



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PERMASALAHAN *PARTIAL DISCHARGE* PADA
ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR 11.8 KV**

SKRIPSI

SETYOADI

0906603101

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JULI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PERMASALAHAN *PARTIAL DISCHARGE* PADA
ISOLASI BELITAN STATOR GENERATOR 11.8 KV**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

SETYOADI

0906603101

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JULI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Setyoadi
NPM : 0906603101
Tanda Tangan :
Tanggal : 9 Juli 2012

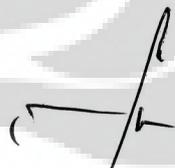


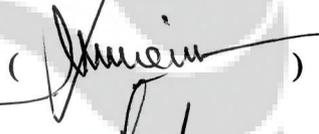
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Setyoadi
NPM : 0906603101
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Permasalahan *Partial Discharge* Pada
Isolasi Belitan Stator Generator 11.8 KV

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan di terima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K, M.T. ()

Penguji : Ir. Amien Rahardjo, M.T. ()

Penguji : Ir. I Made Ardita Y, M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2012

KATA PENGANTAR

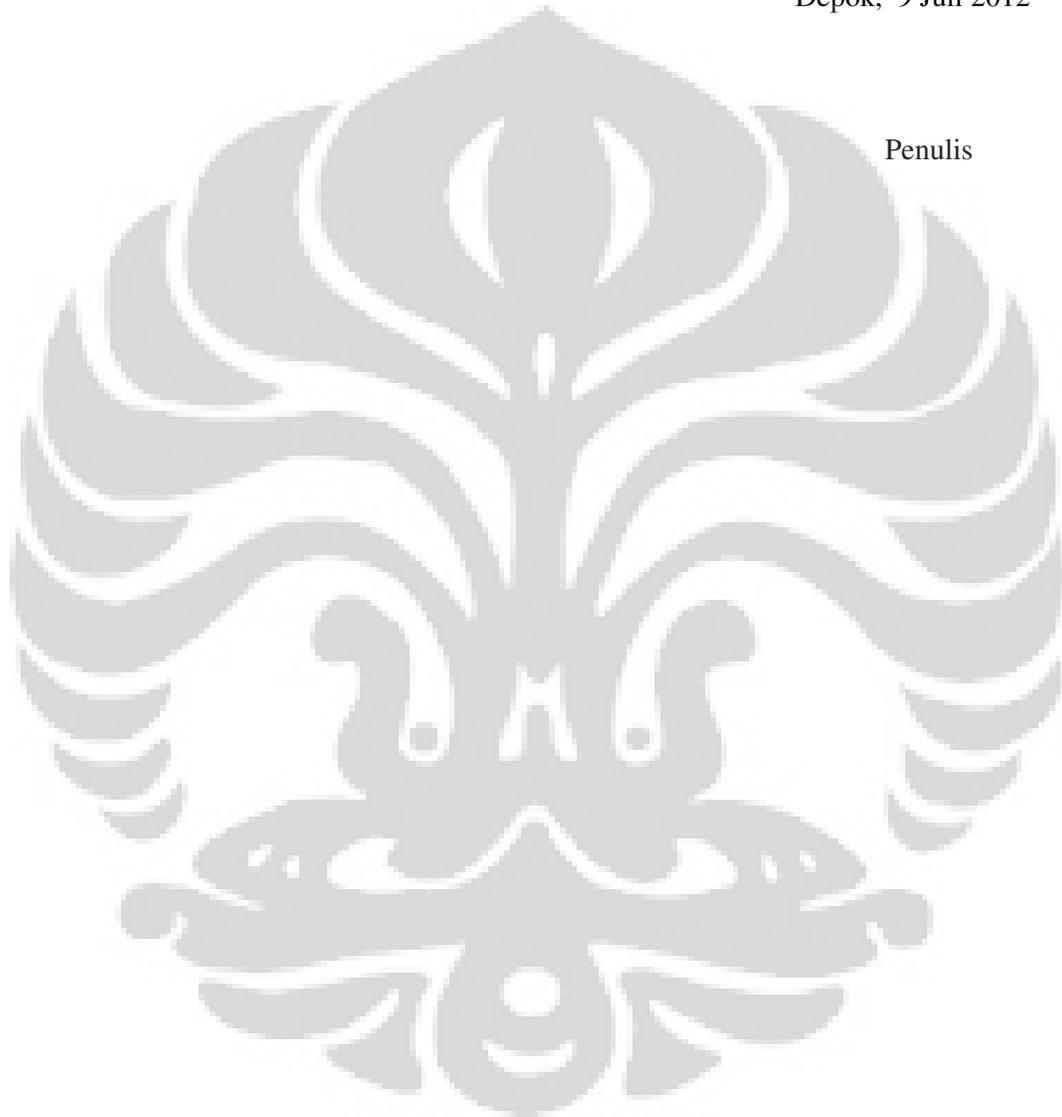
Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M.K, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Mas Basuki selaku TL FE RITA (*Reliability & Integrity*) Chevron Geothermal Salak, Ltd. yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada saya dari semenjak awal kuliah sampai penyusunan skripsi ini.
3. Rekan-rekan engineer di tim FE RITA dan tim *electrical maintenance*, yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang telah banyak membantu dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Orangtua yang senantiasa memberikan dukungan serta doa yang tak pernah terputus.
5. Vanny, istriku tercinta yang selalu memberikan inspirasi, motivasi, dukungan, dan doa yang tak pernah terputus.
6. Sahabat dan rekan-rekan exel'09 seperjuangan yang telah banyak membantu serta memberikan warna semasa perkuliahan hingga sampai penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 9 Juli 2012

Penulis



**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Setyoadi
NPM : 0906603101
Program Studi : Sarjana Teknik
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty Free-Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**ANALISIS PERMASALAHAN *PARTIAL DISCHARGE* PADA ISOLASI
BELITAN STATOR GENERATOR 11.8 KV**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 9 Juli 2012

Yang menyatakan



(Setyoadi)

ABSTRAK

Nama : Setyoadi
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Permasalahan *Partial Discharge* Pada Isolasi Belitan Stator Generator 11.8 KV

Peluhan parsial/PD (*Partial Discharge*) merupakan permasalahan yang umum terjadi pada sistem isolasi mesin-mesin atau peralatan bertegangan tinggi. Pada mesin-mesin berputar (generator/motor), PD biasanya terjadi pada isolasi belitan yang terletak di dalam slot inti stator maupun di bagian belitan yang keluar dari inti stator (*end winding*). PLTP Gunung Salak memiliki 3 unit pembangkit listrik yang dioperasikan oleh Chevron sejak tahun 1997. Setelah dioperasikan selama kurang lebih 9 tahun, pada tahun 2006 untuk pertama kalinya pengecekan visual kondisi isolasi belitan stator generator dapat dilakukan. Hal yang menarik yang ditemukan pada saat itu adalah kerusakan akibat PD terjadi pada lapisan *grading* dan tingkat kerusakan yang berbeda antara ketiga generator tersebut. Skripsi ini membahas mengenai analisa permasalahan PD yang terjadi pada isolasi belitan stator generator Unit-4 dengan melakukan analisa komparasi, trending, karakteristik, uji korelasi parameter operasi generator, dan bentuk aktual kerusakan fisik isolasi. Berdasarkan hasil analisa, proses fabrikasi yang kurang baik pada area *overlap* semikonduktif generator Unit-4 di duga menjadi akar penyebab PD mudah terbentuk pada bagian ini. Seiring dengan proses penuaan isolasi dan meningkatnya rata-rata suhu operasi air pendingin Unit-4 (dari 27 ke 29°C), maka akselerasi aktifitas PD diperkirakan terjadi sehingga generator Unit-4 memiliki PD yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan Unit-5 dan 6.

Kata kunci:

Generator, *Partial Discharge*, isolasi belitan, area *grading*, suhu, penuaan

ABSTRACT

Name : Setyoadi
Study Program : Electrical Engineering
Title : Analysis of Partial Discharge Problem on 11.8 kV Generator
Stator Winding Insulation

Partial Discharge (PD) is a common problem occurring on the insulation system of high voltage machines or equipment. In the rotating machineries (generators/motors), PD usually occurs on the winding insulation installed inside the stator slot or outside the stator core (end winding). PLTP Gunung Salak has 3 power plants which have been being operated by Chevron since 1997. After being in service for 9 years, in the 2006, thorough visual inspection on stator winding insulation could be performed for the first time. The interesting findings at that time were the damaged portion on the grading coating by PD and the different severity level among those three generators. The focus in this study is to analyze PD problem on the generator Unit-4 winding insulation by conducting analysis of comparison, trending, characteristic, generator operation parameters correlation, and the actual physical damage on insulation. According to the analysis results, improper workmanship on semi conductive overlap layers during fabrication process is predicted to be the root cause that makes PD to be formed easily on this portion. Along with the insulation aging process and the increment of average operating temperature (from 27 to 29) on Unit-4 cooling system, it is suspected that PD activity is being accelerated and thus PD level on Unit-4 generator is higher than Unit-5 and 6.

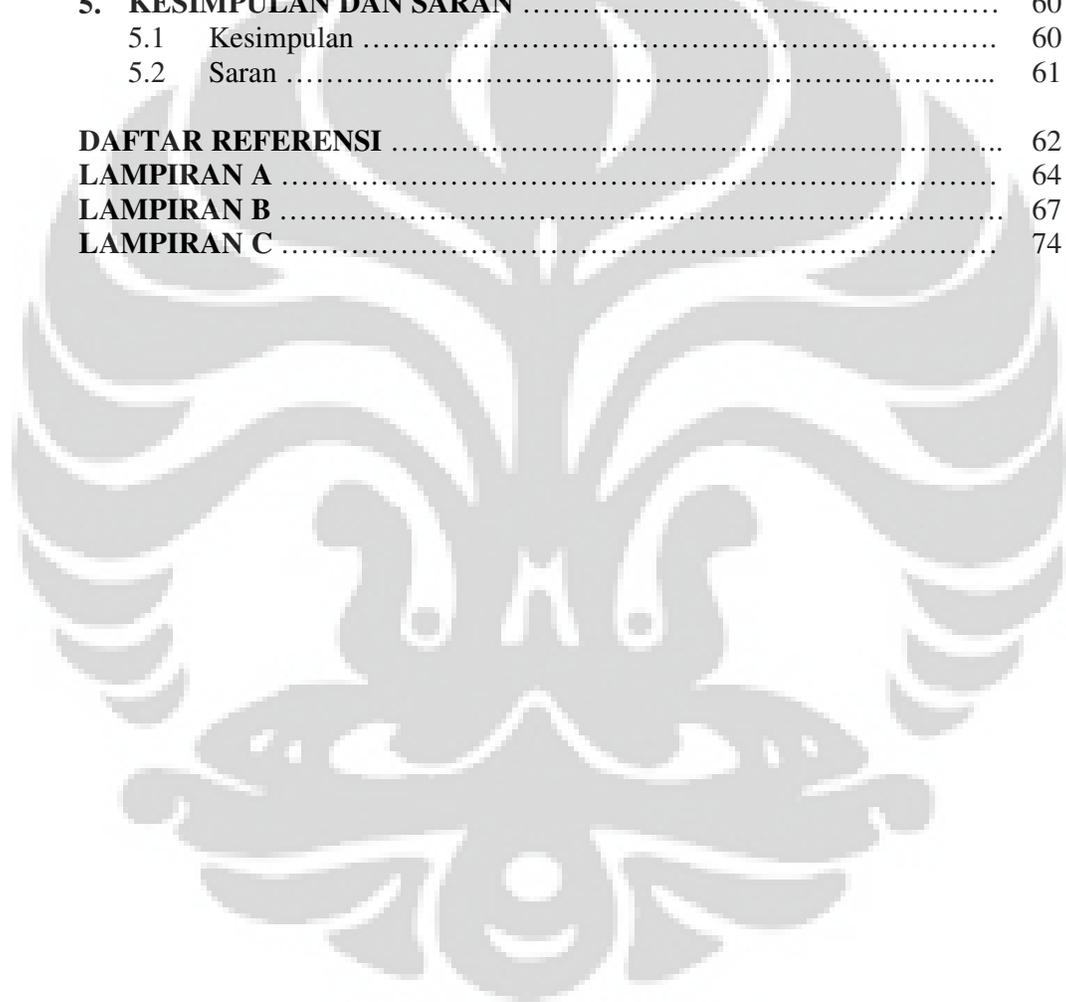
Key words:

Generator, Partial Discharge, winding insulation, grading area, temperature, aging.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
2. TEORI PENUNJANG	6
2.1 Umum	6
2.2 Isolasi Belitan Stator <i>Multi Turn</i>	7
2.2.1 Isolasi <i>Strand</i>	7
2.2.2 Isolasi <i>Turn</i>	8
2.2.3 Isolasi <i>Groundwall</i>	8
2.2.4 Lapisan Semikonduktif	8
2.2.5 Lapisan <i>Stress Control</i>	9
2.3 Dielektrik di Bawah Pengaruh Medan Magnet	10
2.3.1 Polarisasi dan Permittivitas Dielektrik	11
2.3.2 Kapasitansi	12
2.5 Peluahan Parsial (<i>Partial Discharge</i>)	14
2.5.1 Proses Terjadinya PD	15
2.5.2 Bentuk Fisik PD	18
2.5.3 Polaritas PD	20
2.5.4 Void Dalam Isolasi	21
2.5.5 Void Dekat Konduktor	21
2.5.6 Void Dekat Inti Besi (Dipermukaan Isolasi)	22
2.5.7 <i>Endwinding Discharge</i>	23
3. METODA PENGAMBILAN DAN PENGOLAHAN DATA PD	24
3.1 Umum	24
3.2 Metoda Pengukuran PD	25
3.3 Pengolahan Data	28
3.3.1 <i>Pulse Height Analysis</i> (PHA)	28
3.3.2 <i>Phase Resolved Plot</i>	29
3.3.2.1 <i>Pulse Phase Analysis</i> (PPA)	29
3.3.2.2 <i>Linear Pulse Density</i> (LPD)	30
3.4 Analisa Data PD	31
3.4.1 Analisa Trend	31

3.4.2	Analisa Komparasi	34
3.4.3	Analisa Karakteristik	36
4.	ANALISA	39
4.1	Gambaran Kondisi Belitan Stator Generator Unit-4 (Sebelum 26 Maret 2012)	39
4.2	Analisa Komparasi	41
4.3	Analisa <i>Trending</i> PD	43
4.4	Analisa Karakteristik PD	45
4.5	Parameter Operasi Generator dan PD	49
4.6	Generator Unit-4 dan Permasalahan Pada Area <i>Grading</i> Belitan ...	50
4.7	Lapisan Semikonduktif dan Suhu Air Pendingin Unit-4	55
5.	KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1	Kesimpulan	60
5.2	Saran	61
	DAFTAR REFERENSI	62
	LAMPIRAN A	64
	LAMPIRAN B	67
	LAMPIRAN C	74



DAFTAR GAMBAR

Gambar-2.1 Isolasi pada koil <i>Multi-Turn</i>	7
Gambar-2.2 Komponen koil <i>mult- turn</i> (1) Isolasi belitan pada area exit slot (2) Isolasi <i>groundwall</i> (3) Isolasi <i>strand</i> dan juga <i>turn</i> “c”, “d” lapisan semikonduktif, “e” lapisan <i>stress control</i>	9
Gambar-2.3 Lapisan <i>Stress Control</i>	10
Gambar-2.4 Kapasitansi Pada Dua Pelat Sejajar	13
Gambar-2.5 Ilustrasi Terjadinya PD pada Isolasi	16
Gambar-2.6 Proses Terbentuknya Pulsa PD Pada Gelombang Tegangan Sinusoidal	19
Gambar-2.7 <i>Rise Time</i> Pulsa PD	20
Gambar-2.8 Polaritas dan Letak PD Pada Isolasi	20
Gambar-2.9 Karakteristik Pulsa PD Untuk <i>Void</i> di Dalam Isolasi	21
Gambar-2.10 Karakteristik Pulsa PD Untuk <i>Void</i> di Dekat Konduktor	22
Gambar-2.11 Karakteristik Pulsa PD Untuk <i>Void</i> di Dekat Inti Besi	23
Gambar-2.12 Karakteristik Pulsa PD pada <i>Endwinding Discharge</i>	23
Gambar-3.1 Konfigurasi instalasi sensor PD	25
Gambar-3.2 Frekuensi <i>bandwidth</i> PD dan pengetesan	26
Gambar-3.3 Ringkasan variabel PD	27
Gambar-3.4 Plot data PD dengan menggunakan PHA	29
Gambar-3.5 Plot data PD dengan menggunakan PPA	30
Gambar-3.6 Plot data PD menggunakan LPD	31
Gambar-3.7 Grafik Trending data PD	32
Gambar- 3.8 (a) <i>Flow chart</i> analisa PD klasik (b) PD non klasik	38
Gambar-4.1 Saat Proses Penarikan Rotor dengan Menggunakan Penopang dan <i>Liner</i> yang Berpotensi Menggores Isolasi Belitan Stator.....	39
Gambar-4.2 Konfigurasi Belitan dan Penomorasi Slot Stator Generator Unit-4	40
Gambar-4.3 Kondisi Isolasi Belitan Stator Generator Unit-4 Pada Tahun 2010 yang Sebelumnya Telah Diperbaiki Pada MO 2006.....	41
Gambar-4.4 Grafik Perbandingan Nilai Magnitudo PD Generator Unit-4, 5, dan 6	42
Gambar-4.5 Data trending magnitudo PD dari tahun 2006 sampai dengan 26 Maret 2012	44

Gambar-4.6 Data Pengukuran PD Generator Unit-4 dalam plot PHA	46
Gambar-4.7 Data Pengukuran PD Generator Unit-4 dalam plot LPD	47
Gambar-4.8 Perbandingan Data Pengukuran PD Generator Unit-4 periode 2006 – 2012	48
Gambar-4.9 Perbandingan Data Pengukuran PD Generator Unit-4 Sebelum dan Sesudah MO 2010	51
Gambar-4.10 Permukaan Area Grading Belitan Stator Generator Unit-4 yang Rusak Akibat PD	52
Gambar-4.11 Konstruksi Pemasangan Lapisan Konduktif dan Lapisan Semikonduktif <i>Voltage Grading</i> Generator Unit-4	53
Gambar-4.12 Rangkaian Pengganti Isolasi Pada Area <i>Grading</i>	52
Gambar-4.13 Grafik Hubungan Antara Nilai Resistansi yang Berbeda Pada material SiC dengan Tegangan Permukaan Isolasi	54
Gambar-4.14 Kondisi Area Grading yang Telah Diperbaiki Pada Tahun 2006, di Periksa Kembali Pada Tahun 2010	55
Gambar-4.15 Data Suhu Air Pendingin Unit-4, 5, dan 6	56
Gambar-4.16 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T1 Pada Belitan Stator Fasa R	58
Gambar-C.1 Grafik Perbandingan Antara Suhu Air Pendingin Masuk dan Udara Pendingin Pada Generator <i>Cooler A</i>	74
Gambar-C.2 Grafik Perbandingan Antara Suhu Air Pendingin Masuk dan Udara Pendingin Pada Generator <i>Cooler B</i>	74
Gambar-C.3 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T2 Pada Belitan Stator Fasa R	75
Gambar-C.4 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T3 Pada Belitan Stator Fasa S	75
Gambar-C.5 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T4 Pada Belitan Stator Fasa S.....	76
Gambar-C.6 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T5 Pada Belitan Stator Fasa T.....	76
Gambar-C.7 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler A</i> dan RTD T6 Pada Belitan Stator Fasa T.....	77
Gambar-C.8 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T1 Pada Belitan Stator Fasa R.....	77
Gambar-C.9 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T2 Pada Belitan Stator Fasa R.....	78
Gambar-C.10 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T3 Pada Belitan Stator Fasa S.....	78
Gambar-C.11 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T4 Pada Belitan Stator Fasa S.....	79
Gambar-C.12 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T5 Pada Belitan Stator Fasa T.....	79
Gambar-C.13 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator <i>Cooler B</i> dan RTD T6 Pada Belitan Stator Fasa T.....	80
Gambar-C.14 Grafik Pengujian Normalitas Data dari Daya Keluaran Generator Unit-4.....	80

DAFTAR TABEL

Tabel-1.1 Data Kegagalan Mesin Berputar Terkait dengan Kegagalan Listrik	2
Table-2.1 Data Statistik Korelasi Kelas Tegangan dan Umur Operasi dengan Terukurnya PD	15
Tabel-3.1 Kategori Pulsa Terukur Langsung	26
Tabel-3.2 Korelasi PD Terhadap Parameter Operasi	32
Tabel-3.3 Tipikal Trending Magnitudo PD	33
Tabel- 3.4 Data <i>Statistical Summary</i> Magnitudo PD dan Kelas Tegangan Mesin	35
Tabel 4.1 Data Kerusakan Akibat PD Pada Belitan Stator Generator Unit-4	40
Tabel-4.2 Data Pengukuran Magnitudo PD Generator Unit-4, 5, dan 6 Tanggal 26 Maret 2012.....	42
Tabel-4.3 Komparasi Data Hasil Pengukuran PD dengan data <i>IRIS Staititcal Summary</i>	42
Tabel-4.4 Katagori Data Trend Generator Unit-4 Berdasarkan Perioda Trending dan Fasa Belitan	45
Tabel-4.5 Data Pengukuran PD Pada Isolasi Belitan Generator Unit-4.....	45
Tabel-4.6 Korelasi Parameter Operasi Generator dengan Magnitudo PD di Fasa A	50
Tabel-4.7 Korelasi Parameter Suhu Pendingin dan Suhu Belitan Stator.....	57
Tabel-A.1 Data Parameter Operasi Generator dan Pengukuran PD.....	64
Tabel-B.1 Data Parameter Operasi Generator dan Parameter Suhu.....	67

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Unplanned shutdown pada unit pembangkit yang disebabkan kerusakan pada peralatan/mesin listrik dapat mengakibatkan kerugian secara ekonomi baik dari sisi pembangkit listrik itu sendiri (*loss production*) maupun kerugian bagi pihak konsumen pengguna listrik akibat dari ketiadaan listrik yang tidak diperkirakan sebelumnya. Keandalan dan ketersediaan pasokan listrik sangatlah penting untuk dijaga mengingat listrik merupakan salah satu energi yang menjadi tulang punggung perekonomian bangsa. Rendahnya keandalan dan ketersediaan pasokan listrik akan berakibat pada kecilnya tingkat pertumbuhan ekonomi sehingga akan menghambat laju pembangunan Indonesia.

Pada sebuah pembangkit listrik, generator merupakan salah satu mesin yang sangat krusial dalam sistem pembangkitan energi listrik yang berfungsi untuk mengkonversikan energi primer menjadi energi listrik (sekunder). Dalam operasi pembangkit, keandalan generator menjadi salah satu fokus penting karena memiliki kontribusi yang sangat besar pada keseluruhan tingkat keandalan pembangkit listrik tersebut.

Berdasarkan data statistik dari IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineer*) dan EPRI (*Electric Power Research Institute*), sekitar 30% kegagalan pada mesin berputar (motor/generator) diakibatkan dari permasalahan yang terkait dengan kegagalan listrik^[1]. Tabel 1.1 memperlihatkan hasil studi terkait dengan kegagalan listrik dimana data dari IEEE mengidentifikasi permasalahan berdasarkan kontributor kegagalan (*Failure Contributor*), sedangkan data EPRI mengidentifikasi permasalahan berdasarkan persentase kegagalan oleh komponen (*Percentage Failure by Component*)^[2].

Tabel-1.1 Data Kegagalan Mesin Berputar Terkait dengan Kegagalan Listrik ^[2]

Studi IEEE		Studi EPRI	
<i>Failure Contributor</i>	%	<i>Failed Component</i>	%
<i>Persistent Overloading</i>	4.2	<i>Stator Ground Insulation</i>	23.0
<i>Normal Deterioration</i>	26.4	<i>Turn Insulation</i>	4.0
		<i>Bracing</i>	3.0
		<i>Core</i>	1.0
		<i>Cage</i>	5.0
Total	30.6		36.0

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*).

Pada aplikasi di industri dan pembangkit, umur rata-rata mesin berputar adalah sekitar 20 – 30 tahun sebelum mesin tersebut memerlukan perbaikan atau penggantian pada belitan ^[3]. 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 salah satunya 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 ^[3].

Terbentuknya *Partial Discharge* (PD) atau peluahan sebagian pada sistem isolasi merupakan indikasi atau gejala yang timbulkan akibat adanya stres-stres tersebut. Selama hampir lebih dari 40 tahun, beberapa pabrik pembuat generator/motor dan sebagian dari pembangkit listrik yang melakukan pengukuran PD memberikan sebuah hipotesa, bahwa secara praktis pengukuran aktifitas PD secara periodik dapat mendeteksi permasalahan pada isolasi belitan beberapa tahun sebelum terjadinya kegagalan. Dalam konsep perawatan terprediksi, hasil pengukuran aktifitas PD dapat diolah untuk dapat digunakan dalam memprediksi

waktu perawatan yang tepat sehingga *cost effective*. Kegiatan perawatan yang dapat dilakukan seperti membersihkan dan memperbaiki isolasi belitan, merubah operasi mesin, atau mengganti belitan sehingga dapat memperpanjang umur pakai dan dapat mencegah kegagalan mesin yang tidak terduga.

1.2 Perumusan Masalah

Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP) Gunung Salak yang dioperasikan sejak tahun 1997 oleh Chevron berjumlah 3 unit dengan kapasitas total pembangkitan sebesar 3 x 65 MW. Seiring dengan bertambahnya usia pembangkit, maka kemungkinan timbulnya permasalahan yang terkait dengan kegagalan listrik pada generator utama semakin meningkat. Sistem untuk memonitor aktivitas PD pada isolasi belitan stator yang telah di pasang sejak tahun 2006 dapat memberikan kemudahan untuk tim *engineering* dan *maintenance* dalam melakukan evaluasi terhadap kondisi isolasi belitan stator dalam kondisi operasi yang sesungguhnya. Evaluasi kondisi isolasi yang saat ini dilakukan baru sebatas mengukur dan mencatat level PD serta melakukan trending terhadap data tersebut. Dalam skripsi ini, penulis mencoba untuk menganalisis lebih lanjut karakteristik PD pada isolasi belitan stator, mencari korelasi terhadap parameter operasi dan hasil visual inspeksi, serta menganalisa kerusakan dan mencari penyebab permasalahan tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pembuatan skripsi ini adalah untuk memenuhi syarat kelulusan pada tingkat sarjana di Universitas Indonesia. Selain itu, penelitian dalam skripsi ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut :

1. Mengetahui level aktifitas PD terkini pada isolasi belitan stator berdasarkan perbandingan nilai aktual data hasil pengukuran dan data distribusi statistik yang dikeluarkan oleh IRIS Power Engineering, Inc. Perbandingan juga dilakukan untuk ketiga unit generator yang tipikal agar dapat diketahui kondisi belitan relatif antar generator.
2. Menganalisa *trending* data magnitudo PD terhadap waktu sehingga

dapat diketahui tipe proses kegagalan isolasi belitan stator secara umum.

