

**DETEKSI DAN ANALISIS PELUAHAN PARSIAL
PADA BELITAN STATOR GENERATOR**

SKRIPSI

Oleh:

MUHAMMAD HUSNUL K.

04 03 03 0764



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**DETEKSI DAN ANALISIS PELUAHAN PARSIAL
PADA BELITAN STATOR GENERATOR**

SKRIPSI

Oleh

MUHAMMAD HUSNUL K.

04 03 03 0764



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul:

DETEKSI DAN ANALISIS PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Juli 2008

Muhammad Husnul K.

NPM 0403030764

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

DETEKSI DAN ANALISIS PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 10 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, Juli 2008

Dosen Pembimbing

Ir. Agus R. Utomo MT.

NIP. 131 595 840

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan kepada **Allah SWT** karena atas rahmat serta karunia-Nya penulisan tugas skripsi ini dapat diselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Ir. Agus R. Utomo MT.

Sebagai dosen pembimbing dalam skripsi ini yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, diskusi, dan bimbingan, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Muhammad Husnul K.
NPM 04 03 03 0764
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Ir. Agus R. Utomo MT.

DETEKSI DAN ANALISIS PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR

ABSTRAK

Generator sebagai salah satu komponen utama pembangkit, harus tetap berada pada kondisi terbaik. Kerusakan yang terjadi pada isolasi belitan stator merupakan hal yang paling dominan sebagai salah satu penyebab kerusakan pada generator. Adanya *void* pada belitan stator menyebabkan aktifitas peluahan parsial (*Partial Discharge*; PD). Kenaikan aktifitas PD yang terjadi dapat menyebabkan kegagalan operasi generator.

Void pada belitan stator generator dapat menyebabkan kegagalan jika intensitas medan listrik yang bekerja melebihi kekuatan dielektrik dari *void* itu sendiri. Dalam hal ini, akan terjadi distribusi muatan yang tidak seimbang pada belitan stator generator. Penambahan temperatur belitan stator terjadi akibat perubahan nilai muatan bocor pada *void* tiap satuan waktu.

Pengukuran PD dilakukan menggunakan alat diagnostik *PD tech Power Engineering AG* dan perangkat lunak *MICAMAXXTM Plus*. Berdasarkan pengamatan dalam studi kasus generator GT 1.2, terjadi PD pada setiap fasa dengan jenis PD yang terdeteksi adalah peluahan internal karena adanya *void* bagian isolasi utama belitan stator. Dari hasil perhitungan, usia efektif generator GT 1.2 diprediksi sampai dengan tanggal 8 Maret 2020.

KATA KUNCI : Peluahan Parsial, Void, Belitan Stator, Generator

Muhammad Husnul K.
NPM 04 03 03 0764
Electrical Engineering Department

Counselor
Ir. Agus R. Utomo MT.

DETECTION AND ANALYZING PARTIAL DISCHARGE IN STATOR WINDING OF GENERATOR

ABSTRACT

Generator as a main component of power plant should be ensured that it always on its best condition. Deterioration of stator winding insulation is the predominant causes of generator failures. A void on stator winding causes partial discharge. The increasing of PD activity which is occurred may cause failure of generator operation.

A void on stator winding may cause failure if electric field intensity which is working over than dielectric strength of itself. On this part, there will be unbalance charge distribution on stator generator. The additional temperature of stator winding occurred, because of the value changing of leak charge at the void in every time unit.

PD Measurement is performed by using PD tech Power Engineering AG as a diagnostic tools and software MICAMAXX™ Plus. Based on the research in the case study of generator GT 1.2, PD is occurred on each phase with the PD's type which is detected as internal discharge because there is a void on the main insulation of stator winding. From the calculation result, the effective life period of generator GT 1.2 can be predicted until 2020, 8th March.

KEYWORDS : Partial Discharge, Void, Stator Winding, Generator

DAFTAR ISI

| | |
|--|------|
| PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI | ii |
| PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| ABSTRAK | v |
| ABSTRACT | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| DAFTAR LAMPIRAN | xii |
| DAFTAR SINGKATAN | xiii |
| DAFTAR SIMBOL | xiv |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 LATAR BELAKANG | 1 |
| 1.2 PERUMUSAN MASALAH | 1 |
| 1.3 TUJUAN PENULISAN | 2 |
| 1.4 BATASAN MASALAH | 2 |
| 1.5 METODOLOGI PENELITIAN | 2 |
| 1.6 SISTEMATIKA PENULISAN | 3 |
| BAB II TEORI PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR | 4 |
| 2.1 BELITAN STATOR GENERATOR | |
| 2.1.1 Umum | 4 |
| 2.1.2 Sistem Isolasi Belitan Stator Generator | 7 |
| 2.2 KERAPATAN FLUKS LISTRIK | 7 |
| 2.3 INTENSITAS MEDAN LISTRIK | 9 |
| 2.4 PELUAHAN PARSIAL | 11 |
| 2.4.1 Umum | 11 |
| 2.4.2 PD pada Belitan Stator Generator | 12 |
| BAB III PENGUKURAN AKTUAL PELUAHAN PARSIAL PADA GENERATOR | 17 |

| | |
|--|----|
| 3.1 INSTRUMEN PENGUKURAN AKTUAL PD | 17 |
| 3.1.1 Kapasitor Kopling | 17 |
| 3.1.2 <i>High Frequency Current Transformer</i> | 17 |
| 3.1.3 <i>PD Tech Power Engineering AG</i> | 18 |
| 3.2 RANGKAIAN PENGUKURAN AKTUAL PD | 21 |
| 3.3 PARAMETER KUANTITATIF HASIL PENGUKURAN AKTUAL PD | 22 |
| 3.4 INTERPRETASI HASIL PENGUKURAN AKTUAL PD | 22 |
| 3.4.1 Interpretasi Grafik Pola PD | 22 |
| 3.4.2 Interpretasi Distribusi Tinggi Pulsa | 25 |
| BAB IV STUDI KASUS PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR | 26 |
| 4.1 AREA DAN OBJEK STUDI | 26 |
| 4.2 ANALISIS GRAFIK KELUARAN PENGUKURAN PD | 28 |
| 4.3 ANALISIS DISTRIBUSI TINGGI PULSA | 30 |
| 4.4 ANALISIS PARAMETER KUANTITATIF | 31 |
| 4.4.1 <i>Apparent Charge</i> | 31 |
| 4.4.2 <i>Average Discharge Current</i> | 31 |
| 4.4.3 <i>Quadratic Rate</i> | 32 |
| 4.5 PREDIKSI USIA EFEKTIF BERDASARKAN AKTIFITAS PD PADA BELITAN STATOR GENERATOR GT 1.2 | 32 |
| BAB V KESIMPULAN | 39 |
| DAFTAR ACUAN | 40 |
| DAFTAR PUSTAKA | 42 |
| LAMPIRAN | 43 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Komponen rotor (a) dan stator (b) generator | 4 |
| Gambar 2.2 | penampang melintang stator generator | 5 |
| Gambar 2.3 | Rangkaian pengganti generator serempak 1 fasa | 5 |
| Gambar 2.4 | Fluks listrik dalam ruang yang memisahkan bola konsentris bermuatan | 8 |
| Gambar 2.5 | Kerapatan fluks listrik di titik P yang dihasilkan oleh muatan Q | 8 |
| Gambar 2.6 | Q_1 dan Q_2 memiliki polaritas sama, sehingga \mathbf{F}_2 searah dengan \mathbf{R}_{12} | 9 |
| Gambar 2.7 | Bahan isolasi dengan kekosongan udara dalam medan elektrostatik | 12 |
| Gambar 2.8 | Representasi skematik dari mekanisme penurunan kualitas isolasi | 13 |
| Gambar 2.9 | Representasi hubungan antara PD dengan kerusakan sistem isolasi | 14 |
| Gambar 2.10 | Gambaran PD pada sistem isolasi | 14 |
| Gambar 2.11 | PD pada permukaan isolasi (a) menyebabkan pohon elektris (b) | 16 |
| Gambar 3.1 | Kapasitor kopling | 17 |
| Gambar 3.2 | CT17 pada generator GT 1.2 | 18 |
| Gambar 3.3 | Instalasi CT17 pada generator GT 1.2 | 18 |
| Gambar 3.4 | Rangkaian dalam CTB1 | 19 |
| Gambar 3.5 | Terminal koneksi CTB1 | 19 |
| Gambar 3.6 | <i>PD Tech Power Engineering AG</i> | 20 |
| Gambar 3.7 | Rangkaian pengukuran aktual PD | 21 |
| Gambar 3.8 | Pola keluaran PD pada bagian celah stator | 23 |
| Gambar 3.9 | Gambaran <i>void</i> pada bagian celah stator | 23 |
| Gambar 3.10 | Pola keluaran PD pada bagian belitan akhir stator | 24 |
| Gambar 3.11 | Gambaran <i>void</i> pada bagian belitan akhir stator | 24 |
| Gambar 3.12 | Pola keluaran PD pada peluahan internal | 24 |

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 3.13 | Gambaran <i>void</i> pada peluahan internal | 25 |
| Gambar 3.14 | Interpretasi grafik distribusi tinggi pulsa | 25 |
| Gambar 4.1 | Diagram satu baris UBP Priok | 26 |
| Gambar 4.2 | <i>Noise</i> dari sistem eksitasi pada pengukuran PD generator GT 1.2 | 28 |
| Gambar 4.3 | Pola simetris hasil pengukuran PD generator GT 1.2 | 29 |
| Gambar 4.4 | Gambaran <i>void</i> pada slot stator GT 1.2 | 29 |
| Gambar 4.5 | Grafik distribusi tinggi pulsa hasil pengukuran PD generator GT 1.2 | 30 |
| Gambar 4.6 | Suhu belitan stator generator GT 1.2 selama periode pengukuran PD | 33 |
| Gambar 4.7 | Hasil pengukuran PD generator GT 2.3 fasa R | 33 |
| Gambar 4.8 | Grafik regresi linier fasa R | 35 |
| Gambar 4.9 | Grafik regresi linier fasa S | 37 |
| Gambar 4.10 | Grafik regresi linier fasa T | 38 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|------------------|--|----|
| Tabel 2.1 | Tabel standar kelas temperatur motor dan generator | 7 |
| Tabel 2.2 | Nilai permitivitas relatif | 11 |
| Tabel 2.3 | Kekuatan dielektrik material | 11 |
| Tabel 2.4 | Nilai batas maksimum PD pada peralatan tegangan tinggi | 15 |
| Tabel 3.1 | Data teknis CT17 | 18 |
| Tabel 3.2 | Data teknis <i>PD Tech Power Engineering AG</i> | 20 |
| Tabel 4.1 | Data instalasi generator GT 1.2 | 27 |
| Tabel 4.2 | Data aktual pengukuran PD generator GT 1.2 | 27 |
| Tabel 4.3 | Perhitungan regresi linier fasa R | 34 |
| Tabel 4.4 | Perhitungan regresi linier fasa S | 36 |
| Tabel 4.5 | Perhitungan regresi linier fasa T | 37 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|-------------------|---|----|
| Lampiran 1 | Data Hasil Pengukuran PD Generator GT 2.3 PLTGU Priok | 43 |
| Lampiran 2 | Data Hasil Pengukuran PD Generator GT 1.2 PLTGU Priok | 44 |
| Lampiran 3 | Diagram Satu Baris PLTGU Priok | 59 |
| Lampiran 4 | Foto Pengukuran PD Generator GT 1.2 PLTGU Priok | 60 |

DAFTAR SINGKATAN

| | |
|-------|--|
| CC | <i>Coupling Capacitor</i> |
| CT | <i>Current Transformer</i> |
| CTB1 | <i>Circuit Terminal Box 1</i> |
| GT | <i>Gas Turbine</i> |
| HFCT | <i>High Frequency Current Transformer</i> |
| HSD | <i>High Speed Diesel</i> |
| IEC | <i>International Electro technical Commission</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| NEMA | <i>National Electrical Manufacturers Association</i> |
| PD | <i>Partial Discharge</i> |
| PLTD | Pembangkit Listrik Tenaga Diesel |
| PLTG | Pembangkit Listrik Tenaga Gas |
| PLTGU | Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap |
| PLTU | Pembangkit Listrik Tenaga Uap |
| UBP | Unit Bisnis Pembangkitan |

DAFTAR SIMBOL

| | |
|----------------------------------|--|
| D | = Kerapatan Fluks Listrik |
| r | = Jarak Radial |
| Q | = Muatan Listrik |
| π | = Notasi Phi |
| \mathbf{a}_r | = Vektor Satuan Jarak |
| ψ | = Fluks Listrik |
| F | = Gaya |
| ϵ_0 | = Permittivitas Ruang Hampa |
| E | = Intensitas Medan Listrik |
| ϵ_r | = Permittivitas Relatif |
| I_t | = <i>Average Discharge Current</i> |
| Q_n | = <i>Apparent Charge</i> |
| t_0 | = <i>Starting Time</i> |
| t_n | = <i>Completion Time</i> |
| T | = <i>Time Interval</i> |
| B_r | = Medan Magnet Rotor |
| μ | = Permeabilitas pengantar pada rotor |
| N_r | = Jumlah lilitan kawat pada rotor |
| I_r | = Arus searah yang mengalir pada rotor |
| L | = Panjang penampang pengantar pada rotor |
| Φ | = Fluks magnetik |
| A | = Luas permukaan bidang penampang kumparan stator |
| θ | = Sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator |
| e_{ind} | = Tegangan induksi yang dihasilkan pada stator |
| N_s | = Jumlah lilitan kawat stator |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Tujuan utama dari pembangkit listrik adalah menghasilkan energi listrik dengan tingkat ketersediaan yang sesuai dan dengan biaya operasi serta perawatan yang seminimal mungkin. Perawatan yang dilakukan dengan berbasis waktu dan kondisi diterapkan pada tiap komponen pembangkit untuk mencapai tujuan tersebut.

Generator sebagai salah satu komponen utama pembangkit, harus tetap berada pada kondisi terbaik. Dalam operasinya, belitan stator generator mengalami tekanan yang bersifat elektrik, mekanik, dan termal. Dalam periode operasi, faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan penurunan kualitas isolasi stator generator [1]. Kerusakan yang terjadi pada isolasi belitan stator merupakan hal yang paling dominan sebagai salah satu penyebab kerusakan pada generator [2]. Akses secara aktual, dapat digunakan untuk mencegah kesalahan fatal, serta mencegah timbulnya biaya perbaikan kerusakan yang besar pada belitan stator generator.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Banyak ketidakhomogenitas terjadi pada tahapan proses manufaktur dari belitan stator generator. *Void* yang terjadi menyebabkan aktifitas peluahan parsial (*Partial Discharge*; PD) pada belitan stator generator [3]. Kerusakan yang diakibatkan oleh PD biasanya disertai dan dipercepat oleh tekanan termal, mekanikal, dan tekanan lainnya yang bekerja pada belitan stator generator [4]. Kenaikan aktifitas PD yang terjadi dapat menyebabkan kegagalan operasi generator. Analisis hasil deteksi dan pengukuran aktifitas PD secara aktual pada generator dalam sistem pembangkit dapat menjadi bahan pertimbangan utama dalam proses pemeliharaan belitan stator generator. Dengan begitu, dapat diperhitungkan pula prediksi usia efektif generator.

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan permasalahan tersebut, pada skripsi ini penulis melakukan pengukuran secara aktual aktifitas PD pada generator GT 1.2 PLTGU Priok serta melakukan analisis data hasil pengukuran. Mengacu pada hasil pengukuran, akan dibuat prediksi usia efektif generator GT 1.2.

1.4 BATASAN MASALAH

Pada skripsi hanya dibahas hal-hal berikut:

1. Studi kasus PD generator GT 1.2 PLTGU Priok
2. Pengukuran dilakukan menggunakan alat diagnostik *PD tech Power Engineering AG* dan perangkat lunak *MICAMAXXTM Plus*
3. Analisis pola keluaran pengukuran PD dilakukan berdasarkan data empiris dari *PD tech Power Engineering AG*
4. Analisis distribusi tinggi pulsa dilakukan berdasarkan distribusi grafik pulsa positif dan pulsa negatif
5. Analisis data kuantitatif terdiri dari nilai *apparent charge*, *average discharge current*, dan *quadratic rate*
6. Lokasi terjadinya PD hanya ditetapkan berdasarkan fasa
7. Prediksi usia efektif menggunakan metode regresi linier berdasarkan acuan data pengukuran PD GT 2.3 PLTGU priok, dengan asumsi tidak ada perubahan yang dilakukan pada belitan stator generator.
8. Pengukuran PD dilakukan secara aktual sesuai dengan kondisi di lapangan tanpa dilakukan pengaturan parameter generator.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan dimulai dengan studi literatur, observasi lapangan dan pengukuran PD secara aktual. Pengukuran PD secara menggunakan alat diagnostik *PD tech Power Engineering AG*, yang hasilnya diinterpretasikan ke komputer dengan perangkat lunak *MICAMAXXTM Plus*. Hasil pengukuran dalam rentang waktu tertentu akan dianalisis dan dilakukan perhitungan prediksi usia efektif generator dengan menggunakan metode regresi linier.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Agar mempermudah pembahasan, penulisan dibagi dalam beberapa bab. Bab satu menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan, bab dua membahas tentang dasar teori PD pada belitan stator generator, bab tiga membahas pengukuran aktual PD, instrumen pengukuran PD secara aktual, rangkaian pengukuran PD, dan parameter pengukuran PD, bab empat membahas analisis grafik keluaran pengukuran PD, analisis distribusi tinggi pulsa, analisis parameter kuantitatif, serta analisis prediksi usia efektif generator, sedangkan bab lima merupakan penutup yang berisi kesimpulan.

BAB II

TEORI PELUAHAN PARSIAL PADA BELITAN STATOR GENERATOR

2.1 BELITAN STATOR GENERATOR

2.1.1 Umum

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



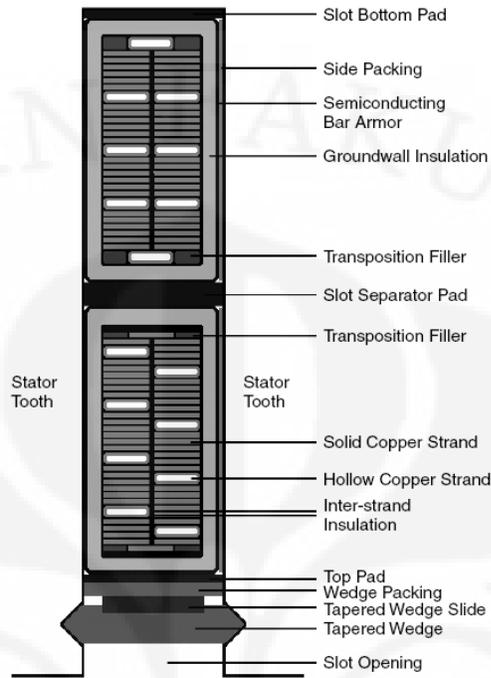
(a)

(b)

Gambar 2.1 Komponen rotor (a) dan stator (b) generator

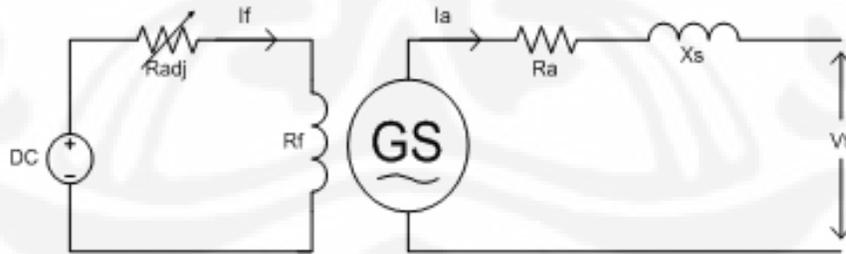
Rotor merupakan bagian yang berputar yang menghasilkan medan magnet. Sedangkan stator merupakan bagian yang diam yang menerima induksi elektromagnetis dari rotor, menghasilkan tegangan, dan terhubung dengan sistem transmisi pada jaringan tenaga listrik. Dengan demikian energi mekanik akan diberikan pada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

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



Gambar 2.2 Penampang melintang stator generator [5]

Generator serempak bekerja berdasarkan prinsip induksi elektro magnetis yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dengan demikian energi mekanik akan diberikan pada rotor sehingga dapat menghasilkan energi listrik pada stator. Berikut merupakan rangkaian pengganti sederhana dari generator serempak 1 fasa.



