

**ANALISIS PENGARUH MEDAN LISTRIK LOKAL
TERHADAP KECEPATAN PERTUMBUHAN
PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE**

SKRIPSI

Oleh

RACHMAT SETIADI
04 03 03 0853



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

**ANALISIS PENGARUH MEDAN LISTRIK LOKAL
TERHADAP KECEPATAN PERTUMBUHAN
PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE**

SKRIPSI

Oleh

RACHMAT SETIADI
04 03 03 0853



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

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

ANALISIS PENGARUH MEDAN LISTRIK LOKAL TERHADAP KECEPATAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE

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

Depok, Januari 2008

Rachmat Setiadi

NPM. 04 03 03 0853

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**ANALISIS PENGARUH MEDAN LISTRIK LOKAL TERHADAP
KECEPATAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK
PADA KABEL XLPE**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, Januari 2008

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Rudy Setiabudy

NIP. 131 402 966

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr. Ir. Rudy Setiabudy

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Rachmat Setiadi
NPM 04 03 03 0853
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Rudy Setiabudy

**ANALISIS PENGARUH MEDAN LISTRIK LOKAL
TERHADAP KECEPATAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN
LISTRIK PADA KABEL XLPE**

ABSTRAK

Pemohonan listrik merupakan salah satu penurunan kemampuan (degradasi) pada bahan isolasi padat berupa struktur mirip pohon, bercabang-cabang akibat medan listrik tak seragam yang sangat tinggi antara bahan isolasi dengan konduktor atau induksi dari rongga Medan listrik lokal sebesar lebih dari 1MV/mm dapat muncul di daerah seperti ini. Penurunan kemampuan (degradasi) lokal akibat tekanan medan listrik seperti ini akan menginisiasi munculnya pemohonan listrik.

Pemohonan ini makin lama akan makin panjang yang akan menghubungkan elektroda atau bagian konduktor dengan konduktor lain. Bila hal ini terjadi maka biasanya isolasi polimer sudah tidak dapat lagi berfungsi untuk menahan medan listrik normal.

Pada skripsi ini, akan dibahas pengaruh tekanan medan listrik lokal pada isolasi XLPE pada kabel bawah tanah terhadap pertumbuhan pemohonan listrik. Pada skripsi ini akan diamati pula pengaruh tegangan yang diterapkan dan jari-jari ujung tonjolan pada permukaan tabir konduktor terhadap medan listrik lokal tersebut, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi pertumbuhan pemohonan listrik.

Kata Kunci : Pemohonan listrik, penurunan (degradasi) isolasi , medan listrik lokal, kabel XLPE

Rachmat Setiadi
NPM 04 03 03 0853
Electrical Engineering Departement

Counsellor
Dr. Ir. Rudy Setiabudy

**ANALYSIS OF LOCAL ELECTRICAL FIELD INFLUENCE
UPON ELECTRICAL TREEING GROWTH VELOCITY
WITHIN XLPE CABLE**

ABSTRACT

Electrical treeing is pre-breakdown phenomenon in insulation with structure like tree, branched by high divergen electrical field between insulation and conductor or partial discharge in void. Local electrical field above 1MV/mm can be appeared in this region. Local insulation degradation by such electrical field will initiate electrical treeing.

This electrical treeing will increase higher, ultimately that can bridged between electrodes. In this case, insulation won't be longer withstand normal electrical field.

In this paper, local field effect toward electrical treeing growth within XLPE cable will be discused. In this paper, influence of voltage and protrusion tip radius toward such a local electrical field ultimately can effect treeing growth , will be observed.

Keyword : Electrical treeing, insulation degradation, local electrical field , XLPE cable

DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SINGKATAN	xiii
DAFTAR ISTILAH	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB 2 PEMBENTUKAN DAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE	4
2.1 KABEL TEGANGAN MENENGAH	4
2.1.1 Konstruksi Kabel XLPE	5
2.1.2 Isolasi XLPE	7
2.2 MASALAH PELUAHAN SEBAGIAN (<i>Partial discharge</i>)	8
2.2.1 Teori Peluahan Sebagian (<i>partial discharge</i>)	8
2.2.2 Pembentukan Rongga Udara (<i>void</i>)	9
2.2.3 Aspek -Aspek Pelepasan Muatan Sebagian (<i>partial discharge</i>) ..	10
2.3 PEMBENTUKAN PEMOHONAN LISTRIK	11
2.3.1 Tipe Pemohonan Listrik	12

2.4 ANALISIS KESEIMBANGAN ENERGI PADA PROSES PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK	14
2.5 PEMOHONAN YANG DIPENGARUHI TEKANAN MEDAN LISTRIK	16
BAB 3 PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE	21
3.1 TEKANAN MEDAN LISTRIK	21
3.1.1 Arah Medan Listrik	21
3.1.2 Medan Listrik pada Lekukan (Tonjolan) Sebuah Permukaan	22
3.2 PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA KABEL TANAH	24
3.2.1 Perhitungan Medan Listrik pada Tabir Konduktor (<i>conductor screen</i>)	26
3.2.2 Perhitungan Medan Listrik pada Tabir Isolasi (<i>insulation screen</i>)	27
3.2.3 Perhitungan Medan Listrik Pada Bahan Isolasi	28
3.3 PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK LOKAL PADA UJUNG TONJOLAN (<i>Protrusion</i>) PADA PERMUKAAN TABIR KONDUKTOR.....	28
3.4 PERHITUNGAN PEMANJANGAN PEMOHONAN (<i>Treeing</i>) AKIBAT DARI MEDAN LISTRIK LOKAL	29
BAB 4 ANALISIS HASIL PERHITUNGAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE.....	31
4.1 UMUM	31
4.2 HASIL PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA KABEL XLPE ..	32
4.2.1 Hasil Perhitungan Medan Listrik pada Bahan Isolasi	32
4.2.2 Hasil Perhitungan Medan Listrik Lokal	33
4.2.3 Pemanjangan Pemohonan Listrik pada Ketiga Sampel akibat Medan Listrik Lokal	34
4.3 PENGARUH TEGANGAN YANG DITERAPKAN TERHADAP PEMANJANGAN PERMOHONAN LISTRIK	39
4.3.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Medan Listrik Lokal	39
4.3.2 Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Beberapa Nilai	

Tegangan yang Diterapkan	40
4.3.3 Perbandingan Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Tegangan yang Diterapkan Sebesar 20 KV, 21 KV, dan 22 KV	43
4.3.4 Pengaruh Tegangan yang Diterapkan terhadap Waktu Terjadinya Kegagalan (<i>breakdown time</i>)	44
4.4 PENGARUH JARI-JARI UJUNG TONJOLAN (<i>Protrusion</i>) PADA PERMUKAAN TABIR KONDUKTOR TERHADAP PEMANJANGAN PERMOHONAN LISTRIK.....	45
4.4.1 Pengaruh Jari-Jari Ujung <i>Protrusion</i> Terhadap Medan Listrik Lokal	45
4.4.2 Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Beberapa Nilai Jari-Jari Ujung Tonjolan (<i>protrusion</i>) pada Permukaan	48
4.4.3 Perbandingan Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Jari-Jari Ujung <i>Protrusion</i> Sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm	51
4.4.4 Pengaruh Jari-Jari Ujung Tonjolan (<i>protrusion</i>) terhadap Waktu Terjadinya Kegagalan (<i>breakdown time</i>)	52
BAB 5 KESIMPULAN	54
DAFTAR ACUAN	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN 1	58
LAMPIRAN 2	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Konstruksi kabel XLPE	6
Gambar 2.2 Struktur Molekul XLPE	8
Gambar 2.3 Rongga udara (<i>void</i>) di dalam isolasi	9
Gambar 2.4 Representasi rangkaian ekuivalen Whitehead	10
Gambar 2.5 <i>Vented tree</i>	13
Gambar 2.6 <i>Bow tie tree</i>	13
Gambar 2.7 Ilustrasi bentuk dari pemohonan listrik	14
Gambar 2.8 Pertumbuhan kanal pemohonan	14
Gambar 2.9 Perambatan pemohonan dan proses percabangannya	16
Gambar 3.1 Komponen medan listrik E pada permukaan	22
Gambar 3.2. Muatan elektron pada permukaan benda yang tidak teratur..	23
Gambar 3.3 Muatan cenderung berkumpul di daerah lekukan (tonjolan) yang lebih tajam.....	24
Gambar 3.4 Beda potensial antara 2 titik yang membentuk gradien tegangan	26
Gambar 4.1 Skema pengamatan pertumbuhan pemohonan listrik pada bahan isolasi.....	32
Gambar 4.2 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 1 terhadap waktu.....	36
Gambar 4.3 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 2 terhadap waktu	37
Gambar 4.4 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 3 terhadap waktu (menit)	38
Gambar 4.5 Grafik pengaruh tegangan yang diterapkan terhadap medan listrik lokal.	40

Gambar 4.6	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV.....	41
Gambar 4.7	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV	42
Gambar 4.8	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV	43
Gambar 4.9	Kecepatan pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu	44
Gambar 4.10	Grafik hubungan antara tegangan yang diterapkan dengan waktu terjadinya kegagalan (<i>breakdown time</i>).....	45
Gambar 4.11	Grafik pengaruh jari-jari ujung <i>protrusion</i> terhadap medan Listrik lokal.....	46
Gambar 4.12	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana ujung <i>protrusion</i> sebesar 10 μm	48
Gambar 4.13	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana ujung <i>protrusion</i> sebesar 15 μm	49
Gambar 4.14	Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana ujung <i>protrusion</i> sebesar 20 μm	50
Gambar 4.15	Grafik perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan jari-jari ujung <i>protrusion</i> sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm sebelum terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>).....	51
Gambar 4.16	Grafik hubungan antara jari-jari ujung <i>protrusion</i> pada permukaan dengan waktu terjadinya kegagalan (<i>breakdown time</i>)	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Data sampel kabel XLPE 20 KV	31
Tabel 4.2 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) pada sampel 1	35
Tabel 4.3 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) pada sampel 2	37
Tabel 4.4 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) pada sampel 3.	38
Tabel 4.5 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV.....	40
Tabel 4.6 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV.....	41
Tabel 4.7 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV.....	42.
Tabel 4.8 Perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV, 21 KV, dan 22 KV	43
Tabel 4.9 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung <i>protrusion</i> sebesar 10 μm	48
Tabel 4.10 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung <i>protrusion</i> sebesar 15 μm	49
Tabel 4.11 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung <i>protrusion</i> sebesar 20 μm	50
Tabel 4.12 Perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan jari-jari ujung <i>protrusion</i> sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm sebelum terjadinya kegagalan (<i>breakdown</i>)	51

DAFTAR SINGKATAN

AC	Alternating Current
DPZ	Damage Process Zone
EPR	Ethylene Propylene Rubber
KV	Kilo Volt
MV	Mega Volt
PD	Partial Discharge
PE	Polyethylene
PVC	Poly Vinyl Chloride
XLPE	Cross Linked Polyethylene

DAFTAR ISTILAH

Breakdown strength	Ketahanan terhadap kegagalan
Degradasi isolasi	Penurunan kemampuan isolasi
Fraktal	Suatu bentuk yang dibentuk dari bagian-bagian dengan bentuk yang serupa.
Inisiasi pemohonan	Proses permulaan dalam pembentukan pemohonan
Irreversible	Tidak dapat kembali ke bentuk semula
Isolasi	Bahan yang berfungsi untuk menahan tekanan listrik
Kanal	Bagian utama jalur pemohonan
Konduktif	Dapat menghantarkan listrik
Konduktor	Bahan yang dapat menghantarkan listrik
Kontaminan	Kotoran-kotoran seperti logam yang menimbulkan medan listrik tinggi sehingga bahan isolasi tersebut menjadi terlalu panas dan memburuk
Korona	Fenomena terlepasnya muatan listrik dari permukaan bahan penghantar arus listrik.
Peluhan sebagian	Peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut.
Permitivitas dielektrik	Batas kemampuan suatu bahan dielektrik dalam menahan medan listrik.
Protrusion	Tonjolan pada permukaan
Reversible	Dapat kembali ke bentuk semula
Void	Rongga yang berisi gas atau udara

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Pada pemakaian isolasi polimer, sering ditemukan adanya gas yang terperangkap didalamnya. Secara umum, gas memiliki konstanta dielektrik yang kecil (mendekati 1) dibandingkan dengan konstanta dielektrik isolasi polimer (antara 2 - 6) sehingga gas akan mendapat medan listrik yang lebih besar dari isolasi polimer, padahal kekuatannya lebih rendah. Dengan demikian gas akan tembus ada saat isolasi polimer masih jauh dari tembus. Tembus gas dalam isolasi padat ini dinamakan peluahan sebagian (*partial discharge*). Akibat peluahan sebagian di dalam rongga udara (*void*), rongga udara (*void*) dapat tumbuh menjadi kanal bercabang-cabang yang membentuk suatu struktur menyerupai ranting-ranting pohon yang disebut pemohonan listrik (*electrical treeing*)^[1].

Pemohonan ini makin lama akan makin panjang yang akan menghubungkan elektroda atau bagian konduktor dengan konduktor lain. Bila hal ini terjadi maka biasanya isolasi polimer sudah tidak dapat lagi berfungsi untuk menahan medan listrik normal.

Pemohonan listrik juga dapat bermula dari medan listrik yang sangat tinggi di dalam isolasi polimer karena adanya permukaan konduktor yang tajam atau ada kontaminan konduktif. Medan listrik lokal sebesar lebih dari 1MV/mm dapat muncul di daerah seperti ini. Penurunan kemampuan (degradasi) lokal akibat tekanan medan listrik seperti ini akan menginisiasi munculnya pemohonan listrik.

Untuk memperlambat waktu terjadinya pemohonan listrik dapat dilakukan dengan membuat isolasi dengan kepadatan yang homogen, untuk mencegah terjadinya rongga udara (*void*), membuat permukaan yang bersentuhan antara konduktor dengan isolasi sehalus mungkin sehingga tidak ada bagian yang menonjol, yang akan mengakibatkan terjadinya medan yang besar dan terpusat di satu titik.

Pemohonan listrik ditemukan pada isolasi polimer di daerah yang memiliki medan listrik yang tinggi, seperti pada bagian yang tajam (tonjolan)

pada logam dan kontaminan yang bersifat konduktif. Peluahan sebagian yang terjadi di dalam rongga udara (*void*) juga dapat menyebabkan pemohonan listrik, karena rongga udara (*void*) ini dapat menjadi sumber kedua untuk terbentuknya pemohonan listrik.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Mengetahui pengaruh tekanan medan listrik lokal terhadap pertumbuhan pemohonan listrik serta mengetahui pengaruh tegangan yang diterapkan dan jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*) pada tabir konduktor yang mempengaruhi medan listrik lokal tersebut.

1.3 BATASAN MASALAH

Penulisan skripsi ini dibatasi oleh beberapa hal :

- a. Terbatas pada pemohonan listrik. Pada skripsi ini tidak dibahas tentang pemohonan air.
- b. Pemohonan listrik terjadi pada isolasi XLPE.
- c. Pemohonan listrik berbentuk *vented tree* .
- d. Prediksi pemanjangan pemohonan listrik menggunakan pendekatan termodinamika.

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah studi literatur dari jurnal-jurnal dan buku-buku referensi sehingga diperoleh konsep dasar mengenai proses pertumbuhan, dan perambatan pemohonan listrik serta faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan perambatan pemohonan listrik tersebut.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab, yaitu : Pendahuluan, Pembentukan dan Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE, Perhitungan Medan Listrik pada Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE, Analisis Hasil Perhitungan Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE, dan Kesimpulan.

