sesuatu yang belum dikerjakan, seringkali tampak mustahil; kita baru yakin kalau kita telah berhasil melakukannya dengan baik." (Evelyn Underhill)
3. "Tiadanya keyakinanlah yang membuat orang takut menghadapi tantangan; dan saya percaya pada diri saya sendiri." (Muhammad Ali)
4. “Senyumu di depan saudaramu, adalah sedekah bagimu.”(HR Tirmidzi no 1956)
5. Waktu bagaikan pedang. Jika engkau tidak memanfaatkannya dengan baik (untuk memotong), maka ia akan memanfaatkanmu (dipotong)." (HR. Muslim)
6. Bersyukur dalam setiap keadaan. Berangkat dengan penuh keyakinan. Berjalan dengan penuh keikhlasan. Istiqomah dalam menghadapi cobaan. SYUKUR, YAKIN, IKHLAS, ISTIQOMAH.



KATA PENGANTAR

Dengan mengucap puji dan syukur kehadiran Allah SWT, karena atas ridho dan hidayahNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Maksud dan tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk memenuhi persyaratan kelulusan program Studi Strata I pada Jurusan Teknik Elektro di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Penulis merasa bahwa dalam menyusun laporan ini masih menemui beberapa kesulitan dan hambatan, disamping itu juga menyadari bahwa penulisan laporan ini masih jauh darisempurna dan masih banyak kekurangan-kekurangan lainnya, maka dari itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak.

Berkat dorongan dan bimbingan dari berbagai pihak sehingga laporan ini dapat terselesaikan, oleh karena itu penulis mengucapkan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Dr. Ir. Novi Mariyana, S.T., M.T., IPU., ASEAN. Eng. selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri UNNISULA, yang telah mengesahkan tugas akhir ini.
2. Jenny Putri Hapsari, ST., MT. selaku ketua Jurusan Program Studi Teknik Elektro yang telah memberi izin dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Ir. Ida Widiastuti, M.T sebagai dosen pembimbing pertama yang telah bersedia untuk meluangkan waktu untuk membimbing, memeriksa, serta memberikan petunjuk-petunjuk dalam penyusunan laporan.
4. Seluruh staf pengajar Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang telah membimbing dan memberikan materi perkuliahan kepada penulis.
5. Rekan kuliah teknik elektro kelas mitra Universitas Islam Sultan Agung Semarang yang senantiasa memberi dukungan semangat kepada penulis.
6. Lania Khanza Wahyuningtyas dan Haqqi yang selalu memberi doa dan semangat untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Orang Tua dan Mertua, yang selalu memberi doa dan dukungan untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan laporan tugas akhir ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat dan menambah ilmu pengetahuan khususnya dibidang Teknik Elektro.

Semarang, 06 Juni 2024



Hendra Prasetyawan



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	iv
SURAT PERNYATAAN	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI ILMIAH	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
Daftar Tabel.....	xv
ABSTRAK	xvi
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Pembatasan Masalah	3
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Manfaat.....	3
1.6. Sistematika Penulisan.....	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
2.1. Tinjauan Pustaka	5
2.2. Landasan Teori.....	6
2.2.1. Generator Sinkron.....	6
2.2.2. Konstruksi Generator Sinkron	10
2.2.3. Rotor	11
2.2.4. Stator.....	12
2.2.5. Getaran Area Belitan Ujung	16

2.2.6. Dampak Kelonggaran Ikatan Belitan Ujung.....	19
2.2.7. Kerusakan Perlindungan Korona	20
2.2.8. Condition Assessment Generator.....	21
BAB III.....	40
METODE PENELITIAN	40
3.1. Metode Penelitian.....	40
3.2. Metode Pengujian.....	40
3.2.1 Visual inspeksi.....	40
3.2.2 Insulation Resistance Test & Polarization Index Test	42
3.2.3 Uji Faktor Disipasi.....	43
3.2.4 Uji Offline -Peluhan Parsial.....	45
3.2.5 Uji Getaran (Bump Test).....	46
3.2.6 Lokasi Penelitian.....	47
3.3 Diagram Alir Penelitian.....	48
BAB IV.....	50
ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50
4.1 Hasil Visual Inpeksi	50
4.2 Hasil Uji Resistansi Isolasi (IR) dan Indeks Polarisasi (PI)	51
4.3 Hasil Uji Faktor Disipasi	54
4.4 Hasil Uji Offline Partial Discharge	58
4.5 Hasil Uji Getaran Pada Struktur Belitan Ujung	59
4.6 Perbaikan Masalah	60
4.6.1 Perbaikan Ikatan Belitan Ujung.....	60
4.6.2 Perbaikan Hasil PD offline Tinggi.....	61
4.7 Pembahasan	64
BAB V.....	69
PENUTUP.....	69
3.2. Kesimpulan.....	69
3.3. Saran.....	70
DAFTAR PUSTAKA.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Komponen rotor (a) dan stator (b) generator.....	6
Gambar 2. 2 ujung-ujung kumparan belitan generator.....	7
Gambar 2. 3 Prinsip kerja generator sinkron.....	8
Gambar 2. 4 konstruksi generator	10
Gambar 2. 5 konstruksi rotor generator.....	11
Gambar 2. 6 Stator	12
Gambar 2. 7 Rangka Stator	13
Gambar 2. 8 inti stator.....	13
Gambar 2. 9 belitan stator	14
Gambar 2. 10 konstruksi isolasi belitan stator generator.....	15
Gambar 2. 11 belitan ujung stator generator	16
Gambar 2. 12 Garis Fluks Untuk Magnet Rotor Dua Dan Empat Kutub.....	17
Gambar 2. 13 Bubuk putih disebabkan oleh getaran belitan ujung.[8].....	18
Gambar 2. 14 PD terjadi pada dua fase yang berbeda.[8].....	20
Gambar 2. 15 Pengujian Yang Dianjurkan menurut IEEE 62.2-2004.....	22
Gambar 2. 16 kurva nilai PI berdasarkan waktu	26
Gambar 2. 17 model insulasi dengan kapasitor.....	27
Gambar 2. 18 (a) Isolator Pararel (b) Diagram Fasor isolator Pararel	28
Gambar 2. 19 koneksi pengukuran tan delta tes.....	30
Gambar 2. 20 kurva $\tan \delta$ versus tegangan dalam step tegangan 0,2 Un.....	30
Gambar 2. 21 Koneksi mode GST	31
Gambar 2. 22 Koneksi mode GST-Guard.....	32
Gambar 2. 23 Koneksi mode UST	32
Gambar 2. 24 pengukuran partial discharge.....	33
Gambar 2. 25 partial discharge.....	34
Gambar 2. 26 pola PD untuk mesin berputar	36
Gambar 2. 27 Pola keluaran PD pada bagian celah stator.....	36
Gambar 2. 28 Lokasi peluahan pada celah stator	37
Gambar 2. 29 Pola keluaran PD pada belitan akhir stator.....	37
Gambar 2. 30 Lokasi peluahan pada belitan akhir stator	38

Gambar 2. 31 Peluahan pada celah stator dan end winding	38
Gambar 2. 32 Pola keluaran PD pada peluahan internal	38
Gambar 2. 33 lokasi peluahan internal	39
Gambar 2. 34 uji benturan pada ujung belitan sisi eksiter.....	39
Gambar 3. 1 form inspeksi visual stator generator	41
Gambar 3. 2 alat ukur IR dan PI tes	42
Gambar 3. 3 rangkaian pengujian tahanan isolasi	43
Gambar 3. 4 instalasi koneksi tangen delta tes.....	43
Gambar 3. 5 Alat Uji Tan Delta Doble M4100	44
Gambar 3. 6 Koneksi Tes Offline PD	45
Gambar 3. 7 peralatan uji partial discharge.....	46
Gambar 3. 8 diagram alir penelitian	48
Gambar 4. 1 Hasil Visual Inspeksi Tahun 2023.....	50
gambar 4. 2 hasil pengukuran IR.....	51
gambar 4. 3 hasil uji sebelum perbaikan fasa R.....	58
gambar 4. 4 hasil uji sebelum perbaikan fasa S.....	58
gambar 4. 5 hasil uji sebelum perbaikan fasa T	58
gambar 4. 6 salah satu titik yang diuji dan hasilnya BAD.....	59
Gambar 4. 7 Penambahan Tali Pengikat Belitan Ujung.....	60
Gambar 4. 8 Aplikasi Varnis Konduktif Dan Semikonduktif Dengan Kuas.....	62
gambar 4. 9 hasil penambahan ikatan dan penguatan struktur belitan ujung	65

Daftar Tabel

Tabel 2. 1 Tabel standar kelas temperatur motor dan generator	16
Tabel 2. 2 standar nilai tahanan isolasi.....	24
Tabel 2. 3 Tabel standar kelas temperatur motor dan generator	25
Tabel 2. 4 standar nilai PI belitan stator	27
Tabel 2. 5 Nilai Karakteristik <i>tan delta</i> generator	30
Tabel 3. 1 tabel pedoman tegangan uji.....	43
Tabel 4. 1 hasil pengujian IR.....	51
Tabel 4. 2 hasil uji IR dan PI tes sebelum.....	52
Tabel 4. 3 hasil uji IR.....	52
Tabel 4. 4 hasil uji IR dan PI tes sesudah.....	53
Tabel 4. 5 hasil uji tangen delta fasa U	55
Tabel 4. 6 hasil uji tangen delta fasa V	56
Tabel 4. 7 hasil uji tangen delta fasa W.....	56
Tabel 4. 8 perbandingan hasil uji dissipation factor sebelum dan sesudah	57
Tabel 4. 9 hasil uji getaran pada struktur belitan ujung	59
Tabel 4. 10 perbandingan Sebelum Dan Sesudah Perbaikan	61
Tabel 4. 11 Perbandingan Hasil Uji Partial Discharge Fasa R.....	63
Tabel 4. 12 Perbandingan Hasil Uji Partial Discharge Fasa S	63
Tabel 4. 13 Perbandingan Hasil Uji Partial Discharge Fasa T	64
Tabel 4. 14 grafik trending pengukuran tangen δ dari tahun 2019-2023	66
Tabel 4. 15 grafik pengkuran PD sebelum dan sesudah pemeliharaan	67
Tabel 4. 16 Trending Pengukuran PD Dari Tahun 2019-2023	68

ABSTRAK

Faktor kerusakan yang sering terjadi pada isolasi belitan stator terletak pada belitan ujungnya (*endwinding*). Belitan ujung stator sangat rentan terhadap getaran pada frekuensi ganda sistem jaringan medan elektromagnetik. Gejala kelonggaran ujung belitan generator pada unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar setelah dilakukan pengujian menunjukkan hal itu sebagai akibat dari frekuensi alami belitan ujung berada pada kisaran 95-115Hz. Masalah kelonggarannya bisa membawa dampak yang serius terhadap isolasi belitan karena dapat menimbulkan degradasi isolasi. Hasil degradasi isolasi ditunjukkan dengan temuan material senyawa gemuk yang timbul dari gesekan bahan isolasi pada isolasi belitan ujung stator generator.

Uji getaran (*bump test*) pada struktur penahan belitan ujung dilakukan untuk mengetahui natural frekwensi dari peralatan tersebut sehingga tidak menambah getaran terhadap belitan ujung. Upaya untuk mencegah timbulnya getaran berlebih pada belitan ujung, seperti memperbaiki ikatan yang sudah ada dan menambah ikatan baru pada ikatan belitan ujung untuk meningkatkan kekakuannya. Selain itu metode yang tepat untuk mengetahui kondisi isolasi belitan stator generator adalah dengan uji kelistrikan *Condition Assessment Diagnostic* diantaranya pengamatan visual, uji *insulation resistance*, uji polaritas indeks, uji faktor disipasi dan uji pelepasan sebagian.

Untuk memperbaiki pelepasan sebagian (*Partial Discharge*) pada belitan ujung, adalah dengan memperbaiki lapisan anti corona pada area yang terdampak. Hasil tes pelepasan sebagian setelah perbaikan menunjukkan bahwa cara ini efektif untuk mengurangi nilai besaran peluahan sebagian ke tingkat aman. Metode ini juga efektif dan menambah kepercayaan pemilik aset untuk mengoperasikan generator 412 mVA unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar dengan aman. Itu bisa memberi referensi kepada pembangkit listrik lain yang menghadapi masalah yang sama.

Kata kunci: *Isolasi Belitan, Vibrasi Belitan Ujung, Tangen Delta, Pasrtial Discharge*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Tanjung awar-awar yang dioperasikan sejak tahun 2013 oleh PLN Nusantara Power berjumlah 2 unit dengan kapasitas total pembangkitan sebesar 2 x 350 megawatt. Seiring dengan bertambahnya usia pembangkit, maka kemungkinan timbulnya permasalahan yang terkait dengan kegagalan listrik pada generator utama semakin meningkat. Ditandai juga dengan ditemukannya material seperti pelumas di sisi belitan ujung generator sisi eksiter yang diduga adalah indikasi peluahan sebagian.

Dalam sebuah pembangkit listrik, salah satu peralatan utama dalam sistem pembangkitan energi listrik adalah generator, yang berfungsi untuk mengkonversikan energi primer menjadi energi listrik (sekunder). Dalam operasi pembangkit, kehandalan generator menjadi salah satu fokus penting karena memiliki kontribusi yang sangat besar pada keseluruhan tingkat kehandalan pembangkit listrik tersebut.

Pemadaman paksa pada unit pembangkit yang disebabkan kerusakan pada peralatan/mesin listrik yang terjadi secara tiba-tiba dan tidak terencana dapat mengakibatkan kerugian secara ekonomi baik dari sisi pembangkit maupun bagi pihak konsumen pengguna listrik akibat terhentinya proses produksi listrik tersebut. Kehandalan dan ketersediaan pasokan listrik sangatlah penting untuk dijaga mengingat listrik merupakan salah satu energi yang menjadi tulang punggung perekonomian bangsa. Rendahnya kehandalan dan ketersediaan poskan listrik berakibat pada kecilnya tingkat pertumbuhan ekonomi dan akan menghambat laju pembangunan.

Berdasarkan data tingkat kegagalan komponen, isolasi memiliki tingkat kegagalan yang relatif besar bila dibandingkan dengan komponen lain. Oleh

karenanya, isolasi belitan perlu mendapatkan perhatian khusus dalam kegiatan perawatan baik yang bersifat berkala (*Preventive Maintenance*) maupun yang bersifat prediksi dini (*Predictive Maintenance*).

Proses penuaan pada isolasi belitan secara alamiah terjadi akibat deteriorisasi isolasi seiring dengan umur pengoperasian. Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi laju deteriorasi pada isolasi yang salahsatunya adalah stres berlebih. Stres yang berlebih pada isolasi dapat diakibatkan oleh panas (*Thermal*), listrik (*Electrical*), kondisi sekitar (*Ambient*), dan mekanikal (*Mechanical*) atau di singkat TEAM [1].

Pada tahun 2023, Generator unit 2 dilakukan Periodik Maintenance atau overhaul. Setelah dilakukan pull out rotor generator unit 2, ditemukan adanya indikasi abnormal berupa senyawa gemuk (*grease*) pada stator generator bagian belitan ujung. Setelah dilakukan pengambilan data uji getaran pada struktur belitan ujung dan Partial Discharge offline, ditemukan aktivitas *Partial Discharge* pada phase T diatas standar. Berdasarkan hal tersebut, dipandang perlu untuk melakukan analisa sistem isolasi belitan stator pada generator untuk memastikan generator beroperasi secara aman dan layak untuk dioperasikan kembali.

Salah satu tujuan utama *assessment* (pengujian) peralatan dalam pemeliharaan ialah untuk mendeteksi defect/cacat pada awal fase kerusakan, dan melakukan pengukuran dan pemeliharaan efektif yang diperlukan. Pendeteksian awal sering diperoleh dari evaluasi diagnosis di lapangan yang dilakukan secara berkala (misalnya tahunan atau bila diperlukan).

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada Tugas Akhir adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa dampak dari vibrasi belitan ujung stator terhadap isolasi belitan stator generator.
2. Menganalisa isolasi belitan stator generator dari data hasil pengujian sehingga dapat diketahui kondisi isolasi belitan stator secara umum.

3. Menganalisa hasil pengujian untuk menentukan metode perbaikan yang tepat.
4. Menganalisa hasil uji isolasi belitan tersebut sehingga dapat menentukan kelayakan operasi untuk generator.

1.3. Pembatasan Masalah

Dalam penyusunan penelitian ini, telah ditentukan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Studi kasus hanya dilakukan pada generator unit 2 PLTU Tj. Awar-Awar.
2. Pengujian isolasi dilakukan hanya pada stator generator.
3. Pengujian IR (*Insulation Resistance*) test dan PI (*Polarization Index*) menggunakan alat Megger MIT 525.
4. Pengujian tan delta menggunakan alat Omicron CPC100, CPTD
5. Pengukuran aktivitas PD (*Partial Discharge*) dilakukan secara *offline* menggunakan sensor PD TECH DELTA MAXX.

1.4. Tujuan

Tujuan dari pembuatan Tugas Akhir ini adalah:

1. Mengetahui dampak yang ditimbulkan dari vibrasi belitan ujung terhadap isolasi belitan stator generator.
2. Mengetahui trending hasil pengujian isolasi belitan stator generator 412 mVA unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar.
3. Memberikan rekomendasi untuk perbaikan terhadap isolasi belitan ujung generator dengan hasil uji yang diatas standar yang diijinkan.
4. Menentukan kelayakan operasi untuk generator #2 PLTU Tanjung Awar-Awar.

1.5. Manfaat

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Untuk meningkatkan keandalan peralatan.
- b. Untuk dapat menentukan metode yang tepat untuk perbaikannya.

- c. Menentukan batas pola operasi.
- d. Sebagai data trending kondisi isolasi belitan stator generator #2.
- e. Sebagai referensi untuk metode perbaikan isolasi belitan endwinding generator pada PT PLN group dengan permasalahan yang sama.
- f. Sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya terkait *endwinding vibration* pada generator.

1.6. Sistematika Penulisan

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan mengenai latar belakang, perumusan masalah, pembatasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Pada bab ini menjelaskan tentang pembahasan mengenai pengertian generator, teori tentang isolasi belitan stator generator, struktur endwinding generator, macam-macam pengujian isolasi belitan stator dari buku dan internet.

BAB III : METODE PENGUJIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang alat dan bahan penelitian, metode pengujian isolasi, metode penelitian dan tempat penelitian,

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil pengujian isolasi dan pembahasan mengenai hasil pengujian serta proses perbaikan isolasi.

BAB V : PENUTUP

Pada bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan dan saran dari penulis Tugas Akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

Setelah penulis melakukan telaah terhadap beberapa penelitian, ada beberapa yang memiliki keterkaitan dengan penelitian yang penulis lakukan.