Gambar 2.3. Rangkaian pengganti generator serempak 1 fasa

Pada gambar 2.3, rotor pada generator serempak akan diberikan catu tegangan arus searah. Karena rangkaian rotor generator serempak merupakan suatu rangkaian tertutup, maka pada rotor akan mengalir arus searah yang akan melewati kumparan R_f . Berdasarkan pada Hukum Oersted, ketika arus listrik mengalir pada suatu kumparan, akan timbul medan magnet. Dengan demikian

pada kumparan kawat rotor akan timbul medan magnet yang besarnya sesuai dengan persamaan:

$$B_r = \frac{\mu N_r I_r}{l} \quad (2.1)$$

Karena kumparan kawat rotor merupakan kumparan yang menghasilkan medan magnet, maka kumparan kawat rotor pada generator serempak disebut sebagai kumparan medan.

Garis gaya medan magnet yang dihasilkan di rotor akan memotong permukaan kumparan yang ada pada stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks magnetis yang melingkupi kumparan kawat stator, berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\Phi = B_r A \cos \theta \quad (2.2)$$

selanjutnya kumparan kawat stator akan disebut sebagai kumparan jangkar.

Karena pada rotor mendapatkan catu tegangan arus searah, maka medan magnet yang dihasilkan adalah konstan pada fungsi waktu. Dengan demikian untuk setiap periode waktunya, nilai fluks magnetis yang timbul pada stator akan juga bernilai konstan. Namun, ketika sistem generator serempak mendapatkan energi mekanik dari luar yang disebut sebagai penggerak utama, akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan jangkar.

Hal ini akan menyebabkan perubahan nilai fluks magnetik di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi, di mana:

$$e_{ind} = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.3)$$

Rotor pada generator serempak tidak bisa menerima catu tegangan arus bolak balik. Hal ini karena pada tegangan arus bolak balik, medan magnet yang dihasilkan di rotor tidak akan bernilai konstan pada fungsi waktu. Sehingga akan ada perubahan fluks pada setiap waktunya. Dengan demikian tidak diperlukan adanya energi mekanik untuk menghasilkan energi listrik.

2.1.2 Sistem Isolasi Belitan Stator Generator

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

Tabel 2.1 Tabel standar kelas temperatur motor dan generator [6]

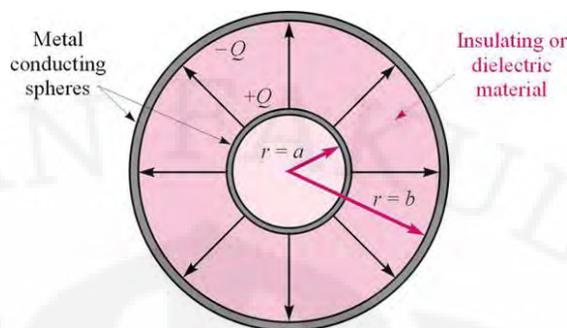
| Temperature Tolerance Class | Maximum Operation Temperature Allowed | |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----|
| | °C | °F |
| A | 105 | 221 |
| B | 130 | 266 |
| F | 155 | 311 |
| H | 180 | 356 |

Secara umum, motor dan generator sebaiknya tidak dioperasikan melebihi nilai maksimum temperatur yang diizinkan. Setiap kenaikan 10°C dari nilai batas yang diizinkan dapat menurunkan usia efektif generator sampai setengahnya dari usia normal. Kelas temperatur B paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 60 Hz, sedangkan kelas temperatur F paling sering ditemui pada motor dan generator yang bekerja pada frekuensi 50 Hz [6].

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

2.2 KERAPATAN FLUKS LISTRIK

Percobaan Faraday menyatakan bahwa kerapatan fluks listrik adalah sebuah medan vektor yang arahnya sama dengan arah fluks yang melewati titik tertentu dan magnitudonya adalah jumlah garis fluks yang menembus sebuah permukaan normal terhadap garis fluks, dibagi dengan luas permukaannya [8].



Gambar 2.4 Fluks listrik di dalam ruang yang memisahkan bola konsentris bermuatan

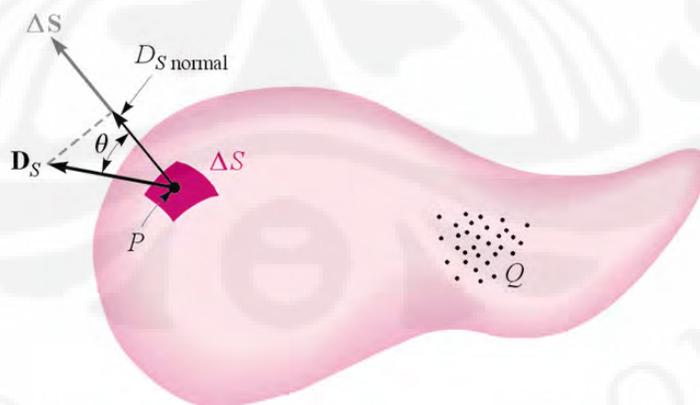
Dari gambar 2.4, dapat diketahui bahwa kerapatan fluks listrik memiliki arah radial dan memiliki nilai sebesar

$$\mathbf{D}|_{r=a} = \frac{Q}{4\pi a^2} \mathbf{a}_r \quad (2.4)$$

$$\mathbf{D}|_{r=b} = \frac{Q}{4\pi b^2} \mathbf{a}_r \quad (2.5)$$

Persamaan 2.4 dan 2.5 memiliki perbedaan yang disesuaikan dengan nilai jari-jari bola dimana bola dalam berjari-jari a , sedangkan bola luar berjari-jari b .

Hukum Gauss menyatakan bahwa jumlah fluks listrik yang menembus keluar dari sembarang permukaan tertutup sama dengan muatan total yang terkandung di dalam atau dilingkupi oleh permukaan tersebut. Berikut adalah gambaran suatu bentuk distribusi muatan yang dilingkupi oleh suatu permukaan tertutup.



Gambar 2.5 Kerapatan fluks listrik di titik P yang dihasilkan oleh muatan Q

Fluks total yang menembus seluruh permukaan tertutup dapat dihitung dengan menjumlahkan fluks-fluks dari semua elemen permukaan parsial ΔS , atau

dengan mengambil limit diferensial untuk fluks-fluks parsial ini dan kemudian mengintegrasikannya,

$$\psi = \int d\psi = \oint_{\text{permukaan tertutup}} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.6)$$

Sedangkan, besarnya nilai dari kerapatan fluks listrik secara umum dinyatakan dengan persamaan

$$\mathbf{D} = \frac{Q}{4\pi r^2} \mathbf{a}_r \quad (2.7)$$

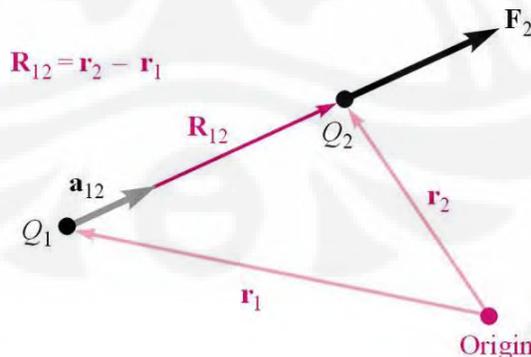
Dari persamaan 2.7, dapat disimpulkan bahwa arah dan magnitudo dari kerapatan fluks listrik tidak dipengaruhi oleh bahan dielektrikum yang menyekat kedua bola pada percobaan Faraday.

2.3 INTENSITAS MEDAN LISTRIK

Coulomb menyatakan bahwa gaya yang terdapat antara dua buah objek yang sangat kecil, berada di dalam ruang hampa dan saling dipisahkan oleh jarak yang relatif besar dibandingkan ukurannya sebanding dengan besarnya muatan pada masing-masing objek dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. Besarnya gaya dapat dihitung menggunakan persamaan

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_{12}^2} \mathbf{a}_{12} \quad (2.8)$$

Nilai vektor gaya ditentukan dengan memperhitungkan polaritas dari kedua muatan seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 \$Q_1\$ dan \$Q_2\$ memiliki polaritas sama, sehingga \$\mathbf{F}_2\$ searah dengan \$\mathbf{R}_{12}\$

Persamaan 2.8 dapat juga dituliskan sebagai gaya yang dikerahkan pada setiap muatan listrik sebesar satu satuan, sehingga didapatkan persamaan

$$\frac{\mathbf{F}_2}{Q_2} = \frac{Q_1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_{12}^2} \mathbf{a}_{12} \quad (2.9)$$

Dengan demikian, intensitas medan listrik menjabarkan gaya yang dialami oleh sebuah muatan uji bernilai satu satuan muatan positif. Intensitas medan listrik diukur dalam besaran newton per coulomb sesuai persamaan

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_t}{Q_t} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{E} = \frac{Q_1}{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot R_{12}^2} \mathbf{a}_{12} \quad (2.11)$$

Berbeda dengan kerapatan fluks listrik, besarnya intensitas medan listrik dipengaruhi oleh medium pemisah antar muatan. Dengan membandingkan persamaan keduanya, didapatkan hubungan bahwa

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (2.12)$$

Hubungan pada persamaan 2.12 tersebut berlaku pada ruang hampa, dimana nilai dari ϵ_0 adalah

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ F/m} \quad (2.13)$$

Sedangkan, nilai permitivitas dari tiap material didefinisikan dengan persamaan

$$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \quad (2.14)$$

Nilai permitivitas relatif dari setiap medium dan material berbeda-beda. Perbandingan nilai permitivitas tiap medium dapat dilihat dari tabel 2.2.

Tabel 2.2 Nilai permitivitas relatif [9]

| Medium | Relative Permittivity (ϵ_r) |
|--------------------------------------|--|
| Vacuum | 1 |
| Air | 1.006 |
| Styrofoam | 1.03 |
| Polystyrene | 2.7 |
| Plexiglass | 3.4 |
| Amber | 3 |
| Rubber | 3 |
| Quartz | 5 |
| Formica | 6 |
| Ammonia (liquid) | 22 |
| Glycerine | 50 |
| Distilled water | 81 |
| Barium Titanate (BaTiO_3) | 1,200 |
| Barium Titanate stannate | 20,000 |

2.4 PELUAHAN PARSIAL

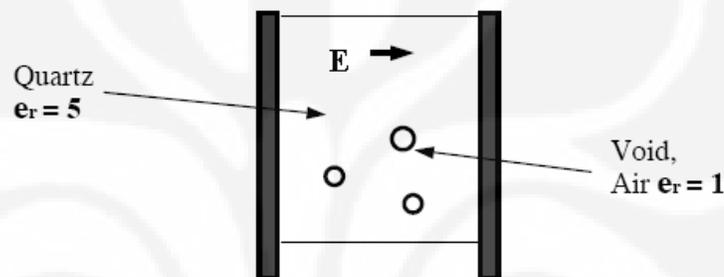
2.4.1 Umum

Sebagai ilustrasi, bahan isolasi kwarsa dengan ketebalan 1 milimeter digambarkan antara dua pelat konduksi. Bahan isolasi tersebut mengalami kerusakan bentuk dimana terdapat *void* yang berisi udara di dalamnya. Jika diberikan tegangan melintasi bahan isolasi sebesar 1 kV, maka akan terdapat intensitas medan listrik sebesar 1kV/mm yang melintasi bahan dielektrik. Akan tetapi, udara yang memiliki nilai permitivitas relatif sebesar 1/5 kali dibandingkan dengan kwarsa akan menyebabkan intensitas medan listrik yang berbeda terjadi pada *void* dalam bahan isolasi sebesar 5kV/mm. Kondisi ini menyebabkan distribusi muatan yang tidak seimbang pada bahan isolasi.

Tabel 2.3 Kekuatan dielektrik material [9]

| Material | Dielectric Strength (kV per mm) |
|----------------------------|---------------------------------|
| Air (atmospheric pressure) | 3 |
| Oil (Mineral) | 15 |
| Impregnated Paper | 15 |
| Polystyrene | 20 |
| Rubber (hard) | 21 |
| Bakelite | 25 |
| Glass (plate) | 30 |
| Paraffin | 30 |
| Quartz (fused) | 30 |
| Mica | 200 |

Dari tabel 2.3, terlihat bahwa kekuatan dielektrik dari kwarsa adalah 30 kV/mm, jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan udara yang hanya sebesar 3 kV/mm. Perbedaan ini menyebabkan ionisasi pada kekosongan udara sehingga mengalami peluahan muatan secara terus menerus, yang dapat menyebabkan kegagalan. Fenomena inilah yang disebut dengan peluahan parsial (*Partial Discharge; PD*). Dinyatakan juga dalam IEEE std 1434-2000, bahwa PD adalah peluahan elektris yang hanya menjembatani sebagian antara isolasi dengan konduktor.



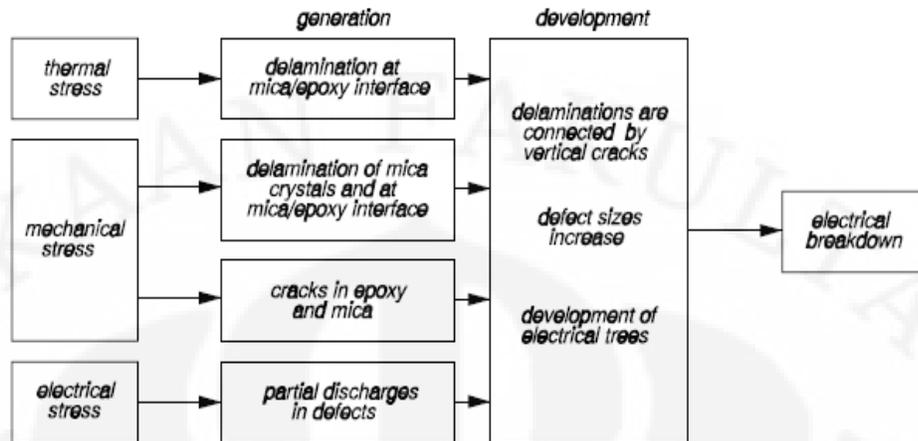
Gambar 2.7 Bahan isolasi dengan kekosongan udara dalam medan elektrostatis [9]

Void dapat muncul di dalam isolasi melalui proses-proses yang tidak sempurna [10], antara lain:

- Proses fabrikasi dimana *void* terbentuk karena adanya udara bocor saat proses *cross linking* dari *polyethylen*. Proses ini terjadi pada temperatur 200-220° C, yang untuk mencapainya digunakan uap panas dan tekanan 1.6-2 Mpa.
- Proses instalasi, seperti pada proses penyambungan kabel.
- Pada operasi kabel, seperti pada saat terjadi hubung singkat yang menghasilkan perubahan termis yang besar pada kabel. Jika tekanan yang dialami melebihi batas, ikatan isolasi polimer dapat lepas sehingga menghasilkan *void*.

2.4.2 PD pada Belitan Stator Generator

Secara umum, proses penurunan kualitas isolasi generator direpresentasikan oleh bagan berikut:

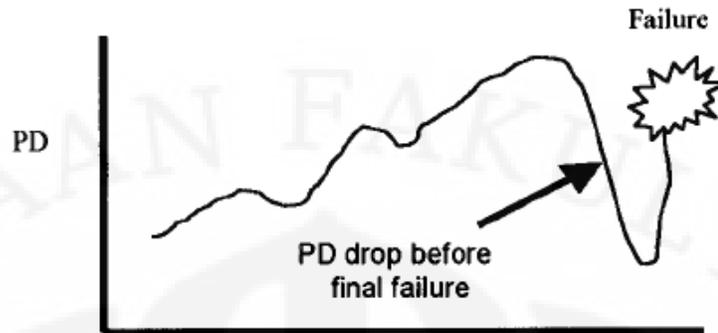


Gambar 2.8 Representasi skematik dari mekanisme penurunan kualitas isolasi

Tekanan bersifat mekanis diakui sebagai parameter yang memiliki pengaruh terbesar pada usia generator [11]. Hal ini terjadi akibat siklus termal mekanis selama proses operasi dan pembebanan generator. Vibrasi mekanis dapat menyebabkan perubahan nilai PD pada bagian celah stator dan mengubah pola hasil pengukuran PD.

Tekanan bersifat termal menyebabkan dekomposisi molekuler dan oksidasi material organik [12]. Sebagai hasilnya, kekuatan rekat antara *epoxy* dengan mika berkurang. Walaupun tekanan bersifat termal hanya memberikan sedikit efek pada nilai tegangan jatuh, namun dapat mempercepat erosi sistem isolasi jika dikombinasikan dengan tekanan bersifat mekanis dan PD.

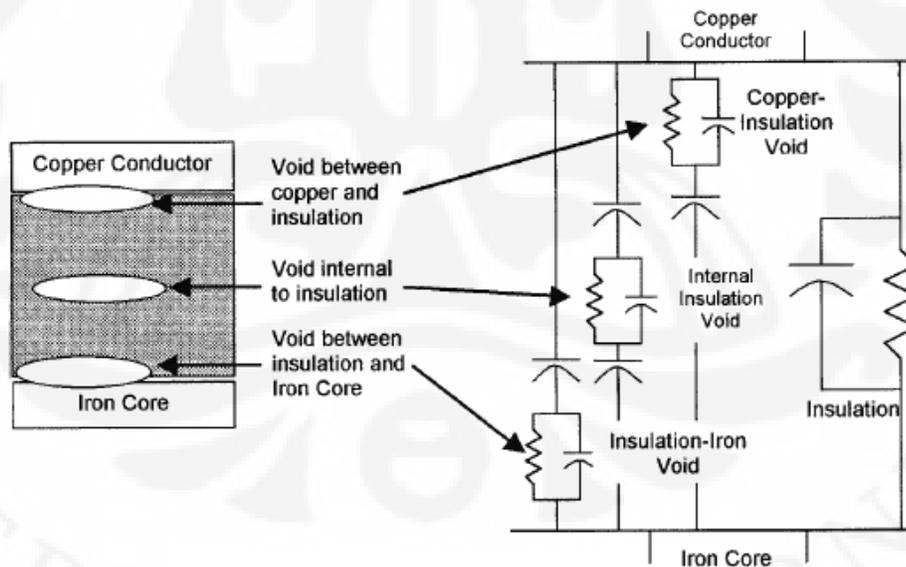
Tekanan bersifat elektrik menyebabkan PD pada kerusakan yang disebabkan oleh stres mekanis dan termal. PD dapat menimbulkan pohon elektrik pada permukaan dari sistem isolasi akibat intensitas medan yang tinggi. Hubungan antara PD dengan kerusakan sistem isolasi direpresentasikan dalam grafik berikut.



Gambar 2.9 Representasi hubungan antara PD dengan kerusakan sistem isolasi [13]

Secara grafik, hubungan antara aktifitas PD dengan kerusakan sistem isolasi bersifat linier sebelum mencapai titik kritis.

Gambaran sederhana dari sebuah sistem isolasi direpresentasikan oleh sebuah kapasitor dan resistor yang terhubung secara paralel. Konsep ini digunakan dalam pengukuran faktor daya dari sistem isolasi, yakni nilai cosinus dari sudut antara total arus bocor dengan arus bocor dari komponen resistif. Sedangkan kekosongan dalam bahan isolasi, hanya direpresentasikan dengan sebuah kapasitor.