Bab Satu Pendahuluan berisi mengenai latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab Dua Pembentukan dan Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE berisi teori mengenai proses terjadinya pemohonan listrik dan faktor-faktor yang mempengaruhinya. Bab Tiga Perhitungan Medan Listrik pada Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE berisi perhitungan medan listrik pada rongga udara (*void*) dan medan listrik pada bahan XLPE dimana medan listrik tersebut mempengaruhi medan listrik lokal yang ada di ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan yang selanjutnya medan listrik lokal ini akan mempengaruhi pertumbuhan pemohonan listrik. Bab Empat Analisis Hasil Perhitungan Pertumbuhan Pemohonan Listrik pada Kabel XLPE berisi hasil perhitungan dan analisis dari hasil perhitungan tersebut. Bab Lima Kesimpulan berisi kesimpulan yang didapat dari hasil perhitungan dan analisis pengaruh medan listrik lokal terhadap pertumbuhan pemohonan listrik.

BAB 2

PEMBENTUKAN DAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE

2.1 KABEL TEGANGAN MENENGAH

Menurut publikasi IEC no 502, kabel tegangan menengah berisolasi adalah kabel listrik berisolasi yang terdiri dari kabel berinti tunggal (*single core*) atau berinti banyak (*multicore*) untuk instalasi tetap di bawah tanah, di atas tanah atau digantungkan diantara jaringan tegangan menengah.

Tegangan pengenal untuk kabel tegangan menengah dinyatakan dengan U_0/U (U_m), misalkan sebagai berikut :

6/10 (12) KV

12/20 (24) KV

U_0 adalah tegangan yang diukur antara penghantar dan bumi (*phase to neutral voltage*).

U adalah tegangan yang diukur antar masing-masing penghantar (*phase to phase voltage*).

U_m adalah nilai maksimum tegangan sistem tempat kabel dipasang.

Untuk kode pengenal kabel, Indonesia menggunakan standar VDE0273 sebagai berikut :

N : kabel dengan penghantar tembaga

NA : kabel dengan penghantar aluminium

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)

2X : isolasi *cross-linked polyethylene* (XLPE)

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
 WA : aluminium bergelombang
 WK : tembaga bergelombang
 WS : baja bergelombang
 WRS : baja tahan karat bergelombang
 CV : kawat berisolasi XLPE, selubung PVC
 CE : kawat berisolasi XLPE, selubung PE
 re : penghantar bulat dan padat
 rm : penghantar bulat dipilin
 contoh : NA2XSEFFGbY, 3x150, 12/20 (24) KV

menunjukkan bahwa kabel berinti tiga, berpenghantar aluminium, berisolasi XLPE dengan lapisan tembaga di setiap inti, perisai kawat baja digalvanisasi dan spiral pita baja serta selubung PVC. Luas penampang nominal 150 mm^2 , tegangan pengenal 12/20 KV serta tegangan maksimum 24 KV.

2.1.1 Konstruksi Kabel XLPE

Kabel inti tunggal XLPE 20 KV pada umumnya terdiri dari kawat tembaga atau aluminium yang dipilin dalam bentuk bulat. Inti ini dilapisi oleh bahan semikonduktor bagian dalam / tabir konduktor, isolasi XLPE dan bahan semikonduktor bagian luar / tabir isolasi yang dilakukan dengan proses ekstrusi. Lalu dilapisi dengan pita / kawat tembaga yang fungsinya sebagai pentanahan. Lapisan paling luar adalah lapisan PVC yang berfungsi sebagai pelindung dari pengaruh luar.

Dalam pemakaian sehari-hari antara tabir isolasi dan pita / kawat tembaga dilengkapi dengan pita penahan air (*water blocking tape*) agar kabel tidak mudah kemasukan air, sedangkan untuk melindungi kabel dari kerusakan akibat tekanan mekanik dari luar, maka di bawah lapisan PVC dilengkapi dengan pita baja galvanis.

Di bawah ini adalah konstruksi kabel XLPE dengan bagian-bagiannya



Gambar 2.1 Konstruksi kabel XLPE

(Sumber : ABB XLPE Cable Systems Users Guide)

Kabel XLPE terdiri dari beberapa bagian, yaitu :

a. Konduktor

Merupakan bagian dari kabel yang bertegangan dan berfungsi untuk menyalurkan energi listrik. Umumnya tidak berupa satu hantaran pejal, tetapi kumpulan kawat yang dipilin agar lebih fleksibel. Bahan yang digunakan adalah tembaga atau aluminium.

b. Isolasi

Isolasi suatu bahan merupakan bahan yang berfungsi untuk menahan tekanan listrik sehingga energi listrik tidak bocor kemana-mana. Terdapat berbagai jenis bahan isolasi yang umumnya dikelompokkan menjadi bahan isolasi cair, isolasi gas, dan isolasi padat.

c. Tabir (*screen*)

Untuk tegangan yang tinggi, setiap inti kabel dilengkapi dengan suatu lapisan yang disebut tabir (*screen*), yang terbuat dari bahan semikonduktor. Lapisan tersebut berfungsi untuk :

- Meratakan distribusi medan listrik sehingga tidak terjadi penimbunan tegangan.

- Untuk menahan radiasi medan elektromagnetik.
 - Untuk mengamankan manusia dari bahaya listrik.
- d. Selubung (*sheath*) bagian dalam
- Bagian ini berfungsi untuk menahan air atau uap air agar tidak masuk ke dalam inti kabel.
- e. Pita baja galvanis
- Bagian ini berfungsi untuk pelindung inti kabel dari tekanan luar berupa gaya mekanis.
- f. Selubung (*sheath*) bagian luar
- Lapisan ini berfungsi sebagai pelindung inti kabel dari pengaruh luar, seperti pelindung terhadap korosi, pelindung terhadap gaya mekanis dan gaya listrik, maupun sebagai pelindung terhadap masuknya air atau uap air. Bahan yang digunakan adalah logam, seperti timbal atau aluminium, maupun bahan sintesis seperti PVC.

2.1.2 Isolasi XLPE ^[2]

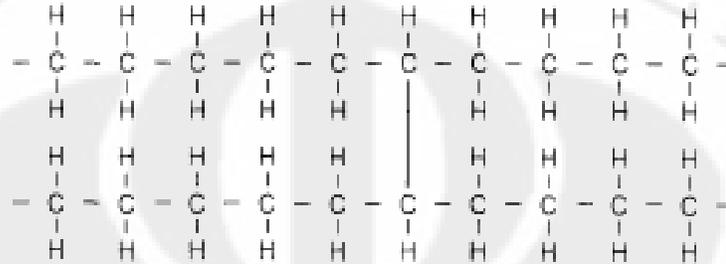
Untuk daerah tropis, kabel distribusi bawah tanah yang sebaiknya digunakan adalah jenis yang isolasinya *ethylene propylene rubber* (EPR) atau *cross-linked polyethylene* (XLPE). Pilihan ini terutama dengan pertimbangan resistivitas termal kedua material ini cukup baik untuk menghadapi temperatur tanah tropis yang tinggi.

XLPE adalah sejenis bahan polimer, yaitu zat yang terdiri dari rantai panjang molekul-molekul kecil (*monomer*) yang bergabung menjadi makromolekul. Material ini memenuhi syarat untuk digunakan sebagai isolasi karena ringan dan elastis. Dibandingkan dengan polimer jenis lain, XLPE lebih unggul dilihat dari rugi-rugi dielektrik dan resistivitas termalnya. Titik leburnya lebih tinggi sehingga dapat beroperasi pada suhu 90⁰ C selama 40 tahun.

XLPE memiliki struktur jaring-jaring PE tiga dimensi dengan jembatan intermolekuler. Pembuatannya dilakukan melalui ikat silang (*cross-linking*) PE melalui reaksi kimia biasanya dengan bantuan peroksida seperti DCP (*di- α -cumyl peroxide*) dalam kondisi suhu dan tekanan yang tinggi. Hasilnya, perbaikan kinerja dilihat dari segi deformasi termal, penuaan termal (*thermal aging*) dan

keretakan akibat tekanan luar. Selain itu hampir seluruh karakteristik unggul dari PE, seperti permitivitas, faktor disipasi, dan ketahanan terhadap kegagalan (*breakdown strength*) tetap dapat dipertahankan.

Dibawah ini adalah struktur XLPE,



Gambar 2.2 Struktur molekul XLPE

2.2 MASALAH PELUAHAN SEBAGIAN (*Partial discharge*)

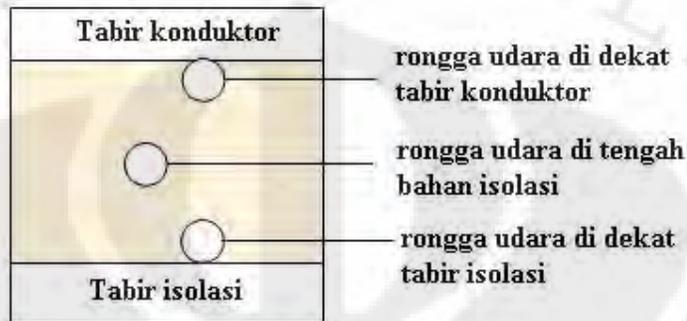
Peluahan sebagian (*partial discharge*) adalah peristiwa pelepasan/loncatan bunga api listrik yang terjadi pada suatu bagian isolasi (pada rongga dalam atau pada permukaan) sebagai akibat adanya beda potensial yang tinggi dalam isolasi tersebut. Peluahan sebagian (*partial discharge*) dapat terjadi pada bahan isolasi padat, bahan isolasi cair maupun bahan isolasi gas.

Peluahan sebagian (*partial discharge*) merupakan kejadian tembus lokal pada isolasi padat atau cair. Pada isolasi cair, *partial discharge* dapat muncul di dalam gelembung udara (*cavity*) yang terperangkap di dalam isolasi cair tersebut. Di dalam isolasi padat, *partial discharge* dapat muncul di dalam rongga udara (*void*). Peluahan sebagian (*partial discharge*) yang terjadi pada sebuah rongga udara (*void*) menyebabkan penurunan kualitas isolasi.

2.2.1 Teori Peluahan Sebagian (*partial discharge*)

Pada sistem kelistrikan, bahan isolasi menjadi pemisah antara konduktor dan pentanahan (*ground*). Bahan isolasi padat mempunyai permitivitas relatif ϵ_r besar sekitar 2 - 6, sedangkan udara/gas biasanya mempunyai permitivitas relatif ϵ_r dianggap 1. Dengan demikian bila didalam isolasi terdapat rongga udara (*void*) yang berisi gas. Padahal kekuatan isolasi gas jauh lebih kecil dari isolasi padat. Dengan demikian, pada saat isolasi padat masih dapat menahan kuat medan

listrik dengan baik, gas yang berada di dalam rongga udara (*void*) mungkin sudah mengalami kegagalan (*breakdown*). Kejadian ini disebut peluahan sebagian (PD=*partial discharge*). Gambar 2.3 memperlihatkan kemungkinan posisi rongga udara (*void*) di dalam isolasi padat.



Gambar 2.3 Rongga udara (*void*) di dalam isolasi

2.2.2 Pembentukan Rongga Udara (*void*)

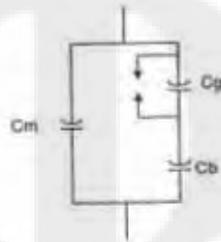
Rongga-rongga yang berisi udara atau gas sering terdapat di dalam isolasi kabel. Rongga udara ini terbentuk pada waktu pembuatan kabel dan juga dapat terbentuk pada waktu pemakaian kabel. Sebagaimana diketahui bahwa kabel terdiri dari bahan yang berlainan. Bahan-bahan ini memiliki koefisien muai yang berlainan. Jika terjadi pemanasan atau pendinginan baik pada waktu pembuatan ataupun pada waktu pembebanan dengan arus maka pemuaian dan penyusutan dari masing-masing bahan itu berbeda. Akibatnya akan terbentuk rongga berisi udara atau gas diantara lapisan tersebut.

Rongga udara (*void*) dapat muncul di dalam isolasi dimungkinkan disebabkan melalui proses yang tidak sempurna. Proses tersebut antara lain :

1. Proses fabrikasi, rongga udara (*void*) terbentuk karena adanya udara bocor saat proses *cross-linking* dari *polyethylene*. *Cross linking* dari *polyethylene* terjadi pada temperature 200-220 °C yang untuk mencapainya digunakan uap panas dan tekanan 1,6-2 Mpa.
2. Pada proses instalasi, seperti pada proses penyambungan kabel dimungkinkan adanya kontaminan udara.
3. Pada operasi kabel, seperti pada kondisi hubung singkat terjadi perubahan termis yang besar pada kabel. Jika tekanan yang dialami melebihi batas

yang dapat ditahan oleh isolasi polimer, maka ikatan polimer dapat lepas sehingga menghasilkan rongga udara (*void*).

Untuk menurunkan hubungan tegangan pada rongga udara (*void*) dan tegangan yang diterapkan pada isolasi polimer, maka dapat digunakan representasi rangkaian ekivalen Whitehead ^[3], seperti pada gambar berikut



Gambar 2.4 Representasi rangkaian ekivalen Whitehead

Rongga udara (*void*) diwakili dengan kapasitor C_g yang diparalel dengan sela percik, yang mengalami peluahan (sekurang-kurangnya PD), ketika tegangan padanya melebihi tegangan permulaan. Sementara kapasitansi isolasi yang berada pada posisi seri dengan rongga udara (*void*) diwakili kapasitor C_b dan bagian isolasi selebihnya diwakili dengan kapasitor C_m . Rangkaian pengganti rongga udara (*void*) dapat dilihat pada gambar dibawah

Jika suatu tegangan AC dengan frekuensi f dan magnitude $V(t)$ diterapkan pada isolasi, maka tegangan rongga udara (*void*) $V_g(t)$ adalah

$$V_g(t) = \frac{C_b}{C_g + C_b} \cdot V(t) \quad (2.1)$$

Besarnya muatan *partial discharge* pada rongga udara (*void*) dinyatakan :

$$Q_g = C_g \cdot V_g \quad (2.2)$$

Kapasitansi total dari seluruh isolasi polimer (C_a) adalah :

$$C_a = C_m + \frac{C_g \cdot C_b}{C_g + C_b} \quad (2.3)$$

$$C_a = \frac{C_g C_m + C_b C_m + C_g C_b}{C_g + C_b} \quad (2.4)$$

2.2.3 Aspek –Aspek Pelepasan Muatan Sebagian (*partial discharge*) ^[2]

Korona adalah fenomena terlepasnya muatan listrik dari permukaan bahan penghantar arus listrik. Modus terlepasnya muatan itu dalam skala besar dapat

terlihat oleh mata, sedangkan untuk skala kecil hanya terdeteksi oleh peralatan khusus.

Terjadinya korona dapat digambarkan sebagai berikut :

- Elektron valensi dapat melepaskan diri dari atom induknya dan menjadi elektron bebas jika mendapatkan tambahan energi yang dibangkitkan oleh suatu medan listrik sehingga mampu melompati media udara.
- Jika elektron-elektron bebas ini terus mendapatkan energi dalam medan listrik, maka elektron-elektron tersebut akan menimbulkan proses tabrakan atomik sehingga menghasilkan ion-ion baru. Proses inilah yang disebut proses ionisasi.
- Setelah elektron-elektron tersebut menabrak atom. Sebuah elektron lagi akan dilepaskan sehingga reaksi berantai akan terjadi dengan pertambahan jumlah elektron secara eksponensial.

2.3 PEMBENTUKAN PEMOHONAN LISTRIK ^[4]

Awal terjadinya pemohonan listrik adalah melalui penyuntikan muatan ke dalam polimer yang disebabkan oleh medan listrik yang tinggi pada elektroda dan juga pelepasan muatan gas pada rongga udara (*void*).