Penelitian yang pertama ada penelitian yang dilakukan oleh Mohammad Amir dan I Wayan Angga Juliawan dengan judul “ Analisa Pengaruh Partial Discharge Dan Tan delta Terhadap Umur Isolasi Belitan Stator Akibat Ikatan Kumparan Generator Longgar”. Dalam penelitian ini juga dilakukan pengukuran *tan delta* dan juga *partial discharge* sebelum dan sesudah dilakukan pemeliharaan. Tujuan dari penelitian ini adalah memprediksi sisa umur generator dengan metode D Map, yang hasilnya didapat sisa umur adalah 19 tahun dengan catatan pola operasi generator stabil dan terkontrol.[2]

Selanjutnya penelitian yang dilakukan Joe KAPLER, John LETAL, Mladen SASIC, Greg C. STONE dengan judul “*Recent Endwinding Vibration Problems In Air-Cooled Turbine Generators*”, dalam penelitiannya disebutkan bahwa Daerah belitan ujung belitan stator generator turbin besar merupakan salah satu bagian paling kompleks untuk merancang dan membuat generator. Selama pengoperasian normal, belitan ujung dilalui tegangan tinggi dan gaya elektromekanis pada frekuensi daya dua kali lipat akibat arus pada batang stator, serta gaya mekanis yang ditransmisikan melalui inti dan bantalan dengan kecepatan rotasi. Ditunjukkan juga dengan gambar-gambar hasil vibrasi belitan ujung pada stator generator. Metode yang digunakan untuk mendiagnosis yaitu dengan uji bump test saat kondisi tidak beroperasi atau dengan memasang peralatan instrumen On-Line Endwinding Vibration Monitoring. Dan hasilnya bisa dengan Pemasangan pemblokiran dan penguat tambahan, Pasang kembali bahan pemblokiran dan pengikatan atau yang lebih ekstrim dengan mendesain ulang struktur belitan ujung dan mengganti seluruhnya dengan yang baru.[3]

Dalam *Prosiding 1 Day National Seminar :Power Plant RLA*, M. Fuad Hassan, Henry Pariaman Dan Bambang Anggono[4] dengan judul “*Assessment Isolasi Stator Generator menggunakan Uji Insulation Resistance, Tan Delta dan Partial Discharge*” (studi kasus pada relokasi PLTG Duri), didalam tulisannya tujuan dari penelitian ini membahas fungsi dan sasaran dilaksanakan pengujian tersebut, serta mendapatkan metode penafsiran yang lebih baik atau terbaik untuk kondisi stator generator. Dijelaskan juga metode terbaik untuk mengetahui kondisi Kesehatan generator adalah dengan membandingkan hasil uji dari beberapa tes dari waktu ke waktu pada mesin yang sama dan variable yang terkontrol yang sama.

2.2. Landasan Teori

2.2.1. Generator Sinkron

[5] Generator merupakan mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetis. Suatu generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator.



Gambar 2. 1 Komponen rotor (a) dan stator (b) generator

Pada umumnya rotor merupakan tempat dimana medan magnet dibangkitkan. Rotor generator terdiri dari 2 bagian inti rotor dan kumparan rotor. Rotor pada umumnya ditumpu pada kedua ujungnya dengan bantalan (bearing). Perlu diketahui bahwa salah satu atau bahkan kedua bantalan tersebut diisolasi terhadap pondasi (ground). Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya sirkuit yang tertutup antara rotor, bantalan dan pondasi (ground) yang dapat menimbulkan aliran arus liar ini terjadi, maka permukaan bantalan minyak pelumas akan rusak akibat efek

elektrokimia (electro chemical)

Generator yang umumnya digunakan dalam pusat listrik adalah generator tiga fasa. Ujung-ujung kumparan stator dari generator sinkron dihubungkan ke penjepit pada generator sehingga ada enam penjepit seperti terlihat pada gambar 1. Penjepit-penjepit ini umumnya diberi kode RST dan U V W. Penjepit R dan U merupakan ujung-ujung kumparan pertama, S dan V dari kumparan kedua, sedangkan dari kumparan ketiga adalah T dan W. Karena umumnya generator sinkron dirangkaikan dalam hubungan W, maka ketiga penjepit UVW dihubungkan jadi satu sebagai titik netral, seperti yang diperlihatkan pada gambar 1.



Gambar 2. 2 ujung-ujung kumparan belitan generator

Belitan stator terbuat dari batangan konduktor tembaga yang terisolasi. Batangan tersebut terdistribusi di sekeliling inti stator dengan jarak celah yang sama. Setiap celah terdiri dari dua batang konduktor, dimana satu konduktor berada di atas konduktor lainnya. Berikut adalah penampang melintang dari stator generator.

Generator sinkron menghasilkan tegangan bolak-balik (Alternating Current). Generator dikatakan sinkron apabila jumlah putaran rotor sama dengan jumlah medan magnet pada stator. Kecepatan putar rotor dengan kutub-kutub magnet yang berputar dengan kecepatan yang sama akan menghasilkan kecepatan sinkron [5]. Hubungan antara medan magnet dan frekuensi pada stator ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$f = \frac{120.n}{p} \quad (2.1)$$

Dimana:

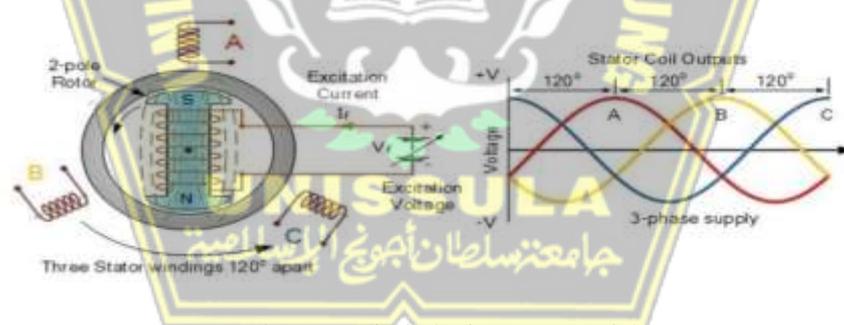
f = frekuensi (Hz)

n = kecepatan rotor (rpm)

p = jumlah kutub

Pada generator AC 3 Fasa kumparan jangkar berada pada bagian yang diam (stator) dan kumparan magnet berada pada bagian yang bergerak (rotor). Pada saat kumparan magnet di rotor diberi arus DC (penguatan) maka akan timbul medan magnet yang bergerak dari sisi kutub magnet utara ke kutub magnet selatan.

Pada saat rotor diputar oleh penggerak mula (primover) maka kumparan medan magnet akan memotong kumparan jangkar di stator sehingga pada kumparan jangkar di stator akan timbul Gaya Gerak Listrik (GGL). GGL yang timbul pada kumparan jangkar merupakan GGL bolak balik 3 fasa dimana GGL bolak balik tersebut akan dialirkan melalui terminal menuju beban listrik. Pada saat generator dibebani maka akan mengalirkan arus bolak balik 3 fasa pada beban.



Gambar 2. 3 Prinsip kerja generator sinkron

[13] Hukum induksi magnetik Faraday ini menyatakan bahwa emf yang ditimbulkan rangkaian listrik tertutup sama dengan rata-rata perubahan gaya fluks.

$$\text{Gaya fluks}(\phi) = N\phi$$

dimana N adalah jumlah putaran pada koil dan ϕ adalah fluks yang menghubungkannya. Pada banyak kasus, fluks ϕ tidak berkaitan dengan semua putaran dan semua putaran tidak berkaitan dengan fluks yang sama. Pada kondisi ini, penjumlahan semua fluks magnetik dengan putaran rangkaian magnetik menghasilkan nilai total jaringan fluks ϕ .

Total fluks sebesar :

$$\Phi = N_1\Phi_1 + N_2\Phi_2 + \dots + N_n\Phi_n = \sum_{k=1}^n N_k\Phi_k \quad (2.2)$$

dengan N_k adalah jumlah putaran yang terhubung dengan fluks Φ_k . Apabila terdapat perubahan nilai fluks pada koil, muncul emf yang dihasilkan di dalamnya dengan nilai sebesar:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Tanda negatif pada persamaan 3 menandakan bahwa arah emf induksi seperti arus yang dihasilkannya berlawanan dengan perubahan fluks.

Perubahan fluks dapat disebabkan oleh tiga hal :

- Koil tidak berubah terhadap fluks dan magnitudo fluks berubah terhadap waktu.
- Fluks tidak berubah terhadap waktu dan koil bergerak pada fluks tersebut.
- Kedua perubahan yang disebutkan diatas muncul bersamaan, artinya koil bergerak dalam waktu yang terus berjalan.

Pada metode pertama diatas, dengan koil yang tidak berubah dan fluks yang berubah terhadap waktu, dihasilkan emf yang disebut emf transformator (pulsasional). Karena tidak ada gerakan yang terjadi, maka tidak ada konversi energi dan proses yang sebenarnya terjadi adalah transfer energi. Prinsip ini digunakan pada transformator yang menggunakan koil tetap dan fluks yang berubah terhadap waktu untuk transfer energi dari suatu level ke level lainnya.

Pada metode kedua, pengaruh fluks dapat digunakan untuk menggambarkan emf yang dihasilkan pada konduktor yang bergerak pada medan stasioner yang konstan. Emf yang dibangkitkan pada konduktor yang bergerak dengan sudut yang tepat, seragam, stasioner diperoleh dengan:

$$E = Blv \quad (2.4)$$

Dimana

B = kerapatan fluks, Wb/m^2 (T')

l = panjang konduktor (m)

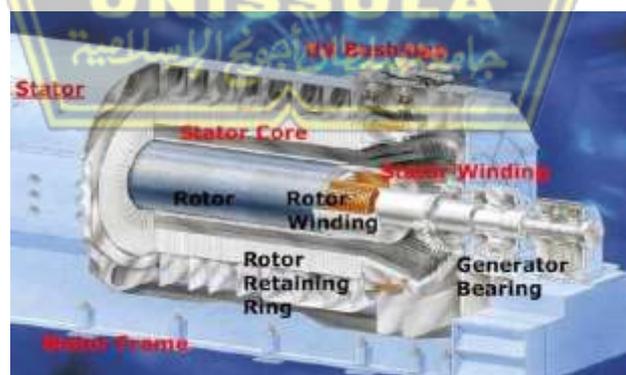
v = , m/s

Emf yang dibangkitkan pada contoh tersebut disebut dengan emf gerak karena dihasilkan dari pergerakan konduktor. Karena gerakan ikut berperan dalam membangkitkan emf ini, proses ini melibatkan konversi energi elektromagnetik. Prinsip ini dimanfaatkan pada mesin putar seperti mesin induksi DC dan mesin sinkron.

Pada metode ketiga, konduktor atau koil bergerak sepanjang medan magnetik stasioner yang berubah terhadap waktu (fluks) dan maka dari itu transformator seperti halnya emf gerak dihasilkan pada konduktor atau koil. Proses ini meliputi transfer energi dan konversi energi. Prinsip ini digunakan pada mesin putar.

2.2.2. Konstruksi Generator Sinkron

Bagian utama generator sinkron yaitu: rotor dan stator. Stator merupakan bagian diam yang menghasilkan tegangan bolak-balik. Rotor merupakan bagian bergerak yang menghasilkan medan magnet dan menginduksikannya ke stator. Kedua bagian tersebut merupakan rangkaian magnetik yang berbentuk simetris dan silindris. Selain itu generator sinkron juga mempunyai ruang celah udara antara stator dan rotor sebagai tempat timbulnya fluks listrik.



Gambar 2. 4 konstruksi generator

2.2.3. Rotor

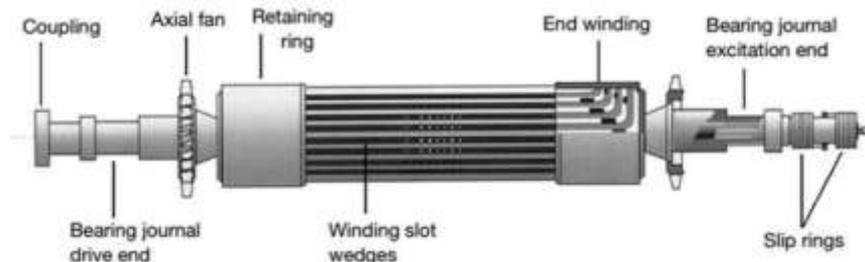
Rotor adalah bagian yang bergerak menghasilkan medan magnet yang menginduksikan ke stator. Rotor merupakan bagian yang berputar yang menghasilkan medan magnet. Sedangkan stator merupakan bagian yang diam yang menerima induksi elektromagnetis dari rotor, menghasilkan tegangan, dan terhubung dengan sistem transmisi pada jaringan tenaga listrik. Dengan demikian energi mekanik akan diberikan pada rotor sehingga dapat menghasilkan energi listrik pada stator.

Rotor terdiri dari 3 komponen utama :

a) Slip Ring Slip ring merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolator. Terminal kumparan rotor dipasang ke slip ring ini kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (brush) yang letaknya menempel pada slip ring.

b) Kumparan Rotor (kumparan medan) Kumparan rotor merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

c) Poros Rotor Poros rotor merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot – slot secara paralel terhadap poros rotor.



Gambar 2. 5 konstruksi rotor generator

2.2.4. Stator

Stator merupakan lilitan tembaga statis yang terletak mengelilingi poros utama. Fungsi stator adalah untuk membangkitkan medan magnet di sekitar rotor. Stator terdiri dari pelat - pelat besi yang disusun sama besar dengan rotor dan pada bagian dalam mempunyai banyak alur yang diberi kumparan kawat tembaga yang berisolasi. Jika kumparan stator mendapat suplai arus tiga fasa maka pada kumparan tersebut akan muncul fluks magnet putar. Pada umumnya stator merupakan tempat ggl dibangkitkan dan tempat arus beban mengalir ketika generator berbeban. Stator generator untuk pusat pembangkit listrik umumnya terdiri dari 3 bagian yaitu, rangka stator (stator frame), inti stator (stator core) dan kumparan stator (stator winding).



Gambar 2. 6 Stator

2.2.4.1 Rangka Stator

Rangka stator dibuat menyerupai tabung silinder yang bagian dalamnya diperkuat dengan rusuk-rusuk berupa lempengan-lempengan cincin baja yang dilas. Di sekeliling bagian dalam rangka silinder ini kemudian dipasang baja-baja bulat juga dilas sehingga menyerupai bentuk sangkar, rangka stator juga merupakan casing dimana inti stator, braket bantalan dan cincin segel terpasang. Desainnya ditujukan untuk menghasilkan konstruksi casing generator yang kedap udara dan mampu menahan tekanan gas sampai 10 kg/cm², dua kali lipat tekanan maksimum.



Gambar 2. 7 Rangka Stator

2.2.4.2 Inti Stator

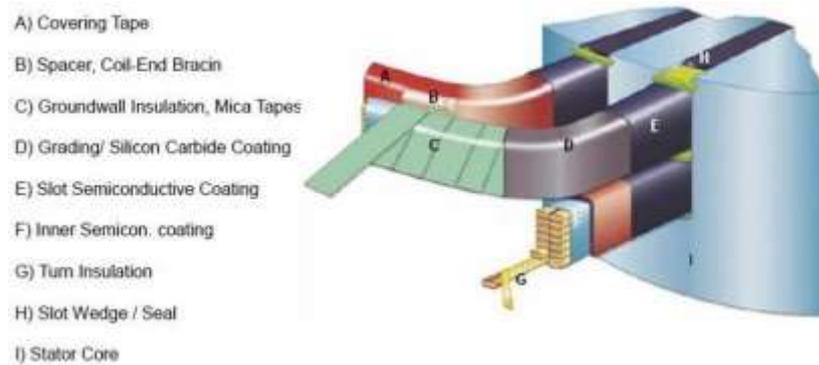
Inti stator terbuat dari segmen-segmen dimana tiap segmen tersebut terbuat dari laminasi lembaran plat baja silikon yang memiliki sifat kemagnitan sangat baik (permeabilitasnya tinggi). Ini juga merupakan bagian dimana terpasang belitan stator dan lokasi dimana terjadinya aliran induksi medan magnet. terbentuk dari susunan plat-plat besi silikon magnetik tipis dengan ketebalan 0.35-0.5 mm yang membentuk suatu cakram, dimana dibagian sisi dalam dibentuk seperti gigi yang akan membentuk slot untuk lokasi pemasangan belitan.



Gambar 2. 8 inti stator

2.2.4.3 Belitan Stator

Kumparan stator terbuat dari lempengan-lempengan tembaga berpenampang segi empat (*copper strips*) dan mempunyai konduktifitas yang tinggi, yang dililit dengan pita isolasi diseluruh permukaannya sehingga membentuk batang solid yang terisolasi. Batang tembaga berisolasi ini kemudian ditempatkan pada alur (slot) inti stator dan dikunci dengan pasak yang terbuat dari bahan isolasi.



Gambar 2. 9 belitan stator

2.2.4.4 Belitan Ujung Stator

Adalah kedua bagian ujung dari belitan stator dimana yang terdapat pada sisi turbin merupakan titik belok (bending) dan sisi exciter merupakan titik sambungan (connecting). Bagian belitan ujung ini merupakan bagian yang paling kritis, karena pada bagian inilah terdapat sambungan antar belitan dan posisinya diluar slot inti stator, sehingga memiliki resiko terhadap keretakan mekanik akibat gaya elektromagnetik saat operasi normal maupun saat kondisi gangguan hubungan pendek arus. Konstruksinya diikat pada konstruksi penahan yang dipasang pada ujung inti dan sebuah cincin lonjakan yang berbentuk lingkaran. Semua konstruksi ini terbuat dari material non-magnetik untuk meminimalisasi rugi-rugi besi dan arus eddy akibat flux yang timbul pada ujung inti.

Untuk memproteksi lilitan medan dan lilitan stator pada sistem isolasi sebuah generator dengan menyatukan beberapa material yang berbeda, sehingga pada peralatan utama memerlukan beberapa pengetesan untuk mendapatkan batasan standar isolasi. Sistem isolasi ini berhubungan dengan kekuatan dielektrik yang sudah berhasil diaplikasikan menggunakan sebuah mika dalam berbagai bentuk. Dalam penyusunannya isolasi lilitan *asphalt-mica* pada generator memiliki sejarah yang dapat menyerap kelembaban pada suatu keadaan, namun pada beberapa kasus yang membutuhkan pengeringan belitan supaya mendapatkan level resistansi sistem isolasi yang baik. Isolasi *epoxy-mica* sekarang banyak digunakan karena memiliki kekuatan mekanik dan pengendapan yang cukup baik terhadap air,

oli, ataupun kontaminasi lain yang dapat ditimbulkan oleh kondisi tidak normal.

Kualitas isolasi menjadi faktor yang harus diperhatikan untuk melakukan suatu perbaikan (*rewinding*) ataupun (*reinsulation*). Pengujian dengan tegangan tinggi pada belitan merupakan salah satu cara untuk mengetahui adanya arus bocor pada isolasi belitan. Dengan memberikan tegangan tinggi pada isolasi belitan, maka dapat menunjukkan kualitas dari isolasi terhadap tegangan kerja yang di terima.

Besarnya nilai arus bocor yang terdeteksi pada saat pengujian, menjadi parameter dari ketahanan kualitas isolasi terhadap tegangan kerja yang diterima. *Dissipation factor* atau *tan delta* adalah sebuah parameter untuk menunjukan seberapa efisien isolasi yang digunakan. Pengetesan *tan delta* sangat efektif dalam mendeteksi adanya kontaminasi sebuah isolasi, kualitas pada semikonduktor, jumlah kandungan kehampaan dan *partial discharge*.