3. Menganalisa karakteristik sebaran PD secara teoritis dan membandingkannya dengan kondisi aktual isolasi belitan stator yang ditemukan pada *major overhaul* (MO) sehingga dapat diketahui hubungan antara teori dan kondisi aktual.
4. Menganalisa korelasi parameter-parameter operasi generator yang terukur bersamaan dengan pengukuran PD. Hal ini digunakan sebagai penunjang analisa karakteristik PD sehingga dapat diketahui hubungan antara variabel-variabel tersebut.
5. Menganalisa kerusakan akibat PD serta mencari tahu penyebab permasalahan tersebut sehingga dapat memberikan rekomendasi untuk perbaikan ke depan.

1.4 Pembatasan Masalah

Hal-hal yang akan di bahas dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Studi kasus hanya dilakukan pada generator utama Unit-4 yang memiliki jumlah titik kerusakan isolasi yang paling tinggi.
2. Data magnitudo PD generator Unit-5 dan 6 digunakan hanya sebagai data pembanding.
3. Pengukuran aktivitas PD dilakukan menggunakan alat diagnostik TGA-B dengan perangkat lunak PDLitepro 2.5 yang dibuat oleh IRIS Power Engineering, Inc.
4. Analisis distribusi dan magnitudo pulsa menggunakan perangkat lunak PDLite View 3.6 yang dibuat oleh IRIS Power Engineering, Inc.
5. Analisis pola keluaran pengukuran PD dilakukan berdasarkan data empiris dari IRIS Power Engineering, Inc.
6. Analisis data kuantitatif yang terdiri dari Qm dan NQN dilakukan berdasarkan data empiris dari IRIS Power Engineering, Inc.

7. Parameter operasi generator yang diambil dan diolah yaitu, daya keluaran (P/Q), tegangan (V), arus (I), suhu belitan (t_{RTD}), suhu udara pendingin (t_{cooler}), dan suhu air pendingin (t_{air}).
8. Data pengukuran suhu air dan udara pendingin generator diambil mulai dari tahun 2010 dari rekaman data *Plant Information Management System* (PIMS).
9. Metoda perbaikan isolasi belitan stator tidak termasuk dalam bahasan.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian yang dilakukan di mulai dengan studi literatur, melakukan pengumpulan data PD dan data-data parameter operasi generator serta data kondisi isolasi aktual hasil inspeksi. Pengambilan data PD dilakukan dengan menggunakan *analyzer* TGA-B dan perangkat lunak PDLite Pro 2.3 yang hasilnya di olah dengan menggunakan perangkat lunak PDview 3.6. Data hasil pengolahan tersebut kemudian dianalisa lebih lanjut untuk dibandingkan antara hasil analisa secara teoritis dan kondisi aktual yang ditemukan. Selain itu analisa korelasi juga dilakukan terhadap parameter-parameter operasi generator dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Statistical Process Control* (SPC) XL 2.4. Analisa kerusakan akibat PD dilakukan dengan menganalisa secara teori yang diambil dari beberapa jurnal ilmiah IEEE dan melihat kondisi aktual bagian yang rusak.

1.6 Sistematika Penulisan

Agar mempermudah pembahasan, penulisan di bagi kedalam beberapa bab. Bab-1 menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab-2 membahas tentang dasar teori penunjang yang berkaitan dengan PD dan analisa yang dilakukan. Bab-3 membahas tentang metoda pengambilan dan pengolahan data. Bab-4 berisi tentang analisa. Bab-5 merupakan penutup yang berisi kesimpulan.

BAB 2

TEORI PENUNJANG

2.1 Umum

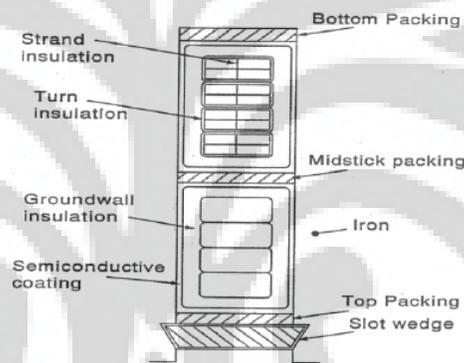
Seleksi penggunaan sistem isolasi kelistrikan pada mesin-mesin berputar akan selalu bergantung pada beberapa faktor yaitu material (bahan baku) yang tersedia, harga material, kebutuhan teknis (aplikasi pada mesin yang berbeda-beda), serta biaya-biaya relatif untuk proses fabrikasi. Pada era awal perkembangan industri, sistem isolasi bergantung pada bahan-bahan alami. Penggunaan bahan-bahan tersebut dilakukan dengan serangkaian uji coba untuk mendapatkan sistem isolasi yang memenuhi kriteria. Sehingga pada waktu itu suhu operasi, stres mekanik, dan stres elektrik pada mesin berputar di jaga pada level yang rendah agar memenuhi batasan dari kemampuan material tersebut ^[3].

Kehandalan sistem isolasi pada mesin-mesin berputar generasi awal melibatkan desain yang konservatif untuk menjamin umur operasi yang panjang. Dengan meningkatnya persaingan seiring dengan meningkatnya ilmu pengetahuan dan keterbatasan material alami, kombinasi atau pencampuran material mulai dilakukan sehingga memungkinkan sistem isolasi dioperasikan pada tingkat stres yang lebih tinggi (termal, mekanik, listrik, dan kondisi sekitar). Dengan tingginya tingkat stres serta ketebalan isolasi yang di desain lebih tipis oleh pabrik, umur isolasi belitan pada era saat ini relatif lebih pendek bila dibandingkan dengan umur isolasi generasi awal.

Permasalahan pada isolasi yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi prematur adalah peluahan parsial *Partial Discharge (PD)*. Dengan kemajuan teknologi saat ini, pengukuran PD dapat dilakukan secara *on-line* (saat mesin beroperasi) sehingga PD dapat di ukur pada operasi mesin yang sesungguhnya dan hasil analisa dapat lebih akurat.

2.2 Isolasi Belitan Stator *Multi Turn*

Fungsi utama dari isolasi adalah untuk memisahkan konduktor dari inti stator sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan tegangan antara konduktor dari inti stator. Ada tiga tipe isolasi pada koil *multi-turn* yaitu isolasi *strand*, *turn*, dan *groundwall*. Sedangkan pada *bar* hanya terdapat isolasi *strand* dan *groundwall*. Material *tape* yang biasa digunakan untuk isolasi adalah kaca dan mika yang memiliki sifat isolasi elektrik yang bagus tetapi tidak bagus dalam sifat mekanik. Kaca dan mika cenderung pecah ketika terjadi vibrasi pada generator. Untuk mengurangi stres mekanik pada isolasi, biasanya digunakan *tape* dengan bahan campuran organik. Bahan organik yang sering digunakan seperti aspal, *polyester*, dan epoksi.



Gambar-2.1 Isolasi pada koil *Multi-Turn*

2.2.1 Isolasi *Strand*

Fungsi dari isolasi *strand* adalah untuk memisahkan individual *strand* yang membuat ikatan berputar. Putaran yang dibuat *strand* yang lebih kecil akan menurunkan *skin* efek dan *losses stray* dari medan magnet. Stres tegangan yang melewati isolasi *strand* biasanya dalam range mV dan kurang dari 1 V. Karena ada stres yang minimal, kegagalan pada isolasi *strand* biasanya hanya menaikkan *losses stray*. Akan tetapi jika terjadi *arcing*, *strand to strand* maka akan terjadi hubung singkat dan dengan cepat akan terjadi kegagalan pada koil. Pada mesin modern biasanya digunakan *polyamide*, polimide film, kaca, *dacron*, dan mika sebagai isolasi *strand*.

2.2.2 Isolasi *Turn*

Hanya pada koil *multi-turn* yang memiliki isolasi *turn* sedangkan belitan stator bar tidak memiliki isolasi *turn* karena hanya memiliki satu *turn*. Tujuan dari isolasi *turn* adalah untuk mencegah shorts antar *turn* dan untuk menghasilkan kekuatan dielektrik yang cukup untuk mencegah kegagalan dibawah pengaruh tegangan transien yang hadir pada belitan stator selama penyalaan maupun gangguan petir. Frekuensi stres tegangan yang melewati isolasi *turn* pada koil *form-wound* adalah konstan dan merupakan hasil dari desain mesin yang bisa dihitung berdasarkan tegangan fasa to ground dari mesin dan jumlah *turn* dalam koil. Stres tegangan AC yang melewati isolasi *turn* adalah 10-200 V/*turn*. Material yang biasa digunakan untuk isolasi *turn* adalah kertas mika dengan kaca atau polyester sebagai pendukungnya.

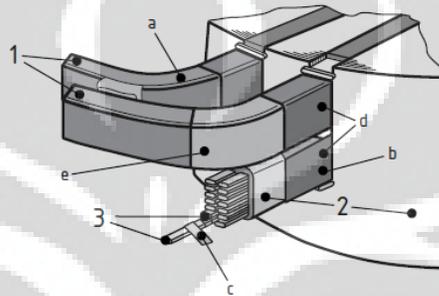
2.2.3 Isolasi *Groundwall*

Tujuan dari isolasi *groundwall* adalah untuk mencegah hubung singkat antara konduktor tembaga dan inti stator yang tergroundkan. Ketebalan dari isolasi *groundwall* biasanya bergantung pada tegangan kerja mesin dan stres volt/mm. Semakin tipis isolasi *groundwall*, semakin banyak stres tegangan yang melewati *groundwall* dan meningkatkan kemungkinan terjadinya *breakdown*. Material utama yang digunakan untuk isolasi *groundwall* adalah mika. Mika memiliki sifat kuat secara elektrik dan termal, tetapi mudah pecah. Oleh karena itu, dibutuhkan material untuk melindungi mika dari stres mekanik yaitu dengan mengimpregnasi *tape* dengan resin organik. Karena koil isolasi *groundwall* dapat terpengaruh stres elektrik dan termal, lapisan tersebut di ikat bersama dengan *varnish* organik yang biasanya digunakan material *polyester* maupun epoksi.

2.2.4 Lapisan Semikonduktif

Lapisan semikonduktif diaplikasikan pada setiap koil sehingga menghasilkan stres elektrik yang lebih seragam disepanjang isolasi pada inti stator dari belitan. Koil dibungkus pada slot menggunakan pembungkus tipe semikonduktif. Antara tembaga bertegangan tinggi dan inti stator yang tergroundkan terdapat isolasi dan *void* (d_{air}). Berdasarkan spesifikasi instalasi *void*

yang terjadi biasanya kurang dari 0.05 mm. Akan tetapi, selama tahun pertama operasi, isolasi baru yang diaplikasikan akan mengalami penyusutan sehingga menyebabkan *void* udara menjadi lebih besar. Isolasi dan *void* udara berada di antara dua metal sehingga akan membentuk kapasitor dan material memiliki perbedaan konstanta dielektrik (ϵ). Ketika tegangan AC diaplikasikan melewati kapasitor, stres tegangan membagi wilayah tiap dielektrik berdasarkan ketebalan dan konstanta dielektrik.



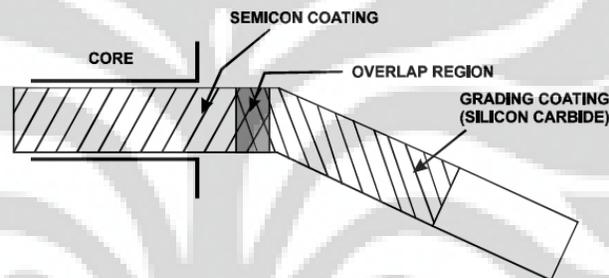
Gambar-2.2 Komponen koil multi turn (1) Isolasi belitan pada area exit slot (2) Isolasi groundwall (3) Isolasi strand dan juga turn “c”, “d” lapisan semikonduktif, “e” lapisan stress control

Partial discharge akan terjadi jika tegangan yang melewati *void* melebihi tegangan *breakdown* elektrik udara yaitu 3 kV/mm. Untuk mengurangi stres tegangan yang melewati *void*, material semikonduktif (berupa cat maupun *tape*) digunakan disekeliling koil yang diaplikasikan dalam slot. Material semikonduktif digunakan untuk menghubungkan singkat kapasitansi *void* sehingga mencegah tegangan naik. Ketika lapisan semikonduktif utuh dan baik, seharusnya tidak ada peluang untuk stres mengalir secara alami melewati spasi antara inti besi dan permukaan koil untuk mencapai tingkatan tegangan yang dapat menyebabkan *breakdown*.

2.2.5 Lapisan *Stress Control*

Lapisan *stress control* merupakan silikon karbida yang berupa cat maupun *tape*. Pada daerah *endwinding*, kehadiran bidang ground memungkinkan permukaan koil memiliki potensial yang sama dengan konduktor. Pada bagian

akhir koil akan ada tegangan fasa ke ground. Pada tepi *tape* semikonduktif di luar slot, terdapat stres elektrik yang tinggi. Pada permukaan ini tegangan tiba-tiba berganti dari tegangan penuh ke nol. Untuk mencegah hal ini terjadi, ditempatkan lapisan *stress control* pada permukaan sistem isolasi *groundwall* sedikit tumpang tindih dengan lapisan semikonduktif, sepanjang 7-12 cm ke arah *endwinding* ^[5]. Material *silicone carbide* memiliki resistivitas non linear, resistansi akan berkurang dengan seiring dengan naiknya tegangan. Tujuan dari penerapan lapisan *stress control* adalah untuk mengurangi tegangan tinggi pada *endwinding* ke nol pada semikonduktif yang tergroundkan secara bertahap. Tanpa adanya lapisan *stress control*, maka akan ada stres elektrik yang akan mengurangi umur belitan dan menghasilkan PD.



Gambar-2.3 Lapisan *Sress Control*

2.3 Dielektrik Dibawah Pengaruh Medan Listrik

Saat suatu bahan isolasi/dielektrik berada dalam pengaruh medan listrik, maka hal utama yang terjadi adalah polarisasi, yaitu suatu pembatasan jarak antara dua molekul terikat atau orientasi didalam suatu molekul dua kutub.

Fenomena polarisasi dielektrik dapat dinilai melalui parameter permitivitas (konstanta dielektrik) dan faktor disipasi (*loss angle* atau *loss tangent*) jika pada fenomena tersebut terjadi disipasi energi listrik kedalam bentuk panas yang menyebabkan pemanasan pada dielektrik. Pemanasan dielektrik dapat merupakan akibat dari adanya sejumlah muatan bebas dalam bahan dielektrik tersebut. Hal ini akan mengakibatkan arus bocor (arus konduksi) dalam jumlah kecil pada tegangan yang diterapkan. Keberadaan arus ini di dalam dan pada permukaan dielektrik menunjukkan terjadinya konduksi listrik pada dielektrik tersebut, kemudian dapat

dikuantisasikan menurut konduktivitas volume dan permukaannya sehingga terlihat hubungan terbalik dengan resistibilitas volume dan permukaannya.

Tegangan yang dapat diterapkan pada semua bahan dielektrik tidak boleh melebihi nilai batas tegangan yang umum pada keadaan terbatas. Apabila nilai tegangan yang diterapkan melebihi harga tadi, kegagalan dielektrik akan terjadi, yaitu kehilangan seluruh kemampuan isolasi bahan tersebut.

Nilai tegangan dimana suatu bahan dielektrik mulai pecah disebut tegangan gagal, dan kekuatan medan listrik seragam disebut *dielectric strength* (yang juga dikenal dengan istilah *electric strength* atau *breakdown strength*)

2.3.1 Polarisasi dan Permittivitas Dielektrik

Muatan terikat yang berada pada bahan dielektrik dapat berpindah akibat pengaruh medan listrik searah dengan gaya yang aktif pada dielektrik tersebut. Perpindahannya akan proporsional terhadap kuat medan tersebut. Saat medan listrik menghilang, muatan-muatan ini kembali kekeadaan semula. Pada dielektrik berkutub yang terdiri dari atas molekul dua kutub, medan listrik akan menyebabkan orientasi dua kutub searah dengan medan. Saat medan listrik memudar, orientasi dua kutub akan menghilang juga akibat fluktuasi suhu^[10].

Kebanyakan dielektrik memiliki hubungan yang linier antara perpindahan molekul dielektrik dan kuat medan listrik yang dihasilkan didalam bahan dielektrik. Pada suatu kelompok dielektrik tertentu, perubahan kuat medan listrik menyebabkan perpindahan molekul dengan hubungan yang tidak linier hingga mencapai titik jenuh/saturasi pada kekuatan medan tertentu. Kelompok ini disebut *ferro electrics*. Polarisasi dielektrik yang tidak linier pertama kali ditemukan melalui penelitian Rochelle salt.

Bahan dielektrik apapun dengan elektroda-elektroda diletakan padanya kemudian dihubungkan ke rangkaian listrik dapat dianggap sebagai kapasitor dengan nilai kapasitansi tertentu.

2.4 Kapasitansi

Penggunaan bahan dielektrik sebagai suatu isolasi antar elektroda menimbulkan efek kapasitansi. Efek kapasitansi ini akan mempunyai karakteristik yang berbeda-beda tergantung dari sifat permeabilitas dari bahan dielektrik tersebut. Efek kapasitansi tersebut mempunyai sifat yang sama dengan dua plat sejajar dengan suatu permeabilitas bahan dialiri suatu sumber tegangan.

Jika beda potensial antara dua pelat sejajar adalah V , maka kita dapat mendefinisikan kapasitansi dari sistem dua konduktor ini sebagai rasio muatan total pada salah satu konduktor terhadap beda potensial antara kedua konduktor.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

Kapasitansi ini erat kaitannya dengan intensitas medan listrik (E), kerapatan fluks listrik (D) serta permeabilitas (ϵ). Menurut hukum Gauss, besarnya kerapatan fluks listrik yang menembus setiap permukaan tertutup sama dengan muatan total yang dilingkupi oleh permukaan tersebut, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan ^[13] :

$$D = \frac{Q}{A} \quad (2.2)$$

Dimana:

Q = Besar muatan (Coloumb)

A = Luas penampang (m^2)

Intensitas medan magnet mendapat pengaruh dari permeabilitas bahan dan fluks. Sehingga E dapat dihitung dengan persamaan:

$$E = \frac{D}{(\epsilon_0 \cdot \epsilon_r)} \quad (2.3)$$

Dimana:

ϵ_0 = Permeabilitas ruang hampa.

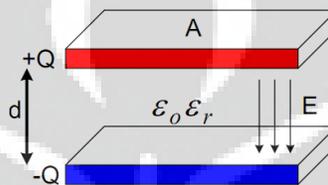
ϵ_r = Permeabilitas bahan.

Besarnya tegangan antara kedua pelat sejajar adalah

$$V = \frac{Q \cdot d}{(\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A)} \quad (2.4)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.1) dan (2.4) maka didapatkan

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} \quad (2.5)$$



Gambar-2.4 Kapasitansi Pada Dua Pelat Sejajar

Akibat dari permeabilitas bahan diantara dua konduktor berbeda-beda, maka akan menimbulkan tingkat kapasitansi yang berbeda-beda.

Pada susunan permeabilitas bahan secara seri, besar muatan yang mengalir pada setiap permeabilitas adalah sama^[13].

$$E_2 = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2} \cdot A} \quad ; \quad E_1 = \frac{Q}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1} \cdot A} \quad (2.6)$$

Tegangan pada setiap permeabilitas adalah

$$V = E_1 \cdot d_1 = \frac{Q \cdot d_1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1} \cdot A} \quad ; \quad V = E_2 \cdot d_2 = \frac{Q \cdot d_2}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2} \cdot A}$$

$$V = V_1 + V_2$$

$$\text{Besarn} \quad = Q \left(\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r1} \cdot A / d_1} + \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{r2} \cdot A / d_2} \right) \quad (2.7)$$

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{V}{Q}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r1} \cdot A / d_1} + \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{r2} \cdot A / d_2} \\
 &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

2.5 Peluahan Parsial (*Partial Discharge*)

Definisi *partial discharge* (PD) merujuk pada IEC 60207 adalah peristiwa tembus listrik (peluahan) yang menghubungkan secara parsial atau sebagian isolasi yang berada diantara dua buah konduktor. Hal ini berbeda dengan peristiwa tembus listrik secara penuh yang didefinisikan sebagai kegagalan isolasi. Istilah korona didefinisikan sebagai peristiwa terionisasinya medium gas disekitar konduktor sehingga menghasilkan PD yang dapat terlihat. Peristiwa korona ini tidak melibatkan isolasi dalam proses pembentukannya.

Secara umum PD terjadi akibat dari tingginya konsentrasi (*stres*) muatan listrik yang terlokalisir baik di dalam maupun dipermukaan isolasi. PD akan muncul dalam bentuk pulsa atau impuls dengan durasi yang sangat singkat. Terbentuknya pulsa-pulsa PD ini dipengaruhi oleh tegangan kerja (AC) pada peralatan listrik dan mulai terbentuk pada tegangan kerja mulai dari 3 kV ke atas.

PD yang terjadi pada waktu lama akan menyebabkan terjadinya degradasi dari kualitas isolasi dan pada akhirnya akan menyebabkan kegagalan (*breakdown*). PD dapat terjadi pada isolasi padat maupun cair. Di dalam isolasi cair, PD dapat muncul pada gelembung udara/gas yang terjebak didalam isolasi cair tersebut. Sedangkan didalam isolasi padat, PD dapat muncul pada void (rongga udara) atau pada pemohonan listrik (*electrical treeing*).

Pada era awal perkembangan teknologi, pengukuran PD hanya dapat dilakukan secara *off-line* (mesin dalam keadaan mati) dengan menginjeksikan sumber tegangan pada belitan stator untuk mensimulasikan kondisi stres tegangan pada isolasi. Di samping memiliki keunggulan untuk melokalisir masalah PD pada belitan stator, akan tetapi pengukuran PD semacam ini memiliki kelemahan, yaitu

tidak bisa mengukur aktivitas PD yang terjadi akibat dari pengaruh kondisi operasi mesin berputar. Sebagai contoh aktivitas PD yang dipengaruhi oleh kondisi termal dan vibrasi saat mesin beroperasi. Seiring dengan perkembangan teknologi, pengukuran aktivitas PD secara *on-line* (saat mesin beroperasi) dan teknologi pemisahan *noise* sudah dapat dilakukan dengan baik sehingga akurasi nilai pengukuran PD semakin meningkat.

Pengukuran PD secara *on-line* sangat membantu dalam memonitor dan mengevaluasi secara akurat kualitas isolasi mesin dalam kondisi operasi yang sesungguhnya. Pada generator/motor dengan umur operasi yang relatif baru, adanya aktivitas PD dalam level yang rendah merupakan fenomena yang wajar dan tidak dapat dihindari akibat dari proses fabrikasi dan desain yang tidak sempurna. Berikut ini adalah data statistik yang memperlihatkan korelasi antara kelas tegangan peralatan dan umur operasi dimana rata-rata aktivitas PD mulai terukur.

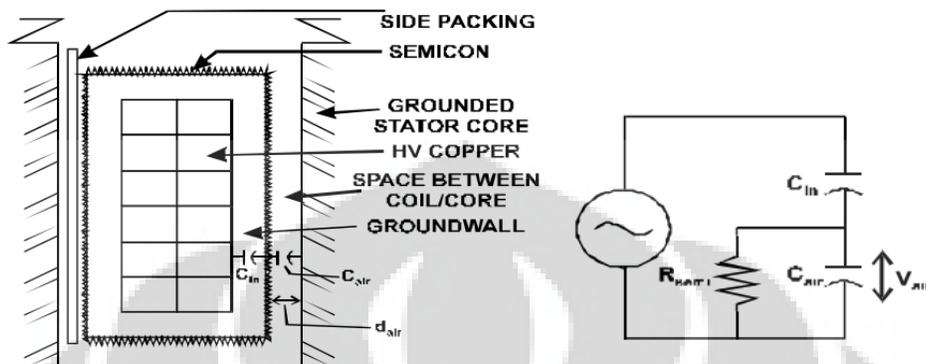
Table-2.1 Data Statistik Korelasi Kelas Tegangan dan Umur Operasi dengan Terukurnya PD ^[5]

Rating Tegangan Peralatan	Umur Operasi
Rating \geq 18 KV	10 tahun
Rating 11 - 13.8 KV	5 tahun
Rating 6 - 8 KV	2 – 3 tahun
Rating 3.3 – 4 KV	Beberapa bulan

2.5.1 Proses Terjadinya PD

Awal dari sebuah kegagalan isolasi adalah terbentuknya gelembung atau rongga (*void*) yang terisi udara atau gas yang memiliki permeabilitas lebih rendah dari sekelilingnya. Pada isolasi padat terbentuknya *void* bisa disebabkan oleh beberapa penyebab diantaranya adalah proses fabrikasi, instalasi, dan faktor operasi. Ketika *void* terbentuk pada isolasi, maka beda potensial/tegangan akan terbentuk pada *void* tersebut. Besarnya tegangan ini akan tergantung dari tegangan operasi mesin, kapasitansi bahan isolasi, dan jenis gas didalam *void* tersebut.

Tegangan yang terbentuk pada *void* didalam isolasi mesin dapat dimodelkan seperti pada gambar berikut.



Gambar-2.5 Ilustrasi Terjadinya PD pada Isolasi

Merujuk pada hukum Paschen, peluahan dapat terjadi ketika stres elektrik (V/mm) melebihi stres tegangan tembus dari gas. Faktor lain disamping panjang *void* yang berdampak pada stres didalam *void* adalah diameter, kandungan gas, tekanan, juga sifat alami dari permukaan *void*. Perhitungan tegangan pada *void* dapat dilihat pada contoh perhitungan berikut.

Kriteria:

- Isolasi belitan stator di impregnasi dengan epoksi setebal 5 mm.
- Tegangan kerja generator adalah 11.8 kV dengan tipe pendinginan udara.
- Sebuah *void* dengan lebar celah 0.5 mm terbentuk pada permukaan yang berbatasan dengan inti stator yang digroundkan.

Tegangan yang terbentuk pada *void* dapat ilustrasikan dalam gambar 2.5 dan dapat diperkirakan dengan pendekatan sebagai berikut:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} ; \quad \epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Dimana

ϵ = adalah sifat bahan dielektrik antara konduktor dan ground.

$$\epsilon_r \text{ epoxy} = 4$$

A = luas area isolasi dimana void berada.

d = adalah diameter void atau jarak rongga.

Sehingga didapat

$$C_{\text{isolasi}} = 4 \epsilon_0 A / d_{\text{isolasi}}$$

$$C_{\text{udara}} = \epsilon_0 A / d_{\text{udara}}$$

Perhitungan tegangan pada udara didapat dengan prinsip rangkaian pembagi tegangan kapasitif, sehingga di peroleh:

$$V_{\text{udara}} = \frac{C_{\text{isolasi}}}{C_{\text{udara}} + C_{\text{isolasi}}} \times V_{\text{kerja}}$$

Dimana tegangan kerja adalah tegangan fasa ke ground dari generator yaitu

$$\begin{aligned} V_{\text{kerja}} &= 11.8 / 1.73 \\ &= 6.82 \text{ kV} \end{aligned}$$

Dengan mengasumsikan luas area (A) isolasi sama dengan luas area dimana *void* berada, maka:

$$V_{\text{udara}} = \frac{4/d_{\text{isolasi}}}{4/d_{\text{isolasi}} + 1/d_{\text{udara}}} \times V_{\text{kerja}}$$

Sehingga di dapat:

$$\begin{aligned} V_{\text{udara}} &= \frac{4/4.5}{4/4.5 + 1/0.5} \times 6.82 \\ &= 2.1 \text{ kV} \end{aligned}$$

Peluhan akan terjadi jika stres elektrik (V/mm) melebihi nilai stres tegangan tembus dari gas, yaitu 3kV/mm untuk udara dan bernilai lebih tinggi

pada gas lain (contohnya hidrogen). Pada perhitungan diatas, maka stres elektrik yang terbentuk pada *void* adalah $2.1 \text{ kV}/0.5 \text{ mm} = 4.2 \text{ kV/mm}$.