Proses penyuntikan muatan memberikan energi pada polimer yang dapat menyebabkan kerusakan fisik polimer yang kemudian membentuk jalur pelepasan muatan atau kanal. Ini dapat terjadi karena beberapa hal diantaranya :

Pengaruh eksitasi dari elektron yang mempunyai energi kinetik yang cukup (elektron panas) yang dapat mengawali terjadinya penurunan secara kimiawi.

Pada pemakaian isolasi polimer sering ditemukan adanya gas yang terperangkap didalamnya. Secara umum, gas memiliki konstanta dielektrik yang kecil (mendekati 1) dibandingkan dengan konstanta dielektrik isolasi polimer (antara 2 - 6) sehingga gas akan mendapat kuat medan yang lebih besar dari isolasi polimer, padahal kekuatannya lebih rendah.

Dengan demikian gas akan tembus ada saat isolasi polimer masih jauh dari tembus. Tembus gas dalam isolasi padat ini dinamakan peluahan sebagian (*partial discharge*). Akibat peluahan sebagian di dalam rongga udara (*void*), rongga udara (*void*) dapat tumbuh menjadi kanal bercabang-cabang yang membentuk suatu

struktur menyerupai ranting-ranting pohon yang disebut pemohonan listrik (*electrical treeing*).

Pemohonan ini makin lama akan makin panjang yang akan menghubungkan elektroda atau bagian konduktor dengan konduktor lain. Bila hal ini terjadi maka biasanya isolasi polimer sudah tidak dapat lagi berfungsi untuk menahan medan normal. Pemohonan listrik juga dapat bermula dari medan yang sangat tinggi di dalam isolasi polimer karena adanya permukaan konduktor yang tajam atau ada kontaminan konduktif.

Bila radius ketajaman r , jarak elektroda d dan tegangan yang diterapkan V maka besar medan yang telah diturunkan oleh Mason adalah :

$$E = \frac{2V}{r \ln(1 + 4d/r)} \quad (2.5)$$

Medan lokal sebesar lebih dari 1MV/mm dapat muncul di daerah seperti ini. Penurunan kemampuan (degradasi) lokal akibat tekanan medan listrik seperti ini akan menginisiasi munculnya pemohonan listrik. Untuk memperlambat waktu terjadinya pemohonan listrik dapat dilakukan dengan membuat isolasi dengan kepadatan yang homogen, untuk mencegah terjadinya rongga udara (*void*), dan juga membuat permukaan yang bersentuhan antara konduktor dengan isolasi sehalus mungkin sehingga tidak ada bagian yang menonjol, yang akan mengakibatkan terjadinya medan yang besar dan terpusat di satu titik.

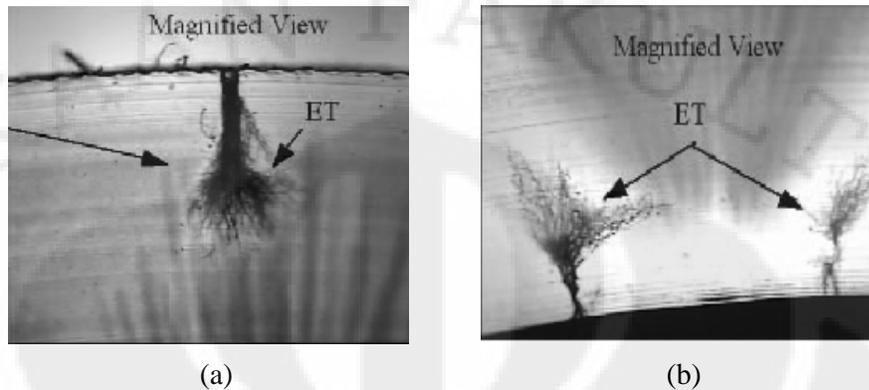
Pemohonan listrik ditemukan pada isolasi polimer di daerah yang memiliki medan listrik yang tinggi, seperti pada kontaminan yang bersifat konduktor dan ketidakaturan struktur. Peluahan sebagian yang terjadi di dalam rongga udara (*void*) juga dapat menyebabkan pemohonan listrik karena rongga udara (*void*) ini dapat menjadi sumber kedua untuk terbentuknya pemohonan listrik.

2.3.1 Tipe Pemohonan Listrik

Berdasarkan arah bentukannya, pemohonan terdiri dari :

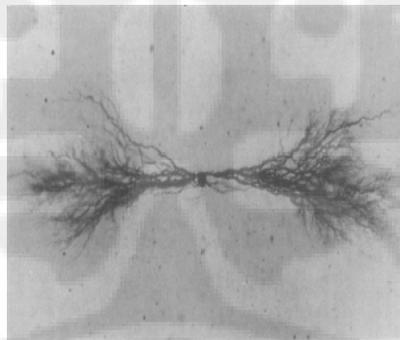
- *Vented tree* : Pemohonannya tumbuh dari permukaan tabir (*screen*) menuju tabir (*screen*) pada sisi lain sepanjang sumbu kuat medan listrik. Ada dua jenis *vented tree* yaitu *vented tree* yang tumbuh dari tabir isolasi

(*insulation screen*) dan *vented tree* yang tumbuh dari tabir konduktor (*conductor screen*).



Gambar 2.5 (a) *Vented tree* yang tumbuh dari tabir isolasi (*insulation screen*)
(b) *Vented tree* yang tumbuh dari tabir konduktor (*conductor screen*)
(Sumber : IEEE Electrical Insulation Magazine)

- *Bow-tie tree* : pemohonannya tumbuh dari bagian tengah isolasi menuju ke arah permukaan tabir (*screen*) dalam arah yang berlawanan sepanjang garis-garis medan listrik.

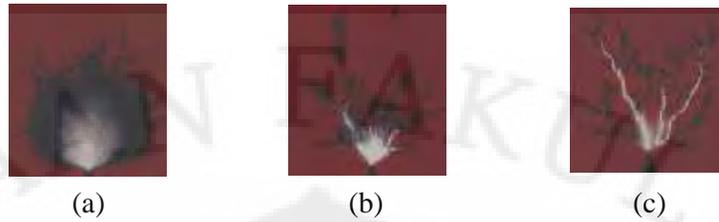


Gambar 2.6 Bow-tie tree

(Sumber : IEEE Electrical Insulation Magazine)

Ada tiga sub kategori bentuk pemohonan listrik, yang secara umum dapat dibedakan sebagai berikut :

- branch type tree,
- bush type tree,
- dan bush-branch type tree.



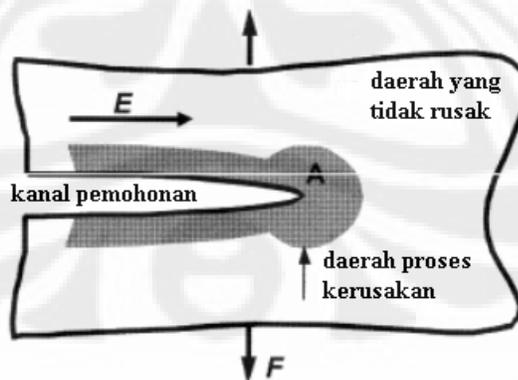
Gambar 2.7 Ilustrasi bentuk dari pemohonan listrik: (a) *Bush type tree*, (b) *Bush-Branch type tree*, dan (c) *Branch type tree*.

(Sumber : Suwarno dan Ronald P. Hutahaean, “Simulasi Pemohonan Listrik (*electrical treeing*) pada Isolasi Polimer dengan Menggunakan Metode Cellular Automata”, ITB Sains & Tek)

2.4 ANALISIS KESEIMBANGAN ENERGI PADA PROSES PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK ^[4]

Pemohonan listrik biasanya berawal dari tempat yang memiliki medan listrik yang tinggi dan divergen. Karena adanya perbedaan tekanan dan medan serta sifat karakteristik bahan yang tidak linear, maka proses pertumbuhan pemohonan menjadi sangat kompleks. Dari sudut pandang termodinamika, semua kejadian di alam cenderung terjadi penurunan energi, begitu pula pada proses perambatan pemohonan listrik.

Oleh karena itu, kita menggunakan pendekatan keseimbangan energi untuk mempelajari masalah perambatan pemohonan listrik pada dielektrik padat. Kita anggap kanal pemohonan yang merambat di dalam dielektrik mengalami tekanan medan listrik dan mekanis seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Kanal pemohonan yang mengalami tekanan listrik dan tekanan mekanis : daerah proses kerusakan / *damage process zone*(DPZ) dan daerah yang tidak rusak / *undamaged zone* pada saat pemohonan merambat dengan kondisi tegangan bolak-balik

Selama kanal pemohonan bergerak maju, medan listrik kuat yang berada didepan kanal menggerakkan elektron dan ion-ion di daerah yang melewati ujung kanal pemohonan dimana elektromekanik dan juga panas dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada daerah tersebut, kita menyebutnya daerah proses kerusakan / *damage proses zone (DPZ)*.

Usaha yang dialami, sebagian tersimpan pada deformasi yang *reversible*, sebagian untuk membentuk kanal pemohonan, dan sebagian lagi terdisipasi pada daerah proses kerusakan (DPZ). Keseimbangan energi untuk konversi energi dan usaha dalam proses perambatan pemohonan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$VdQ + Fd\Delta = dU + gL + g_s dL \quad (2.6)$$

Dimana,

V = tegangan listrik

Q = muatan listrik

F = gaya mekanik

Δ = pergeseran

U = energi dalam yang tersimpan pada dielektrik akibat deformasi yang *reversible*

L = panjang kanal pemohonan

g = energi deformasi plastik untuk membentuk satuan panjang kanal pemohonan.

g_s = energi yang terdisipasi di DPZ selama pemohonan merambat

Berdasarkan termodinamika, energi dalam yang tersimpan dapat dihitung dari persamaan di atas

$$dU = VdQ + Fd\Delta - g_f^C dL \quad (2.7)$$

dimana

g_f^C = jumlah gaya pendorong pemanjangan pemohonan.

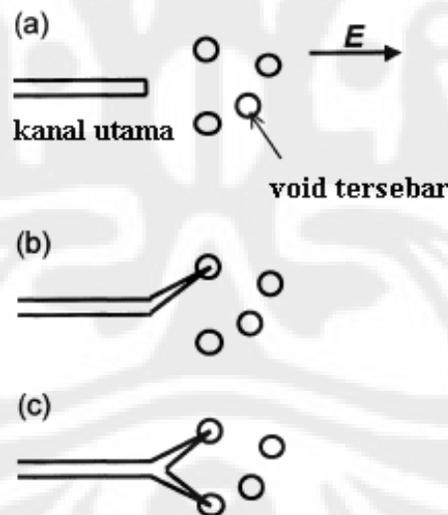
Dari persamaan (2.6) dan (2.7) menunjukkan bahwa kanal pemohonan tidak dapat tumbuh jika $g_f^C < g + g_s$ dan pertumbuhan pemohonan listrik dapat terjadi jika

$$g_f^C \geq g + g_s.$$

Pada gambar 2.8, daerah A merupakan daerah DPZ. Semua panas yang terdisipasi dan energi yang terperangkap juga termasuk g_s berada di daerah A yang *irreversible*. Kemudian jumlah gaya pendorong pemanjangan pemohonan g_t^c bukan merupakan konstanta bahan, karena g_s tergantung pada kondisi pembebanan. hal ini yang menjelaskan kenapa perambatan pemohonan listrik sangat peka terhadap geometri elektroda, tegangan, dan frekuensi.

2.5 PEMOHONAN YANG DIPENGARUHI TEKANAN MEDAN LISTRIK^[4]

Kita menganggap sistem perambatan pemohonan listrik dan daerah sekitar DPZ mengalami tekanan medan listrik bolak-balik. DPZ ini digambarkan berkembang dengan cara yang sama dan berkembang hingga terjadi kerusakan struktur pada polimer. Sifat dasar dari kerusakan ini berkaitan erat dengan mikrostruktur dari polimer tersebut. Kerusakan di DPZ ini merupakan kerusakan mikro yang dapat berbentuk rongga udara (*void*), retakan, dan bentuk yang lain.



Gambar 2.9 Perambatan pemohonan dan proses percabangannya

- (a) Rongga udara (*void*) mulai bermunculan di dalam DPZ pada ujung pemohonan.
- (b) Rongga udara (*void*) yang ada di sekitarnya tererosi dan bergabung dengan ujung kanal pemohonan.
- (c) Rongga udara (*void*) lainnya tererosi dan bergabung dengan ujung kanal sehingga terjadi percabangan pada kanal pemohonan.

Gambar 2.9 menunjukkan karakteristik dari perambatan pemohonan listrik. Kerusakan di DPZ yang berada di depan pemohonan menyebabkan terjadinya peningkatan rongga udara (*void*) yang akhirnya bergabung menjadi cabang dari kanal utama pemohonan. Karakteristik dari kerapatan rongga udara (*void*) ini tergantung pada bahan dan kondisi pembebanan. Pada proses perambatan pemohonan, arah pemanjangan pemohonan ini adalah sembarang. Oleh karena itu perambatan pemohonan ini merupakan proses acak dan struktur dari pemohonan ini dapat dimodelkan dengan menggunakan kumpulan fraktal.

Kumpulan fraktal ini berkaitan dengan panjang ukurannya, L dan jumlah cabang dimana kumpulan fraktal ini terbentuk, D . Persamaan yang dapat dibentuk dari hubungan tersebut adalah :

$$D = (L/L_b)^{d_f} \quad (2.8)$$

Dimana

d_f = ukuran fraktal

D = jumlah rongga udara (*void*) yang diperlukan untuk membentuk struktur pemohonan

L = panjang struktur pemohonan

L_b = panjang linear dari rongga udara (*void*)

Persamaan ini dapat digunakan untuk menggambarkan jumlah kerusakan isolasi karena pemohonan listrik dimana jumlah panjang dari semua cabang per banyaknya cabang sama dengan panjang rata-rata cabang yang baru terbentuk. L_b dapat dinyatakan sebagai kenaikan rata-rata panjang pemohonan karena penggabungan rongga udara (*void*).

Persamaan ini juga dapat digunakan untuk menggambarkan karakteristik dari fraktal pemohonan dan untuk mengukur dimensi fraktal pemohonan dimana L_b digunakan sebagai skala pengukuran. Fraktal digunakan untuk menggambarkan bentuk suatu benda yang tidak beraturan.

Menurut Mandelbrot^[4], fraktal adalah suatu bentuk yang terbentuk dari bagian-bagian yang sama untuk keseluruhan bagian. Fraktal tidak hanya memberikan pendekatan yang logis dalam mencirikan struktur menjadi nampak serupa dalam perkiraan tertentu, tetapi juga menampilkan informasi penting untuk menggambarkan proses pembuatan pola secara teori.

Pembentukan dan pertumbuhan rongga udara (*void*) di daerah DPZ yang berada di ujung pemohonan dapat dijelaskan sebagai berikut. Proses penurunan kemampuan (degradasi) pada polimer berawal dari pemotongan rantai molekul dan pembentukan radikal bebas karena adanya pembawa muatan yang kemudian menyebabkan suatu daerah menjadi lemah. Karena tekanan listrik pada polimer yang paling tinggi berada di daerah DPZ, maka masing-masing daerah yang rantai molekulnya rusak menyebabkan kerusakan yang berturut-turut pada daerah sekitar karena adanya konsentrasi medan listrik lokal.

Akumulasi dari kerusakan di suatu daerah ini yang disebut dengan rongga udara (*void*). Ukuran rongga udara (*void*) tergantung pada struktur polimer. Pada rongga udara (*void*) ini, kuat medan listrik semakin besar. Oleh karena itu menyebabkan lebih banyak kerusakan ikatan molekul yang mengakibatkan pertumbuhan rongga udara (*void*). Akhirnya kumpulan-kumpulan rongga udara (*void*) ini membentuk cabang pemohonan.