Gambar 2. 10 konstruksi isolasi belitan stator generator

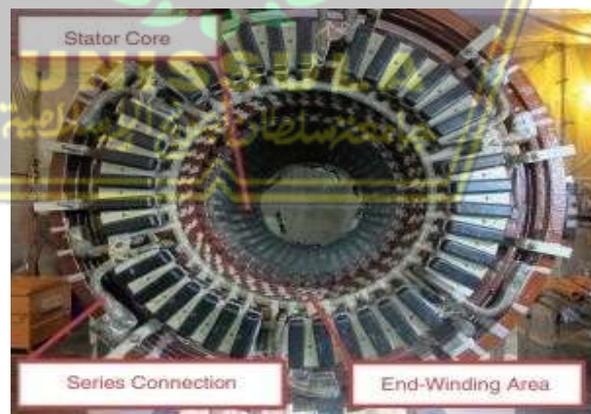
Standar sistem isolasi diklasifikasikan NEMA dengan mengacu kepada temperatur maksimum operasi dari motor dan generator. Berikut adalah tabel klasifikasi kelas temperatur motor dan generator.

Temperature Tolerance Class	Maximum Operation Temperature Allowed	
	°C	°F
A	105	221
B	130	266
F	155	311
H	180	356

Tabel 2. 1 Tabel standar kelas temperatur motor dan generator

Secara umum, motor dan generator sebaiknya tidak dioperasikan melebihi nilai maksimum temperatur yang diizinkan. Setiap kenaikan 10°C dari nilai batas yang diizinkan dapat menurunkan usia efektif generator sampai setengahnya dari usia normal. Kelas temperatur B paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 60 Hz, sedangkan kelas temperatur F paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 50 Hz.

Micadur sebagai salah satu sistem isolasi belitan stator generator kelas temperatur F, dirancang agar generator dapat beroperasi efektif selama 30 tahun dalam kondisi termal, listrik, mekanis, dan lingkungan yang optimal [7].



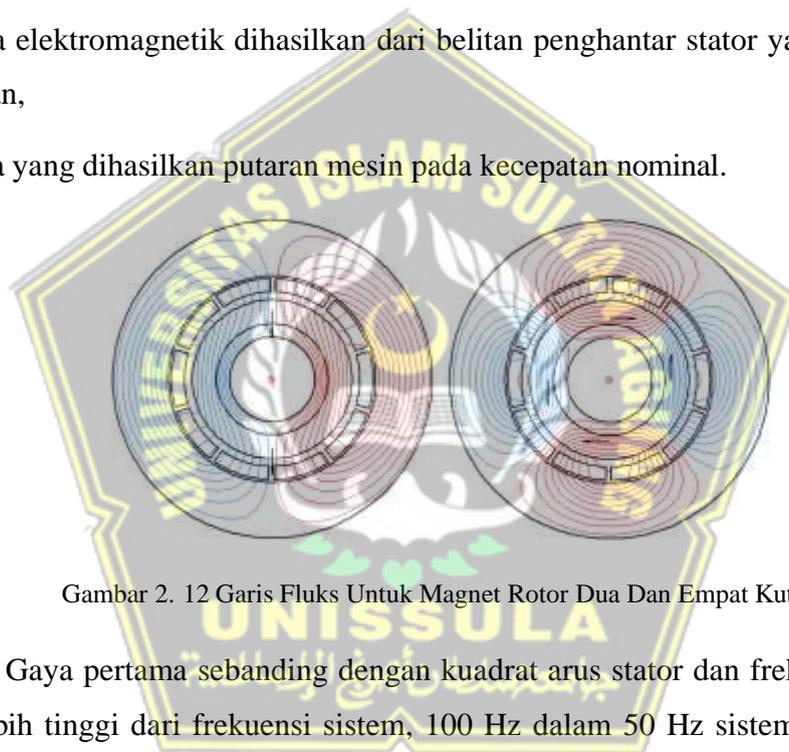
Gambar 2. 11 belitan ujung stator generator

2.2.5. Getaran Area Belitan Ujung

Fungsi utama belitan ujung stator adalah untuk memungkinkan sambungan listrik yang aman antara batang-batang seri dan paralel lainnya. Koneksi ini harus

dibuat jauh dari inti stator untuk mencegah kegagalan isolasi pada titik sambungan. Pada mesin bertegangan lebih tinggi jarak rambat yang dibutuhkan antara inti dan sambungan bisa menjadi cukup jauh. Selain itu, mesin berkecepatan lebih tinggi memiliki belitan ujung yang panjang karena alasan geometris, misalnya. 2m atau lebih. Panjang batang-batang belitan ujung yang tidak ditopang, khususnya pada mesin berkecepatan tinggi menjadi rentan terhadap gerakan berlebihan yang mengakibatkan getaran. Ada dua gaya utama yang berkontribusi terhadap getaran belitan akhir:

- 1) gaya elektromagnetik dihasilkan dari belitan penghantar stator yang membawa arus dan,
- 2) gaya yang dihasilkan putaran mesin pada kecepatan nominal.



Gambar 2. 12 Garis Fluks Untuk Magnet Rotor Dua Dan Empat Kutub

Gaya pertama sebanding dengan kuadrat arus stator dan frekuensinya dua kali lebih tinggi dari frekuensi sistem, 100 Hz dalam 50 Hz sistem, dan 120 Hz dalam sistem 60 Hz. Gaya kedua terjadi pada frekuensi sistem untuk dua kutub dan setengah dari frekuensi sistem untuk mesin empat kutub.[7]

Kekuatan-kekuatan ini dapat diukur dalam tiga arah. Mengingat tampilan akhir stator seperti ini biasanya ditentukan sebagai radial, tangensial (atau melingkar), dan aksial. Untuk elektromagnetik arah gaya yang paling diperhatikan adalah radial dan tangensial. Ini karena kekuatannya dihasilkan oleh dua konduktor pembawa arus paralel, yaitu gaya antara atas dan bawah batang (radial) dan antara dua batang yang berdekatan (tangensial). Gaya dalam arah aksial ini adalah biasanya dapat diabaikan. Gaya kecepatan belok terdapat pada tiga arah, namun

biasanya lebih besar signifikan pada arah radial dan tangensial. Untuk mengakomodasi gaya-gaya ini selama pengoperasian, setiap batang sering kali diikatkan pada cincin penyangga terbuat dari logam terisolasi. Kekuatan lingkaran cincin penyangga mencegah gerakan arah radial. Blok terisolasi yang ditempatkan di antara jeruji yang berdekatan mencegah pergerakan di dalam arah melingkar. Tergantung pada panjang lilitan ujung satu atau lebih baris pemblokiran mungkin ada. Gaya tambahan pada belitan ujung stator disebabkan oleh ekspansi termal yang mengakibatkan pertumbuhan stator batang dalam arah aksial. Desain penyangga belitan ujung adalah keseimbangan antara kekakuan yang harus dicegah pergerakan dalam arah radial dan tangensial dari gaya operasi normal dan fleksibilitas ke memungkinkan pertumbuhan karena ekspansi termal. Hal ini memerlukan karakteristik kebalikan dari kekakuan dan fleksibilitas merupakan tantangan ketika merancang sistem pendukung belitan ujung.



Gambar 2. 13 Bubuk putih disebabkan oleh getaran belitan ujung.[8]

Getaran belitan ujung akibat gerakan berlebihan pada struktur belitan ujung stator kemungkinan besar akan terjadi dalam mesin lilitan dua dan empat kutub karena belitan ujungnya panjang. Gulungan berputar di pintu keluar slot karena ditahan erat di dalam slot yang menciptakan efek kantilever di dalam daerah ujung berliku. Dukungan belitan ujung yang tepat diperlukan untuk mencegah pergerakan akibat efek ini dimana gaya getaran dapat menyebabkan retak lelah pada isolasi dan bahkan konduktor pada ujung inti atau pada sambungan. Pemburukan belitan stator mungkin disebabkan oleh buruknya desain kualitas belitan stator atau penuaan

komponen pendukung belitan ujung. Keduanya dapat menjadi faktor yang berkontribusi terhadap resonansi kondisi yang merupakan situasi ketika frekuensi natural lilitan ujung sama dengan frekuensinya gaya elektromagnetik (dua kali frekuensi sistem). Dalam hal kondisi resonansi terjadi dalam pengoperasian, getaran yang biasanya terjadi akan diperkuat secara signifikan. Sering berhenti, gangguan sistem dan penuaan, juga dapat mempengaruhi kondisi endwinding dan mengakibatkan perubahan frekuensi alami belitan.[9]

Jumlah gaya yang dihasilkan dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$F = \frac{8\pi \times 10^{-7}}{w} i m^2 [1 - \cos 2\omega t] \quad (2.5)$$

F : gaya kumparan

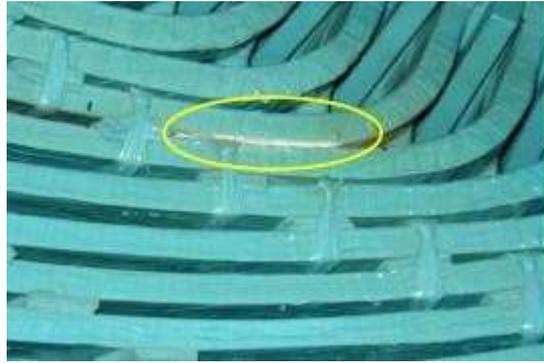
I : saat ini

w : lebar slot koil

2.2.6. Dampak Kelonggaran Ikatan Belitan Ujung

kelonggaran belitan ujung akan mengurangi struktur belitan ujung kekuasaan secara bertahap. Kelonggaran akan meningkat ketika berakhir frekuensi alami belitan tetap antara 95 hingga 115 Hz [10]. Mengoperasikan generator pada kondisi seperti ini berbahaya. Generator yang sering mengalami start stop operasi dan memiliki masalah eksternal akan memiliki risiko kegagalan yang lebih besar. Kegagalan generator karena kelonggaran belitan ujung seperti:

- ✓ Isolasi menghasilkan kerusakan hubung singkat fasa ke fasa.
- ✓ Konduktor terdampar (kumparan) retak.
- ✓ Kerusakan sambungan brazing atau berliku yang dapat menghasilkan panas yang menyebabkan korsleting.



Gambar 2. 14 PD terjadi pada dua fase yang berbeda.[8]

2.2.7. Kerusakan Perlindungan Korona

Ketika lapisan semi konduktif atau silikon karbida mengalami degradasi, akan terjadi pelepasan sebagian pada permukaan insulasi belitan stator. Dalam generator berpendingin udara, pelepasan sebagian akan menghasilkan ozon (O_3). Ozon bersifat reaktif gas kimia yang dapat dicampur dengan nitrogen dan kelembaban menjadi asam nitrat (HNO_3). Asam nitrat akan merusak lapisan anti corona yang terdiri dari bahan semi konduktif dan lapisan konduktif, memperluas penghancuran anti-korona. Corona Permukaan PD merusak lapisan anti-korona, Pelepasan sebagian yang terus berkembang dalam isolasi permukaan pelapis akan merusak epoksi insulasi utama atau biasanya disebut insulasi dinding tanah. Lubang kecil mungkin akan berkembang karena kerusakan dinding tanah yang dapat menimbulkan arus pendek

Sirkuit Peran Proteksi Korona Dalam Isolasi Belitan Stator Lapisan pelindung corona merupakan komponen isolasi yang berfungsi untuk mencegah pelepasan sebagian pada stres penilaian (overhang). Pelepasan sebagian terjadi ketika tegangan tembus isolasi lebih tinggi dari $3kV/mm$. Tegangan tembus disebabkan oleh tegangan listrik yang sangat besar daerah menjorok. Hal ini disebabkan oleh lapisan konduktif tipis yang menghasilkan ujung lapisan konduktif yang runcing. Ujung runcingnya akan mengembangkan medan listrik tidak seragam yang nilainya berlawanan dengan radius lapisan konduktif. Jari-jari yang lebih kecil atau semakin tipis lapisan konduktif maka tegangan listrik semakin besar. Listrik tegangan pada daerah overhang dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$E = \frac{2V}{r \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \quad (2.6)$$

E : tegangan listrik daya medan listrik (kV/mm)

V : tegangan saluran-tanah overhang (kV)

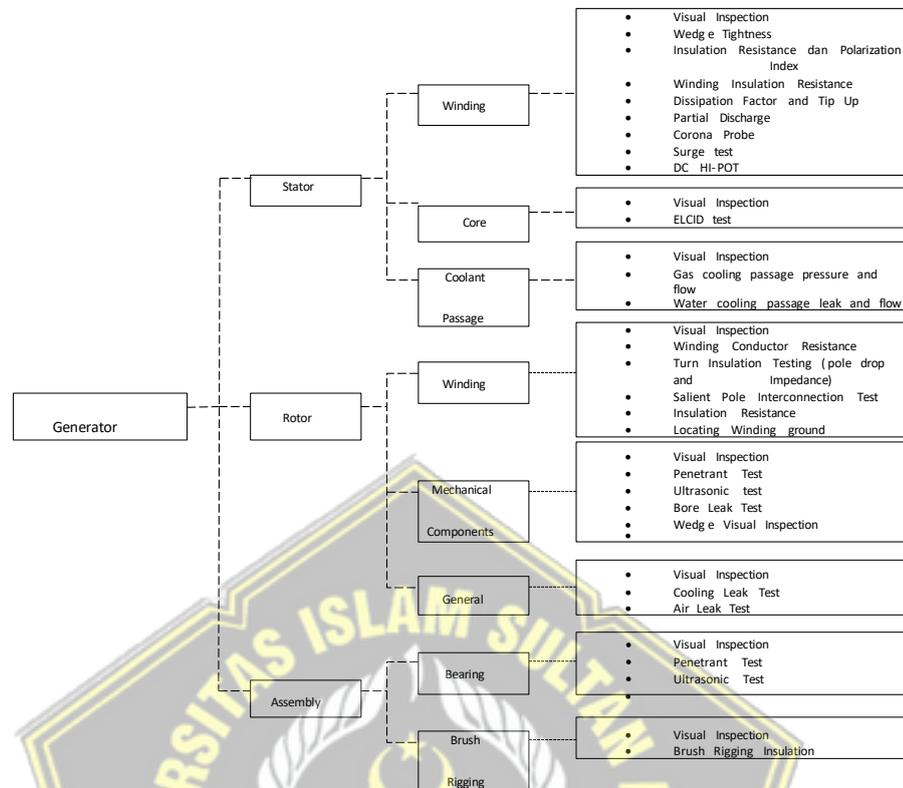
d : ketebalan isolasi utama (mm)

r : radius lapisan konduktif (mm).

[3] Untuk mengurangi tekanan listrik pada lapisan konduktif runcing, itu perlu tumpang tindih dengan lapisan semi-konduktif. Lapisan semi konduktif terdiri dari silikon karbida (SiC) yang memiliki karakteristik non linier. Jika terjadi tegangan listrik atau tegangan listrik overhang yang tinggi, resistensi SiC akan menjadi rem secara berurutan untuk menghasilkan medan listrik yang seragam. Dengan berkembangnya medan listrik seragam, tegangan listrik akan sangat rendah inti akhir.

2.2.8. Condition Assessment Generator

Penilaian kondisi generator (*Condition Assessment Generator*) merupakan persyaratan penting dari program manajemen aset yang efektif, yang dilakukan untuk mengurangi pemadaman paksa karena kegagalan yang tidak terduga atau untuk mengidentifikasi penyebab penurunan kinerja. Penilaian kondisi generator yang akurat membantu perusahaan menginvestasikan anggaran modal mereka dengan bijak dan menetapkan program pemeliharaan yang menangani komponen mesin yang paling berisiko.[11]



Gambar 2. 15 Pengujian Yang Dianjurkan menurut IEEE 62.2-2004

Banyak mekanisme kegagalan yang dapat dideteksi sejak dini melalui pengujian-pengujian elektrikal seperti pada gambar 2.23. Pengujian diatas bisa dilakukan semua maupun hanya sebagian, sesuai kebutuhan analisa pada peralatan yang akan diuji.

2.2.8.1 Inspeksi visual

Inspeksi Visual adalah Teknik NDT yang mengandalkan penglihatan, ini adalah metode pengujian yang paling umum digunakan di semua industri. Pengujian Visual secara inheren merupakan bagian dari semua metode pengujian lainnya. Metode uji visual dapat dilakukan dengan melihat spesimen secara langsung atau dapat digunakan secara tidak langsung melalui penggunaan cermin, borescope, atau melalui pengamatan jarak jauh. Inspeksi visual dapat dibantu dengan menggunakan kaca pembesar atau tanpa bantuan dengan mata telanjang. Banyak cacat yang dapat ditemukan melalui pengujian visual, termasuk retak, korosi, bagian yang tidak sejajar, dan perubahan warna.

Penggunaan visual pakar direkomendasikan sebagai bagian dari metode standar yang digunakan untuk analisis. Itu Pertanyaan yang jelas muncul adalah bagaimana menilai hasil kuantitatif yang konsisten di antara para pengawas. solusi yang diinginkan adalah dengan menetapkan nilai numerik berskala berdasarkan penilaian kondisi dari mesin. Skor pemeringkatan akan dikembangkan untuk memungkinkan hasil akhir ditentukan. Itu Konstruksi skala pemeringkatan tidak tercakup dalam makalah ini namun dianggap sebagai suatu keharusan dalam makalah ini masa depan analisis getaran belitan ujung. Penilaian kualitatif dapat dilakukan dan ambang batasnya agar penerimaan getaran dapat diidentifikasi oleh masing-masing pemeriksa berdasarkan kasus per kasus. Hasil pemeriksaan harus dibandingkan dengan hasil metode pengujian lainnya untuk membuat a penilaian akhir.

Pemeriksaan pada frame: Periksa apakah terjadi perubahan warna yang extreme pada cat frame, perubahan extreme menunjukkan adanya overheating yang dapat disebabkan oleh:

1. overloading
2. aliran pendinginan yang tidak baik

Pemeriksaan pada Stator core: Periksa apakah pada cooling duct terdapat kotoran / partikel metal oxida (tampak seperti tepung berwarna kemerahan), jika terdapat kotoran yang demikian maka hal ini menunjukkan adanya kerusakan core dan wedges

Compression Bolts: periksa jika terdapat grease, debu, minyak, dll, yang disebabkan oleh gesekan dari dua komponen mesin yang diakibatkan oleh adanya vibrasi, periksa kekencangan bolts.

Surge Ring Support: periksa jika ada keretakan dan kekencangan tali pengikatnya

Finger Plate: periksa jika ada keretakan dan pembengkokan

Winding Connection: periksa jika keretakan dan pengelupasan isolasi

Termination: periksa jika ada keretakan, kontaminasi, jamur / korosi dan kekencangan cable lug

Dirt Contamination

Pada air cooled generator dengan sistim open ventilasi, pengotoran pada winding dapat terjadi dengan mudah, jika terjadi penumpukan pengotoran pada stator mungkin akan menyebabkan tersendatnya aliran udara sehingga dapat menimbulkan pemanasan lebih pada winding

Coil dan Support : Normalnya pada sisi end winding dan antara end winding dengan connection dipasang separator yang berfungsi untuk memisahkan antar winding dan untuk menjaga jarak antar winding agar tidak berubah, selama mesin dioperasikan winding akan saling bergesekan satu sama lain sebanyak $2x$ Frequency kerja mesin.

