



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS *PARTIAL DISCHARGE* PADA PENGUJIAN KABEL XLPE
TEGANGAN MENENGAH SATU INTI DAN TIGA INTI**

SKRIPSI

PUNGKIE OKTHARIA HERMAWAN

0806315894

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS *PARTIAL DISCHARGE* PADA PENGUJIAN KABEL XLPE
TEGANGAN MENENGAH SATU INTI DAN TIGA INTI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana

PUNGKIE OKTHARIA HERMAWAN

0806315894

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

DEPOK


JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

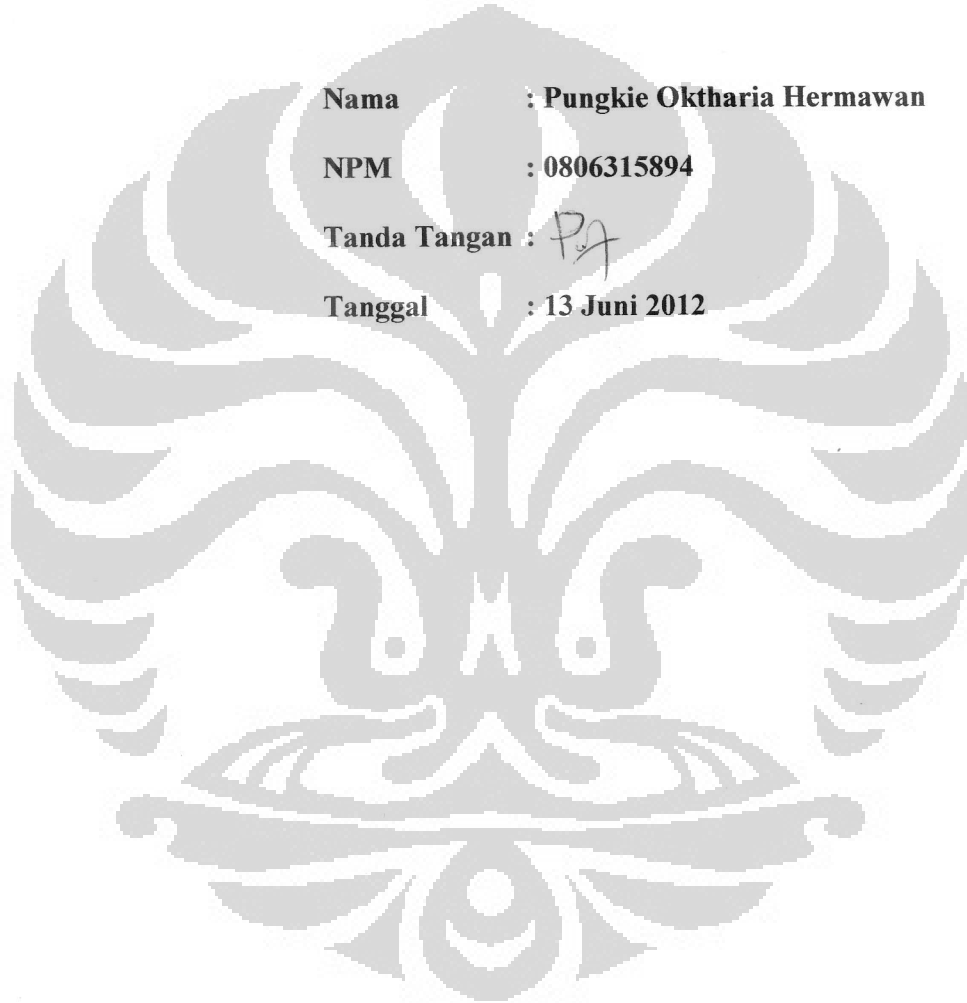
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Pungkie Oktharia Hermawan

NPM : 0806315894

Tanda Tangan : 

Tanggal : 13 Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Pungkie Oktharia Hermawan
NPM : 0806315894
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis *Partial Discharge* pada Pengujian Kabel
XLPE Tegangan Menengah Satu Inti dan Tiga Inti

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima 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. Agus R. Utomo M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2012

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur hanya kepada Allah SWT karena atas berkah dan rahmatNya, penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih memiliki banyak kekurangan, karenanya penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk terus berlangsungnya proses pembelajaran. Banyak pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M. K. M. T, selaku Dosen Pembimbing,
2. Bapak Satyagraha, Bapak Aji Firman, Bapak Supriatna, Bapak Nano, Bapak Wasis, dan Bapak Rohman, yang telah membantu dan membimbing penulis selama pengujian dan pengambilan data,
3. Kedua orangtua dan kedua kakak penulis, atas cinta, doa dan dukungan yang terus diberikan kepada penulis,
4. Teman – teman satu perjuangan (Ari, De'a, Fajar, Heru, dan Irfan) dan Wawan, yang tidak jera memberikan asupan semangat dan bantuan,
5. Seluruh asisten laboratorium TTPL (Ari, Pandu, Danyos, Isab, Fidel, Angga dan Kelvin) atas kebahagiaan di setiap harinya,
6. Teman-teman Elektro UI angkatan 2008 yang selalu tertawa bersama dalam kondisi apapun,
7. Keluarga besar Departemen Teknik Elektro, baik para dosen, karyawan, serta teman – teman teknik elektro dan komputer,

dan semua pihak yang telah membantu dalam penulisan skripsi ini, namun tidak dapat disebutkan satu persatu. Akhir kata, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat yang seluas-luasnya bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 13 Juni 2012

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Pungkie Oktharia Hermawan
NPM : 0806315894
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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


ANALISIS *PARTIAL DISCHARGE* PADA PENGUJIAN KABEL XLPE
TEGANGAN MENENGAH SATU INTI DAN TIGA INTI

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan 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 : 13 Juni 2012

Yang menyatakan,



(Pungkie Oktharia Hermawan)

ABSTRAK

Nama : Pungkie Oktharia Hermawan
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis *Partial Discharge* pada Pengujian Kabel XLPE
Tegangan Menengah Satu Inti dan Tiga Inti

Pertumbuhan kelistrikan diproyeksikan akan terus meningkat seiring dengan program peningkatan rasio elektrifikasi dan pertumbuhan daerah perumahan yang akan terus menjamur di wilayah pinggiran kota mendorong peningkatan linear akan pemakaian kabel XLPE yang menjadi produk unggulan dalam sistem distribusi tegangan menengah. Meskipun menjadi unggulan, kabel XLPE masih memiliki permasalahan utama akan kegagalan isolasi yang berupa pemohonan listrik ataupun pemohonan air. Kedua masalah ini berawal dari adanya *partial discharge*, dimana dapat ditentukan oleh adanya kontaminan, seperti void (rongga udara) di dalam isolasi kabel. Dengan diadakannya *type test* oleh PT. PLN (Persero) PUSLITBANG Ketenagalistrikan pada kabel yang akan diproduksi, dimana pada mata uji pengujian *partial discharge* diperoleh hasil pengujian bahwa parameter ukuran kabel tidak mempengaruhi besarnya *partial discharge*, sedangkan parameter suhu memiliki pengaruh linear terhadap besarnya *partial discharge* terukur, selain itu terdapat faktor lain yang dapat mempengaruhi besarnya hasil pengujian.

Kata kunci: *Partial discharge*, Peluahan Sebagian, Kabel XLPE, *Type Test*

ABSTRACT

Name : Pungkie Oktharia Hermawan
Major : Electrical Engineering
Title : Partial Discharge Analysis in Single Core and Three Cores
Medium Voltage XLPE Cable Test

Projected growth in electricity will continue to increase along with the electrification ratio improvement program and the growth of the residential area which will keep mushrooming in the suburb regions that will encourage linear increasing in use of the XLPE cable as a flagship product in the medium voltage distribution system. In spite of being seeded, XLPE cable still has the main problem against the insulation failure, namely electrical treeing or water treeing. Both these issues were derived from the existence of partial discharge, which can be determined by the presence of contaminants, such as voids (air cavity) in the cable insulation. As the type test that held by PT. PLN (Persero) PUSLITBANG Ketenagalistrikan on the cable that will be produced, in which the partial discharge test obtained the test results that the cable size parameter does not affect the partial discharge measured, whereas the temperature parameter has linear effect in partial discharge measured, in addition there are another factors that affect the partial discharge measured.

Keywords: *Partial discharge*, XLPE Cable, Type Test

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metodologi Penelitian	2
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1 Kabel Tanah.....	4
2.1.1 Bagian – bagian Kabel Tanah.....	5
2.1.2 Isolasi Kabel Tanah	9
2.2 Kabel Cross - Linked Polyethylene (XLPE)	11
2.2.1 Polyethylene (PE).....	11
2.2.2 Cross – Linked Polyethylene (XLPE)	16
2.2.3 Proses Pembuatan Isolasi XLPE.....	17
2.3 <i>Partial discharge</i>	19
2.3.1 Sifat Dielektrik pada Kabel	19
2.3.2 Pembentukan Rongga Udara (Void).....	22
2.3.3 Pengertian <i>Partial discharge</i>	22
2.3.4 Mekanisme Terjadinya <i>Partial discharge</i>	23

2.3.5	Efek <i>Partial discharge</i>	26
2.4	Pengujian Kabel Tanah.....	27
2.4.1	Jenis Pengujian Kabel Tanah.....	28
2.4.1	Mata Uji Pengujian Kabel Tanah	29
BAB III	METODE/TEKNIK PENGUJIAN.....	30
3.1	Pengujian Kabel (Mekanis).....	30
3.1.1	<i>Bending Test</i>	31
3.1.2	<i>Heating Cycle Test</i>	32
3.2	Metode Pengujian <i>Partial discharge</i>	37
BAB IV	DATA DAN ANALISIS.....	43
4.1	Data Hasil Pengujian	43
4.1.1	Data Hasil Pengujian <i>Partial discharge</i> setelah <i>Bending Test</i>	43
4.1.2	Data Hasil Pengujian <i>Partial discharge</i> setelah <i>Heating Cycle Test</i>	44
4.2	Analisis Data Hasil Pengujian.....	45
4.2.1	Analisis Hubungan Ukuran Kabel dengan Nilai <i>Partial discharge</i>	45
4.2.2	Analisis Hubungan Suhu Terhadap Nilai <i>Partial discharge</i>	50
4.2.3	Analisis Tambahan	56
BAB V	KESIMPULAN.....	57
DAFTAR	ACUAN	58

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti	43
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti	44
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti	44
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti	45
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti A.....	52
Tabel 4.6	Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti B.....	53
Tabel 4.7	Hasil Pengujian Inti 1 pada Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti	55
Tabel 4.8	Hasil Pengujian Inti 2 pada Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti	55
Tabel 4.9	Hasil Pengujian Inti 3 pada Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Bagian Utama Kabel.....	7
Gambar 2.2	Bagian Pelengkap Kabel.....	8
Gambar 2.3	Rantai Polietilena.....	12
Gambar 2.4	Gulungan Rantai Polietilena.....	13
Gambar 2.5	Jenis – jenis Rantai Polietilena.....	14
Gambar 2.6	<i>Cristallinity</i> pada Rantai Polietilena.....	15
Gambar 2.7	Pembentukan Rantai Polietilena.....	17
Gambar 2.8	Void pada Bagian Internal Isolasi Kabel.....	21
Gambar 2.9	Rangkaian Pengganti Gambar 2.8.....	21
Gambar 2.10	Rangkaian Pengganti Void dalam Isolasi.....	24
Gambar 2.11	Pemohonan Listrik.....	26
Gambar 2.12	Pemohonan Air.....	27
Gambar 3.1	<i>Bending Test</i>	32
Gambar 3.2	Foto <i>Current Transformer</i> (CT).....	33
Gambar 3.3	Foto <i>Slide Regulator</i>	33
Gambar 3.4	Foto <i>Thermorecorder</i>	34
Gambar 3.5	Foto <i>Thermocontrol</i>	35
Gambar 3.6	Foto Kabel XLPE Uji.....	35
Gambar 3.7	Foto <i>Timer</i>	36
Gambar 3.8	Grafik <i>Heating Cycle Test</i>	37
Gambar 3.9	Pengupasan Kabel XLPE.....	38
Gambar 3.10	Rangkaian Pengujian <i>Partial Discharge</i>	38
Gambar 3.11	Foto Rating Trafo.....	39
Gambar 3.12	Foto <i>Slide Regulator</i>	39
Gambar 3.13	Foto Laptop (<i>Interface Pengujia</i>).....	40
Gambar 3.14	Foto <i>Partial discharge Detector</i>	41
Gambar 3.15	Foto Kapasitor <i>Coupling</i>	41
Gambar 3.16	Foto Filter Tegangan.....	42
Gambar 4.1	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Satu Inti	

	Sebelum <i>Heating Cycle Test</i>	46
Gambar 4.2	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Satu Inti Setelah <i>Heating Cycle Test</i>	47
Gambar 4.3	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Tiga Inti Sebelum <i>Heating Cycle Test</i>	48
Gambar 4.4	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Tiga Inti Setelah <i>Heating Cycle Test</i>	49
Gambar 4.5	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Satu Inti A.....	51
Gambar 4.6	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> Kabel Satu Inti B.....	53
Gambar 4.6	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> pada Inti 1 Kabel Tiga Inti.....	54
Gambar 4.6	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> pada Inti 2 Kabel Tiga Inti.....	54
Gambar 4.6	Grafik Ukuran Kabel vs <i>Partial Discharge</i> pada Inti 3 Kabel Tiga Inti.....	55

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kabel tanah *cross – linked polyethylene* atau yang lebih dikenal dengan kabel XLPE merupakan jenis kabel yang paling banyak digunakan saat ini sebagai kabel saluran distribusi bawah tanah. Penggunaan ini kemungkinan akan terjadi peningkatan mengingat akan adanya peningkatan rasio elektrifikasi, serta keunggulan - keunggulan yang ditawarkan oleh kabel XLPE ini.

Peningkatan akan rasio elektrifikasi tentunya menuntut adanya penambahan jumlah saluran distribusi, baik saluran distribusi udara maupun saluran distribusi bawah tanah. Selain itu, pembangunan pemukiman yang berada di daerah perluasan kota kian marak, juga akan meningkatkan jumlah saluran distribusi bawah tanah, melihat dari sisi keindahan serta keamanan yang diberikan. Dengan peningkatan ini tentunya akan ada peningkatan jumlah pemakaian kabel bawah tanah, terutama yang menggunakan isolasi berupa *cross – linked polyethylene*.

Di sisi lain, keunggulan – keunggulan yang diberikan isolasi XLPE ini dalam tugasnya sebagai kabel saluran bawah tanah akan menjadikan kabel XLPE sebagai pilihan utama untuk saat ini. Dengan keunggulan seperti daya tahan suhu yang tinggi, daya tahan akan stress mekanikal ataupun elektrik yang tinggi, tahan terhadap cahaya ultraviolet, memiliki ketahanan oksidasi dan reaksi kimia yang baik, dan keunggulan lainnya.

PT PLN (Persero), sebagai penyedia layanan kelistrikan di Indonesia merupakan konsumen akan kabel XLPE yang berasal dari berbagai macam produsen yang terpercaya. Untuk mendapatkan kualitas terbaik, tentunya PT PLN (Persero) memiliki standar untuk kabel yang akan digunakan, sebagai contoh SPLN, SNI dan IEC. Untuk memenuhi standar tersebut dilakukan pengujian agar mendapat parameter – parameter yang ditentukan pada standar. Salah satu poin penting pada pengujian adalah nilai *partial discharge*, karena hal ini merupakan salah satu masalah yang ada pada kabel XLPE. Oleh karena itu, dilakukan analisis pada pengujian *partial discharge* ini, dimaksudkan untuk mengetahui parameter -

parameter apa saja yang bisa mempengaruhi nilai pengujian *partial discharge* tersebut.

1.2 Tujuan

Tujuan dari skripsi ini adalah untuk melakukan analisis pengujian *partial discharge* pada kabel XLPE tegangan menengah 20 kV dengan diameter yang berbeda - beda, baik kabel XLPE 1 inti maupun tiga inti, serta pengaruh *heating cycle test* pada pengujian *partial discharge*, berdasarkan standar yang digunakan, yaitu SPLN 43 – 5 - 3, dan IEC 60502 - 2.

1.3 Pembatasan Masalah

Pembahasan skripsi ini hanya pada,

1. Pengujian *partial discharge* yang dilakukan merupakan bagian dari rangkaian pengujian jenis/*type test* kabel XLPE yang dilakukan oleh PLN PUSLITBANG.
2. Pengujian yang dilakukan dalam kondisi lingkungan yang diabaikan, seperti suhu lingkungan, dan kelembaban.
3. Analisis data hasil pengujian *partial discharge* pada kabel XLPE, hanya mengacu pada standar yang digunakan, yaitu IEC 60502 – 2, dan SPLN 43 – 5 – 3.

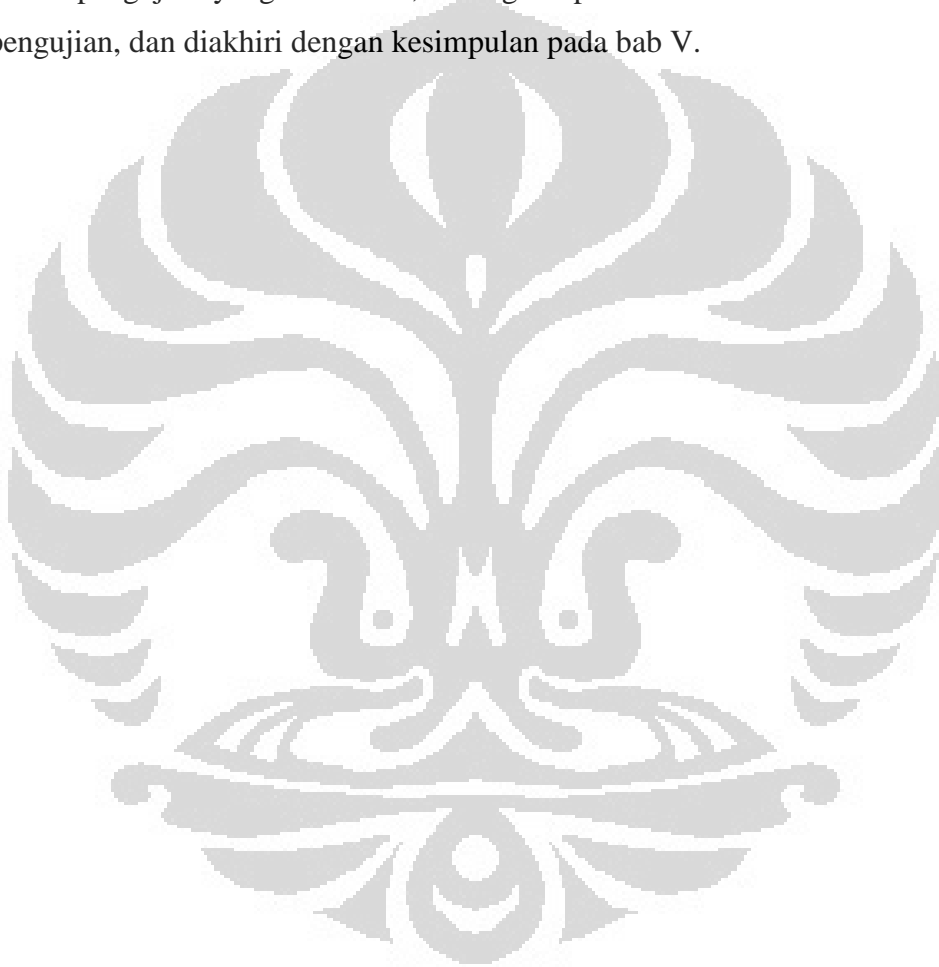
1.4 Metodologi Penulisan

Adapun metodologi yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah dengan cara :

1. Melakukan studi pustaka, untuk mendapatkan dasar – dasar dalam melakukan pengujian dan analisis data.
2. Diskusi dengan pembimbing, serta orang terkait dalam pengujian (pegawai PLN Puslitbang)
3. Melakukan pengamatan pada pengujian kabel yang dilakukan serta analisis terhadap hasil pengujian kabel XLPE, yaitu *partial discharge* setelah *bending test*, serta *partial discharge* setelah *heating cycle test*, berdasarkan literatur – literatur yang ada.