Pembentukan rongga udara (*void*) dan pertumbuhan rongga udara (*void*) memerlukan adanya pemutusan ikatan kimia yang terjadi melalui proses termal dengan energi aktivasi U_0 . Pada medan listrik lokal, energi yang tersimpan mengurangi energi U_0 sebesar $\alpha C_0 \pi \epsilon E^2$, dimana E adalah kuat medan listrik, ϵ adalah permitivitas dielektrik, dan $\pi \approx 3,14$. $G^c \equiv \pi \epsilon E^2$ adalah energi elektrostatis yang dilepaskan ketika rongga udara (*void*) tumbuh per satuan panjang, dan ini disebut dengan gaya pemanjangan rongga udara (*void*) per satuan panjang.

Parameter α adalah sifat bahan, yang menggambarkan daerah pergerakan yang searah dengan medan listrik, dan αC_0 merupakan volume yang teraktivasi akibat medan listrik lokal. Frekuensi pertumbuhan rongga udara (*void*), K di dalam medan listrik E dengan temperatur T dapat ditentukan dengan persamaan.

$$K = \left(\frac{kT}{h} \right) \exp \left(\frac{\alpha C_0 \pi \epsilon E^2 - U_0}{kT} \right) \quad (2.9)$$

Dimana,

$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ adalah tetapan Boltzmann

$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ adalah tetapan Planck

Dengan persamaan ini pergerakan pertumbuhan pemohonan listrik dapat digambarkan secara kuantitatif.

Struktur pemohonan dimodelkan sebagai kumpulan fraktal yang terdiri dari rongga udara - rongga udara yang tumbuh. Frekuensi pertumbuhan rongga udara (*void*), K yang ditentukan oleh persamaan (2.9) berkaitan dengan mekanisme kerusakan ikatan yang kemudian akan mengendalikan laju pertumbuhan struktur pemohonan, dD/dt . Asumsi bahwa N_b adalah jumlah rongga udara (*void*) yang tumbuh yang diperlukan untuk membentuk cabang sepanjang L_b .

Semua rongga udara (*void*) di dalam DPZ memiliki frekuensi pertumbuhan K yang sama. Kita dapat menghitung laju pembentukan cabang baru dari pembentukan dan pertumbuhan rongga udara (*void*) yaitu K/N_b . Untuk merumuskan laju pertumbuhan struktur pemohonan dari pembentukan dan pertumbuhan rongga udara (*void*) di dalam DPZ, perlu diasumsikan bahwa struktur pemohonan akan merambat asalkan sedikitnya ada satu cabang baru yang dibentuk melalui penggabungan sejumlah rongga udara (*void*) yang tumbuh.

Laju pertumbuhan struktur pemohonan dari pembentukan dan pertumbuhan rongga udara (*void*) dapat ditentukan oleh persamaan (2.10)

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K}{N_b} = \left(\frac{kT}{hN_b} \right) \exp\left(\frac{\alpha C_0 \pi \epsilon E^2 - U_0}{kT} \right) \quad (2.10)$$

Untuk kasus yang paling sederhana, N_b bernilai 1, yang berarti pemohonan merambat setelah satu rongga udara (*void*) di dalam DPZ tererosi dan bergabung dengan kanal dalam pembentukan cabang yang baru.

Persamaan (2.10) menjelaskan hukum perkembangan kerusakan pemohonan listrik yang diperoleh berdasarkan model kinetik dari kerusakan dielektrik yang bergantung waktu pada bahan polimer. Terlihat jelas bahwa hukum perkembangan kerusakan pemohonan listrik tidak hanya tergantung pada mekanisme fisik dari pembentukan dan pertumbuhan rongga udara (*void*), tetapi juga karakteristik mikrostruktur bahan dan kondisi pembebanan.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.8) ke persamaan (2.10), akan diperoleh persamaan laju pertumbuhan pemohonan listrik yaitu :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{kT L_b^{d_f}}{h N_b^{d_f}} L^{(1-d_f)} \exp\left(\frac{\alpha C_0 \pi \epsilon E^2 - U_0}{kT}\right) \quad (2.11)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.11) akan didapat hukum pertumbuhan pemohonan listrik, yaitu :

$$L = L_b \left\{ \frac{kT}{h N_b} \exp\left(\frac{\alpha C_0 \pi \epsilon E^2 - U_0}{kT}\right) \right\}^{1/d_f} t^{1/d_f} \quad (2.12)$$

dimana

- L = panjang pemohonan
- L_b = panjang linear rongga udara (*void*)
- k = tetapan Boltzmann (1,38 x 10⁻²³ J K⁻¹)
- h = tetapan Planck (6,626 x 10⁻³⁴ J s)
- N_b = rongga udara (*void*) yang dibutuhkan untuk membentuk cabang pemohonan
- E = medan listrik lokal
- T = suhu lingkungan
- t = waktu pertumbuhan pemohonan

Menurut H.-Z. Ding dan B. R. Varlow^[4], besarnya $\alpha C_0 = 0,56 \times 10^{-28} \text{ m}^3$

Dengan

$$\epsilon = 2,3 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$U_0 = [1,382 - 0,0414 \times \ln(N_b)] \times 10^{-19} \text{ J}$$

BAB 3

PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE

3.1 TEKANAN MEDAN LISTRIK

Pada aplikasi tegangan listrik, tekanan medan listrik bertambah besar ketika mengalami tegangan yang tinggi. Tekanan medan listrik pada bahan isolasi besarnya sama dengan gradien tegangan dan sama dengan kuat medan listrik

$$E = -\nabla\phi \quad (3.1)$$

dimana

E = kuat medan listrik

ϕ = tegangan yang diterapkan

$$\nabla \equiv a_x \frac{\partial}{\partial x} + a_y \frac{\partial}{\partial y} + a_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (3.2)$$

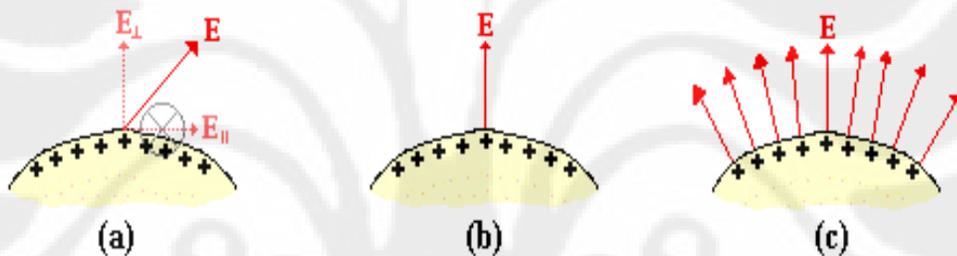
Kekuatan dielektrik suatu bahan isolasi didefinisikan sebagai tekanan dielektrik maksimum dimana bahan isolasi masih dapat bertahan terhadap tekanan tersebut.

Ketahanan terhadap kegagalan (*electrical breakdown*) suatu bahan tergantung pada tekanan, temperatur, kelembaban, konfigurasi medan, tegangan yang diterapkan pada bahan, ketidaksempurnaan bahan dielektrik, bahan elektroda, kondisi permukaan elektroda, dan sebagainya

3.1.1 Arah Medan Listrik

Karakteristik konduktor pada keadaan keseimbangan elektrostatik adalah bahwa medan listrik pada permukaan konduktor memiliki arah yang tegak lurus terhadap permukaan. Tidak ada komponen medan listrik atau gaya listrik yang sejajar dengan permukaan. Jika suatu benda memiliki bentuk yang tidak beraturan, maka arah medan listrik pada titik tertentu adalah tegak lurus terhadap garis singgung pada permukaan di titik tersebut. Alasan mengapa arah medan listrik

tegak lurus terhadap permukaan benda adalah karena jika ada komponen medan listrik yang sejajar dengan permukaan maka akan ada muatan yang terdorong oleh komponen ini sehingga dapat dikatakan bahwa benda tersebut tidak dalam keadaan keseimbangan elektrostatik. Oleh karena itu arah medan listrik harus tegak lurus terhadap permukaan benda/konduktor agar mencapai keseimbangan elektrostatik. Tentu saja benda yang mengalami kelebihan muatan mempunyai komponen medan listrik yang sejajar dengan permukaan. Namun komponen ini kemudian menyebarkan kelebihan muatan pada permukaan sehingga mencapai keseimbangan elektrostatik. Pada saat keseimbangan elektrostatik tercapai, maka tidak ada lagi komponen medan listrik yang sejajar dengan permukaan dan tidak ada lagi pergerakan muatan.



Gambar 3.1 Komponen medan listrik E pada permukaan.
 (a) Komponen E sejajar dengan permukaan yang menggerakkan muatan lebih. (b) Jika benda telah mencapai keseimbangan elektrostatik, maka tidak ada lagi komponen E yang sejajar permukaan. (c) Arah medan listrik tegak lurus terhadap setiap titik pada permukaan.

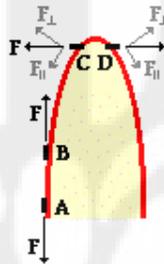
3.1.2 Medan Listrik pada Lekukan (Tonjolan) Sebuah Permukaan

Karakteristik benda yang berada pada keseimbangan elektrostatik adalah bahwa medan listrik yang paling besar berada di titik permukaan yang paling menonjol. Lokasi permukaan yang datar memiliki medan listrik yang lemah. Di sisi lain, titik pada permukaan yang paling menonjol memiliki medan listrik yang kuat. Benda berbentuk bola yang bentuk lekukannya seragam di sepanjang permukaan, memiliki kekuatan medan listrik pada permukaan yang sama besar.

Untuk memahami alasan karakteristik ini, kita menganggap benda yang bentuknya tidak teratur bermuatan negatif. Benda tersebut memiliki kelebihan elektron. Elektron-elektron ini akan menyebar sedemikian rupa untuk mengurangi

gaya tolak-menolak. Karena gaya elektrostatik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak, maka elektron-elektron ini cenderung memperbesar jarak satu sama lain. Pada permukaan bola yang teratur, jarak antara elektron adalah sama. Tetapi pada permukaan benda yang tidak teratur, elektron akan cenderung berkumpul di daerah dengan kepadatan muatan yang lebih besar di sepanjang lekukan (tonjolan) yang paling tajam.

Perhatikan gambar di bawah ini



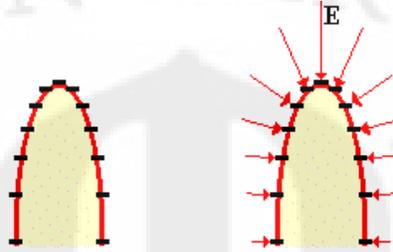
Gambar 3.2 Muatan elektron pada permukaan benda yang tidak teratur.

Elektron A dan B berada di daerah permukaan yang lebih datar. Keduanya tolak-menolak dimana gaya tolak-menolaknya searah dengan garis yang menghubungkan kedua elektron sehingga arah gaya tersebut sejajar dengan permukaan. Di sisi lain, elektron C dan D berada di permukaan yang lekukannya paling tajam. Elektron-elektron juga saling menolak dengan gaya yang searah dengan garis yang menghubungkan kedua elektron tersebut. Akan tetapi gaya yang sejajar dengan permukaan lebih kecil. Sebagian besar gaya tolak-menolak antara elektron C dan D adalah tegak lurus terhadap permukaan.

Komponen gaya tolak-menolak yang sejajar ini akan menggerakkan elektron sepanjang permukaan. Elektron akan bergerak dan menyebar sampai keseimbangan elektrostatik tercapai. Pada saat keseimbangan elektrostatik tercapai, resultan dari komponen gaya yang sejajar ini harus bernilai nol. Untuk jarak pemisah yang sama, komponen gaya tolak-menolak yang sejajar yang paling besar adalah antara elektron A dan B. Jadi untuk mencapai keseimbangan, jarak antara elektron A dan B harus lebih jauh bila dibandingkan jarak antara elektron C dan D. Dengan demikian jarak antara elektron lebih berdekatan bila berada di lekukan (tonjolan) yang paling tajam. Hal ini berarti pada lekukan (tonjolan) yang

paling tajam terdapat kepadatan muatan yang lebih besar yang berarti medan listrik pada daerah tersebut juga lebih besar.

Perhatikan gambar berikut :



Gambar 3.3 Muatan cenderung berkumpul di daerah lekukan (tonjolan) yang lebih tajam.

3.2 PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA KABEL TANAH ^[5]

Medan listrik dikatakan terjadi di sebuah titik jika ada gaya listrik yang dialami oleh sebuah benda bermuatan yang ditempatkan di titik tersebut. Medan listrik dari kabel saluran transmisi ini ditentukan melalui tinjauan elektrostatik dimana medan listrik tersebut merupakan medan listrik sesaat.

Penelitian mengenai hukum gaya antara benda bermuatan pertama kali dilakukan oleh Coulomb pada tahun 1784. Hukum yang kemudian dikenal dengan nama hukum Coulomb tersebut berbunyi : *Gaya tarik atau gaya tolak antara dua muatan titik berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan tersebut.* Persamaan untuk gaya antara dua muatan titik adalah sebagai berikut :

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \quad (3.3)$$

dimana :

F = gaya antara dua muatan titik (Newton)

q,q' = besar muatan (Coulomb)

r = jarak antara kedua muatan (Meter)

Hukum Coulomb ini hanya berlaku untuk muatan titik, yaitu benda-benda bermuatan yang ukurannya jauh lebih kecil dari jarak r antara keduanya. Hukum ini juga hanya berlaku untuk sepasang muatan. Jika terdapat lebih dari sepasang

muatan maka besar gaya pada satu muatan merupakan penjumlahan dari gaya-gaya yang dihasilkan oleh muatan-muatan lainnya terhadap muatan tersebut.

$$\vec{F} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \dots + \vec{F}_{1n} \quad (3.4)$$

Karena keterbatasan hukum Coulomb ini, selanjutnya hukum Gauss dipergunakan untuk perhitungan benda-benda bermuatan yang dikelilingi oleh sebuah permukaan tertutup sembarang bentuk dari bentuk geometrik yang sederhana. Menurut hukum Gauss :

$$q = \int D \, dA \quad (3.5)$$

dimana

D = kerapatan fluks

A = luas permukaan yang bermuatan

Hukum Gauss ini memperlihatkan bahwa fluks listrik yang melalui sebuah bidang tertutup sama dengan muatan yang terbungkus di dalam bidang tertutup tersebut. Medan listrik pada kabel transmisi listrik dapat dihitung dengan menggunakan hukum Gauss dengan cara memisalkan kabel transmisi listrik sebagai sebuah penghantar lurus dan panjang dengan bentuk geometrik seperti sebuah silinder. Bentuk silinder yang simetris dengan sumbu dan berjari-jari r dan dengan mengasumsikan tidak ada muatan lain di sekelilingnya maka kerapatan fluks D terhadap permukaan silinder adalah konstan. Sehingga persamaan (3.5) dapat diturunkan menjadi :

$$q = D \int dA \quad ; \quad A = 2 \pi r l \quad (3.6)$$

$$q = D 2 \pi r l \quad (3.7)$$

$$q_1 = E \cdot \epsilon_0 \cdot 2\pi r \quad (3.8)$$

$$E = \frac{q_1}{2\pi r \cdot \epsilon_0} \quad (3.9)$$

dimana

q_1 = muatan persatuan panjang (C/m)

ϵ_0 = permitivitas

E = medan listrik (N/C)

Jika kita anggap ada dua buah titik sepanjang medan listrik, misalnya titik a dan b, maka diantara kedua titik tersebut akan terdapat beda potensial yang

membentuk gradien tegangan. Gradien tegangan ini kemudian didefinisikan sebagai kenaikan tegangan (ΔV) untuk setiap panjang elemen (Δl).

$$E = - \Delta V \quad (3.10)$$

$$V = - \int E \cdot dl \quad (3.11)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (3.9) ke persamaan (3.11) maka didapatkan :

$$V = - \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \int \frac{dr}{r} \quad (3.12)$$

$$V = - \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_a}{r_b} \quad (3.13)$$

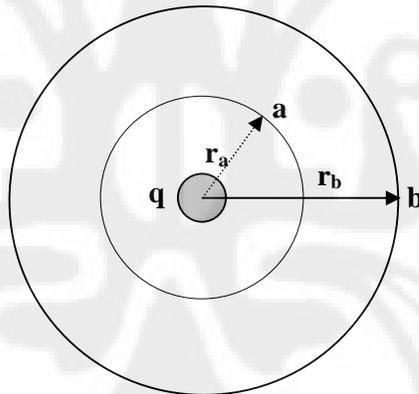
$$V = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3.14)$$

dimana

V = beda potensial antara titik a dan b

r_a = jarak muatan ke titik a (meter)

r_b = jarak muatan ke titik b (meter)



Gambar 3.4 Beda potensial antara 2 titik yang membentuk gradien tegangan.