Energi yang tersimpan pada *void* dengan menganalogikan sebagai sebuah kapasitor adalah

$$W = \frac{1}{2} C_{\text{udara}} \times V_{\text{udara}}^2 \quad (2.9)$$

Sesaat sebelum terjadi kegagalan tegangan pada udara adalah $V_{\text{udara}} = 3 \text{ kV} \times d_{\text{udara}}$ (dari $E = V/d$) sehingga di peroleh

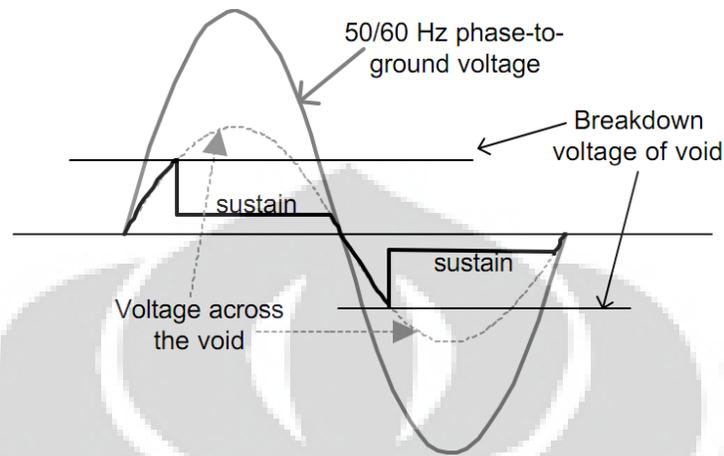
$$W = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\epsilon_{\text{udara}} \times A}{d_{\text{udara}}} \right) \times (3\text{kV} \times d_{\text{udara}})^2 \ll V d_{\text{udara}}$$

Dari persamaan diatas, maka magnitudo dari peluahan adalah proporsional dengan volume udara dari *void*. Semakin besar volumenya maka akan semakin besar pula peluahannya. Selain lebar celah *void*, hal lain yang mempengaruhi stres elektrik pada *void* yaitu diameter, jenis gas dan tekanan, serta sifat alami dari permukaan di dalam *void*.

2.5.2 Bentuk Fisik PD

Ketika gelombang tegangan sinusoidal dengan frekuensi 50/60 Hz berubah naik dari nol menuju nilai maksimum, stres elektrik yang muncul pada *void* juga akan berubah naik dari nol sampai pada batas 3 kV/mm atau nilai ekuivalen tegangan tembus pada *void*. Tegangan lebih (*overvoltage*) pada *void* adalah keadaan saat tegangan pada *void* melebihi nilai tegangan tembus untuk ukuran dan jenis gas didalamnya. Semakin besar tegangan lebih maka semakin meningkat pula efek pengisian muatan (*space charge effect*) di dalam *void*. Walaupun *void* mengalami tegangan lebih, terjadinya kegagalan atau isolasi tembus tidak akan terjadi sampai elektron bebas, karena proses kosmik atau radiasi, di dalam celah mulai meloncat/berpindah (*avalanche*). *Avalanche* adalah aliran elektron-elektron pada celah dengan waktu kenaikan (*rise time*) pulsa arus yang sangat cepat (dalam orde nano detik), itulah yang dinamakan peluahan parsial (*partial discharge*). Besarnya tegangan lebih saat PD mulai terbentuk disebut sebagai tegangan

ambang (*inception voltage*). Besarnya tegangan saat aktivitas PD menghilang disebut dengan tegangan punah (*extinction voltage*).



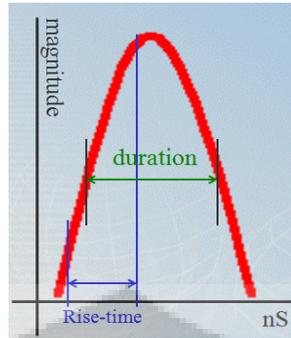
Gambar-2.6 Proses Terbentuknya Pulsa PD Pada Gelombang Tegangan Sinusoidal

Ketika kegagalan terjadi maka tegangan pada *void* akan turun sampai pada level tegangan yang cukup untuk mempertahankan peluahan. Dikarenakan hal ini menyebabkan pengurangan pada tegangan yang melewati *void* maka disebut sebagai -ve PD. Saat polaritas tegangan berubah (siklus negatif), maka tegangan kemudian akan bertambah hingga peluahan lain terjadi dan akan menyebabkan kenaikan pada tegangan yang melewati *void* sehingga disebut +ve PD. Oleh karenanya pada sebuah *void*, PD akan terdeteksi sebanyak dua kali siklus tegangan bolak-balik^[5].

Sebuah pulsa PD memiliki karakteristik *rise time* dalam orde nano detik (1 – 5 nS). Dalam istilah elektronik, *rise time* di rujuk sebagai waktu yang diperlukan sebuah sinyal untuk berubah dari keadaan awal (rendah) menuju keadaan akhir (tinggi). Secara konvensi, *rise time* di ukur saat perubahan besaran pada nilai 10 s/d 90% dari nilai puncak atau tegangan penuh pulsa. Frekuensi *rise time* untuk satu kuadran pertama dapat di hitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f = 1/T$$

$$= 1/(4 \times \text{rise time}) \quad (2.10)$$

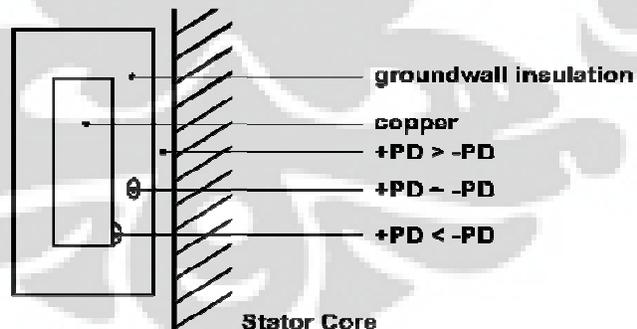


Gambar-2.7 Rise Time Pulsa PD

Rise time pulsa PD memiliki durasi yang sangat singkat yaitu sebesar 1 - 5 ns. Hal ini berarti frekuensi yang ditimbulkan oleh pulsa PD berada pada rentang 50 – 250 MHz. Pada rentang frekuensi tersebut, derau (*noise*) dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Oleh karenanya teknologi pemisahan *noise* dalam pengukuran PD akan menentukan tingkat keakuratan hasil pembacaan.

2.5.3 Polaritas PD

Pemodelan karakteristik aktual dari pulsa PD sulit dilakukan dikarenakan PD dipengaruhi oleh dimensi *void*, gas dan tekanan, induktansi, kapasitansi, geometri dan beberapa faktor lainnya yang dapat mempengaruhi besar dan frekuensi pulsa. Namun, ada beberapa karakteristik dasar yang dapat diprediksi berdasarkan lokasi *void*.



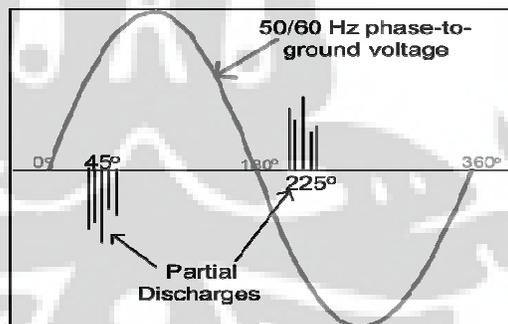
Gambar-2.8 Polaritas dan Letak PD Pada Isolasi

Jika polaritas positif lebih dominan maka PD kemungkinan besar terjadi pada permukaan isolasi. Jika polaritas negatif lebih dominan, probabilitas PD terjadi pada permukaan konduktor dan jika tidak ada yang dominan maka PD

kemungkinan besar terjadi di dalam lapisan isolasi.

2.5.4 Void Dalam Isolasi

Ketika mesin tidak diimpregnasi dengan benar atau dioperasikan pada suhu kerja tinggi selama beberapa tahun, maka terdapat kecenderungan timbulnya *void* pada isolasi *groundwall*. PD akan terbentuk pada *void* ketika terjadi tegangan lebih dan terdapat elektron bebas. Ketika PD terbentuk, tegangan pada celah akan stabil pada level yang diperlukan untuk mempertahankan aktivitas peluahan. Selama proses ini, muatan dalam *void* akan terdistribusi mengikuti muatan yang diterapkan. Ketika gelombang AC berubah polaritasnya, muatan-muatan ini akan menyebabkan kondisi *overvoltage* yang lain dalam polaritas yang berlawanan dan membentuk PD lainnya. Jika kedua sisi dari *void* memiliki material isolasi yang sama, perubahan distribusi akan sama selama siklus positif dan negatif. Akan ada dua pulsa PD yang teramati pada tiap siklus AC dengan besar magnitudo sama dan polaritas berlawanan tiap *void* di dalam isolasi. Pulsa PD ini termasuk dalam posisi klasik untuk *phase to ground*, negatif pulsa dekat dengan 45° dan positif pulsa dekat 225° dengan referensi 50/60 Hz tegangan *phase to ground*. Dengan kata lain tidak ada yang dominan baik PD negatif maupun positif.

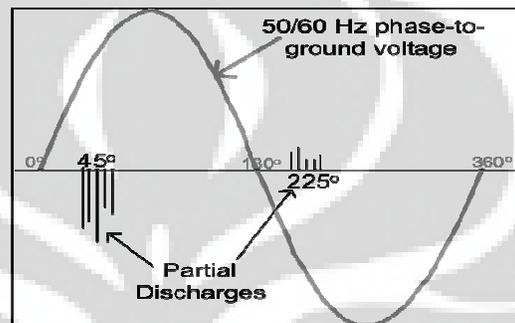


Gambar-2.9 Karakteristik Pulsa PD Untuk Void di Dalam Isolasi

2.5.5 Void Dekat Konduktor

Mesin yang sering mengalami perubahan beban seketika (*load cycling*) atau sering beroperasi pada temperatur berlebih (*overheat*) akan memiliki *void* yang terbentuk di dekat konduktor tembaga. *Void* yang terbentuk di antara konduktor dan isolasi akan memiliki karakteristik yang berbeda dengan *void* yang

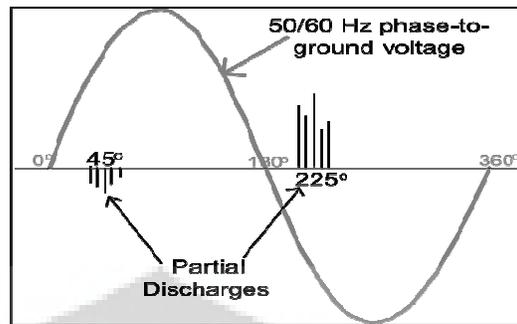
terbentuk di dalam isolasi. Walaupun mekanisme dasar terbentuknya PD memiliki kesamaan, akan tetapi karena elektroda yang berbeda menyebabkan salah satu polaritas menjadi lebih dominan. Mobilitas ion positif pada permukaan isolasi lebih rendah daripada ion negatif pada permukaan konduktor. Oleh karena itu, PD negatif lebih dominan daripada PD positif. Ion negatif lebih mendominasi untuk berpindah melalui gap ke permukaan isolasi positif sehingga akan terlihat PD negatif berkumpul di sekitar 45° selama siklus AC positif.



Gambar-2.10 Karakteristik Pulsa PD Untuk *Void* di Dekat Konduktor

2.5.6 *Void* Dekat Inti Besi (Dipermukaan Isolasi)

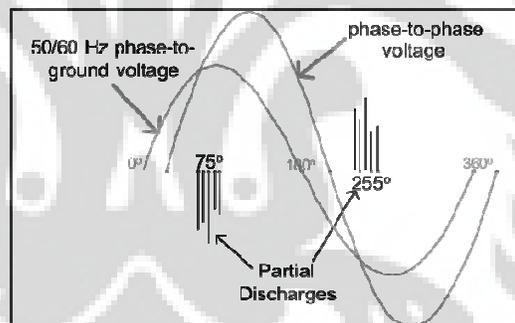
Koil lepas, lapisan semikonduktif yang kurang baik, dan masalah pada lapisan *grading/semicon interface* dapat menimbulkan peluahan dipermukaan atau peluahan di slot antara stator bar dengan inti besi yang ditanahkan. Seperti halnya PD yang terjadi di dekat konduktor, peluahan ini terjadi di antara elektroda yang berbeda materialnya. Muatan positif yang diam terdapat pada isolasi dan muatan negatif yang bergerak terdapat pada inti besi yang diketanahkan akan menghasilkan pulsa pada siklus AC negatif. Dikarenakan elektroda metalik ditanahkan, pulsa PD yang terlihat lebih dominan adalah PD positif dimana terletak dekat 225° .



Gambar-2.11 Karakteristik Pulsa PD Untuk *Void* di Dekat Inti Besi

2.5.7 *Endwinding Discharge*

Kontaminasi ataupun jarak spasi yang tidak memadai antara koil pada area ujung belitan stator dapat menyebabkan PD. Berbeda dengan sebelumnya, PD pada area ini sangat dipengaruhi oleh tegangan fasa ke fasa. Dikarenakan pengaruh tegangan tersebut, maka pulsa PD akan terdeteksi berbeda 30° dari posisi sudut fasa klasik (pulsa PD yang dipengaruhi oleh tegangan fasa ke tanah).



Gambar-2.12 Karakteristik Pulsa PD pada *Endwinding Discharge*

Walaupun tipe pulsa ini terkadang tidak menentu, akan tetapi memungkinkan untuk dapat membedakan pulsa ini dengan mengetahui posisinya berdasarkan referensi tegangan fasa ke tanah. Pulsa *endwinding* cenderung muncul disekitar 15°, 75°, 195° dan 255° berdasarkan lokasi pulsa dan sudut putar mesin.

BAB 3

METODA PENGAMBILAN DAN PENGOLAHAN DATA PD

3.1 Umum

Penulisan skripsi Analisis Permasalahan *Partial Discharge* Pada Isolasi Belitan Stator Generator 11.8 KV dilakukan dengan mengambil data PD secara *on-line* saat generator sedang beroperasi pada beban penuh dan terkoneksi pada jaringan 150 kV serta melakukan pengumpulan dan pengolahan data hasil pengukuran.

Tiga buah unit generator 70 MVA milik PLTP Chevron Gunung Salak merupakan generator tipe sinkron yang di buat pada tahun 1996 oleh Fuji Electric. Pada tahun 1997, generator mulai di operasikan dengan daya keluaran sebesar 55 MW. Pada tahun 2002, daya keluaran generator dinaikan menjadi sebesar 65 MW.

Data dalam penulisan skripsi ini di ambil dari satu unit generator yaitu Unit-400 yang teridentifikasi memiliki aktivitas PD dengan level magnitudo yang relatif tinggi. Adapun spesifikasi dari generator tersebut adalah sebagai berikut:

Spesifikasi

Pabrik Pembuat	: Fuji Electric
Tahun Pembuatan	: 1996
Tipe/Model	: Sinkron/FTLRI 504/58-2
Daya Keluaran	: 70 MVA (maksimum dari <i>Capability Curve</i>)
Tegangan	: 11.8 kV
Frekuensi	: 50 Hz
Putaran	: 3000 Rpm
Jumlah Phasa	: 3
Kelas Isolasi	: F
Tipe Isolasi	: <i>Epoxy Mica</i>

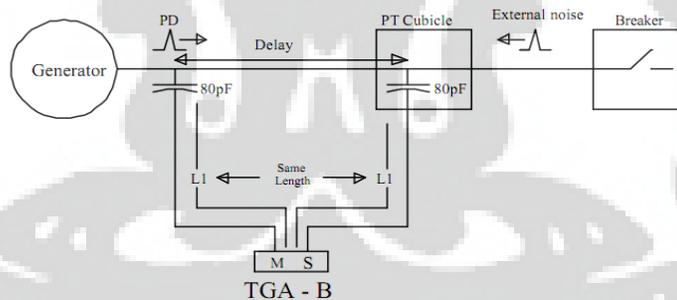
Konfigurasi Belitan : *Multi turn coil*

Metoda Instalasi : *Global VPI (Vacuum Pressure Impregnation)*

Belitan Stator

3.2 Metoda Pengukuran PD

Sensor yang digunakan untuk mendeteksi aktivitas PD pada generator adalah *Epoxy Mica Capacitor* (EMC) dengan nilai kapasitansi sebesar 80 pF (toleransi ± 3 pF). Konfigurasi rangkaian yang digunakan adalah *capacitive coupler*, yaitu dengan memasang dua buah kapasitor EM yang terpisah pada jarak 2 meter satu sama lain pada setiap fasa. Kabel koaksial di pasang sama panjang dari kedua buah kapasitor EM menuju ke panel terminasi (data akuisisi). Kapasitor EM yang di pasang pada terminal generator dinamakan sensor mesin (M) dan kapasitor EM yang di pasang pada jalur masuk dinamakan sensor sistem (S). Konfigurasi *capacitive coupler* ini digunakan sebagai satu metoda untuk memisahkan sinyal *noise* yang datang dari luar generator dan pulsa PD dari dalam generator.

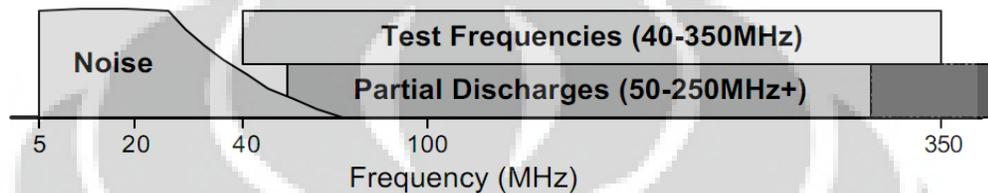


Classification	Machine sensor	System sensor
Unit PD	L1	L1 + delay
System Noise*	L1 + delay	L1
Bus Noise*	L1 + <delay	L1 + <delay

*System and Bus Noise are displayed together as Total System Noise.

Gambar-3.1 Konfigurasi instalasi sensor PD ^[5]

Data PD diambil dengan menggunakan alat PD *analyzer* TGA-B IRIS Power secara *on-line* saat generator beroperasi. TGA-B memiliki *band width* sebesar 0.1 – 350 MHz sehingga alat ini memiliki frekuensi *cut-off* pada 350 Mhz. Sedangkan kapasitor EM 80 pF memiliki frekuensi *cut-off* pada 40 Mhz. Kombinasi dari kapasitor dan TGA-B menghasilkan jangkauan frekuensi pengetesan dari 40 – 350 Mhz dimana frekuensi PD dengan *rise time* sangat cepat menghasilkan frekuensi yang dapat terdeteksi pada jangkauan 50 – 250 MHz.



Gambar-3.2 Frekuensi *bandwidth* PD dan pengetesan^[5]

Perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan pengambilan data PD dengan alat TGA-B adalah PDLite Pro. Adapun parameter-parameter yang ada dalam menggunakan perangkat lunak ini adalah sebagai berikut.

1. Kategori Pulsa

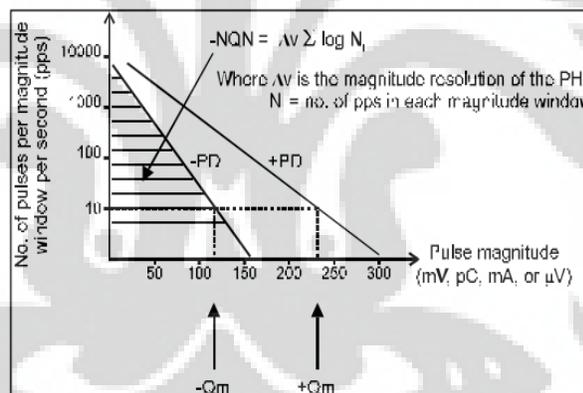
Ketika TGA-B mengukur sinyal pulsa dari sensor, PDLite Pro ini dapat mengategorikan sinyal pulsa berdasarkan waktu kedatangan (*time of arrival*) dan polaritas (positif atau negatif). *Counter* pulsa pada alat TGA-B akan bekerja berdasarkan kategori dasar seperti terlihat pada tabel berikut.

Tabel-3.1 Kategori Pulsa Terukur Langsung^[5]

Name	Short Name	Description
+ PD from Machine	Machine PD +	+ PD pulses originating from within the winding or terminals
- PD from Machine	Machine PD -	- PD pulses originating from within the winding or terminals
+ Bus Noise	Bus +	+Noise pulses from the bus between the sensors
- Bus Noise	Bus -	- Noise pulses from the bus between the sensors
+ System Noise	System +	+ Noise pulses from the power system
- System Noise	System -	- Noise pulses from the power system
+ Total Noise	Noise +	Combination of Bus + and System +
- Total Noise	Noise -	Combination of Bus - and System -

2. Indikator aktivitas PD (NQN dan Qm)

PDlite Pro ini dapat mengkalkulasikan besaran Qm dan NQN berdasarkan plot PHA (*Pulse Height Analysis*). NQN (*Normalized Quantity Number*) adalah kuantitas PD yang proporsional terhadap total PD yang terukur oleh sensor. NQN negatif merujuk pada total aktifitas pulsa PD negatif dan NQN positif merujuk pada total aktifitas pulsa PD positif. Nilai NQN merupakan indikator kondisi isolasi rata-rata dari belitan stator. Qm adalah magnitudo dari pulsa untuk satu kategori pulsa dasar (terukur langsung) yang mempunyai laju pengulangan (*repetition rate*) sebesar 10 pulsa per detik, yang merupakan nilai puncak aktifitas PD. Qm merupakan indikator kerusakan yang terjadi akibat PD pada bagian isolasi yang paling terdeteriorasi. Jika level aktifitas PD melebihi setelan jangkauan sensitivitas yang dipilih, maka nilai NQN dan Qm tidak bisa dihitung dan di catat sebagai tidak bisa diaplikasikan (NA)



Gambar-3.3 Ringkasan variabel PD

3. Jangkauan sensitivitas

Jangkauan ini menentukan batas atas dan bawah pendeteksian PD dari TGA-B. Sebagai contoh, bila sensitivitas di set 5 – 85 mV maka nilai magnitudo PD yang lebih besar dari 85 mV tidak dapat diukur (*over range*).

4. Sudut referensi

Sudut ini dipergunakan oleh TGA-B untuk menentukan pergeseran sudut fasa antara frekuensi tegangan yang dijadikan referensi dengan tegangan

kerja pada phasa yang diukur. Sudut yang digunakan untuk melakukan pengukuran PD dengan *capacitive coupler* adalah 90^0 .

5. Waktu tunda (*Delay time*)

Waktu tunda adalah waktu yang diperlukan pulsa frekuensi tinggi untuk berjalan/merambat pada jarak antara dua sensor, biasa disebut IDT (*Instrument Delay Time*). Nilai IDT ini sudah ditentukan untuk setiap generator dimana nilai ini di dapat saat pertama kali instalasi dikalibrasi.

6. Bendera kualitas (*Quality flag*)

Bendera kualitas atau status digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian jangkauan sensitivitas terhadap data PD yang diambil.

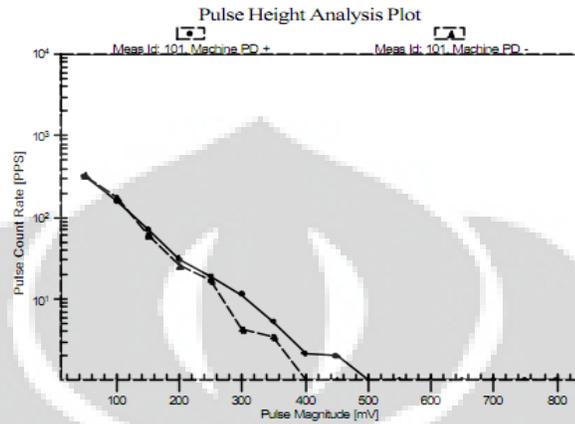
3.3 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak PDview 3.7 dan SPC (*Statistical Process Control*) XL yaitu perangkat lunak tambahan untuk pengolahan data statistik pada *Microsoft Excxl*. Pada perangkat lunak PDview 3.7, pengolahan data PD dilakukan untuk menganalisa trend, magnitudo, dan karakteristik PD. Sedangkan pada SPC XL, pengolahan data PD digunakan untuk membuat suatu model statistik dengan metoda regresi dan mengestimasi laju kenaikan magnitudo terhadap waktu.

3.3.1 Pulse Height Analysis (PHA)

PHA plot merepresentasikan hubungan antara magnitudo pulsa dan laju pengulangan baik untuk polaritas negatif maupun positif *counter* pulsa PD. TGA-B dapat dioperasikan pada beberapa jangkauan pengetesan untuk kedua buah waktu interval yang berbeda yaitu 1 dan 5 detik. Jika langkah pengetesan menggunakan 5 detik untuk setiap jangkauan magnitudo tegangan, pulsa per detik yang ditampilkan merupakan jumlah total pulsa dibagi dengan 5. Pulsa selalu ditampilkan dalam basis per detik. Sumbu horisontal adalah linier yang merepresentasikan magnitude dari pulsa sedangkan sumbu vertikal adalah logaritma yang merepresentasikan jumlah pulsa per detik. Semakin besar jumlah pulsa per detik, maka semakin luas penyebaran deteriorasi pada belitan. Semakin tinggi magnitudo pulsa PD, maka semakin parah tingkat deteriorasi pada belitan.

Perubahan sepanjang waktu garis plot ke posisi kanan atas pada grafik menunjukkan belitan terdeteriorisasi.



Gambar-3.4 Plot data PD dengan menggunakan PHA^[5]

3.3.2 Phase Resolved Plot

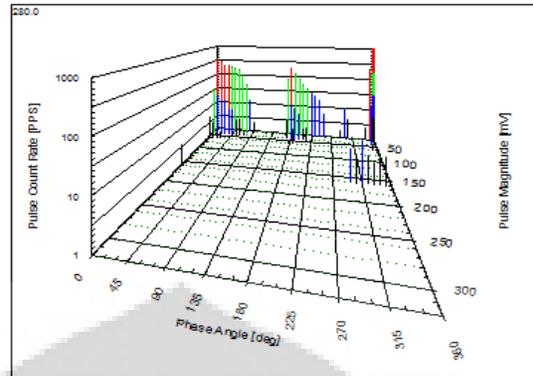
Analisa pulsa dengan menggunakan *Phase Resolved Plot* dapat membantu untuk mengidentifikasi deteriorisasi campuran (*multiple deterioration*) yang terjadi serta mekanisme bagaimana deteriorisasi terbentuk. Ada tiga macam tipe dari *Phase Resolved Plot* yaitu:

1. *Pulse Phase Analysis (PPA)*.
2. Plot pulsa *Linear Pulse Density (LPD)*
3. Plot *Polar Pulse Density (PPD)*

Dalam melakukan pengolahan data pada skripsi ini, ada dua tipe *Phase Resolved Plot* yang digunakan yaitu PPA dan LPD.