1.5 Sistematika Penulisan

Pada skripsi ini dibagi menjadi lima bab, dimana pada bab I yang menjelaskan tentang pendahuluan, meliputi latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah yang diambil, metodologi penulisan yang dilakukan serta sistematika penulisan skripsi. Pada bab II dibahas tentang teori penunjang yang digunakan untuk mendukung penelitian serta penulisan skripsi ini, seperti tentang kabel, *partial discharge* serta pengujian kabel. Bab III berisi tentang metode / teknik pengujian yang dilakukan, sedangkan pada bab IV dilakukan analisis hasil pengujian, dan diakhiri dengan kesimpulan pada bab V.



BAB II

DASAR TEORI

Dalam sistem tenaga listrik, saluran distribusi merupakan rantai penghubung antara pusat – pusat pembangkit tenaga serta saluran transmisi dengan pusat – pusat beban. Pada sistem penyalurannya, kebanyakan menggunakan kabel sebagai sarana aliran arus daya yang dikirimkan, baik melalui saluran udara (*overhead line*), saluran bawah tanah (*underground*), maupun saluran bawah laut (*submarine*). Pemakaian sistem ini bergantung pada kebutuhan serta kondisi dimana sistem akan diterapkan, seperti saluran udara lebih banyak digunakan pada daerah pedesaan, atau lokasi dimana jauh dari pemukiman penduduk yang membutuhkan nilai estetika yang tinggi seperti perkotaan, sebaliknya saluran bawah tanah banyak sekali digunakan di perkotaan untuk menghindari resiko bahaya yang terjadi pada pemukiman padat penduduk tanpa mengurangi keindahan lingkungan.

2.1 Kabel Tanah

Kabel Tanah adalah salah satu/beberapa kawat yang diisolasi, sehingga tahan terhadap tegangan tertentu antara penghantar yang satu dengan penghantar yang lain ataupun penghantar dengan tanah serta dibungkus dengan pelindung, sehingga terhindar dari pengaruh-pengaruh kimia lain yang ada dalam tanah. Oleh karena kabel tanah tersebut beroperasi dalam tanah, maka komponen termasuk kabel harus mampu beroperasi secara terus menerus karena memiliki persyaratan isolasi yang khusus untuk melindunginya dari segala bentuk pengaruh lingkungan (air, kelembaban, kondisi tanah, ataupun hewan) yang terdapat di dalam tanah. Menurut publikasi IEC nomor 502, kabel berisolasi adalah kabel listrik yang terdiri dari kabel berinti tunggal ataupun kabel berinti banyak untuk instalasi tetap dibawah tanah, di atas tanah atau digantungkan.

Pada kabel listrik (kabel tanah), terdapat kode pengenal jenis kabel, untuk Indonesia sendiri menggunakan standar VDE 0237, yang beberapa poinnya juga tercantum pada SPLN 1994, yaitu sebagai berikut :

N : Kabel dengan penghantar tembaga

NA	: Kabel dengan penghantar aluminium
2X	: Isolasi Cross – Linked Polyethylene (XLPE)
Y	: Isolasi PVC (huruf Y pertama pada kode pengenal jenis)
Y	: Selubung PVC (huruf Y kedua pada kode pengenal jenis)
2Y	: Isolasi Polyethylene (huruf 2Y pertama pada kode pengenal jenis)
2Y	: Selubung Polyethylene (huruf 2Y kedua pada kode pengenal jenis)
S	: Lapisan pita tembaga
SE	: Lapisan pita tembaga untuk tiap inti
C	: Lapisan kawat tembaga konsentris
F	: Perisai kawat baja pipih digalvanisasi
R	: Perisai kawat baja bulat digalvanisasi
Gb	: Spiral pita baja
B	: Perisai pita baja ganda
re	: Penghantar bulat dan padat
rm	: Penghantar bulat dipilin

Sebagai contoh, kabel NA2XSY, berarti kabel tersebut berkonduktor aluminium, dengan isolasi berupa XLPE, dengan lapisan pita tembaga, serta selubung berbahan PVC. Selain itu, pada kabel listrik (kabel tanah) terdapat pengenal tegangan, seperti 6/10 (12) kV atau 12/20 (24) kV, yang bila berdasarkan SPLN dapat diterjemahkan dengan tanda huruf U_0/U (U_m), yang memiliki arti sebagai berikut :

U_0	: Tegangan yang diukur antara penghantar dan bumi atau netral (<i>phase to neutral voltage</i>)
U	: Tegangan yang diukur antar masing – masing penghantar (<i>phase to phase voltage</i>)
U_m	: Tegangan (sistem) maksimum dimana kabel dipasang

2.1.1 Bagian – bagian Kabel Tanah

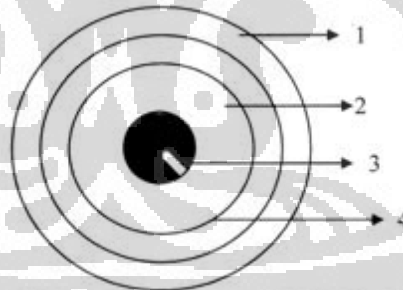
Secara umum, konstruksi kabel dibagi menjadi dua bagian, yaitu :

- Bagian utama terlihat pada gambar 2.1, yang terdiri atas :

1. Selubung (sheath), diletakkan di luar diameter isolasi, dimana memiliki fungsi sebagai pelindung terhadap korosi, penahan gaya mekanis, pengaman terhadap gaya elektrik, pencegah keluarnya minyak (pada kabel dengan isolasi kertas yang diresapi minyak), dan pencegah masuknya uap air /cairan ke dalam kabel. Selain itu, pada konstruksi kabel yang lain, selubung dengan bahan tembaga dapat berfungsi sebagai pembawa arus netral atau arus hubung singkat menuju ke tanah pada saat terjadi gangguan. Bahan yang sering digunakan sebagai selubung, yaitu timah hitam, aluminium, dan thermoplastic.
2. Isolasi, fungsi isolasi adalah untuk memisahkan konduktor yang membawa tegangan terhadap bagian lainnya sama baiknya terhadap tanah. Lebih dari itu, isolasi pada kabel tanah harus menahan tekanan listrik yang disebabkan oleh tegangan arus bolak – balik maupun tegangan transien tanpa mengalami kegagalan isolasi ataupun kegagalan dielektrik yang dapat menimbulkan hubung singkat. Dan sebagai tambahannya, isolasi juga melakukan fungsi mekanis dan harus mampu menahan penekanan termal dan kimia serta juga memiliki daya tahan yang lama atau usia daya tahannya di bawah jenis-jenis penekanan yang bervariasi sehingga isolasi sendiri sangat menentukan kapasitas listrik yang dihantarkan kabel. Bahan isolasi yang sering digunakan bermacam – macam, dapat dikelompokkan menjadi isolasi padat, isolasi cair, dan isolasi gas. Tipe bahan isolasi ini sangat mempengaruhi rating kabel tenaga listrik tersebut, dari sudut pandang panas yang dihasilkan, bahan isolasi yang baik akan mempunyai *thermal resistivity* yang kecil serta mempunyai *dielectric losses* yang rendah.
3. Konduktor/penghantar, bagian yang berfungsi untuk menghantarkan arus listrik sehingga memiliki tahanan jenis yang kecil. Konstruksi dari konduktor kabel tanah berperan penting dalam menentukan rating kabel tanah itu sendiri. Salah satu parameter dalam perhitungan rating kabel tanah adalah diameter konduktor kabel, dimana semakin besar diameter konduktor kabel tanah tersebut maka kapasitas hantar arus kabel tanah itu pun semakin besar. Penghantar yang digunakan biasanya berbentuk

bulat tak berongga, dimana kawat dipilin secara sempurna membentuk lingkaran agar fleksibel. Pada umumnya konduktor yang digunakan pada kabel terbuat dari bahan tembaga ataupun aluminium.

4. Tabir, merupakan suatu lapisan yang ada pada kabel, dimana terdapat dua jenis tabir, yaitu tabir hantaran dan tabir isolasi. Tabir hantaran membungkus penghantar dan membatasinya terhadap isolasi. Fungsi tabir hantaran ini adalah untuk meratakan medan listrik pada konduktor sehingga diperoleh distribusi medan listrik yang radial dan homogen. Sedangkan tabir isolasi adalah tabir yang terletak antara isolasi dengan selubung, yang berfungsi agar stress medan listrik menjadi homogen terhadap bumi. Selain itu, tabir isolasi berfungsi juga sebagai pencegah adanya interferensi gelombang elektromagnetik dengan kabel telekomunikasi yang ditanam di dekatnya. Jenis bahan yang sering digunakan sebagai tabir antara lain, karbon grafit, pita kertas yang dikombinasikan dengan metal tertentu, serta kertas dengan pengisian grafit.



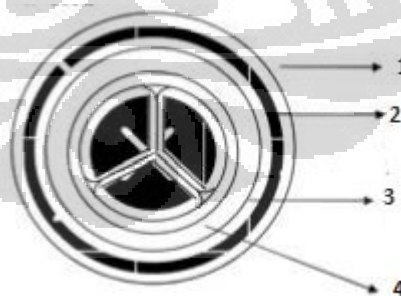
Gambar 2.1 Bagian Utama Kabel

Sumber : Daman Susanto : Sistem Distribusi Tenaga Listrik

- b. Bagian pelengkap terlihat pada gambar 2.2, yang terdiri atas :
 1. Sarung kabel, merupakan suatu lapisan bahan serat yang diresapi dengan campuran kedap air yang berfungsi sebagai bagian terluar yang melindungi kabel dari serangan rayap. Fungsi lain dari sarung kabel adalah sebagai penahan mekanis, serta mencegah masuknya air/cairan dari luar ke dalam kabel. Bahan yang sering digunakan sebagai sarung

kabel tanah ini adalah jute/goni, karet rubber sandwich, PE, dan Poly Chloroprene.

2. Perisai, digunakan sebagai pelindung isolasi dari kerusakan mekanis serta untuk mendapatkan kekuatan tarik yang tinggi. Biasanya terbuat dari baja. Penggunaan baja sebagai perisai suatu kabel tanah berinti tunggal akan mengakibatkan tingginya medan magnet serta rugi – rugi hysteresis kabel sehingga menurunkan rating kabel tersebut. Oleh karena itu, untuk memperoleh rating kabel tanah yang lebih baik digunakanlah bahan *non – magnetic*, seperti aluminium ataupun tembaga.
3. Bantalan, merupakan lapisan yang digunakan sebagai bantalan/tempat duduk perisai, dan juga mencegah proses elektrolisa sehingga tidak merusak bagian dalamnya. Dengan fungsi tersebut, bantalan harus memiliki sifat tahan akan perubahan suhu, tidak bereaksi dan melekat dengan sempurna pada selubung, penguat, atau pelindung serta tidak mudah sobek. Bahan yang sering digunakan adalah pita kapas, pita kertas ataupun jute/goni.
4. Bahan pengisi, berfungsi untuk mengisi bagian kosong pada kabel agar kabel berbentuk bulat, sebagai contoh pada kabel tiga inti dimana terdapat celah setelah pemasangan ketiga intinya. Bahan pengisi biasanya berupa jute, dan karet butyl



Gambara 2.2 Bagian Pelengkap Kabel

Sumber : Damam Susanto : Sistem Distribusi Tenaga Listrik

2.1.2 Isolasi Kabel Tanah

Isolasi pada kabel tegangan tinggi ataupun menengah tidak hanya berfungsi sebagai penyekat atau pengaman dari bagian yang bertegangan saja, tetapi juga berfungsi sebagai pendukung kerja dari sistem transmisi itu sendiri sehingga terdapat bermacam – macam bahan isolasi yang digunakan untuk mendapatkan performa yang berbeda – beda. Penentuan bahan isoalsi kabel yang digunakan disesuaikan dengan beberapa faktor, antara lain sifat fisis dan penuaan bahan isolasi, tahanan isolasi, permitivitas bahan/konstanta dielektrik, kondisi sekitar tempat pemasangan, hingga biaya. Adapun beberapa jenis bahan isolasi yang sering digunakan, antara lain :

a. Isolasi kertas

Kabel tanah berisolasi kertas dapat digunakan untuk tegangan tinggi sampai 400 KV, baik untuk kabel minyak bertekanan rendah (*low pressure oil filled* – LPOF) yang terpadu dalam satu kabel (*self contained*) dan kabel berisolasi kertas yang dimasukkan kedalam pipa, lalu diisi dengan minyak bertekanan tinggi (*high pressure oil filled* – HPOF).

Kertas sebagai isolasi dapat berupa kertas kering maupun kertas yang diresapi minyak. Pada saat dibuat di pabrik (*oil impregnated paper*), dimana kekuatan dielektrik kertas itu tergantung pada ketebalan, kepadatan ketahanan terhadap air (*impermeability*), kekuatan tarik (*tensile strength*), kemuluran (*elongation*), permitivitas relatif, faktor disipasi dan kekuatan tembus listriknya. Peresapan kertas dengan minyak pada kabel tegangan tinggi (diatas 30 KV), dimaksudkan untuk menghindari agar serat-serat kertas tidak pecah karena terbentuknya kantong-kantong udara (void) atau gas dalam kertas isolasi yang dapat berkembang dan mengkerut menjadi bagian-bagian yang tidak sama, dengan bertambahnya panas pada siklus beban. Tekanan pada kantong udara ini tinggi, sehingga terjadi pelepasan muatan (*discharge*) yang menimbulkan panas dan dapat menghanguskan kertas. Dengan kata lain kertas sebagai isolasi mengalami “*partial discharge*” yang mengakibatkan kegagalan isolasi (*breakdown insulation*).

b. Isolasi campuran dan diresapi minyak

Pada hakikatnya kabel dengan jenis isolasi campuran dan diresapi minyak adalah kabel yang berisolasi kertas yang diresapi minyak pada saat dibuat (*oil impregnated paper*), dimana didalam kabel tersebut dialiri dengan minyak yang bertekanan minyak. Dalam hal ini, yaitu berfungsi sebagai isolasi listrik yang memperkuat dielektrik pada kertas isolasi dan media pendingin kabel. Kabel (isolasi) kertas yang diresapi minyak (*oil impregnated*) biasanya digunakan untuk saluran transmisi bawah tanah, meskipun untuk tegangan dibawah 35 kV kabel plastik atau kabel butyl juga dipakai. Sebagai penghantar biasanya digunakan kawat tembaga berlilit (*annealed stranded*), meskipun kawat aluminium berlilit (karena ringan) juga dipakai untuk kabel udara. Sebagai pembungkus sering digunakan timah hitam, meskipun aluminium sekarang juga disukai, bukan saja untuk kabel udara, tetapi juga untuk kabel minyak. Sebagai kulit pelindung digunakan pita baja untuk kabel tiga-kawat yang ditaruh langsung dan kawat baja untuk kabel tiga-kawat yang ditaruh didasar laut. Kawat tembaga, kawat baja tahan karat dan kawat aluminium digunakan bila kabel satu-kawat dipasang dengan tarikan.

c. Isolasi PVC

Merupakan jenis kabel yang berkawat satu atau lebih, berisolasi dan berselubung PVC, tegangan nominal 500 volt. Kabel NYM biasanya digunakan untuk instalasi biasa di dalam gedung, dalam ruang kering maupun lembab dan di atas atau di bawah semen. Di samping itu, karena kemampuan mengalirkan arus yang lebih besar, pada umumnya dapat digunakan kabel XLPE dengan ukuran penghantar satu tingkat di bawah kabel kertas.

d. Isolasi XLPE

Dari segi isolasi, XLPE memiliki ketahanan kerja lebih baik, namun harganya lebih mahal dibandingkan dengan isolasi sintetis jenis lain. XLPE mempunyai karakteristik paling baik, tetapi pada umumnya isolasi sintetis mempunyai kelebihan di bandingkan dengan isolasi kertas yaitu :

a) Lebih bersih

- b) Ringan, karena tak memerlukan selubung logam
- c) Perbaikan dan pemeliharannya mudah
- d) Cara penyambungannya sederhana
- e) Suhu kerjanya lebih tinggi (khusus XLPE), karena itu kapasitas penyalurannya besar.

Isolasi XLPE digunakan pada kabel yang bertegangan mencapai 110 kV atau biasa digunakan pada kabel tegangan menengah. Keuntungan dari isolasi XLPE adalah :

- a) Suhu kerja lebih tinggi sehingga dapat dialiri arus yang lebih tinggi.
- b) Bobot yang ringan.
- c) Bisa digunakan pada frekuensi tinggi.