2.2.8.2 Insulation Resistance (IR) & Polarization Index (PI) Test

Konduktor listrik pada belitan stator generator turbin (TG) diisolasi terhadap stator yang dibumikan dengan komposit mika resistansi tinggi untuk menghentikan aliran arus di luar konduktor. Kemunduran sistem insulasi akhirnya disebabkan oleh gabungan tegangan, yaitu termal, listrik, lingkungan, dan mekanis. Tekanan-tekanan ini mempunyai konsekuensi seperti perubahan kualitas insulasi, resistivitas listrik berkurang, arus bocor melalui volume insulasi meningkat, rugi-rugi dielektrik meningkat, hotspot dan kenaikan suhu, terjadi gangguan bumi dan gangguan antar belitan dan pada akhirnya terjadi kegagalan yang tidak disengaja.

Tabel 2. 2 standar nilai tahanan isolasi

Minimum insulation Resistance	Test specimen
IR1 min = $kV+1$	<i>For most windings made before about 1970, all field windings, and others not described below</i>
IR1 min = 100	<i>For most dc armature and ac windings built after about 1970 (form wound coils)</i>
IR1 min = 5	<i>For most machines with random-wound stator coils and form wound coils rated below 1kV</i>

Standar sistem isolasi diklasifikasikan NEMA dengan mengacu kepada

temperatur maksimum operasi dari motor dan generator. Berikut adalah tabel klasifikasi kelas temperatur motor dan generator.

Temperature Tolerance Class	Maximum Operation Temperature Allowed	
	°C	°F
A	105	221
B	130	266
F	155	311
H	180	356

Tabel 2. 3 Tabel standar kelas temperatur motor dan generator

Secara umum, motor dan generator sebaiknya tidak dioperasikan melebihi nilai maksimum temperatur yang diizinkan. Setiap kenaikan 10°C dari nilai batas yang diizinkan dapat menurunkan usia efektif generator sampai setengahnya dari usia normal. Kelas temperatur B paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 60 Hz, sedangkan kelas temperatur F paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 50 Hz.

Karena umur generator utamanya tergantung pada keadaan insulasinya, kondisi insulasi harus diperhatikan dan diukur secara teratur. Dalam hal ini, pengukuran IR dan PI adalah dua metode yang secara universal diterima sebagai bentuk diagnosa kondisi insulasi tersebut. Kedua metode ini telah digunakan selama lebih dari 75 tahun. Pengujian IR mengukur tahanan dari insulasi elektrik antara penghantar tembaga dan inti stator atau rotor. Idealnya, nilai tahanan insulasi ini tak terhingga (infinite) karena tujuan dari insulasi sendiri adalah menghalangi aliran arus antar penghantar tembaga dengan inti. Tapi pada kenyataannya, hal ini tidak memungkinkan. Untuk itu nilai tahanan insulasi harus bernilai tinggi untuk menghindari arus bocor yang kentara atau besar. Nilai IR yang rendah menunjukkan bahwa bahan insulasi tadi telah menurun kemampuannya atau rusak.

Pengujian Polarity Index (PI) adalah variasi dari pengujian IR, yang mana PI adalah perbandingan nilai IR 10 menit dan nilai IR 1 menit, sehingga:

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (2.7)$$

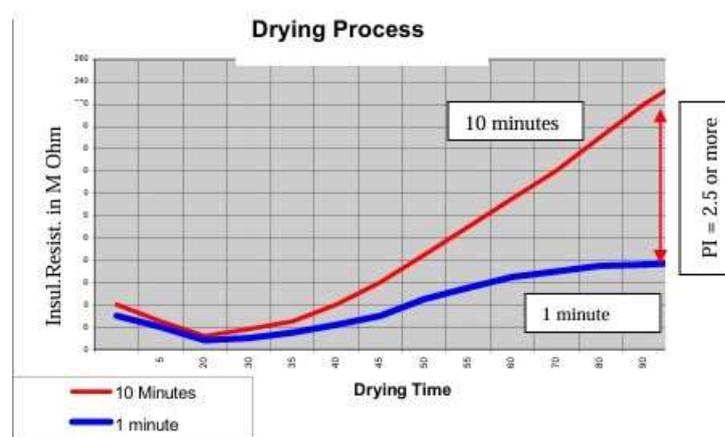
Nilai PI yang rendah menandakan bahwa belitan kumparan bisa saja telah terkontaminasi oli, debu koran dan lain-lain atau uap air. Pada pengujian ini, tegangan DC yang relatif tinggi diberikan antara penghantar tembaga belitan dengan inti rotor atau stator, atau gampangnya antara belitan dengan grounding karena inti dan bodi mesin dibumikan. Dengan menerapkan Hukum Ohm, IR (R_t) pada waktu t adalah:

$$R_t = \frac{V_o}{I_{t1}} \quad (2.8)$$

Dengan V adalah tegangan DC yang diberikan dan I adalah besar arus yang mengalir dalam rangkaian.

Tujuan penggunaan uji IR dan PI [2] :

- Sebagai historical data pada suatu mesin, diukur pada kondisi variabel terkendali yang seragam. Diakui sebagai cara yang berguna untuk trending beberapa aspek kondisi isolasi selama bertahun-tahun.
- Estimasi kesiapan peralatan untuk penerapan tes tegangan tinggi atau untuk beroperasi.



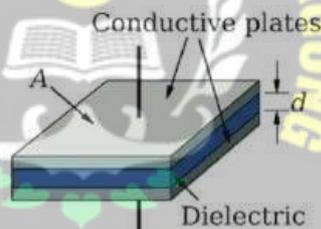
Gambar 2. 16 kurva nilai PI berdasarkan waktu

Tabel 2. 4 standar nilai PI belitan stator

Nilai PI	Keterangan	Tindakan
<1.0	Berbahaya	Keringkan belitan
1-1.5	Buruk	Keringkan belitan
1.5-2.0	Diragukan	Keringkan belitan
2.0-3.0	Cukup	
3.0-4.0	Baik	
>4	Sangat baik	

2.2.8.3 Dissipation Factor

[5]Tan Delta atau dissipation factor atau dielectric loss merupakan bilangan tanpa dimensi yang menunjukkan nilai tahanan isolasi. Idealnya isolasi yang baik tidak mengkonduksikan listrik sama sekali. Namun untuk mencapai hal itu sangatlah sulit sekali, maka akan tetap menjadi konduktor dan mengalirkan sejumlah arus dan menjadi *loss*.



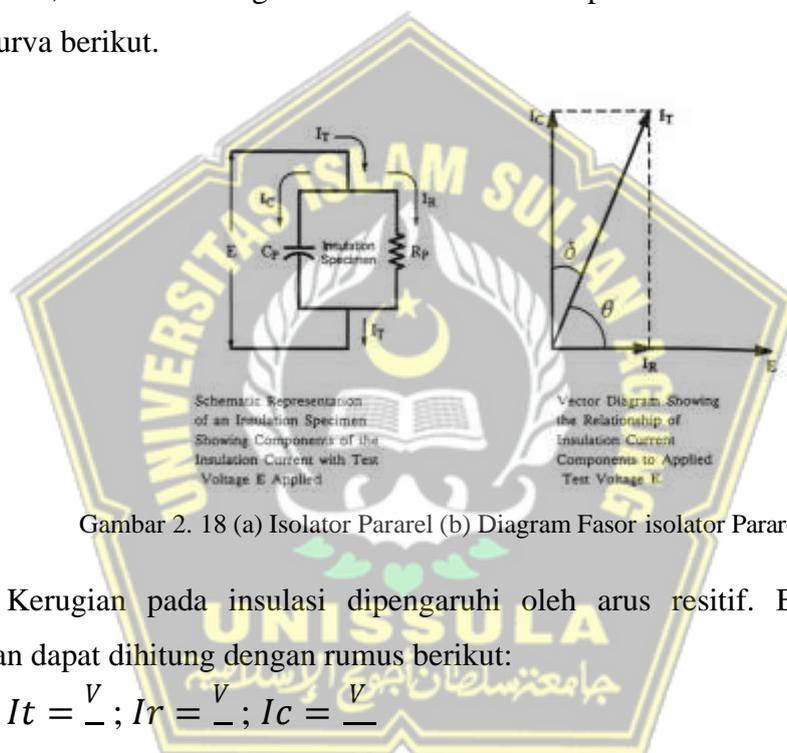
Gambar 2. 17 model insulasi dengan kapasitor

Pada isolasi dengan material yang baik, memiliki *losses* cukup rendah maka tidak memberikan efek merusak terhadap isolasi. Pengujian *tan delta* berfungsi untuk memeriksa *losses* yang terjadi atau juga bisa sebagai *quality control*. Maka dari itu pengujian *tan delta* sering digunakan oleh perusahaan untuk memeriksa kondisi isolasi dari peralatannya. Karena *tan delta* dapat mendeteksi kondisi resin insulasi dalam keadaan *undercured* atau kontaminasi.

Insulasi atau isolasi sesuai dengan namanya berfungsi sebagai penyekat arus listrik. Ketika dua konduktor diletakkan secara berhimpitan, maka insulasi berada diantaranya. Teori ini sama seperti halnya kapasitor. Apabila tegangan (DC)

diinjeksikan terhadap konduktor, maka arus charging kapasitif yang kuat mengalir pada isolator, hal ini yang dapat mengakibatkan arus bocor. Arus bocor yang mengalir melewati isolator berbanding lurus dengan tegangan dan berbanding terbalik dengan tahanan isolasi. Inilah yang menjadi prinsip dasar dari pengukuran tahanan isolasi atau megger tes.

Pada kenyataanya isolasi mengalami kebocoran terhadap tegangan, hal itu di karenakan adanya sifat resistif pada isolasi. Dengan demikian saat tegangan (AC) diinjeksikan, arus total mengalir I_t terdiri dari arus kapasitif I_c arus resistif I_r seperti pada kurva berikut.



Gambar 2. 18 (a) Isolator Pararel (b) Diagram Fasor isolator Pararel

Kerugian pada insulasi dipengaruhi oleh arus resistif. Besarnya nilai kerugian dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$I_t = \frac{V}{Z}; I_r = \frac{V}{R}; I_c = \frac{V}{X_c} \quad (2.9)$$

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{V^2}{R} = \frac{X_c}{R} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C R} \quad (2.10)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C p R p} \quad (2.11)$$

Dimana R_s dapat kita cari terlebih dahulu dengan rumus:

$$R_p = \frac{P}{I^2}$$

Keterangan:

V = Tegangan (V)

$\omega = 2\pi f C$ = Kapasitansi (F)

P_{loss} = Losses Daya (W)

R = Nilai Resistansi (Ω)

Sementara tangen delta sendiri merupakan hasil dari perbandingan antara arus resistif dengan arus kapasitif, dimana rumus tangen delta yang di dapat sebagai berikut.

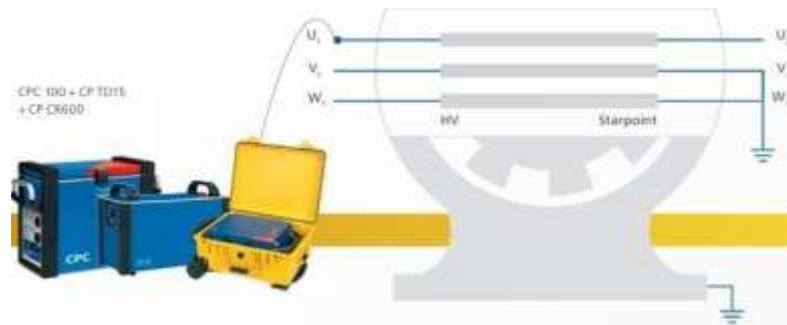
Kelebihan Tan Delta

Pada dasarnya pengujian tan delta merupakan tes diagnosis yang dilakukan pada isolasi kabel, coil dan belitan. Ini digunakan untuk tingkat degradasi kombinasi bahan-bahan isolasi pada peralatan mesin-mesin listrik, kabel dan belitan. Pengujian tan delta beroperasi sesuai dengan prinsip bahwa setiap isolasi murni adalah bertindak sebagai kapasitor.

Pengujian tan delta dapat memberikan hasil tangent dari sudut I_r / I_c yang memberikan suatu kondisi dari isolasi suatu peralatan. Semakin tinggi nilai sudut loss maka hasil akan menunjukkan tingginya tingkat kontaminasi pada isolasi. Dengan aplikasi dan interpretasi yang tepat pada pengujian tan delta, kondisi isolasi belitan dapat dimonitor dan dijaga untuk tetap dalam kondisi sesuai standart.

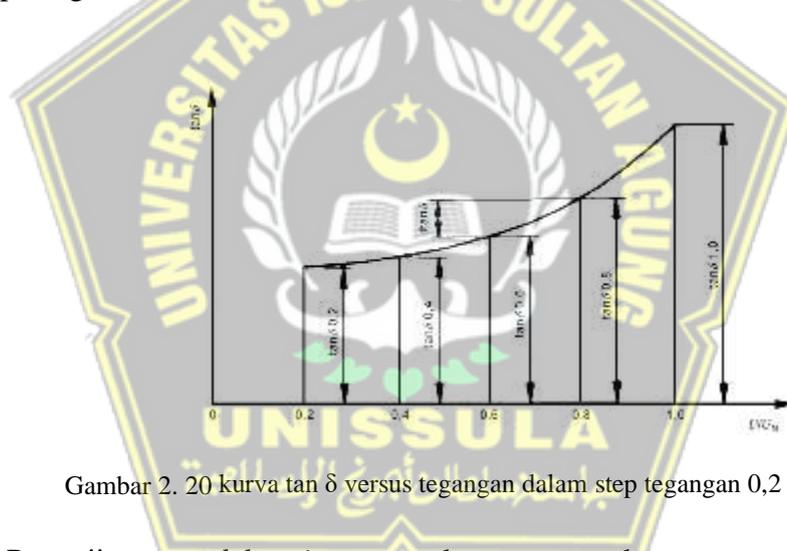
Pengujian tan delta juga dapat dilakukan pada mesin-mesin listrik yang telah selesai dilakukan maintenance untuk mengetahui kondisi belitan dan usia pakai dari peralatan.

Untuk memenuhi standar tersebut maka dilakukan pengujian *tan delta* dengan metode *power factor* dan *tip-up power factor (dissipation factor, tan delta)*. Pengukuran *tan delta* dilakukan dengan injeksi tegangan AC (*sinusoidal*) dengan harmonisa rendah sesuai dengan IEC 60034-27-3: 2015.



Gambar 2. 19 koneksi pengukuran tan delta tes

Tan delta biasanya diukur pada rentang tegangan U/U_n dimulai dari 0,2 U_n (*phase-phase*) sampai ke tegangan pengenalan 1,0 U_n (*phase-phase*). Nilai dari *tan delta* didapatkan pada setiap interval 0,2 U_n . Diagram interval pengujian dapat dilihat pada gambar berikut:

Gambar 2. 20 kurva $\tan \delta$ versus tegangan dalam step tegangan 0,2 U_n

Pengujian *tan delta tip-up* untuk generator dengan tegangan pengenalan sampai dengan 21 kV dilakukan injeksi tegangan sampai dengan 0,6 U_n (IEC 60034-27-3:2015) atau $U_n/13$ (IEEE 286-2000). Kriteria nilai *tan delta* mengacu pada Tabel.

Tabel 2. 5 Nilai Karakteristik *tan delta* generator

Nilai karakteristik yang terukur pada suhu ruang (25 °C)		
1	Nilai inisial dari <i>tan delta</i> pada 0,2 U_n - $\tan \delta_{0,2}$	20×10^{-3}
2	<i>Tan delta tip-up</i> antara 0,6 U_n dan 0,2 U_n - ($\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}$)	5×10^{-3}

Jika nilai *tan delta* melebihi batasan pada Tabel 3.4 maka evaluasi kondisi generator dapat merujuk pada data pabrikan, data riwayat pengukuran sebelumnya atau data komisioning.

Untuk tegangan pengenal generator di atas 21 kV nilai *tan delta* harus ditentukan dengan persetujuan khusus.

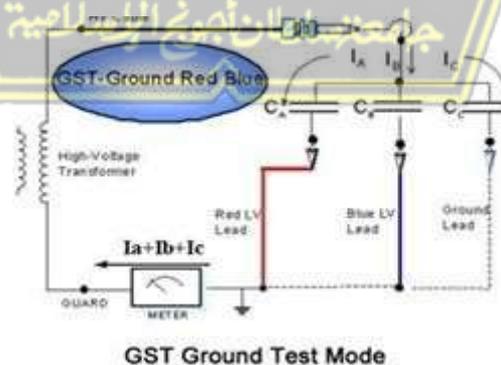
Pengujian belitan *stator* baru dapat dijadikan sebagai titik acuan terhadap *trending* data kondisi penuaan sistem *insulasi*. Variasi nilai *tan delta* pada periode pengukuran yang berbeda mengindikasikan perubahan kondisi *insulasi*, *conductive slot coating*, *stress control coating*, *end winding*, atau *slot support systems*.

Untuk pengujian generator dengan sistem pendinginan hidrogen dan air (*Generator Stator Cooling Water/GSCW*) dengan kondisi pompa sirkulasi GSCW beroperasi (kondisi basah) konduktivitas air tidak boleh lebih dari 0.25 *microsiemens per centimeter* (uS/cm) berdasarkan standar IEEE 286-2000. Apabila generator SCW diuji pada kondisi kering (air pendingin belitan generator dikosongkan/*drain*), maka nilai IR dan PI harus memenuhi.

Pada pengujian *tan delta* terdapat beberapa metode yang sering digunakan yaitu:

a. Mode GST (Grounded Speciment Test)

Pemasangan koneksi pada mode GST ditunjukkan pada gambar sebagai berikut:

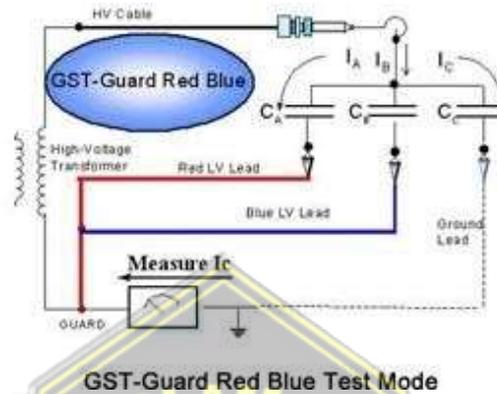


Gambar 2. 21 Koneksi mode GST

Merupakan mode pengujian *tan delta*, yang mana nilai kapasitansi yang digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi obyek yang diuji terhadap ground.

b. Mode GSTG (Grounded Speciment Test Guard)

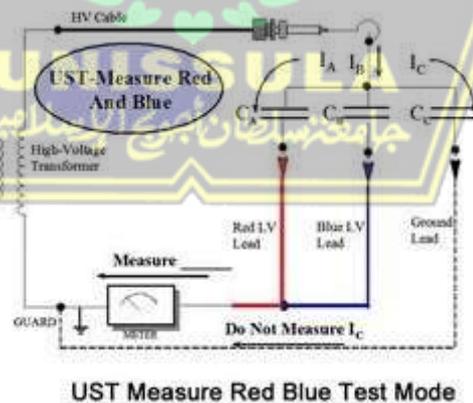
Pemasangan koneksi pada mode GST-Guard ditunjukkan pada gambarr 2.22 sebagai berikut:



Gambar 2. 22 Koneksi mode GST-Guard

Merupakan mode pengujian tan delta, yang mana nilai kapasitansi yang digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi obek yang diuji terhadap ground dan membatasi kapasitansi obyek lain yang mempengaruhi nilai kapasitansi.

c. Mode UST (Ungrounded Speciment Test) Pemasangan koneksi pada mode UST ditunjukkan pada gambarr 2.23 aebagai berikut:



Gambar 2. 23 Koneksi mode UST

Merupakan mode pengujian tan delta, yang mana nilai kapasitansi yang digunakan sebagai referensi pengujian adalah kapasitansi antara dua obyek yang sama sekali tidak terhubung dengan ground.

d. Hot Collar Mode pengujian ini sangat efektif untuk mengetahui lokasi keretakan pada porcelain, pemburukan atau kontaminasi pada permukaan bushing seperti lapisan tipis compound, cairan atau sisa compound yang menempel pada bushing.