3.3.2.1 Pulse Phase Analysis (PPA)

Plot PPA, biasa dinamakan sebagai plot tiga dimensi, dapat menggambarkan hubungan antara sudut fasa (sumbu x), laju pengulangan pulsa (sumbu y), dan magnitudo dari pulsa (sumbu z).

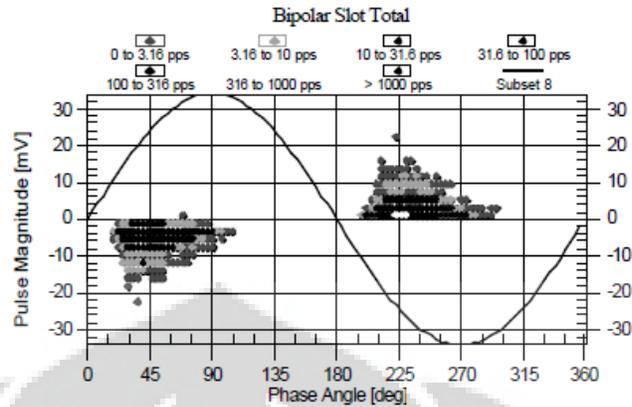


Gambar-3.5 Plot data PD dengan menggunakan PPA^[5]

Penggunaan plot PPA dapat mengidentifikasi lokasi sumber PD pada bagian slot dan atau pada bagian ujung belitan. Secara spesifik, PD yang terjadi pada bagian slot memiliki pulsa PD dengan polaritas positif atau negatif yang terpusat di dekat sudut fasa 45^0 dan 225^0 secara berturut-turut dengan referensi tegangan fasa ke tanah. Pulsa PD dengan karakteristik seperti ini dinamakan PD klasik. Sedangkan untuk PD yang tidak klasik atau akibat dari interfasal, posisi sudut fasa tergeser dari posisi PD klasik PD.

3.3.2.2 Linear Pulse Density (LPD)

Plot LPD merupakan tipe grafik yang paling umum digunakan untuk menampilkan data PD *phase resolved*. Plot dua dimensi ini menampilkan magnitudo PD (sumbu vertikal) sebagai fungsi dari sudut fasa gelombang sinusoidal referensi 50 Hz (sumbu horisontal). Kode warna memberikan informasi laju pengulangan pulsa untuk kombinasi sudut fasa dan magnitudo yang terukur. Dalam analisis *phase resolved*, tegangan referensi biasanya dipilih adalah tegangan fasa ke tanah dari fasa yang di ukur. Unit skala minor untuk grafik ini adalah 15^0 , sedangkan unit skala mayornya adalah 45^0 . Hal ini dapat mempermudah dalam mengidentifikasi sudut fasa dimana PD kluster berkumpul. Secara spesifik, tampilan grafik ini juga memungkinkan untuk membedakan antara sumber PD slot dan interfasal.



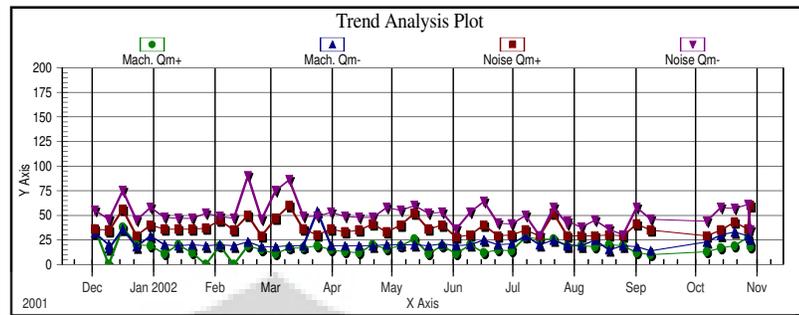
Gambar-3.6 Plot data PD menggunakan LPD^[5]

Distribusi pulsa normal Gaussian dengan standard deviasi 15° , mengindikasikan *void* di dalam bagian slot inti. Pulsa *narrow band* biasanya berasal dari sisi metalik yang tajam seperti koneksi. Pulsa *wide band* mengindikasikan terjadinya mekanisme kegagalan yang kompleks (*multiple failure*). Pola PD yang melewati siklus AC mengindikasikan kontaminasi, *noise* atau mungkin kombinasi dari beberapa mekanisme kegagalan yang terjadi bersamaan. PD dengan pola tidak biasa (*unusual*) merupakan non Gaussian yang berbentuk miring dan tidak simetris. Bentuk *unusual* ini tidak mudah dideskripsikan karena merupakan mekanisme kegagalan kompleks yang terjadi secara bersamaan.

3.4 Analisa Data PD

3.4.1 Analisa Trend

Tahap awal dalam melakukan analisa adalah dengan membandingkan hasil pengukuran dengan hasil sebelumnya. Trend plot merepresentasikan perubahan besaran PD sepanjang waktu, terutama NQN dan Qm dan menghasilkan grafik yang merepresentasikan proses dari penuaan isolasi. Trend plot dapat menampilkan trend lebih dari 10 parameter untuk seleksi data, NQN+, NQN-, Qm+ dan Qm-, *load*, dan temperatur.



Gambar-3.7 Grafik Trending data PD^[5]

Dalam melakukan analisa trend, parameter operasi dari generator sebisa mungkin di jaga pada nilai yang relatif sama. Tabel dibawah ini menunjukkan korelasi perubahan parameter terhadap magnitudo PD.

Tabel-3.2 Korelasi PD Terhadap Parameter Operasi^[5]

Parameter	Magnitudo	Korelasi PD
Tegangan	$\pm 200V$	PD akan meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan sehingga fluktuasi pada nilai tegangan akan mengakibatkan fluktuasi pada level PD.
Beban, daya nyata (P), dan daya reaktif (Q)	$\pm 10\%$	Jika mesin memiliki PD yang terpengaruh dengan mekanikal seperti koil lepas atau koneksi longgar, maka kemungkinan level PD akan berubah seiring dengan perbedaan beban.
Temperatur stator	$\pm 5^0 C$	Temperatur operasi mempengaruhi volume dari void internal sehingga akan level PD akan berubah

		seiring dengan perbedaan temperatur.
Kelembaban	Tidak diketahui	Kelembaban akan mempengaruhi PD yang timbul dipermukaan, khususnya pada area ujung belitan (<i>endwinding</i>)

Kondisi lingkungan terutama kelembaban dapat terlihat pengaruhnya terhadap level PD terutama apabila kontaminasi pada permukaan menjadi bagian yang konduktif apabila menjadi basah.

Walaupun fluktuasi level PD dalam melakukan trend data tidak bisa dihindari, akan tetapi ketika sistem isolasi mengalami proses penuaan, maka akan dengan mudah terlihat trend kenaikan level PD seiring dengan waktu. Proses penuaan merupakan proses yang memakan waktu panjang sehingga kenaikan tiba-tiba level PD bukan merupakan akibat dari proses tersebut. Kenaikan Qm dua kali nilai sebelumnya dalam periode waktu 6 bulan mengindikasikan adanya peningkatan mekanisme kegagalan secara cepat. Kegagalan yang sesungguhnya secara normal disebabkan dari sumber yang lain yang menyebabkan stress isolasi seperti petir, sinkronasi terlepas, atau pemanasan berlebih.

Berikut ini adalah tipe-tipe trending yang sering muncul dalam melakukan monitoring aktivitas PD.

Tabel-3.3 Tipikal Trending Magnitudo PD ^[5]

Tipikal Trending	Deskripsi
<i>Baseline</i>	Tidak ada data trend yang tersedia.
<i>Stable</i>	Tidak ada bukti perubahan pada kondisi stator ($\pm 25\%$)
<i>Downward</i> trend untuk mesin baru	Penurunan trend PD untuk 12-18 bulan pertama pengoperasian.
<i>Upward</i> trend	Tidak diperlukan tindakan segera. Pengetesan selanjutnya diperlukan untuk mengetahui kontinuitas dari trend.

<i>Downward trend</i>	Tidak umum, kecuali penurunan yang sangat cepat yang menunjukkan adanya perubahan kondisi isolasi seperti terjadinya karbonisasi di dalam void.
<i>Rapid deterioration</i>	Kenaikan PD secara cepat dan menjadi konsen. Pengetesan lebih lanjut diperlukan untuk mengetahui kontinuitas dari trend.
<i>Fluctuation</i>	PD terkadang berfluktuasi karena variasi dari kondisi lingkungan dan operasi dan bukan merupakan indikasi perubahan kondisi isolasi
<i>Downward due to maintenance</i>	Kesuksesan kegiatan perawatan pada isolasi dapat menyebabkan penurunan trend PD.

3.4.2 Analisa Komparasi

Analisa komparasi dilakukan dengan dua metoda, yaitu membandingkan langsung satu mesin dengan mesin yang sama (generator Unit-4 dibandingkan dengan generator Unit-5 dan 6) dan membandingkan mesin dengan data *statistical summary* yang dikeluarkan oleh IRIS. Data yang diambil dari mesin dengan parameter operasi yang sama dan dengan menggunakan alat pengetesan dan metoda yang sama bisa dibandingkan secara langsung dan hal ini sangat berguna sekali. Hal ini juga memungkinkan secara kasar untuk membandingkan hasil-hasil pengetesan dari satu mesin ke mesin-mesin lain yang serupa. Karena pengaruh dari frekuensi pengetesan, maka metoda pengetesan (termasuk tipe sensor dan tipe/setting alat pengukuran) haruslah sama untuk semua perbandingan. Berdasarkan hasil analisa statistik, tipe dari mesin tidak tampak memberikan pengaruh yang signifikan pada level PD dan walaupun tipe-tipe isolasi memiliki mekanisme kegagalan yang berbeda-beda. Dari perbandingan data-data yang diambil, secara kasar tidak terdapat perbedaan yang berarti terhadap keseluruhan level PD. Besarnya beban dan temperatur sangat berpengaruh pada hasil pengetesan, akan tetapi hal ini tergantung dari tipe dan kondisi isolasi, dan oleh

karenanya tidak bisa digunakan dalam perbandingan kasar ini. Untuk variable operasi yang lain yaitu tegangan dan tipe pendingin haruslah sama untuk membandingkan hasil pengukuran.

IRIS membuat sebuah data base dari 140.000 hasil pengetesan dari sekitar 11.000 mesin yang dapat digunakan untuk melakukan komparasi. Pada tabel berikut ini adalah data *statistical summary* untuk kelas tegangan mesin yang berbeda-beda dengan berpendingin udara yang diambil menggunakan alat TGA-B dan sensor EMC (BUS).

Tabel- 3.4 Data *Statistical Summary* Magnitudo PD dan Kelas Tegangan Mesin ^[6]

Bus - air-cooled (TGA)

Rated V	2-5kV	6-9kV	10-12kV	13-15kV	16-18kV	> 19kV
25%	8	26	29	53	44	25
50%	25	70	74	122	77	80
75%	67	152	181	245	160	162
90%	235	273	382	477	285	469

Tipikal perbandingan untuk level PD adalah sebagai berikut

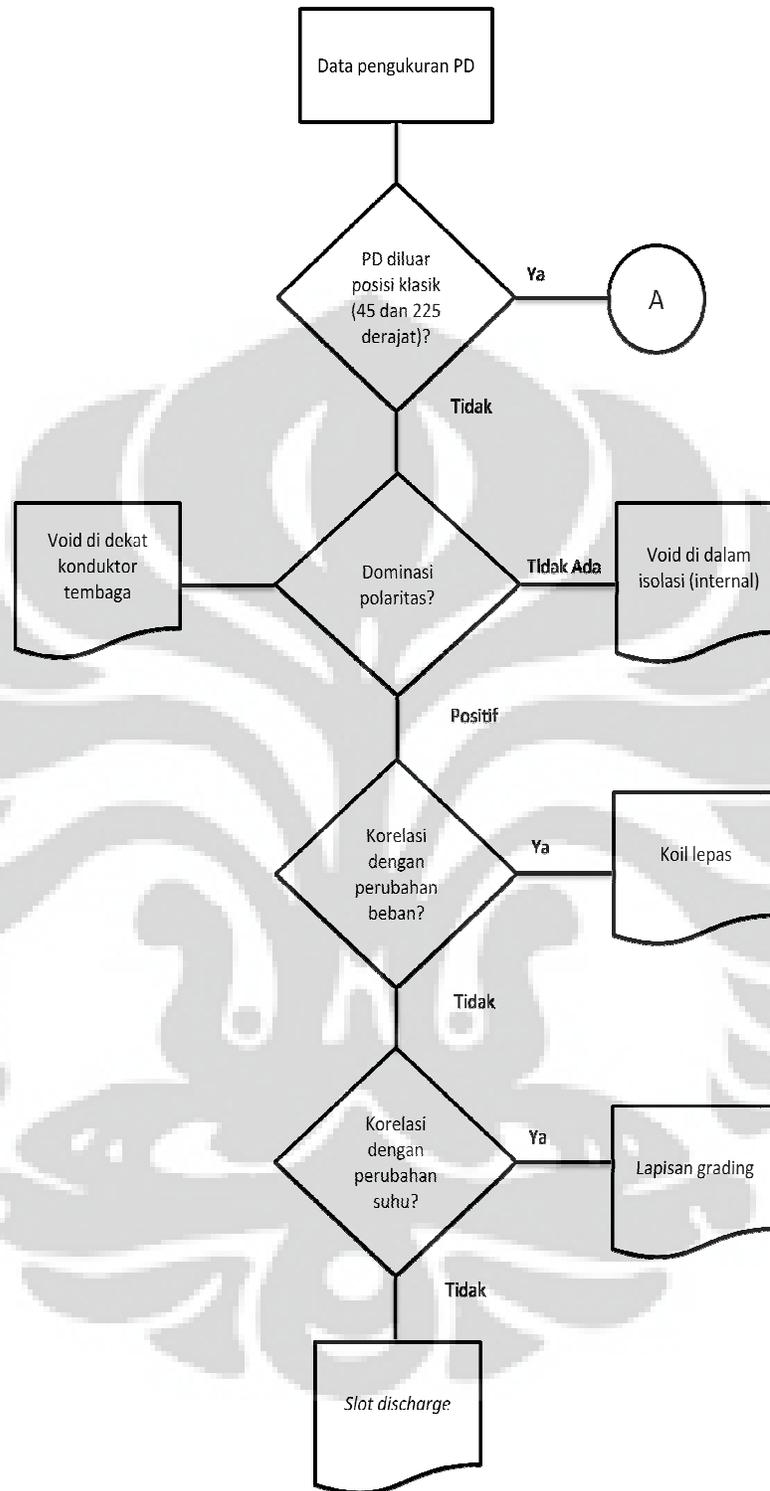
- Diabaikan (*Negligible*) < 25%
- Rendah (*Low*) < 50%
- Rata-rata (*Typical/average*) < 75%
- Agak tinggi (*Moderate*) < 90%
- Tinggi (*High*) > 90%

Nilai Qm ke 25 persentil menunjukkan nilai magnitudo Qm untuk 25% dari hasil-hasil pengetesan adalah rendah atau terlalu kecil untuk bisa diinterpretasikan. Begitu juga untuk nilai 50%, 75%, dan 90%. Secara normal, nilai Qm lebih besar ke 90 persentil dan memiliki kecenderungan naik terdapat masalah pada isolasi. Untuk itu pengecekan visual dan pengetesan secara *off-line* direkomendasikan untuk dilakukan untuk mengetahui kondisi dan permasalahan isolasi lebih lanjut.

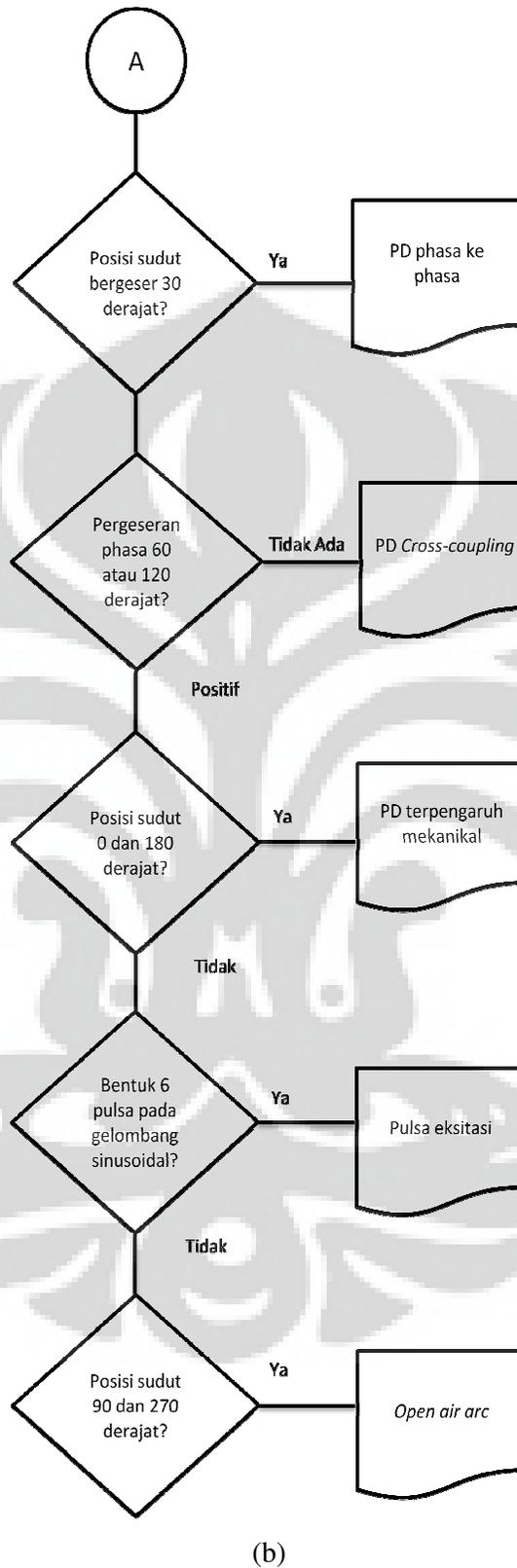
3.4.3 Analisa Karakteristik

Sebaran pulsa PD yang terbaca pada gelombang sinusoidal dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu PD Klasik dan PD non klasik. PD klasik memiliki sebaran pulsa di sekitar sudut 45 dan 225 derajat. Karakteristik PD klasik dipengaruhi oleh tegangan fasa ke *ground* karena terkait dengan lokasi terjadinya PD yang berada pada area slot stator dan area yang berbatasan dengan inti stator. Analisa dominasi polaritas PD dapat dilakukan untuk membantu menentukan posisi terjadinya PD pada isolasi belitan. PD non klasik memiliki sebaran pulsa di luar dari posisi PD klasik. Karakteristik PD non klasik sangat dipengaruhi oleh tegangan fasa ke fasa karena terkait dengan lokasi terjadinya PD yang berada pada ujung belitan stator. Diagram alir untuk menganalisa karakteristik ini dapat dilihat pada Gambar-3.8.





(a)



Gambar- 3.8 (a) *Flow chart* analisa PD klasik (b) PD non klasik

BAB 4

ANALISA

4.1 Gambaran Kondisi Belitan Stator Generator Unit-4 (Sebelum 26 Maret 2012)

Generator Unit-4 dan kedua Unit generator lainnya (Unit-5 dan 6) telah dioperasikan selama kurang lebih 15 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 1997, inspeksi pada belitan stator generator baru dilakukan sebanyak dua 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.



Gambar-4.1 Saat Proses Penarikan Rotor dengan Menggunakan Penopang dan *Liner* yang Berpotensi Menggores Isolasi Belitan Stator

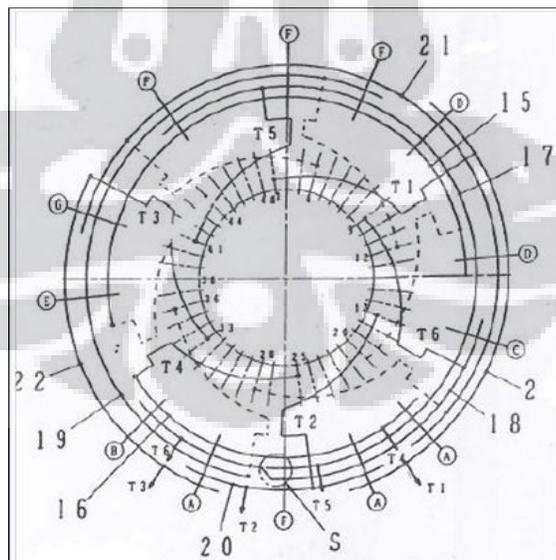
Pada tahun 2006, untuk pertama kalinya *major overhaul* (MO) dilakukan pada ketiga unit pembangkit sehingga inspeksi menyeluruh pada generator untuk pertama kalinya dapat dilakukan. Instalasi sistem pendeteksi PD pada belitan stator juga dilakukan bersamaan dengan aktifitas MO pada tahun ini. Berdasarkan hasil inspeksi pada belitan stator generator Unit-4, kerusakan yang terjadi akibat

PD ditemukan sebanyak 4 titik ^[7] yang terletak pada permukaan area *grading* isolasi belitan di dekat inti stator.

Pada tahun 2010, MO dilakukan untuk yang kedua kalinya. Berdasarkan rekomendasi dari Fuji Electric, MO dilakukan setiap 8 tahun sekali. MO 2010 dilaksanakan lebih cepat dari yang dijadwalkan karena adanya kebutuhan untuk pemasangan alat monitoring fluks magnetik (*flux probe*) pada dinding inti stator yang berfungsi untuk mendeteksi gangguan pada bagian rotor. Berdasarkan hasil inspeksi pada belitan stator generator Unit-4, kerusakan yang terjadi akibat PD ditemukan sebanyak 7 titik ^[8] yang terletak pada permukaan area transisi (*voltage stress control/grading*) isolasi belitan di dekat *exit slot* stator. Dari total 7 titik yang ditemukan rusak, 4 diantaranya merupakan titik yang telah diperbaiki pada tahun 2006.

Tabel 4.1 Data Kerusakan Akibat PD Pada Belitan Stator Generator Unit-4 ^[9]

Tahun Inspeksi	Bagian Stator	
	Sisi Turbin	Sisi Exciter
2006	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Slot no.2 (T1) ▪ Slot no.3 (T1) ▪ Slot no.17 (T2) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Slot no.2 (T1)
2010	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Slot no.2 (T1) ▪ Slot no.3 (T1) ▪ Slot no.17 (T2) ▪ Slot no.18 (T2) ▪ Slot no.33 (T3) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Slot no.2 (T1) ▪ Slot no.3 (T1)



Gambar-4.2 Konfigurasi Belitan dan Penomoran Slot Stator Generator Unit-4



Gambar-4.3 Kondisi Isolasi Belitan Stator Generator Unit-4 Pada Tahun 2010 yang Sebelumnya Telah Diperbaiki Pada MO 2006

Kerusakan akibat PD pada isolasi tegangan tinggi di tandai dengan adanya serbuk putih di sekitar titik kerusakan sebagai produk dari mekanisme *discharge* yang melibatkan material isolasi akibat terjadinya stres tegangan berlebih pada bagian tersebut.

Berdasarkan hasil inspeksi pada ketiga unit generator yang dilakukan pada tahun 2006 dan 2010, jumlah titik kerusakan akibat PD paling banyak ditemukan pada generator Unit-4^[9]. Sampai saat ini, penyebab mengapa generator Unit-4 mempunyai titik kerusakan yg paling banyak masih belum dapat diketahui. Pada bagian analisa korelasi, penyebab perbedaan jumlah kerusakan akibat PD akan di analisis terkait dengan parameter operasi dan pendingin dari generator.

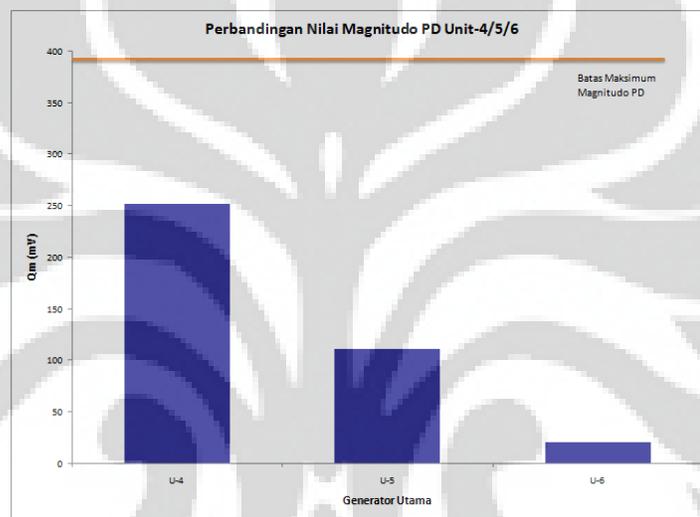
4.2 Analisa Komparasi

Data PD yang di ambil pada tanggal 26 Maret 2012 merupakan data primer yang akan digunakan dalam analisa komparasi dan analisa lainnya. Analisa komparasi dilakukan dengan membandingkan magnitudo PD antara generator Unit-4 dengan dua unit lainnya yang tipikal dimana parameter operasi ketiga generator tersebut relatif tidak ada perbedaan. Pada tabel berikut ini disajikan data perbandingan magnitudo PD untuk ketiga unit generator.

Tabel-4.2 Data Pengukuran Magnitudo PD Generator Unit-4, 5, dan 6 Tanggal 26 Maret 2012

Generator Utama		Qm+	Qm-
Unit-4	Fasa A	252	194
	Fasa B	198	189
	Fasa C	197	181
Unit-5	Fasa A	34	38
	Fasa B	9	27
	Fasa C	111	99
Unit-6	Fasa A	9	8
	Fasa B	7	7
	Fasa C	21	18

Sumber: Olahan Data



Gambar-4.4 Grafik Perbandingan Nilai Magnitudo PD Generator Unit-4, 5, dan 6 (Sumber: Olahan Data)

Selain membandingkan dengan generator unit lain yang tipikal, analisa komparasi dilakukan dengan membandingkan magnitudo PD generator Unit-4 dengan PD *statistical summary* yang di keluarkan oleh IRIS sebagai referensi untuk menilai kondisi isolasi belitan stator secara umum.