Adapun permasalahan yang terdapat pada isolasi XLPE adalah lebih sensitif terhadap pelepasan muatan (*partial discharges*), yang kemudian menjadikan umur bahan yang tidak terlalu lama. Apabila sering terjadi pelepasan muatan maka disini akan terjadi suatu kegagalan pada isolasi tersebut, yaitu mengalirnya muatan pada isolasi. Hal ini tidak diinginkan, karena ini sangat berpengaruh terhadap umur bahan. Bentuk kegagalan yang dominan adalah kegagalan thermal, yang dipengaruhi oleh suhu dari kabel tersebut akibat dialiri oleh tegangan, khususnya tegangan bolak – balik.[6]

2.2 Kabel Cross - Linked Polyethylene (XLPE)

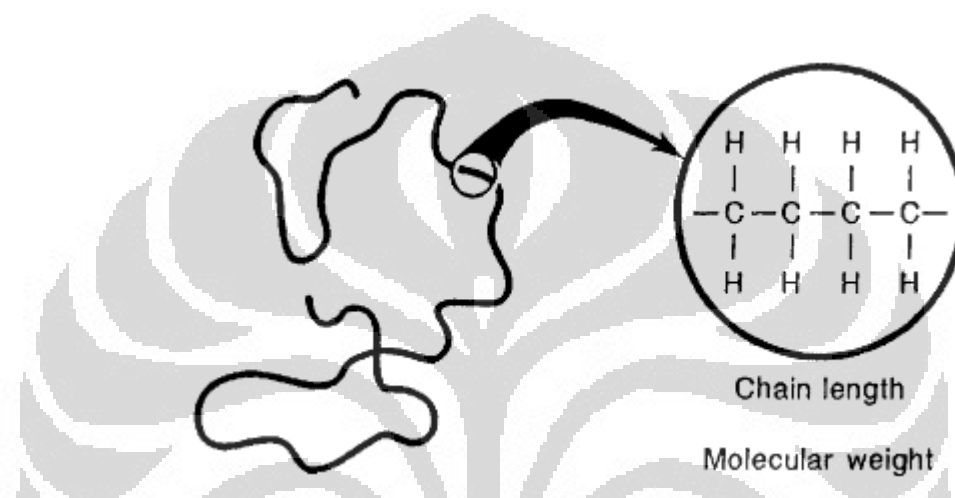
Pada saat ini, kabel – kabel distribusi tegangan menengah banyak menggunakan isolasi jenis XLPE, dikarenakan keandalannya. Kabel XLPE sendiri memiliki ketahanan tegangan yang baik, serta cocok digunakan pada daerah tropis dimana suhu kerja kabel akan tinggi.

2.2.1 Polyethylene (PE)

Polyethylene atau polietilena merupakan polimer hidrokarbon yang secara eksklusif terdiri dari karbon dan hidrogen. Polietilena ini berasal dari hasil polimerisasi monomer etilena.



Polietilena termasuk ke dalam polimer yang dikenal dengan polyolefins, yaitu polimer yang diproduksi dengan berbagai macam proses. Sifat polimer yang terbentuk dikontrol oleh proses manufaktur, dimana kontrol akan struktur kimia yang tepat akan menghasilkan sifat polimer yang sesuai. Pada polietilena, struktur hidrokarbonnya cukup sederhana, seperti yang tertulis di atas. Namun, struktur polietilena yang sebenarnya lebih kompleks.



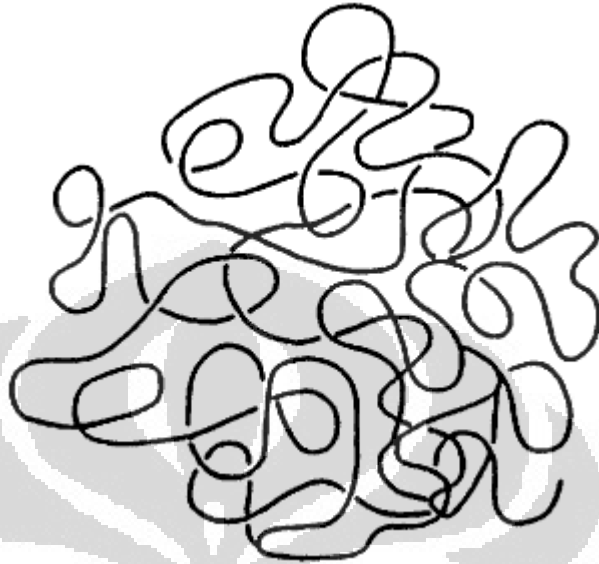
Gambar 2.3 Rantai Polietilena

Sumber : H. Lee Willis : Electrical Power Cable Engineering

Garis yang berlekuk – lekuk di atas dimisalkan sebagai rantai karbon dan panjang dari rantai karbon menentukan berat molekul. Semakin panjang rantai karbon maka semakin berat molekul, begitupun sebaliknya. Berat molekul ini meningkat seiring meningkatnya jumlah grup molekul etilena. Polietilena sendiri, biasanya terdiri atas beberapa rantai dan panjangnya bervariasi. Oleh karena itu, polietilena terdiri atas rantai - rantai polimer yang memiliki berat molekul yang bervariasi. Pada kabel tegangan menengah yang menggunakan isolasi polietilena, material polimer yang digunakan adalah *high molecular* sehingga panjang rata – ratanya tinggi. Hal ini dikarenakan adanya pernyataan bahwa semakin berat molekul penyusun maka semakin baik bahan tersebut menjadi isolasi suatu peralatan tenaga listrik.

Hal penting lain yang perlu diperhatikan adalah bahwa rantai polietilena pada kenyataannya memiliki kecenderungan untuk membentuk gulungan –

gulungan. Dengan kata lain, rantai polimer yang terbentuk tidak lurus tetapi cenderung memiliki bentuk yang random. Kecenderungan ini tidaklah bergantung pada berat molekul.

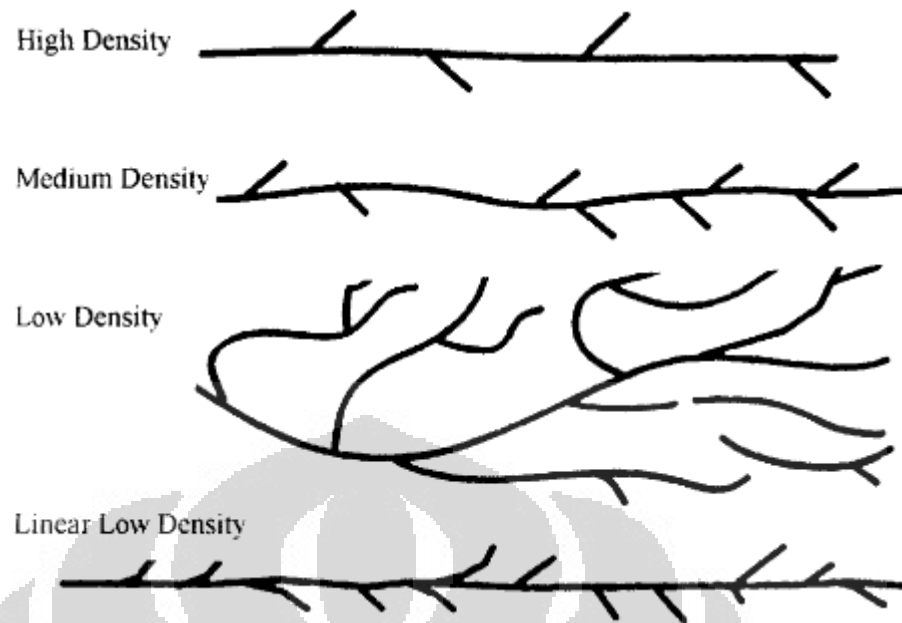


Gambar 2.4 Gulungan Rantai Polietilena

Sumber : H. Lee Willis : Electrical Power Cable Engineering

Kecenderungan untuk membentuk gulungan berarti juga bahwa rantai – rantai polietilena memiliki kecenderungan untuk membelit satu sama lain. Belitan – belitan ini terjadi ketika rantai – rantai tersebut terpisah dan akan tertahan untuk bergerak. Belitan – belitan ini menunjukkan polietilena yang baik, namun tidak menunjukkan kualitas daya tahan polietilena yang baik terhadap uap air.

Pada gambar di atas terlihat bahwa rantai polietilena linear, namun ketika diproduksi terdapat cabang – cabang dari rantai polietilena. Cabang – cabang ini juga berkontribusi pada berat molekul polietilena. Dengan adanya percabangan ini, dimungkinkan adanya dua molekul polietilena yang memiliki berat yang sama, namun memiliki panjang molekul yang berbeda. Berdasarkan percabangan tersebut, molekul – molekul polietilena dapat dibedakan *menjadi high density polyethylene, medium density polyethylene, low density polyethylene, dan linear low density polyethylene* yang dapat terlihat perbedaannya pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5 Jenis – jenis Rantai Polietilena

Sumber : H. Lee Willis : Electrical Power Cable Engineering

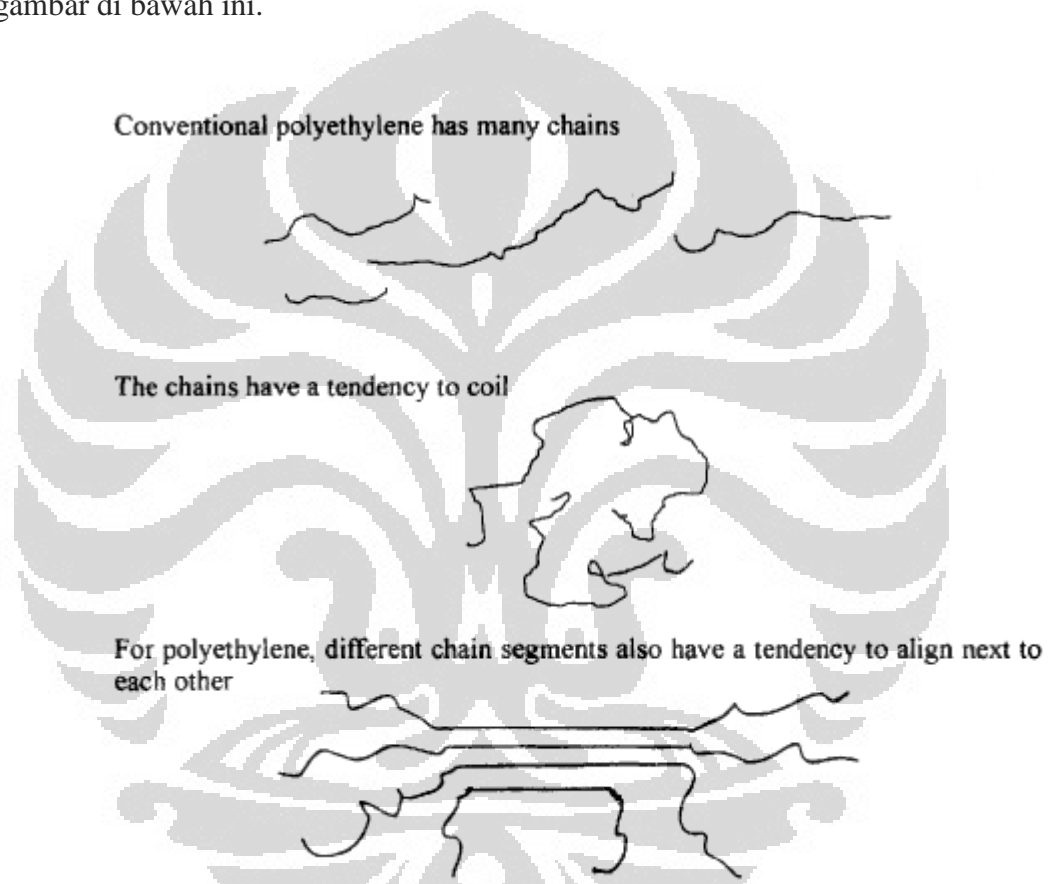
Berat molekul atau distribusi berat molekul merupakan salah satu cara untuk menjelaskan karakteristik isolasi polietilena. Namun, masih ada cara lain untuk menentukannya, yaitu dengan percabangan dan *crystallinity*. Percabangan seperti yang terlihat pada gambar di atas, merupakan hasil dari proses polimerisasi. Pada proses polimerisasi dengan proses tekanan tinggi menghasilkan jumlah percabangan yang banyak dibandingkan dengan proses polimerisasi saat ini yang menggunakan proses tekanan rendah. Percabangan berpengaruh terhadap proses kristalisasi dengan pengintervensian kemampuan rantai polietilena untuk berposisi sejajar satu sama lain. Rantai - rantai polimer yang tidak memiliki percabangan akan mampu berdekatan satu sama lain, namun ketika memiliki percabangan kemampuan rantai – rantai tersebut untuk saling berdekatan akan semakin kecil. Seperti terlihat pada gambar, terdapat tiga jenis polietilena berdasarkan tingkat percabangannya, yaitu *high density*, *medium density*, dan *low density*.

Low density dan *medium density* konon diproduksi dengan proses tekanan tinggi, sedangkan *high density* diproduksi dengan proses tekanan rendah menggunakan konsep katalis. Dengan perkembangan teknologi, proses produksi

polietilena pun berubah, sampai akhirnya diproduksi *linear low density polyethylene* (LLDPE), yang diproduksi dengan proses tekanan rendah.

Semakin tinggi tingkat densitasnya, maka tingkat kesejajaran rantai polietilena pun semakin tinggi dan “volume” dari rantai yang sejajar/membentuk barisan pun semakin tinggi.

Cristallinity merupakan kecenderungan suatu rantai polietilena untuk berposisi sejajar atau membentuk barisan. Secara sederhana dapat terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.6 *Crystallinity* pada Rantai Polietilena

Sumber : H. Lee Willis : Electrical Power Cable Engineering

Polietilena dengan posisi rantai – rantainya sejajar tidak dapat membentuk belitan, inilah yang disebut *crystalline*. Sedangkan rantai – rantai polietilena yang membentuk belitan, atau tidak dapat berposisi sejajar disebut dengan *amorphous*.

Pada gambar di atas, terdapat molekul polimer yang memiliki panjang rantai polimer yang berbeda, terdapat bagian yang berbaris yang disebut region

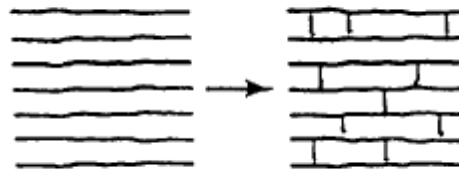
crystalline dan terdapat pula bagian yang tidak sejajar atau disebut region *amorphous*. Pada gambar tersebut juga menunjukkan bahwa tingkat posisi dari rantai polietilena tidaklah mempengaruhi berat molekul yang dibentuk. Bisa saja, high density polyethylene memiliki berat molekul yang besar, atau juga berat molekul yang ringan.

Namun region *crystalline* dapat memberikan sifat kokoh, modulus yang tinggi, dan resistansi yang tinggi terhadap gas dan cairan. Hal ini sesuai dengan sifat dari region *crystalline* dimana memiliki densitas yang tinggi karena tingkat kerapatan rantai polietilena yang lebih. Sedangkan region *amorphous* memiliki sifat yang fleksibel, sesuai dengan posisi rantai – rantainya yang terkesan jauh lebih bebas.

Dengan paparan – paparan di atas cukup jelas bahwa, polietilena merupakan material yang kompleks. Polietilena memiliki region *crystalline* dan region *amorphous*, sehingga disebut dengan *semicrystalline*. Region *amorphous* memungkinkan untuk masuknya bahan – bahan asing, seperti kotoran maupun ion ke dalam molekulnya, mengingat kerenggangan rantai – rantai polietilena yang terbentuk. Sedangkan region *crystalline* akan terlindung dari kotoran dan ion – ion, karena kerapatan rantai – rantainya. Namun, tidak mungkin membentuk isolasi yang berfungsi tanpa ada pencampuran kedua region tersebut.

2.2.2 Cross – Linked Polyethylene (XLPE)

Berdasarkan arti kata, cross – linked polyethylene merupakan penghubungan silang antara rantai polietilena yang berbeda. Lebih jelasnya, XLPE dapat dianggap sebagai rantai polietilena yang memiliki cabang, dimana cabangnya terhubung dengan rantai polietilena yang lain. Metode *crosslinking* ini berpengaruh pada sifat positif bagi polietilena sendiri. Sebagai contoh nyata, XLPE sebagai isolasi kabel memiliki kelebihan dalam hal mempertahankan bentuk yang stabil pada kondisi suhu yang dinaikkan. Secara sederhana, penggambaran XLPE dapat terlihat di bawah ini.



Gambar 2.7 Pembentukan Rantai XLPE

Sumber : H. Lee Willis : Electrical Power Cable Engineering

Seperti yang telah didiskusikan sebelumnya, polietilena terdiri atas rantai polimer yang panjang, dimana rantai polimer tersebut berupa grup etilena. Molekul polietilena sendiri sangat panjang, dimana sebuah *backbone* mungkin mengandung 10000 sampai 60000 atom, bahkan bisa lebih. Lebih jauh lagi, polietilena memiliki region *crystalline* dan region *amorphous*, dan terdapat ketidakmurnian/kontaminan dan bahan tambahan pada region *amorphous*. *Crosslinking* sendiri menambahkan aspek lain pada kompleksitas susunan molekul polietilena.

Proses *crosslinking* pada XLPE merupakan cara untuk menambah berat molekul. Proses penambahan berat molekul ini terjadi terus – menerus, selama proses *crosslinking* berlangsung. Penambahan berat molekul yang terjadi pun signifikan, sehingga jika proses *crosslinking* terus berlangsung maka XLPE dapat dianggap memiliki berat molekul tak terbatas.

XLPE memiliki sifat yang berbeda dengan polietilena, dimana jika polietilena merupakan *thermoplastic* sedangkan XLPE merupakan *thermosetting*. Dengan sifat yang berbeda ini, XLPE memiliki keuntungan lebih dibandingkan dengan polietilena, seperti suhu kerja lebih tinggi, lebih tahan panas sehingga tidak meleleh saat dipanaskan, dan kekuatan tarik yang lebih. Kelebihan ini tentunya yang membuat XLPE menjadi pengganti polietilena untuk dijadikan isolasi suatu kabel.