Gambar 2.10 Gambaran PD pada sistem isolasi

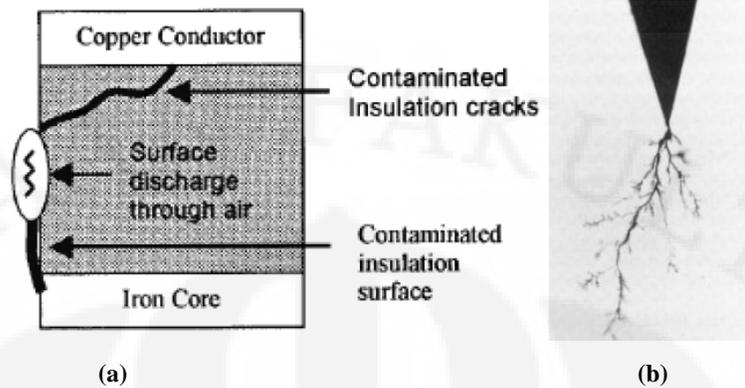
Berikut adalah nilai batas maksimum muatan PD yang terjadi pada peralatan tegangan tinggi.

Tabel 2.4 Nilai batas maksimum PD pada peralatan tegangan tinggi [14]

| | |
|--------------|---|
| GIS | 2-5 pC |
| XLPE cables | 5 pC at $1.5*U_{nom}$ |
| transformers | 300 pC at $1.3*U_{nom}$, 500 pC at $1.6*U_{nom}$ |
| generators | >1000 pC can be tolerated for over 25 years |

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

- Peluahan pada bagian celah stator atau *slot discharge*
Slot discharge terjadi jika terdapat kerusakan proteksi korona dan adanya ketidaksempurnaan proses injeksi resin di antara isolasi belitan dengan celah stator generator. Umumnya pada generator dengan tegangan di atas 6 kV terdapat *slot discharge* dengan nilai tertentu akibat adanya *void* kecil pada isolasi dan adanya kerusakan kecil pada proteksi korona. Kerusakan pada proteksi korona dapat diakibatkan oleh adanya vibrasi pada belitan stator, yang berakibat pada abrasi permukaan isolasi karena adanya gesekan dengan dinding celah.
- Peluahan internal atau *Internal Discharge*
Internal discharge terjadi jika terdapat void di dalam isolasi. *Void* ini timbul karena proses yang tidak sempurna pada proses manufaktur. Peluahan akan terjadi pada *void* tersebut dan secara perlahan-lahan menimbulkan pohon listrik yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan.
- Peluahan pada bagian permukaan atau *Surface Discharge*
Jika terdapat kontaminan pada permukaan isolasi seperti garam, debu, oli maka akan terjadi peningkatan aliran listrik pada permukaan isolasi. Jika terjadi *surface discharge* maka pada permukaan isolasi akan terjadi proses karbonisasi berbentuk warna hitam atau *hotspot* akibat panas yang ditimbulkan oleh peluahan, yang dalam periode tertentu dapat membentuk pohon listrik pada permukaan isolasi. Dalam jangka waktu tertentu, karbonisasi tersebut akan meluas dan membesar ke arah dalam sehingga terjadi *ground fault* pada stator.



Gambar 2.11 PD pada permukaan isolasi (a) menyebabkan pohon listrik (b)

- Peluahan pada bagian belitan akhir atau *endwinding discharge*
Peluahan ini terjadi secara langsung antar belitan dari fasa yang berbeda di daerah belitan akhir. Hal ini terjadi karena adanya kontaminasi debu atau oli yang bersifat konduktif pada permukaan isolasi di daerah tersebut.

BAB III

PENGUKURAN AKTUAL PELUAHAN PARSIAL PADA GENERATOR

3.1 INSTRUMEN PENGUKURAN AKTUAL PD

3.1.1 Kapasitor Kopling

Kapasitor digunakan sebagai divais kopel untuk melewatkan arus yang memiliki frekuensi tinggi dari titik deteksi sebagai masukan dari sistem pengukuran yang dilaksanakan.



Gambar 3.1 Kapasitor kopling

Untuk instalasi pengukuran aktual PD, dapat pula digunakan *surge capacitor* yang telah terpasang dalam sistem generator sebagai pengganti kapasitor kopling. Sistem PLTGU Priok memiliki *surge capacitor* dengan nilai 130 nF. Dengan begitu, tidak dilakukan instalasi kapasitor kopling sehingga lebih ekonomis. Besarnya nilai kapasitansi akan mempengaruhi sensitifitas sistem deteksi aktual PD [15].

3.1.2 High Frequency Current Transformer

HFCT digunakan untuk memonitor motor, generator, dan peralatan lainnya yang biasa terdeteksi aktifitas PD. CT memiliki *wide-band pulse response* yang dapat digunakan untuk mengukur pulsa PD yang bekerja pada frekuensi tinggi. Arus dengan frekuensi tinggi yang dilewatkan dideteksi oleh CT yang terletak pada terminal netral dari *surge capacitor*. Jenis HFCT yang digunakan

adalah CT17, yang dapat bekerja hingga frekuensi 20 MHz. Berikut ini adalah data teknis dari CT17 dan instalasinya pada generator GT 1.2 PLTGU Priok.

Tabel 3.1 Data teknis CT17

| General: | | Voltage Tests: | |
|--------------------------|----------------|-------------------------|------------------------|
| <i>Saturation:</i> | >25A @ 50/60Hz | <i>Connection</i> | Coaxial BNC |
| <i>Diameter:</i> | 17mm | <i>Tolerance:</i> | +/- 10% |
| <i>Dimension (LxBxW)</i> | 64 x 58 x 34mm | <i>Max voltage:</i> | Depends on application |
| <i>Protection</i> | IP65 | <i>Operation Temp.:</i> | -20°C to +85°C |



Gambar 3.2 CT17 pada generator GT 1.2

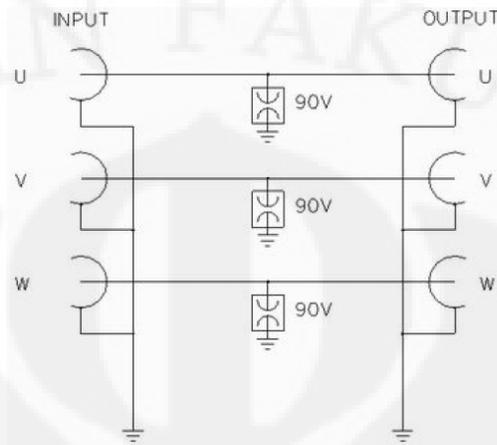


Gambar 3.3 Instalasi CT17 pada generator GT 1.2

3.1.3 PD Tech Power Engineering AG

Setelah pulsa arus yang bekerja pada frekuensi tinggi diteruskan oleh *surge capacitor* dan dideteksi oleh CT, maka akan masuk ke dalam terminal CTB1. Internal *surge arrester* 90 V pada CTB1 akan melindungi instrumen dan

operator dari tegangan berlebih. Rangkaian dalam dari CTB1 digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.4 Rangkaian dalam CTB1



Gambar 3.5 Terminal koneksi CTB1

CTB1 dihubungkan ke alat diagnostik *PD Tech Power Engineering AG* dengan menggunakan kabel koaksial. Alat ini yang mengakuisisi aktifitas PD yang ditangkap oleh sensor selama proses pengukuran. Keluaran hasil pengukuran yang dilakukan adalah berupa visualisasi dan data-data kuantitatif. Berikut ini adalah tabel data teknis dari *PD Tech Power Engineering AG*.

Tabel 3.2 Data teknis PD Tech Power Engineering AG

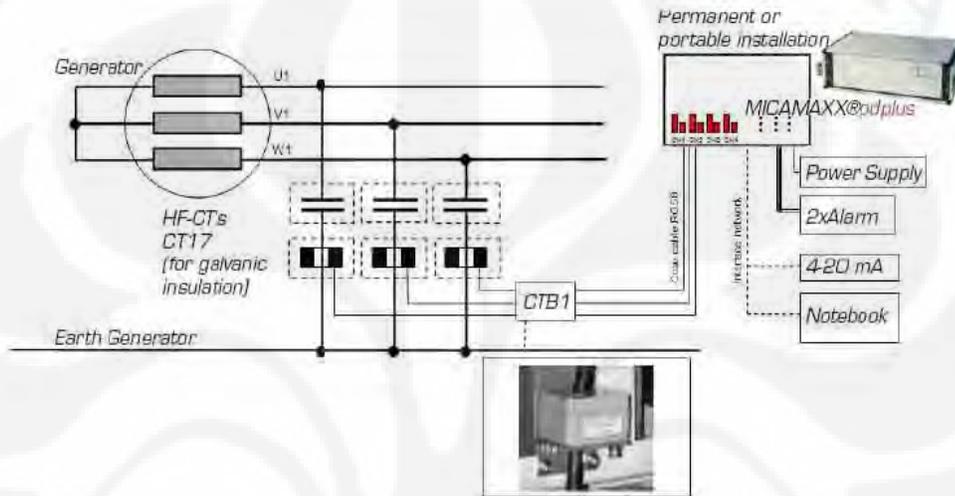
| | |
|---------------------------------------|--|
| General: | |
| Mains Supply: | Universal 90 to 240VAC 50/60Hz |
| Enclosure: | Smart Carrying Case: 420 x 210 x 400mm |
| Weight: | 11kg |
| Temp. Range: | High Industrial Temp. Range 0-70°C |
| Acquisition Unit: | |
| Signal Inputs: | -4 Partial Discharge Signal Inputs with Voltage Reference, 3 channels: wideband, programmable filtering, 1 channel: low frequency, wideband according to IEC 60270 external Voltage Reference Input (TTL compatible) |
| Sensor Compatibility | Compatible with most known Partial Discharge Sensors Coupling Capacitors as: - PD Tech 1nF (CC7 to CC30) - IRIS/ADWEL 80pF - ABB Pamos 9nF RF CT's as: - CT17 (Surge Capacitor Modification) - HF-CT85 (Euro Mould compatible) - Rogowski Coils |
| Partial Discharge Acquisition: | |
| Input Sensitivity: | 2 pC, depends on Sensor / Machine / Noise Spectrum |
| Input Impedance: | 2kOhm |
| Input Connectors: | Standard BNC female |
| Frequency Ranges: | 3xwide-band input: 8 Frequency Ranges, each channel individually programmable: - 0.3 to 5.5 MHz (std) - 2.3 to 7.9 MHz - 0.5 to 5.8 MHz - 2.9 to 8.5 MHz - 1 to 6.4 MHz - 3.5 to 9.1 MHz - 1.5 to 7 MHz - 4 to 9.7 MHz 1xwide-band input according to IEC60270: 100 to 600 kHz, designed for off-line tests |
| Signal Amplification: | 8 – channel independent Amplifications Steps from 1 to 200 |
| Voltage Reference: | 3 – channel independent inputs: - Internal 0-30Vrms (directly from PD Signal input) - external 0-30Vrms (TTL compatible) - Line (from Power Supply) |
| Partial Discharge Results: | |
| Visualisation: | High resolution Phase Resolved Partial Discharge Patterns 8x8x16Bit, map and 3-D Display |
| Embedded Calculations: | - Counts & Repetition Rate - Average Discharge Current (IEC270) - Quadratic Rate (IEC270) - Apparent Charge |



Gambar 3.6 PD Tech Power Engineering AG

3.2 RANGKAIAN PENGUKURAN AKTUAL PD

Pengukuran aktual PD dengan menggunakan alat diagnostik *PD Tech Power Engineering AG* dilakukan dengan menggunakan kerangka acuan IEC 60270 dan IEEE Std 1434-2000. Secara umum, rangkaian pengukuran yang dilakukan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.7 Rangkaian pengukuran aktual PD

Setiap generator GT pada sistem PLTGU Priok telah dilengkapi dengan *surge capacitor* sebesar 130 nF sehingga tidak perlu dilakukan instalasi CC sehingga lebih ekonomis. Nilai *surge capacitor* mempengaruhi nilai frekuensi yang dipotong oleh rangkaian filter deteksi PD. Frekuensi batas filter dihitung dengan persamaan

$$f = \frac{1}{2\pi.R.C} \quad (3.1)$$

Dari hasil perhitungan menggunakan persamaan 3.1, didapatkan bahwa nilai frekuensi di bawah 24.5 kHz tidak akan terdeteksi oleh sensor PD.

Hasil pengukuran aktual PD diinterpretasikan ke computer dengan menggunakan perangkat lunak *MICAMAXXTM Plus*. Data-data yang dihasilkan adalah grafik keluaran pengukuran PD, grafik distribusi tinggi pulsa, dan parameter-parameter kuantitatif PD.

3.3 PARAMETER KUANTITATIF HASIL PENGUKURAN AKTUAL PD

Nilai-nilai parameter kuantitatif dihasilkan dari alat diagnostik *PD Tech Power Engineering AG*. Parameter kuantitatif yang akan dianalisis adalah:

- *Apparent Charge*

Nilai *apparent charge* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kumulatif peluahan PD dibagi dengan jumlah peluahan yang terjadi selama proses pengukuran. Nilai kumulatif ini digambarkan dalam satuan coulomb.

- *Average Discharge Current*

Nilai *average discharge current* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kumulatif muatan yang bocor selama PD dibagi dengan waktu pengukuran. Nilai ini digambarkan dengan satuan coulomb per detik atau ampere.

$$I_t = \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{t_n - t_0} = \sum_{j=1}^n \frac{Q_j}{t_n - t_0} \quad (3.2)$$

- *Quadratic Rate*

Nilai *quadratic rate* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kuadrat kumulatif muatan yang bocor selama PD dibagi dengan waktu pengukuran. Nilai ini digambarkan dengan satuan coulomb² per detik.

$$D = \left(\frac{1}{T}\right) [Q_1^2 + Q_2^2 + \dots + Q_m^2] \quad (3.3)$$

3.4 INTERPRETASI HASIL PENGUKURAN AKTUAL PD

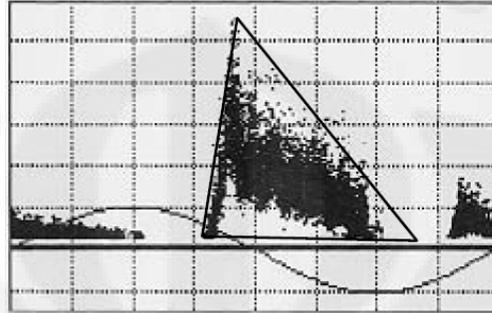
3.4.1 Interpretasi Grafik Pola PD

Interpretasi grafik pola PD dilakukan berdasarkan data empiris dari *PD Tech Power Engineering AG*. Interpretasi grafik pola PD menghasilkan jenis PD yang terjadi pada belitan stator generator [16].

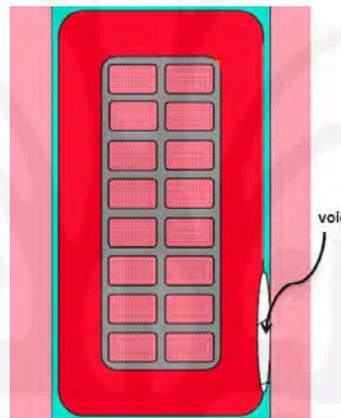
- Peluahan pada bagian celah stator atau *slot discharge*

Kerusakan paling berbahaya terjadi pada bagian celah stator generator. Hal ini biasanya disebabkan oleh vibrasi yang dapat merusak isolasi celah stator. Pola PD yang dihasilkan berbentuk asimetris dengan nilai

magnitudo pada siklus negatif lebih besar dari siklus positif. Grafik berbentuk segitiga dengan nilai puncak yang berada pada sudut fasa 0° siklus negatif dengan amplitudo sekitar 10 nC seperti pada gambar berikut.

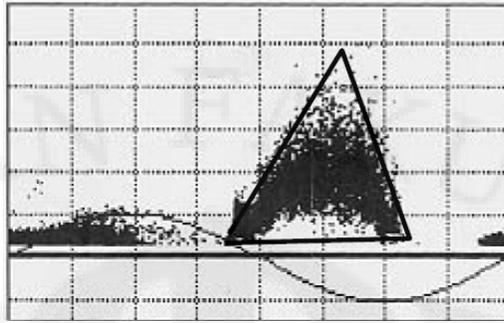


Gambar 3.8 Pola Keluaran PD pada bagian celah stator

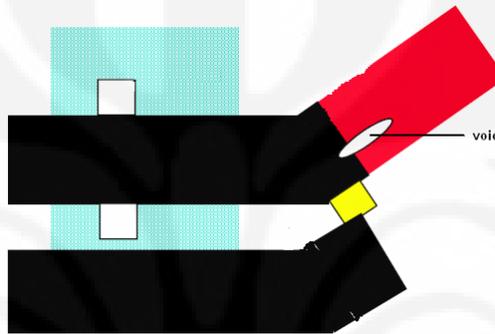


Gambar 3.9 Gambaran *void* pada bagian celah stator

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



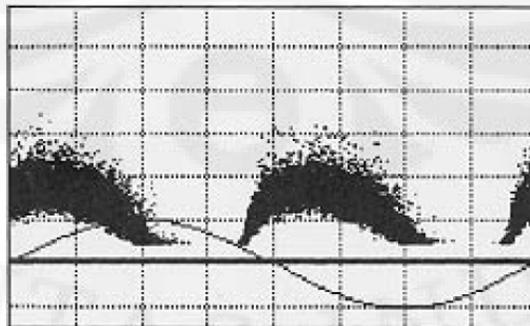
Gambar 3.10 Pola keluaran PD pada bagian belitan akhir stator



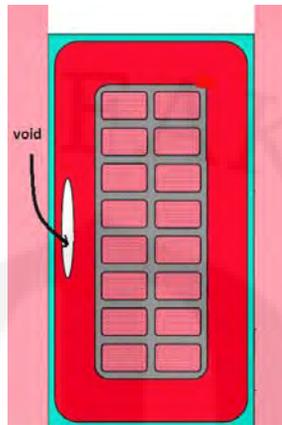
Gambar 3.11 Gambaran *void* pada bagian belitan akhir stator

- Peluahan internal

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



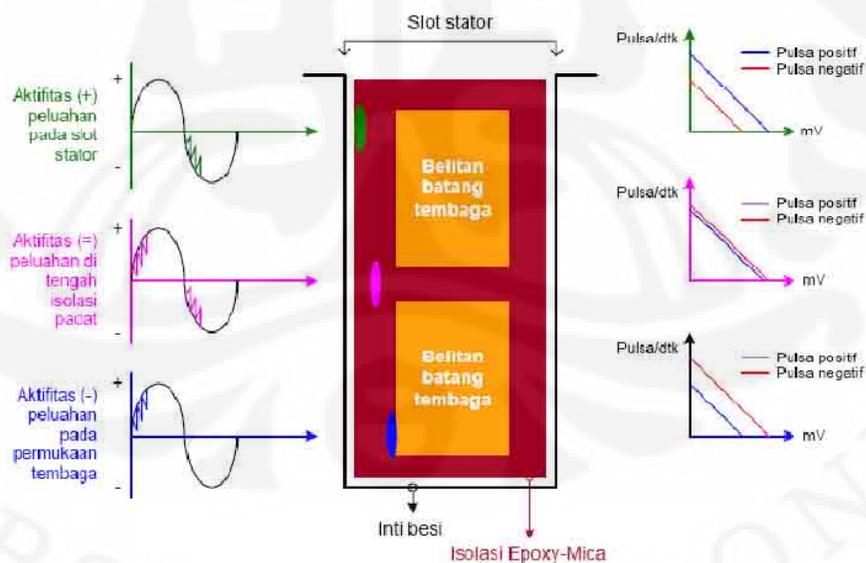
Gambar 3.12 Pola keluaran PD pada peluahan internal



Gambar 3.13 Gambaran void pada peluahan internal

3.4.2 Interpretasi Distribusi Tinggi Pulsa

Peningkatan grafik pulsa positif dalam periode pengukuran menggambarkan peningkatan aktifitas PD pada bagian celah stator atau disebut dengan *slot discharge*. Peningkatan grafik pulsa negatif dalam periode pengukuran menggambarkan aktifitas PD pada bagian inti tembaga dari stator generator. Sedangkan, keseimbangan yang terjadi antara grafik pulsa positif dan pulsa negatif menggambarkan PD dengan jenis peluahan internal [3].