Tabel-4.3 Komparasi Data Hasil Pengukuran PD dengan data *IRIS Stastitical Summary*

Generator Unit-4	Qm+	Qm-	Distribusi Statistik	Katagori Aktifitas PD
Fasa A	252	194	90 %	Moderat
Fasa B	198	189	90%	Moderat
Fasa C	197	181	90%	Moderat

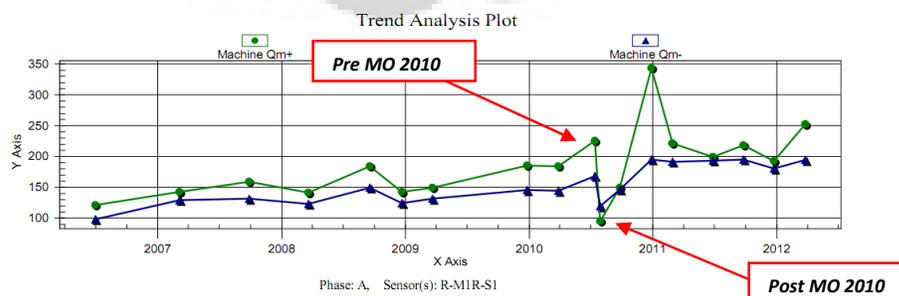
Sumber: Olahan Data

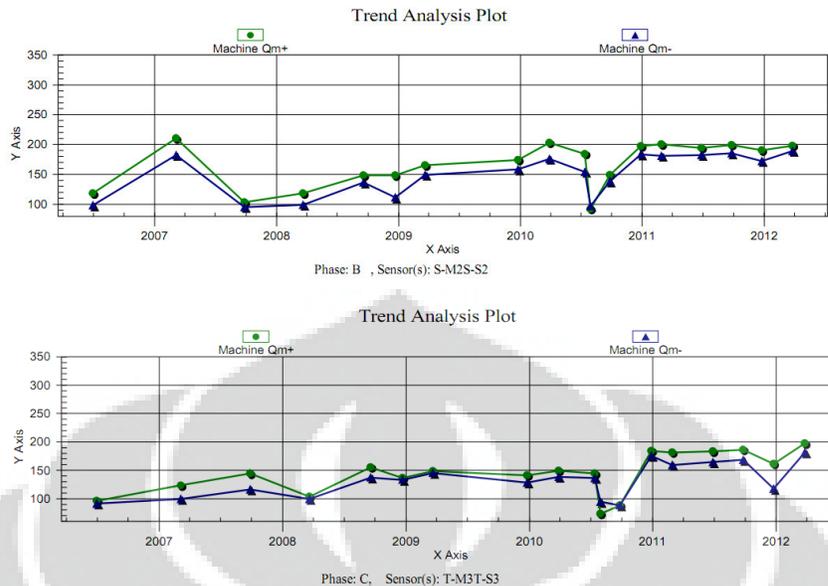
Berdasarkan hasil komparasi dengan kedua metoda diatas, kondisi belitan stator generator Unit-4 memiliki aktifitas PD yang lebih tinggi dibandingkan dengan Unit-5 dan 6. Hal ini mengindikasikan adanya ketidakseragaman kondisi isolasi dari ketiga unit generator yang tipikal tersebut. Berdasarkan komparasi dengan data *statistical summary*, kondisi isolasi belitan stator Unit-4 masuk ke dalam katagori 90 persentil yang mengindikasikan aktifitas PD berada pada kondisi moderat (agak tinggi). Secara umum, aktifitas PD yang terjadi pada belitan stator Unit-4 masih dalam batas aman sehingga saat ini belum diperlukan tindakan korektif.

Pengambilan data PD yang saat ini dilakukan per-kuarter dinilai masih sesuai dengan kebutuhan sehingga tidak diperlukan perubahan jadwal pengambilan oleh tim *maintenance*. Perubahan jadwal pengambilan data menjadi lebih singkat akan diperlukan apabila magnitudo PD telah melebihi 90 persentil dan menetap pada beberapa kali pengambilan data lanjutan. Magnitudo PD di atas 90 persentil mengindikasikan adanya deteriorasi yang signifikan pada isolasi sehingga diperlukan pengawasan yang lebih intensif untuk mengetahui laju kenaikannya. Selain itu tindakan pengecekan/pengukuran secara *off-line* pada isolasi belitan harus segera dijadwalkan untuk menginvestigasi lebih lanjut permasalahan pada isolasi. Tindakan perbaikan dapat dilakukan sesuai dengan tingkat kerusakan sehingga dapat mencegah kerusakan isolasi menjadi lebih parah dan dapat menghindari kerugian akibat *unplanned shutdown* dengan durasi panjang yang disebabkan oleh kegagalan isolasi belitan generator secara tiba-tiba.

4.3 Analisa Trending PD

Pengumpulan data PD pada generator unit-4 dimulai pada tahun 2006 setelah generator kembali beroperasi pada beban penuh dan terhubung kembali ke jaringan 150 KV. Perbaikan pada lapisan area stres *grading* yang rusak akibat PD sebanyak 4 titik telah dilakukan oleh tim dari Fuji Electric sebagai langkah korektif terhadap hasil temuan inspeksi. Isolasi belitan yang telah dibersihkan dan diperbaiki dalam aktifitas *MO* 2006 ini diambil sebagai kondisi acuan awal (*baseline*) terkait dengan magnitudo PD yang terukur. Data PD yang terukur pada tanggal 30 Juni 2006 diambil sebagai data acuan awal yang digunakan untuk memulai trending data PD generator Unit-4.





Gambar-4.5 Data trending magnitudo PD dari tahun 2006 sampai dengan 26 Maret 2012 (Sumber: Olahan Data)

Terkait dengan kegiatan perawatan yang dilakukan dalam MO 2010, maka trending data PD dapat dibagi menjadi dua periode, yaitu trending data periode 2006 sampai sebelum MO 2010 dan periode paska MO 2010 sampai dengan tanggal 26 Maret 2012.

Pada periode pertama, fluktuasi magnitudo PD terlihat pada ketiga fasa. Walaupun demikian, kenaikan secara gradual magnitudo PD seiring dengan waktu dapat terlihat dengan jelas. Pada fasa A, kenaikan magnitudo PD terjadi dalam periode satu tahun pertama yaitu dari tahun 2006 sampai pertengahan 2007. Kemudian magnitudo PD berfluktuasi pada level 100-150 mV sampai awal tahun 2009. Magnitudo PD terlihat naik cukup secara gradual sampai pada tanggal 13 Juli 2010 yang menyentuh level 225 mV (sebelum MO dilaksanakan). Kenaikan magnitudo PD secara gradual juga terjadi pada fasa B dan C dimana magnitudo PD kedua fasa ini lebih rendah dibandingkan dengan fasa A. Hal ini mengindikasikan kondisi isolasi yang tidak seragam dalam belitan stator generator Unit-4.

Pada periode kedua, data awal PD di ambil setelah generator beroperasi pada beban penuh dan terkoneksi ke jaringan 150 KV. Data PD ini diambil sebagai data acuan setelah perawatan dan perbaikan pada isolasi belitan. Turunnya magnitudo PD mengindikasikan adanya korelasi antara magnitudo PD dengan perbaikan pada area *grading* isolasi belitan (Gambar-4.4 pada keterangan *pre* dan *post* MO). Akan tetapi dalam perioda 6 bulan pertama, magnitudo PD naik secara signifikan dan kembali ke magnitudo mendekati nilai sebelum MO. Kenaikan yang cukup signifikan juga terjadi pada fasa C dengan magnitudo terukur sampai

pada level 147 mV. Namun kenaikan yang terjadi pada fasa C ini terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi sebelum MO. Hal ini diduga terjadi akibat adanya perubahan kondisi isolasi baik fisik maupun sifat materialnya terutama pada bagian yang diperbaiki.

Berdasarkan plot trending data, kenaikan secara gradual magnitudo PD seiring dengan waktu mengindikasikan proses degradasi isolasi belitan stator yang umum terjadi karena proses alamiah penuaan bahan isolasi. Proses penuaan bahan isolasi bisa terjadi baik di dalam isolasi itu sendiri, dilapisan permukaannya, maupun diseluruh bagian isolasi yang mengakibatkan terbentuknya *void-void* tempat PD terjadi. Kenaikan signifikan yang terlihat pada periode ke dua menunjukkan adanya perubahan kondisi isolasi secara cepat yang bukan merupakan ciri dari proses penuaan. Tanpa adanya kejadian gangguan dalam periode 6 bulan yang dapat mempercepat laju kerusakan isolasi atau menimbulkan stres hebat pada isolasi seperti sambaran petir, hubung singkat, atau lepas sinkronisasi maka hal ini dapat mengindikasikan penurunan kualitas hasil perbaikan lapisan *grading* yang telah dilakukan pada MO 2010.

Tabel-4.4 Katagori Data *Trend* Generator Unit-4 Berdasarkan Perioda *Trending* dan Fasa Belitan.

Belitan Stator	Katagori Data <i>Trend</i>	
	Sebelum MO 2010	Sesudah MO 2010
Fasa A	<i>Upward Trend</i>	Magnitudo turun; <i>Upward Trend & stabil</i>
Fasa B	<i>Upward Trend</i>	Magnitudo turun; <i>Upward Trend & stabil</i>
Fasa C	<i>Upward Trend</i>	Magnitudo turun; <i>Upward Trend & stabil</i>

Sumber: Olahan Data

4.4 Analisa Karakteristik PD

Dalam analisa karakteristik, data primer di olah dengan menggunakan plot analisis yang tersedia pada perangkat lunak PDview versi 3.7. Berikut ini adalah data hasil pengukuran yang diambil pada tanggal 26 Maret 2012.

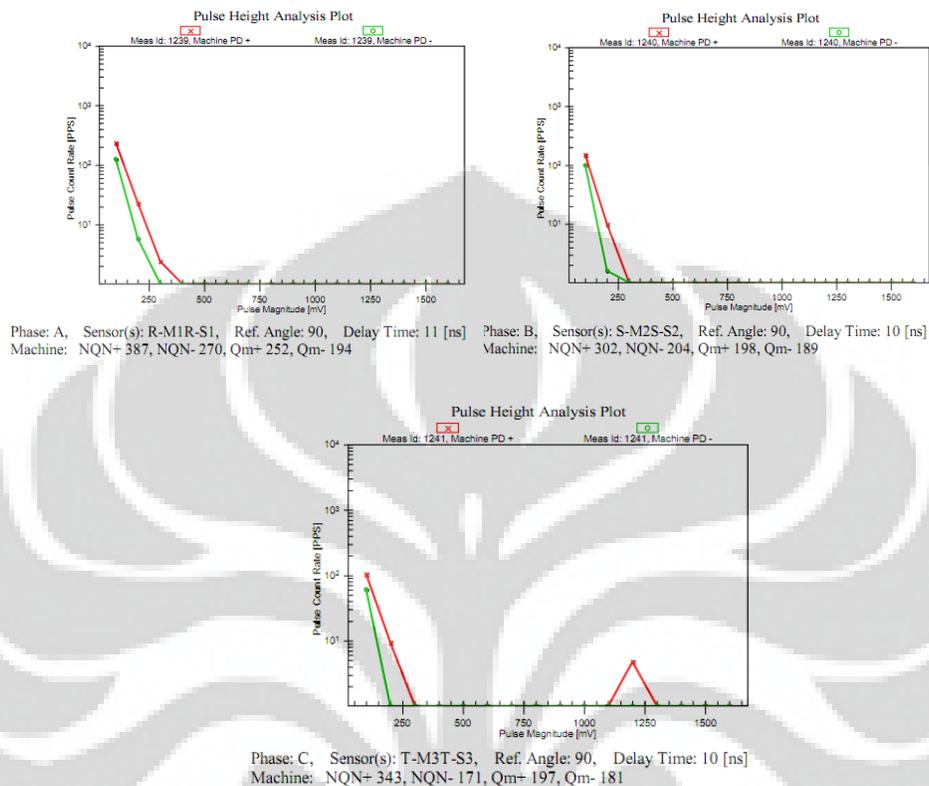
Tabel-4.5 Data Pengukuran PD Pada Isolasi Belitan Generator Unit-4

Test #	Date	Phase	Sensititivity Range	Freq (Duration)	NQN+	NQN-	Qm+	Qm-
1239	3/26/2012 10:14	A	100.0 to 1700.0 mV	50 Hz, (5 sec.)	387	270	252	194
1240	3/26/2012 10:16	B	100.0 to 1700.0 mV	50 Hz, (5 sec.)	302	204	198	189
1241	3/26/2012 10:18	C	100.0 to 1700.0 mV	50 Hz, (5 sec.)	343	171	197	181

Sumber: Olahan Data

Hubungan antara kuantitas PD (PPS) dan magnitudo PD (Qm) dari data pengukuran dapat dengan mudah dilihat dengan menggunakan plot PHA (*Pulse*

Height Analysis) pada Gambar-4.5. PPS (*pulse per second*) menyatakan jumlah pulsa PD yang muncul dalam tiap durasi pembacaan.

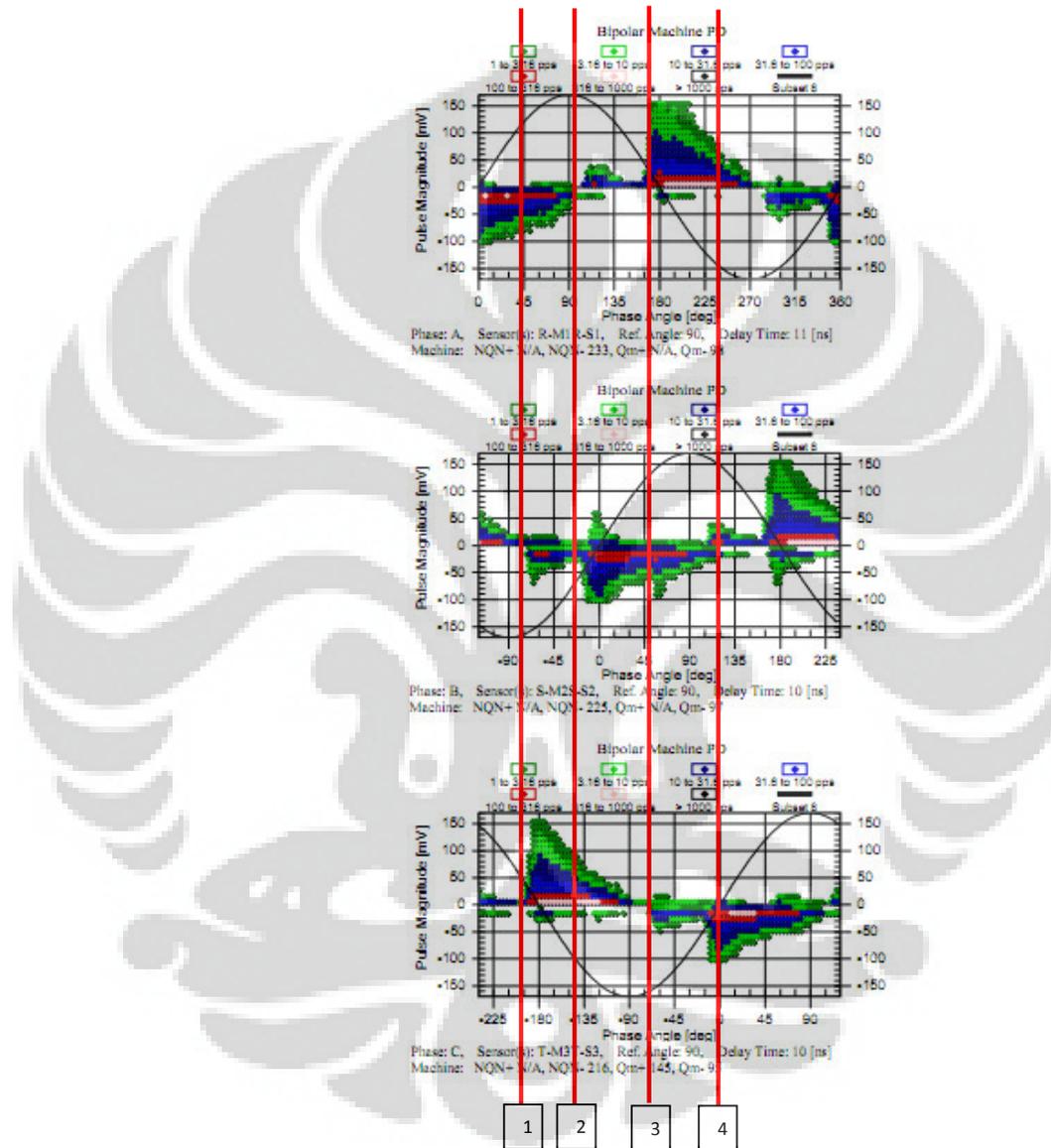


Gambar-4.6 Data Pengukuran PD Generator Unit-4 dalam plot PHA
(Sumber: Olahan Data)

Dari data plot PHA di atas terlihat magnitudo PD positif pada semua fasa berada di depan magnitudo PD negatif. Dalam analisa dominasi polaritas, hal tersebut dapat menunjukkan aktifitas PD yang terjadi berada dipermukaan isolasi.

Berdasarkan hasil plot *Linear Pulse Density* dalam Gambar-4.7, data PD yang terukur pada ketiga fasa belitan stator generator Unit-4 memperlihatkan sebaran pulsa PD yang dominan di sekitar sudut 0 dan 180⁰. Akan tetapi, distribusi pulsa PD di semua fasa tidak menunjukkan bentuk distribusi normal (*Gaussian*) yang memiliki deviasi sebesar 2 σ ($\sigma = 15^0$). Bentuk distribusi pulsa PD yang terukur merupakan bentuk *wide band* yang mengindikasikan adanya PD yang terjadi akibat proses multi kegagalan atau adanya bentuk *void* yang memanjang. Kluster pulsa PD yang polaritasnya terbalik pada fasa S (dibatasi garis merah no.1 dan 2) bukan merupakan pulsa PD yang berasal dari fasa tersebut, melainkan pulsa yang terbentuk dari mekanisme *cross-coupling* yang bersumber dari fasa T. Begitu juga yang terjadi pada fasa T (dibatasi garis merah no.3 dan 4), kluster pulsa PD yang polaritasnya terbalik terbentuk dari mekanisme

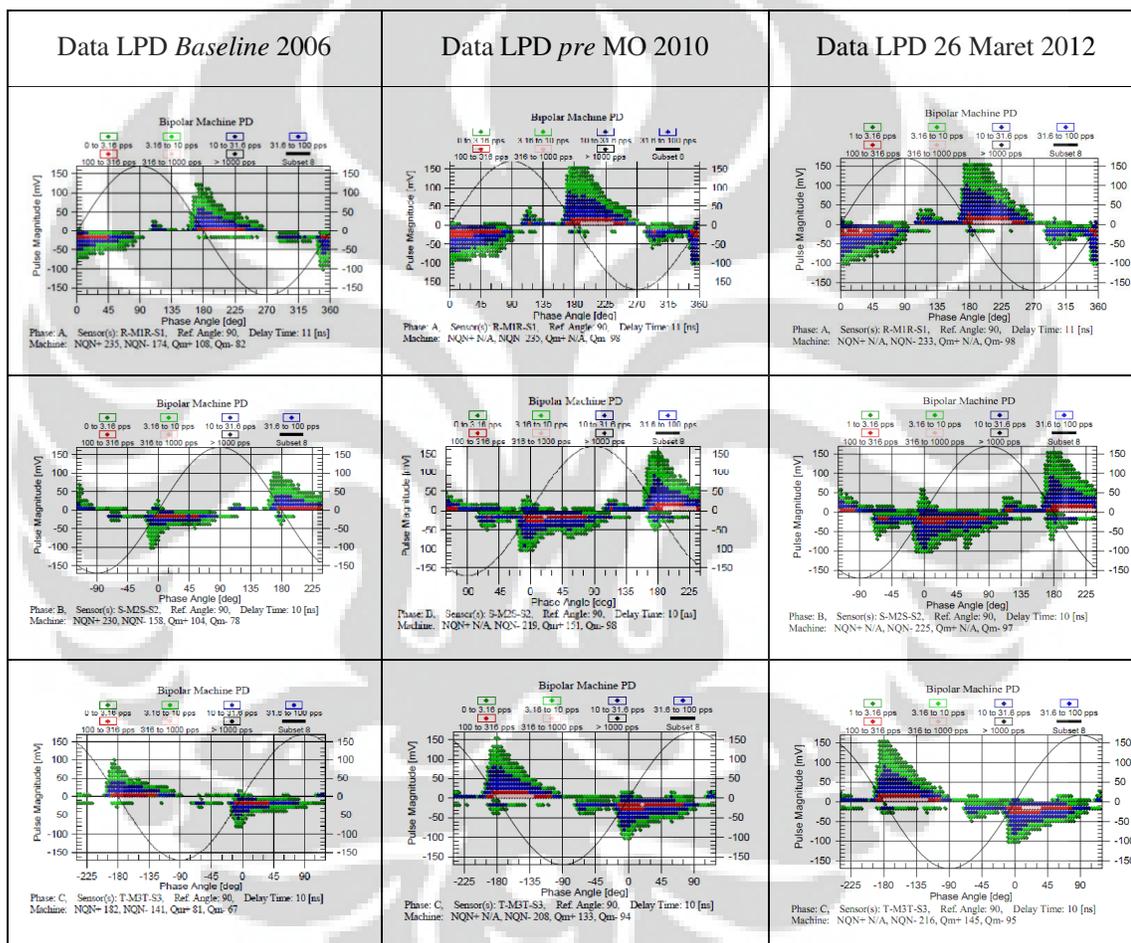
cross-coupling yang bersumber dari fasa R. Hal yang sama juga terjadi di fasa R pada sudut 300^0 yang merupakan mekanisme *cross-coupling* yang bersumber dari fasa S. Adanya kluster pulsa PD yang terbentuk akibat mekanisme *cross-coupling* bukanlah indikasi suatu masalah pada fasa tersebut sehingga tidak perlu dilakukan analisa lebih lanjut.



Gambar-4.7 Data Pengukuran PD Generator Unit-4 dalam plot LPD
(Sumber: Olahan Data)

Sebaran pulsa PD yang dominan pada sudut 0 dan 180^0 tersebut mengindikasikan aktifitas PD yang terjadi pada isolasi merupakan PD dengan tipe karakteristik non klasik. Berbeda dengan PD klasik, dominasi polaritas pada PD

non klasik tidak bisa digunakan untuk menentukan letak terjadinya kerusakan akibat PD di isolasi. Kluster PD di sekitar sudut 0 dan 180⁰ merupakan ciri PD yang terjadi di udara terbuka (*open air arc*). Hal ini dapat diakibatkan oleh PD pada koneksi terminasi yang longgar atau PD pada bagian metal yang runcing. Selain itu, kemunculan kluster PD di sekitar 0 dan 180⁰ dapat terjadi akibat kerusakan pada lapisan semi konduktif/grading area saat kerusakan tersebut mencapai tingkat keparahan yang tinggi [5]. Ciri PD yang terjadi pada area ini adalah dominasi polaritas positif, kenaikan magnitudo seiring dengan kenaikan suhu, dan terpengaruh oleh tegangan fasa ke tanah.



Gambar-4.8 Perbandingan Data Pengukuran PD Generator Unit-4 periode 2006 - 2012

(Sumber: Olahan Data)

Dari perbandingan data pengukuran PD di atas, sebaran pulsa PD yang terukur dari waktu ke waktu selama kurang lebih 6 tahun memiliki pola yang relatif sama, akan tetapi dengan magnitudo yang meningkat terhadap fungsi waktu. Hal ini menunjukkan bahwasanya permasalahan PD pada isolasi belitan stator generator Unit-4 terletak pada lokasi/bagian yang tipikal dengan tingkat kerusakan yang melebar seiring dengan waktu atau kerusakan baru timbul pada

belitan lain di area yang sama. Tidak adanya perubahan pola sebaran pulsa PD menunjukkan stres berlebih yang terjadi saat ini masih terlokalisir pada area di luar slot stator atau pada area *grading*.

Perbaikan lapisan stres *grading* pada MO 2010 terbukti hanya mampu menurunkan magnitudo PD saja (tidak bisa menghilangkan). Hal ini bisa menjadi indikasi adanya bagian yang tidak dapat dijangkau untuk perbaikan yang kemungkinan disebabkan oleh faktor konstruksi belitan stator.

4.5 Parameter Operasi Generator dan PD

Data operasi generator yang terdiri dari daya output, tegangan, arus, dan suhu belitan diambil bersamaan dengan setiap kali pengukuran PD. Hal ini akan sangat membantu dalam identifikasi awal penyebab fluktuasi (turun/naik) data magnitudo PD dalam data *trending*. Selain itu, analisa parameter operasi dapat membantu untuk memperkuat hasil analisa karakteristik PD serta dapat membedakan letak permasalahan pada isolasi belitan generator.

Generator Unit-4 memiliki data parameter operasi sebanyak 21 set data yang tercatat dengan lengkap. Data ini diambil mulai dari tahun 2007 secara periodik namun pengambilan belum dapat terjadwal dengan baik untuk setiap tahunnya. Dalam analisa parameter ini, 3 set data yang tercatat pada tanggal 21 Desember 2008, 29 Juli 2010, dan 15 Januari 2012 dianggap *outlier*. Hal ini dikarenakan pada tanggal 21 Desember 2008 daya keluaran generator hanya sebesar 60 MW dikarenakan adanya kekurangan pasokan uap dari sumur produksi yang dilakukan perawatan. Tanggal 29 Juli 2010 nilai magnitudo PD menurun drastis akibat dari perbaikan isolasi yang dilakukan pada beberapa hari sebelumnya (saat MO 2010). Data pada tanggal 15 Januari 2012 tidak bisa digunakan karena pengukuran PD dilakukan saat generator *ramp up* sehingga suhu belitan belum mencapai nilai sesungguhnya pada daya keluaran penuh.

Dengan menggunakan data parameter operasi yang terkumpul, analisa korelasi parameter operasi dengan magnitudo PD di olah dengan menggunakan bantuan perangkat lunak SPC XL. Analisa korelasi dilakukan dengan membandingkan variansis setiap parameter operasi dengan variansis nilai magnitudo PD. Jika diasumsikan tegangan keluaran generator pada fasa A adalah variabel x dan magnitudo PD adalah variabel y, maka koefisien korelasi (r) dapat dihitung dengan menggunakan rumus *Pearson's product-moment coefficient* sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{\sum xy}{\sqrt{(\sum x^2)(\sum y^2)}} \quad (4.1)$$

Besarnya koefisien korelasi $r = +1,0$ menunjukkan korelasi positif sempurna, $r = 0,0$ menunjukkan tidak adanya korelasi, dan $r = -1,0$ menunjukkan korelasi negatif

sempurna ^[13]. Berikut ini adalah hasil pengolahan data yang disajikan dalam bentuk matriks korelasi.