3.2.1 Perhitungan Medan Listrik pada Tabir Konduktor (*conductor screen*)

Dari persamaan (3.14) dapat diturunkan rumus untuk mencari medan listrik pada tabir konduktor (*conductor screen*) yaitu :

$$V = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \text{ dikalikan dengan } 1/r_a \text{ sehingga menjadi}$$

$$\frac{V}{r_a} = \frac{q_1}{2\pi r_a \epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3.15)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (3.9) ke persamaan (3.15) akan didapatkan medan listrik pada tabir konduktor (*conductor screen*) yaitu :

$$\frac{V}{r_a} = E_a \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3.16)$$

$$E_a = \frac{V}{r_a \ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (3.17)$$

dimana

V = tegangan yang diterapkan

E_a = medan listrik pada tabir konduktor (*conductor screen*)

r_a = jari-jari konduktor

r_b = jari-jari luar isolasi dari titik pusat

3.2.2 Perhitungan Medan Listrik pada Tabir Isolasi (*insulation screen*)

Dari persamaan (3.14) juga dapat diturunkan rumus untuk mencari medan listrik pada tabir isolasi (*insulation screen*) yaitu :

$$V = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \text{ dikalikan dengan } 1/r_b \text{ sehingga menjadi}$$

$$\frac{V}{r_b} = \frac{q_1}{2\pi r_b \epsilon_0} \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3.18)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (3.9) ke persamaan (3.18) akan didapatkan medan listrik pada tabir isolasi (*insulation screen*) yaitu :

$$\frac{V}{r_b} = E_b \ln \frac{r_b}{r_a} \quad (3.19)$$

$$E_b = \frac{V}{r_b \ln \frac{r_b}{r_a}} \quad (3.20)$$

dimana

V = tegangan yang diterapkan

E_b = medan listrik pada tabir isolasi (*insulation screen*)

r_a = jari-jari konduktor

r_b = jari-jari luar isolasi dari titik pusat

3.2.3 Perhitungan Medan Listrik Pada Bahan Isolasi ^[6]

Untuk mendapatkan besarnya kuat medan listrik pada bahan isolasi XLPE adalah dengan mengasumsi bahwa rongga udara (*void*) yang terdapat pada isolasi XLPE berbentuk bola, dimana besar medan listrik di dalam rongga udara (*void*) adalah :

$$E_r = \frac{3.\varepsilon_i.E_i}{(\varepsilon_r + 2.\varepsilon_i)} \quad (3.21)$$

Dengan demikian besar medan listrik pada bahan isolasi adalah :

$$E_i = \frac{E_r(\varepsilon_r + 2.\varepsilon_i)}{3.\varepsilon_i} \quad (3.22)$$

dimana

- E_i = medan listrik pada bahan isolasi
- E_r = medan listrik pada rongga udara
- ε_i = konstanta dielektrik isolasi XLPE
- ε_r = konstanta dielektrik udara di dalam rongga

Untuk mencari besar medan listrik di dalam rongga udara (*void*) digunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_r = \frac{V}{x + (y - x) \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_i}} \quad (3.23)$$

dimana

- V = tegangan yang diterapkan
- y = tebal isolasi
- x = diameter rongga

3.3 PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK LOKAL PADA UJUNG TONJOLAN (*Protrusion*) PADA PERMUKAAN TABIR KONDUKTOR

Menurut Mason ^[7], perbesaran medan lokal pada ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan tabir konduktor dirumuskan dengan persamaan

$$\frac{E_{lokal}}{E_{rata - rata}} = \frac{2d}{r \ln \left[1 + \ln \frac{4d}{r} \right]} \quad (3.24)$$

Dengan demikian, besar medan lokal pada pada ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan tabir konduktor adalah :

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2d}{r \ln \left[1 + \ln \frac{4d}{r} \right]} E_{\text{rata-rata}} \quad (3.25)$$

dimana

- E rata-rata = medan listrik pada bahan isolasi
- r = jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*)
- d = jarak antara ujung tonjolan (*protrusion*) dengan tabir isolasi / ground

3.4 PERHITUNGAN PEMANJANGAN PEMOHONAN (Treeing) AKIBAT DARI MEDAN LISTRIK LOKAL ^[4]

Dari persamaan (2.12), dapat diperoleh besarnya panjang pemohonan (*treeing*) akibat dari medan listrik lokal.

$$L = L_b \left\{ \frac{kT}{hN_b} \exp \left(\frac{\alpha C_0 \pi \epsilon E^2 - U_0}{kT} \right) \right\}^{1/d_f} t^{1/d_f}$$

Menurut H.-Z. Ding dan B. R. Varlow ^[4], besarnya $\alpha C_0 = 0,56 \times 10^{-28} \text{ m}^3$

Dengan

$$\epsilon = 2,3 \times 8,85 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$U_0 = [1,382 - 0,0414 \times \ln(N_b)] \times 10^{-19} \text{ J}$$

L_b = diameter rongga udara (void) yang tumbuh

Waktu yang diperlukan oleh pertumbuhan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan isolasi dapat dihitung dengan menurunkan persamaan (2.12), dimana nilai L adalah L_c , yaitu panjang pemohonan listrik ketika telah mencapai tabir isolasi/ground. Sehingga persamaannya menjadi :

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{d_f} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_0 - \alpha C_0 \pi \epsilon E^2}{kT} \right) \quad (3.26)$$

Persamaan ini adalah hubungan dasar antara umur isolasi dengan kuat medan listrik, suhu lingkungan, dan dimensi fraktal dari struktur pemohonan.

Terlihat jelas bahwa umur isolasi akan menurun secara eksponensial ketika medan listrik E meningkat. Umur isolasi lebih lama dengan dimensi fraktal dari pemohonan listrik yang lebih tinggi. Umur isolasi akan lebih pendek jika suhu lingkungan semakin tinggi.



BAB 4

ANALISIS PERHITUNGAN PERTUMBUHAN PEMOHONAN LISTRIK PADA KABEL XLPE

4.1 UMUM

Penelitian masalah pemohonan listrik biasanya dilakukan di laboratorium. Untuk dapat mengamati inisiasi pemohonan dan mengetahui proses pemohonan listrik di dalam laboratorium dan mempelajari karakteristiknya merupakan proses yang memakan banyak waktu, memakan biaya yang banyak serta memerlukan peralatan yang sangat yang baik. Oleh karena itu, penelitian pemohonan listrik yang dilakukan adalah dengan perkiraan menggunakan pemodelan termodinamika dan dasar-dasar rumus yang telah ada.

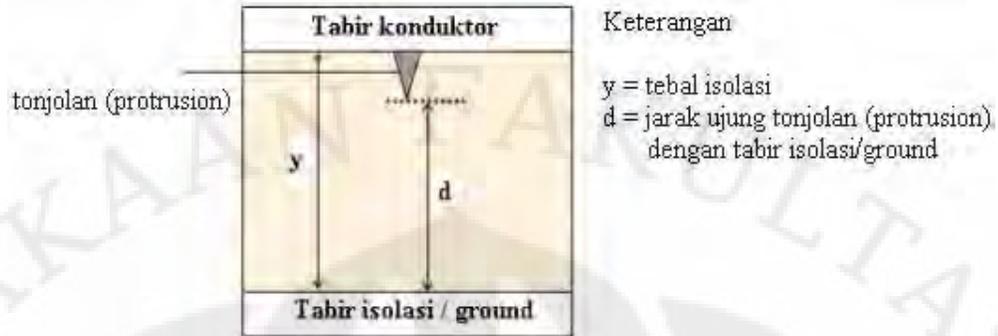
Dalam melakukan perhitungan medan listrik lokal pada proses pembentukan dan pertumbuhan pemohonan listrik (*electrical treeing*) pada kabel XLPE, penulis menggunakan data yang ada ^[2]. Data sampel yang akan digunakan dapat terlihat pada tabel 4.1.

No	Spesifikasi	Ukuran(mm ²)	Tebal isolasi (mm)	Diameter <i>void</i> terbesar (µm)
1	NA2XSEFGbY	3 x 150	5,92	80
2	NA2XSE2Y	3 x 150	5,88	15
3	NA2XSEBY	3 x 150	6,08	20

Tabel 4.1 Data sampel kabel XLPE 20 KV.

(Sumber : Laporan penelitian Rudy Setiabudy dan Desrinda)

Skema pengamatan yang akan dilakukan adalah seperti pada gambar di bawah ini, dimana dalam penelitian ini, akan diamati pengaruh jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan dan tegangan yang diterapkan terhadap medan listrik lokal yang nantinya akan mempengaruhi pertumbuhan pemohonan listrik.



Gambar 4.1 Skema pengamatan pertumbuhan pemohonan listrik pada bahan isolasi.

4.2 HASIL PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK PADA KABEL XLPE

Pada perhitungan ini, tegangan yang diterapkan adalah 20 KV. Konstanta dielektrik XLPE adalah 2,3. Sedangkan rongga yang dianggap berisi udara memiliki konstanta dielektrik sebesar 1.

4.2.1 Hasil Perhitungan Medan Listrik pada Bahan Isolasi

Sampel 1

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{20}{0,08 + (5,92 - 0,08) \frac{1}{2,3}} = 7,636 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi pada sampel 1 dengan menggunakan persamaan (3.22).

$$E_i = \frac{7,636 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,197 \frac{KV}{mm}$$

Sampel 2

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{20}{0,015 + (5,88 - 0,015) \frac{1}{2,3}} = 7,797 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi pada sampel 2 dengan menggunakan persamaan (3.22).

$$E_i = \frac{7,797 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,328 \frac{KV}{mm}$$

Sampel 3

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{20}{0,02 + (6,08 - 0,02) \frac{1}{2,3}} = 7,533 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi pada sampel 3 dengan menggunakan persamaan (3.22)

$$E_i = \frac{7,533 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,114 \frac{KV}{mm}$$

Diantara ketiga sampel, yang paling besar medan listriknya pada bahan isolasi adalah sampel 2 karena memiliki diameter rongga yang paling kecil. Namun pada sampel 3, medan listriknya lebih kecil daripada sampel 1 walaupun memiliki diameter rongga yang lebih kecil daripada diameter rongga pada sampel 1. Hal ini disebabkan karena tebal isolasi pada sampel 3 lebih besar daripada tebal isolasi pada sampel 1. Semakin besar jarak dua elektroda (dalam hal ini ketebalan isolasi), maka semakin kecil medan listrik yang dihasilkan.

4.2.2 Hasil Perhitungan Medan Listrik Lokal

Pada perhitungan medan listrik lokal, jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan ditetapkan sebesar 10 μm . Jarak antara ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan dan tabir isolasi/*ground* ditetapkan sebesar 5mm.

Sampel 1

Medan listrik lokal pada sampel 1 dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{lokal} = \frac{2 \times 5}{0,01 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,01} \right]} \times 6,197 = 815,3 \frac{KV}{mm}$$

Sampel 2

Medan listrik lokal pada sampel 2 dapat dihitung dengan cara yang sama seperti pada sampel 1.

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2x5}{0,01x \ln \left[1 + \ln \frac{4x5}{0,01} \right]} x 6,328 = 832,5 \frac{KV}{mm}$$

Sampel 3

Begitu pula dengan medan listrik lokal pada sampel 3, dapat dihitung dengan cara yang sama, yaitu menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2x5}{0,01x \ln \left[1 + \ln \frac{4x5}{0,01} \right]} x 6,328 = 804,3 \frac{KV}{mm}$$

4.2.3 Pemanjangan Pemohonan Listrik pada Ketiga Sampel akibat Medan Listrik Lokal

Proses pemanjangan pemohonan listrik merupakan suatu hal yang sangat kompleks. Proses ini sangat kompleks dari proses permulaan, perambatan, dan pertumbuhan pemohonan listrik. Maka dengan menggunakan model termodinamika, perkiraan pemanjangan pemohonan listrik tersebut dapat dilakukan.

Ada beberapa ketentuan dalam pengamatan pemanjangan pemohonan listrik yang akan dilakukan ini, diantaranya suhu lingkungan (T) sebesar suhu kamar, yaitu 300 K. Jari-jari ujung tonjolan (*protrusion tip*) pada permukaan sebesar 10 μm ^[8]. Diameter *void* yang tumbuh (Lb) adalah 10 μm , karena biasanya diameter kanal pemohonan yang terbentuk sebesar 10 μm ^[4,9]. Nilai N_b diasumsikan bernilai 1, yang berarti pemohonan merambat setelah satu rongga udara (*void*) di dalam DPZ tererosi dan bergabung dengan kanal dalam pembentukan cabang yang baru.

Banyak penelitian yang telah membahas bahwa pemohonan listrik memiliki karakteristik fraktal atau *self similarity*. Dari sudut pandang ini konsep fraktal menjelaskan karakteristik pertumbuhan pemohonan listrik pada isolasi kabel XLPE ^[10]. Dimensi fraktal dari pemohonan listrik pada bahan isolasi XLPE diperkirakan sekitar 1,35 ^[4,10].

Sampel 1

Pemanjangan pemohonan listrik akibat medan listrik lokal pada sampel 1 dapat diperkirakan dengan pendekatan model termodinamika yang ada. Dengan menggunakan persamaan (2.12).

$$L = L_b \left\{ \frac{kT}{hN_b} \exp\left(\frac{\alpha C_o \pi \epsilon E^2 - U_o}{kT}\right) \right\}^{1/df} t^{1/df} \text{ sehingga menjadi}$$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp\left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (8,153 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,4 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*breakdown*) dapat dihitung dengan persamaan (3.26).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b}\right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp\left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT}\right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001}\right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp\left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (8,153 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right)$$

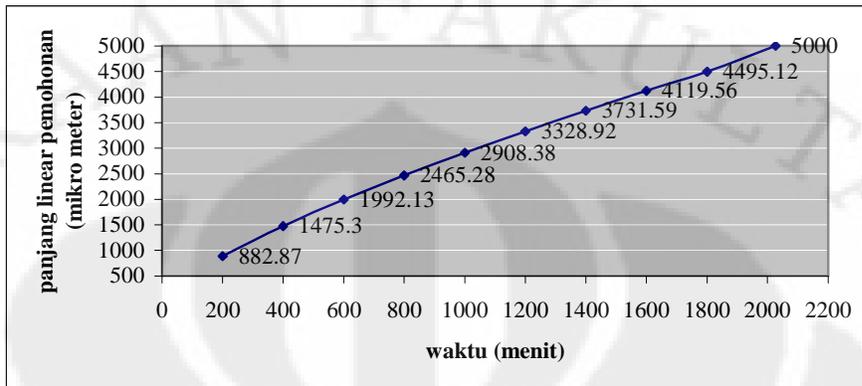
$$t_g = 2076,53 \text{ menit}$$

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 1.

Waktu (menit)	Panjang (µm)
200	882,87
400	1475,30
600	1992,13
800	2465,28
1000	2908,38
1200	3328,92
1400	3731,59
1600	4119,56
1800	4495,12
2076,53	5000

Tabel 4.2 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 1.