2.2.3 Proses Pembuatan Isolasi XLPE

Proses pembentukan XLPE atau *crosslinking* dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain adalah :

a) Menggunakan peroksida organik

Metode *crosslinking* menggunakan peroksida organik merupakan metode yang biasa digunakan untuk pembuatan kabel XLPE tegangan menengah. Polietilena yang di *crosslinking* dengan peroksida terdiri atas sejumlah kecil agen *crosslinking* yang akan tersebar ke polimer. Peroksida organik adalah larutan kimia yang stabil pada suhu kamar tapi akan mengalami dekomposisi saat terjadi kenaikan suhu. Terdapat berbagai jenis peroksida salah satunya adalah *dicumyl peroxide* yang umum digunakan untuk kabel tegangan tinggi dan menengah. Peroksida ini biasanya telah tergabung dengan bahan butiran polietilena yang akan dimasak. Ketika polietilena diekstrusi (proses perubahan bahan butiran polietilena menjadi isolasi kabel) maka polietilena akan tetap stabil sebab suhu dekomposisi masih lebih tinggi daripada suhu ekstruksi. Setelah proses ekstruksi selesai dan polietilena telah melapisi konduktor dan konduktor shield, kabel akan masuk ke *curing tube* dimana suhu disini akan naik melebihi suhu ekstruksi sehingga menyebabkan peroksida mengalami proses *decompose* dan akan melakukan proses *crosslinking*. Metode *crosslinking* menggunakan peroksida ini didesain agar secara intens mengalami dekomposisi pada suhu yang telah ditentukan setelah proses konversi butiran bahan polietilena menjadi isolasi (*extruded*). Untuk mendapatkan hasil yang baik dari proses ini maka peroksida harus seragam saat menyebar ke polietilena. Supaya keseragamannya tepat saat menjadi isolasi kabel maka suhu dan tekanan pada *curing tube* harus dijaga.

b) Menggunakan *High Energy Radiation*

Ini dimungkinkan untuk membentuk XLPE dengan menggunakan *high energy radiation*. Pancaran elektron dari alat khusus dapat menghilangkan elektron dari rantai polimer. Ini menyebabkan rantai polimer reaktif untuk berinteraksi dengan rantai lainnya, sehingga akan terjadi *crosslink*. Isotop radioaktif dapat digunakan untuk tujuan yang sama. *High Energy Radiation* menyebabkan struktur kimia berubah tapi memiliki hasil XLPE yang berbeda dengan proses pembentukan XLPE dengan peroksida. Faktor utama untuk menggunakan *high energy radiation* ini adalah masalah ekonomis.

c) Memodifikasi struktur rantai backbone

Ini juga dimungkinkan untuk memodifikasi polimer dengan menggunakan *silane*. *Silane* akan berinteraksi dengan uap dan timah supaya terjadi *crosslink* pada rantai polietilena dengan yang lainnya. Karena penetrasi uap adalah kunci dari proses *crosslink* sehingga jelas bahwa proses ini lebih efisien dengan berkurangnya ketebalan dinding.[1]

2.3 Partial Discharge

2.3.1 Sifat Dielektrik pada Kabel

Dielektrik adalah sifat suatu bahan yang memiliki daya hantar arus yang sangat kecil atau bahkan hampir tidak ada. Tidak seperti konduktor, pada bahan dielektrik tidak terdapat elektron-elektron konduksi yang bebas bergerak di seluruh bahan oleh pengaruh medan listrik. Medan listrik tidak akan menghasilkan pergerakan muatan dalam bahan dielektrik. Sifat inilah yang menyebabkan bahan dielektrik itu merupakan isolator yang baik. Dalam bahan dielektrik, semua elektron-elektron terikat dengan kuat pada intinya sehingga terbentuk suatu struktur regangan (*lattices*), bagian-bagian positif dan negatifnya terikat bersama-sama sehingga tiap aliran massa bukan merupakan perpindahan dari muatan. Karena itu, jika suatu dielektrik diberi muatan listrik, muatan ini akan tinggal di daerah di mana muatan tadi ditempatkan.

Suatu dielektrik dikatakan merupakan isolator yang baik, jika memiliki fungsi sebagai berikut :

- a) Untuk mengisolasi antara penghantar dengan penghantar lain.
- b) Untuk menahan gaya mekanis akibat adanya arus yang mengalir pada konduktor yang terisolasi (dalam hal ini kabel)
- c) Mampu menahan tekanan yang diakibatkan panas dan reaksi kimia.

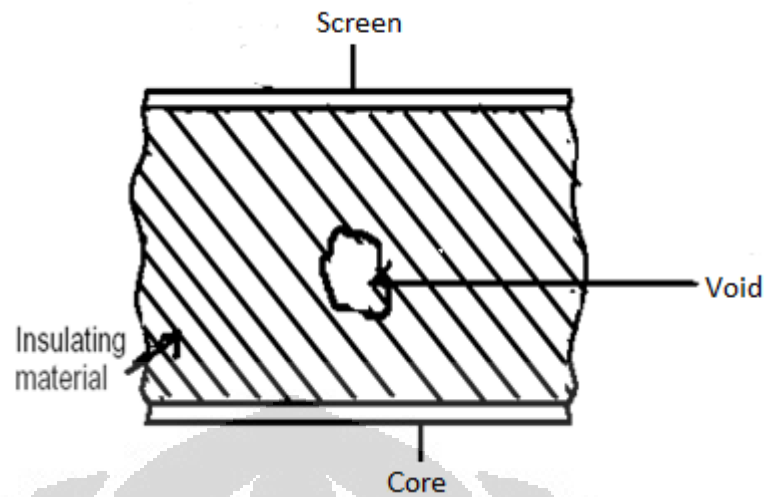
Untuk memenuhi fungsi diatas, maka suatu dielektrik harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

- a) Mempunyai kekuatan dielektrik yang tinggi, agar dimensi sistem isolasi menjadi kecil dan penggunaan bahan dielektrik semakin sedikit sehingga harganya semakin murah.

- b) Rugi – rugi dielektrik yang rendah, agar suhu bahan isolasi tidak melebihi batas yang ditentukan.
- c) Memiliki kekuatan kerak tinggi, agar tidak terjadi erosi karena tekanan elektrik permukaan.
- d) Memiliki konstanta dielektrik yang tepat dan cocok sehingga membuat arus pemuatan tidak melebihi yang diijinkan.
- e) Kemampuan menahan panas yang tinggi/daya tahan panas tinggi.
- f) Kerentanan terhadap perubahan bentuk pada keadaan panas.
- g) Konduktivitas yang tinggi.
- h) Koefisien muai panas yang rendah.
- i) Tidak mudah terbakar.
- j) Tahan terhadap busur api.
- k) Daya serap air yang rendah.

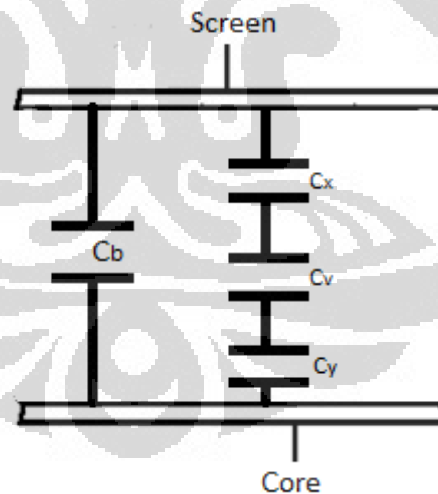
Namun pada kenyataannya, tidak ada bahan yang mampu memenuhi persyaratan dielektrik sebagai isolator yang baik di atas. Oleh karena itu, diperlukan penyesuaian kemampuan dielektrik bahan dengan penggunaannya.

Seperti diketahui bahwa, bahan dielektrik merupakan bahan yang berada pada dua daerah yang bertegangan. Sebagai contoh bahan dielektrik adalah isolator pada kabel tanah tenaga listrik, yang merupakan pengisolasi antara inti kabel yang bertegangan dengan tanah. Penggunaan bahan dielektrik sebagai isolasi suatu peralatan listrik akan memiliki efek kapasitansi. Secara sederhana, dapat dikatakan bahwa kabel dengan bahan isolasi murni merupakan kapasitor yang panjang. Namun dalam keadaan sebenarnya dalam isolasi suatu kabel tidaklah murni, melainkan adanya kontaminan baik berupa kotoran, void, maupun air. Sebagai contoh, suatu kabel tanah dengan isolasi XLPE yang memiliki kontaminan berupa void, dimana void berupa rongga yang berisikan udara yang terdapat pada isolasi XLPE. Rongga udara ini memiliki ukuran yang bervariasi, dan bentuk yang bervariasi seperti, bola, ataupun bentuk sembarang serta letaknya yang tersebar, bisa di tengah isolasi, ataupun dekat dengan permukaan isolasi. Adapun gambaran sederhana void dapat terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.8 Void pada Bagian Internal Isolasi Kabel

Pada gambar di atas terlihat bahwa adanya void yang terletak pada bagian internal isolasi kabel, dengan bentuk yang agak sembarang. Dengan mengacu pada diskusi sebelumnya dimana isolasi pada kabel merupakan sebuah kapasitor, maka dari gambar di atas dapat diperoleh rangkaian penggantinya, seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.9 Rangkaian Pengganti Gambar 2.8

Pada gambar di atas, C_b merupakan kapasitansi dari isolator XLPE secara utuh dari core sampai screen. Sedangkan C_x dan C_y juga merupakan kapasitansi dari bahan isolasi XLPE yang disertai dengan kapasitansi dari void, dimana ketiganya paralel dengan kapasitansi C_b . Secara sederhana, dapat terlihat

dielektrik yang terbentuk pada kabel, dimana akan terdapat nilai kapasitansi yang berbeda untuk kondisi isolasi yang berbeda, maksudnya dengan letak dan jumlah void yang berbeda.

2.3.2 Pembentukan Rongga Udara (Void)

Sebelumnya telah dibahas tentang sifat dielektrik pada pada kabel, yaitu tentang dielektrik yang terbentuk antara konduktor dengan *ground*/netral berupa isolasi kabel. Sifat dielektrik yang terbentuk akan berupa kapasitor sempurna, jika tidak adanya kontaminan, yang umumnya berupa void. Void adalah rongga – rongga yang berisikan udara atau gas sering berada pada isolasi suatu kabel, dalam hal ini *cross – linked polyethylene* (XLPE).

Void ini dapat terbentuk akibat beberapa proses - proses yang tidak sempurna, antara lain :

- Proses manufaktur/pembuatan isolasi, dalam hal ini pembuatan XLPE. Pembuatan XLPE menggunakan metode *crosslinking* dari polyethylene, dimana pada salah satu prosesnya menggunakan uap panas untuk meningkatkan temperatur hingga mencapai 200 - 220°C dan bertekanan 1,6 – 2 Mpa.
- Proses instalasi, salah satu proses instalasi kabel tanah dengan isolasi ini adalah melakukan jointing/penyambungan atau terminasi, dimana dilakukan pengupasan kabel, yang memungkinkan adanya kontaminan udara.
- Proses pengoperasian kabel, pada saat terjadi gangguan hubung singkat, dimana arus yang mengalir sangat besar, mengakibatkan adanya perubahan suhu yang besar pada kabel. Jika stress suhu yang diterima oleh kabel melebihi kapasitas kabel, maka ada kemungkinan adanya pelepasan ikatan polimer penyusun XLPE yang menimbulkan adanya void atau rongga udara.

2.3.3 Pengertian *Partial Discharge*

Berdasarkan IEC 60270 : 2001, *partial discharge* diartikan sebagai pelepasan elektrik/muatan listrik lokal (lokasi/titik tertentu saja) yang hanya “menjembatani” suatu bagian isolasi diantara suatu penghantar, pada bagian yang dapat ataupun tidak dapat terjadi pelepasan muatan yang berdekatan dengan

penghantar. Pelepasan ini dapat terjadi pada isolasi antara konduktor fasa dengan ground ataupun konduktor fasa dengan konduktor fasa yang lain.[3]

Partial discharge ini merupakan konsekuensi dari adanya stress listrik lokal di dalam isolator ataupun di permukaan isolator. *Partial discharge* ini muncul dalam bentuk pulsa listrik dengan durasi yang kurang dari 1 μ s. *Partial discharge* biasanya ditandai dengan adanya emisi suara, cahaya, panas, dan reaksi kimia.

Partial discharge dapat terjadi pada isolasi padat, cair, maupun gas. Pada isolasi gas biasanya diawali dengan peristiwa korona, yaitu salah satu bentuk *partial discharge* dengan ciri – ciri berupa cahaya violet, suara bising, suhu meningkat di daerah sekitar, serta reaksi kimia berupa pembentukan ozon. Pada isolasi cair biasanya dikarenakan adanya kontaminan, bisa berupa udara/gelembung – gelembung udara, ataupun air. Sedangkan pada isolasi padat, *partial discharge* sering terjadi karena adanya void, kotoran, cairan yang berasal dari proses manufaktur, kesalahan pemasangan, maupun selama pemakaian peralatan.

Partial discharge ini dapat dinilai berdasarkan kuantitas dan kualitasnya. Nilai kuantitas *partial discharge* berupa nilai *partial discharge* pada besaran pico Coloumb (pC), sedangkan nilai kualitasnya dapat dianalisis dari kecenderungan data pengujian *partial discharge* pada bahan tertentu.

2.3.4 Mekanisme terjadinya *Partial Discharge*

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, *partial discharge* terjadi karena adanya kontaminan, void, atau cairan pada isolasi suatu kabel, dalam hal ini XLPE. Sebagai contoh void, void memiliki perbedaan permitivitas dengan XLPE, dimana permitivitas pada void, jika berisi udara, permitivitas relatifnya adalah 1 atau yang nilainya lebih rendah dibandingkan dengan XLPE yang memiliki nilai permitivitas 2,3. Dengan keadaan ini dapat mengakibatkan intensitas medan listrik pada void lebih tinggi dibandingkan dengan intensitas medan listrik pada isolasi XLPE. Dengan kondisi pemberian tegangan yang sama, maka hal ini menyebabkan void akan lebih dulu mengalami kegagalan dielektrik dibandingkan isolasi, kejadian ini yang dapat disebut dengan *partial discharge*.

Dengan menggunakan analisis sederhana, dimana

$$C = Q \times V$$

$$Q = \frac{C}{V}$$

dengan,

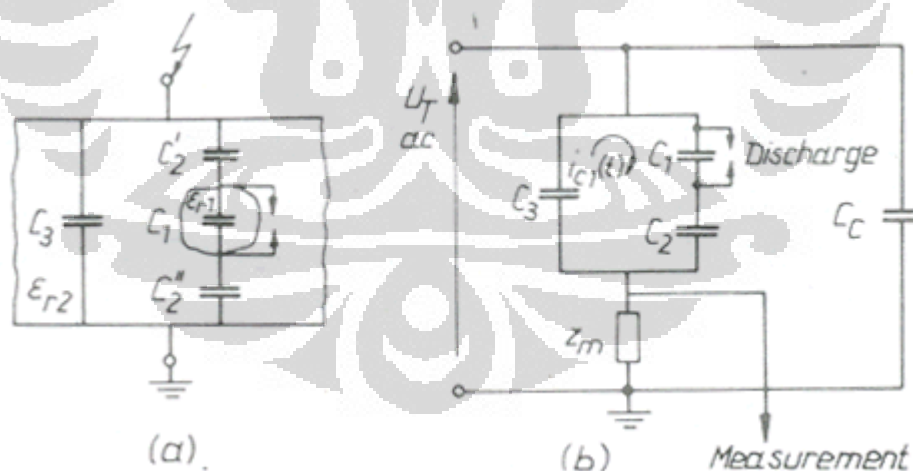
C = Kapasitansi bahan dielektrik

Q = Muatan yang mengalir pada bahan dielektrik

V = Tegangan yang diberikan pada bahan dielektrik.

Maka muatan yang mengalir, dalam hal ini *discharge* akan terjadi dengan pengaruh kapasitansi dan tegangan yang diaplikasikan. Besarnya kapasitansi merupakan kapasitansi total dari isolasi, dimana besarnya terdapat pengaruh dari void dan kontaminan lain dalam isolasi.

Sebagai contoh, suatu kabel dengan suatu isolasi berdiameter d yang memiliki void yang terletak di tengah, dengan bentuk void berupa bola dengan diameter sebesar t . Secara sederhana dapat kita gambarkan rangkaian pengganti dengan kondisi tersebut, seperti di bawah ini.



Gambar 2.10 Rangkaian Pengganti Void dalam Isolasi

Sumber : http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT-KANPUR/HighVoltageEngg/ui/Course_home3_18.htm

Dimana, C_1 merupakan kapasitansi dari void, C_2 merupakan kapasitansi yang terjadi pada daerah sekitar void, dan C_3 kapasitansi dari bahan isolasi itu

sendiri. Dengan penjabaran pada pernyataan sebelumnya dapat diketahui besarnya kapasitansi masing – masing, yaitu :

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{t}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d - t}$$

$$C_3 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d}$$

Dengan menilik rangkaian pengganti pada gambar 4.1, maka kita dapat mengetahui besarnya nilai *partial discharge* pada rangkaian tersebut. Dengan mengasumsikan besarnya tegangan *breakdown* pada C_1 adalah U_{C1} , maka besar U_{C1} adalah

$$U_{c1} = \frac{C_2}{C_2 + C_1} \cdot U_T$$

Sedangkan untuk besarnya tegangan jatuh pada saat *partial discharge* terjadi adalah

$$\Delta U_{c1} = \frac{C_2}{C_3 + C_2} \cdot U_{c1}$$

dengan asumsi jika tegangan jatuh pada sampe pengujian adalah ΔU_T , maka

$$\Delta U_T = U_T \cdot \frac{C_2^2}{(C_3 + C_2) \cdot (C_1 + C_2)}$$

sehingga dapat diketahui besarnya nilai *partial discharge* yang terjadi pada rangkaian pengganti tersebut, yaitu

$$q_{c1} = \Delta U_{c1} \cdot \left[C_1 + \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} \right]$$

$$q = U_T \cdot \frac{C_2^2}{(C_3 + C_2) \cdot (C_1 + C_2)} \cdot \left[C_1 + \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} \right]$$

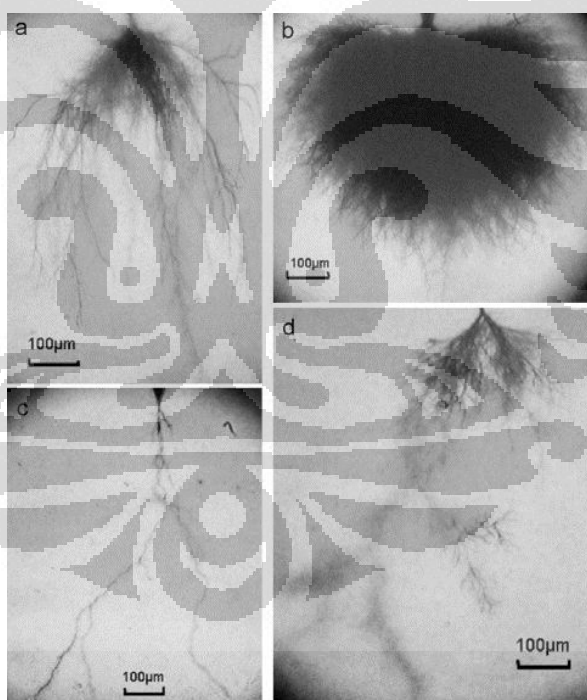
Dari rumus di atas diketahui bahwa besarnya *partial discharge*, dipengaruhi oleh tegangan terapan serta nilai kapasitansi, dalam hal ini nilai kapasitansi dipengaruhi oleh keberadaan void, ukuran void, serta jenis bahan isolasi yang digunakan.