Tabel-4.6 Korelasi Parameter Operasi Generator dengan Magnitudo PD di Fasa A

Correlation Matrix												
	P	Q	V.R	V.S	V.T	I.R	I.S	I.T	T1	T2	R Qm+	R Qm-
P	1.0	0.093253	-0.5266	-0.177976	-0.198724	0.814508	0.846027	0.823317	0.216333	0.230462	0.189407	0.195686
Q		1.0	-0.13991	-0.177114	-0.116743	0.428216	0.452145	0.430082	0.11682	0.111759	0.17841	0.229022
V.R			1.0	0.4068	0.67533	-0.407211	-0.498659	-0.508382	0.357029	0.379907	-0.440616	-0.630825
V.S				1.0	0.239833	-0.182827	-0.222926	-0.266087	0.021831	0.031423	-0.476109	-0.383406
V.T					1.0	-0.138718	-0.205648	-0.204634	0.515856	0.518799	-0.309862	-0.521566
I.R						1.0	0.946509	0.9739	0.211532	0.227857	-0.004709	0.041992
I.S							1.0	0.906363	0.268133	0.277776	0.033797	0.130943
I.T								1.0	0.080098	0.097541	0.07797	0.119608
T1									1.0	0.996891	-0.030022	-0.284589
T2										1.0	-0.052745	-0.310002
R Qm+											1.0	0.902597
R Qm-												1.0
Summary												
Mean	64.834	15.947	11.861	11.885	12.014	3249.54	3331.17	3166.79	93.173	95.519	175.167	147.444
StDev	1.2039	2.8169	0.072154	0.15282	0.13118	80.217	75.017	79.806	2.6725	2.7679	28.937	23.821
Count	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18

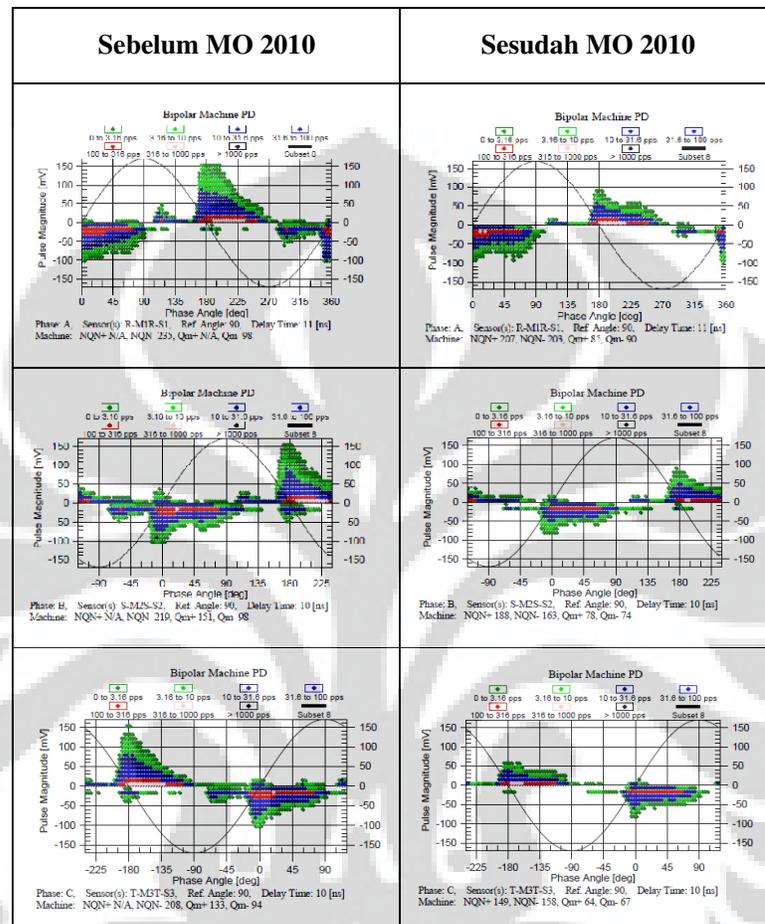
Sumber: Olahan Data

Dari hasil pengolahan data, variansis parameter operasi terhadap variansis nilai magnitudo PD hanya menunjukkan korelasi yang sangat kecil. Hal ini disebabkan karena data parameter operasi tidak tersebar pada jangkauan yang lebar dan hanya terlokalisir pada nilai daya keluaran penuh generator. Korelasi dimungkinkan untuk dapat di analisa apabila pengambilan data PD dan data parameter operasi dilakukan dalam berbagai variasi daya keluaran output, tegangan, dan suhu dalam jangkauan yang cukup lebar. Berdasarkan panduan dalam melakukan trending, pengaruh perubahan parameter operasi terhadap perubahan PD kemungkinan dapat ditemukan dengan variasi perubahan parameter operasi daya keluaran sebesar $\pm 10\%$, tegangan sebesar ± 0.2 kV, dan suhu sebesar ± 5 °C.

4.6 Generator Unit-4 dan Permasalahan Pada Area Grading Belitan

Berdasarkan hasil inspeksi visual pada tahun 2006 dan 2010, generator Unit-4 memiliki permasalahan PD pada area *grading* belitan. Data menunjukkan bahwasanya 4 dari 7 kerusakan yang ditemukan pada tahun 2010 merupakan bagian yang telah diperbaiki pada tahun 2006. Fakta ini mendorong penulis untuk melakukan perbandingan karakteristik dan pola sebaran PD seperti yang sudah dilakukan pada bagian 4.4 dan dapat dilihat di dalam Gambar-4.7. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan bahwasanya karakteristik dan pola sebaran PD cenderung tidak menampilkan banyak perubahan selama perioda 4 tahun pertama (2006-2010 sebelum MO) dan perioda 2 tahun kedua (sesudah MO 2010- 26 Maret 2012). Hal yang paling dominan terlihat dari perbandingan tersebut adalah kenaikan magnitudo PD seiring dengan waktu. Berdasarkan data *trending* perioda pertama dan hasil pengecekan visual pada MO 2010, bertambahnya nilai magnitudo PD menunjukkan adanya korelasi terhadap meningkatnya jumlah titik

kerusakan pada area *grading*. Korelasi ini lebih diperkuat dengan adanya data karakteristik dan pola sebaran PD yang diambil pada tanggal 29 Juli 2010 yaitu setelah perbaikan pada ke 7 titik kerusakan dilakukan .

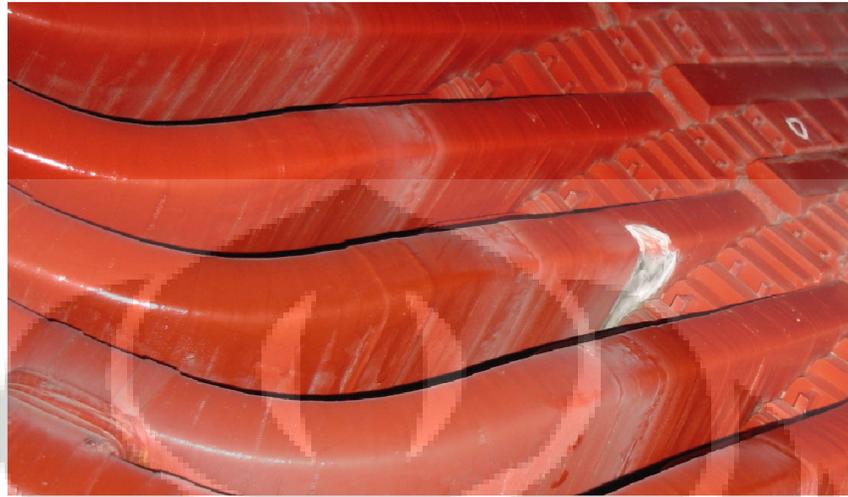


Gambar-4.9 Perbandingan Data Pengukuran PD Generator Unit-4 Sebelum dan Sesudah MO 2010 ^[9]

Dengan menggunakan jangkauan sensitivitas pengukuran yang sama, yaitu 10 – 170 mV dan jangkauan parameter-parameter operasi dalam batas yang direkomendasikan, maka kita dapat dengan mudah membandingkan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan dengan menggunakan plot diatas. Data yang memperlihatkan penurunan magnitudo PD sebagai hasil perbaikan pada area *grading* memberikan sebuah kesimpulan bahwasanya sebagian besar perbaikan yang dilakukan telah tepat pada area permasalahan isolasi belitan.

Permasalahan PD yang terjadi pada area *grading* belitan stator melibatkan material semikonduktif yang berfungsi untuk mereduksi stres lokal permukaan akibat adanya beda potensial pada bagian konduktor yang bertegangan tinggi di

endwinding dengan bagian pada inti stator yang di *ground*-kan dan juga di antara belitan-belitan yang berbeda potensial.



Gambar-4.10 Permukaan Area Grading Belitan Stator Generator Unit-4 yang Rusak Akibat PD

Perbedaan potensial pada permukaan *grading* ini menyebabkan terbentuknya medan listrik yang tidak seragam sehingga area ini rentan terhadap timbulnya PD apabila gradien yang terbentuk terlalu tinggi.

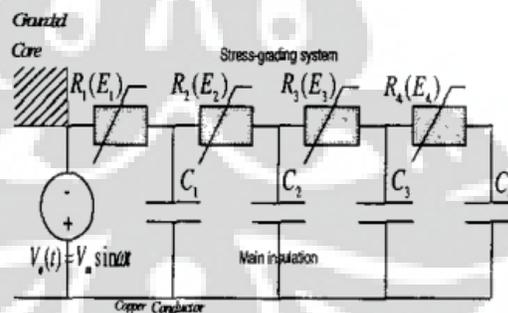
Ada dua material semikonduktif berbeda yang digunakan untuk menurunkan gradien potensial secara bertahap. Material yang pertama adalah semikonduktif *slot liner* atau biasa disebut konduktif material yang berbahan dasar *graphite* dan atau karbon hitam . Material yang kedua adalah semikonduktif *voltage grading* yang berbahan dasar *Silicon Carbide*.

Secara konstruksi pemasangan, material konduktif digunakan pada lapisan isolasi belitan di dalam slot yang bertujuan untuk menghubungkan secara elektrik permukaan isolasi dengan inti stator yang di *ground*-kan sehingga dapat menghasilkan potensial yang sama (distribusi medan listrik yang seragam). Selain di dalam slot, lapisan ini diperpanjang beberapa sentimeter ke luar slot yang bertujuan untuk memanjangkan hubungan ke *ground* pada permukaan belitan. Hal ini diperlukan untuk menjaga keseragaman medan listrik pada permukaan isolasi di luar slot ^[11].



Gambar-4.11 Konstruksi Pemasangan Lapisan Konduktif dan Lapisan Semikonduktif *Voltage Grading* Generator Unit-4

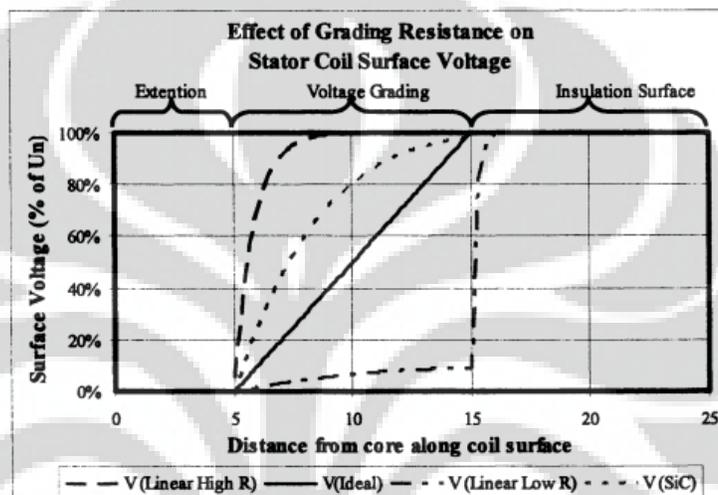
Berdasarkan sifatnya, material konduktif memiliki karakteristik konduktifitas lebih baik dibandingkan dengan lapisan *voltage grading*, tetapi tidak lebih baik dari pada tembaga dan baja. Material *voltage grading* memiliki karakteristik tegangan (V) fungsi arus (I) yang non-linier. Rangkaian pengganti dari aplikasi lapisan ini pada isolasi belitan stator dapat dimodelkan seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar-4.12 Rangkaian Pengganti Isolasi Pada Area *Grading* ^[12]

Secara praktis, isolasi *groundwall* yang terbuat dari mika memiliki resistansi yang sangat besar sehingga rangkaian paralel dapat diwakili oleh kapasitor (C) untuk merepresentasikan komponen kapasitif dari isolasi. Pada bagian permukaan, kerapatan arus kapasitif sangat kecil bila dibandingkan dengan kerapatan arus konduktif sehingga resistor non linier yang di susun seri digunakan untuk merepresentasikan komponen resistif pada lapisan *grading* ^[12].

Besarnya potensial/tegangan pada permukaan isolasi akan sangat bergantung dari resistansi pada lapisan *voltage grading*. Hubungan antara besarnya resistansi pada material *Silicone Carbide* dan potensial pada permukaan isolasi dapat dilihat pada Gambar-4.12. Dari grafik tersebut dapat terlihat, apabila material memiliki resistansi yang terlalu rendah, maka beda potensial yang tinggi akan terjadi pada lapisan antara *voltage grading* dan isolasi menuju *endwinding*. Sedangkan apabila material memiliki resistansi yang terlalu tinggi, maka beda potensial yang tinggi akan terjadi pada lapisan antara *voltage grading* dengan lapisan konduktif yang keluar dari slot.



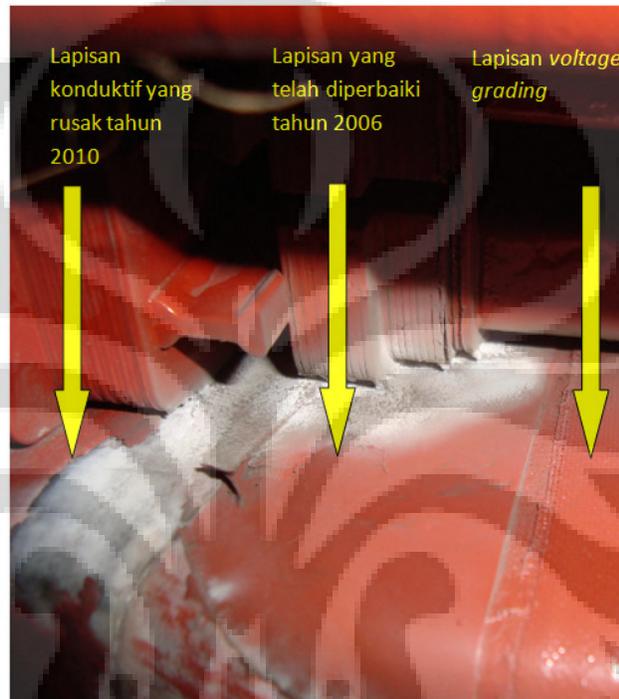
Gambar-4.13 Grafik Hubungan Antara Nilai Resistansi yang Berbeda Pada material SiC dengan Tegangan Permukaan Isolasi ^[11]

Berdasarkan hasil inspeksi visual, kerusakan pada permukaan isolasi akibat PD terjadi pada area lapisan antara *voltage grading* dengan lapisan konduktif yang keluar dari slot. Hal ini menunjukkan adanya resistansi yang cukup tinggi pada pertemuan kedua lapisan tersebut. Berdasarkan literatur, penyebab tingginya resistansi pada area tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor ^[3], antara lain:

- Densitas partikel karbon pada material semikonduktif yang terlalu rendah
- Kurang tepatnya densitas atau distribusi ukuran partikel *silicone carbide* pada lapisan *voltage grading*.
- Kurang tepatnya ukuran area tumpang tindih kedua permukaan lapisan tersebut bagi arus kapasitif yang mengalir dipermukaan.

Terkait dengan perbaikan lapisan *grading* yang dilakukan pada tahun 2006, hasil inspeksi visual tahun 2010 memperlihatkan kerusakan akibat PD bergeser dari bagian yang telah diperbaiki menuju ke lapisan konduktif. Hal tersebut menunjukkan masih tingginya beda potensial disekitar pertemuan antara

lapisan baru dan lapisan konduktif. Tidak adanya kerusakan antara pertemuan lapisan baru dan lapisan *voltage grading* mengindikasikan potensial yang sama pada kedua pertemuan tersebut. Terdapatnya kerusakan akibat PD pada lapisan konduktif diperkirakan terjadi akibat adanya mikro *void* pada pertemuan lapisan tersebut (saat pelapisan ulang) atau akibat kesalahan penggunaan bahan cat yang diaplikasikan (memiliki karakteristik resistansi yang tinggi).

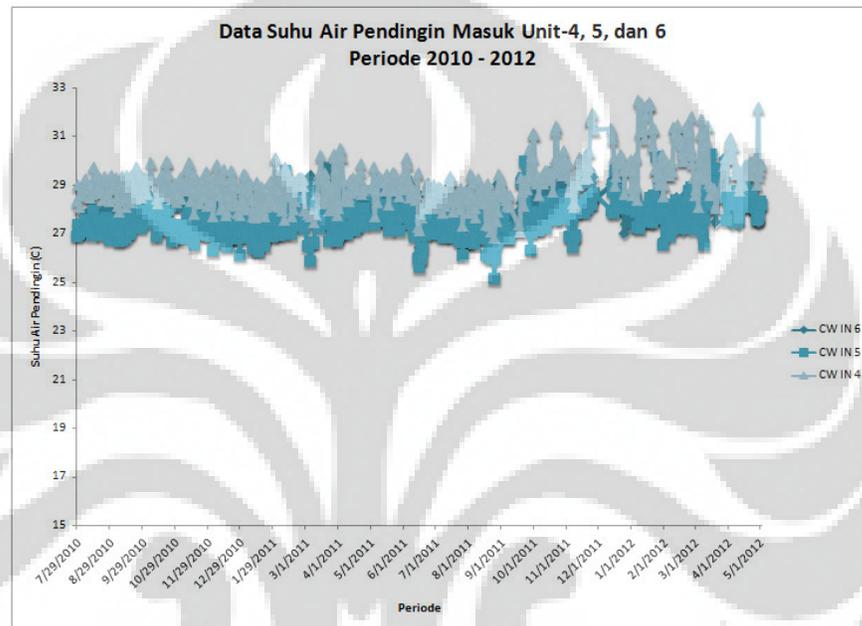


Gambar-4.14 Kondisi Area *Grading* yang Telah Diperbaiki Pada Tahun 2006, di Periksa Kembali Pada Tahun 2010

4.7 Lapisan Semikonduktif dan Suhu Air Pendingin Unit-4

Data pengukuran PD pada tanggal 26 Maret 2012 dan hasil inspeksi visual memperlihatkan bahwa isolasi belitan stator Unit-4 memiliki aktifitas PD yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan kedua Unit generator lainnya. Fakta ini cukup menarik dikarenakan ketiga generator ini tipikal. Ketiganya dibuat oleh Fuji Electric pada tahun 1996, di pasang di dalam satu bangunan, dioperasikan pada parameter operasi yang sama (daya, tegangan, arus), dan terkoneksi pada jaringan 150 kV yang sama. Secara teoritis, isolasi belitan ketiga generator ini akan sama-sama menghadapi kondisi transien (arus dan tegangan) baik yang diakibatkan oleh sambaran petir maupun hubung singkat pada jaringan. Berdasarkan fakta tersebut, kondisi rata-rata isolasi belitan stator ketiga generator seharusnya tidaklah jauh berbeda.

Untuk melakukan evaluasi lebih lanjut, data *trending* suhu air pendingin Unit-4 diambil melalui data yang terekam pada PIMS (*Plant Information Management System*) mulai dari tahun 2010 (paska MO) sampai dengan tahun 2012. Data ini dianggap telah mewakili kondisi sistem pendingin yang ideal (seperti saat pembangkit mulai beroperasi) setelah sebelumnya dilakukan kegiatan perawatan di dalam aktifitas MO. Berdasarkan dari data yang dikumpulkan, terlihat air pendingin Unit-4 memiliki rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedua unit lainnya.



Gambar-4.15 Data Suhu Air Pendingin Unit-4, 5, dan 6 (Sumber: Olahan Data)

Uji korelasi dilakukan pada parameter suhu air pendingin terhadap udara pendingin dan suhu belitan stator generator dengan mencuplik dari rekaman data. Uji korelasi tersebut diambil dari data pada tanggal 20 sampai 24 November dimana generator beroperasi pada daya keluaran yang relatif sama dan adanya variasi suhu air pendingin. Berdasarkan hasil uji korelasi dengan menggunakan bantuan perangkat lunak SPC XL, terlihat korelasi positif yang kuat antara suhu udara pendingin, udara pendingin, dan suhu belitan stator.

Tabel-4.7 Korelasi Parameter Suhu Pendingin dan Suhu Belitan Stator

Correlation Matrix									
	Air Pendingin	Cooler A	Cooler B	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Air Pendingin	1.0	0.97154	0.97221	0.804264	0.791168	0.792139	0.792227	0.785702	0.786749
Cooler A		1.0	0.998843	0.90932	0.899119	0.899497	0.899707	0.895099	0.896967
Cooler B			1.0	0.904016	0.893784	0.893702	0.893663	0.88993	0.891429
T1				1.0	0.997115	0.997254	0.996758	0.995346	0.99594
T2					1.0	0.997898	0.995976	0.99681	0.997939
T3						1.0	0.996224	0.996647	0.997408
T4							1.0	0.995357	0.995784
T5								1.0	0.997425
T6									1.0
Summary									
Mean	28.765	34.102	34.571	91.593	93.721	93.885	93.392	91.165	92.885
StDev	0.56146	0.66876	0.66813	3.0302	3.1377	3.0927	3.0678	3.0112	3.1209
Count	102	102	102	102	102	102	102	102	102

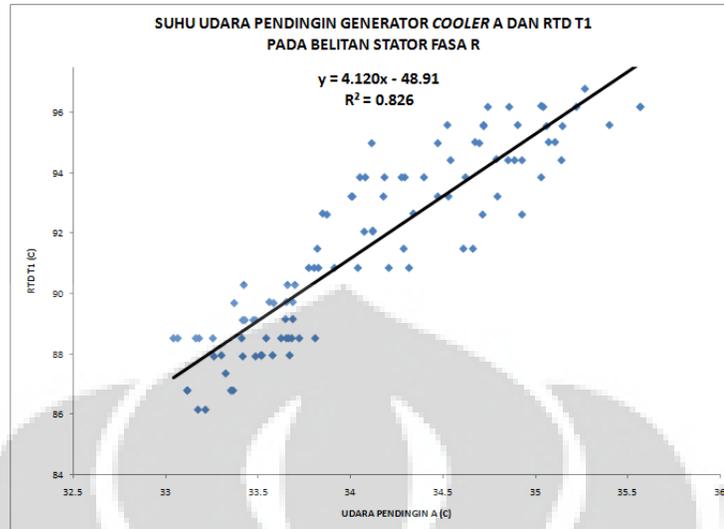
(Sumber: Olahan Data)

Selain mencari koefisien korelasi, hubungan antara variabel-variabel tersebut dapat diketahui dengan mencari koefisien determinasi r^2 menggunakan persamaan berikut:

$$r^2 = \frac{b(\sum xy)}{\sum(y^2)} \quad (4.2)$$

Dimana b adalah gradien kemiringan garis y fungsi x. Perhitungan koefisien determinasi menggunakan bantuan perangkat lunak SPC XL dengan keluaran dalam bentuk garis regresi. Besarnya koefisien determinasi r^2 yang dapat di terima minimum bernilai 0.5 dan maksimum 1 yang menunjukkan model garis regresi yang dihasilkan memiliki model yang kuat^[13]. Hasil pengolahan data dapat dilihat pada Gambar-4.16.

Berdasarkan hasil pengolahan data tersebut, variansis suhu yang terukur lewat RTD memiliki korelasi positif yang kuat terhadap variansis suhu udara pendingin. Hal ini menunjukkan kenaikan suhu air pendingin akan meningkatkan suhu udara pendingin yang berakibat meningkatnya suhu isolasi belitan. Secara teoritis kenaikan suhu media pendingin akan mengakibatkan turunnya kapasitas media tersebut untuk menyerap dan membuang panas (*heat transfer*) pada permukaan isolasi belitan.



Gambar-4.16 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler A* dan RTD T1 Pada Belitan Stator Fasa R (Sumber: Olahan Data)

Dalam teori pita energi, material semikonduktif memiliki celah terlarang yang relatif kecil ($\pm 1\text{eV}$) bila dibandingkan dengan isolator ($\pm 6\text{eV}$). Pada suhu rendah bahan ini akan bersifat isolator karena pita valensi tetap penuh dan pita konduksi tetap kosong. Apabila suhu dinaikan, sebagian dari elektron valensi memperoleh energi yang lebih besar dari E_G (0,785 dan 1,21 eV pada 0^0K) sehingga elektron tersebut memasuki pita konduksi^[10].

PD yang terjadi pada lapisan semikonduktif/*grading* merupakan tipe PD permukaan. Secara desain, konduktifitas berubah seiring dengan perubahan suhu. Aktifitas PD yang terjadi pada lapisan semikonduktif/*grading* memiliki korelasi yang positif terhadap kenaikan suhu^[5].

Permasalahan PD pada area pertemuan kedua lapisan *grading* disebabkan oleh kurang baiknya desain pengontrol stres dan atau proses fabrikasi. Bagian pertemuan yang dipasang tumpang tindih tersebut pada prinsipnya adalah sebuah sambungan elektrik. Arus yang mengalir pada bagian tersebut berasal dari arus kapasitif antara konduktor tegangan tinggi di dalam isolasi dengan lapisan *silicone carbide*. Arus kapasitif ini mengalir dengan arah aksial melalui *silicone carbide* ke lapisan konduktif, lalu ke inti stator yang di *ground*-kan. Jika resistansi pada bagian tersebut terlalu tinggi, maka akan menimbulkan rugi-rugi I^2R yang berlebih. Pemanasan ini akan menyebabkan naiknya suhu pada sambungan tersebut melebihi suhu belitan sehingga menghasilkan *hotspot*. Suhu yang tinggi ini akan mengakibatkan semakin bertambahnya resistansi akibat proses oksidasi. Pada akhirnya sambungan tersebut memiliki resistansi yang tak terhingga sehingga menyebabkan *discharge* akhirnya terjadi^[3].