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 1 terhadap waktu.



Gambar 4.2 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 1 terhadap waktu.

Sampel 2

Pemanjangan pemohonan listrik akibat medan listrik lokal pada sampel 2 dapat diperkirakan dengan pendekatan model termodinamika yang ada. Dengan menggunakan persamaan (2.12).

$$L = L_b \left\{ \frac{kT}{hN_b} \exp\left(\frac{\alpha C_o \pi \epsilon E^2 - U_o}{kT}\right) \right\}^{1/df} t^{1/df} \text{ sehingga menjadi}$$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp\left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \cdot \pi \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (8,325 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,56 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*breakdown*) dapat dihitung dengan persamaan (3.26)

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b}\right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp\left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT}\right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001}\right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp\left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \cdot \pi \cdot 2,3 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} (8,325 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}\right)$$

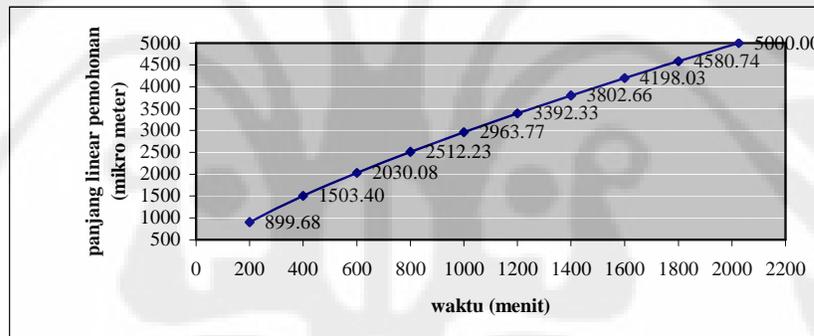
$$t_g = 2026,22 \text{ menit}$$

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 2.

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	899,68
400	1503,40
600	2030,08
800	2512,23
1000	2963,77
1200	3392,33
1400	3802,66
1600	4198,03
1800	4580,74
2026,22	5000,00

Tabel 4.3 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 2.

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 2 terhadap waktu



Gambar 4.3 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 2 terhadap waktu

Sampel 3

Pemanjangan pemohonan listrik akibat medan listrik lokal pada sampel 3 dapat diperkirakan dengan pendekatan model termodinamika yang ada. Dengan menggunakan persamaan (2.12)

$$L = L_b \left\{ \frac{kT}{hN_b} \exp \left(\frac{\alpha C_o \pi \epsilon E^2 - U_o}{kT} \right) \right\}^{1/d_f} t^{1/d_f} \text{ sehingga menjadi}$$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,043 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,31 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*breakdown*) dapat dihitung dengan persamaan (3.26)

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp \left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,043 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right)$$

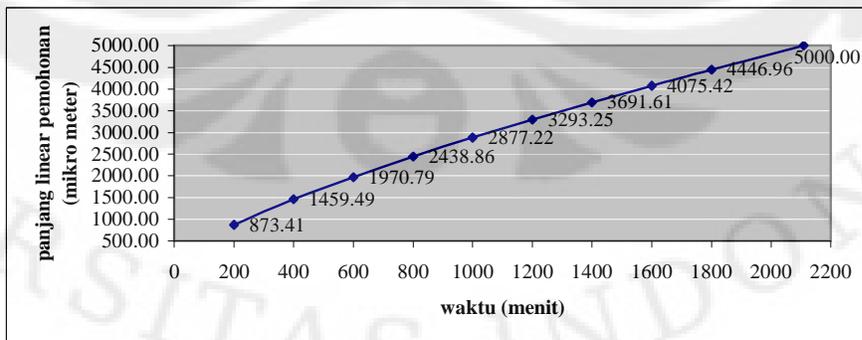
$t_g = 2108,63$ menit

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 3.

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	873,41
400	1459,49
600	1970,79
800	2438,86
1000	2877,22
1200	3293,25
1400	3691,61
1600	4075,42
1800	4446,96
2108,63	5000,00

Tabel 4.4 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) pada sampel 3.

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 3 terhadap waktu



Gambar 4.4 Grafik pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 3 terhadap waktu (menit)

Pemanjangan pemohonan listrik pada ketiga sampel tersebut dipengaruhi oleh medan listrik lokal masing-masing. Pada data terlihat bahwa pemanjangan pemohonan listrik pada sampel 2 adalah yang paling cepat karena medan listrik lokal pada sampel 2 adalah yang paling besar. Dan pemanjangan pemohonan listrik yang paling lama terdapat pada sampel 3 karena medan listrik lokalnya paling kecil.

Pada proses pemanjangan pemohonan listrik di ketiga sampel tersebut terlihat bahwa semakin panjang pemohonan listrik atau dengan kata lain semakin dekat dengan elektroda di sisi lain, maka kecepatan pemanjangan pemohonan listrik semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena ujung pemohonan semakin jauh dari ujung *protrusion* yang berarti medan listrik lokal pada ujung pemohonan semakin kecil sehingga kecepatan pemanjangan pemohonan listrik tersebut menjadi semakin berkurang.

4.3 PENGARUH TEGANGAN YANG DITERAPKAN TERHADAP PEMANJANGAN PERMOHONAN LISTRIK

Pada penelitian ini akan diamati pengaruh kondisi pembebanan (perubahan tegangan yang diterapkan) terhadap medan listrik lokal yang nantinya akan mempengaruhi pemanjangan pemohonan listrik. Perubahan tegangan yang diterapkan adalah antara 20 – 22 KV. Sedangkan data sampel yang akan diamati adalah sampel 1.

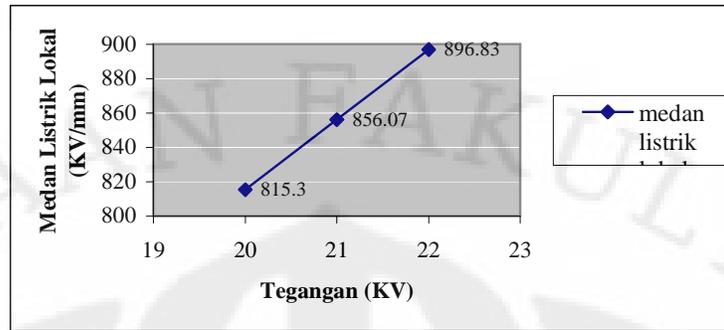
4.3.1 Pengaruh Tegangan Terhadap Medan Listrik Lokal

Untuk tegangan sebesar 20 KV, diperoleh medan listrik lokal sebesar $815,3 \frac{KV}{mm}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Untuk tegangan sebesar 21 KV, diperoleh medan listrik lokal sebesar $856,07 \frac{KV}{mm}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Untuk tegangan sebesar 22 KV, diperoleh medan listrik lokal sebesar $896,83 \frac{KV}{mm}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Di bawah ini adalah grafik pengaruh tegangan yang diterapkan terhadap medan listrik lokal.



Gambar 4.5 Grafik pengaruh tegangan yang diterapkan terhadap medan listrik lokal.

Pada grafik di atas terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterapkan maka semakin besar medan listrik lokal. Hal ini karena medan listrik pada bahan isolasi merupakan gradien tegangan. Sehingga apabila tegangan yang diterapkan meningkat, maka medan listrik juga akan meningkat.

4.3.2 Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Beberapa Nilai Tegangan yang Diterapkan

Tegangan 20KV

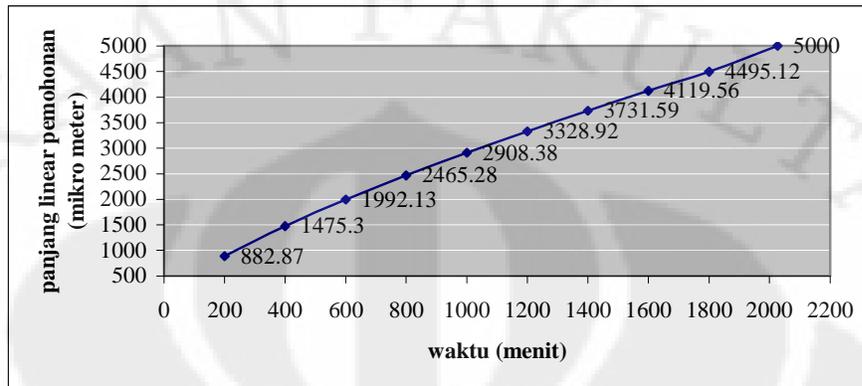
Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20

KV dan medan listrik lokal sebesar $815,3 \frac{KV}{mm}$. (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang (μm)
200	882,87
400	1475,30
600	1992,13
800	2465,28
1000	2908,38
1200	3328,92
1400	3731,59
1600	4119,56
1800	4495,12
2076,53	5000

Tabel 4.5 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV.



Gambar 4.6 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV.

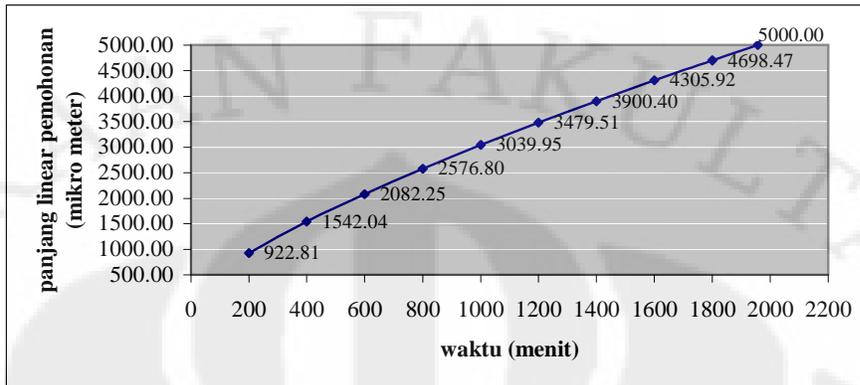
Tegangan 21 KV

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV dan medan listrik lokal sebesar $856,07 \frac{KV}{mm}$. (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	922,81
400	1542,04
600	2082,25
800	2576,80
1000	3039,95
1200	3479,51
1400	3900,40
1600	4305,92
1800	4698,47
1957,68	5000,00

Tabel 4.6 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV.

Di bawah ini adalah Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV.



Gambar 4.7 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 21 KV

Tegangan 22 KV

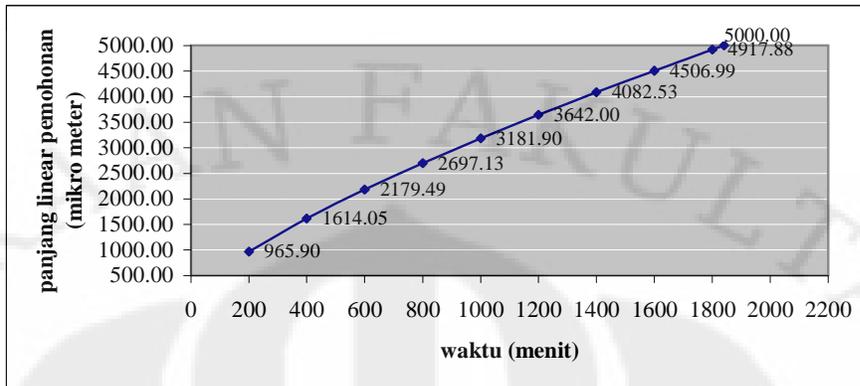
Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 22

KV dan medan listrik lokal sebesar $896,83 \frac{KV}{mm}$ (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	965,90
400	1614,05
600	2179,49
800	2697,13
1000	3181,90
1200	3642,00
1400	4082,53
1600	4506,99
1800	4917,88
1840,35	5000,00

Tabel 4.7 Pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV



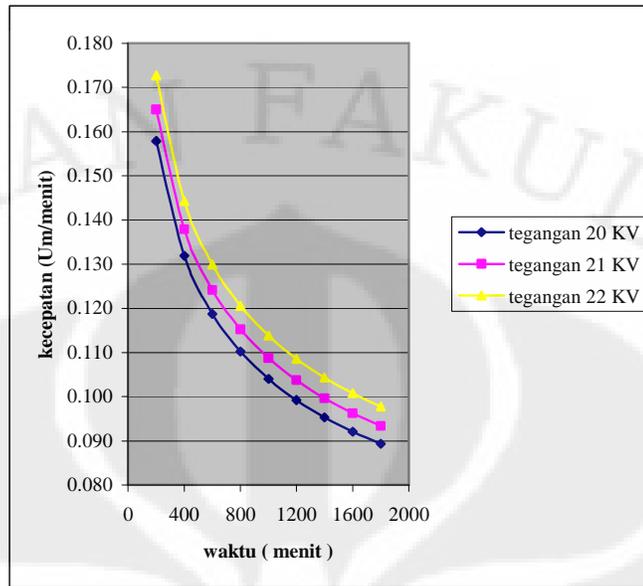
Gambar 4.8 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV

4.3.3 Perbandingan Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Tegangan yang Diterapkan Sebesar 20 KV, 21 KV, dan 22 KV

Waktu (menit)	20 KV	21 KV	22 KV
	Panjang (μm)	Panjang(μm)	Panjang(μm)
200	882,87	922,81	965,90
400	1475,30	1542,04	1614,05
600	1992,13	2082,25	2179,49
800	2465,28	2576,80	2697,13
1000	2908,38	3039,95	3181,90
1200	3328,92	3479,51	3642,00
1400	3731,59	3900,40	4082,53
1600	4119,56	4305,92	4506,99
1800	4495,12	4698,47	4917,88

Tabel 4.8 Perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV, 21 KV, dan 22 KV

Pada tabel terlihat bahwa semakin besar tegangan yang diterapkan, maka semakin cepat pemanjangan pemohonan listrik. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat kecepatan pemanjangan pemohonan listrik dengan tegangan yang berbeda-beda. (cara perhitungan ada di lampiran).



Gambar 4.9 Kecepatan pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu

Pada grafik di atas terlihat bahwa kecepatan pemanjangan pemohonan listrik yang paling besar adalah pemohonan listrik dengan tegangan yang diterapkan sebesar 22 KV. Pada awal pertumbuhan pemohonan listrik, selisih kecepatan masing-masing pemohonan besar, namun makin lama makin kecil.

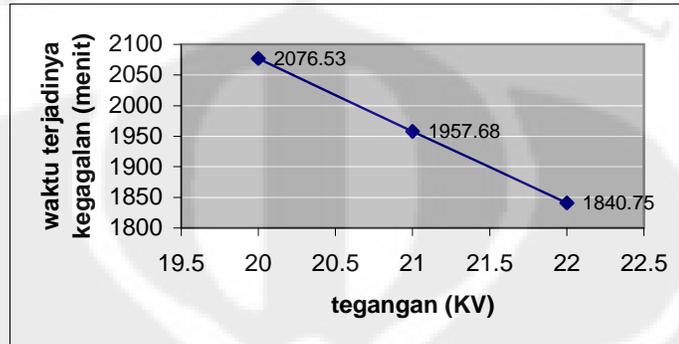
Pada grafik di atas juga terlihat bahwa semakin panjang pemohonan listrik atau dengan kata lain semakin dekat dengan elektroda di sisi lain, maka kecepatan pemanjangan pemohonan listrik semakin berkurang. Atau dapat disimpulkan bahwa pada proses pemanjangan pemohonan listrik, kecepatannya semakin lambat. Hal ini disebabkan karena ujung pemohonan semakin jauh dari ujung *protrusion* yang berarti medan listrik lokal pada ujung pemohonan semakin kecil sehingga kecepatan pemanjangan pemohonan listrik tersebut menjadi semakin berkurang.