Gambar 3.14 Interpretasi grafik distribusi tinggi pulsa

Generator GT pada setiap blok memiliki jenis dan spesifikasi yang sama. Usia efektif generator GT 1.2 diprediksi berdasarkan aktifitas PD yang terjadi, dengan menggunakan hasil pengukuran PD pada generator GT 2.3 sebagai data pembandingan. Berikut ini adalah tabel data instalasi generator GT 1.2.

Tabel 4.1 Data instalasi generator GT 1.2

| Generator GT 1.2 | |
|-------------------|-------------|
| Manufaktur | ABB |
| Type | 13 E |
| Tahun Pembuatan | 1993 |
| Kecepatan Sinkron | 3000 rpm |
| Frekuensi | 50 Hz |
| Tegangan stator | 15,8 kV |
| Daya terpasang | 130 MW |
| Sistem isolasi | Micadur |
| Kelas | F |
| Sistem pendingin | Udara |
| Eksitasi | Sikat arang |

Pengukuran PD pada generator GT 1.2 dilakukan pada tanggal 14 November hingga 6 Desember 2007. Pengukuran PD secara aktual dilaksanakan tanpa ada pengaturan pembebanan generator. Pengukuran dilakukan pada kisaran pukul 09.30 sampai 11.30 agar mendapatkan pembebanan yang relatif sama. Berikut ini adalah data aktual generator GT 1.2 yang diambil pada saat pengukuran aktifitas PD.

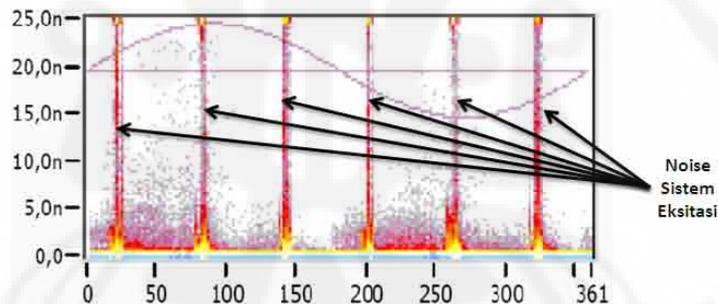
Tabel 4.2 Data aktual pengukuran PD generator GT 1.2

| No. | Parameter | Satuan |
|-----|---------------------|--------------------|
| 1 | Kecepatan Generator | rpm |
| 2 | $\cos \phi$ | - |
| 3 | Frekuensi | Hz |
| 4 | Tegangan Generator | KV |
| 5 | Arus Generator | A |
| 6 | Daya Aktif | MW |
| 7 | Daya Reaktif | MVAR |
| 8 | Temperatur Ambien | $^{\circ}\text{c}$ |
| 9 | Kelembaban | % |
| 10 | Suhu Stator slot 2 | % |
| 11 | Suhu Stator slot 10 | % |
| 12 | Suhu Stator slot 18 | % |
| 13 | Suhu Stator slot 26 | % |
| 14 | Suhu Stator slot 34 | % |
| 15 | Suhu Stator slot 42 | % |

4.2 ANALISIS GRAFIK KELUARAN PENGUKURAN PD

Dari pengukuran aktifitas PD pada stator generator GT 1.2 dihasilkan tiga grafik pola PD, yang masing-masing menggambarkan aktifitas PD pada tiap fasa. Grafik keluaran yang terbentuk terdiri dari sumbu vertikal dan sumbu horizontal. Sumbu vertikal menggambarkan nilai muatan yang meluahkan akibat proses PD yang terjadi pada belitan stator generator, dinyatakan dengan satuan 10^{-9} Coulomb. Sedangkan untuk sumbu horizontal, menggambarkan sudut fasa yang berkisar antara 0° hingga 360° . Pengukuran PD pada generator GT 1.2 dilakukan dengan *gain* 5 sehingga akan tampak nilai maksimum untuk muatan yang meluahkan sebesar 25 nC pada grafik pola PD.

Dalam setiap proses pengukuran PD secara aktual pada generator selalu dipengaruhi oleh *noise*. Sumber utama *noise* yang terdeteksi pada pengukuran PD yang dilakukan pada generator GT 1.2, berasal dari komutasi thyristor pada sistem eksitasi. Dari hasil pengukuran yang dilakukan, terlihat bahwa grafik pada tiap fasa terbentuk *noise* hasil sistem eksitasi.

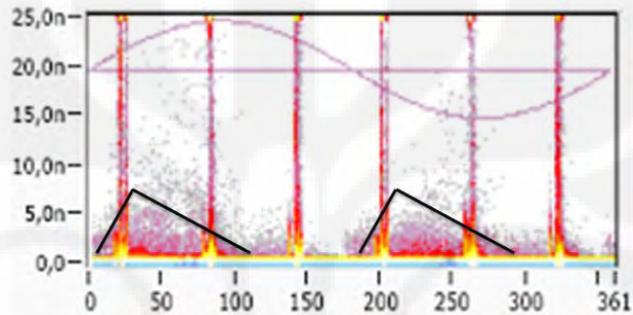


Gambar 4.2 *Noise* dari sistem eksitasi pada pengukuran PD generator GT 1.2

Dalam pengukuran PD, akan didapatkan grafik tanpa *noise* tersebut jika dilakukan pada generator yang menggunakan sistem *brushless exciter*.

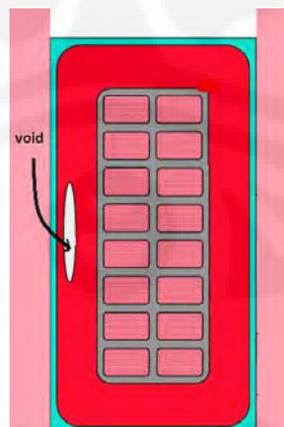
Analisis grafik keluaran pengukuran PD dilakukan dengan membandingkan perkembangan pola PD dengan pengukuran sebelumnya dalam periode pengukuran serta menentukan jenis PD yang terjadi berdasarkan data empiris yang ada. Dari hasil analisis perkembangan pola PD, tidak ditemukan perkembangan pola yang signifikan dalam periode pengukuran atau dengan kata lain aktifitas PD selama periode pengukuran tidak mengalami perubahan yang signifikan. Hal ini terjadi di semua fasa.

Interpretasi jenis PD yang terjadi dari hasil pengukuran PD di tiap fasa dilakukan dengan menganalisis pola grafik keluaran. Secara umum, grafik keluaran di tiap fasa memiliki bentuk yang sama yakni terdapat dua pola segitiga yang simetris di siklus tegangan positif dan negatif. Siklus tegangan positif dan negatif ditunjukkan dengan pola sinusoidal pada grafik keluaran di tiap fasa. Titik puncak dua segitiga yang simetris tersebut terletak pada sudut fasa 30° di siklus positif dan 210° di siklus negatif.



Gambar 4.3 Pola simetris hasil pengukuran PD generator GT 1.2

Berdasarkan data empiris, pola tersebut menunjukkan adanya PD dengan jenis peluahan internal karena adanya *void* pada bagian isolasi utama belitan stator. Jika dilakukan inspeksi visual atau pada saat dilakukan pembersihan belitan stator akan terlihat kerusakan pada pita terluar lapisan belitan stator. Berikut adalah gambaran *void* pada belitan stator GT 1.2.



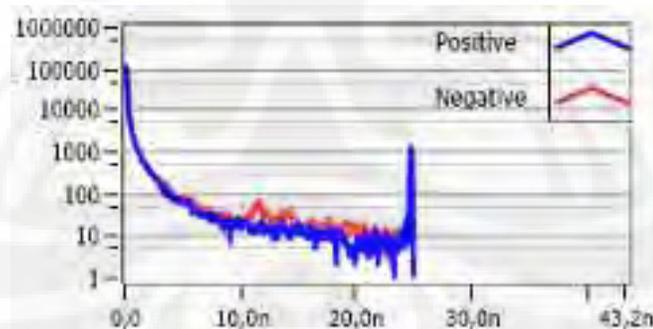
Gambar 4.4 Gambaran *void* pada belitan stator GT 1.2

4.3 ANALISIS DISTRIBUSI TINGGI PULSA

Grafik distribusi tinggi pulsa yang dihasilkan dari pengukuran PD digunakan untuk menganalisis jenis PD yang terjadi. Pada prinsipnya, grafik ini menggambarkan tampilan samping dari grafik pola PD. Garis berwarna biru menggambarkan grafik pulsa positif, sedangkan garis berwarna merah menggambarkan grafik pulsa negatif. Pulsa dengan polaritas positif direpresentasikan pada grafik pola PD di setengah siklus grafik sinus yang ada, yakni pada sudut fasa $0^\circ - 180^\circ$. Sedangkan pulsa dengan polaritas negatif berada pada sudut fasa $180^\circ - 360^\circ$.

Analisis distribusi tinggi pulsa dilakukan dengan menggunakan grafik pulsa positif dan negatif sebagai parameter yang mengindikasikan jenis PD yang terjadi. Peningkatan grafik pulsa positif dalam periode pengukuran menggambarkan peningkatan aktifitas PD pada bagian celah stator atau disebut dengan *slot discharge*. Peningkatan grafik pulsa negatif dalam periode pengukuran menggambarkan aktifitas PD pada bagian inti stator. Sedangkan, keseimbangan yang terjadi antara grafik pulsa positif dan pulsa negatif menggambarkan PD dengan jenis peluahan internal.

Dari hasil pengukuran pada generator GT 1.2, secara umum grafik distribusi tinggi pulsa yang dihasilkan dalam periode pengukuran adalah sebagai berikut.



Gambar 4.5 Grafik distribusi tinggi pulsa hasil pengukuran PD generator GT 1.2

Dari gambar, terlihat bahwa terjadi keseimbangan nilai antara grafik pulsa polaritas positif dengan negatif. Dapat disimpulkan bahwa, terjadi PD pada belitan stator generator GT 1.2 dengan jenis peluahan internal.

4.4 ANALISIS PARAMETER KUANTITATIF

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai analisis parameter kuantitatif yang dihasilkan dari pengukuran PD pada generator GT 1.2. Nilai-nilai parameter kuantitatif dihasilkan dari alat diagnostik *PD Tech Power Engineering AG*.

4.4.1 *Apparent Charge*

Nilai *apparent charge* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kumulatif peluahan PD dibagi dengan jumlah peluahan yang terjadi selama proses pengukuran. Nilai kumulatif ini digambarkan dengan banyaknya muatan yang bocor selama PD dalam satuan coulomb.

Dari hasil pengukuran yang dilakukan, terdapat nilai *apparent charge* yang terdeteksi oleh alat diagnostik sehingga dapat disimpulkan bahwa terjadi aktifitas PD pada generator GT 1.2. Nilai *apparent charge* tertinggi yang terdeteksi selama periode pengukuran adalah sebesar:

- Fasa R : $6,39 \cdot 10^{-10}$ C
- Fasa S : $6,93 \cdot 10^{-10}$ C
- Fasa T : $6,92 \cdot 10^{-10}$ C

4.4.2 *Average Discharge Current*

Nilai *average discharge current* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kumulatif muatan yang bocor selama PD dibagi dengan waktu pengukuran. Nilai ini digambarkan dengan satuan coulomb per detik atau ampere. Dengan kata lain, nilai dari parameter ini menggambarkan kecepatan peluahan muatan yang terjadi tiap satuan waktu. Semakin besar nilai *average discharge current* maka semakin tinggi pula kecepatan peluahan muatan yang terjadi akibat PD pada generator GT 1.2.

Nilai *average discharge current* tertinggi yang terdeteksi selama periode pengukuran generator GT 1.2 adalah sebesar:

- Fasa R : $3,94 \cdot 10^{-13}$ A
- Fasa S : $4,10 \cdot 10^{-13}$ A
- Fasa T : $3,88 \cdot 10^{-13}$ A

4.4.3 Quadratic Rate

Nilai *quadratic rate* yang dihasilkan dalam pengukuran PD menunjukkan nilai kuadrat kumulatif muatan yang bocor selama PD dibagi dengan waktu pengukuran. Nilai ini digambarkan dengan satuan coulomb² per detik. Dengan kata lain, parameter ini menggambarkan nilai energi yang hilang per satuan hambatan. Semakin besar nilai *quadratic rate* maka semakin tinggi pula energi yang hilang akibat PD pada generator GT 1.2.

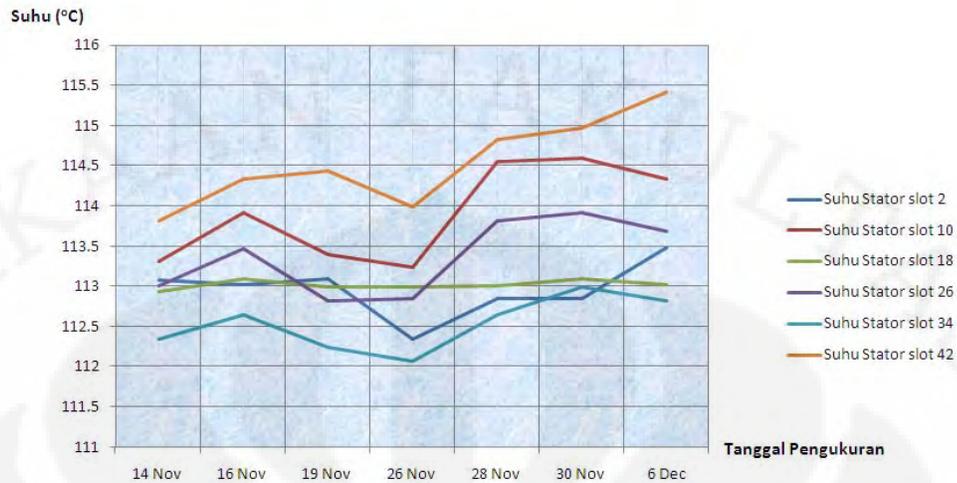
Nilai *quadratic rate* tertinggi yang terdeteksi selama periode pengukuran generator GT 1.2 adalah sebesar:

- Fasa R : $2,90 \cdot 10^{-5} \text{ C}^2/\text{s}$
- Fasa S : $3,14 \cdot 10^{-5} \text{ C}^2/\text{s}$
- Fasa T : $3,13 \cdot 10^{-5} \text{ C}^2/\text{s}$

4.5 PREDIKSI USIA EFEKTIF BERDASARKAN AKTIFITAS PD PADA BELITAN STATOR GENERATOR GT 1.2

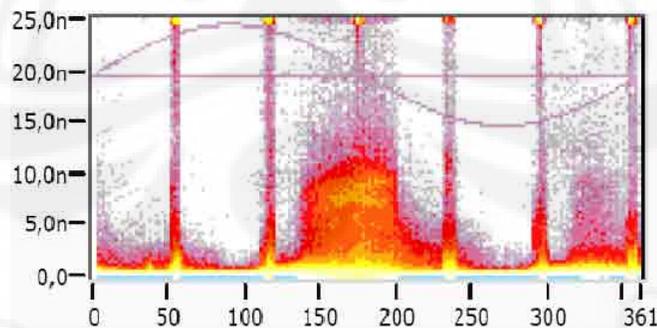
Muatan yang bocor akibat PD pada belitan stator generator berubah-ubah terhadap waktu. Nilai perubahan muatan terhadap waktu ini menyebabkan timbulnya arus listrik yang mengalir di luar belitan stator. Arus peluahan inilah yang memberikan kontribusi terhadap kenaikan temperature belitan stator.

Generator GT 1.2 memiliki sistem isolasi kelas F, dimana nilai maksimum temperatur belitan stator yang diizinkan adalah 155°. Dari pemantauan temperatur belitan stator generator GT 1.2 tidak ditemukan nilai yang melebihi batas. *Void* yang terdapat pada belitan stator generator GT 1.2 dapat mengalami kegagalan jika intensitas medan listrik yang bekerja melebihi kekuatan dielektrik dari *void* itu sendiri. Dalam hal ini, akan terjadi distribusi muatan yang tidak seimbang pada belitan stator generator. Penambahan temperatur belitan stator terjadi akibat perubahan nilai muatan bocor pada *void* tiap satuan waktu. Pada pengukuran PD generator GT 1.2, terdapat kenaikan temperatur dalam periode pengukuran. Berikut adalah grafik kenaikan temperatur belitan stator generator GT 1.2 selama periode pengukuran PD.



Gambar 4.6 Suhu belitan stator generator GT 1.2 selama periode pengukuran PD

Perhitungan prediksi usia efektif generator GT 1.2 akibat PD dengan menggunakan metode regresi linier. Data yang digunakan sebagai pembanding adalah data pengukuran PD generator GT 2.3 yang berada dalam sistem PLTGU Priok. Data tersebut dapat dijadikan acuan pembanding karena generator GT 2.3 memiliki spesifikasi yang sama dengan generator GT 1.2. Dari data hasil pengukuran PD, didapatkan sebaran nilai magnitudo maksimum muatan yang meluahkan. Dari sebaran nilai ini, digunakan metode regresi linier untuk menentukan estimasi usia generator GT 1.2 di tiap fasa dengan nilai magnitudo maksimum pengukuran generator GT 2.3 yang dilakukan pada tanggal 26 April 2007 pukul 11.13 sebagai acuan. Berikut adalah grafik hasil pengukuran PD GT 2.3 fasa R.



Gambar 4.7 Hasil pengukuran PD generator GT 2.3 fasa R

Dari grafik tersebut, didapatkan bahwa nilai magnitudo maksimum yang terjadi adalah 17,18 nC. Nilai inilah yang dijadikan acuan untuk estimasi usia

generator GT 1.2 akibat aktifitas PD yang terjadi. Metode regresi linier menghasilkan garis prediktor yang digunakan untuk perhitungan sehingga dapat ditentukan prediksi usia efektif generator GT 1.2 berdasarkan aktifitas PD yang terjadi di tiap fasa.