2.3.5 Efek *Partial Discharge*

Aktivitas *partial discharge* dalam bahan isolasi padat akan membentuk beberapa pengaruh diantaranya adalah

- Pemohonan Listrik

Pemohonan listrik merupakan kondisi kegagalan listrik pada suatu isolasi bahan padat yang memiliki bentuk struktur seperti pohon, dan tidak simetris bentuknya. Kondisi ini dapat terjadi akibat adanya kontaminan ataupun void pada suatu isolasi yang dikenai tegangan, dimana void dan kontaminan tersebut gagal menahan medan listrik yang berakibat bentuk struktur seperti pohon. Kondisi ini paling sering terjadi pada isolasi kabel bawah tanah, dimana hal ini sangat berbahaya bagi kelangsungan isolasi kabel tersebut. Semakin bertambahnya waktu maka dapat menyebabkan perluasan area dari pemohonan listrik ini, yang dapat mengakibatkan kegagalan isolasi.



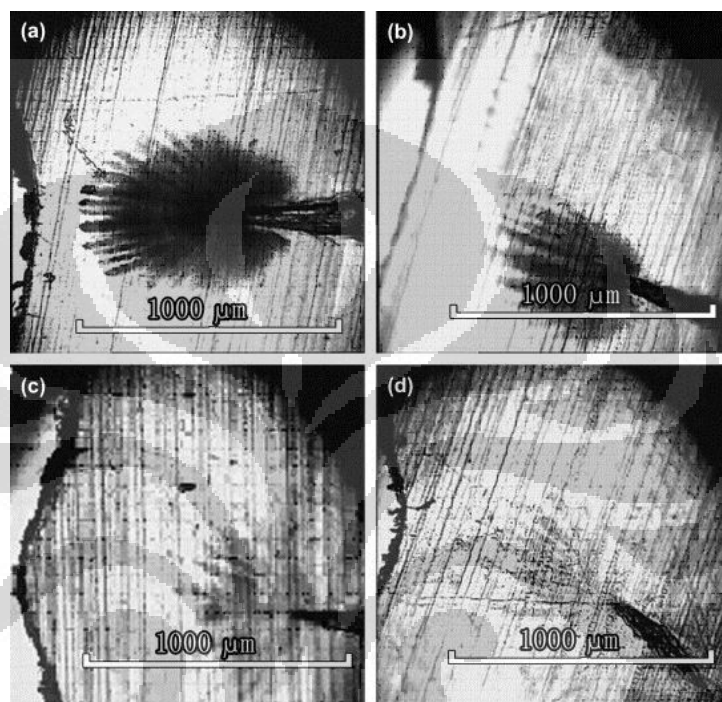
Gambar 2.11 Pemohonan Listrik

Sumber : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921452611004248>

- Pemohonan Air

Pemohonan air disebabkan oleh peresapan air yang prosesnya sedang menyebar keseluruh bagian melalui lapisan pelindung isolasi. Pada isolasi

polietilena mempunyai sifat bahan yang dapat menyerap air. Kerusakan polietilena oleh peluahan elektrik karena bahan polietilena mengandung uap air dikenal sebagai pemohonan air. Pemohonan air bisa menyebabkan suatu kerusakan di dalam bahan isolasi karena merupakan gejala awal pemohonan elektrik yang bisa mempercepat kegagalan.



Gambar 2.12 Pemohonan Air

Sumber : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391007000298>

2.4 Pengujian Kabel Tanah

Kabel listrik (kabel tanah) yang telah selesai proses produksi maupun akan dipasarkan/akan digunakan, diharuskan melalui pengujian kabel sebelum dipasarkan, dalam hal dimaksudkan untuk memperoleh parameter – parameter standar, baik dari IEC, IEEE, ANSI, SPLN (tergantung parameter mana yang akan digunakan oleh produsen, atau pengguna kabel nantinya), agar pada saat pemakaian nantinya tidak terjadi gangguan yang tidak diharapkan. Pengujian yang dilakukan pun bermacam – macam, baik yang diadakan oleh produsen kabel sendiri ataupun instansi yang memiliki kewenangan dan terpercaya untuk melakukan pengujian, seperti PLN PUSLITBANG (Pusat Penelitian dan Pengembangan) Ketenagalistrikan.

2.4.1 Jenis Pengujian Kabel Tanah.

Untuk Indonesia, dalam hal ini pengujian kabel adalah PLN LITBANG, menggunakan standar IEC dan SPLN, meskipun produsen ataupun pengguna kabel dapat menentukan standarnya, namun paling sering menggunakan IEC karena SPLN sendiri mengacu pada IEC. Adapun pengujian – pengujian kabel berdasarkan IEC 60502 – 2, antara lain :

a. Pengujian Rutin (*Routine Test*)

Pengujian yang dilakukan oleh produsen kabel pada setiap panjang kabel yang dihasilkan untuk mengecek bahwa setiap panjang dari kabel tersebut memenuhi syarat spesifikasi yang telah ada (nilai resistansi, *partial discharge*, ketahanan tegangan)

b. Pengujian Sample (*Sample Test*)

Pengujian ini dilakukan oleh produsen kabel juga, hanya saja bahan uji adalah sample yang telah selesai proses produksi, dengan syarat pengujian menggunakan frekuensi tertentu, di Indonesia digunakan frekuensi 50 Hz, untuk mengetahui produk jadi tersebut memenuhi persyaratan yang telah ditentukan dan dijadikan acuan.

c. Pengujian Jenis (*Type Test*)

Pengujian ini, dilakukan saat produsen akan memasarkan produk (kabel tanah) yang telah selesai produksi. Pengujian ini dilakukan oleh instansi yang memiliki kewenangan dan terpercaya dalam hal pengujian alat – alat listrik, sebagai contoh PLN PUSLITBANG, dengan bahan uji berupa jenis kabel keluaran produsen untuk dilihat performa karakteristik kabel untuk memenuhi performa pemakaian yang diinginkan, baik elektris maupun mekanisnya.

Seluruh pengujian di atas dilakukan secara alami, maksudnya setelah kabel selesai proses produksi langsung dilakukan pengujian dan didapat hasilnya, tanpa adanya pengulangan pengujian kecuali adanya perubahan pada material kabel yang dapat mengubah performa kabel. [2]

2.4.2 Mata Uji Pengujian Kabel Tanah

Dalam pengujian kabel seperti yang disebutkan di atas, berisi rangkaian pengujian kabel yang disesuaikan dengan jenis pengujiannya. Ketiga pengujian di atas memiliki rangkaian pengujian yang berbeda – beda. Berikut akan dipaparkan rangkaian pengujian dari masing – masing pengujian diatas.

- Pengujian Rutin (*Routine Test*)

Seperti penjelasan sebelumnya, pengujian rutin ini dilakukan oleh setiap pabrikan kabel untuk menguji tiap panjang kabel yang diproduksi, dimana panjang kabel dapat disesuaikan oleh prosedur *quality control*. Adapaun standar rangkaian pengujian rutin, antara lain :

- a) Pengukuran resistansi konduktor
- b) Pengujian *partial discharge*.
- c) Pengujian tegangan

- Pengujian Sample (*Sample Test*)

Pada pengujian sample, terdapat rangkaian pengujian sebagai berikut :

- a) Uji fisik konduktor
- b) Uji dimensi
- c) Pengujian tegangan
- d) *Hot set test* untuk isolasi (EPR, HEPR, dan XLPE) dan selubung elastomer

- Pengujian Jenis (*Type Test*)

Pengujian jenis dilakukan pada kabel dengan panjang 10 m sampai 15 m, dengan rangkaian pengujian sebagai berikut :

- a) Pengujian *partial discharge*
- b) *Bending test*, kemudian dilanjutkan dengan pengujian *partial discharge*
- c) Pengukuran $\tan \delta$
- d) *Heating cycle test*, kemudian dilanjutkan dengan pengujian *partial discharge*
- e) Uji *impulse*, kemudian diikuti dengan uji tegangan
- f) Uji tegangan selama 4 jam

BAB III METODE/TEKNIK PENGUJIAN

Data yang didapatkan merupakan hasil dari pengujian *partial discharge* yang dilakukan di PT. PLN (Persero) PUSLITBANG Ketenagalistrikan, yang berada di jalan Duren Tiga nomor 102, Jakarta. Pengujian *partial discharge* yang dilakukan merupakan bagian dari rangkaian mata uji *type test* kabel dengan bahan uji berupa kabel XLPE satu inti maupun tiga inti dengan ukuran berbeda - beda. Adapun tahapan – tahapan yang dilakukan hingga data hasil pengujian didapatkan dapat terlihat pada diagram di bawah ini.

1 PERSIAPAN

- STUDI LITERATUR
- DISKUSI DENGAN PEMBIMBING
- MENGURUS PERIZINAN DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO MAUPUN PT. PLN (PERSERO) PUSLITBANG

2 PENGUJIAN

- PARTIAL DISCHARGE TEST SETELAH BENDING TEST
- HEATING CYCLE TEST
- PARTIAL DISCHARGE TEST SETELAH HEATING CYCLE TEST

3 PENGAMBILAN DATA

- PENGUMPULAN DATA HASIL PENGUJIAN
- DISKUSI TENTANG PENGUJIAN DAN HASIL PENGUJIAN DENGAN PEGAWAI PT. PLN (PERSERO) PUSLITBANG

Dari diagram di atas terlihat jelas alur pengambilan data hasil pengujian yang digunakan pada bab IV sebagai bahan analisis. Dari diagram juga terlihat pengujian yang dilakukan terdiri dari pengujian mekanis dan pengujian listrik, dimana pengujian mekanis yang berkaitan dengan data yang akan digunakan adalah *bending test* dan *heating cycle test*, dan pengujian listrik yang dilakukan

adalah *partial discharge test*. Berikut akan dijelaskan metode pengujian, serta peralatan – peralatan pengujian yang digunakan.

3.1 Pengujian Kabel (Mekanis)

Pengujian kabel mekanis ini merupakan pengujian yang dilakukan terhadap sisi fisik dari kabel apakah kabel akan memenuhi syarat yang ada. Selain itu, hal ini juga menjadi sarana untuk melihat parameter – parameter elektrik yang akan terjadi setelah dilakukan pengujian mekanis. Secara umum, pengujian mekanis ini merupakan pengkondisian kabel pada kondisi sebenarnya, maksudnya kabel akan dikondisikan pada kondisi dimana kabel akan terpasang nantinya, sehingga apakah kabel ini akan layak pakai. Adapun mata uji pengujian mekanis kabel bermacam – macam, seperti uji dimensi, uji visual, uji penyerapan air, *bending test* (uji tekuk), *heating cycle test* (uji siklus pemanasan kabel), serta uji mekanis lainnya. Dalam hal ini, karena bahasan skripsi ini adalah *partial discharge*, dimana *partial discharge* ini dilakukan setelah uji mekanis *bending test* dan *heating cycle test* maka akan dibahas tentang kedua uji mekanis tersebut.

3.1.1 *Bending Test* (Uji Tekuk)

Bending test ini dilakukan karena pada dasarnya kabel yang telah diproduksi akan ditekuk/digulung pada suatu media biasanya drum, untuk kemudahan dalam hal penyimpanan, pengiriman, penginstalasian kabel nantinya. Hanya saja pada *bending test* ini, seluruh bagian kabel akan merasakan tekukan berbeda dengan kondisi sebenarnya dimana hanya sebagian kabel saja yang mengalami penekukan.

Berdasarkan IEC 60502 – 2, *bending test* dilakukan di tempat/media yang berbentuk silinder dimana kabel digulung pada suhu ambient (suhu ruang) minimal 1 putaran atau 1 gulungan penuh. Setelah itu dikembalikan pada kondisi semula, dan ditekuk/digulung ulang dengan wilayah penekukan yang berbeda atau bagian kabel yang belum mengalami penekukan. Proses penekukan/penggulungan ini dilakukan sebanyak tiga kali, sehingga hampir keseluruhan bagian kabel mengalami penekukan. Setelah selesai melakukan *bending test* kemudian

dilakukan pengukuran diameter dari kabel yang diuji. Adapun standar untuk *bending test* ini, yaitu

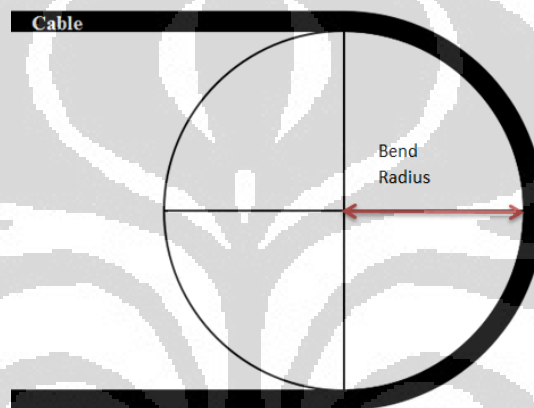
$20 (d + D) \pm 5\%$, untuk kabel 1 inti

$15 (d + D) \pm 5\%$, untuk kabel 3 inti

Dimana :

D = diameter eksternal kabel (diameter keseluruhan kabel), satuan dalam milimeter

d = diameter konduktor kabel, satuan dalam millimeter



Gambar 3.1 *Bending Test*

Secara sederhana, *bending test* dapat terlihat pada gambar di atas, hanya saja minimal penggulangan/penekukan kabel adalah 1 putaran penuh. Setelah selesai *bending test*, kabel kemudian diuji *partial discharge*.

3.1.2 *Heating Cycle Test*

Heating cycle test (uji siklus panas) merupakan salah satu mata uji yang dilakukan setelah beberapa rangkaian mata uji pada suatu pengujian kabel. Pada pengujian kabel, *heating cycle test* dilakukan setelah dilakukan mata uji *partial discharge* setelah *bending test*. *Heating cycle test* ini juga merupakan salah satu pengkondisian kabel pada saat pemakaian kabel nantinya, karena pada dasarnya kabel akan ditanam di dalam tanah di lingkungan tropis di tambah dengan adanya panas dari arus yang mengalir.

Berdasarkan IEC 60502 – 2, *heating cycle test* dilakukan pada ruangan uji, dimana kabel uji dibentangkan di atas lantai, untuk kemudian dipanaskan. Adapun pemanasan yang dilakukan dengan cara mengaliri arus pada konduktor kabel uji. Pemanasan ini dilakukan dengan cara menginduksi arus melalui *current transformer* (CT), dimana arus yang dialirkan besarnya tergantung pada diameter kabel yang diuji.



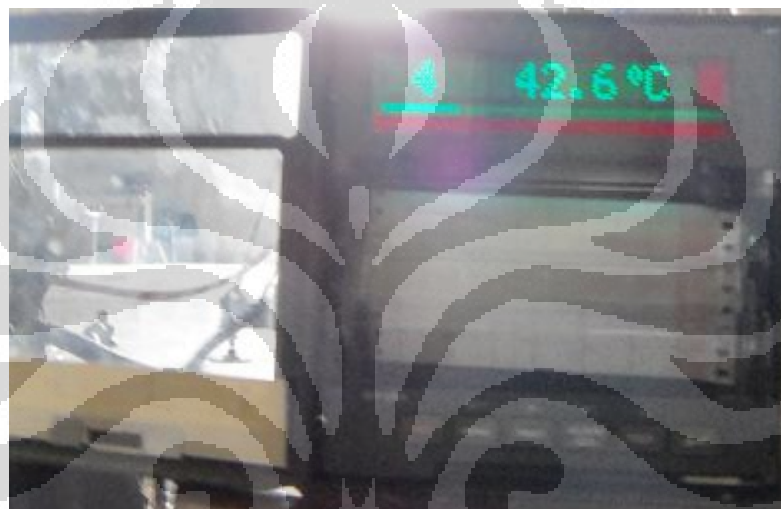
Gambar 3.2 Foto *Current Transformer* (CT)

Adapun pengaturan arus dilakukan oleh *slide regulator*, dimana akan mengatur tegangan yang berefek pada arus yang mengalir. *Slide regulator* ini seperti halnya tap changing pada trafo.



Gambar 3.3 Foto *Slide Regulator*

Kemudian diukur suhunya sampai kondisi *steady* (stabil) pada suhu $5^{\circ} - 10^{\circ} \text{C}$ di atas suhu maksimum konduktor pada operasi normalnya, yaitu $95^{\circ} + 5^{\circ} \text{C}$. Pengukuran suhu ini dilakukan oleh *thermorecorder* sebagai perekam/penyimpan data suhu yang terjadi selama pengujian, dan *thermocontrol* untuk pengaturan suhu disesuaikan dengan siklus yang ada. *Thermorecorder* memiliki probe yang langsung dihubungkan dengan kabel, pada pengujian diletakkan/ditempelkan pada sisi outer kabel. Pada gambar di bawah terlihat pula bahwa channel 4 yang digunakan sebagai recorder pada pengujian.



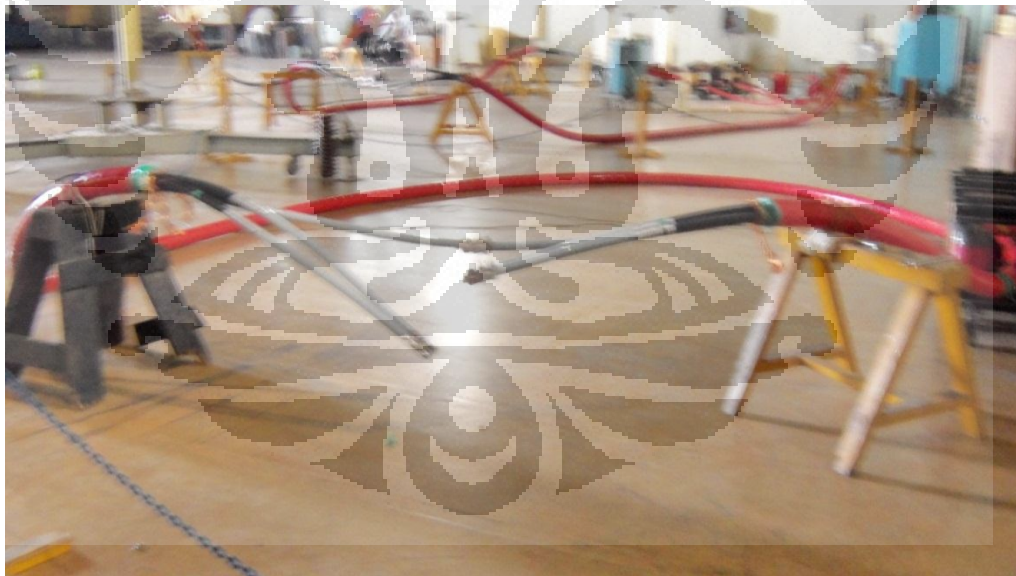
Gambar 3.4 Foto *Thermorecorder*

Thermocontrol ini berfungsi sebagai switch, dimana jika suhu melebihi setelan maka arus akan terputus dan suhu akan turun kembali. Sama seperti *thermorecorder*, *thermocontrol* pun memiliki *probe* yang langsung terhubung pada *outer* kabel sebagai pengukur suhu kabel uji.