4.3.4 Pengaruh Tegangan yang Diterapkan terhadap Waktu Terjadinya Kegagalan (*breakdown time*)

Kondisi pembebanan pada kabel (dalam hal ini perubahan tegangan) dapat mempengaruhi terjadinya kegagalan listrik (*breakdown*). Perubahan tegangan ini berpengaruh pada medan listrik lokal yang nantinya akan mempengaruhi pemanjangan pemohonan listrik. Apabila pemohonan listrik telah merambat dan

menjembatani kedua elektroda (tabir konduktor dan tabir isolasi), maka akan terjadi kegagalan listrik (*breakdown*).

Di bawah ini grafik hubungan antara tegangan yang diterapkan dengan waktu terjadinya kegagalan (*breakdown*).



Gambar 4.10 Grafik hubungan antara tegangan yang diterapkan dengan waktu terjadinya kegagalan (*breakdown*).

4.4 PENGARUH JARI-JARI UJUNG TONJOLAN (*Protrusion*) PADA PERMUKAAN TABIR KONDUKTOR TERHADAP PEMANJANGAN PERMOHONAN LISTRIK

Pada penelitian ini akan diamati pengaruh jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan terhadap medan listrik lokal yang nantinya akan mempengaruhi pemanjangan pemohonan listrik. Besarnya jari-jari ujung tonjolan (*protrusion*) pada permukaan yang akan diamati adalah 10 μm , 15 μm , dan 20 μm . Sedangkan data sampel yang akan diamati adalah sampel 1.

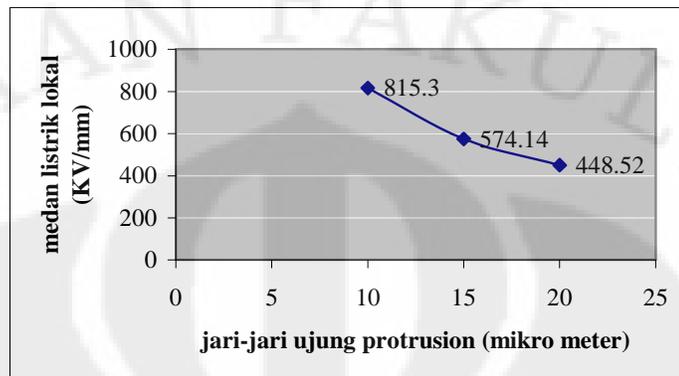
4.4.1 Pengaruh Jari-Jari Ujung *Protrusion* Terhadap Medan Listrik Lokal

Untuk jari-jari *protrusion* sebesar 10 μm , diperoleh medan listrik lokal sebesar $815,3 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Untuk jari-jari *protrusion* sebesar 15 μm , diperoleh medan listrik lokal sebesar $574,14 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Untuk jari-jari *protrusion* sebesar 20 μm , diperoleh medan listrik lokal sebesar $448,52 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$ (cara perhitungan dapat dilihat di lampiran).

Di bawah ini adalah grafik pengaruh jari-jari ujung *protrusion* terhadap medan listrik lokal.



Gambar 4.11 Grafik pengaruh jari-jari ujung *protrusion* terhadap medan listrik lokal.

Pada grafik di atas terlihat bahwa semakin tajam ujung *protrusion* maka medan listrik lokal semakin besar. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut :

Karakteristik benda yang berada pada keseimbangan elektrostatik adalah bahwa medan listrik yang paling besar berada di titik permukaan yang paling menonjol. Lokasi permukaan yang datar memiliki medan listrik yang lemah. Di sisi lain, titik pada permukaan yang paling menonjol memiliki medan listrik yang kuat.

Untuk memahami alasan karakteristik ini, kita menganggap benda yang bentuknya tidak teratur bermuatan negatif. Benda tersebut memiliki kelebihan elektron. Elektron-elektron ini akan menyebar sedemikian rupa untuk mengurangi gaya tolak-menolak. Karena gaya elektrostatik berbanding terbalik dengan kuadrat jarak, maka elektron-elektron ini cenderung memperbesar jarak satu sama lain. Pada permukaan bola yang teratur, jarak antara elektron adalah sama. Tetapi pada permukaan benda yang tidak teratur, elektron akan cenderung berkumpul di daerah dengan kepadatan muatan yang lebih besar di sepanjang lekukan (tonjolan) yang paling tajam.

Misalkan elektron A dan B berada di daerah permukaan yang lebih datar. Keduanya tolak-menolak dimana gaya tolak-menolaknya searah dengan garis yang menghubungkan kedua elektron sehingga arah gaya tersebut sejajar dengan

permukaan. Di sisi lain, elektron C dan D berada di permukaan yang lekukannya paling tajam.

Elektron-elektron juga saling menolak dengan gaya yang searah dengan garis yang menghubungkan kedua elektron tersebut. Akan tetapi gaya yang sejajar dengan permukaan lebih kecil. Sebagian besar gaya tolak-menolak antara elektron C dan D adalah tegak lurus terhadap permukaan.

Komponen gaya tolak-menolak yang sejajar ini akan menggerakkan elektron sepanjang permukaan. Elektron akan bergerak dan menyebar sampai keseimbangan elektrostatis tercapai. Pada saat keseimbangan elektrostatis tercapai, resultan dari komponen gaya yang sejajar ini harus bernilai nol. Untuk jarak pemisah yang sama, komponen gaya tolak-menolak yang sejajar yang paling besar adalah antara elektron A dan B. Jadi untuk mencapai keseimbangan, jarak antara elektron A dan B harus lebih jauh bila dibandingkan jarak antara elektron C dan D.

Dengan demikian jarak antara elektron lebih berdekatan bila berada di lekukan (tonjolan) yang paling tajam. Hal ini berarti pada lekukan (tonjolan) yang paling tajam terdapat kepadatan muatan yang lebih besar yang berarti medan listrik pada daerah tersebut juga lebih besar.

Dengan demikian, medan listrik lokal pada ujung tonjolan (*protrusion tip*) pada permukaan tabir konduktor sangat besar, bahkan bisa mencapai ratusan kali medan listrik bahan isolasi tersebut.

4.4.2 Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Beberapa Nilai Jari-Jari Ujung Tonjolan (*protrusion*) pada Permukaan

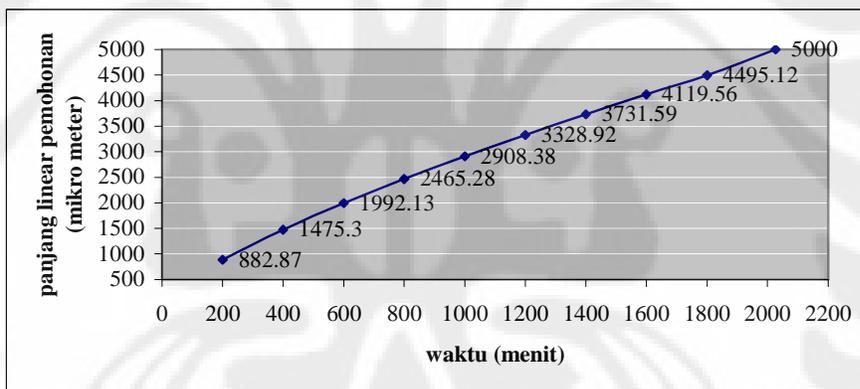
Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 10 μm

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV dan medan listrik lokal sebesar $815,3 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$. (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang (μm)
200	882,87
400	1475,30
600	1992,13
800	2465,28
1000	2908,38
1200	3328,92
1400	3731,59
1600	4119,56
1800	4495,12
2076,53	5000

Tabel 4.9 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 10 μm

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 10 μm



Gambar 4.12 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 10 μm

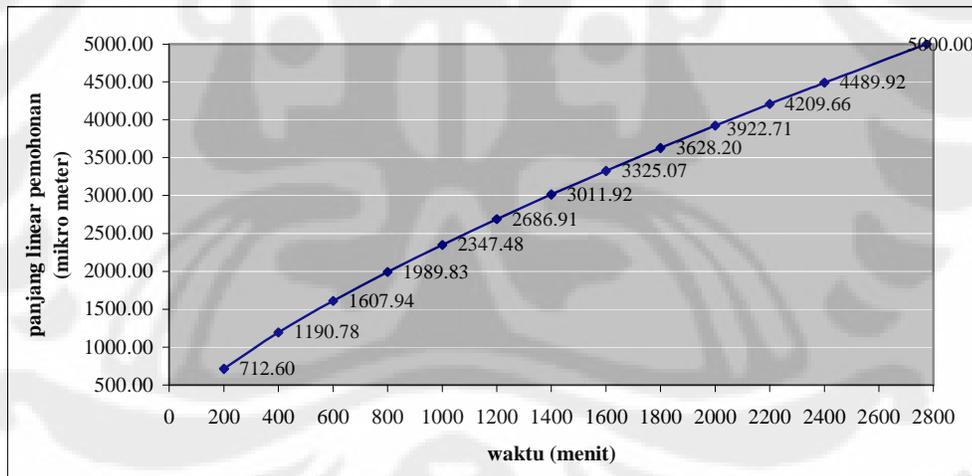
Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 15 μm

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV dan medan listrik lokal sebesar 574,14 $\frac{\text{KV}}{\text{mm}}$ (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	712,60
400	1190,78
600	1607,94
800	1989,83
1000	2347,48
1200	2686,91
1400	3011,92
1600	3325,07
1800	3628,20
2000	3922,71
2200	4209,66
2400	4489,92
2774,67	5000,00

Tabel 4.10 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar $15\ \mu\text{m}$

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar $15\ \mu\text{m}$



Gambar 4.13 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar $15\ \mu\text{m}$

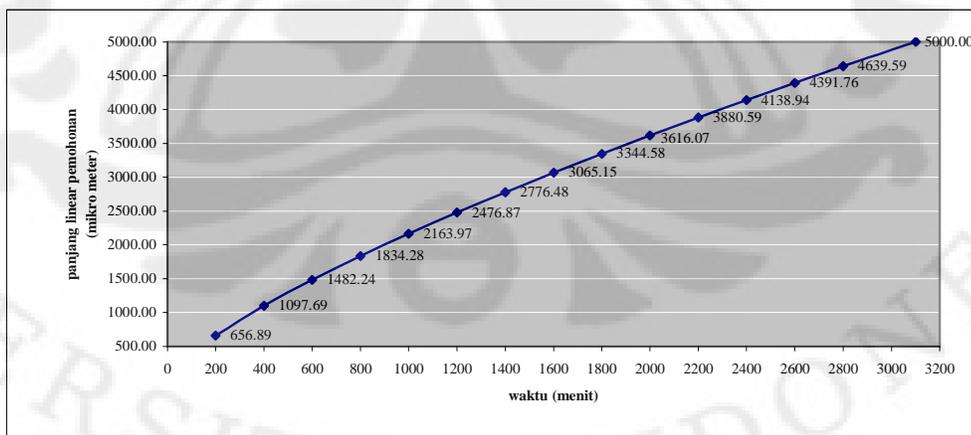
Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 20 μm

Di bawah ini adalah tabel pemanjangan pemohonan listrik sampai terjadinya kegagalan (*breakdown*) dengan tegangan yang diterapkan sebesar 20 KV dan medan listrik lokal sebesar $448,52 \frac{KV}{mm}$ (cara perhitungan ada di lampiran)

Waktu (menit)	Panjang(μm)
200	656,89
400	1097,69
600	1482,24
800	1834,28
1000	2163,97
1200	2476,87
1400	2776,48
1600	3065,15
1800	3344,58
2000	3616,07
2200	3880,59
2400	4138,94
2600	4391,76
2800	4639,59
3100,78	5000,00

Tabel 4.11 Pemanjangan pemohonan listrik, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 20 μm

Di bawah ini adalah grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 20 μm

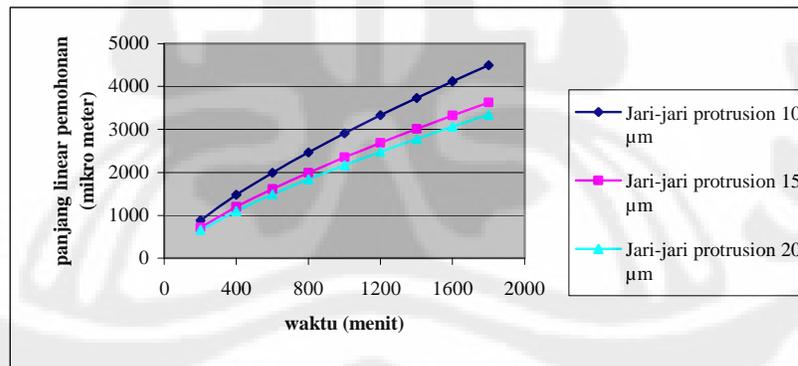


Gambar 4.14 Grafik pemanjangan pemohonan listrik terhadap waktu, dimana jari-jari ujung *protrusion* sebesar 20 μm

4.4.3 Perbandingan Pemanjangan Pemohonan Listrik dengan Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm

Waktu (menit)	Jari-jari Ujung <i>Protrusion</i>		
	10 μm Panjang (μm)	15 μm Panjang(μm)	20 μm Panjang(μm)
200	882,87	712,60	656,89
400	1475,30	1190,78	1097,69
600	1992,13	1607,94	1482,24
800	2465,28	1989,83	1834,28
1000	2908,38	2347,48	2163,97
1200	3328,92	2686,91	2476,87
1400	3731,59	3011,92	2776,48
1600	4119,56	3325,07	3065,15
1800	4495,12	3628,20	3344,58

Tabel 4.12 Perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan jari-jari ujung *protrusion* sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm sebelum terjadinya kegagalan (breakdown).



Gambar 4.15 Grafik perbandingan pemanjangan pemohonan listrik dengan jari-jari ujung *protrusion* sebesar 10 μm , 15 μm , dan 20 μm sebelum terjadinya kegagalan (breakdown).

Dari grafik di atas terlihat bahwa ujung *protrusion* yang lebih tajam menyebabkan peningkatan pemanjangan pemohonan listrik yang lebih besar. Pada grafik terlihat bahwa ujung *protrusion* dengan jari-jari sebesar 10 μm menyebabkan pemanjangan pemohonan listrik yang semakin lama semakin cepat

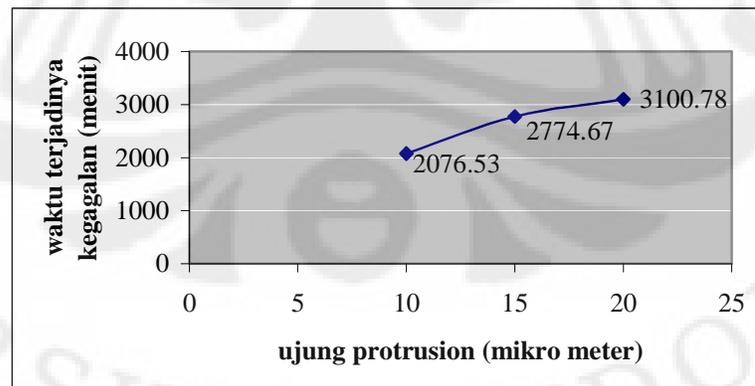
bila dibandingkan ujung *protrusion* dengan jari-jari 15 μm dan 20 μm . Hal ini disebabkan karena ujung *protrusion* yang lebih tajam menyebabkan medan listrik lokal yang lebih besar yang dapat mempercepat elektron melakukan proses tabrakan atomik sehingga menghasilkan ion-ion baru yang disebut ionisasi.

Pada proses tumbukan atomik, terjadi penambahan jumlah elektron secara eksponensial yang akan mempercepat terjadinya *partial discharge*. Pada akhirnya dapat mengakibatkan loncatan bunga api (*spark over*) yang selanjutnya dapat mengerosi daerah proses kerusakan / *Damage Process Zone* sehingga dapat mempercepat proses pemanjangan pemohonan listrik.