Prediksi usia efektif menggunakan metode regresi linier dilakukan dengan asumsi tidak dilakukan perubahan terhadap kondisi belitan stator generator GT 1.2. Persamaan umum garis regresi untuk regresi linier sederhana adalah

$$\hat{y} = a + bx \quad (4.1)$$

dimana

$$a = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4.2)$$

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4.3)$$

dengan *standard error of estimate* persamaan 4.1 sebesar

$$S_{\hat{y}.x} = \sqrt{\frac{\sum y^2 - a \cdot \sum y - b \cdot \sum xy}{n}} \quad (4.4)$$

- Perhitungan fasa R

Tabel 4.3 Perhitungan regresi linier fasa R

| Tanggal pengukuran | X | y | X ² | y ² | Xy |
|--------------------|-----|-------|----------------|----------------|--------|
| 14-Nov | 1 | 1.43 | 1 | 2.0449 | 1.43 |
| 15-Nov | 2 | 1.21 | 4 | 1.4641 | 2.42 |
| 16-Nov | 3 | 1.21 | 9 | 1.4641 | 3.63 |
| 19-Nov | 6 | 1.32 | 36 | 1.7424 | 7.92 |
| 21-Nov | 8 | 1.32 | 64 | 1.7424 | 10.56 |
| 22-Nov | 9 | 1.65 | 81 | 2.7225 | 14.85 |
| 23-Nov | 10 | 1.32 | 100 | 1.7424 | 13.2 |
| 26-Nov | 13 | 1.32 | 169 | 1.7424 | 17.16 |
| 28-Nov | 15 | 1.21 | 225 | 1.4641 | 18.15 |
| 30-Nov | 17 | 1.32 | 289 | 1.7424 | 22.44 |
| 6-Dec | 23 | 1.43 | 529 | 2.0449 | 32.89 |
| Σ | 107 | 14.74 | 1507 | 19.9166 | 144.65 |

$$a = \frac{(1507).(14,74) - (107).(144,65)}{(11).(1507) - (107)^2} = 1,3135$$

$$b = \frac{(11).(144,65) - (107).(14,74)}{(11).(1507) - (107)^2} = 0,0027$$

Maka, persamaannya menjadi

$$y = 1,3135 + 0,0027x \quad (4.5)$$

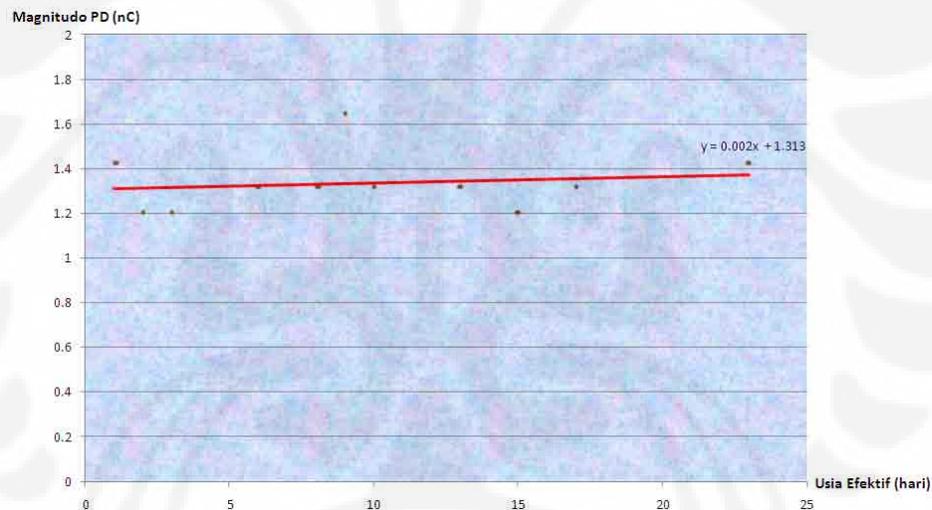
Estimasi nilai x jika $y = 17,18$ adalah

$$x = \frac{y - a}{b} = \frac{17,18 - 1,3135}{0,0027} = 5825 \text{ hari}$$

Dapat disimpulkan bahwa usia efektif generator GT 1.2 berdasarkan aktifitas PD pada fasa R adalah diprediksi sampai dengan tanggal 10 September 2023.

Standard error of estimate sebesar

$$S_{\hat{y}.x} = \sqrt{\frac{19,9166 - (1,3135).(14,74) - (0,0027).(144,65)}{11}} = 0,29$$



Gambar 4.8 Grafik regresi linier fasa R

- Perhitungan fasa S

Tabel 4.4 Perhitungan regresi linier fasa S

| Tanggal pengukuran | X | y | x ² | y ² | Xy |
|--------------------|-----|--------|----------------|----------------|---------|
| 14-Nov | 1 | 1.1 | 1 | 1.21 | 1.1 |
| 15-Nov | 2 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| 16-Nov | 3 | 1.1 | 9 | 1.21 | 3.3 |
| 19-Nov | 6 | 0.991 | 36 | 0.982081 | 5.946 |
| 21-Nov | 8 | 0.881 | 64 | 0.776161 | 7.048 |
| 22-Nov | 9 | 0.991 | 81 | 0.982081 | 8.919 |
| 23-Nov | 10 | 0.991 | 100 | 0.982081 | 9.91 |
| 26-Nov | 13 | 0.991 | 169 | 0.982081 | 12.883 |
| 28-Nov | 15 | 1.1 | 225 | 1.21 | 16.5 |
| 30-Nov | 17 | 0.991 | 289 | 0.982081 | 16.847 |
| 6-Dec | 23 | 1.1 | 529 | 1.21 | 25.3 |
| Σ | 107 | 11.236 | 1507 | 11.52657 | 109.753 |

$$a = \frac{(1507).(11,236) - (107).(109,753)}{(11).(1507) - (107)^2} = 1,0119$$

$$b = \frac{(11).(109,753) - (107).(11,236)}{(11).(1507) - (107)^2} = 0,0009$$

Maka, persamaannya menjadi

$$y = 1,0119 + 0,0009x \quad (4.6)$$

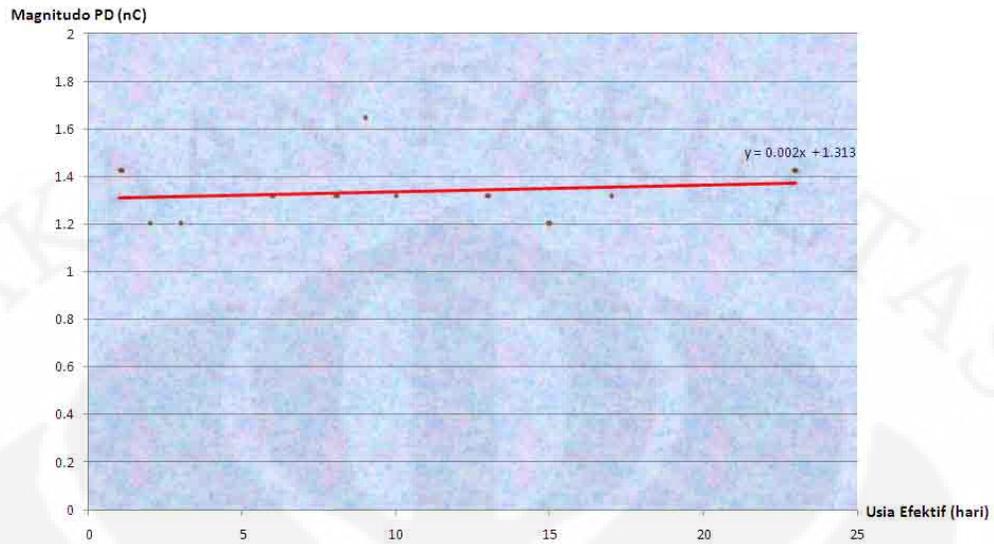
Estimasi nilai x jika $y = 17,18$ adalah

$$x = \frac{y - a}{b} = \frac{17,18 - 1,0119}{0,0009} = 16480 \text{ hari}$$

Dapat disimpulkan bahwa usia efektif generator GT 1.2 berdasarkan aktifitas PD pada fasa S adalah diprediksi sampai dengan tanggal 7 Januari 2053.

Standard error of estimate sebesar

$$S_{\hat{y}.x} = \sqrt{\frac{11,52657 - (1,0119).(11,236) - (0,0009).(109,753)}{11}} = 0,15$$



Gambar 4.9 Grafik regresi linier fasa S

- Perhitungan fasa T

Tabel 4.5 Perhitungan regresi linier fasa T

| Tanggal pengukuran | X | y | x ² | y ² | Xy |
|--------------------|-----|--------|----------------|----------------|---------|
| 14-Nov | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 15-Nov | 2 | 1.21 | 4 | 1.4641 | 2.42 |
| 16-Nov | 3 | 1 | 9 | 1 | 3 |
| 19-Nov | 6 | 1.21 | 36 | 1.4641 | 7.26 |
| 21-Nov | 8 | 0.991 | 64 | 0.982081 | 7.928 |
| 22-Nov | 9 | 1.43 | 81 | 2.0449 | 12.87 |
| 23-Nov | 10 | 1.21 | 100 | 1.4641 | 12.1 |
| 26-Nov | 13 | 1 | 169 | 1 | 13 |
| 28-Nov | 15 | 1 | 225 | 1 | 15 |
| 30-Nov | 17 | 1.21 | 289 | 1.4641 | 20.57 |
| 6-Dec | 23 | 1.21 | 529 | 1.4641 | 27.83 |
| Σ | 107 | 12.471 | 1507 | 14.34748 | 122.978 |

$$a = \frac{(1507).(12,471) - (107).(122,978)}{(11).(1507) - (107)^2} = 1,0989$$

$$b = \frac{(11).(122,978) - (107).(12,471)}{(11).(1507) - (107)^2} = 0,0036$$

Maka, persamaannya menjadi

$$y = 1,0989 + 0,0036x \quad (4.7)$$

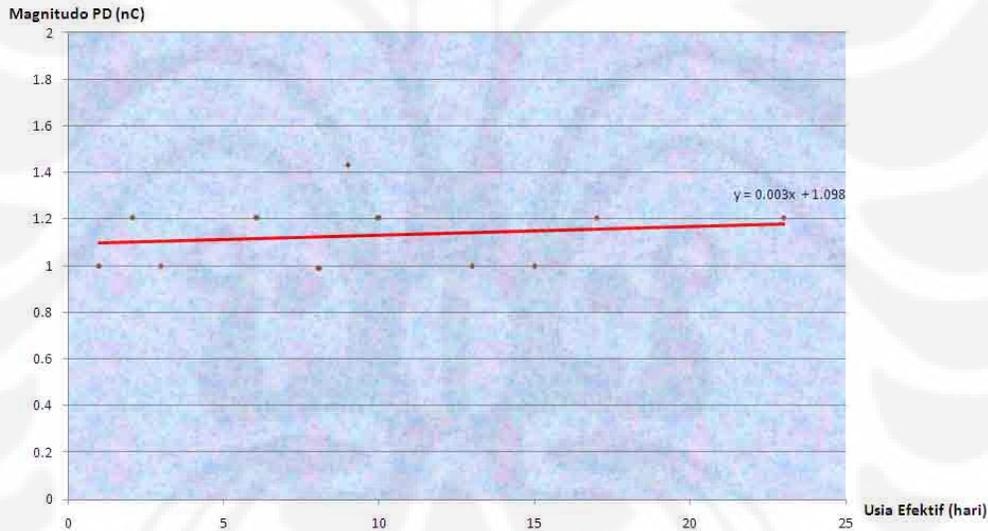
Estimasi nilai x jika $y = 17,18$ adalah

$$x = \frac{y - a}{b} = \frac{17,18 - 1,0989}{0,0036} = 4492 \text{ hari}$$

Dapat disimpulkan bahwa usia efektif generator GT 1.2 berdasarkan aktifitas PD pada fasa T adalah diprediksi sampai dengan tanggal 8 Maret 2020.

Standard error of estimate sebesar

$$S_{\hat{y}.x} = \sqrt{\frac{14,34748 - (1,0989).(12,471) - (0,0036).(122,978)}{11}} = 0,31$$



Gambar 4.10 Grafik regresi linier fasa T

Dari ketiga data hasil perhitungan, maka usia efektif generator GT 1.2 diprediksi sampai dengan tanggal 8 Maret 2020 karena telah terjadi kegagalan di fasa T.

BAB V

KESIMPULAN

1. Berdasarkan pengamatan dalam studi kasus generator GT 1.2, terjadi PD pada belitan statornya di setiap fasa dengan jenis PD yang terdeteksi adalah peluahan internal.
2. Terjadi peningkatan temperatur belitan stator generator akibat peningkatan PD. Kenaikan temperatur inilah yang menyebabkan berkurangnya usia efektif akibat kegagalan generator.
3. Bila diasumsikan tidak dilakukan perubahan, maka usia efektif generator GT 1.2 diprediksi sampai dengan tanggal 8 Maret 2020.

DAFTAR ACUAN

- [1] Pemen, August J.M., "Detection of Partial Discharge in Stator Windings of Turbine Generators" Tesis, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2000.
- [2] Stone, Greg C. dan Howard G. Sedding, "Application of Partial Discharge Testing to Motor and Generator Stator Winding Maintenance" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, March/April 1996.
- [3] Mallikarjunappa, K. dan S.N. Moorching, "Partial Discharge Magnitude Distribution Analysis in Characterizing Ageing Phenomena in High Voltage Rotating Machine Insulation System" IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.
- [4] Kotlica, Miomir "Analisis Peluahan Parsial secara Online" paper, PT.KES Ltd. International, 1997
- [5] Klempner, Geoff dan Isidor Kerszenbaum, "Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators" McGraw-Hill, New York, 2004.
- [6] ____, *NEMA Insulation Classes*. Diakses 22 April 2008.
http://www.engineeringtoolbox.com/nema-insulation-classes-d_734.html
- [7] ____, *Insulation System for Rotating Electrical Machines*. Diakses 5 Februari 2008, ABB.
[http://library.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/9f72cb329708b62dc2256dbf00238b49/\\$File/Micadur_062003.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/9f72cb329708b62dc2256dbf00238b49/$File/Micadur_062003.pdf)
- [8] Hayt, William H. dan John A. Buck, "Elektromagnetika, edisi ketujuh" Erlangga, Jakarta, 2006.
- [9] ____, *Partial Discharge Testing*. Diakses 5 Februari 2008, HT, Inc.
<http://www.ht-world.com/pdfs/PartialDischargePaper.pdf>
- [10] Agung, Haryo dan Saiful Adib, "Partial Discharge and Diagnosis" Paper, Bandung: ITB, 2000.
- [11] Kimura, Ken, "Progress of Insulation Ageing and Diagnostic of High Voltage Rotating Machines Windings in Japan" IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 9, No. 3, May/June 1993.

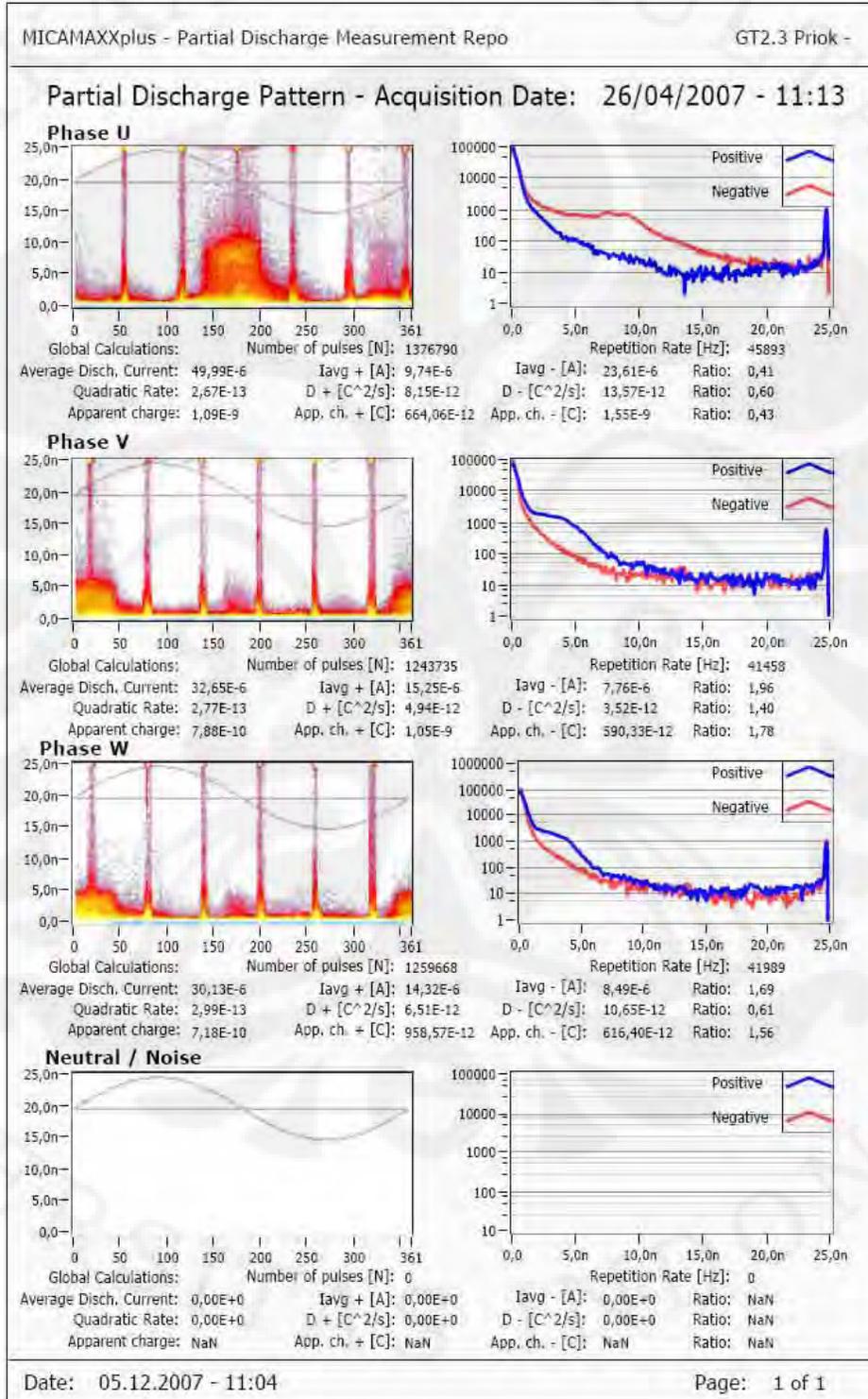
- [12] Kim, Hee Dong, Tae Wan Kim, dkk, "Thermal Aging Properties of Mica/Epoxy Stator Winding Insulations" IEEE Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, 1997
- [13] Paoletti, Gabriel J., Alexander Golubev "Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium-Voltage Electrical Equipment" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, January/February 2001.
- [14] Wood, J.W., H.G.Sedding, dkk "Partial Discharge in HV Machines; Initial Considerations for a PD Specification" IEE Proceedings-A, Vol.140, No.5, September 1993.
- [15] Wendel, Christoph, Thomas Laird, dan Tom Bertheau "Continuous Partial Discharge Monitoring with Assessed Condition Trending System (ACTS)" paper CIGRE, Mexico: 2001.
- [16] Fruth, Bernd "General Interpretation Scheme for Partial Discharge Pattern Monitoring" PD Power Engineering AG, 1999.

DAFTAR PUSTAKA

- , *MICAMAXX Plus Step by Step Procedure*. Switzerland: PD Tech Power Engineering AG, January 2003.
- , *MICAMAXX Plus User Manual*. Switzerland: PD Tech Power Engineering AG, September 2002.
- , *Partial Discharge Basic of Monitoring*. Switzerland: PD Tech Power Engineering AG.
- , *Partial Discharge Online Monitoring of Rotating Machines*. Switzerland: PD Tech Power Engineering AG.
- Breen, H.J. Van, dkk “PD Activity as a Means to Classify Insulation Degradation of Large Turbo Generators” IEEE International Symposium on High Voltage Engineering, Delft, The Netherlands, September 2003.
- Chapman, Stephen J., “Electric Machinery and Power System Fundamentals” McGraw-Hill, New York, 2002.
- Hayt, William H. dan John A. Buck, “Elektromagnetika, edisi ketujuh” Erlangga, Jakarta, 2006.
- Muhr, M., R.Schwarz “Partial Discharge Measurement as a Diagnostic Tools for HV-Equipment” IEEE The 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), Bali, Indonesia, June 2006
- Paoletti, Gabriel J., Alexander Golubev “Partial Discharge Theory and Technologies Related to Medium-Voltage Electrical Equipment” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, January/February 2001.