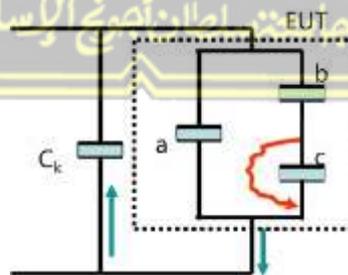
2.2.8.4 Partial discharge

PD menurut IEC 60270 adalah peluahan listrik lokal yang hanya menjembatani sebagian isolasi di antara konduktor dan yang mungkin terjadi dekat dengan konduktor.

Partial Discharge atau PD adalah sebuah fenomena pada tegangan tinggi atau tegangan menengah yang biasanya terjadi pada isolator. PD adalah fenomena peluahan muatan elektrik yang bisa menjembatani sistem isolasi baik secara sebagian ataupun menyeluruh di dalam suatu isolator.

Secara sederhana dapat diartikan Partial discharge merupakan proses atau peristiwa pelepasan atau loncatan elektron dan proton (jika sudah besar dapat terjadi bunga api listrik) yang terjadi pada suatu bagian bahan isolasi yang disebabkan oleh adanya beda potensial yang tinggi dalam bahan isolasi

PD biasanya terjadi pada isolator yang terdapat void (rongga), crack, atau kecacatan lain yang diakibatkan faktor usia atau faktor cacat produksi pabrikan. Bisa juga terjadi karena ada kotoran atau unsur garam pada isolator. PD juga dapat terjadi jika ada runcing atau tonjolan pada suatu isolator.



Gambar 2. 24 pengukuran partial discharge

Kapasitor kopling (C_k) diperlukan untuk memaksa arus PD keluar keluar. C_k bertindak sebagai EUT utama kapasitansi, a, di sebelumnya tetapi itu adalah fisik eksternal komponen (dimungkinkan untuk mengukur arus yang mengalir melaluinya)

$$[Q_{app} = bV_c = (a + C_k + b) \cdot \Delta V] \quad (2.12)$$

Keterangan :

C = kapasitansi rongga

b = kapasitansi dielektrik yang dirangkai seri dengan rongga

a = kapasitansi sisa bagian sistem isolasi

C_k = kapasitor kopling

Q_{app} = muatan nyata

2.2.8.4.1 Klasifikasi Partial Discharge

Sumber Partial Discharge dapat diklasifikasikan kedalam 3 kelompok yaitu :

1. Internal Discharge : Partial Discharge yang terjadi di dalam isolator
2. Surface Discharge : Partial Discharge yang terjadi pada permukaan isolator
3. Korona : Partial Discharge yang terjadi karena ada bagian runcing pada isolator (karena akan ada konsentrasi medan di sekitar bagian runcing) atau isolator yang kotor.



Gambar 2. 25 partial discharge

2.2.8.4.2 Partial Discharge Pada Stator Generator

Berdasarkan lokasi terjadinya proses partial discharge pada belitan stator generator, secara umum dapat dibedakan menjadi:

1. Partial Discharge Pada Bagian Celah Stator Atau Slot Discharge

Slot discharge terjadi jika terdapat kerusakan proteksi korona dan adanya ketidaksempurnaan proses injeksi resin diantara isolasi belitan dengan celah stator generator. Umumnya pada generator dengan tegangan di atas 6 kV terdapat slot discharge dengan nilai tertentu akibat adanya void kecil pada

isolasi dan adanya kerusakan kecil pada proteksi korona. Kerusakan pada proteksi korona dapat diakibatkan oleh adanya vibrasi pada belitan stator, yang berakibat pada abrasi permukaan isolasi karena adanya gesekan dengan dinding celah.

2. Partial Discharge Internal Atau Internal Discharge

Internal discharge terjadi jika terdapat void di dalam isolasi. Void ini timbul karena proses yang tidak sempurna pada proses manufaktur. Peluahan akan terjadi pada void tersebut dan secara perlahan-lahan menimbulkan pohon listrik yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan.

3. Partial Discharge Pada Bagian Permukaan Atau Surface Discharge

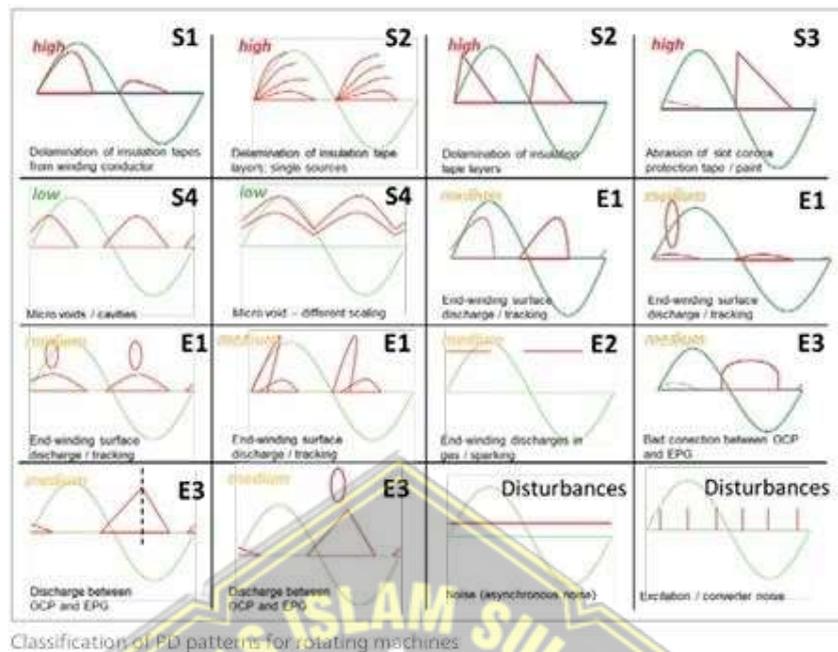
Jika terdapat kontaminan pada permukaan isolasi seperti garam, debu, oli maka akan terjadi peningkatan aliran listrik pada permukaan isolasi. Jika terjadi surface discharge maka pada permukaan isolasi akan terjadi proses karbonisasi berbentuk warna hitam atau hotspot akibat panas yang ditimbulkan oleh peluahan, yang dalam periode tertentu dapat membentuk pohon listrik pada permukaan isolasi. Dalam jangka waktu tertentu, karbonisasi tersebut akan meluas dan membesar ke arah dalam sehingga terjadi ground fault pada stator.

4. Partial Discharge Pada Belitan Akhir Atau Endwinding Discharge

Peluahan ini terjadi secara langsung antara belitan dari fasa yang berbeda di daerah belitan akhir. Hal ini terjadi karena adanya kontaminasi debu atau oli yang bersifat konduktif pada permukaan isolasi di daerah tersebut.

2.2.8.4.3 Interpretasi Grafik Pola PD Pada Mesin Berputar

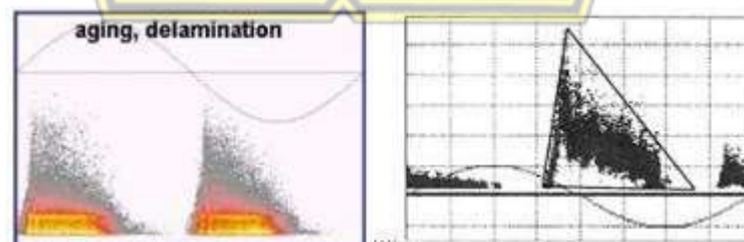
Intepretasi grafik pola PD dilakukan berdasarkan data empiris dari PD Tech Power Engineering AG. Intepretasi grafik pola PD menghasilkan jenis PD yang terjadi pada stator generator.



Gambar 2. 26 pola PD untuk mesin berputar

A. Partial Discharge Pada Bagian Celah Stator Atau Slot Discharge

Kerusakan paling berbahaya terjadi pada bagian celah stator generator. Hal ini biasanya disebabkan oleh vibrasi yang dapat merusak isolasi celah stator. Pola PD yang dihasilkan berbentuk asimetris dengan nilai magnitudo pada siklus negatif lebih besar dari siklus positif. Grafik berbentuk segitiga dengan nilai puncak yang berada pada sudut fasa 0° . Siklus negatif dengan amplitudo sekitar 10nC .



Gambar 2. 27 Pola keluaran PD pada bagian celah stator

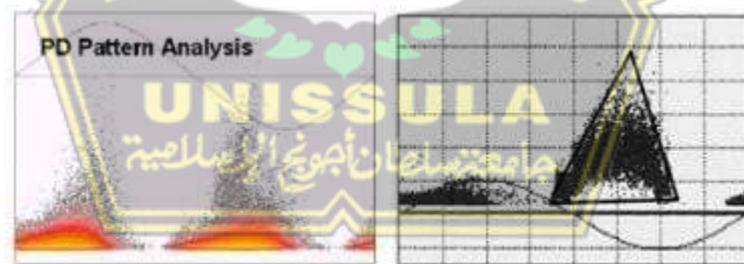
Lokasi peluahan pada celah stator digambarkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 28 Lokasi peluahan pada celah stator

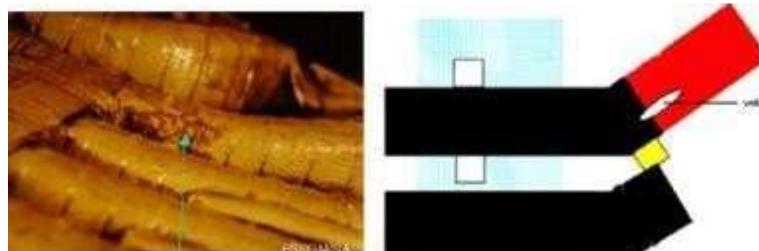
B. Eksternal discharge, partial discharge pada belitan akhir stator atau end winding discharge

PD pada bagian akhir stator terjadi karena adanya kontaminasi permukaan, penuaan generator, atau desain yang tidak sesuai. Jika dilakukan inspeksi visual, maka akan ditemukan bubuk putih pada permukaan stator generator dibagian belitan akhir. Grafik pola PD yang dihasilkan memiliki kemiripan dengan grafik peluahan pada celah stator. Akan tetapi, puncak pola segitiga yang terbentuk lebih berorientasi pada tegangan maksimum yakni sudut fasa 270° .



Gambar 2. 29 Pola keluaran PD pada belitan akhir stator

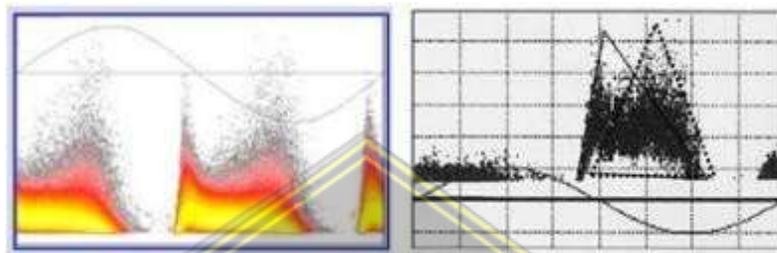
Lokasi peluahan pada belitan akhir stator digambarkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 30 Lokasi peluahan pada belitan akhir stator

C. Partial discharge yang terjadi pada slot discharge dan end winding

Peluhan pada slot dan endwinding terjadi dikarenakan kondisi pada stator generator yang sudah tidak baik disebabkan oleh berbagai faktor. Intepretasi pola grafiknya digambarkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 31 Peluahan pada celah stator dan end winding

D. Partial discharge internal

Pada umumnya, pola yang terbentuk menyerupai dua pola segitiga yang simetris di siklus tegangan positif dan negative. Titik puncak dua segitiga yang simetris tersebut terletak pada sudut fasa 30° di siklus positif dan 210° di siklus negatif. Jika dilakukan inspeksi visual atau pada saat dilakukan pembersihan belitan stator akan terlihat kerusakan pada pita terluar lapisan belitan stator.



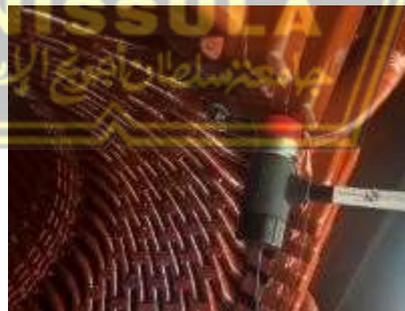
Gambar 2. 32 Pola keluaran PD pada peluahan internal



Gambar 2. 33 lokasi peluahan internal

2.2.8.5 Bump Test (Uji Getaran)

Pengujian “benturan” adalah cara terbaik untuk memastikan tidak terjadi getaran yang merusak pada lilitan ujung terjadi pada generator.[12] Sebaiknya, setiap mesin 2 dan 4 kutub harus diberikan uji benturan setelah proses manufaktur ataupun perbaikan untuk menemukan frekuensi alami global dan lokal serta bentuk mode belitan ujung, di sisi eksiter dan sisi turbin. Namun, pengujian tersebut tidak akan menemukan masalah yang terkait dengan manufaktur misalnya, pemblokiran antar belitan yang salah tempat, impregnasi yang buruk dengan resin pengikat, roving yang terlewat, dll. Uji coba ini melibatkan pemukulan lilitan ujung dan pengukuran respon lilitan ujung dengan akselerometer piezoelektrik di beberapa lokasi.



Gambar 2. 34 uji benturan pada ujung belitan sisi eksiter

Perlengkapan yang dibutuhkan antara lain:

1. Sebuah "palu terkalibrasi" dengan massa sekitar 0,5 kg yang dapat berdampak pada belitan ujung dan mengukur besarnya gaya tumbukan dengan transduser yang dipasang pada palu.

2. Akselerometer pendeteksi yang diikat sementara pada kumparan/batang (biasanya dengan lilin lebah). Setidaknya diperlukan dua akselerometer atau satu akselerometer sumbu ganda untuk mengukur getaran dalam arah melingkar dan radial. Akselerometer triaksial dapat menyediakan informasi respons dalam arah aksial juga.
3. Penganalisis spektrum jenis Fast Fourier Transform (FFT) yang dapat merespons frekuensi naik hingga sekitar 10 kHz untuk secara bersamaan menangkap masukan gaya dan tiga akselerometer tanggapan menghasilkan fungsi transfer respons frekuensi untuk analisis. Gambar 7 menunjukkan plot percepatan yang dinormalisasi sebagai fungsi frekuensi.
4. Untuk analisis struktur tingkat lanjut, perangkat lunak untuk menghitung tabel bentuk mode getaran.

Pada unit generator, natural frekuensi dari komponen generator (dalam hal ini adalah winding stator) didesain untuk tidak mendekati nilai eksitasi getaran, yaitu kecepatan putar (3000rpm atau 50 Hz) dan harmonik kedua atau 2X line frekuensinya (100Hz). Standard IEEE 1665-2009 mengatur nilai natural frekuensi yang diperbolehkan adalah ± 10 Hz dari nilai 50 Hz dan 100Hz.

Pada Standard GB/T20140-2006 turbine generator. Natural frekuensi harus menghindari 100hz, persyaratan khususnya sebagai berikut:

额定转速 r/min Specified speed	支持形式 support form	引线固有频率/Hz the natural frequency of the lead	整体椭圆固有频率/Hz the overall elliptic natural frequency
3000	刚性支持 Rigid support	≤ 95 ≥ 108	≤ 95 ≥ 110
	柔性支持 Flexible supporting	≤ 95 ≥ 108	≤ 95 ≥ 112
3600	刚性支持 Rigid support	≤ 114 ≥ 130	≤ 114 ≥ 132
	柔性支持 Flexible supporting	≤ 114 ≥ 130	≤ 114 ≥ 134

1. Menurut technical report dan China standard GB/T20140-2006 natural frekuensi (FRF) $<40 - f_n > 65$ dan $f_n < 95 - f_n > 108$

2. Kategori

a. GOOD : apabila FRF tidak berada pada standar point A(tidak berada pada kedua standar-nya)

b. MEDIUM : apabila FRF berada pada frekuensi point A(berada pada satu standar atau kedua standar), tp nilai amplitude-nya berada di bawah 0,1 g/lbf

c. BAD : apabila FRF berada pada frekuensi point A(berada pada satu standar atau kedua standar) dan nilai amplitude-nya berada di atas 0,1 g/lbf

3. Apabila kategori :

a. GOOD : tidak diperlukan tying, visual inspection terutama pada coil antar fase

b. MEDIUM : Lakukan tying untuk menggeser ke frekuensi di luar standarnya. Jika sudah tidak ada space, maka pastikan nilai amplitude-nya semakin kecil

c. BAD : Lakukan tying untuk menggeser ke frekuensi di luar standarnya. Jika sudah mentok lakukan tying hingga nilai amplitudanya tidak lebih 0,1 g/lbf



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian

Objek yang diteliti yaitu generator unit 2 karena bertepatan dengan major overhaul yang dilakukan pada tahun 2023, dimana dilakukan pembongkaran dengan mengeluarkan rotor generator, sehingga dapat dilakukan pengujian secara menyeluruh. Studi literatur yang merupakan kumpulan beberapa jurnal dan artikel yang berhubungan dengan isolasi dan manual book data pabrikan generator #2 yang menjadi referensi dalam pemahaman mengenai pengujian tahanan isolasi stator. Pengumpulan data yang didapatkan berasal dari riwayat pengujian dan pengujian langsung dari lapangan. Beberapa pengujian yang dianjurkan menurut buku manual, yaitu Visual Inspeksi, uji IR (*Insulation Resistance*), PI (*Polarization Index*), *Dissipation Factor*, dan PD (*partial discharge*). Jika hasil dari rangkaian uji tersebut memenuhi standar maka kondisi isolasi belitan generator dalam kondisi baik dan aman untuk dioperasikan.

3.2. Metode Pengujian

3.2.1 Visual inspeksi

Tujuan dilakukan Visual Inspeksi adalah melihat langsung dengan mata telanjang kondisi peralatan dan selanjutnya kita dapat menentukan pengujian apa saja yang harus dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil temuan visual inspeksi. Stator terdiri dari sistem bahan organik dan anorganik yang bekerja bersama dalam kondisi ekstrem dan beroperasi selama bertahun-tahun, sebelum pengujian kelistrikan dilakukan, inspeksi visual dilakukan terlebih dahulu.

