



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KORONA PADA KUBIKEL MODEL  
TERHADAP DISTORSI HARMONISA ARUS DAN  
TEGANGAN SUMBER LISTRIK AC**

**SKRIPSI**

**FAIZ HUSNAYAIN  
06 06 07 3902**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JUNI, 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PENGARUH KORONA PADA KUBIKEL MODEL  
TERHADAP DISTORSI HARMONISA ARUS DAN  
TEGANGAN SUMBER LISTRIK AC**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana**

**FAIZ HUSNAYAIN  
06 06 07 3902**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**

**DEPOK**

**JUNI, 2010**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : Faiz Husnayain**

**NPM : 0606073902**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 8 Juni 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Faiz Husnayain  
NPM : 0606073902  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Studi Pengaruh Korona Pada Kubikel Model  
Terhadap Distorsi Harmonisa Arus Dan Tegangan  
Sumber Listrik AC

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Iwa Garnima MK, MT. ( )  
Penguji : Ir. Amien Rahardjo, MT ( )  
Penguji : Budi Sudiarto, ST., MT. ( )

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 1 Juli 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan syukur Saya panjatkan kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan kekuatan kepada saya untuk dapat menyelesaikan buku skripsi ini;
2. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa, MK, M.T. selaku pembimbing skripsi yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran dalam mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
3. Ir. Amien Rahardjo, MT dan Budi Sudiarto, ST., MT., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan konstruktif dalam sidang skripsi.
4. Orang tua yang selalu mendoakan, membimbing serta memberikan segalanya yang dibutuhkan untuk anaknya ini;
5. Dini, Ghilman, adik-adik lainnya serta saudara-saudara saya lainnya yang selalu membantu dan mengingatkan dan memberikan inspirasi untuk segera menyelesaikan penulisan skripsi ini;
6. Pak sudarman, Nadir M.Aljaidi dan teman-teman 'gatrik' lainnya yang cukup membantu dalam penyelesaian skripsi ini;
7. Teman – teman satu perjuangan baik di PPSDMS (Ksatria UI), departemen, fakultas maupun universitas yang telah mendoakan dan selalu memberikan semangat;
8. Seluruh keluarga besar Civitas Akademika Fakultas Teknik Universitas Indonesia khususnya karyawan Departemen Teknik Elektro yang telah banyak memberikan bantuan dalam urusan administrasi skripsi.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga buku skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 8 juni 2010

Faiz Husnayain

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Faiz Husnayain  
NPM : 0606073902  
Program studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**STUDI PENGARUH KORONA PADA KUBIKEL MODEL TERHADAP  
DISTORSI HARMONISA ARUS DAN TEGANGAN SUMBER LISTRIK  
AC**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemegang Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal: 8 Juni 2010

Yang menyatakan

Faiz Husnayain

## ABSTRAK

Nama : Faiz Husnayain  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Studi Pengaruh Korona Pada Kubikel Model Terhadap Distorsi Harmonisa Arus Dan Tegangan Sumber Listrik AC

Penerapan tegangan tinggi AC pada sistem tenaga listrik menimbulkan beberapa gejala, salah satunya korona. Salah satu dampak yang ditimbulkan korona pada sistem tenaga listrik adalah kenaikan nilai distorsi harmonik dari gelombang sumber. Korona dapat ditemukan pada saluran transmisi, gardu induk dan gardu distribusi. Pengujian untuk mendeteksi korona pada kubikel model dengan melihat perubahan nilai total distorsi harmonik (THD) dilakukan untuk mengurangi dampak negatif yang ditimbulkannya. Hasil pengujian menyatakan bahwa nilai THD semakin meningkat saat terjadinya korona. Perubahan jarak penghantar dengan kubikel dan besar diameter kawat penghantar juga mempengaruhi besar perubahan THD.

Kata kunci: tegangan tinggi AC, korona, kubikel model, distorsi harmonisa,

## ABSTRACT

Name : Faiz Husnayain  
Study Program : Teknik Elektro  
Title : Study of Corona effect on Cubicle Model toward Harmonic Distortion of Current and Potential AC Electric Source

Application of AC high voltage in power system cause several effect, such as corona. One of impact caused by corona in power system is increasing the value of harmonic distortion of power source. Corona mostly developed in transmission lines, substations and distribution substation. Experiment to detect corona in cubicle model by observing the gradient of total harmonic distortion (THD) is conducted to reduce the negative impact caused by them. Results show that THD's value increasing during corona phenomenon. Changes in distance between electrode and cubicle as well as diameter of electrode influence the THD's values.