Gambar 3.5 Foto *Thermocontrol*

Adapun untuk pengujian kabel tiga inti, ketiga konduktornya dialiri arus, sampai dengan syarat suhu yang di tentukan, yaitu 100°C. Untuk mendapatkan arus yang mengalir di ketiga konduktor, maka dilakukan pembuatan *loop* pada ketiga konduktornya.

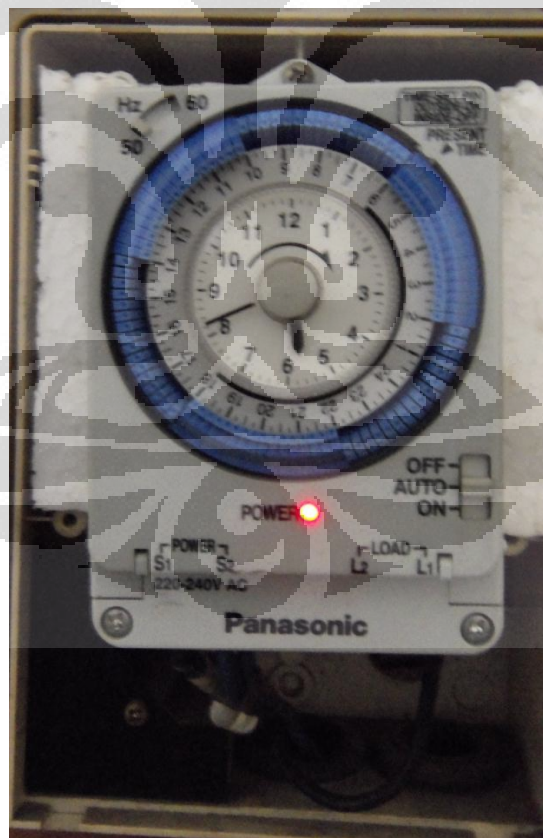


Gambar 3.6 Foto Kabel XLPE Uji

Heating cycle test ini berdurasi minimal 8 jam, dengan rincian masing – masing 2 jam untuk tiap siklus, yaitu 2 jam untuk siklus menaikkan suhu sampai *steady*, 2 jam untuk siklus suhu pada kondisi *steady*, dan 4 jam untuk siklus pendinginan (*cooling air*). Pada kondisi 2 jam awal, siklus menaikkan suhu

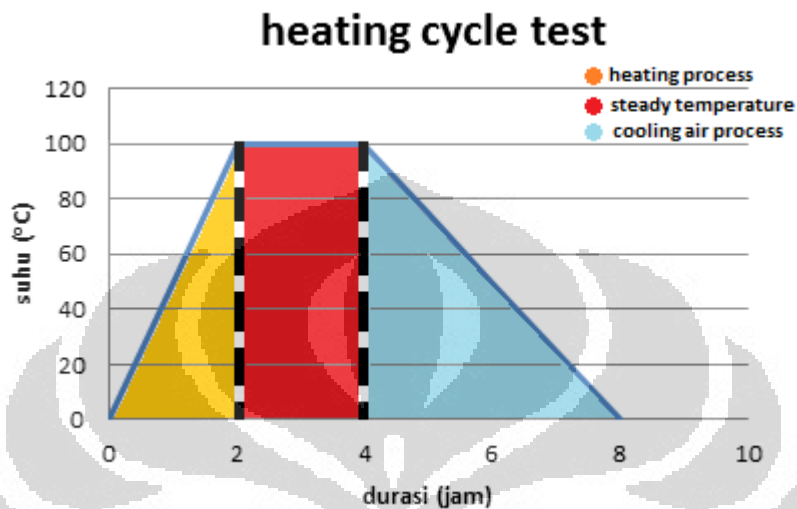
hingga suhu *steady*, yaitu 100°C, dilakukan pengaturan arus agar arus yang mengalir tidak terlalu besar untuk mencapai suhu *steady* dalam waktu yang terlalu cepat. Hal ini dilakukan agar tidak terjadi kerusakan pada kabel uji, karena kelajuan kenaikan suhu yang terlalu cepat. Besarnya arus yang mengalir pun berbeda – beda untuk setiap penampang kabel uji. Pada siklus suhu *steady*, suhu kabel uji diatur oleh *thermocontrol* untuk memiliki nilai maksimal suhu 100 °C, sehingga jika suhu mulai melebihi angka tersebut maka arus yang mengalir akan dihentikan. Sedangkan pada siklus terakhir, *cooling air*, terjadi pendinginan kabel uji dengan menggunakan udara, dengan artian arus yang mengalir akan diturunkan sehingga tercapai kondisi awal, dengan durasi waktu pendinginan 4 jam.

Pengaturan durasi siklus ini dilakukan oleh *timer*, dimana *timer* ini juga memiliki switch yang bekerja secara sinkron dengan *thermocontrol*.



Gambar 3.7 Foto *Timer*

Siklus 8 jam ini dilakukan sebanyak 20 kali, atau proses *heating cycle test* ini menghabiskan waktu selama 7 hari. Selain arus dan suhu konduktor yang diperhatikan, frekuensi kerja pun diperhatikan, yaitu 50 Hz.



Gambar 3.8 Grafik *Heating Cycle Test*

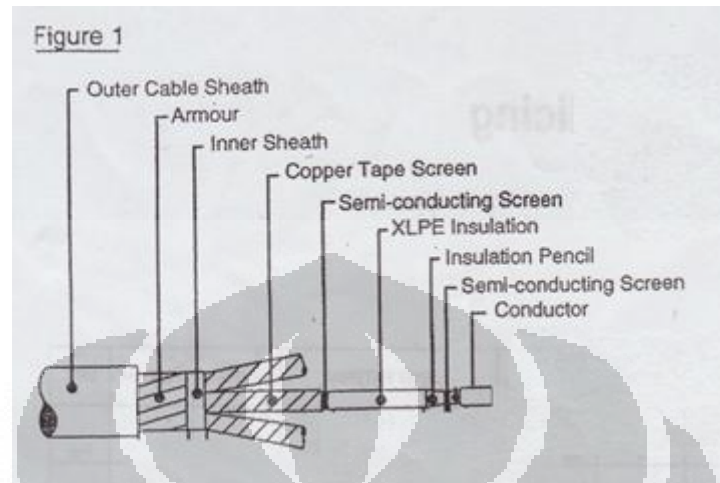
3.2 Metode Pengujian *Partial Discharge*

Pengujian *partial discharge* ini dilakukan setelah proses mata uji *bending test* dan *heating cycle test*. Hal ini sesuai dengan standar acuan yang digunakan, yaitu IEC 60502 – 2, yang membahas tentang kabel tegangan menengah 1 – 30 kV, baik tentang standar bagian – bagian kabel hingga standar pengujian yang dilakukan pada kabel tegangan menengah sebelum dipakai.

Pengujian *partial discharge* yang dilakukan menggunakan tegangan 1,73 U_0 atau sebesar 21 kV. Hal ini disesuaikan dengan standar yang digunakan pada *type test*. Parameter lain pada pengujian yang perlu diperhatikan adalah frekuensi sistem yang dipakai, yaitu 50 Hz. Parameter yang diabaikan pada pengujian *partial discharge* adalah suhu ambient dan kelembaban, karena pengujian *partial discharge* ini menguji isolasi pada kabel.

Pengujian dilakukan pada kabel tegangan menengah yang sebelumnya sudah dikupas, seperti persiapan kabel untuk terminasi pada instalasi sistem distribusi. Kondisi kabel yang telah dikupas ini diterapkan selama rangkaian pengujian *type test*. Adapun kondisi pengupasan kabel ini dapat terlihat seperti di

bawah, dengan memperhatikan jarak antara tabir semikonduktor dengan konduktor, agar selama pengujian tidak ada loncatan listrik.



Gambar 3.9 Pengupasan Kabel XLPE

Pengujian *partial discharge* diawali dengan merangkai rangkaian uji, yang terdiri dari suplai tegangan 220 Volt, trafo step – up 33 kV, filter tegangan, kapasitor coupling, kabel uji, kemudian sebagai interface digunakan laptop dengan software mtronix MPD, dan server sebagai penghubung antara laptop dengan rangkaian uji, seperti terlihat pada gambar di bawah ini.

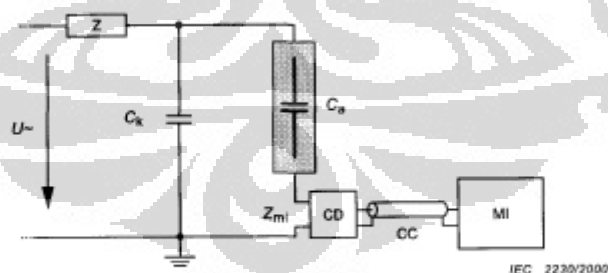
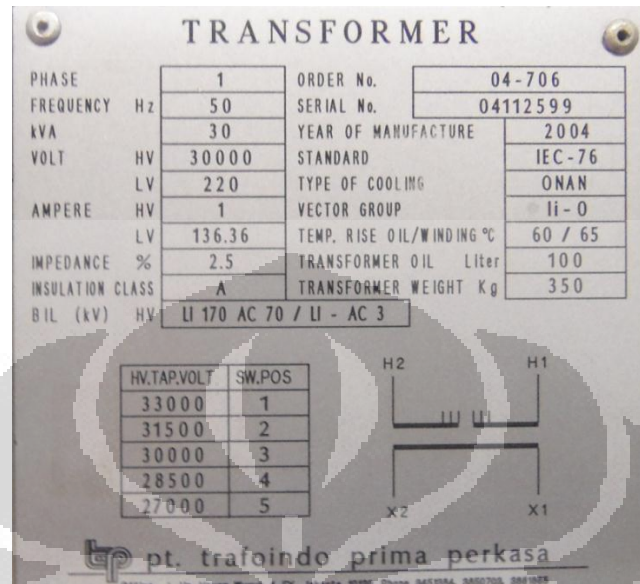


Figure 1b – Coupling device CD in series with the test object

Gambar 3.10 Rangkaian Pengujian *Partial Discharge*

Pengujian yang dilakukan menggunakan tegangan input 220 volt, dimana selama pengujian ini diperlukan tegangan sebesar 21 kV, sehingga diperlukan adanya transformator step – up. Trafo yang digunakan merupakan trafo satu fasa yang memiliki tegangan input 220 volt dan memiliki 5 tap changing. Pada

pengujian yang dilakukan digunakan tap changing 1, yang memiliki tegangan keluaran sebesar 33 kV.



Gambar 3.11 Foto Rating Trafo

Karena output tegangan melebihi dari tegangan yang diperlukan, maka digunakan slide regulator, untuk mendapatkan tegangan 21 kV saat pengujian.



Gambar 3.12 Foto Slide Regulator

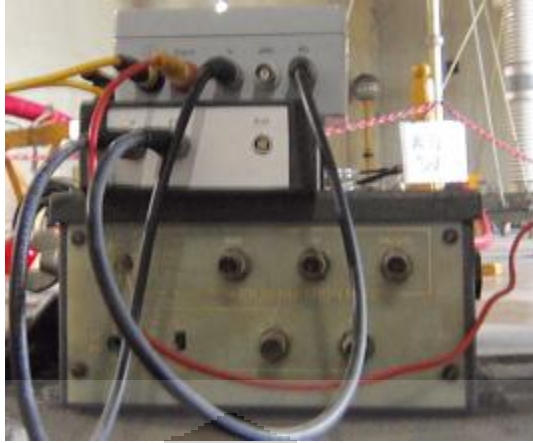
Untuk mengetahui besar tegangan yang diberikan, maka digunakan laptop yang terinstal software mtronix MPD, sebagai pengatur dan pencatat

parameter – parameter yang diperlukan selama pengujian *partial discharge*. Adapun parameter – parameter yang terlihat pada mtronix MPD tegangan (kV), arus (A), dan muatan yang lepas (pC).



Gambar 3.13 Foto Laptop (*Interface Pengujian*)

Laptop ini terhubung dengan *partial discharge detector* melalui server dengan kabel fiber optik. *Partial detector* ini terhubung pada kabel uji serta kapasitor coupling, untuk mendapatkan parameter – parameter pengujian. Sebelum pengujian, dilakukan kalibrasi pada peralatan pengukuran (kapasitor coupling) dengan *partial discharge calibrator*, untuk didapatkan nilai sebesar 10 pC, sesuai dengan standar yang digunakan. Jika tidak didapatkan nilai 10 pc, maka *partial discharge calibrator* akan melakukan perbaikan pada kapasitor coupling sehingga didapatkan nilai 10 pC.



Gambar 3.14 Foto *Partial Discharge Detector*

Kapasitor coupling disini digunakan sebagai alat konversi pengukuran untuk kemudian besaran pengukuran digunakan oleh *partial discharge detector*. Selain itu, kapasitor coupling berfungsi sebagai penghubung pada rangkaian pengujian.



Gambar 3.15 Foto Kapasitor Coupling

Selain menggunakan kapasitor coupling, pada rangkaian pengujian digunakan pula kapasitor yang berfungsi sebagai filter. Filter ini sesuai dengan namanya berfungsi untuk menyaring gelombang tegangan yang diinjeksikan pada pengujian, agar gelombang selama pengujian bersih dari *ripple – ripple* gelombang.



Gambar 3.26 Foto Filter Tegangan

Pengujian dilakukan dengan pengkalibrasian kapasitor *coupling* dan *partial discharge detector* untuk memiliki nilai sebesar 10 pC. Kemudian setelah menghubungkan rangkaian uji dengan kabel uji, dilakukan pengujian dengan penyalaan suplai dan mulai pengaturan tegangan melalui *slide regulator* dan untuk melihat tegangan yang diberikan melalui *software* mtronix MPD. Setelah diberikan tegangan sebesar 1,73 U_0 atau 21 kV maka dilihat nilai *partial discharge* yang diperoleh. Pada awalan pemberian maka akan terlihat nilai yang random, posisi nilai yang akan naik turun. Nilai *partial discharge* diambil saat nilai yang tampak pada layar sudah stabil, kemudian dicatat. Untuk pengujian kabel 3 fasa dilakukan dengan mengecek tiap konduktor secara bergantian. Dan dengan cara yang sama untuk mendapatkan nilai *partial discharge*. Metode pengujian *partial discharge* ini berlaku umum, maksudnya metode pengujian ini akan sama untuk pengujian *partial discharge* setelah *bending test* maupun pengujian *partial discharge* setelah *heating cycle test*.

BAB IV DATA DAN ANALISIS

4.1 Data Hasil Pengujian

Setelah dilakukan pengujian sesuai dengan metode yang dipaparkan pada bab 3, baik pengujian *partial discharge* setelah *bending test* maupun pengujian *partial discharge* setelah *heating cycle test*, berikut akan dipaparkan data – data hasil pengujian tersebut.

4.1.1 Data Hasil Pengujian *Partial Discharge* setelah *Bending Test*

Pada pengujian *partial discharge* setelah *bending test*, didapatkan dua tabel hasil pengujian, yaitu tabel hasil pengujian kabel tegangan menengah satu inti dan tabel hasil pengujian kabel tegangan menengah tiga inti.

4.1.1.1 Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti

Pada pengujian kabel XLPE tegangan menengah satu inti didapatkan hasil pengujian berupa besaran nilai *partial discharge* yang terukur, pada kondisi tegangan pengujian yang diberikan 21 kV dan pada frekuensi tetap 50 Hz. Adapun data hasil pengujian dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti

No.	Jenis Kabel	Ukuran	Nilai Terukur		Standar (SPLN, SNI, IEC)	Satuan
			Kabel A	Kabel B		
1	NA2XSY	1 X 240 mm ²	3	0.5	Max. 5	pC
2	NA2XSY	1 X 630 mm ²	1.5	0.6	Max. 5	pC
3	N2SXY	1 X 95 mm ²	3.2	1.4	Max. 5	pC
4	N2SXY	1 X 35 mm ²	0.4	0.4	Max. 5	pC

Sumber : PT PLN(PERSERO) PUSLITBANG KETENAGALISTRIKAN

4.1.1.2 Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

No.	Jenis Kabel	Ukuran	Nilai Terukur		Standar (SPLN, SNI, IEC)	Satuan
			Inti 1	Inti 2		
1	NA2XSEYBY	3 X 150 mm ²	Inti 1 : 1.0	Max. 5	pC	
			Inti 2 : 0.9			
			Inti 3 : 0.9			
2	NA2XSEYBY	3 X 240 mm ²	Inti 1 : 0.7	Max. 5	pC	
			Inti 2 : 0.8			
			Inti 3 : 0.8			
3	N2XSEYFGbY	3 X 95 mm ²	Inti 1 : 0.23	Max. 5	pC	
			Inti 2 : 0.21			
			Inti 3 : 0.24			

Sumber : PT PLN(PERSERO) PUSLITBANG KETENAGALISTRIKAN

4.1.2 Data Hasil Pengujian *Partial Discharge* setelah *Heating Cycle Test*

Pada pengujian *partial discharge* setelah *heating cycle test*, didapatkan dua tabel hasil pengujian, yaitu tabel hasil pengujian kabel tegangan menengah satu inti dan tabel hasil pengujian kabel tegangan menengah tiga inti.