4.4.4 Pengaruh Jari-Jari Ujung Tonjolan (*protrusion*) terhadap Waktu Terjadinya Kegagalan (*breakdown time*)

Ketajaman ujung *protrusion* pada permukaan dapat mempengaruhi waktu kegagalan listrik (*breakdown time*). Perubahan jari-jari ujung *protrusion* pada permukaan berpengaruh pada medan listrik lokal yang nantinya akan mempengaruhi pemanjangan pemohonan listrik. Apabila pemohonan listrik telah merambat dan menjembatani kedua elektroda (tabir konduktor dan tabir isolasi), maka akan terjadi kegagalan listrik (*breakdown*).

Di bawah ini adalah grafik hubungan antara jari-jari ujung *protrusion* pada permukaan dengan waktu terjadinya kegagalan (*breakdown time*) dimana tegangan yang diterapkan konstan sebesar 20 KV.



Gambar 4.16 Grafik hubungan antara jari-jari ujung *protrusion* pada permukaan dengan waktu terjadinya kegagalan (*breakdown time*)

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa semakin tajam ujung *protrusion* maka medan listrik lokal semakin membesar. Medan listrik lokal tersebut akan mempercepat pertumbuhan pemohonan listrik yang pada akhirnya akan juga mempercepat waktu terjadinya kegagalan (*breakdown time*).

Pada kondisi jari-jari ujung *protrusion* 10 μm telah mencapai kegagalan (*breakdown*), pemanjangan pemohonan listrik pada kondisi ujung *protrusion* dengan jari-jari sebesar 15 μm baru mencapai 4033,35 μm , sedangkan pemanjangan pemohonan listrik pada kondisi jari-jari ujung *protrusion* sebesar 20 μm baru mencapai 3718,06 μm .

Di sini terlihat jelas bahwa pada saat yang sama (2076,53 menit), pemanjangan pemohonan listrik pada kondisi jari-jari ujung *protrusion* 10 μm telah mencapai 100% dari total panjang pemohonan listrik, pemohonan listrik pada kondisi jari-jari ujung *protrusion* 15 μm , baru mencapai 80,7 % dari total panjang pemohonan listrik, sedangkan pemohonan listrik pada kondisi jari-jari ujung *protrusion* 20 μm , baru mencapai 74,4 % dari total panjang pemohonan listrik

Dapat disimpulkan bahwa semakin tajam ujung *protrusion* pada permukaan, maka pemanjangan pemohonan listrik akan semakin cepat, yang juga akan mempercepat terjadinya kegagalan (*breakdown*).

BAB 5

KESIMPULAN

Pengamatan yang dilakukan terhadap pengaruh medan listrik lokal pada kabel XLPE membawa kesimpulan sebagai berikut :

1. Medan listrik lokal yang sangat tinggi pada kabel XLPE dapat disebabkan oleh tonjolan (*protrusion*) pada permukaan tabir konduktor dan medan listrik lokal tersebut merupakan perbesaran dari medan listrik pada bahan isolasi.
2. Medan listrik lokal pada ujung pemohonan yang lebih dekat dengan tabir isolasi/ground akan semakin kecil. Dengan demikian kecepatan pemanjangan pemohonan pada ujung pemohonan yang lebih dekat dengan tabir isolasi/ground akan semakin lambat.
3. Kecepatan pemanjangan pemohonan listrik pada bahan isolasi, makin lama akan semakin lambat dan kecepatannya menjadi nol (pertumbuhan pemohonan listrik berhenti) pada saat pemohonan listrik telah menjembatani kedua elektroda (tabir konduktor dan tabir isolasi).

DAFTAR ACUAN

- [1] Suwarno dan Ronald P. Hutahaeon, “Simulasi Pemohonan Listrik (*electrical treeing*) pada Isolasi Polimer dengan Menggunakan Metode Cellular Automata”, ITB Sains & Tek. Vol. 37 A, No. 2, pp 131-145, 2005
- [2] Rudy Setiabudy dan Desrinda, “Analisis Tegangan Pelepasan Parsial dalam Void pada Isolasi XLPE Kabel Bawah Tanah”, Laporan Penelitian, Fakultas Teknik UI, Depok, 1999
- [3] L.A Dissado and J.C. Fotehergill, *Electrical Degradation And Breakdown in Polymers* , (London : Peter Peregrinus Ltd.,1992)
- [4] H.-Z. Ding and B. R. Varlow, “Thermodynamic Model for Electrical Tree Propagation Kinetics in Combined Electrical and Mechanical Stresses”, *Journal of IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. 12, No. 1, pp. 1-9, February, 2005
- [5] William H. Hayt, *Elektromagnetika Teknologi*, Edisi kelima (Jakarta : Penerbit Erlangga, 1997)
- [6] Teguh Herbasuki, “Studi Pengaruh Rongga pada Isolasi Ethylene Propylene Rubber terhadap Kegagalan Isolasi pada Sambungan Kabel Tanah 20 KV”, Thesis, Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2001
- [7] Mason, J. H., “Progress In Dielectrics”, Vol. I, ed, Birks, J. S.,Schulman, J.H. (London : Heywood & Co. Ltd., 1959)
- [8] M. Rezinkima, “Numerical Modelling of Treeing Appearing in Polyethylene Insulation Upon High Voltage Stress”, *International Conference on Solid Dielectrics*, pp 1 – 4, 2004
- [9] Suwarno, Suzuoki, T. Mizutani “Model for Electrical Treeing Discharges and Computer Simulation”” *Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp 260 – 263, 2000
- [10] Young-Shin Cho, Mi-Ja Shim, Sang-Wook Kim, “Fractal Characteristics of Electrical Treeing Phenomena in Electric Power Distributing Cable Insulation”, *Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of dielectric Materials*, pp 443 – 446, 1997

DAFTAR PUSTAKA

- Cho, Y.S., Mi-Ja Shim, Sang-Wook Kim, "Fractal Characteristics of Electrical Treeing Phenomena in Electric Power Distributing Cable Insulation", *Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of dielectric Materials*, pp 443 – 446, 1997
- Ding, H.-Z., B. R. Varlow, "Thermodynamic Model for Electrical Tree Propagation Kinetics in Combined Electrical and Mechanical Stresses", *Journal of IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. 12, No. 1, pp. 1-9, February, 2005
- Dissado, L. A., J.C. Fotehergill, *Electrical Degradation And Breakdown in Polymers*, (London : Peter Peregrinus Ltd.,1992)
- Dissado, L. A., "Understanding Electrical Trees in Solids: from Experiment to Theory", *Journal of IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. 9, pp. 483-497, 2002.
- Eichhorn, R. M., "Treeing In Solid Extruded Electrical Insulation", *Journal of IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* Vol. EI-12, No. 1, pp. 2-18, 1976
- Hayt, William H., *Elektromagnetika Teknologi*, Edisi kelima (Jakarta : Penerbit Erlangga, 1997)
- Herbasuki, Teguh, "Studi Pengaruh Rongga pada Isolasi Ethylene Propylene Rubber terhadap Kegagalan Isolasi pada Sambungan Kabel Tanah 20 KV", Thesis, Program Pasca Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok, 2001
- Mashikian, M. S., A. Szatkowski, "Medium Voltage Cable Defects Revealed by Off-Line *Partial discharge* Testing at Power Frequency", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 22, No. 4, pp. 24 – 32, July/August, 2006
- Mason, J. H., "Progress In Dielectrics", Vol. I, ed, Birks, J. S., Schulman, J.H. (London : Heywood & Co. Ltd., 1959)
- Setiabudy, Rudy, Desrinda, "Analisis Tegangan Pelepasan Parsial dalam Void pada Isolasi XLPE Kabel Bawah Tanah", Laporan Penelitian, Fakultas Teknik UI, Depok, 1999

Suwarno, Ronald P. Hutahaean, “Simulasi Pemohonan Listrik (*electrical treeing*) pada Isolasi Polimer dengan Menggunakan Metode Cellular Automata”, ITB Sains & Tek. Vol. 37 A, No. 2, pp 131-145, 2005

Suwarno, Suzuoki, T. Mizutani “Model for Electrical Treeing Discharges and Computer Simulation” *Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, pp 260 – 263, 2000

Weedy, B.M., *Underground Transmission of Electric Power* (New York : John Willey & Sons Ltd.,1980)

XLPE Cable Systems Users Guide
<http://www.abb.com/cable>



LAMPIRAN 1

PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK LOKAL DENGAN BEBERAPA NILAI TEGANGAN YANG DITERAPKAN

Tegangan 20 KV

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{20}{0,08 + (5,92 - 0,08) \frac{1}{2,3}} = 7,636 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi dengan menggunakan persamaan (3.22)

$$E_i = \frac{7,636 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,197 \frac{KV}{mm}$$

Medan listrik lokal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{lokal} = \frac{2 \times 5}{0,01 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,01} \right]} \times 6,197 = 815,3 \frac{KV}{mm}$$

Tegangan 21 KV

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{21}{0,08 + (5,92 - 0,08) \frac{1}{2,3}} = 8,018 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi dengan menggunakan persamaan (3.22)

$$E_i = \frac{8,018 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,507 \frac{KV}{mm}$$

Medan listrik lokal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{lokal} = \frac{2 \times 5}{0,01 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,01} \right]} \times 6,507 = 856,07 \frac{KV}{mm}$$

Tegangan 22 KV

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{22}{0,08 + (5,92 - 0,08) \frac{1}{2,3}} = 8,4 \frac{KV}{mm}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi dengan menggunakan persamaan (3.22)

$$E_i = \frac{8,4 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,817 \frac{KV}{mm}$$

Medan listrik lokal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{lokal} = \frac{2 \times 5}{0,01 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,01} \right]} \times 6,817 = 896,83 \frac{KV}{mm}$$

PEMANJANGAN PEMOHONAN LISTRIK DENGAN BEBERAPA NILAI TEGANGAN YANG DITERAPKAN

Tegangan 20 KV, Medan listrik lokal 815,3 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,153 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,4 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*breakdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300} \exp \left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,153 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \times 300} \right)$$

$$t_g = 2076,53 \text{ menit}$$

Tegangan 21 KV, Medan listrik lokal 856,07 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,56 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,78 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*brekwdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp \left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,56 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right)$$

$$t_g = 1957,68 \text{ menit}$$

Tegangan 22 KV, Medan listrik lokal 896,83 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,968 \cdot 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 9,19 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*brekwdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp \left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (8,968 \cdot 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right)$$

$$t_g = 1840,75 \text{ menit}$$

KECEPATAN PEMANJANGAN PEMOHONAN LISTRIK TERHADAP WAKTU

Tegangan 20 KV, Medan listrik lokal 815,3 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 8,4 \times 10^{-7}(t^{0,741}) \text{ m}$$

$$V = \frac{dL}{dt} = 0,62244 \times (t^{-0,259}) \mu\text{m/menit}$$

Tegangan 21 KV, Medan listrik lokal 856,07 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 8,78 \times 10^{-7}(t^{0,741}) \text{ m}$$

$$V = \frac{dL}{dt} = 0,65 \times (t^{-0,259}) \mu\text{m/menit}$$

Tegangan 22 KV, Medan listrik lokal 896,83 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 9,19 \times 10^{-7}(t^{0,741}) \text{ m}$$

$$V = \frac{dL}{dt} = 0,68 \times (t^{-0,259}) \mu\text{m/menit}$$

Tabel Kecepatan Pemanjangan Pemohonan Listrik Terhadap Waktu

Waktu (menit)	20 KV	21 KV	22 KV	
	Tegangan yang Diterapkan	Kecepatan ($\mu\text{m/menit}$)	Kecepatan ($\mu\text{m/menit}$)	Kecepatan ($\mu\text{m/menit}$)
200		0.158	0.165	0.173
400		0.132	0.138	0.144
600		0.119	0.124	0.130
800		0.110	0.115	0.121
1000		0.104	0.109	0.114
1200		0.099	0.104	0.109
1400		0.095	0.100	0.104
1600		0.092	0.096	0.101
1800		0.089	0.093	0.098



LAMPIRAN 2

PERHITUNGAN MEDAN LISTRIK LOKAL AKIBAT PENGARUH PERUBAHAN JARI-JARI UJUNG TONJOLAN (*Protrusion*) PADA PERMUKAAN

Pada perhitungan ini, tegangan yang diterapkan adalah 20 KV dan data yang digunakan adalah data sampel 1.

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 10 μm

Medan listrik pada rongga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (3.23) sehingga

$$E_r = \frac{20}{0,08 + (5,92 - 0,08) \frac{1}{2,3}} = 7,636 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Dengan demikian dapat diperoleh medan listrik bahan isolasi dengan menggunakan persamaan (3.22)

$$E_i = \frac{7,636 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,197 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Medan listrik lokal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2 \times 5}{0,01 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,01} \right]} \times 6,197 = 815,3 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 15 μm

Medan listrik bahan isolasi sebesar

$$E_i = \frac{7,636 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,197 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Medan listrik lokal dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2 \times 5}{0,015 \times \ln \left[1 + \ln \frac{4 \times 5}{0,015} \right]} \times 6,197 = 574,14 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 20 μm

Medan listrik bahan isolasi sebesar :

$$E_i = \frac{7,636 (1 + 2 \times 2,3)}{3 \times 2,3} = 6,197 \frac{\text{KV}}{\text{mm}}$$

Medan listrik lokal apat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.25).

$$E_{\text{lokal}} = \frac{2x5}{0,02x \ln \left[1 + \ln \frac{4x5}{0,02} \right]} x 6,197 = 448,52 \frac{KV}{mm}$$

PEMANJANGAN PEMOHONAN LISTRIK DENGAN BEBERAPA NILAI JARI-JARI UJUNG TONJOLAN (*Protrusion*)

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 10 μm , Medan Listrik Lokal 815,3 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38.10^{-23} x 300}{6,626.10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56.10^{-28} \pi.2,3x8,85.10^{-12} (8,153.10^8)^2 - 1,382.10^{-19}}{1,38.10^{-23} x 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 8,4 x 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*brekwdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626.10^{-34}}{1,38.10^{-23} x 300} \exp \left(\frac{1,382.10^{-19} - 0,56.10^{-28} \pi.2,3x8,85.10^{-12} (8,153.10^8)^2}{1,38.10^{-23} x 300} \right)$$

$$t_g = 2076,53 \text{ menit}$$

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 15 μm , Medan Listrik Lokal 574,14 $\frac{KV}{mm}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38.10^{-23} x 300}{6,626.10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56.10^{-28} \pi.2,3x8,85.10^{-12} (5,74.10^8)^2 - 1,382x10^{-19}}{1,38.10^{-23} x 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 6,78 x 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*brekwdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626.10^{-34}}{1,38.10^{-23} x 300} \exp \left(\frac{1,382.10^{-19} - 0,56.10^{-28} \pi.2,3x8,85.10^{-12} (5,74.10^8)^2}{1,38.10^{-23} x 300} \right)$$

$$t_g = 2774,67 \text{ menit}$$

Jari-Jari Ujung *Protrusion* Sebesar 20 μm , Medan Listrik Lokal 448,52 $\frac{\text{KV}}{\text{mm}}$

$$L = 10^{-5} \left\{ \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{6,626 \cdot 10^{-34}} \exp \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (4,485 \times 10^8)^2 - 1,382 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) \right\}^{1/1,35} t^{1/1,35}$$

$$L = 6,25 \times 10^{-7} (t^{0,741}) \text{ m}$$

Waktu pemanjangan pemohonan listrik hingga terjadi kegagalan (*breakdown*).

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b} \right)^{df} \frac{hN_b}{kT} \exp \left(\frac{U_o - \alpha C_o \pi \epsilon E^2}{kT} \right)$$

$$t_g = \left(\frac{0,005}{0,00001} \right)^{1,35} \frac{6,626 \cdot 10^{-34}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \exp \left(\frac{1,382 \cdot 10^{-19} - 0,56 \cdot 10^{-28} \pi \cdot 2,3 \times 8,85 \cdot 10^{-12} (4,485 \times 10^8)^2}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right)$$

$$t_g = 3100,78 \text{ menit}$$