Sebagai Data dalam visual inspeksi ini di ambil dari satu unit generator yaitu Unit 2 yang sedang dilakukan *Major Overhaul* atau pemeliharaan dalam lingkup yang besar. Adapun spesifikasi dari generator tersebut adalah sebagai berikut:

Spesifikasi

Pabrik Pembuat : Harbin Electric
 Tahun Pembuatan : 2011
 Tipe/Model : Sinkron/QFSN-350-2
 Daya Keluaran : 412 MVA
 Tegangan : 20 kV
 Arus : 11887 A
 Frekuensi : 50 Hz
 Power factor : 0,85 (lag)
 Putaran : 3000 Rpm
 Jumlah Phasa : 3
 Kelas Isolasi : F
 Tipe Isolasi : Epoxy Mica
 Tipe koneksi : YY
 Tipe pendingin : air-hidrogen-hidrogen

TURBOGENERATOR INSPECTION AND TEST REPORT

Form 4: Stator Inspection Items

Type of blocking: Maple _____; Textolite _____; Conforming _____; Felt _____
 End-winding makeup: Z-ring _____; Radius strip _____; Sausages _____; Other _____
 Ties: Glass roving _____; Flax _____; Other _____
 Type of wedges: Flat _____; Piggyback _____; Other _____
 Type of side fillers: Flat _____; Ripple spring _____; Nonexisting _____
 Top ripple filler?: Yes _____; No _____
 Boroscopic inspection of the air/gas-duct area performed? Yes _____; No _____
 If wedge survey performed: % of loose wedges _____; % of hollow wedges _____
 Number of damaged resistors in nose of water-cooled windings _____
 Number of damaged resistors in nose of directly H₂-cooled windings _____
 "O" for satisfactory
 "X" for unsatisfactory

Item	Description	N/A	O/X	Corrective Action
S01	Cleanliness of bore (oil, dust, etc.)			
S02	Air/gas radial ducts clogged?			
S03	Iron oxide deposits?			
S04	End-winding hardware condition (bolts, nuts, etc.)			
S05	HV bushings			
S06	Stand-off insulators			
S07	Bushing vents clogged?			
S08	Greasing/red-oxide deposits on core bolts?			

Gambar 3. 1 form inspeksi visual stator generator

3.2.2 Insulation Resistance Test & Polarization Index Test

Pengukuran nilai IR (Insulation Resistance) & PI (Polarization Index) akan dilakukan bersamaan. Jika suhu belitan berada di bawah titik embun, belitan mungkin harus dipanaskan terlebih dahulu untuk mengeringkan uap air yang mengembun pada belitan.

Prosedurnya adalah sebagai berikut:

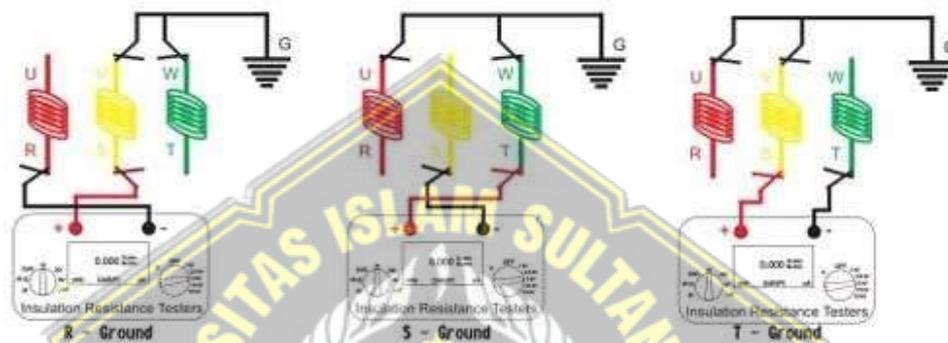
- 1) Cek baterai apakah dalam kondisi baik.
- 2) Lakukan elektrikal zero check:
 - a. Pasang kabel test pada insulation tester terminal serta hubung singkatkan ujung yang lain.
 - b. Letakkan saklar pemilih di posisi 500.
 - c. On-kan insulation tester, angka akan muncul dan harus menunjuk tepat keangka nol.
- 3) Pasang kabel test ke peralatan yang diukur .
- 4) Pilih tegangan ukur melalui saklar sesuai tegangan kerja alat yang diukur.
- 5) Pilih lama waktu pengukuran ke satu menit.
- 6) On-kan insulation tester, baca tampilan pada skalanya.
- 7) 1 menit untuk IR test dan 10 menit untuk PI test.



Gambar 3. 2 alat ukur IR dan PI tes

Tabel 3. 1 tabel pedoman tegangan uji

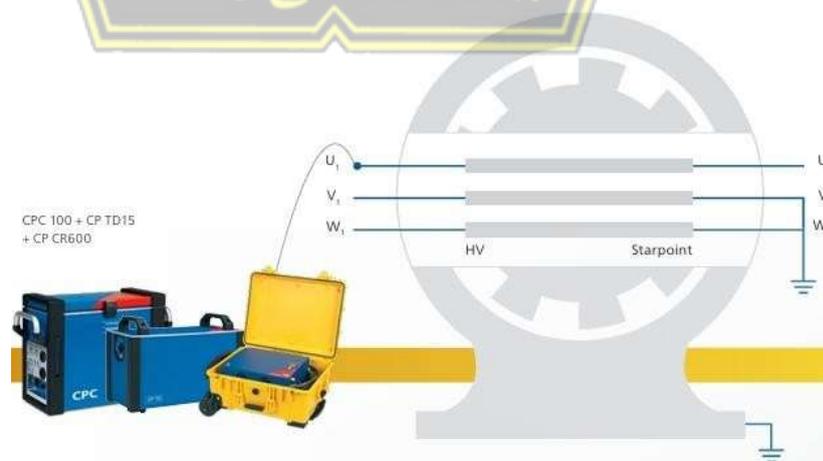
Winding rated voltage (V)*	Insulation resistance test dc voltage (v)
< 1000	500
1000 - 2500	500-1000
2501 - 5000	1000-2500
5001 - 12000	2500-5000
>12000	5000-10000



Gambar 3. 3 rangkaian pengujian tahanan isolasi

3.2.3 Uji Faktor Disipasi

Tujuan dari faktor disipasi atau tangen delta, pengukurannya adalah untuk mengetahui kualitas insulasi peralatan listrik. Hasil uji tangen delta saat ini diperlukan untuk menjadi acuan pada periodik uji tangen delta berikutnya untuk memberikan gambaran grafik isolasi yang jelas terhadap degradasi resistensi.



Gambar 3. 4 instalasi koneksi tangen delta tes



Gambar 3. 5 Alat Uji Tan Delta Doble M4100

Keterangan gambar

2.2.9 Trafo injektor tegangan

2.2.10 Laptop dengan software tan delta

2.2.11 Kabel-kabel koneksi

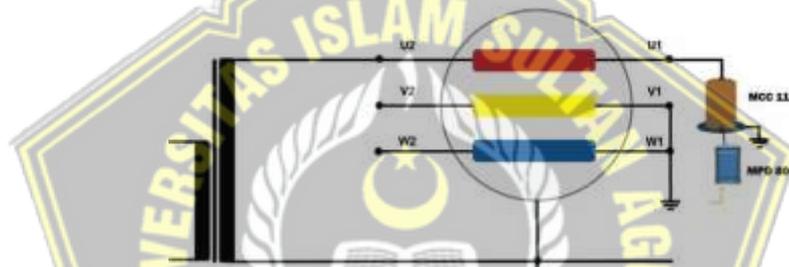
Berikut ini dijelaskan langkah – langkah pelaksanaan pengujian dengan salah satu alat uji yaitu alat uji tange Doble M4100

1. Pasang kabel grounding ke peralatan dan pastikan sistem grounding telah benar.
2. Sambung peralatan dan kabel konektor sesuai dengan fungsi masing –masing
3. Periksa dan pastikan semua kabel telah terpasang dengan baik.
4. Tegangan injeksi L-N
5. Dari $0,2U_n$ - $1U_n$
6. Nyalakan tombol "POWER" ke posisi "ON".
7. Periksa lampu open ground apakah masih menyala terus, yang berarti koneksi ground perlu di check ulang.
8. Setelah lampu ground padam, tekan menu pengukuran sesuai dengan konfigurasi pada specimen yang akan diuji (GST, UST atau GST No Guard).
9. Tekan kedua safety lock dan posisikan potensio HV ke posisi minimum.
10. Tekan tombol HV ON (Warna putih).
11. Putar potensio HV sesuai dengan tegangan yang diinginkan (searah jarum jam).
12. Setelah tegangan sesuai dengan yang diinginkan, tekan tombol "MEASURE", tunggu beberapa saat hasil pengukuran akan terlihat pada display.
13. Hasil yang ada dapat disimpan atau langsung dicetak pada printer yang telah disediakan.

14. Untuk mendownload kekomputer, dapat mempergunakan Data Key yang ada.
15. Data pada komputer dapat langsung dikonversi ke kondisi suhu 20°C.
16. Setelah dilakukan pengujian catat hasil yang diperoleh pada blanko yang tersedia.

3.2.4 Uji Offline -Peluahan Parsial

Untuk mengetahui indikasi deteriorasi didalam insulasi dan jenis kerusakannya kita perlu melakukan tes pelepasan sebagian secara offline untuk memastikan kondisi tersebut. PD merupakan titik-titik lemah didalam sistem insulasi, karena alasan inilah generator perlu diuji PD nya.



Gambar 3. 6 Koneksi Tes Offline PD

Metode pengukuran offline (peralatan yang diuji dalam keadaan tidak bertegangan) Partial Discharge dengan menggunakan standard IEC 60270, yaitu dengan mendeteksi peluahan dengan menggunakan kopling langsung (*coupling device*) yaitu dengan memasang kapasitor secara paralel terhadap sumber tegangan seperti pada gambar 3.10. tegangan injeksi partial discharge L-N.

Standar Pengujian

- IEEE – 1434-2000 : Use Guide To The Measurement Of Partial Discharge In Rotating Machinery
- IRIS STANDART (INTERPRETASI)
Surface Discharge
 - Good : <1 Nc, Medium <10 Nc, Bad >30 Nc
- Slot And Near Conductor Discharge

- Good : $<1 \text{ Nc}$, Medium $<10 \text{ Nc}$, Bad $>30 \text{ Nc}$



Gambar 3. 7 peralatan uji partial discharge

Keterangan gambar

1. Kopling kapasitor (sebagai sensor)
2. Laptop dengan software PD tech Delta maxx
3. Trafo Injektor tegangan

3.2.5 Uji Getaran (Bump Test)

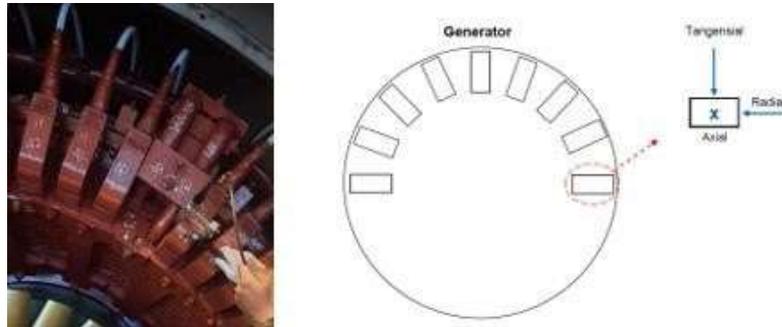
Bump test (uji getaran) pada prinsipnya merupakan salah satu pekerjaan pengetesan yang bertujuan untuk mengukur natural frekuensi dari suatu struktur atau sub struktur. Nilai natural frekuensi tersebut sangat penting diketahui untuk memastikan bahwa resonansi tidak terjadi pada struktur tersebut saat unit dioperasikan.

Titik-titik yang dilakukan uji adalah sebagai berikut :

Pengujian natural frekuensi pada basket coil



Pengujian natural frekuensi pada series connections



Langkah-langkah pengujian sebagai berikut :

1. Pastikan alat pada model Frequency Respon Function (FRF)
2. Catat hasil frekuensi tertinggi dan amplitudanya pada tiga kondisi, axial-radial-tangensial.

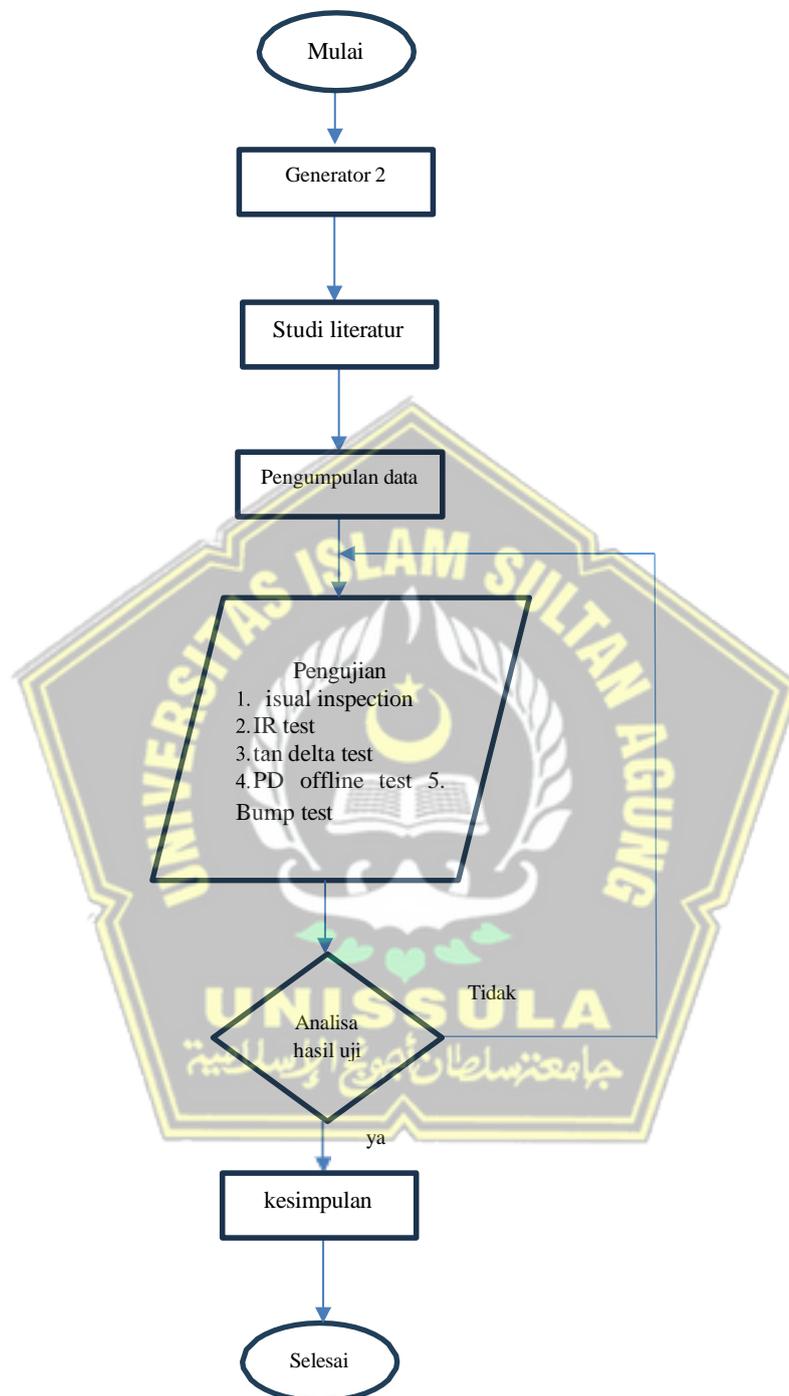


3. Catat nilai FRF (Natural respons) pada range frekuensi 40-60hz dan 95-108hz

3.2.6 Lokasi Penelitian

Penelitian mengenai “Analisis Pengaruh *Endwinding Vibration* Terhadap Isolasi Belitan Stator Generator #2 412 Mva Pltu Tanjung Awar-Awar Dengan Metode *Condition Assessment Diagnostics*” dilakukan di PLTU Tanjung Awar-awar, pembangkit listrik yang berkapasitas 2x350 MW yang beralamat di Jl. Tanjung Awar-Awar, Desa Wadung, Kecamatan Jenu, Kabupaten Tuban, Jawa Timur, Indonesia.

3.3 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 9 diagram alir penelitian

Penjelasam dari diagram alir penelitian adalah sebagai berikut:

1. Menentukan Model

Pertama dalam penelitian ini, peneliti menentukan objek yang di teliti yaitu generator unit 2 dikarenakan bertepatan dengan major overhoul sehingga generator dilakukan pemeliharaan dengan mengeluarkan rotor untuk dilakukan inspeksi dan pengujian

2. Studi Literatur

Pada tahap penelitian ini, konsep dan teori dilengkapi dengan mencari landasan teori dalam berbagai referensi seperti buku, teori yang berhubungan dan melakukan wawancara dengan narasumber agar menjadi referensi dari penelitian yang dilaksanakan.

3. Pengumpulan Data

Pengambilan data hasil pengujian yang sudah dilakukan di tahun sebelumnya dan pada proses ini peneliti melakukan pengambilan data penyebab terjadi permasalahan dalam objek penelitian. Adapun parameter data ditentukan berdasarkan penyebab ditemukan senyawa gemuk indikasi *surface discharge* pada belitan ujung.

4. Pengujian

Kegiatan pengujian isolasi agar mendapat hasil dan data hasil pengujian. Pengujian ini adalah proses yang bertujuan untuk mengetahui kondisi sistem isolasi belitan stator generator #2.

5. Analisis Data

Menganalisa hasil pengujian yang sudah di dapat dan melakukan analisa perhitungan tangen delta yang bertujuan memastikan kecocokan hasil uji coba dan hasil perhitungan, penyebab faktor-faktor internal maupun eksternal, indeks nilai laju penurunan isolasi terhadap usia, perhitungan rugi-rugi daya, parameter ketentuan bushing buruk.

6. Kesimpulan

Pada tahap ini dapat disimpulkan penyebab masalah dalam objek penelitian, setelah menyelesaikan tahap analisis data.

BAB IV

ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Visual Inspeksi

Generator Unit 2 PLTU Tj Awar-Awar telah dioperasikan selama kurang lebih 10 tahun. Sampai saat ini, generator belum pernah mengalami gangguan hubung singkat baik fasa ke fasa maupun fasa ke tanah akibat dari kegagalan isolasi pada belitan stator generator. Sejak mulai dioperasikan pada tahun 2014, inspeksi pada belitan stator generator telah dilakukan sebanyak 3 kali. Untuk dapat melakukan inspeksi menyeluruh, biaya dan resiko yang harus ditanggung oleh perusahaan relatif cukup besar karena harus mengeluarkan rotor generator (*Major Overhaul*). Saat proses pengeluaran rotor generator tersebut, potensi kerusakan dapat terjadi baik pada belitan stator (tergores) maupun pada rotor itu sendiri yang dapat mengakibatkan waktu *overhaul* menjadi lebih panjang.

Pada tahun 2019, dilakukan pemeliharaan dengan mengeluarkan rotor generator pada unit pembangkit sehingga inspeksi menyeluruh pada generator dapat dilakukan. Berdasarkan hasil inspeksi pada belitan stator generator Unit 2, tidak ditemukan senyawa gemuk pada belitan ujung stator.



Gambar 4. 1 Hasil Visual Inspeksi Tahun 2023

Pada tahun 2023, MO dilakukan lagi dengan mengeluarkan rotor generator lagi. Berdasarkan Hasil dari pengecekan visual inspeksi pada stator generator oleh tim QC (*quality control*) dari para enjiner telah ditemukan *grease compound* (senyawa gemuk) pada penahan belitan ujung stator dan terdapat kontaminan

pengotor pada belitan ujung seperti pada gambar 4.1. Itu mengindikasikan bahwa terjadi peristiwa/fenomena yang dikhawatirkan pengikisan dari sistem isolasi belitan stator generator.