Tingginya suhu pendingin pada Unit-4 menyebabkan perubahan konduktifitas dari lapisan semikonduktif *grading* sehingga arus kapasitif yang mengalir pada sambungan menjadi lebih besar. Seiring dengan meningkatnya rugi-rugi I^2R , maka hal ini mengakibatkan suhu *hotspot* pada bagian tersebut menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan kedua unit generator lainnya. Tingginya suhu *hotspot* diperkirakan menjadi pemicu timbulnya PD yang lebih cepat sehingga pada saat ini generator Unit-4 memiliki jumlah titik kerusakan yang lebih banyak.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

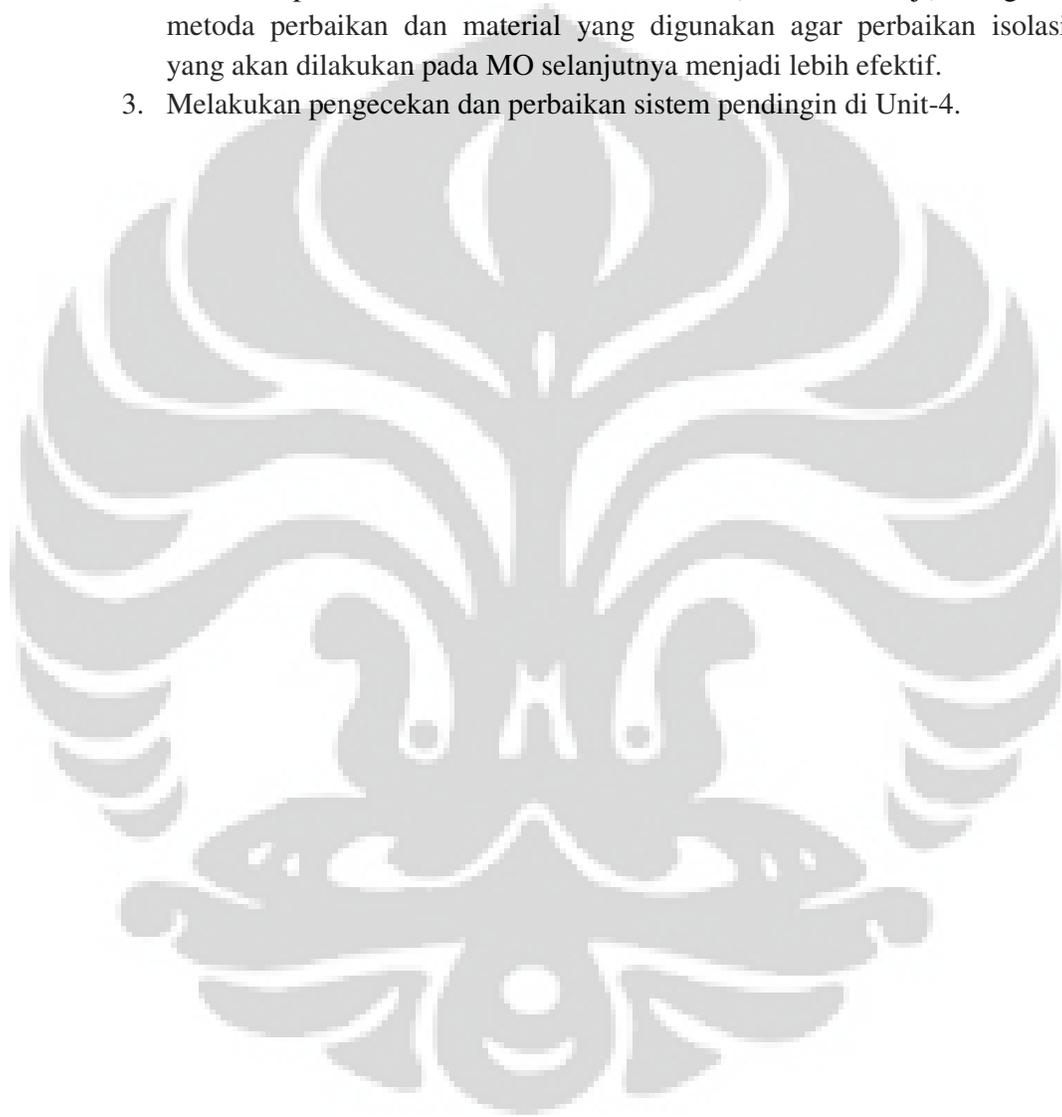
Dari penelitian skripsi tentang “Analisis Permasalahan *Partial Discharge* Pada Belitan Stator Generator 11.8 KV” di Pembangkit Listrik Panas Bumi Gunung Salak ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Berdasarkan hasil analisa komparasi, magnitudo PD yang terukur sebesar 252 mV pada isolasi belitan stator generator Unit-4 masuk kedalam katagori level PD moderat (90 % distribusi statistik). Selain itu, generator Unit-4 memiliki magnitudo paling tinggi bila dibandingkan dengan Unit-5 (11 mV) dan Unit-6 (21 mV). Akan tetapi secara umum, aktifitas PD pada isolasi belitan Unit-4 masih dalam batas aman hingga mencapai 382 mV.
2. Berdasarkan hasil analisa *trending* data, generator Unit-4 memiliki data tipe *upward trend* dengan laju kenaikan magnitudo PD yang relatif lambat sebagai ciri dari proses penuaan bahan. Kenaikan signifikan yang terjadi pada periode ke dua dari 95 mV ke 343 mV bukan merupakan ciri dari proses penuaan, akan tetapi hal ini terkait dengan kualitas hasil perbaikan lapisan *grading* yang dilakukan pada MO 2010.
3. Berdasarkan hasil analisa karakteristik PD, kluster pulsa PD berada pada sudut 0^0 dan 180^0 yang mengindikasikan terjadinya PD pada lapisan semikonduktif/*grading*. Hal ini sesuai dengan kondisi aktual kerusakan yang ditemukan pada isolasi belitan saat dilakukan pengecekan visual.
4. Berdasarkan hasil analisa korelasi, varians parameter operasi terhadap varians nilai magnitudo PD tidak menunjukkan korelasi yang signifikan (< 0.7). Hal ini disebabkan karena data parameter operasi tidak tersebar pada jangkauan yang lebar sehingga analisa korelasi menjadi tidak valid.
5. Berdasarkan hasil analisa, proses fabrikasi yang kurang baik pada area *overlap* semikonduktif generator Unit-4 di duga menjadi akar penyebab PD mudah terbentuk pada bagian ini. Seiring dengan proses penuaan isolasi dan meningkatnya rata-rata suhu operasi air pendingin Unit-4 (dari 27 ke 29^0C), maka akselerasi aktifitas PD diperkirakan terjadi sehingga generator Unit-4 memiliki PD yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan Unit-5 dan 6.

5.2 Saran

Adapun saran-saran yang diberikan dari penelitian tugas akhir ini untuk masa yang akan datang antara lain:

1. Mengkaji ulang metoda perbaikan isolasi belitan stator yang sudah dua kali dilakukan oleh Fuji Electric.
2. Mencari opini kedua dari ahli isolasi belitan (selain dari Fuji) mengenai metoda perbaikan dan material yang digunakan agar perbaikan isolasi yang akan dilakukan pada MO selanjutnya menjadi lebih efektif.
3. Melakukan pengecekan dan perbaikan sistem pendingin di Unit-4.



DAFTAR REFERENSI

- [1] Gabe Paoletti, A.Rose, “Improving Existing Motor Protection for Medium Voltage Motors”, IEEE Transaction on Industri Application, May/June, 1989.
- [2] Motor Reliability Working Group, “Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I”, IEEE Transaction on IA, Vol IA-21, No.4, July/Aug, 1985.
- [3] Greg C.Stone, Edward A. Boulter Ian Culbert, Hussien Dhirani, “Electrical Insulation for Rotating Machines”, IEEE Press Series, John Willey and Sons, Inc., 2004.
- [4] Greg C. Stone, Horward G.Sedding , Micheal J.Costello, “Application of PD Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance”, IEEE Transaction, Vol.32, No.2, March/April 1996.
- [5] IRIS Power LP, “PD Seminar”, Vol-1, Version 4.4, Ontario, Canada, August 2006.
- [6] IRIS Power LP, “PD Data Stastical Summary”, Module 6, Ontario, Canada, 2008.
- [7] Kitawara, “G-400 Inspection Report”, Fuji Electric Report, Chevron Geothermal Salak, June 23, 2006.
- [8] Kitawara, “G-400 Inspection Report”, Fuji Electric Report, Chevron Geothermal Salak, June 23, 2010.
- [9] Setyoadi, “Unit-4/5/6 Main Generator PD Analysis Report - Post OH 2010”, Facilities Engineering Dept, Chevron Geothermal Salak, December 3rd, 2010.
- [10] Rudy Setiabudy, “Material Teknik Listrik”, Universitas Indonesia, Depok, Februari, 2007.
- [11] D.J. Conley, N .Frost “Fundamental of Semiconductive System For High Voltage Stress Grading”, IEEE, Siemens Westinghouse Power Corporation, NY, 2005.
- [12] H.El-Kishky, M.Abdel Salam, H.Wedaa, Y.Sayed, “Time Domain Analysis of Non Linear Stress Grading System For High Voltage Rotating Machine”, IEEE, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric

Phenomena, 2003.

- [13] Dr.T.Narsoyo, “Statistika Eksperimen Rekayasa”, PT.Refika Aditama, Bandung, November, 2009.
- [14] Wiiliam H. Hayt, Jr., John A. Buck, “Elektromagnetika”, Erlangga, Jakarta, Januari, 2006



LAMPIRAN A: Data Pengukuran Parameter Generator dan PD

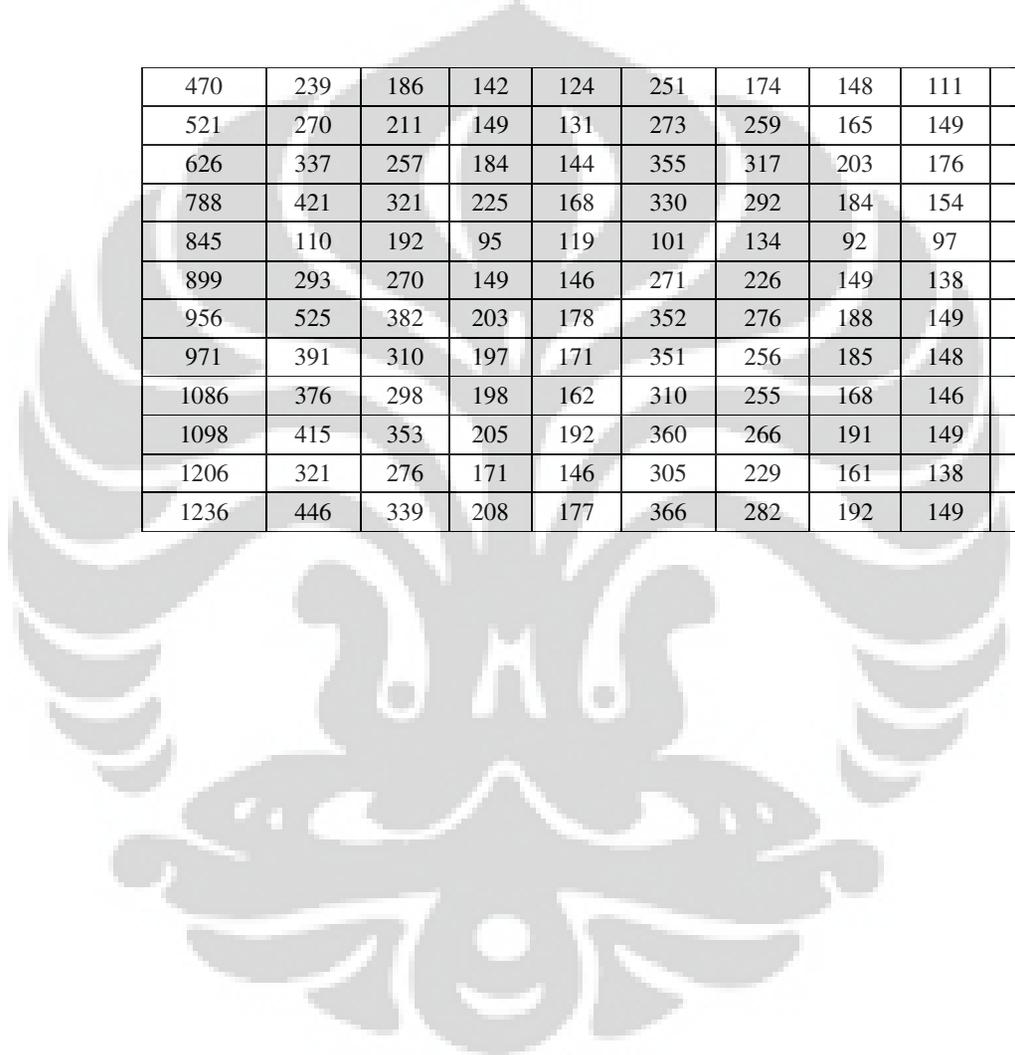
Tabel-A.1 Data Parameter Operasi Generator dan Pengukuran PD

NO	ID PENGUKURAN	TGL	P (MW)	Q (MVAR)	TEGANGAN (KV)			ARUS (AMPER)			SUHU BELITAN STATOR					
					R	S	T	R	S	T	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	115	30-Jun-06	65.7	16.99	11.9	11.9	11.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	283	21-Mar-07	65.06	18.65	11.91	11.92	12.07	3263	3393	3164	97.87	100.72	100.25	100.22	97.42	99.33
3	292	27-Jun-07	65.8	17	11.9	11.9	12.1	3364.41	3364.41	3308.80	92.5	95.4	95.6	95.5	92.1	94.1
4	220	27-Sep-07	66.13	13.73	11.77	11.77	11.89	3279.38	3363.19	3226.31	91.43	93.68	93.9	93.79	91.54	92.89
5	253	9-Jan-08	63.16	15.21	11.95	11.97	12.14	3260.6	3315.63	3144.25	93.79	96.04	95.53	95.51	92.7	94.96
6	319	18-Mar-08	65.2	11.78	11.96	11.97	12.1	3273	3343	3158	95.1	97.76	97.38	98.07	95.1	96.45
7	381	20-Jun-08	65.18	19.72	11.86	11.87	12.02	3293.8	3374.7	3200.6	93.14	95.38	95.57	95.5	92.13	94.11
8	431	18-Sep-08	65.53	14.37	11.91	11.9	12	3230	3330	3130	94.55	97.18	97.37	97.3	94.49	96.43
9	470	21-Dec-08	60.90	10.76	11.86	11.84	11.98	2987.91	3068.81	2899.50	86.75	88.35	88.50	88.46	85.69	87.67
10	521	21-Mar-09	65.05	16.10	11.84	11.82	11.96	3246.81	3346.94	3171.81	93.78	96.02	96.78	96.70	93.37	95.29
11	626	28-Mar-10	65.40	14.47	11.88	11.86	12.40	3245.59	3337.53	3164.29	96.71	98.94	99.11	99.06	95.70	98.20
12	788	13-Jul-10	65.08	15.37	11.87	11.86	12.00	3238.48	3311.46	3146.90	97.87	100.07	100.26	100.22	97.41	99.37

13	845	29-Jul-10	65.75	17.69	11.78	11.77	11.90	3308.74	3384.67	3244.74	92.60	95.40	95.05	94.94	92.40	94.09
14	899	25-Sep-10	65.16	14.42	11.82	12.41	11.95	3241.00	3326.75	3150.57	90.83	93.06	93.22	92.59	90.07	91.72
15	956	28-Dec-10	64.53	20.99	11.84	11.82	11.96	3282.52	3374.11	3206.54	92.04	94.25	94.48	93.80	91.26	92.88
16	971	27-Feb-11	65.60	13.94	11.73	11.70	11.83	3275.12	3371.78	3202.18	90.26	92.49	92.66	92.59	90.07	91.73
17	1086	27-Jun-11	65.31	16.73	11.90	11.88	12.01	3256.57	3328.07	3176.35	92.05	94.27	94.47	93.81	91.86	93.54
18	1098	25-Sep-11	65.19	14.23	11.75	11.72	11.84	3254.38	3344.79	3190.20	88.52	90.72	90.90	90.26	88.34	89.98
19	1206	24-Dec-11	62.07	18.06	11.94	11.91	12.04	3101.61	3185.52	3035.45	89.70	91.91	92.08	91.45	89.51	91.17
20	1236	26-Mar-12	65.66	20.86	11.75	11.74	11.88	3368.47	3441.75	3277.70	94.98	97.22	97.43	96.73	94.24	96.04

Catatan:
 Data pengukuran PD diambil pada setelan sensitivitas di 50 - 850 mV.
 Data pengukuran parameter operasi generator diambil dari data base Plant Information Management System

ID PENGUKURAN	PENGUKURAN PD BELITAN STATOR											
	FASA A				FASA B				FASA C			
	C1 NQN +	C1 NQN -	C1 Qm+	C1 Qm-	C1 NQN +	C1 NQN-	C1 Qm+	C1 Qm-	C1 NQN +	C1 NQN-	C1 Qm+	C1 Qm-
115	173	143	121	98	175	142	118	98	128	88	96	91
283	266	189	154	129	283	375	171	172	202	179	129	114
292	292	203	167	126	418	443	197	202	239	213	140	133
220	332	202	159	131	161	112	103	95	241	179	144	116
253	163	124	108	96	169	160	116	102	132	130	97	96
319	249	194	145	123	177	151	120	98	190	176	112	106
381	295	240	162	140	220	186	139	128	244	189	145	124
431	341	276	184	149	254	223	148	136	266	227	155	137



470	239	186	142	124	251	174	148	111	219	212	136	133
521	270	211	149	131	273	259	165	149	285	257	148	145
626	337	257	184	144	355	317	203	176	283	232	149	138
788	421	321	225	168	330	292	184	154	253	226	144	136
845	110	192	95	119	101	134	92	97	63	96	73	94
899	293	270	149	146	271	226	149	138	82	87	88	88
956	525	382	203	178	352	276	188	149	264	242	147	141
971	391	310	197	171	351	256	185	148	248	219	144	130
1086	376	298	198	162	310	255	168	146	251	231	145	139
1098	415	353	205	192	360	266	191	149	269	226	149	132
1206	321	276	171	146	305	229	161	138	217	180	134	111
1236	446	339	208	177	366	282	192	149	341	246	182	142

LAMPIRAN B: Data Pengukuran Parameter Generator dan Parameter Suhu

Tabel-B.1 Data Parameter Operasi Generator dan Parameter Suhu

NO	TGL	JAM	P (MW)	Q (MVAR)	SUHU AIR PENDINGIN MASUK (°C)	SUHU UDARA MASUK (°C)		SUHU UDARA KELUAR (°C)		SUHU BELITAN STATOR (°C)					
						PENDINGIN A	PENDINGIN B	PENDINGIN A	PENDINGIN B	T1	T2	T3	T4	T5	T6
1	20-Nov-11	0:00	65.61	7.51	28.54	33.67	34.14	67.18	66.03	87.94	89.56	89.74	89.10	87.19	88.83
2	20-Nov-11	1:00	65.44	12.85	28.49	33.62	34.10	66.93	65.81	88.52	90.72	90.90	90.26	88.35	89.98
3	20-Nov-11	2:00	65.54	11.74	28.44	33.65	34.10	67.04	65.87	88.52	90.71	90.89	90.83	88.34	89.98
4	20-Nov-11	3:00	65.21	11.24	28.63	33.68	34.18	67.07	65.89	88.52	90.72	90.90	90.26	88.34	89.98
5	20-Nov-11	4:00	65.46	9.66	28.42	33.58	34.04	66.93	65.78	87.95	89.56	89.74	89.67	87.19	88.82
6	20-Nov-11	5:00	65.38	11.56	28.43	33.52	34.01	66.88	65.70	87.95	90.16	90.33	89.67	87.76	89.40
7	20-Nov-11	6:00	65.40	9.93	28.58	33.81	34.26	67.07	65.87	88.51	90.16	90.33	90.26	87.76	89.40
8	20-Nov-11	8:00	65.07	19.85	28.99	34.29	34.74	67.46	66.25	91.48	93.72	93.93	93.82	91.29	92.90
9	20-Nov-11	9:00	65.00	22.62	29.60	34.86	35.28	68.33	67.14	94.42	96.63	96.84	96.17	94.25	95.89
10	20-Nov-11	10:00	65.41	23.50	29.56	35.03	35.45	69.08	67.91	96.20	98.41	98.61	98.52	96.02	97.62
11	20-Nov-11	11:00	64.97	23.66	29.77	35.27	35.74	69.47	68.29	96.77	98.97	99.17	98.51	96.01	98.21

12	20-Nov-11	12:00	65.39	18.10	29.61	35.03	35.49	69.16	67.95	93.85	96.08	96.28	95.55	93.67	95.27
13	20-Nov-11	13:00	65.31	17.79	29.55	34.93	35.40	68.76	67.67	92.63	94.87	95.08	94.98	92.44	94.12
14	20-Nov-11	14:00	65.45	18.58	29.03	34.53	34.99	68.53	67.39	93.20	95.43	95.65	94.98	92.44	94.70
15	20-Nov-11	15:00	65.81	14.40	29.03	34.34	34.83	68.44	67.28	92.64	94.87	95.09	94.98	92.44	94.12
16	20-Nov-11	17:00	65.74	14.75	29.41	34.61	35.09	68.39	67.20	91.49	93.08	93.93	93.18	90.67	92.34
17	20-Nov-11	18:00	65.06	17.89	28.81	34.21	34.69	67.92	66.74	90.86	93.08	93.25	92.62	90.67	92.33
18	20-Nov-11	19:00	65.46	20.33	29.03	34.47	34.91	68.16	66.99	93.21	95.45	95.65	95.55	93.02	94.70
19	20-Nov-11	20:00	65.94	20.11	28.47	34.05	34.50	68.35	67.17	93.85	96.08	96.29	96.17	93.67	95.28
20	20-Nov-11	21:00	65.99	18.73	28.48	34.01	34.44	68.21	67.02	93.22	96.08	95.65	95.55	93.02	95.28
21	20-Nov-11	22:00	65.85	16.82	28.26	33.85	34.30	67.99	66.79	92.64	94.88	95.09	94.40	92.44	94.13
22	20-Nov-11	23:00	65.81	15.14	28.38	33.83	34.26	67.55	66.34	90.86	93.08	93.25	92.61	90.67	92.33
23	21-Nov-11	0:00	66.06	13.67	28.10	33.42	33.91	67.34	66.12	90.28	92.52	92.69	92.03	90.09	91.76
24	21-Nov-11	1:00	65.78	12.44	28.21	33.47	33.90	67.15	66.00	89.14	91.36	91.54	90.84	88.94	90.56
25	21-Nov-11	2:00	65.51	11.93	28.61	33.73	34.22	66.89	65.72	88.53	90.17	90.62	90.27	87.77	89.41
26	21-Nov-11	3:00	65.57	11.28	28.57	33.67	34.11	66.96	65.86	88.52	90.17	90.91	90.27	87.76	89.41
27	21-Nov-11	4:00	65.70	11.93	28.41	33.54	34.02	67.05	65.87	88.53	90.73	90.91	90.27	88.35	89.99

28	21-Nov-11	5:00	65.51	14.04	28.27	33.42	33.83	66.95	65.81	89.14	91.36	91.53	90.84	88.95	90.56
29	21-Nov-11	6:00	65.60	12.34	27.72	33.04	33.50	66.67	65.48	88.53	90.73	90.90	90.84	88.35	89.99
30	21-Nov-11	7:00	65.98	13.06	28.00	33.18	33.64	66.55	65.40	88.52	90.72	90.91	90.27	87.77	89.41
31	21-Nov-11	8:00	65.71	14.16	28.52	33.65	34.10	67.01	65.83	89.71	91.37	91.53	91.47	88.95	90.56
32	21-Nov-11	9:00	64.80	19.39	28.52	33.82	34.23	67.32	66.15	91.49	93.73	93.93	93.19	90.68	92.33
33	21-Nov-11	10:00	65.31	21.58	28.77	34.18	34.62	67.72	66.64	93.21	95.44	95.65	94.99	92.44	94.70
34	21-Nov-11	11:00	65.11	17.52	28.85	34.29	34.74	68.16	67.09	93.86	96.08	95.66	95.55	93.02	94.70
35	21-Nov-11	12:00	65.38	19.23	29.29	34.63	35.02	68.45	67.33	93.86	96.08	96.28	95.56	93.03	95.28
36	21-Nov-11	13:00	65.42	20.39	29.47	34.80	35.19	68.60	67.54	93.21	95.45	95.66	94.99	92.45	94.71
37	21-Nov-11	14:00	65.45	21.76	29.43	34.79	35.23	68.82	67.72	94.44	96.65	96.85	96.19	93.68	95.28
38	21-Nov-11	15:00	65.13	20.79	29.20	34.68	35.14	69.00	67.81	95.01	97.25	97.45	96.75	94.26	96.49
39	21-Nov-11	16:00	65.40	20.04	29.01	34.54	34.99	68.81	67.67	94.43	96.65	96.85	96.19	93.68	95.29
40	21-Nov-11	17:00	65.15	20.15	28.69	34.18	34.65	68.35	67.15	93.85	96.08	96.29	95.56	93.03	94.71
41	21-Nov-11	18:00	65.53	20.77	28.79	34.28	34.72	68.31	67.12	93.86	96.09	96.29	95.56	93.02	95.28
42	21-Nov-11	19:00	65.76	17.96	28.49	34.01	34.47	68.31	67.10	93.22	95.45	95.66	94.99	93.02	94.71
43	21-Nov-11	20:00	65.63	17.11	28.59	34.07	34.54	67.97	66.84	92.07	94.29	94.50	93.84	91.88	93.55

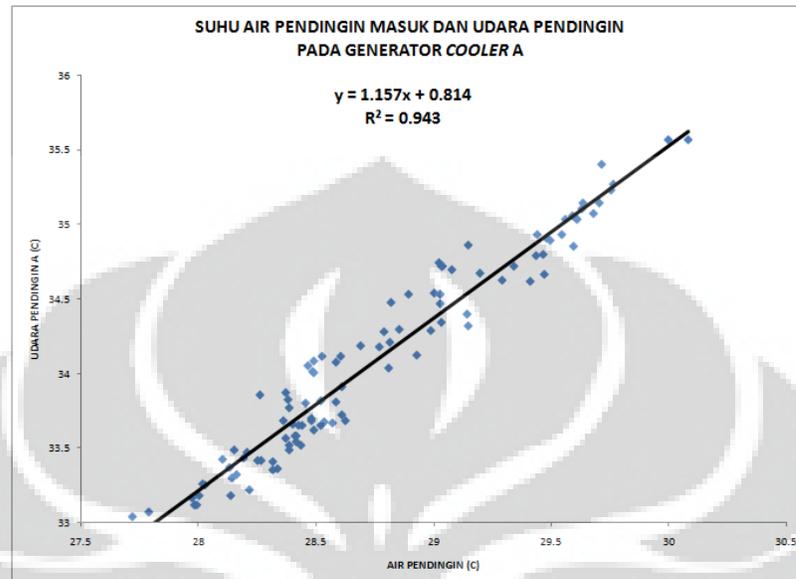
44	21-Nov-11	21:00	65.39	15.71	28.39	33.77	34.25	67.57	66.42	90.86	93.09	93.26	92.62	90.67	92.34
45	21-Nov-11	22:00	65.62	13.81	28.40	33.66	34.18	67.41	66.21	90.29	92.53	92.70	92.03	90.10	91.76
46	21-Nov-11	23:00	65.84	10.55	28.36	33.69	34.11	67.35	66.16	89.14	91.37	91.53	90.84	88.95	90.57
47	22-Nov-11	0:00	65.81	6.96	28.39	33.52	34.02	67.16	65.98	87.95	89.57	89.75	89.68	87.20	88.84
48	22-Nov-11	1:00	65.60	15.60	28.37	33.56	34.02	66.92	65.77	89.72	91.92	92.10	91.47	89.53	91.19
49	22-Nov-11	2:00	65.73	15.57	28.46	33.80	34.25	67.33	66.17	90.86	92.52	93.25	92.62	90.10	91.76
50	22-Nov-11	3:00	65.76	11.51	28.43	33.65	34.09	67.37	66.20	89.14	91.37	91.54	91.47	88.94	90.56
51	22-Nov-11	4:00	65.72	11.33	28.14	33.30	33.81	66.92	65.77	87.95	90.16	90.34	90.27	87.77	89.41
52	22-Nov-11	5:00	65.99	13.17	27.97	33.16	33.61	66.76	65.65	88.53	90.73	90.91	90.27	88.35	89.99
53	22-Nov-11	6:00	65.78	13.24	28.19	33.43	33.88	66.88	65.71	89.14	91.36	91.54	90.84	88.95	90.56
54	22-Nov-11	7:00	65.59	16.12	28.48	33.70	34.13	66.99	65.81	90.28	91.93	92.69	92.03	90.10	91.18
55	22-Nov-11	8:00	65.36	21.19	28.93	34.12	34.55	67.62	66.42	92.07	94.29	94.50	94.40	91.87	93.55
56	22-Nov-11	9:00	65.43	20.46	29.48	34.91	35.36	68.63	67.56	95.58	97.81	98.01	97.91	95.40	97.06
57	22-Nov-11	10:00	65.62	18.88	29.68	35.07	35.56	69.28	68.12	95.01	97.25	97.11	96.75	94.26	96.48
58	22-Nov-11	11:00	65.42	19.90	29.63	35.11	35.62	69.35	68.18	95.01	97.24	97.45	96.75	94.26	96.48
59	22-Nov-11	12:00	65.58	16.88	29.71	35.14	35.60	69.32	68.16	94.42	96.64	96.85	96.18	93.67	95.90