4.1.2.1 Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti

No.	Jenis Kabel	Ukuran	Nilai Terukur		Standar (SPLN, SNI, IEC)	Satuan
			Kabel A	Kabel B		
1	NA2XSY	1 X 240 mm ²	2.5	1.6	Max. 5	pC
2	NA2XSY	1 X 630 mm ²	2.2	4.2	Max. 5	pC
3	N2XSY	1 X 95 mm ²	1.1	1.7	Max. 5	pC
4	N2XSY	1 X 35 mm ²	0.4	1	Max. 5	pC

Sumber : PT PLN(PERSERO) PUSLITBANG KETENAGALISTRIKAN

4.1.2.2 Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

No.	Jenis Kabel	Ukuran	Nilai Terukur	Standar (SPLN,	Satuan
				SNI, IEC)	
1	NA2XSEYBY	3 X 150 mm ²	Inti 1 : 1.0	Max. 5	pC
			Inti 2 : 4.2		
			Inti 3 : 1.7		
2	NA2XSEYBY	3 X 240 mm ²	Inti 1 : 1.2	Max. 5	pC
			Inti 2 : 2.2		
			Inti 3 : 1.0		
3	N2XSEYFGbY	3 X 95 mm ²	Inti 1 : 2.8	Max. 5	pC
			Inti 2 : 3.0		
			Inti 3 : 2.5		

Sumber : PT PLN(PERSERO) PUSLITBANG KETENAGALISTRIKAN

4.2 Analisis Data Hasil Pengujian

Data hasil pengujian *partial discharge* setelah *bending test* akan dijadikan sebagai acuan untuk analisis berikutnya, yaitu *partial discharge* setelah *heating cycle test*. Pada hasil pengujian *partial discharge* setelah *bending test* didapatkan hasil yang memenuhi standar, baik kabel satu inti maupun tiga inti, dalam artian nilai *partial discharge* tiap kabel lolos uji.

4.2.1 Analisis Hubungan Ukuran Kabel dengan Nilai *Partial Discharge*

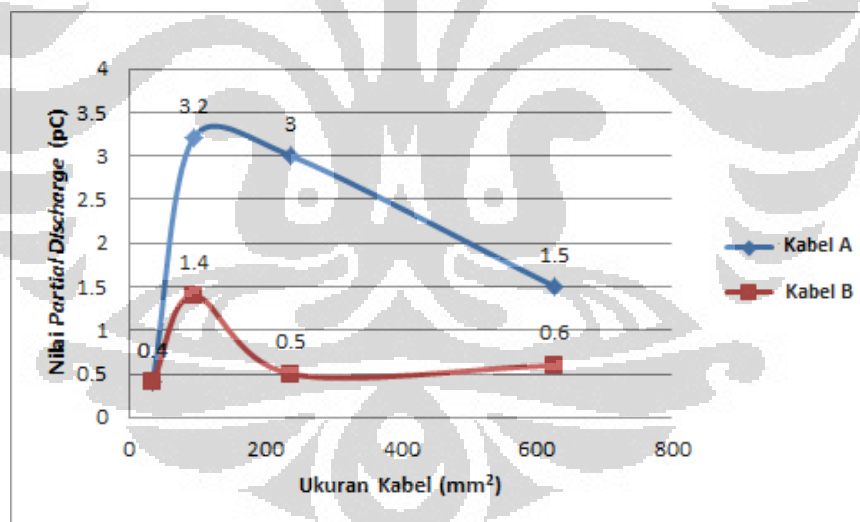
Seperti pada bab dasar teori, cukup dipaparkan bahwa besarnya *partial discharge* pada isolasi padatan dipengaruhi oleh adanya void di dalam isolasi. Lebih lanjut lagi, adanya void akan mempengaruhi nilai kapasitansi pada isolasi kabel. Berdasarkan nilai yang perhitungan yang mengacu pada data pengujian, dapat diketahui bahwa besarnya nilai *partial discharge* sebanding dengan nilai kapasitansi isolasi kabel dengan kondisi tegangan tetap. Dari pernyataan ini dapat kita ketahui, bahwa adanya void dapat meningkatkan nilai kapasitansi isolasi suatu kabel. Hal ini terjadi baik pada kabel satu inti maupun tiga inti.

Lebih dalam lagi, akan diketahui pengaruh diameter pada nilai *partial discharge*. Secara teori, nilai diameter akan mempengaruhi nilai kapasitansi suatu bahan dielektrik. Hal ini dapat terlihat pada rumus dasar kapasitansi suatu bahan dielektrik, seperti terlihat di bawah ini,

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$

dari rumus tersebut dapat diketahui bahwa nilai kapasitansi dipengaruhi oleh diameter, serta jenis bahan dielektrik.

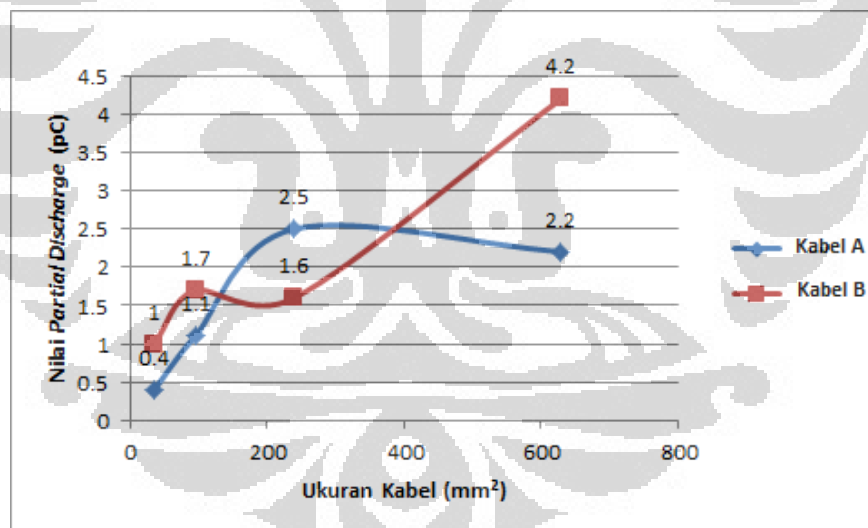
Mengacu pada penjelasan rumus yang dipaparkan pada bab 2, tentang mekanisme terjadinya *partial discharge*, dapat kita ketahui bahwa diameter isolasi tidak signifikan menentukan nilai *partial discharge* yang didapat saat pengujian melainkan hal – hal seperti ukuran void, bentuk void, dan jumlah void, serta letak void yang akan sangat menentukan besarnya nilai *partial discharge* yang akan terbentuk.[4] Keberadaan dan kondisi (ukuran, letak, bentuk) void ini berpengaruh pada nilai kapasitansi dari isolasi kabel yang digunakan, dengan begitu akan mempengaruhi besarnya nilai *partial discharge*.



Gambar 4.1 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Satu Inti Sebelum *Heating Cycle Test*

Grafik di atas menunjukkan hubungan antara ukuran kabel satu inti terhadap nilai *partial discharge* terukur, yang ditunjukkan dengan dua kurva, yaitu kurva biru yang menunjukkan hasil pengukuran kabel A dan kurva merah yang menunjukkan hasil pengukuran kabel B. Grafik ini merupakan hasil

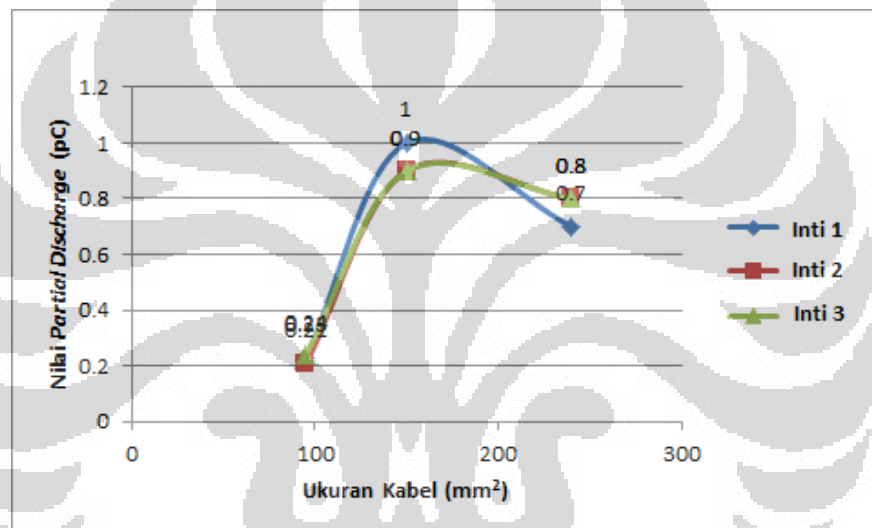
pengujian *partial discharge* setelah *bending test*. Pada kurva biru, terlihat bentuk grafik yang membungkuk, dimana dapat diartikan nilai *partial discharge* terukur tidaklah memiliki bersifat linear terhadap ukuran kabel, malah terjadi kecenderungan hasil pengujian yang acak. Begitu pula pada kurva merah yang memiliki hasil yang acak, pada perbandingan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur, sehingga dari grafik tersebut dapat dikatakan tidak terlihat pola yang menunjukkan keterkaitan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur, sesuai dengan pernyataan sebelumnya dimana yang menentukan besarnya *partial discharge* bukanlah ukuran, melainkan kualitas isolasi dari kabel itu sendiri. Pada grafik tersebut baik pada kabel A maupun pada kabel B memiliki nilai maksimal pada kabel ukuran 95 mm² sehingga dapat dikatakan bahwa kabel XLPE ukuran ini memiliki kualitas isolasi paling buruk, sedangkan nilai terendah pada kabel ukuran terkecil, yaitu 35 mm² yang dapat dikatakan memiliki kualitas isolasi paling baik.



Gambar 4.2 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Satu Inti Setelah *Heating Cycle Test*

Pada kondisi pengujian *partial discharge* setelah *heating cycle test* pun tidak terlihat hubungan yang terpola antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur, meskipun pada beberapa nilai dari kurva di atas terlihat adanya peningkatan nilai *partial discharge* terukur terhadap penambahan ukuran kabel yang diuji. Namun secara keseluruhan, tidak dapat ditarik kesimpulan akan

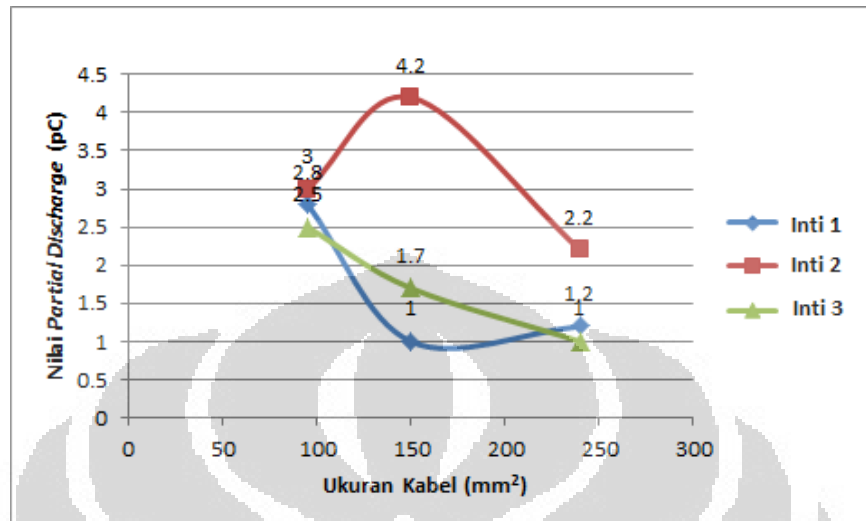
adanya pola kenaikan nilai *partial discharge* dengan pertambahan ukuran kabel, dikarenakan ada beberapa nilai yang secara acak merusak pola tersebut, seperti pada kabel A ukuran 630 mm² dan pada kabel B ukuran 240 mm². Pada hasil pengujian ini, terjadi perubahan nilai maksimum hasil pengujian *partial discharge*, dimana sebelumnya kabel A dan kabel B ukuran 95 mm², memiliki kualitas isolasi terburuk, pada hasil pengujian ini kabel A ukuran 240 mm² dan kabel B ukuran 630 mm², memiliki kualitas isolasi paling buruk yang ditunjukkan dengan nilai *partial discharge* terbesar. Sedangkan untuk nilai *partial discharge* terkecil, masih diperoleh dari kabel A maupun kabel B ukuran terkecil, yaitu 35 mm².



Gambar 4.3 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Tiga Inti Sebelum *Heating Cycle Test*

Hal yang sama pun terjadi pada kabel tiga inti, dimana dari setiap inti diperoleh hasil yang memiliki kemiripan bentuk, yaitu kurva yang membungkok. Dari ketiganya dapat dikatakan bahwa tidak ada pola keterkaitan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* yang terukur. Adapun kemiripan bentuk ini dapat terjadi karena nilai hasil pengujian masing – masing inti pada tiap kabel mirip/sama, dikarenakan inti tiap kabel merupakan hasil produksi yang sama. Pada pengujian kabel tiga inti tersebut memiliki nilai yang terbilang sangat bagus, karena nilai *partial dischargenya* di bawah 1, serta besar nilai antara fasa satu/inti satu dengan yang lain tidak berbeda jauh seperti yang dapat ditunjukkan pada kurva biru merupakan inti 1, kurva merah merupakan inti 2, dan kurva hijau

merupakan inti 3. Kabel dengan ukuran 150 memiliki nilai hasil pengujian partial discharge yang paling besar, baik pada inti 1, 2 dan 3.



Gambar 4.4 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Tiga Inti Setelah *Heating Cycle Test*

Pembenaran akan teori ini semakin diperkuat oleh hasil pengujian *partial discharge* kabel tiga inti setelah *heating cycle test* dimana tidak pula didapatkan pola hubungan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* yang terukur. Pada pengujian ini malah terlihat pola kebalikan dari pengujian kabel satu inti sebelumnya, yaitu penurunan nilai *partial discharge* terhadap penambahan ukuran kabel uji. Dari masing – masing inti pun diperoleh bentuk kurva yang berbeda – beda. Pada inti 1 diperoleh kurva seperti huruf “L”, dimana terjadi pengacakan nilai hasil pengujian pada kabel ukuran 150 mm². Pada kurva yang menggambarkan inti 2, terlihat hasil pencerminan dari inti 1, dimana kabel ukuran 150 mm² memiliki hasil pengujian terbesar. Sedangkan pada inti kabel ketiga, diperoleh kurva yang dapat dikatakan linear, dengan kecenderungan menurun. Dari ketiga bentuk kurva masing – masing inti yang berbeda, menunjukkan hasil pengujian yang berbeda - beda sehingga dapat dikatakan tidak ada pola hubungan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur pada kabel 3 inti, seperti halnya pada hasil pengujian satu inti.

Dengan hasil pengujian tersebut, baik dari hasil pengujian kabel XLPE satu inti maupun tiga inti, terlihat dari bentuk kurva masing – masing dan

perbandingan yang dilakukan berdasarkan teori yang telah dipaparkan, dapat dikatakan bahwa tidak ada pola hubungan antara pengaruh ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur.

4.2.2 Analisis Hubungan Suhu Terhadap Nilai *Partial Discharge*

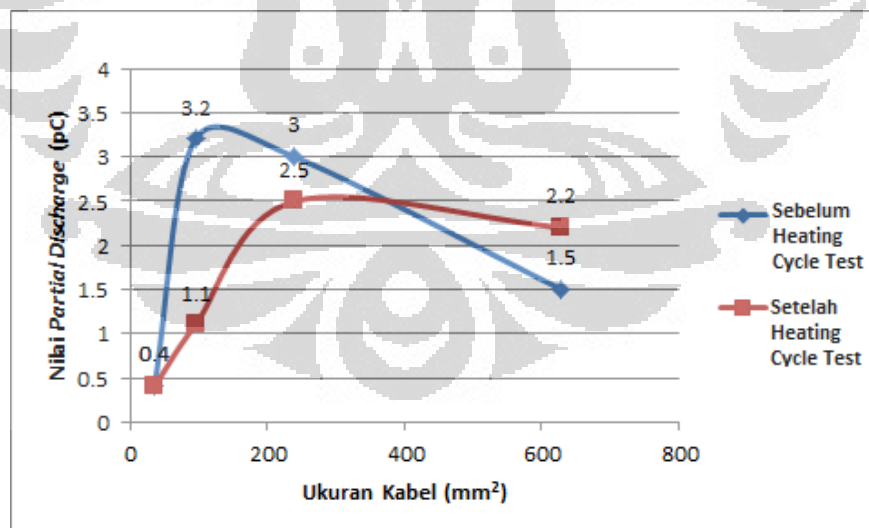
XLPE merupakan hasil perubahan molekul pada polietilena yang berbentuk *cross – linked*, dimana dengan kondisi ini memiliki keunggulan dalam hal suhu tinggi. Perubahan kondisi ini juga mengubah sifat XLPE, dari polietilena yang bersifat *thermoplastic*, menjadi bersifat *thermosetting*. Pada saat suhu tinggi, isolasi XLPE akan cenderung melunak, tidak seperti isolasi polietilena yang akan mencair. Jika kondisi suhu kembali ke suhu semula atau suhu ruang maka isolasi XLPE akan tetap pada bentuk semula tidak seperti polietilena yang akan berubah bentuk sesuai dengan bentuk yang menahannya saat kondisi mencair.

Pengaruh suhu tersebutlah yang akan dilihat pula melalui pengujian *partial discharge* yang dilakukan. Suhu tinggi yang diberikan berasal dari *heating cycle test*, dengan pemberian suhu 5 °C di atas suhu kerja maksimal isolasi XLPE sebesar 95 °C sehingga suhu pada kabel XLPE menjadi 100 °C.

Kondisi isolasi XLPE tidak dapat terelakkan dari keberadaan void karena proses pembuatan XLPE yang sampai saat ini masih akan menghasilkan void, rongga udara pada isolasi kabel XLPE. Secara teori sederhana, udara memiliki sifat memuai jika dipanaskan atau diberikan suhu yang tinggi, sedangkan isolasi XLPE akan melunak pada saat diberikan suhu kerja tinggi. Kedua sifat di atas memiliki korelasi yang konstruktif, maksudnya pada saat diberikan suhu tinggi void dalam isolasi membesar dimungkinkan dengan pemuaian udara serta didukung dengan kondisi isolasi XLPE yang melunak. Hal ini dapat diartikan bahwa ukuran void akan berubah semakin besar yang juga tentunya berefek pada nilai *partial discharge* yang juga akan semakin besar, berdasarkan rumus yang ada pada bab 2, pada penjelasan mekanisme terjadinya *partial discharge*. Pernyataan ini dapat diperkuat jika terdapat dua void yang saling berdekatan, dapat dimungkinkan terjadinya penggabungan void menjadi satu yang berakibat ukuran void yang membesar.