4.2 Hasil Uji Resistansi Isolasi (IR) dan Indeks Polarisasi (PI)

Pengukuran nilai IR (*Insulation resistance*) & PI (*Polarization Index*) dilakukan bersamaan. Karena alat yang digunakan sama, hanya durasi pengambilan data nya yang berbeda, IR (*Insulation resistance*) menit ke 1 dan PI (*Polarization Index*) adalah perhitungan dari pada hasil menit ke 10 dibagi menit ke 1. dimana hukum Ohm V adalah tegangan DC yang diterapkan dari tester dan I adalah arus total.



gambar 4. 2 hasil pengukuran IR

Hasil perhitungan uji Insulation resistance :

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (4.1)$$

$$\text{Fasa U } R_t = \frac{5000}{0,124} = 40,008 \Omega$$

$$\text{Fasa V } R_t = \frac{5000}{0,1249} = 40,010 \Omega$$

$$\text{Fasa W } R_t = \frac{5000}{0,124} = 40,008 \Omega$$

Tabel 4. 1 hasil pengujian IR

Phase	Set (V)	Res (MΩ)	Duration
U-ground	5000	40,08	1:00
V-ground	5000	40,10	1:00
W-ground	5000	40,08	1:00

Hasil perhitungan PI sebelum dilakukan pemeliharaan sebagai berikut :

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1},$$

$$\text{Fasa U, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{60,9}{40,08} = 1,6$$

$$\text{Fasa V, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{40,08}{70,8} = 1,90$$

$$\text{Fasa W, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{40,10}{70,0} = 1,71$$

$$R_1 \quad 40,08$$

(4.2)

Tabel 4. 2 hasil uji IR dan PI tes sebelum

Menit	Phase to ground (tegangan 5000 V)			Standar IEEE 43-2013
	U	V	W	PI
1	40,08 MΩ	40,10 MΩ	40,08 MΩ	
2	40,39	46,30	46,41	
3	50,02	51,10	50,50	
4	52,10	55,50	55,22	
5	52,90	60,30	58,90	
6	53,05	64,10	60,25	
7	55,60	66,15	63,60	
8	58,35	68,29	65,89	
9	60,01	69,64	68,01	
10	60,09 MΩ	70,8 MΩ	70,0 MΩ	
PI	1,6	1,90	1,71	>2

Hasil uji Insulasi Resisntence setelah dilakukan perbaikan :

$$\text{Fasa U } Rt = \frac{5000}{0,227} = 220 \Omega$$

$$\text{Fasa V } Rt = \frac{5000}{0,212} = 235 \Omega$$

$$\text{Fasa W } Rt = \frac{5000}{0,235} = 212 \Omega$$

Tabel 4. 3 hasil uji IR

Phase	Set (V)	Res (MΩ)	Duration
U-ground	5000	229	1:00
V-ground	5000	235	1:00
W-ground	5000	212	1:00

Hasil perhitungan PI setelah dilakukan pemeliharaan sebagai berikut :

$$\text{Fasa U, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{596,2}{220} = 2,71$$

$$\text{Fasa V, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{540}{235} = 2,30$$

$$\text{Fasa W, } PI = \frac{R_{10}}{R_1}, \frac{455}{212} = 2,15$$

Tabel 4. 4 hasil uji IR dan PI tes sesudah

Menit	Phase to ground			Standar IEEE 43-2013
	U	V	W	PI
1	229 MΩ	235 MΩ	212 MΩ	
2	250	275	253	
3	286	290	288	
4	310	325	311	
5	365	351	368	
6	405	443	388	
7	445	480	420	
8	578	510	436	
9	520	522	451	
10	596, 2 MΩ	540 MΩ	455 MΩ	
PI	2,71	2,30	2,15	>2

Adapun rekomendasi minimum nilai hasil pengujian Insulation Resisten Test (IR) dan Polarization Index (PI) disesuaikan dengan standart IEEE 43-2013, yaitu :

1. Nilai minimum tahanan isolasi setelah 1 menit pada temperatur 40° C :
100 MΩ
2. Nilai minimum Polarization Index (PI) untuk isolasi Class F : 2

Berdasarkan hasil pengujian tahanan isolasi tabel 4.1, penulis mengambil data hasil pengujian langsung dari Insulation Resistance Tester (Megger MIT 525). Hasil pengujian diatas didapat pada kondisi diragukan. Diperlukan pemeliharaan kembali untuk meningkatkan tahanan isolasi pada stator generator #2 PLTU Tj

awar-awar. Dan dapat dilakukan beberapa langkah pemeliharaan untuk meningkatkan tahanan isolasi stator generator, yaitu :

1. Memanaskan kumparan – kumparan generator (Menghilangkan kelembaban), dengan *blower heater* ataupun dengan lampu pemanas.
2. Membersihkan kumparan – kumparan dari oli yang ada didalam generator.
3. Memeriksa lapisan – lapisan isolasi pada kumparan – kumparan generator apabila ada yang mengalami kerusakan segera diperbaiki.

Setelah dilakukan pemeliharaan dilakukan pengujian kembali, dan hasil pengujian (tabel 4.2) menunjukkan peningkatan pada nilai tahanan isolasi stator generator PLTU Tj awar-awar.

4.3 Hasil Uji Faktor Disipasi

Tujuan dari faktor disipasi atau tangen delta Pengukurannya adalah untuk mengetahui kualitas insulasi peralatan listrik. Hasil uji terbaru tangen delta pada peralatan kelistrikan diperlukan untuk menjadi acuan pada periodik berikutnya saat dilakukan uji tangen delta lagi pada peralatan yang sama untuk memberikan gambaran yang jelas grafik degradasi resistensi insulasi. Selain digunakan secara berkala, Hasil uji tangen delta dapat dianalisis menggunakan IEEE std 286 – 2000 dan VDE 0530 part 1. Kondisi isolasi belitan stator bisa dijelaskan dari analisis data. pada tabel 3.3 dimana hasil perhitungan dari % PF dapat dihitung dengan rumus :

$$DF = \frac{1}{\omega R_p C_p} \times 100 \quad (4.3)$$

Dimana R_s dapat kita cari terlebih dahulu dengan rumus:

$$R_s = \frac{P}{I^2} \quad (4.4)$$

Keterangan:

$\omega = 2\pi f C =$ Kapasitansi (F)

$P =$ Daya (W)

$R =$ Nilai Resistansi (Ω)

Fasa U

$$Rs = \frac{79,175}{579,733^2} = 0,0002355$$

$$DF = \frac{1}{314 \times 0,000235 \times 184643 \times (10^{-12})} \times 100$$

$$= 1,381 \%$$

Tabel 4. 5 hasil uji tangen delta fasa U

V tes	V meas	I meas	watt	Cp (pF)	% PF meas
2309	2309	579,733	79,175	184643	1,381
4619	4619	580,830	83,661	184618,5	1,440
6928	6939	581,872	95,243	185065	1,637
9237	9236	583,458	113,019	185812	1,937
11547	11523	587,228	148,371	186896	2,527

INTERPRETASI HASIL:

Phase R to Ground :

$$\text{Initial } \tan \delta (0.2 U_n) = 1,381 \%$$

$$\text{Increase } (\tan \delta 0.6 - \tan \delta 0.2) / 2 = (1,381 - 1,637) / 2 = 0,1355 \%$$

$$\text{Increase } \Delta \tan \delta (\tan \delta 0.8 - \tan \delta 0.6) = (1,937 - 1,637) = 0,3 \%$$

Fasa V

$$Rs = \frac{77,290}{581,430^2} = 0,00022862$$

$$DF = \frac{1}{314 \times 0,00022862 \times 184927 \times (10^{-12})} \times 100$$

$$= 1,327 \%$$

Tabel 4. 6 hasil uji tangen delta fasa V

V tes	V meas	I meas	watt	Cp (pF)	% PF meas
2309	2309	581,430	77,290	184927	1,327
4619	4618	581,116	81,071	184277	1,395
6928	6927	582,780	92,259	185313,5	1,583
9237	9240	584,961	111,012	186084,5	1,898
11547	11519	588,270	138,938	187122,5	2,362

INTERPRETASI HASIL:

Phase S to Ground :

Initial $\tan \delta (0.2 U_n) = 1,329 \%$

Increase $(\tan \delta 0.6 - \tan \delta 0.2) / 2 = (1,583 - 1,329) / 2 = 0,127 \%$

Increase $\Delta \tan \delta (\tan \delta 0.8 - \tan \delta 0.6) = (1,898 - 1,583) = 0,315 \%$

Fasa W

$$R_s = \frac{79,175}{579,733^2} = 0,0002355$$

$$DF = \frac{1}{314 \times 0,000235 \times 184643 \times (10^{-12})} \times 100$$

$$= 1,381 \%$$

Tabel 4. 7 hasil uji tangen delta fasa W

V tes	V meas	I meas	watt	Cp (pF)	% PF meas
2309	2309	579,733	79,175	184643	1,381
4619	4619	580,830	83,661	184618,5	1,425

6928	6939	581,872	95,243	185065	1,594
9237	9236	583,458	113,019	185812	1,935
11547	11532	587,228	148,371	186896	2,503

INTERPRETASI HASIL:

Phase T to Ground :

Initial $\tan \delta (0.2 U_n) = 1,371 \%$

Increase $(\tan \delta 0.6 - \tan \delta 0.2) / 2 = (1,594 - 1,371) / 2 = 0,1115 \%$

Increase $\Delta \tan \delta (\tan \delta 0.8 - \tan \delta 0.6) = (1,935 - 1,594) = 0,341 \%$

Tabel 4. 8 perbandingan hasil uji dissipation factor sebelum dan sesudah

Analysis method	Stator winding generator #2						Standard
	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	Sebelum	Sesudah	
	Fasa R		Fasa S		Fasa T		
Tan $\delta 0.2 U_n$	1,466 %	1,366 %	1,4258 %	1,329 %	1,479 %	1,371 %	$\leq 4 \%$
$\Delta \tan \delta$ increment (0,6 $U_n - 0,2 U_n$)/2	0,1355 %	0,133 %	0,127 %	0,1313 %	0,105 %	0,115 %	$\leq 0,25 \%$
Increase $\Delta \tan \delta$	0,3 %	0,2764 %	0,315 %	0,2785 %	0,341 %	0,302 %	$\leq 0,5 \%$

Standart IEEE std 286 – 2000 dan VDE 0530 Part 1:

Initial $\tan \delta (0.2 U_n) = 4 \%$

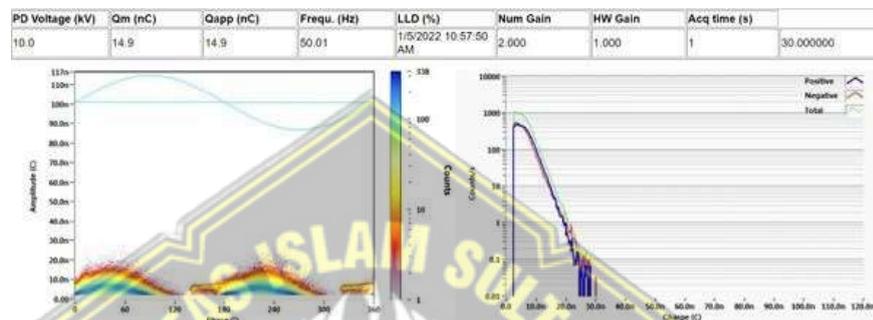
Increase $(\tan \delta 0.6 - \tan \delta 0.2) / 2 = 0.25 \%$

Increase $\Delta \tan \delta (\tan \delta 0.8 - \tan \delta 0.6) = 0.5 \%$

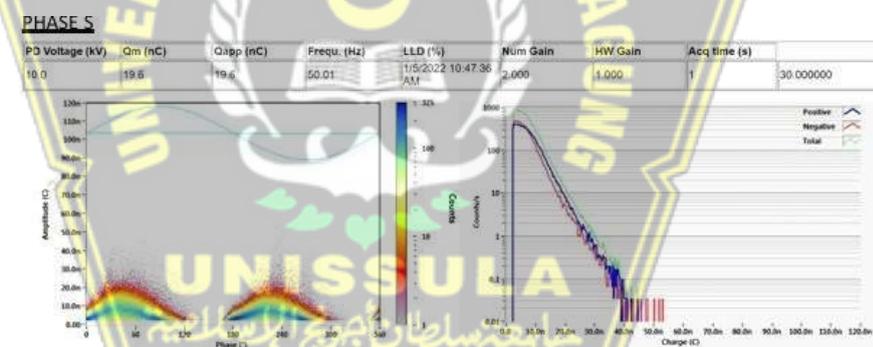
Dissipation Factor atau Tangen δ pada generator unit 2, seluruh hasil pengujian nilainya masih memenuhi parameter yang diijinkan, nilai tangen δ pengujian telah sesuai dengan standart. Hasil pengujian Tan δ menunjukkan bahwa isolasi belitan stator generator #2 seluruh fasa memiliki kondisi yang baik.

4.4 Hasil Uji Offline Partial Discharge

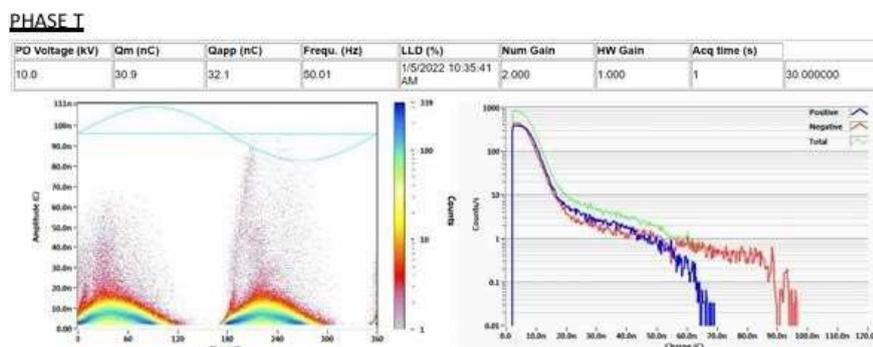
Saat ditemukan kelaianan pada hasil pengamatan visual inspeksi aktifitas *partial discharge* di daerah belitan ujung, kita perlu melakukan uji *partial discharge* secara offline untuk memastikan dan mengkonfirmasi hasil temuan tersebut. Hasil pengujian *partial discharge* dapat dilihat pada gambar 4.3, 4.4 dan 4.5.



gambar 4. 3 hasil uji sebelum perbaikan fasa R



gambar 4. 4 hasil uji sebelum perbaikan fasa S



gambar 4. 5 hasil uji sebelum perbaikan fasa T

- A. Dari tahap pengujian pada tegangan 11,5 kV hasil Qm fasa R 14,9 nC dan pola grafik menunjukkan “micro void”, hal ini termasuk kategori "rendah".
- B. Dari hasil pengujian pada tegangan 11,5 kV hasil Qm fasa S 19,6 nC dan pola grafik menunjukkan “micro void”, hal ini termasuk kategori "rendah".
- C. Dari hasil pengujian pada tegangan 11,5 kV hasil Qm fase T 30,9 nC diperoleh hasil dengan pola “peluahan permukaan belitan ujung”, hal ini termasuk kategori “medium”.

4.5 Hasil Uji Getaran Pada Struktur Belitan Ujung

Tabel 4. 9 hasil uji getaran pada struktur belitan ujung

No	Titik uji	Hasil	Standard	Kesimpulan
1	Slot 1 radial	0,166 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
2	Connector ring slot U5	0,33 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
3	Connector ring slot U6	0,81 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
4	Connector ring slot V2	0,83 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
5	Connector ring slot V5	0,23 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
6	Connector ring slot W2	0,41 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD
7	Connector ring slot V6	0,37 g/lbf	0,1 g/lbf	BAD



gambar 4. 6 salah satu titik yang diuji dan hasilnya BAD

Berdasarkan data bump test diatas (tabel 4.4), nilai pengujian sebelum pemeliharaan melebihi batas aman pada Tes A Slot 1 Exciter side dan conector ring U5, U6, V2, V5, W2, V6. Diketahui nilai amplitude $>0,1$ g/lbf pada frekuensi 100hz yang melebihi batasan standart sebesar 0,1 g/lbf. Oleh karena itu masuk dalam

kategori **BAD** dan perlu dilakukan penguatan struktur untuk menggeser ke frekuensi di luar standarnya.

4.6 Perbaikan Masalah

Setelah dilakukan beberapa tes, hasil pengamatan visual dan data hasil elektrikal tes yang memperjelas bahwa masalah isolasi generator unit 2 PLTU Tj awar-awar itu karena getaran berlebih pada belitan ujung. Yang mana aktifitas itu dapat mengikis permukaan lapisan insulasi yaitu lapisan pelindung anti-korona. Kerusakannya bisa menimbulkan aktivitas peluahan parsial pada belitan ujung stator generator. Berdasarkan faktor tersebut, perbaikannya terbagi menjadi dua perbaikan, yaitu: perbaikan kelonggaran ikatan belitan ujung dan perbaikan permukaan lapisan insulasi belitan ujung.

4.6.1 Perbaikan Ikatan Belitan Ujung

Cara yang mungkin dilakukan adalah dengan menambah kekakuan kumparan. Itu bisa dilakukan dengan memperbaiki ikatan lama yang longgar dan menambahkan ikatan pada ujung belitan area dekat tutup ujung. Bahan pengikatnya adalah isolasi bahan yang mempunyai ketahanan termal dan mekanis yaitu *polyester sheathed fiberglass rope*, sebelum digunakan untuk mengikat, potong tali secukupnya dan celupkan ke cairan epoksi resin agar lebih kuat nanti pada saat sudah kering. Setelah mengikat seluruh ikatan dari area belitan ujung, panaskan ikatan untuk mengeras resin epoksi dengan *heater gun* atau dengan lampu pemanas.



Gambar 4. 7 Penambahan Tali Pengikat Belitan Ujung

Setelah mengikat seluruh ikatan dari area belitan ujung, panaskan ikatan untuk mengeraskan resin epoksi. Kemudian dilakukan kembali uji getaran terhadap isolasi untuk mengetahui efektifitasnya perbaikan yang dilakukan. Hasilnya terlihat pada tabel 4.5.

Tabel 4. 10 perbandingan Sebelum Dan Sesudah Perbaikan

No	Titik uji	Hasil		Standard	Kesimpulan
		Sebelum	Sesudah		
1	Slot 1 radial	0,166 g/lbf	0,0376 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
2	Connector ring slot U5	0,33 g/lbf	0,0212 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
3	Connector ring slot U6	0,81 g/lbf	0,0425 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
4	Connector ring slot V2	0,83 g/lbf	0,0179 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
5	Connector ring slot V5	0,23 g/lbf	0,0028 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
6	Connector ring slot W2	0,41 g/lbf	0,0092 g/lbf	0,1 g/lbf	Good
7	Connector ring slot V6	0,37 g/lbf	0,0550 g/lbf	0,1 g/lbf	Good

4.6.2 Perbaikan Hasil PD offline Tinggi

Penulis mengambil data hasil pengujian langsung dengan alat PD TECH DELTA MAXX. Kesimpulan dari pengujian belitan ini berdasarkan literatur standar IEEE – 1434-2000 dan IRIS STANDART maka hasilnya adalah peluahan pada permukaan belitan ujung. Ada salah satu fasa yaitu fasa T yang melebihi standar yang saat diinjeksikan tegangan tinggi L-N 11,5 kV mendapatkan hasil pada magnitudo Q_m 30,9 nC. Sehingga diperlukan pemeliharaan untuk memperbaiki hasil uji *partial discharge* sekaligus memperbaiki kualitas isolasi belitan stator generator #2 PLTU Tj Awar-Awar.