60	22-Nov-11	14:00	65.57	15.48	29.47	34.67	35.17	68.41	67.33	91.49	93.72	93.25	93.18	90.67	92.33
61	22-Nov-11	15:00	65.57	16.91	29.34	34.72	35.21	68.52	67.41	92.63	94.88	94.50	93.82	91.87	93.55
62	22-Nov-11	16:00	65.70	20.94	29.44	34.93	35.42	68.95	67.77	94.42	96.63	96.84	96.17	94.25	95.89
63	22-Nov-11	17:00	65.86	21.21	29.04	34.72	35.20	69.17	67.97	95.58	97.80	98.00	97.33	94.82	97.05
64	22-Nov-11	18:00	65.91	21.57	29.03	34.72	35.16	69.18	68.02	95.56	97.24	97.43	97.33	94.82	96.47
65	22-Nov-11	19:00	66.01	21.33	29.02	34.74	35.22	69.31	68.05	96.20	98.41	98.48	97.89	96.01	97.62
66	22-Nov-11	20:00	65.91	21.29	28.89	34.53	35.05	69.15	67.92	95.57	97.79	97.99	97.33	95.40	97.04
67	22-Nov-11	21:00	65.74	20.31	28.53	34.11	34.61	68.77	67.59	94.99	97.23	97.44	96.74	94.82	96.47
68	22-Nov-11	22:00	65.92	16.89	28.37	33.88	34.33	68.27	67.08	92.63	94.87	95.07	94.38	92.44	94.12
69	22-Nov-11	23:00	65.97	13.73	28.61	33.91	34.42	67.85	66.63	90.84	93.07	93.25	92.61	90.66	92.32
70	23-Nov-11	0:00	65.70	10.22	28.48	33.69	34.23	67.57	66.41	89.71	91.35	91.52	91.46	88.94	90.55
71	23-Nov-11	1:00	65.68	8.42	28.25	33.42	33.91	67.21	66.04	87.94	90.15	90.33	89.67	87.76	89.39
72	23-Nov-11	2:00	65.89	7.43	28.16	33.33	33.79	66.94	65.79	87.36	88.99	89.17	89.10	86.61	88.25
73	23-Nov-11	3:00	65.89	3.45	28.22	33.22	33.69	66.94	65.81	86.16	88.38	88.57	87.92	85.99	87.66
74	23-Nov-11	4:00	66.08	4.87	28.34	33.37	33.85	66.97	65.82	86.79	88.99	89.17	88.47	86.61	87.66
75	23-Nov-11	5:00	65.92	11.04	27.98	33.12	33.60	66.73	65.56	86.80	88.37	88.57	88.48	85.99	87.66

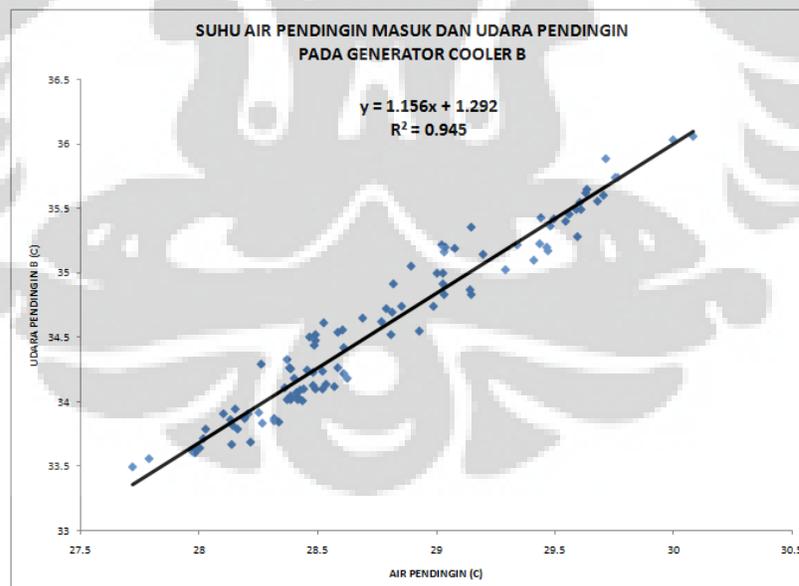
76	23-Nov-11	6:00	65.94	12.46	27.79	33.07	33.56	66.66	65.50	88.51	90.71	90.90	90.25	88.34	89.97
77	23-Nov-11	7:00	65.76	12.43	28.32	33.41	33.87	66.86	65.69	88.51	90.70	90.89	90.26	88.33	89.97
78	23-Nov-11	8:00	65.89	17.30	29.15	34.32	34.83	67.52	66.32	90.85	93.07	93.24	92.61	90.66	92.31
79	23-Nov-11	9:00	65.47	19.83	29.14	34.40	34.87	68.34	67.16	93.84	96.07	96.27	95.54	93.66	95.26
80	23-Nov-11	10:00	65.73	20.65	29.59	35.06	35.49	69.07	67.97	95.56	97.23	97.43	96.73	94.81	96.46
81	23-Nov-11	11:00	65.61	20.91	30.00	35.57	36.03	69.70	68.56	96.20	98.40	98.60	97.88	96.01	97.61
82	23-Nov-11	14:00	65.11	24.94	30.08	35.57	36.05	69.42	68.29	96.20	98.40	98.00	97.89	95.39	97.04
83	23-Nov-11	15:00	65.02	22.49	29.71	35.40	35.88	69.64	68.46	95.58	97.79	97.99	97.32	94.81	97.05
84	23-Nov-11	16:00	65.68	22.07	29.15	34.86	35.36	69.48	68.29	96.19	98.40	98.60	97.89	95.39	97.62
85	23-Nov-11	17:00	65.27	22.24	29.76	35.23	35.74	69.59	68.42	96.20	98.41	98.61	97.89	95.39	97.62
86	23-Nov-11	18:00	65.59	21.64	29.63	35.14	35.65	69.56	68.38	95.56	97.79	98.00	97.32	95.39	97.04
87	23-Nov-11	19:00	65.63	20.69	29.08	34.70	35.19	69.15	67.99	94.99	97.22	96.83	96.73	94.82	96.46
88	23-Nov-11	20:00	65.59	21.14	28.82	34.48	34.92	68.88	67.73	94.99	97.23	97.43	97.32	94.82	96.46
89	23-Nov-11	21:00	65.83	19.28	28.49	34.08	34.52	68.52	67.33	93.85	96.63	96.27	96.17	93.66	95.89
90	23-Nov-11	22:00	65.73	13.41	28.61	34.12	34.56	68.20	66.97	92.05	94.27	94.48	93.82	91.86	93.54
91	23-Nov-11	23:00	65.94	8.53	28.15	33.49	33.94	67.57	66.39	89.12	91.36	91.52	90.83	88.94	90.55

92	24-Nov-11	0:00	65.71	11.19	28.02	33.26	33.71	66.98	65.86	87.94	90.15	90.32	89.66	87.75	89.39
93	24-Nov-11	1:00	65.72	6.46	27.99	33.12	33.65	66.72	65.56	86.79	88.99	89.17	88.47	86.61	88.24
94	24-Nov-11	2:00	65.75	4.71	28.14	33.18	33.67	66.66	65.49	86.16	87.82	87.99	87.91	85.41	87.08
95	24-Nov-11	3:00	65.65	6.46	28.32	33.35	33.85	66.67	65.51	86.79	88.38	88.56	87.91	85.99	87.66
96	24-Nov-11	4:00	65.69	10.55	28.39	33.49	34.05	66.79	65.66	87.94	90.15	90.32	89.67	87.76	88.82
97	24-Nov-11	5:00	65.84	12.78	28.03	33.25	33.79	66.85	65.69	88.52	90.71	90.89	90.26	88.34	89.97
98	24-Nov-11	6:00	65.93	13.86	28.13	33.37	33.86	66.92	65.76	89.70	91.34	91.53	91.45	88.94	90.54
99	24-Nov-11	7:00	65.82	12.58	28.41	33.59	34.08	67.10	65.92	89.70	91.90	92.09	91.45	88.93	90.56
100	24-Nov-11	8:00	65.37	17.54	28.81	34.04	34.52	67.41	66.23	90.84	92.50	92.67	92.61	90.08	91.74
101	24-Nov-11	9:00	65.54	21.18	29.50	34.89	35.41	68.35	67.29	94.41	96.63	96.83	96.16	94.24	95.88
102	24-Nov-11	10:00	65.22	23.85	29.60	35.04	35.54	69.19	68.07	96.19	98.96	98.60	97.88	96.01	97.61

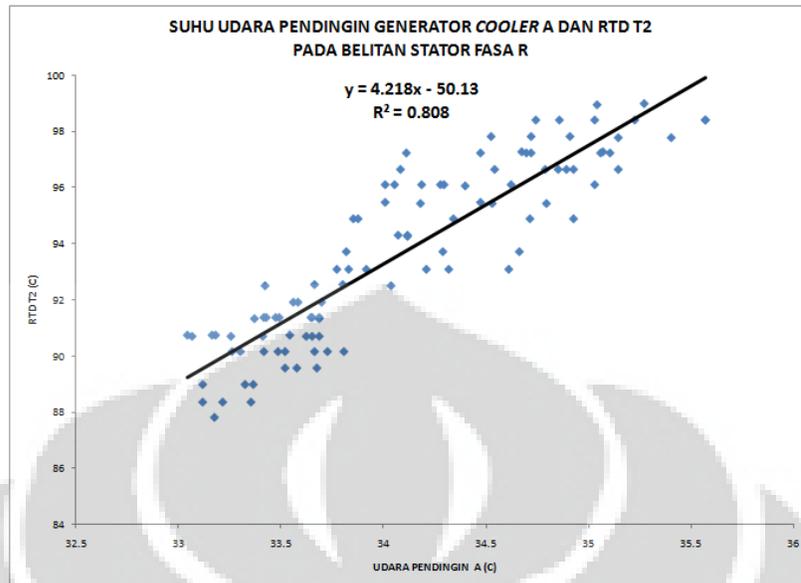
LAMPIRAN C: Grafik Korelasi Parameter Suhu



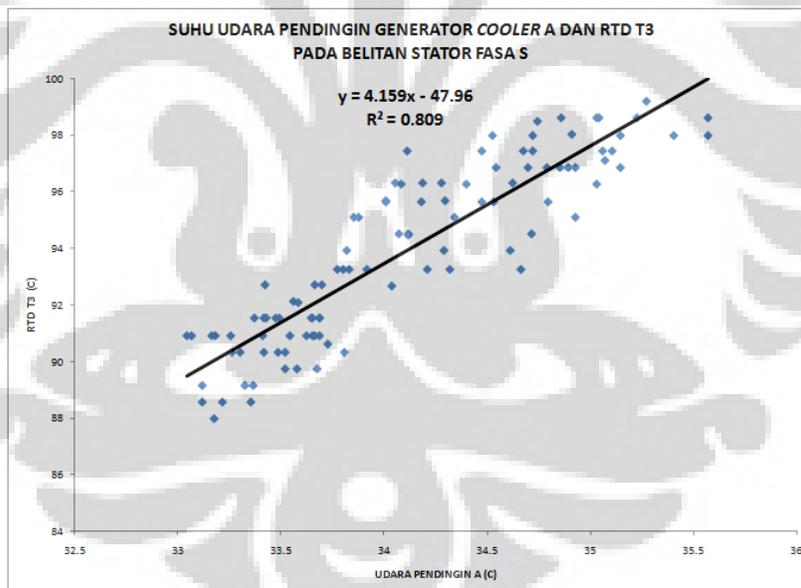
Gambar-C.1 Grafik Perbandingan Antara Suhu Air Pendingin Masuk dan Udara Pendingin Pada Generator *Cooler A*



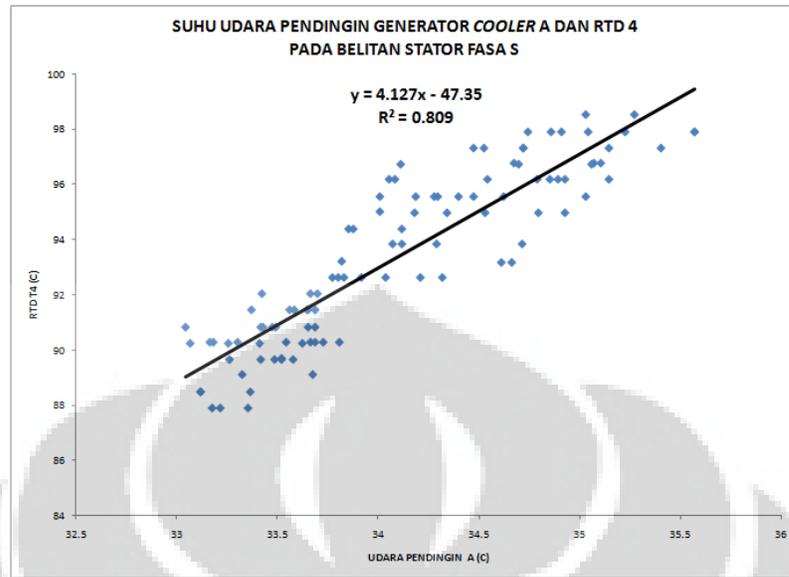
Gambar-C.2 Grafik Perbandingan Antara Suhu Air Pendingin Masuk dan Udara Pendingin Pada Generator *Cooler B*



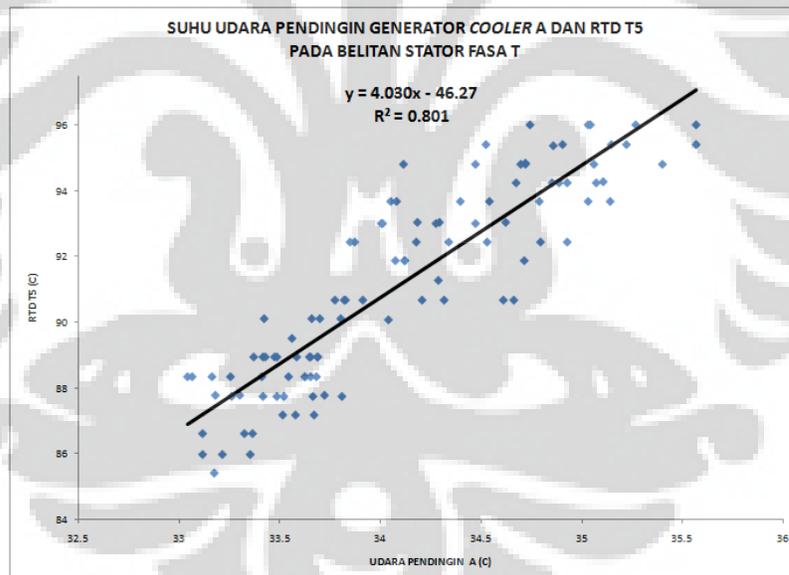
Gambar-C.3 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler* A dan RTD T2 Pada Belitan Stator Fasa R



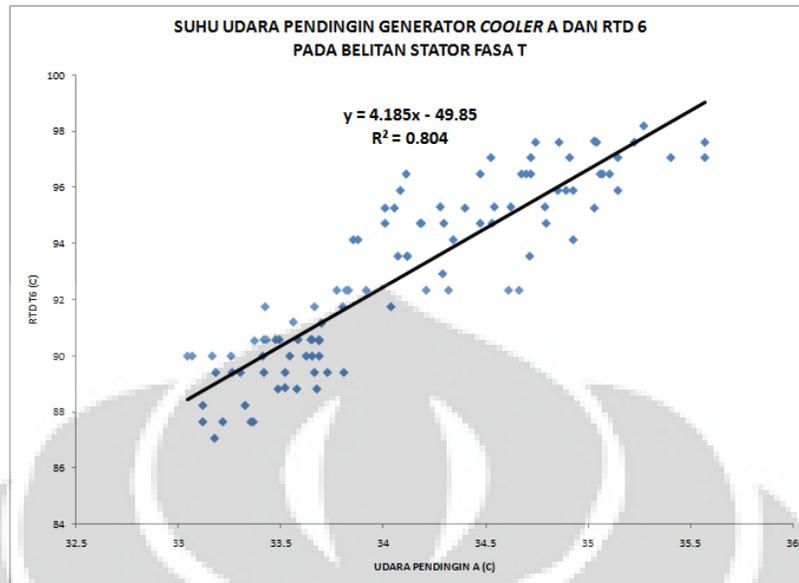
Gambar-C.4 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler* A dan RTD T3 Pada Belitan Stator Fasa S



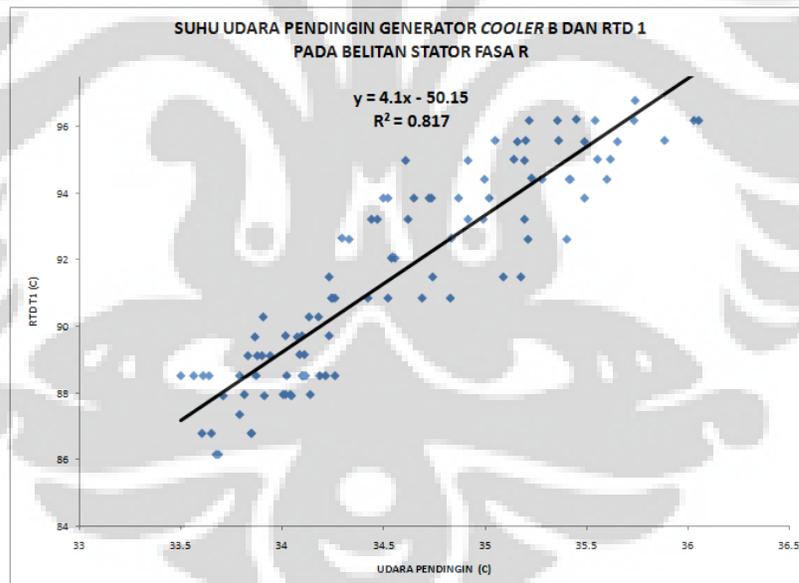
Gambar-C.5 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler A* dan RTD T4 Pada Belitan Stator Fasa S



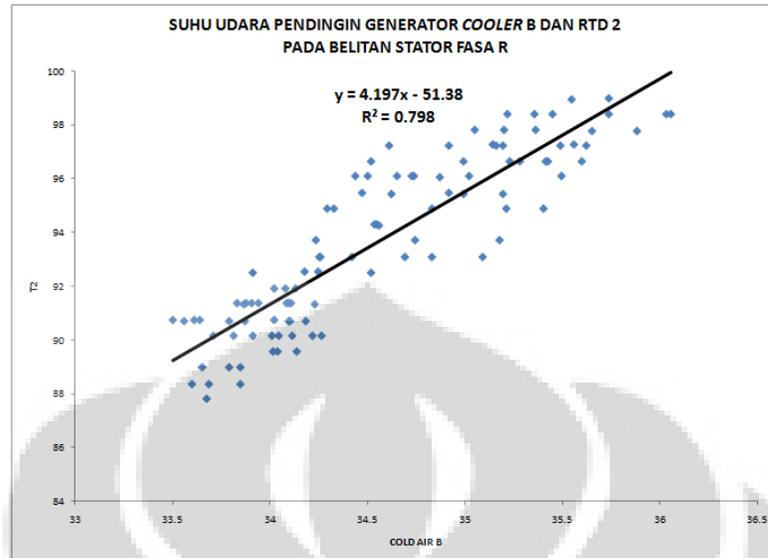
Gambar-C.6 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler A* dan RTD T5 Pada Belitan Stator Fasa T



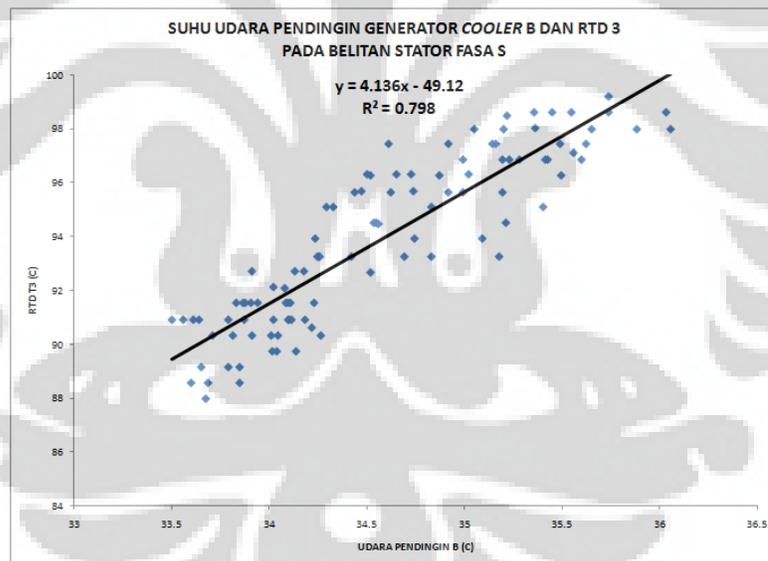
Gambar-C.7 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler A* dan RTD T6 Pada Belitan Stator Fasa T



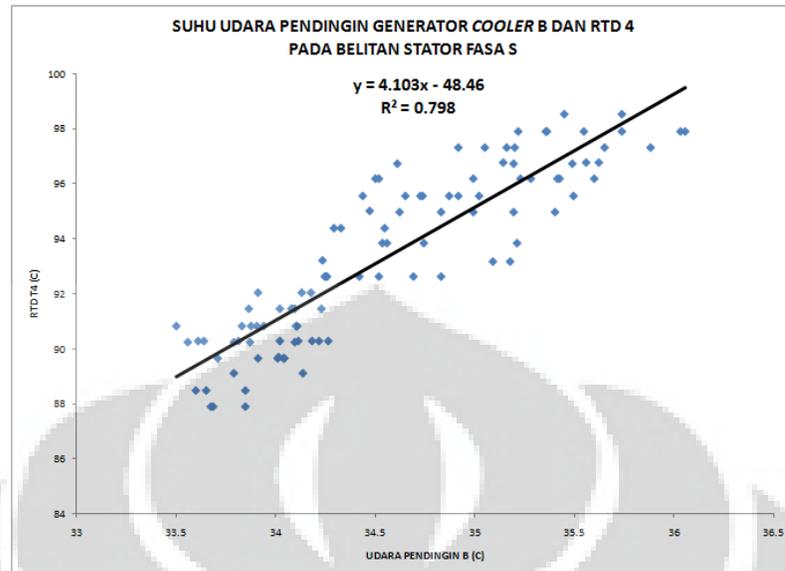
Gambar-C.8 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T1 Pada Belitan Stator Fasa R



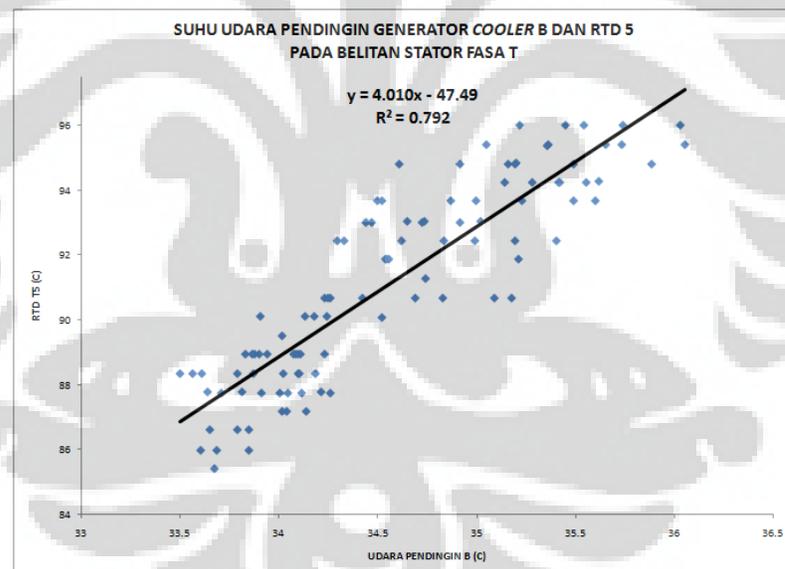
Gambar-C.9 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T2 Pada Belitan Stator Fasa R



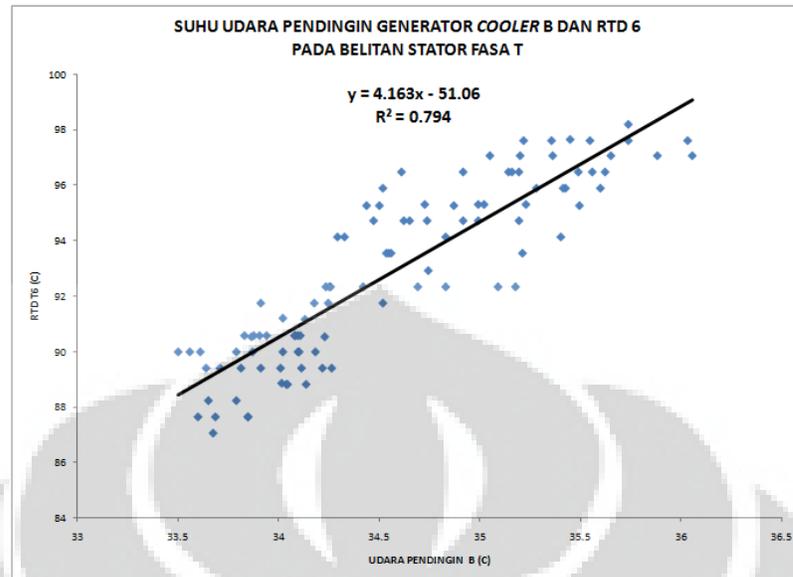
Gambar-C.10 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T3 Pada Belitan Stator Fasa S



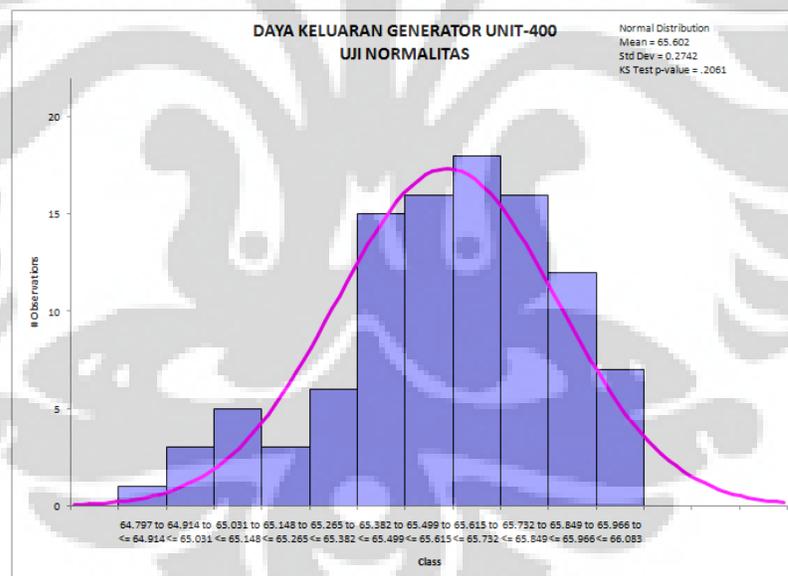
Gambar-C.11 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T4 Pada Belitan Stator Fasa S



Gambar-C.12 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T5 Pada Belitan Stator Fasa T



Gambar-C.13 Grafik Perbandingan Antara Suhu Udara Pendingin Generator *Cooler B* dan RTD T6 Pada Belitan Stator Fasa T



Gambar-C.14 Grafik Pengujian Normalitas Data dari Daya Keluaran Generator Unit-4