LAMPIRAN

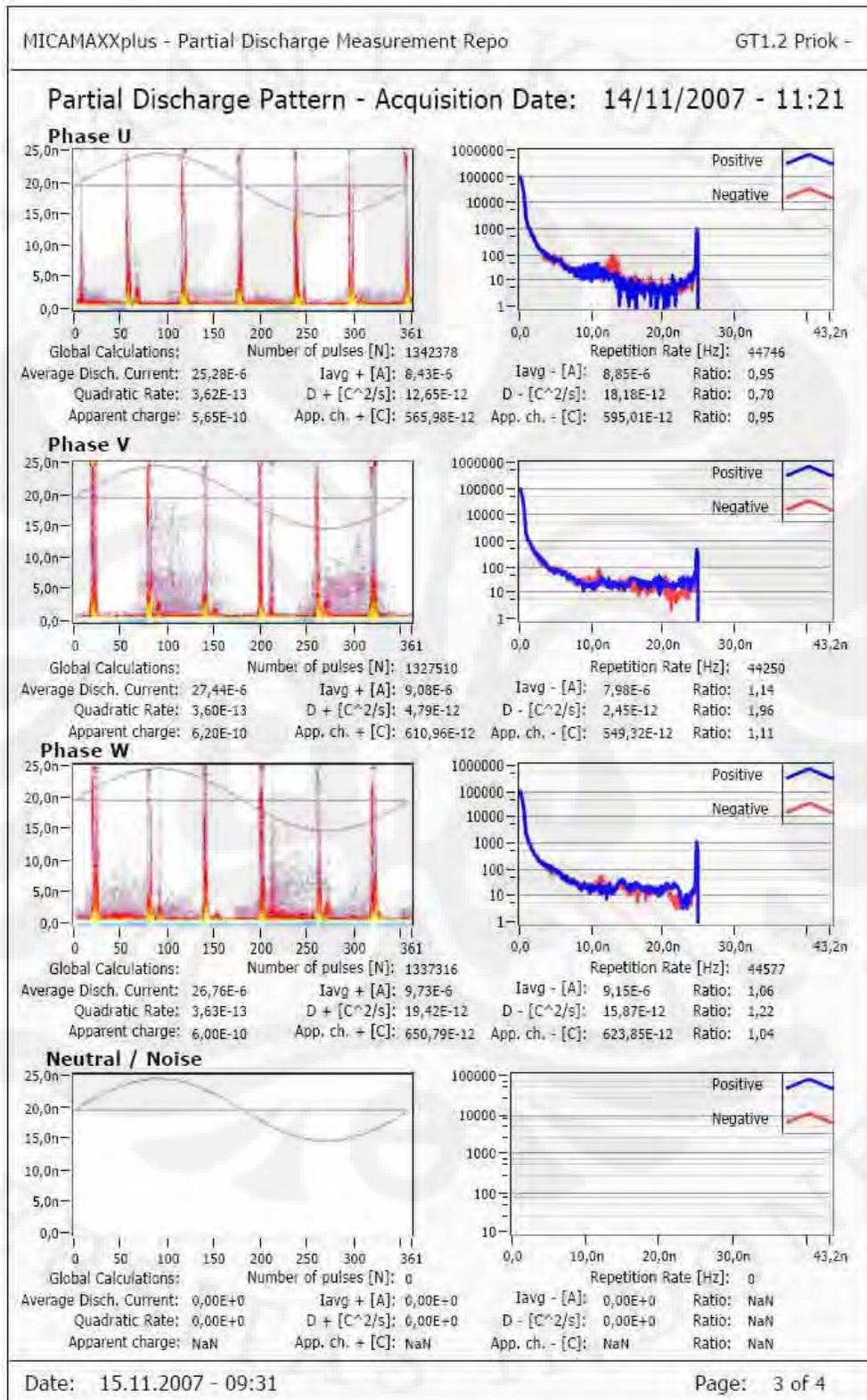
Lampiran 1 Data Pengukuran PD Generator GT 2.3 PLTGU Priok



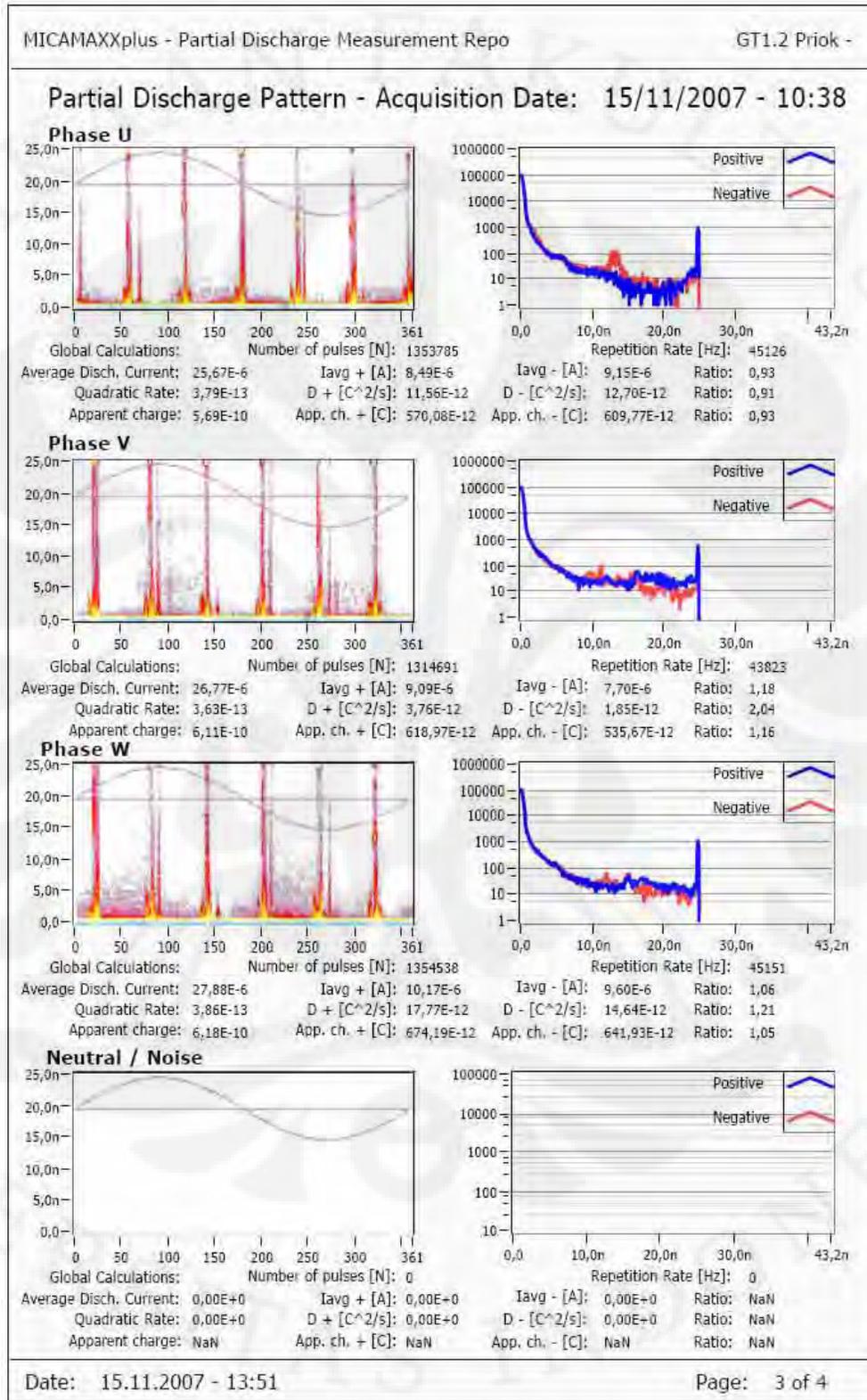
Lampiran 2 Data Hasil Pengukuran PD Generator GT 1.2 PLTGU Priok
Data Aktual Generator GT 1.2

| No. | Parameter | Satuan | 14-Nov | 15-Nov | 16-Nov | 19-Nov | 21-Nov | 22-Nov | 23-Nov | 26-Nov | 28-Nov | 30-Nov | 6-Dec |
|-----|---------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1 | Kecepatan Generator | rpm | 2996 | 3000 | 2996 | 2997 | 2992 | 2997 | 3005 | 2999 | 3005 | 2999 | 2999 |
| 2 | cos ϕ | - | 0.9 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 3 | Frekuensi | Hz | 49.8 | 50.1 | 49.8 | 50 | 49.8 | 50 | 50.1 | 50 | 50.1 | 50 | 50 |
| 4 | Tegangan Generator | KV | 15.8 | 15.8 | 15.9 | 15.8 | 15.8 | 15.9 | 15.8 | 15.8 | 15.8 | 15.8 | 15.8 |
| 5 | Arus Generator | A | 4903 | 4261 | 4973 | 4978 | 4777 | 4716 | 4973 | 4889 | 5105 | 5189 | 5044 |
| 6 | Daya Aktif | MW | 114 | 90.4 | 118 | 117 | 101 | 102 | 105 | 118 | 118 | 118 | 118 |
| 7 | Daya Reaktif | MVAR | 67.4 | 70.2 | 67.2 | 69.4 | 83 | 77.2 | 84.6 | 60.8 | 70.2 | 77.9 | 69.7 |
| 8 | Temperatur Ambien | $^{\circ}$ c | 45 | 49 | 46 | 48 | 41 | 47 | 46 | 47 | 48 | 47 | 45 |
| 9 | Kelembaban | % | 45 | 44 | 46 | 45 | 54 | 43 | 44 | 44 | 46 | 44 | 44 |
| 10 | Suhu Stator slot 2 | % | 75.39 | 70.31 | 75.35 | 75.4 | 72.1 | 72.15 | 72.3 | 74.9 | 75.23 | 75.05 | 75.66 |
| 11 | Suhu Stator slot 10 | % | 75.54 | 70.56 | 75.95 | 75.6 | 72.65 | 72.7 | 72.75 | 75.49 | 76.37 | 76.4 | 76.23 |
| 12 | Suhu Stator slot 18 | % | 75.29 | 70.07 | 75.4 | 75.33 | 72.22 | 72.15 | 72.25 | 75.33 | 75.34 | 75.4 | 75.35 |
| 13 | Suhu Stator slot 26 | % | 75.34 | 70.56 | 75.65 | 75.21 | 72.65 | 72.68 | 72.7 | 75.23 | 75.88 | 75.95 | 75.8 |
| 14 | Suhu Stator slot 34 | % | 74.9 | 70.46 | 75.1 | 74.83 | 71.83 | 71.95 | 72.1 | 74.71 | 75.1 | 75.33 | 75.22 |
| 15 | Suhu Stator slot 42 | % | 75.88 | 70.8 | 76.23 | 76.3 | 72.97 | 73.12 | 73.25 | 75.99 | 76.56 | 76.65 | 76.95 |