Langkah-langkah yang harus dilakukan, yaitu :

1. Gulungan harus benar-benar kering sebelum mengaplikasikan pernis untuk menghindari kelembapan yang terperangkap
2. Membersihkan vernis pada sambungan yang bersinggungan.
3. Memperbaiki lapisan pelindung korona di area belitan ujung.
4. Yang pertama pernis konduktif yang terletak di ujung ujung inti slot stator dengan kuas atau semprot.

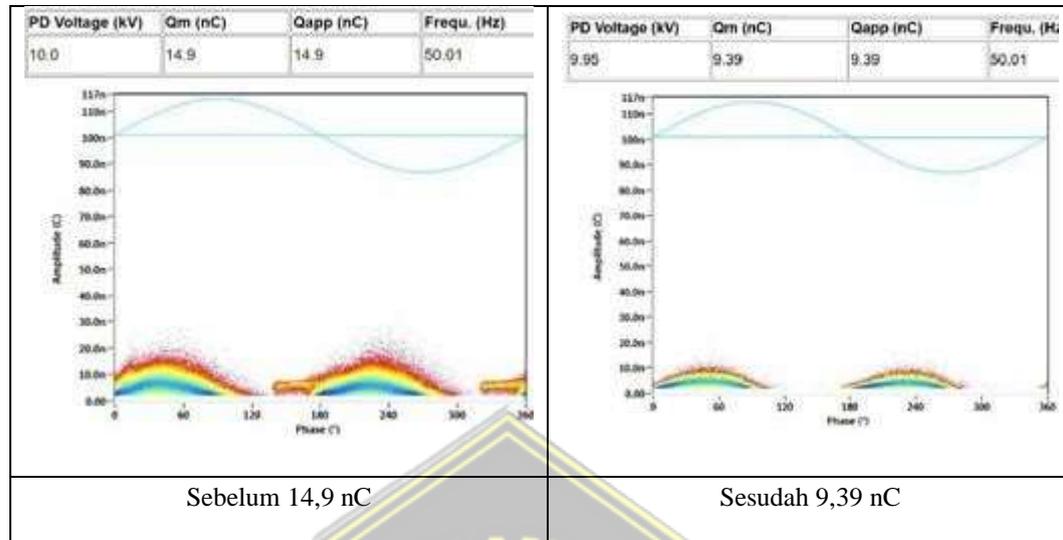
5. Yang kedua adalah semi konduktif pelapisan yang terletak setelah pelapisan konduktif sampai akhir tutup dengan kuas atau disemprotkan
6. Setelah mengaplikasikan vernis kemudian selanjutnya ada menunggu hingga vernis kering
7. Bersihkan belitan kembali.



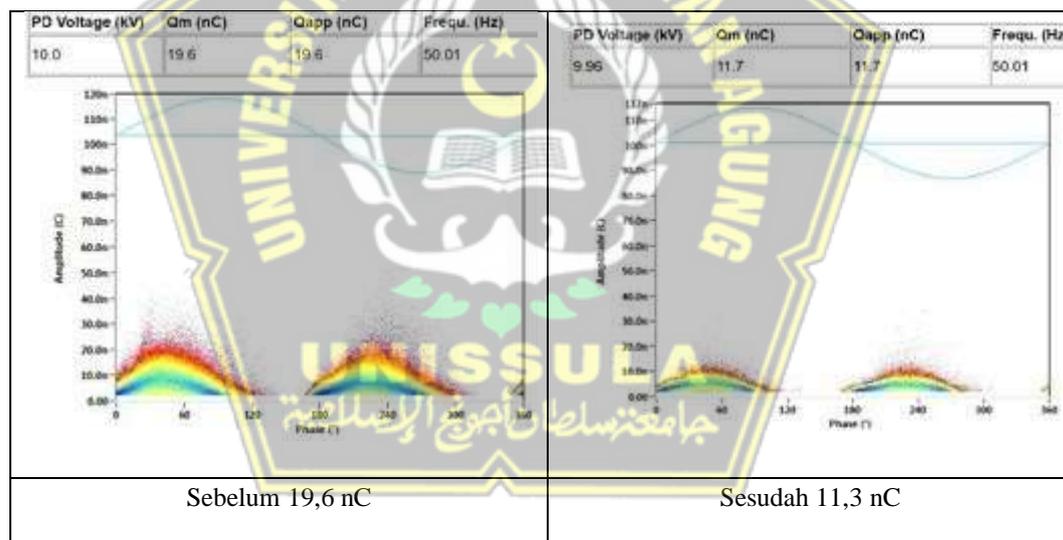
Gambar 4. 8 Aplikasi Varnis Konduktif Dan Semikonduktif Dengan Kuas

Setelah perbaikan lapisan anti corona, langkah selanjutnya adalah pengeringan. Waktu pengeringan didasarkan pada bahan pelapisan yang digunakan. Untuk mengetahui kualitas perbaikan, kami melakukannya secara offline uji peluahan sebagian yang ditunjukkan pada tabel 4.9, 4.10 dan 4.11.

Tabel 4. 11 Perbandingan Hasil Uji Partial Discharge Fasa R



Tabel 4. 12 Perbandingan Hasil Uji Partial Discharge Fasa S



Untuk mengkonfirmasi hasil visual inspeksi maka dilakukan beberapa pengujian yang berkaitan dengan masalah diatas, diantaranya uji resistansi isolasi (IR), uji indeks polaritas (PI), uji faktor disipasi (tangen delta), uji peluahan sebagian (Partial discharge) dan uji getaran (bump test) pada struktur belitan ujung stator generator #2.



gambar 4. 9 hasil penambahan ikatan dan penguatan struktur belitan ujung

Hasil pengujian getaran mengkonfirmasi bahwa terjadi kekendoran pada struktur belitan ujung akibat *thermal stress* dan efek gaya elektromekanik yang timbul dari rotor sehingga terjadi getaran berlebih pada belitan ujung. Hal ini ditunjukkan pada tabel (4.7), dimana terdapat beberapa penahan struktur belitan ujung yang nilainya melebihi standar yang diijinkan yaitu 0,1 g/lbf. Maka diputuskanlah metode perbaikannya dengan mengikat kembali struktur belitan ujung dan mengganti baut yang rusak, hasil perbaikan gambar 4.7 dan hasil uji getaran sudah menunjukkan perbaikan pada tabel 4.8.

Untuk uji elektrikal yang paling awal dilakukan pengujian IR dan PI tes untuk mengetahui belitan dalam kondisi bersih dan kering sebelum dilakukan uji tegangan tinggi. Saat dilakukan pengujian IR dan PI setelah generator beroperasi biasanya nilainya akan diatas standar karena banyaknya kontaminan yang membuat belitan kotor ataupun lembab. Maka sebaiknya dilakukan uji setelah dilakukan pembersihan area belitan dan juga pemanasan belitan.

Hasil uji resistansi isolasi (IR)

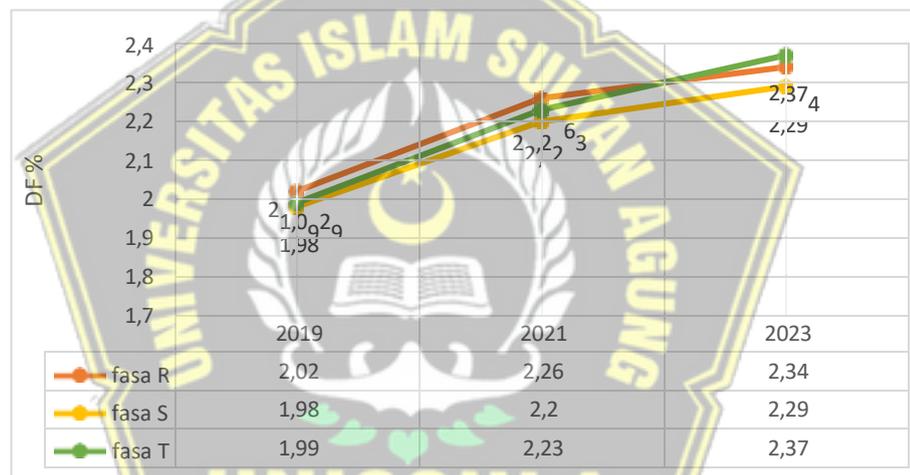
fasa R : 220M Ω , fasa S 235 M Ω , fasa T 212 M Ω kondisi baik

uji indeks polaritas (PI)

fasa R 2,71 fasa S 2,30 fasa T 2,15 kondisi baik

Yang berarti bahwa selain untuk mengetahui kondisi awal isolasi belitan stator, uji IR dan PI adalah sebagai boleh tidaknya dilakukan pengujian tegangan tinggi karena berkaitan dengan kelembaban belitan stator generator. Setelah dinyatakan aman untuk tes tegangan tinggi maka dilakukan uji faktor disipasi, dimana Pada grafik 4.10 terlihat seiring bertambahnya usia, nilai pengujian tange delta mengalami kenaikan. Diketahui kenaikan hasil uji sebagai berikut :

Tabel 4. 14 grafik trending pengukuran tange δ dari tahun 2019-2023



Tahun 2019 ke tahun 2021 mengalami kenaikan.

fasa R 2,02 % >> 2,26%, fasa S 1,98% >>2,20% fasa T 1,99% >> 2,23%

rata-rata kenaikan **110%**

tahun 2021 ke tahun 2023 mengalami kenaikan.

fasa R 2,26% >>2,34%, fasa S 2,20% >>2,29%, fasa T 2,23% >> 2,37%

rata-rata kenaikan **104%**

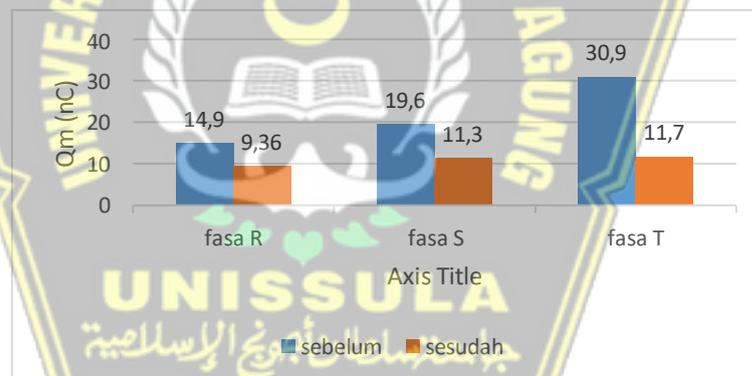
Hal tersebut menunjukkan adanya korelasi antara hasil uji tange delta dengan usia peralatan dan juga penurunan kualitas isolasi belitan stator generator tetapi masih dalam standar yang diijinkan.

Selanjutnya Hasil pengujian PD menunjukkan peluahan di bagian permukaan isolasi belitan ujung dengan ditunjukkan hasil Q_m 30,9 nC dan pola yang terbentuk menunjukkan lokasi terdampak adalah permukaan belitan ujung (*endwinding surface discharge*), serta melapisi kembali isolasi dengan lapisan anti corona dan juga pemanasan stator untuk mengeringkan lapisan anti corona dan resin tali pengikat.

Setelah seluruh rangkaian perbaikan selesai maka dilakukan uji lagi seperti langkah sebelumnya. Dengan metode yang sama didapatkan hasil yang cukup signifikan penurunannya, pada struktur belitan ujung sudah tidak ada lagi natural frekuensi dan nilai PD yang tinggi turun dari 30,9 nC menjadi 11,7 nC dan pola pola grafik menunjukkan “micro void”, dimana standar yang diijinkan yaitu

Good : <1 Nc, Medium <10 Nc, Bad >30 Nc,

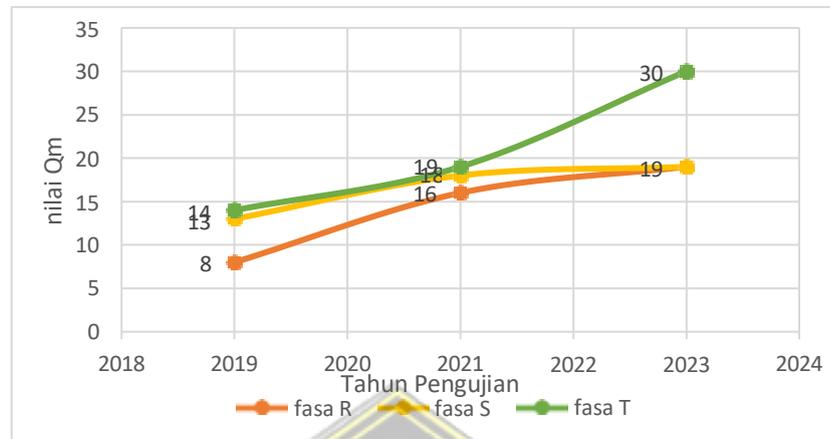
Tabel 4. 15 grafik pengukuran PD sebelum dan sesudah pemeliharaan



Nilai partial discharge mengalami perbaikan setelah dilakukan perbaikan pada tahun 2023 yaitu fasa R dari 14,9 nC menjadi 9,36 nC, fasa S dari 19,6 nC menjadi 11,3 nC dan fasa T dari 30,9 menjadi 11,7 nC.

Pada isolasi belitan generator #2 telah dilakukan pengujian offline partial discharge sesuai jadwal pemeliharaan yang telah ditentukan. Tiga pengujian terakhir yang sudah dilaksanakan yaitu pada Tahun 2019 – 2023 ditunjukkan pada grafik tabel 4.15.

Tabel 4. 16 Trending Pengukuran PD Dari Tahun 2019-2023



Pada grafik gambar 4.15 terlihat seiring bertambahnya usia, nilai pengujian partial discharge mengalami kenaikan.

Tahun 2019 ke tahun 2021 mengalami kenaikan.

fasa R 8 nC >> 16 nC, fasa S 13 nC >>18 nC fasa T 14 nC >> 19 nC

tahun 2021 ke tahun 2023 mengalami kenaikan.

fasa R 16 nC >>19 nC fasa S 18 nC >>19 nC fasa T 19 nC >> 30 nC

Hal tersebut menunjukkan adanya korelasi antara hasil uji partial discharge dengan usia peralatan dan juga penurunan kualitas isolasi belitan stator generator.

BAB V

PENUTUP

3.2. Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dijelaskan pada bab-bab sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil uji getaran pada struktur belitan ujung generator menunjukkan bahwa selain karena stres termal adalah gaya elektromagnetik dari rotor mengakibatkan kekendoran pada ikatan dan penahan struktur belitan ujung dari beberapa sampel uji yang nilainya diatas 0,1 g/lbf ditandai dengan munculnya senyawa gemuk pada area yang terdampak akibat dari gesekan isolasi antar fasa maupun fasa dengan struktur penahan.
2. Hasil pengujian isolasi dengan menggunakan metode *condition assesment diagnostics* diantaranya, (tahanan isolasi (IR) nilainya $>100 \text{ M}\Omega$, indeks polarisasi (PI) nilainya > 2 , faktor disipasi (tangen δ) dimana nilainya masih dalam standar Initial $\tan \delta (0.2 U_n) = < 4 \%$, Increase $(\tan \delta 0.6 - \tan \delta 0.2) / 2 = < 0.25 \%$, Increase $\Delta \tan \delta (\tan \delta 0.8 - \tan \delta 0.6) = < 0.5 \%$, dan pada pengujian peluahan sebagian (PD)) menunjukkan ada hasil uji yang diatas standar $>30\text{nC}$ dan pola menunjukan PD pada belitan ujung, yang berarti bahwa sistem isolasi belitan stator generator sudah mengalami degradasi.
3. Grafik hasil uji *Condition Assessment Diagnostics (tangen delta dan partial discharge)* pada generator unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar menunjukkan laju kenaikan dari tahun 2019-2023 dilihat dari grafik tabel 4.13 dan 4.15, pada tahun 2023 ditemukan nilai hasil uji tidak memenuhi standar, namun setelah dilakukan pemeliharaan dan uji ulang mendapatkan hasil yang baik (memenuhi standar).
4. Dengan dilakukannya perbaikan pada kekendoran struktur belitan ujung dan juga isolasi belitan ujung stator generator dengan mengikat kembali penahan yang kendor maka nilai getaran natural frekwensi pada struktur turun menjadi diibawah $< 0,1 \text{ g/lbf}$ dan juga melapisi kembali (reinsulasi)

dengan cairan conductive dan semi conductive pada isolasi belitan ujung stator pun setelahnya dilakukan uji elektrikal kembali dengan hasil PD turun dari 30 nc menjadi 11,7 nC dan pola PD belitan ujung sudah tidak muncul ditunjukkan pada grafik tabel 4.14, maka isolasi generator dinyatakan aman dan generator unit 2 PLTU Tanjung Awar-Awar layak untuk dioperasikan.

3.3. Saran

Hasil penelitian ini masih banyak kekurangan dan kelemahan, maka penulis dapat menyarankan sebagai berikut :

1. Lakukan pengukuran dan pengujian rutin saat overhaul sebagai data trending isolasi belitan stator generator.
2. Bagi peneliti selanjutnya dapat mengembangkan dengan efek dari pembebanan dengan vibrasi elektro magnetik.
3. Dapat memasang sensor vibrasi endwinding.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Institute of Electrical and Electronics Engineers. and IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society., *2009 IEEE Electrical Insulation Conference : Hilton Montréal Bonaventure, Montréal, Québec, Canada, 31 May-3 June 2009*. IEEE, 2009.
- [2] I. W. A. J. Amir Mohammad, “analisa pengaruh partial discharge dan tan delta terhadap umur isolasi belitan stator akibat ikatan kumparan generator longgar,” vol. XX No.4, Oct. 2018.
- [3] J. Kapler, J. Letal, M. Sasic, and G. C. Stone, “Recent endwinding vibration problems in air-cooled turbine generators.” [Online]. Available: www.cigre.org
- [4] M. F. Hasan, H. Pariaman, and B. Anggono, “Prosiding 1 Day National Seminar : Power Plant RLA 2012.”
- [5] “6. BAB II”.
- [6] “Handbook of Large Turbo Generator Operation and Ma_231101_091812 (1)”.
- [7] H.-C. Jiang, G.-J. Tang, Y.-L. He, K. Sun, W.-J. Li, and L. Cheng, “Effect of Static Rotor Eccentricity on End Winding Forces and Vibration Wearing,” *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2021, p. 5554914, 2021, doi: 10.1155/2021/5554914.
- [8] IEEE Staff and IEEE Staff, *2009 Record of Conference Papers Industry Applications Society 56th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*.
- [9] J. Letal, M. Sasic, and M. Teixeira, “Endwinding vibration monitoring of turbogenerators.”
- [10] J. Letal, B. Satmoko, N. Manik, and G. Stone, “Stator End-Winding Vibration in Two-Pole Machines: Avoiding Generator Failure,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 26, no. 6, pp. 29–39, Nov. 2020, doi: 10.1109/MIAS.2020.2982725.
- [11] “IEEE_Std_62_2_2004 : IEEE guide for diagnostics field testing of electric power apparatus - electrical machinery,” IEEE, 2005.
- [12] International Electrotechnical Commission and International Electrotechnical Commission. Technical Committee 2, *Rotating electrical machines. Part 32, Measurment of stator end-winding vibration at form-wound windings*.
- [13] <https://dunia-listrik.blogspot.com/2009/04/hukum-hukum-dasar-listrik.html>. diakses 03 juni 2024