Selain itu berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diketahui adanya korelasi antara pengaruh suhu terhadap nilai *partial discharge* terukur pada pengujian, yaitu semakin besarnya suhu yang diaplikasikan maka semakin meningkat nilai *partial discharge* yang terukur. Hal ini dikarenakan peningkatan suhu yang diberikan menyebabkan adanya peningkatan energi thermal yang diterima oleh polimer yang diperlukan untuk merangsang gerakan vibrasi yang dapat menyebabkan terjadinya pemutusan ikatan polimer. Dengan terputusnya ikatan polimer ini maka akan terjadi ketidakteraturan struktur molekul polimer sehingga memudahkan munculnya *partial discharge*. Jika suhu terus dinaikkan, dan keadaan ini terus berlangsung, maka kerusakan – kerusakan yang timbul pun semakin besar sehingga polimer yang awalnya menjadi isolasi memiliki sifat konduktif yang semakin besar, yang menyebabkan nilai *partial discharge* semakin besar.[5]

Dari paparan teori serta hasil pengujian di atas, dapat kita analisis hasil pengujian *partial discharge* yang telah dilakukan, untuk melihat pola hubungan antara suhu dengan nilai *partial discharge* yang terukur pada pengujian yang telah dilakukan.



Gambar 4.5 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Satu Inti A

Grafik di atas merupakan hasil pengujian pada kabel A, dimana kurva biru menunjukkan nilai *partial discharge* sebelum *heating cycle test*, dan kurva

merah merupakan hasil pengujian setelah *heating cycle test*. Dari grafik tersebut tidak tampak pola hubungan yang jelas antara pengaruh suhu dengan nilai *partial discharge* terukur, dimana hal ini tidak sesuai dengan teori yang telah dipaparkan sebelumnya. Dari grafik tersebut hanya pada kabel ukuran 630 mm² yang memiliki nilai yang sesuai dengan kondisi yang seharusnya, sedangkan hasil pengujian kabel ukuran 35 mm², 95 mm², dan 240 mm² tidak sesuai dengan teori dan hasil pengujian yang seharusnya. Adapun beberapa kemungkinan faktor yang dapat menyebabkan anomali ini akan dibahas lebih lanjut pada poin analisis tambahan.

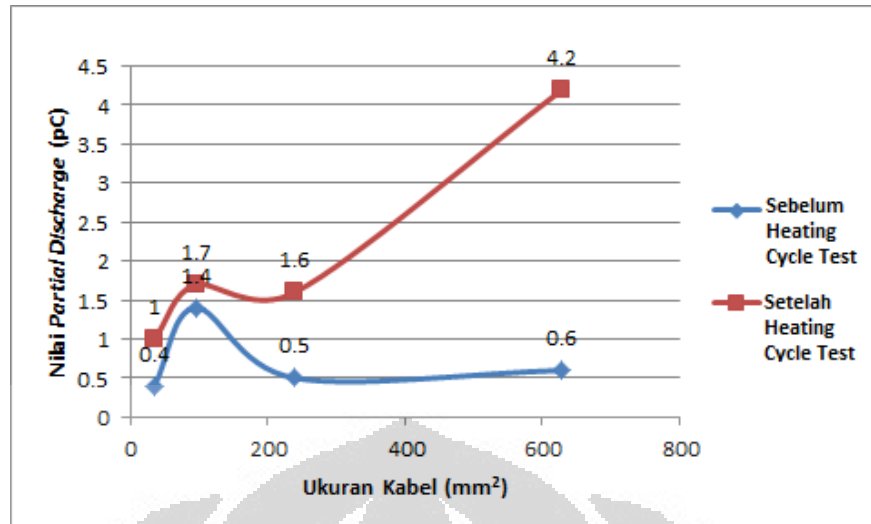
Untuk besarnya kenaikan nilai *partial discharge* yang terukur dapat terlihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti A

No.	Ukuran Kabel	PD sebelum HCT (pC)	PD setelah HCT (pC)	Kenaikan (%)
1	1 x 35 mm ²	0.4	0.4	0
2	1 x 95 mm ²	3.2	1.1	-65.63
3	1 x 240 mm ²	3	2.5	-16.67
4	1 x 630 mm ²	1.5	2.2	46.67

Catatan : HCT = *Heating Cycle Test* ; PD = *Partial Discharge*

Dari tabel di atas dapat kita lihat bahwa besarnya persentase kenaikan nilai *partial discharge*, pada kabel berukuran 35 mm² bernilai nol, yang tidak mengalami perubahan nilai pengujian. Sedangkan dua data yang lain, yaitu kabel ukuran 95 mm² dan 240 mm² yang menunjukkan nilai negatif, yang berarti penurunan akan nilai *partial discharge*, dimana besar penurunan terbesar terjadi pada kabel 95 mm² yang mencapai 65,63 %. Namun pada kabel A ini masih didapat data yang valid dalam artian sesuai dengan teori, yaitu kenaikan data hasil pengujian akibat peningkatan suhu yang diberikan, sehingga terjadi kenaikan mencapai 46,67 %.



Gambar 4.6 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* Kabel Satu Inti B

Sedangkan pada kabel B, seperti terlihat pada kurva di atas didapatkan pola hubungan antara suhu dengan nilai *partial discharge* terukur yang sesuai dengan teori dan hasil pengujian yang pernah dilakukan sebelumnya, yakni adanya peningkatan nilai *partial discharge* setelah isolasi diberikan kenaikan suhu yang berasal dari *heating cycle test*, dengan besar kenaikan dapat terlihat pada tabel di bawah ini.

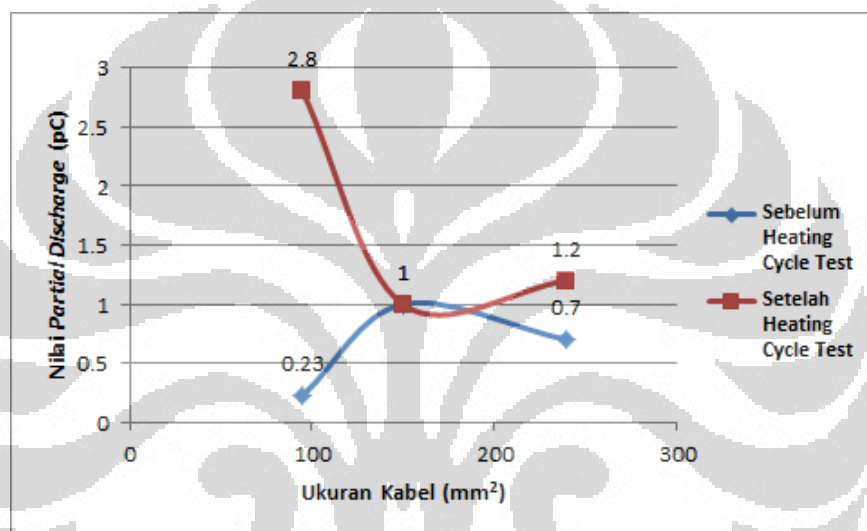
Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kabel XLPE Tegangan Menengah Satu Inti B

No.	Ukuran Kabel	PD sebelum HCT (pC)	PD setelah HCT (pC)	Kenaikan (%)
1	1 x 35 mm ²	0.4	1	150
2	1 x 95 mm ²	1.4	1.7	21.43
3	1 x 240 mm ²	0.5	1.6	220
4	1 x 630 mm ²	0.6	4.2	600

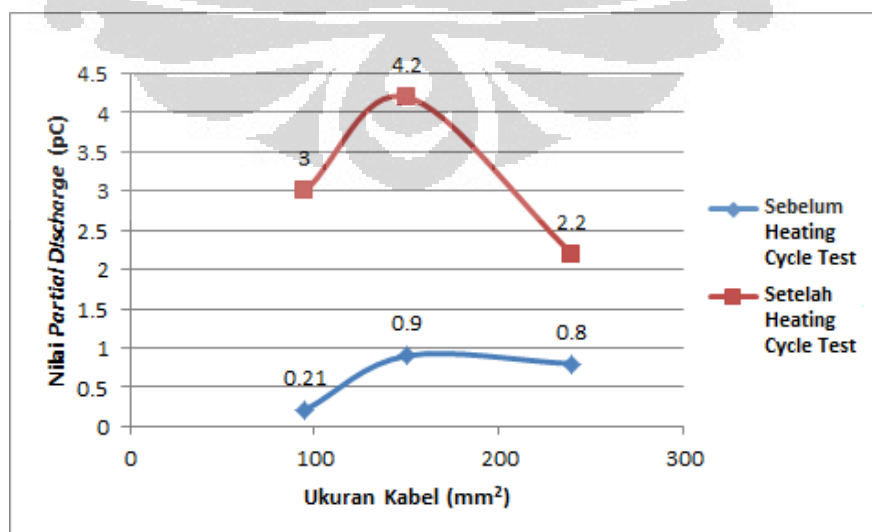
Catatan : HCT = *Heating Cycle Test* ; PD = *Partial Discharge*

Dari tabel di atas diketahui bahwa, seluruh hasil pengujian dari masing – masing ukuran kabel mengalami kenaikan, dimana pada ukuran kabel 630 mm² memiliki persentase kenaikan terbesar, mencapai 600%, atau enam kali lipat dari pengujian sebelum *heating cycle test*. Besarnya persentasi kenaikan di atas sangatlah acak, atau tidak dapat diperkirakan untuk pengaruhnya pada tiap kabel

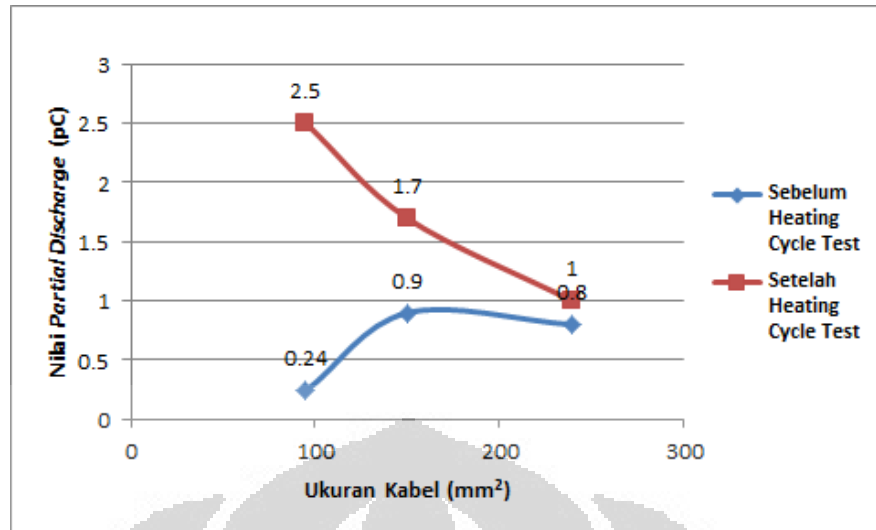
uji. Namun, jika hanya menilik pada kabel satu inti saja tidak dapat ditarik kesimpulan akan pengaruh suhu terhadap nilai *partial discharge* yang terukur mengingat pengujian dilakukan pada kabel tiga inti juga. Pernyataan adanya pengaruh peningkatan suhu terhadap kenaikan nilai *partial discharge* yang terukur semakin terbukti pada hasil pengujian pada kabel tiga inti dimana terlihat pada masing – masing inti terdapat kenaikan nilai *partial discharge* setelah *heating cycle test*. Hal ini dapat terlihat pada tiga grafik hasil pengujian *partial discharge* setelah *heating cycle test* pada kabel tiga inti di bawah ini.



Gambar 4.8 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* pada Inti 1 Kabel Tiga Inti



Gambar 4.8 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* pada Inti 2 Kabel Tiga Inti



Gambar 4.8 Grafik Ukuran Kabel vs *Partial Discharge* pada Inti 3 Kabel Tiga Inti

Dari ketiga grafik di atas terlihat adanya pengaruh kenaikan suhu terhadap kenaikan nilai *partial discharge* yang terukur. Meskipun secara mayoritas dari ketiga inti terjadi kenaikan, tetapi ada satu data pada inti 1 kabel ukuran 150 mm² yang mengalami anomali, yakni tidak terjadi perubahan nilai hasil pengujian. Adapun anomali ini akan dijelaskan pada analisis tambahan. Adapun besarnya persentase kenaikan ini dapat lebih jelas terlihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Inti 1 pada Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

No.	Ukuran Kabel	PD sebelum HCT (pC)	PD setelah HCT (pC)	Kenaikan (%)
1	3 x 95 mm ²	0.23	2.8	1117.39
2	3 x 150 mm ²	1	1	0.00
3	3 x 240 mm ²	0.7	1.2	71.43

Catatan : HCT = *Heating Cycle Test* ; PD = *Partial Discharge*

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Inti 2 pada Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

No.	Ukuran Kabel	PD sebelum HCT (pC)	PD setelah HCT (pC)	Kenaikan (%)
1	3 x 95 mm ²	0.21	3	1328.57
2	3 x 150 mm ²	0.9	4.2	366.67
3	3 x 240 mm ²	0.8	2.2	175

Catatan : HCT = *Heating Cycle Test* ; PD = *Partial Discharge*

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Inti Tiga Kabel XLPE Tegangan Menengah Tiga Inti

No.	Ukuran Kabel	PD sebelum HCT (pC)	PD setelah HCT (pC)	Kenaikan (%)
1	3 x 95 mm ²	0.24	2.5	941.67
2	3 x 150 mm ²	0.9	1.7	88.89
3	3 x 240 mm ²	0.8	1	25

Catatan : HCT = *Heating Cycle Test* ; PD = *Partial Discharge*

Secara keseluruhan, jika diambil dari mayoritas data hasil pengujian, terlihat pola adanya kenaikan nilai *partial discharge* terukur akibat kenaikan suhu yang diberikan pada kabel uji, dimana hal ini sesuai dengan teori dan hasil pengujian sebelumnya. Hal lain yang menyebabkan adanya peningkatan ini adalah dengan adanya pemberian tegangan kritis pada kabel uji dapat mengakibatkan adanya perubahan pada void, dimana void yang berdekatan akan dimungkinkan terjadi penggabungan yang berakibat pada pembesaran ukuran void.[4] Hal ini yang juga berdampak pada kenaikan nilai *partial discharge* hasil pengujian setelah *heating cycle test*. Namun, dari data di atas masih belum dapat dipastikan berapa atau bagaimana pola pasti yang terbentuk, karena nilai dari masing – masing kenaikan berbeda – beda.

4.2.3 Analisis Tambahan (Pengaruh Faktor Lain terhadap Nilai *Partial Discharge* Terukur)

Pada analisis ini akan dibahas tentang anomali – anomali yang terjadi dan didapatkan selama pengujian. Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan beberapa hasil pengujian yang tidak sesuai dengan beberapa teori yang telah dipaparkan, salah satunya terlihat pada grafik 4.6, dimana seharusnya terjadi kenaikan nilai *partial discharge* terukur. Berdasarkan hasil diskusi dengan pegawai yang berpengalaman dalam melakukan pengujian tersebut, ditambah dengan beberapa asumsi penulis dari hasil pengamatan selama pengujian serta studi literatur, didapatkan beberapa kemungkinan akan terjadinya anomali tersebut, antara lain :

a. Proses Persiapan Pengujian

Pada proses ini, hal – hal yang memungkinkan untuk menghasilkan anomali data adalah pada proses pengupasan kabel, dan peletakan posisi serta

pengkondisian kabel. Proses pengupasan kabel sangat penting dalam pengujian ini, dikarenakan proses ini kebanyakan masih dilakukan secara manual, sehingga tidaklah luput dari kesalahan yang dapat menyebabkan kerusakan dalam skala kecil maupun besar. Sebagai contoh kerusakan yang terjadi adalah terlukanya bagian isolasi, seperti tertusuk, lecet, atau timbul sedikit lubang pada bagian isolasi. Kerusakan kecil sekalipun pada bagian kabel, terutama isolasi dapat berpengaruh pada hasil pengujian. Sedangkan peletakan posisi dan pengkondisian kabel ini cukup berpengaruh karena posisi kabel yang tertekuk/belok ataupun terikat juga mempengaruhi nilai pengujian. Hal ini dapat terjadi karena pada bagian belokan/tekukan kabel terjadi kondisi penyempitan void pada bagian dalam tekukan dan peluasan void pada bagian luar tekukan.

b. Proses Pengujian

Pada proses pengujian pun berpengaruh pada hasil pengujian, salah satu hal yang memungkinkan untuk menjadikan data pengujian anomali adalah saat penentuan nilai pengujian. Penentuan nilai pengujian dilakukan dengan melihat kondisi nilai saat *steady*, namun bisa saja terjadi kesalahan karena pada pengukuran *partial discharge* terdapat gelombang yang tidak datang sekali, sehingga bisa saja nilai yang terukur bukanlah nilai yang seharusnya.

BAB V

KESIMPULAN

1. *Partial discharge* pada kabel dipengaruhi oleh besarnya tegangan yang diterapkan, waktu penerapan, kondisi fisik kabel dan kualitas isolasi yang dapat terlihat dari kapasitansi isolasi kabel.
2. Pada pengujian yang dilakukan, didapatkan bahwa tidak ada pola hubungan antara ukuran kabel dengan nilai *partial discharge* terukur baik pada kabel XLPE satu inti maupun tiga inti.
3. Pada hubungan antara suhu dengan nilai *partial discharge* terukur, terdapat pola yang nyata yaitu setelah pemberian suhu tinggi pada kabel melalui *heating cycle test* dapat meningkatkan nilai *partial discharge* terukur, yang terjadi baik pada kabel XLPE satu inti maupun tiga inti.
4. Besarnya peningkatan nilai *partial discharge* terukur setelah pemberian suhu tinggi bervariasi, pada kabel satu inti mencapai enam kali nilai semula, sedangkan pada kabel tiga inti mencapai 13 kali nilai semula.
5. Anomali – anomali yang terjadi pada hasil pengujian dapat disebabkan oleh proses persiapan pengujian, seperti pengupasan kabel dan proses penentuan nilai *partial discharge* saat pengujian.

DAFTAR ACUAN

- [1] Willis, H. Lee. 1999. *Electrical Power Cable Engineering*. USA : Marcel Dekker, Inc.
- [2] IEC 60502 – 2, Edition 1.1, *Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages From 1 kV ($U_n = 1,2 \text{ kV}$) Up To 30 kV ($U_n = 36 \text{ kV}$)*, 1998.
- [3] IEC 60270:2000, *High - Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements*, march 2001.
- [4] Warvian, Dallih. *Perhitungan Pelepasan Muatan Sebagian pada Rongga Udara di dalam Isolasi Ethylene Propylene Rubber*. Skripsi Program Studi Teknik Elektro Universitas Indonesia, 2010.
- [5] Ari Prasajo, Winarko. *Analisis Partial Discharge Pada Material Polimer Resin Epoksi Dengan Menggunakan Elektroda Jarum Bidang*. Program Studi Teknik Elektro Universitas Diponegoro.
- [6] http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IITKANPUR/HighVoltageEngg/ui/Course_home3_18.htm
- [7] Daman Susanto : *Sistem Distribusi Tenaga Listrik*