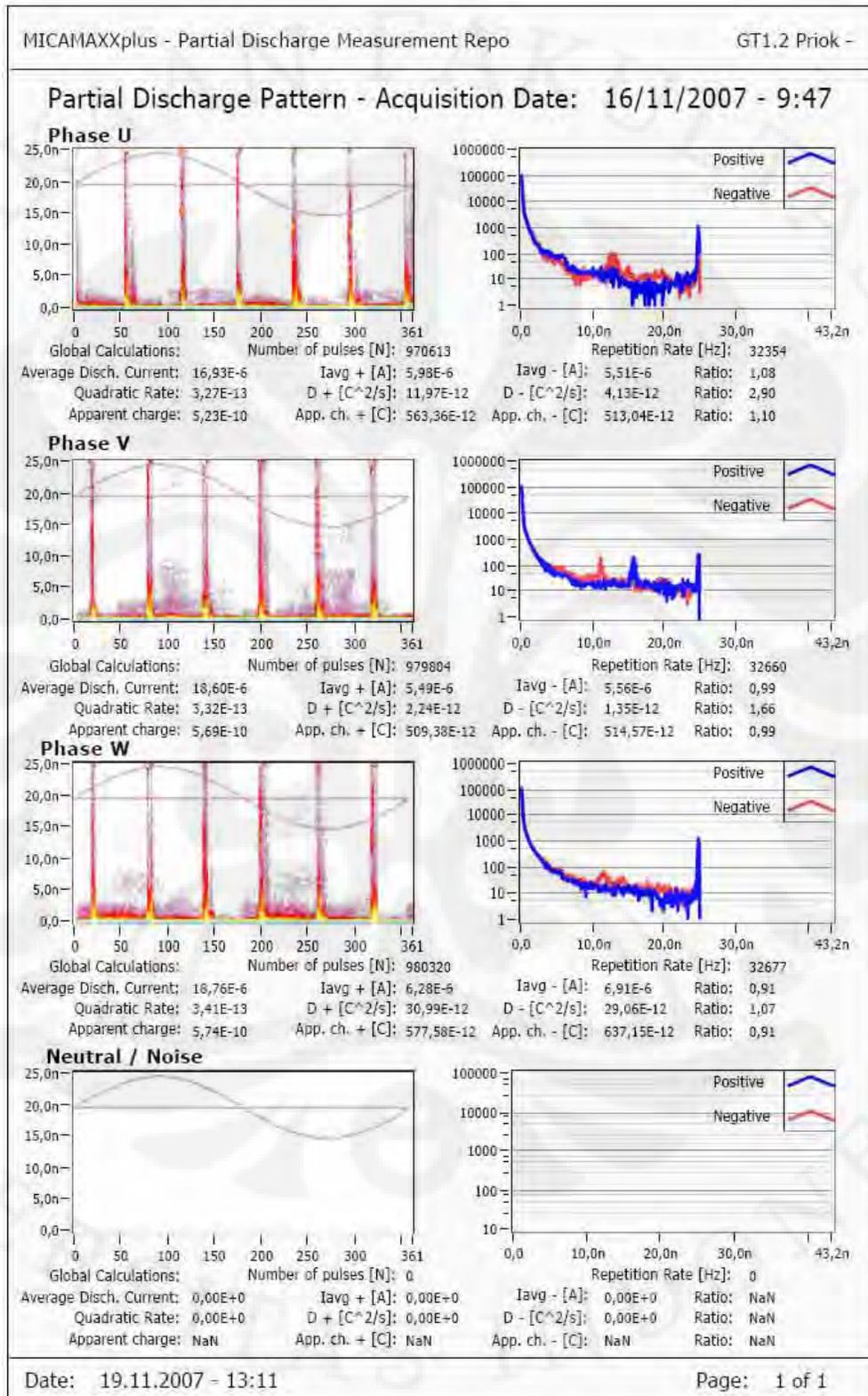
- **Pengukuran 14 November 2007**



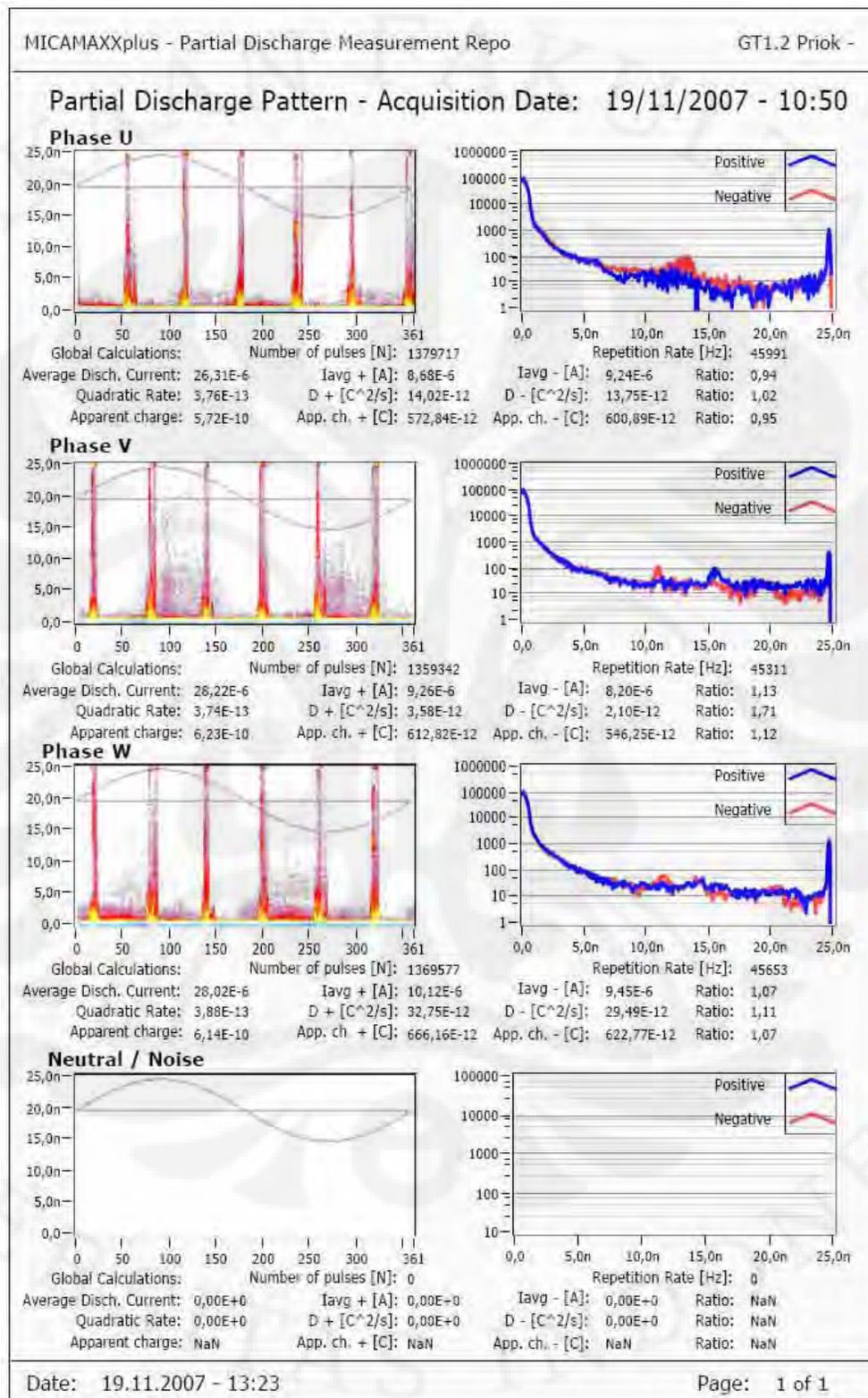
- **Pengukuran 15 November 2007**



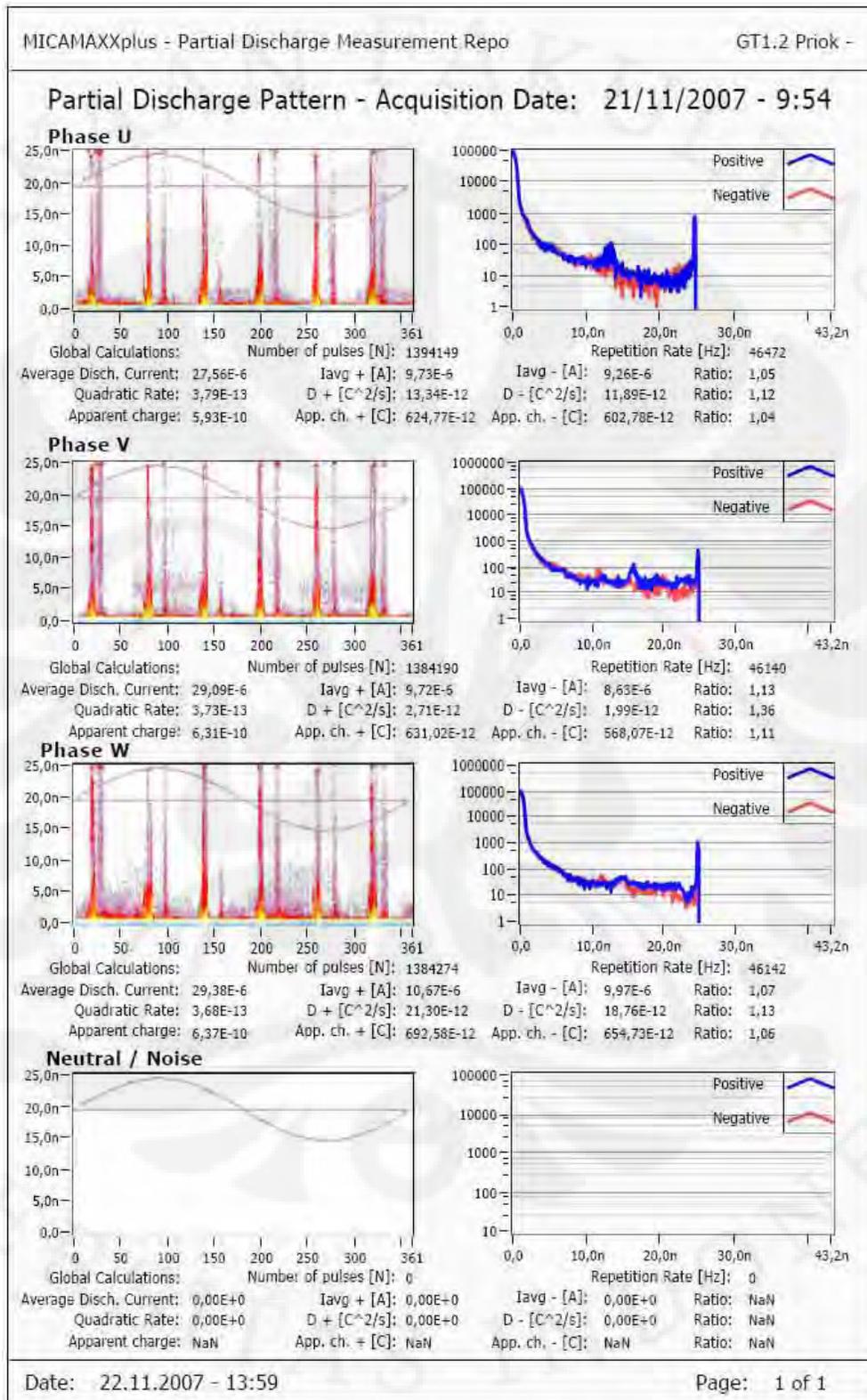
- **Pengukuran 16 November 2007**



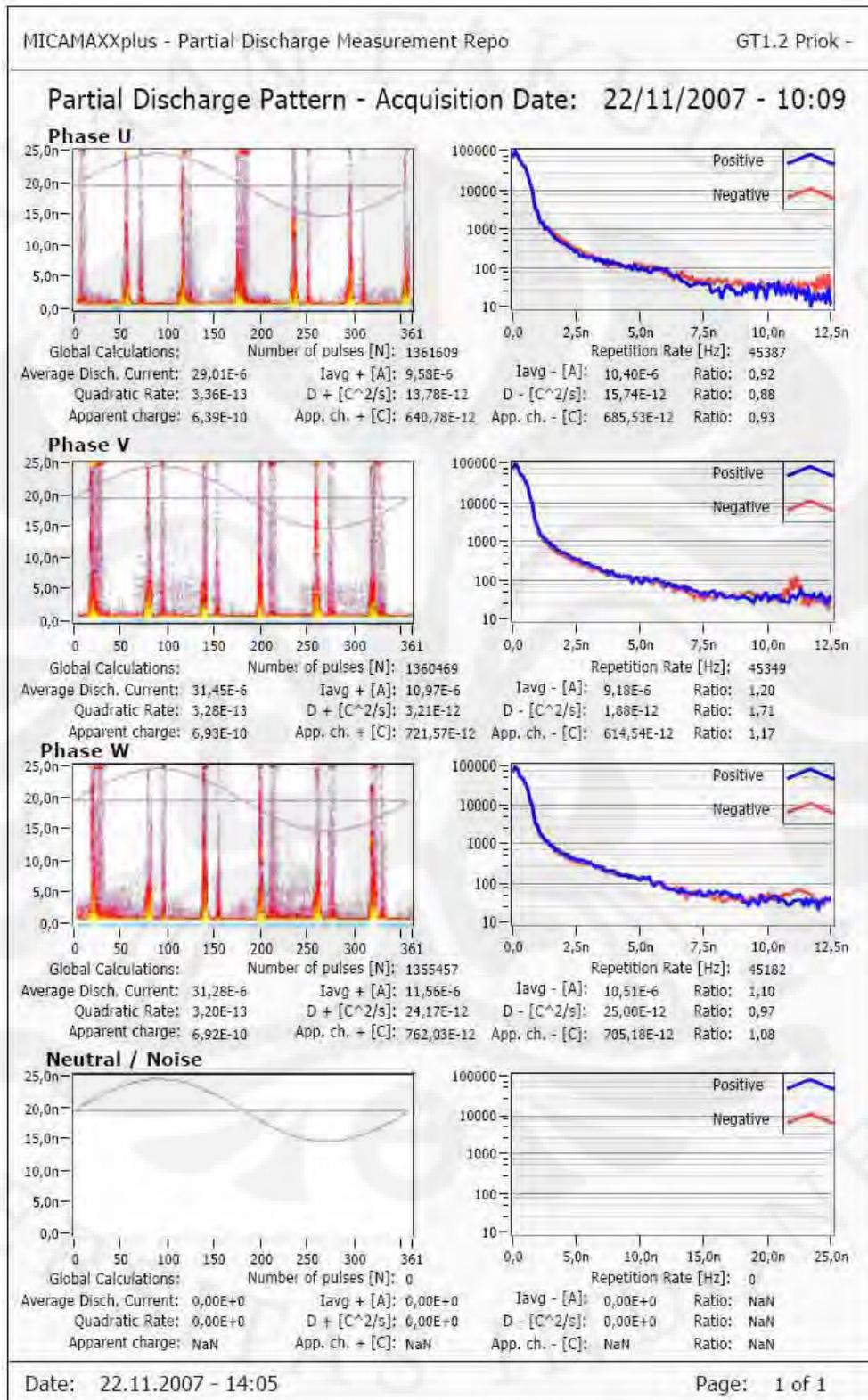
- **Pengukuran 19 November 2007**



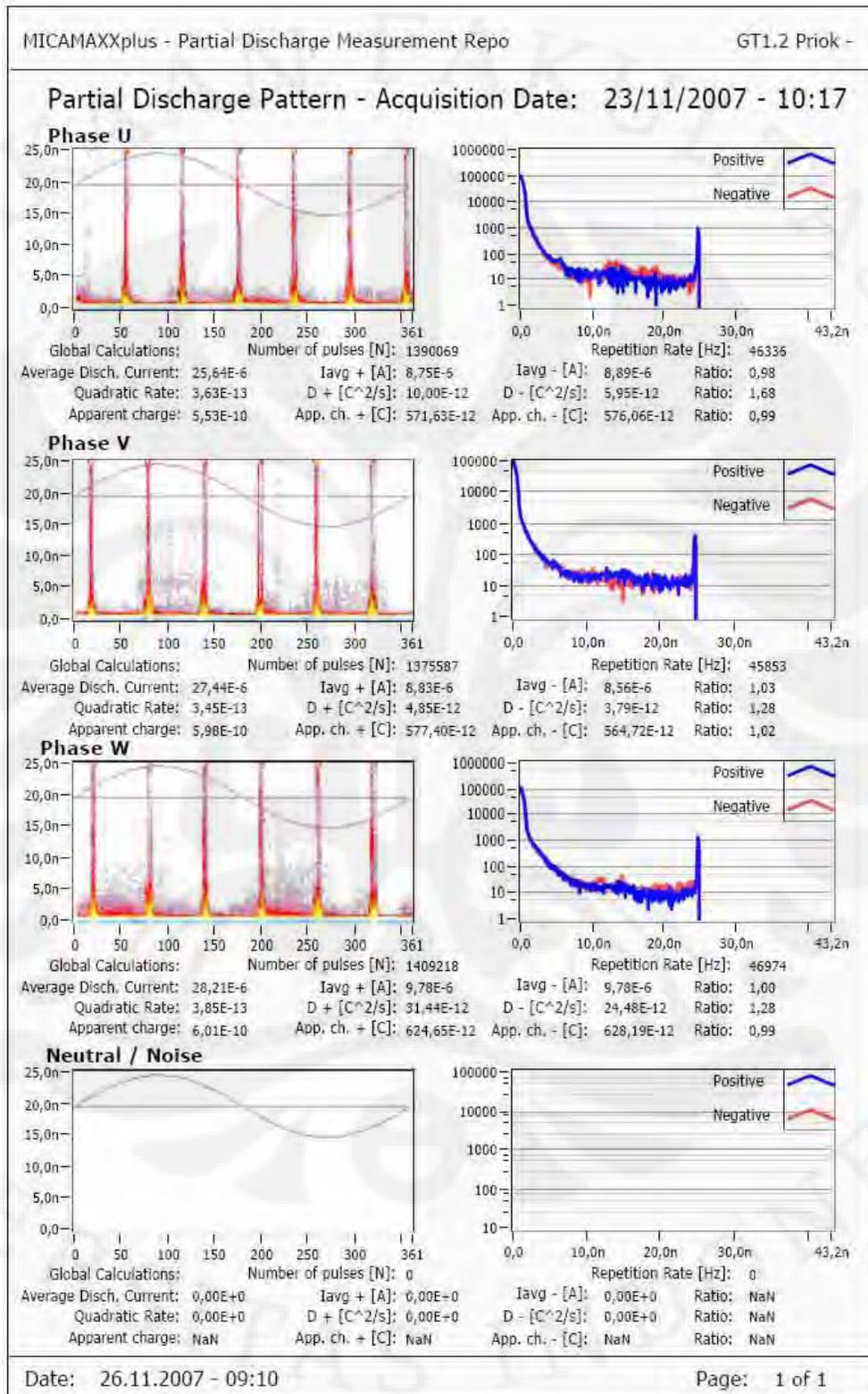
- **Pengukuran 21 November 2007**



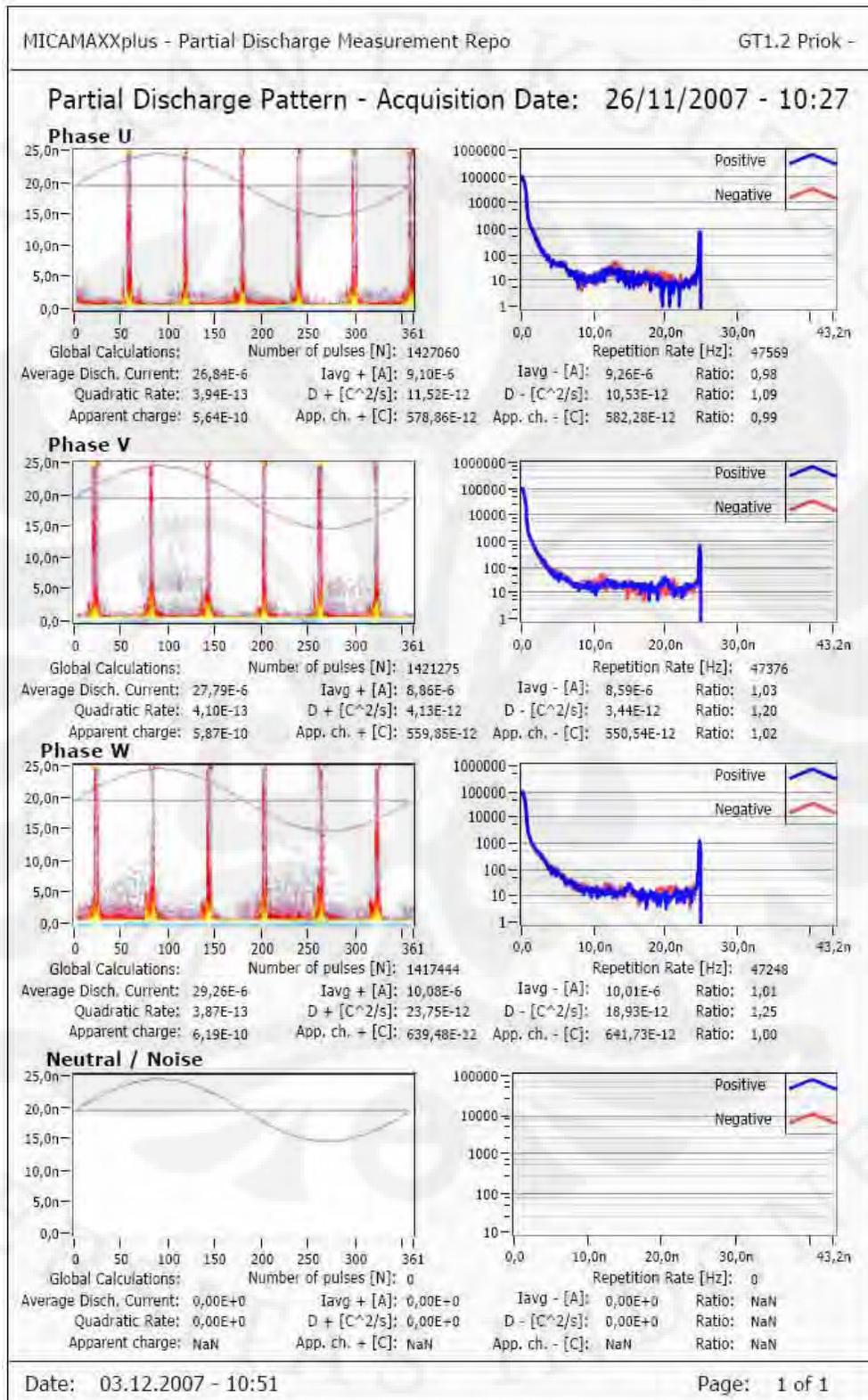
- **Pengukuran 22 November 2007**



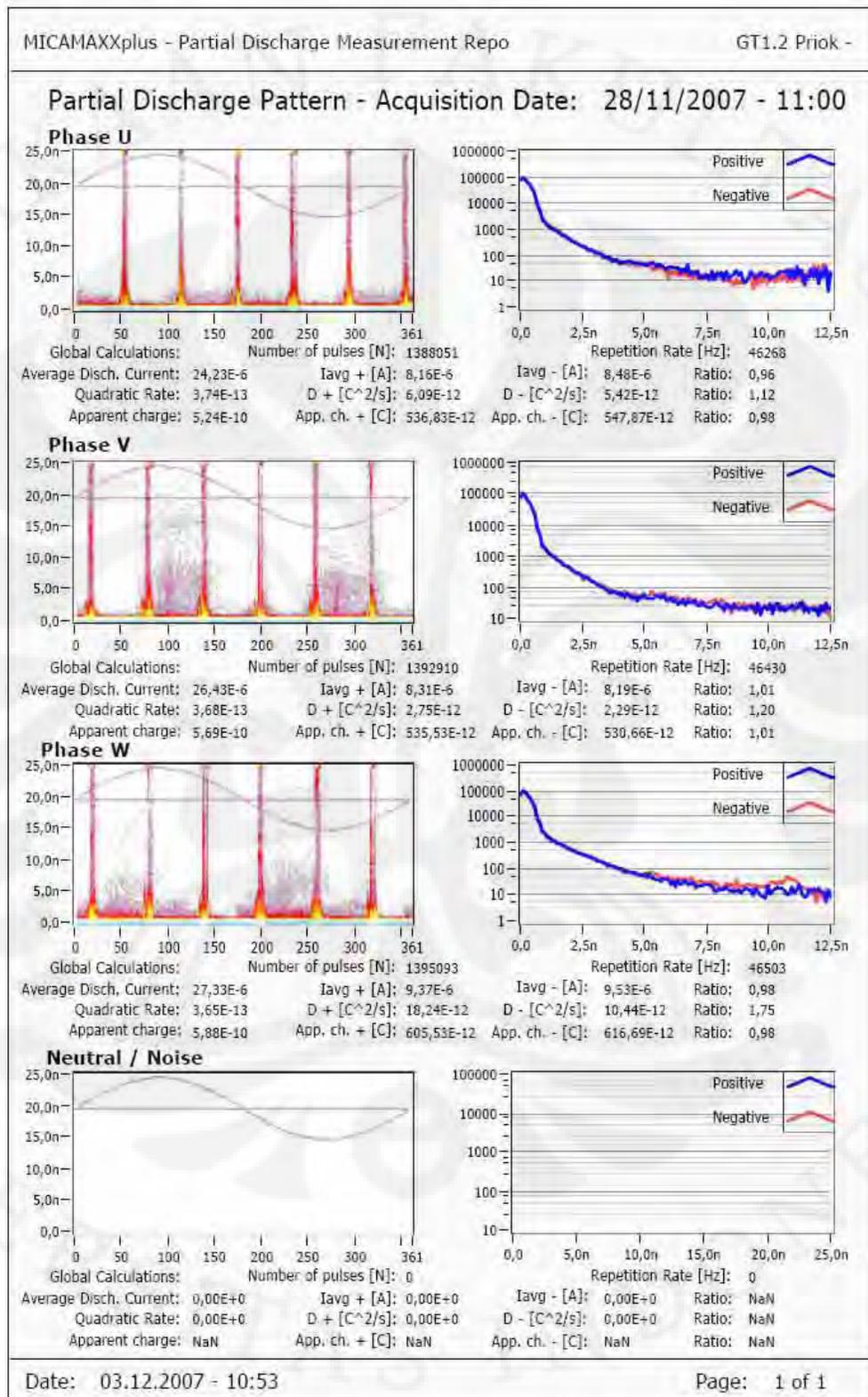
- **Pengukuran 23 November 2007**



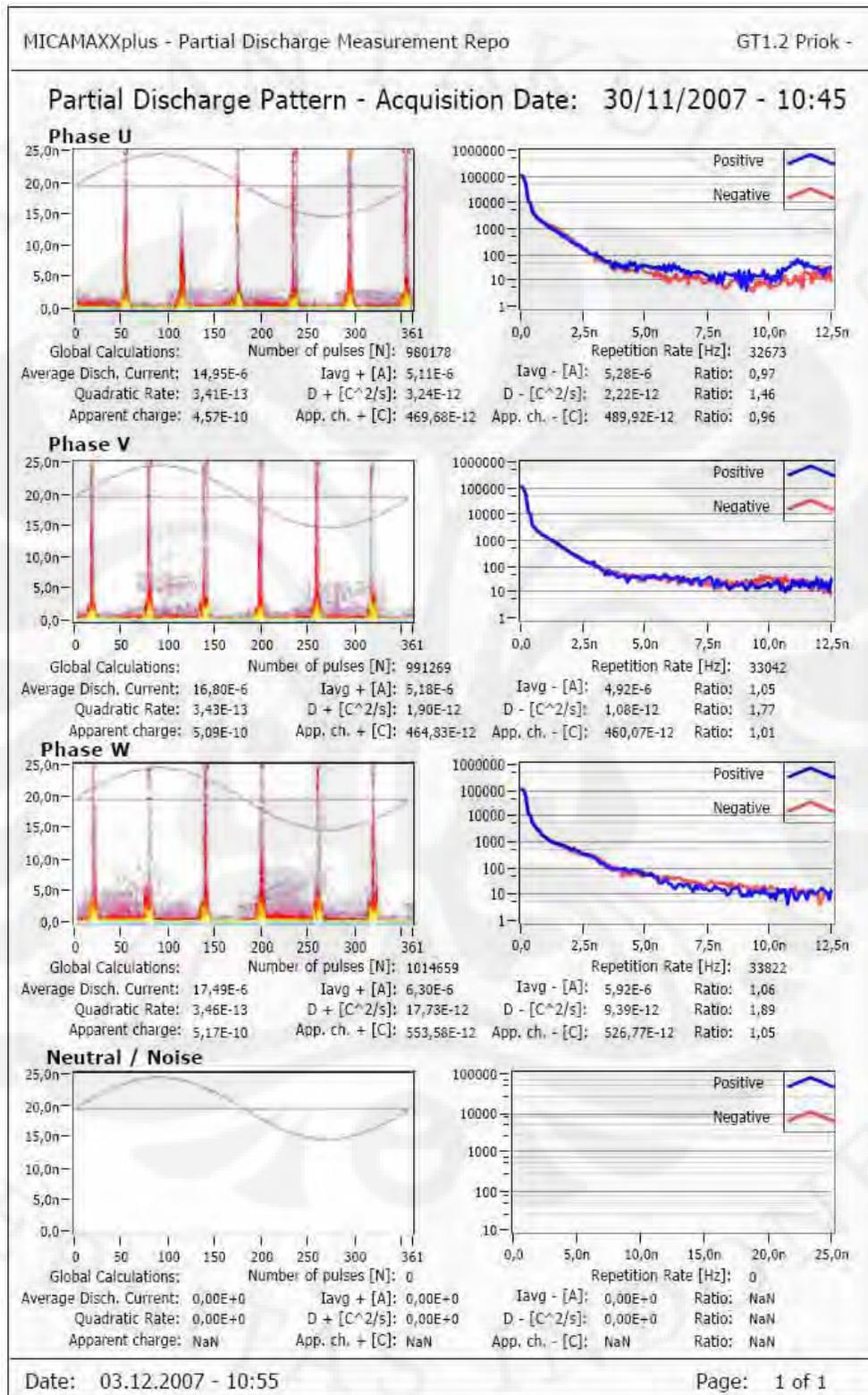
- **Pengukuran 26 November 2007**



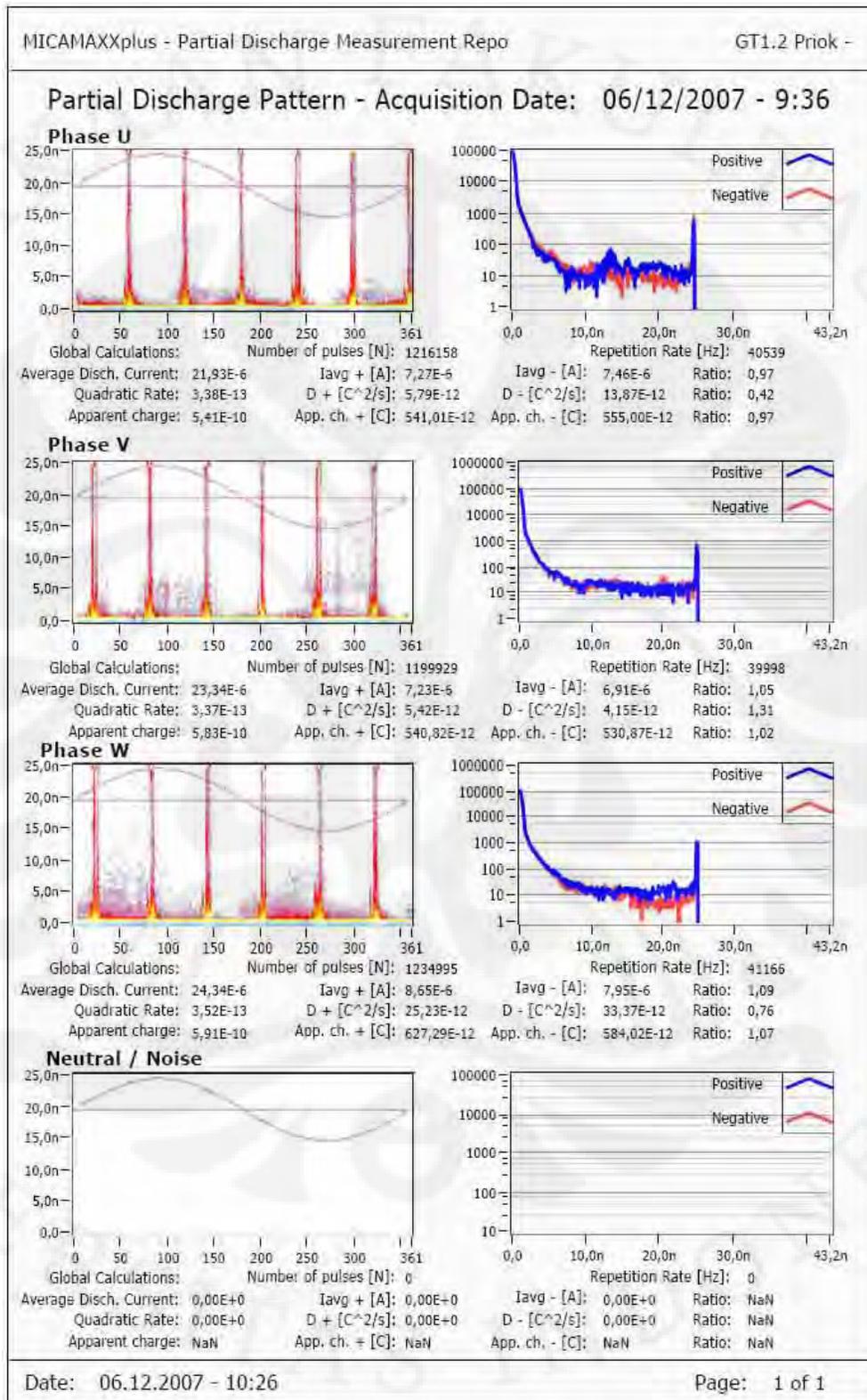
- **Pengukuran 28 November 2007**



- **Pengukuran 30 November 2007**



• **Pengukuran 6 Desember 2007**



- **Nilai Average Discharge Current**

| R | Average Discharge Current | Iavg + | Iavg - | Ratio |
|----------|---------------------------|----------|----------|-------|
| 14-Nov | 2.53E-05 | 8.48E-06 | 8.85E-06 | 0.96 |
| 15-Nov | 2.57E-05 | 8.54E-06 | 9.14E-06 | 0.93 |
| 16-Nov | 1.69E-05 | 6.00E-06 | 5.50E-06 | 1.09 |
| 19-Nov | 2.63E-05 | 8.74E-06 | 9.24E-06 | 0.95 |
| 21-Nov | 2.76E-05 | 9.79E-06 | 9.26E-06 | 1.06 |
| 22-Nov | 2.90E-05 | 9.64E-06 | 1.04E-05 | 0.93 |
| 23-Nov | 2.56E-05 | 8.81E-06 | 8.89E-06 | 0.99 |
| 26-Nov | 2.68E-05 | 9.16E-06 | 9.26E-06 | 0.99 |
| 28-Nov | 2.42E-05 | 8.21E-06 | 8.48E-06 | 0.97 |
| 30-Nov | 1.49E-05 | 5.13E-06 | 5.28E-06 | 0.97 |
| 6-Dec | 2.19E-05 | 7.31E-06 | 7.46E-06 | 0.98 |
| S | Average Discharge Current | Iavg + | Iavg - | Ratio |
| 14-Nov | 2.74E-05 | 9.15E-06 | 8.00E-06 | 1.14 |
| 15-Nov | 2.68E-05 | 9.15E-06 | 7.71E-06 | 1.19 |
| 16-Nov | 1.86E-05 | 5.53E-06 | 5.57E-06 | 0.99 |
| 19-Nov | 2.82E-05 | 9.34E-06 | 8.22E-06 | 1.14 |
| 21-Nov | 2.91E-05 | 9.79E-06 | 8.65E-06 | 1.13 |
| 22-Nov | 3.14E-05 | 1.10E-05 | 9.18E-06 | 1.20 |
| 23-Nov | 2.74E-05 | 8.90E-06 | 8.57E-06 | 1.04 |
| 26-Nov | 2.78E-05 | 8.93E-06 | 8.60E-06 | 1.04 |
| 28-Nov | 2.64E-05 | 8.40E-06 | 8.20E-06 | 1.02 |
| 30-Nov | 1.68E-05 | 5.21E-06 | 4.93E-06 | 1.06 |
| 6-Dec | 2.33E-05 | 7.27E-06 | 6.92E-06 | 1.05 |
| T | Average Discharge Current | Iavg + | Iavg - | Ratio |
| 14-Nov | 2.68E-05 | 9.78E-06 | 9.15E-06 | 1.07 |
| 15-Nov | 2.79E-05 | 1.02E-05 | 9.60E-06 | 1.06 |
| 16-Nov | 1.88E-05 | 6.31E-06 | 6.92E-06 | 0.91 |
| 19-Nov | 2.80E-05 | 1.02E-05 | 9.45E-06 | 1.08 |
| 21-Nov | 2.94E-05 | 1.07E-05 | 1.00E-05 | 1.07 |
| 22-Nov | 3.13E-05 | 1.16E-05 | 1.05E-05 | 1.11 |
| 23-Nov | 2.82E-05 | 9.84E-06 | 9.78E-06 | 1.01 |
| 26-Nov | 2.93E-05 | 1.01E-05 | 1.00E-05 | 1.01 |
| 28-Nov | 2.73E-05 | 9.43E-06 | 9.53E-06 | 0.99 |
| 30-Nov | 1.75E-05 | 6.33E-06 | 5.93E-06 | 1.07 |
| 6-Dec | 2.43E-05 | 8.69E-06 | 7.95E-06 | 1.09 |

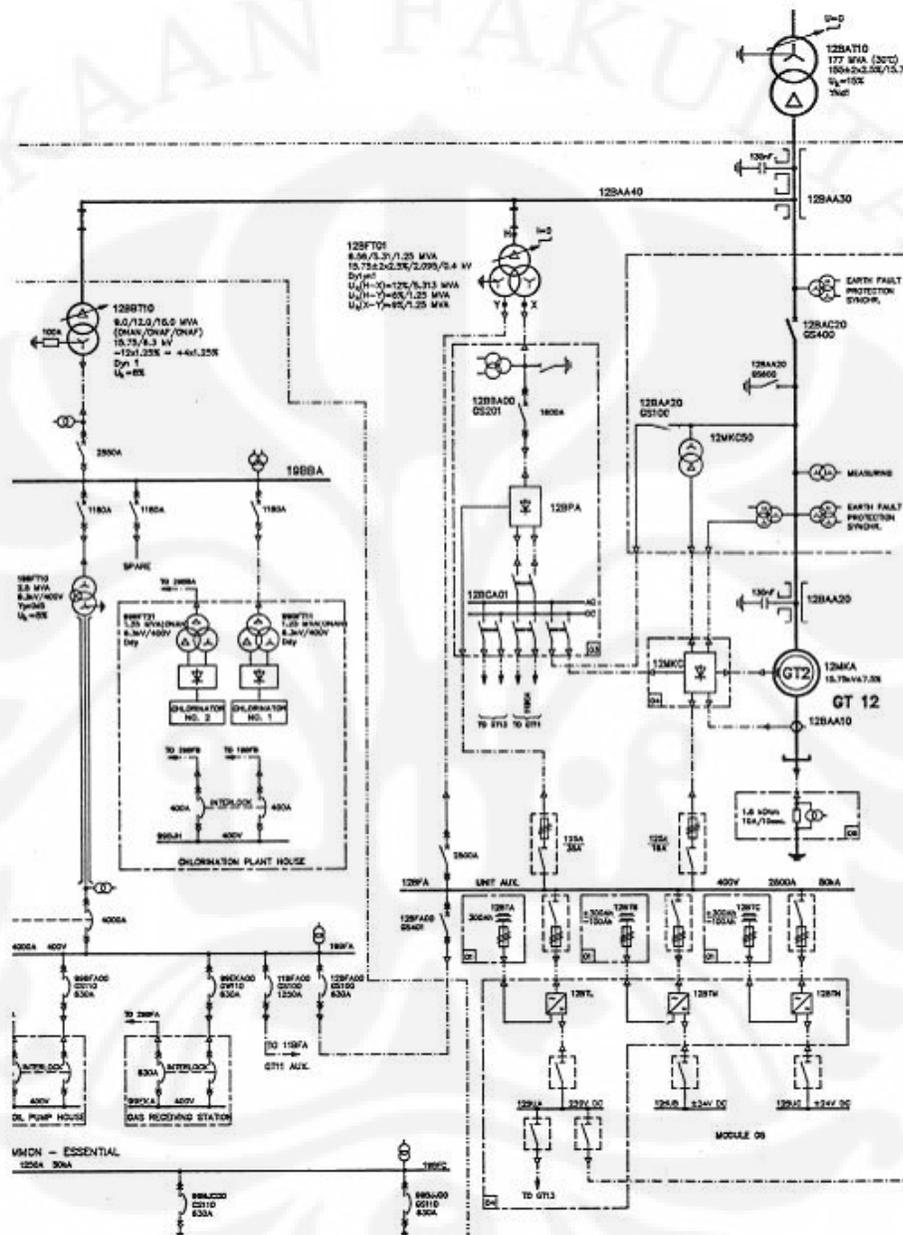
- Nilai Quadratic Rate

| R | Quadratic Rate | D + | D - | Ratio |
|----------|----------------|----------|----------|-------|
| 14-Nov | 3.62E-13 | 1.27E-11 | 1.82E-11 | 0.70 |
| 15-Nov | 3.79E-13 | 1.16E-11 | 1.27E-11 | 0.91 |
| 16-Nov | 3.27E-13 | 1.20E-11 | 4.13E-12 | 2.90 |
| 19-Nov | 3.76E-13 | 1.40E-11 | 1.37E-11 | 1.02 |
| 21-Nov | 3.79E-13 | 1.34E-11 | 1.19E-11 | 1.12 |
| 22-Nov | 3.36E-13 | 1.38E-11 | 1.57E-11 | 0.88 |
| 23-Nov | 3.63E-13 | 1.00E-11 | 5.95E-12 | 1.68 |
| 26-Nov | 3.94E-13 | 1.15E-11 | 1.05E-11 | 1.10 |
| 28-Nov | 3.74E-13 | 6.10E-12 | 5.42E-12 | 1.13 |
| 30-Nov | 3.41E-13 | 3.24E-12 | 2.22E-12 | 1.46 |
| 6-Dec | 3.38E-13 | 5.80E-12 | 1.39E-11 | 0.42 |
| S | Quadratic Rate | D + | D - | Ratio |
| 14-Nov | 3.60E-13 | 4.81E-12 | 2.45E-12 | 1.96 |
| 15-Nov | 3.63E-13 | 3.78E-12 | 1.85E-12 | 2.05 |
| 16-Nov | 3.32E-13 | 2.25E-12 | 1.35E-12 | 1.66 |
| 19-Nov | 3.74E-13 | 3.60E-12 | 2.10E-12 | 1.71 |
| 21-Nov | 3.73E-13 | 2.72E-12 | 1.99E-12 | 1.37 |
| 22-Nov | 3.28E-13 | 3.23E-12 | 1.88E-12 | 1.72 |
| 23-Nov | 3.45E-13 | 4.87E-12 | 3.79E-12 | 1.28 |
| 26-Nov | 4.10E-13 | 4.15E-12 | 3.45E-12 | 1.20 |
| 28-Nov | 3.68E-13 | 2.77E-12 | 2.28E-12 | 1.21 |
| 30-Nov | 3.43E-13 | 1.91E-12 | 1.08E-12 | 1.77 |
| 6-Dec | 3.37E-13 | 5.43E-12 | 4.15E-12 | 1.31 |
| T | Quadratic Rate | D + | D - | Ratio |
| 14-Nov | 3.63E-13 | 1.94E-11 | 1.59E-11 | 1.22 |
| 15-Nov | 3.86E-13 | 1.78E-11 | 1.46E-11 | 1.22 |
| 16-Nov | 3.41E-13 | 3.10E-11 | 2.91E-11 | 1.07 |
| 19-Nov | 3.88E-13 | 3.28E-11 | 2.95E-11 | 1.11 |
| 21-Nov | 3.68E-13 | 2.13E-11 | 1.88E-11 | 1.14 |
| 22-Nov | 3.20E-13 | 2.42E-11 | 2.50E-11 | 0.97 |
| 23-Nov | 3.85E-13 | 3.15E-11 | 2.45E-11 | 1.28 |
| 26-Nov | 3.87E-13 | 2.38E-11 | 1.89E-11 | 1.26 |
| 28-Nov | 3.65E-13 | 1.83E-11 | 1.04E-11 | 1.75 |
| 30-Nov | 3.46E-13 | 1.77E-11 | 9.39E-12 | 1.89 |
| 6-Dec | 3.52E-13 | 2.52E-11 | 3.34E-11 | 0.76 |

- Nilai Apparent Charge

| R | Apparent Charge | Apparent Charge + | Apparent Charge - | Ratio |
|----------|-----------------|-------------------|-------------------|-------|
| 14-Nov | 5.65E-10 | 5.63E-10 | 5.95E-10 | 0.95 |
| 15-Nov | 5.69E-10 | 5.67E-10 | 6.09E-10 | 0.93 |
| 16-Nov | 5.23E-10 | 5.59E-10 | 5.13E-10 | 1.09 |
| 19-Nov | 5.72E-10 | 5.70E-10 | 6.01E-10 | 0.95 |
| 21-Nov | 5.93E-10 | 6.21E-10 | 6.03E-10 | 1.03 |
| 22-Nov | 6.39E-10 | 6.37E-10 | 6.85E-10 | 0.93 |
| 23-Nov | 5.53E-10 | 5.69E-10 | 5.76E-10 | 0.99 |
| 26-Nov | 5.64E-10 | 5.76E-10 | 5.82E-10 | 0.99 |
| 28-Nov | 5.24E-10 | 5.34E-10 | 5.48E-10 | 0.98 |
| 30-Nov | 4.57E-10 | 4.67E-10 | 4.90E-10 | 0.95 |
| 6-Dec | 5.41E-10 | 5.38E-10 | 5.55E-10 | 0.97 |
| S | Apparent Charge | Apparent Charge + | Apparent Charge - | Ratio |
| 14-Nov | 6.20E-10 | 6.09E-10 | 5.50E-10 | 1.11 |
| 15-Nov | 6.11E-10 | 6.16E-10 | 5.36E-10 | 1.15 |
| 16-Nov | 5.69E-10 | 5.07E-10 | 5.15E-10 | 0.98 |
| 19-Nov | 6.23E-10 | 6.11E-10 | 5.47E-10 | 1.12 |
| 21-Nov | 6.31E-10 | 6.28E-10 | 5.69E-10 | 1.10 |
| 22-Nov | 6.93E-10 | 7.18E-10 | 6.15E-10 | 1.17 |
| 23-Nov | 5.98E-10 | 5.75E-10 | 5.65E-10 | 1.02 |
| 26-Nov | 5.87E-10 | 5.58E-10 | 5.51E-10 | 1.01 |
| 28-Nov | 5.69E-10 | 5.35E-10 | 5.32E-10 | 1.01 |
| 30-Nov | 5.09E-10 | 4.63E-10 | 4.61E-10 | 1.00 |
| 6-Dec | 5.83E-10 | 5.38E-10 | 5.32E-10 | 1.01 |
| T | Apparent Charge | Apparent Charge + | Apparent Charge - | Ratio |
| 14-Nov | 6.00E-10 | 6.47E-10 | 6.24E-10 | 1.04 |
| 15-Nov | 6.18E-10 | 6.70E-10 | 6.42E-10 | 1.04 |
| 16-Nov | 5.74E-10 | 5.74E-10 | 6.37E-10 | 0.90 |
| 19-Nov | 6.14E-10 | 6.62E-10 | 6.23E-10 | 1.06 |
| 21-Nov | 6.37E-10 | 6.89E-10 | 6.57E-10 | 1.05 |
| 22-Nov | 6.92E-10 | 7.57E-10 | 7.05E-10 | 1.07 |
| 23-Nov | 6.01E-10 | 6.21E-10 | 6.28E-10 | 0.99 |
| 26-Nov | 6.19E-10 | 6.36E-10 | 6.42E-10 | 0.99 |
| 28-Nov | 5.88E-10 | 6.02E-10 | 6.17E-10 | 0.98 |
| 30-Nov | 5.17E-10 | 5.50E-10 | 5.27E-10 | 1.04 |
| 6-Dec | 5.91E-10 | 6.24E-10 | 5.84E-10 | 1.07 |

Lampiran 3 Diagram Satu Baris PLTGU Priok



Generator GT 1.2 dalam sistem PLTGU Priok

Lampiran 4 Foto Pengukuran PD Generator GT 1.2 PLTGU Priok