Keywords: AC high voltage, corona, cubicle model, harmonic distortion

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB 2 KORONA DAN HARMONIK YANG DIHASILKANNYA</b>	
A. Fenomena Korona	
2.1 Mekanisme Ionisasi pada Isolasi Udara .....	5
2.1.1 Ionisasi Karena Tumbukan Elektron ( <i>collision</i> ) .....	7
2.1.2 Ionisasi karena Cahaya ( <i>Fotoionisasi</i> ) .....	10
2.1.3 Ionisasi karena Panas (Ionisasi Termal) .....	12
2.1.4 Proses katoda .....	12
2.1.4.1 Emisi fotoelektrik .....	13
2.1.4.2 Emisi elektron karena dampak ion positif .....	13
2.1.4.3 Emisi Termionik .....	14
2.1.4.4 Emisi medan .....	15
2.1.5 Rekombinasi .....	16
2.2 Mekanisme Pembentukan Korona .....	17
2.3 Faktor yang Memengaruhi Korona .....	19
2.3.1 Pengaruh Tekanan Udara .....	19
2.3.2 Pengaruh Bentuk Permukaan Penghantar .....	20
2.3.3 Diameter Penghantar .....	21
2.3.4 Pengaruh Partikel di sekitar Penghantar .....	21
2.4 Jenis-jenis korona menurut polaritasnya .....	22
2.4.1 Korona positif .....	22
2.4.2 KoronaNegatif .....	23
2.5 Efek yang Ditimbulkan Korona .....	25
2.5.1 Efek korona Pada Lingkungan Sekitar .....	26
2.5.1.1 Cahaya Tampak .....	26
2.5.1.2 Interferensi Radio dan Televisi .....	27
2.5.1.3 Gangguan Bising .....	27
2.5.2 Efek Korona Pada Performa Peralatan Listrik .....	28

2.5.2.1	Pada Material Listrik .....	28
2.5.2.2	Pada Peralatan Komunikasi, Kontrol Dan Alat Ukur .....	29
<b>B. Distorsi Harmonik Gelombang Arus dan Tegangan</b>		
2.6	Pengertian Harmonik .....	29
2.7	Total Harmonik Distortion .....	32
2.8	Sumber Harmonik .....	33
2.9	Dampak Harmonik .....	35
<b>BAB 3 METODE DAN PROSEDUR PENGUJIAN</b>		
3.1	Metode Pengujian .....	36
3.2	Peralatan Pengujian .....	36
3.3	Prosedur Pengujian .....	37
3.3.1	Persiapan awal .....	38
3.3.2	Jalannya Pengujian .....	39
<b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS</b>		
4.1	Hasil Pengujian .....	41
4.1.1	Hasil Pengujian dengan Diameter 4 mm .....	42
4.1.1.1	Jarak 4cm .....	42
4.1.1.2	Jarak 6cm .....	43
4.1.1.3	Jarak 8cm .....	45
4.1.1.4	Jarak 10cm .....	46
4.1.2	Hasil Pengujian dengan Diameter 8 mm .....	48
4.1.2.1	Jarak 4cm .....	48
4.1.2.2	Jarak 6cm .....	50
4.1.2.3	Jarak 8cm .....	51
4.1.2.4	Jarak 10cm .....	53
4.1.3	Hasil Pengujian dengan Diameter 15 mm .....	55
4.1.3.1	Jarak 4cm .....	55
4.1.3.2	Jarak 6cm .....	56
4.1.3.3	Jarak 8cm .....	58
4.1.3.4	Jarak 10cm .....	60
4.2	Analisis Hasil Pengujian .....	61
4.2.1	Analisis Pengaruh Jarak .....	61
4.2.1.1	Analisis Perubahan Jarak Penghantar terhadap Distorsi Harmonik Pada Gelombang Sumber .....	63
4.2.1.1.a	Gelombang Tegangan .....	63
4.2.1.1.b	Gelombang Arus .....	66
4.2.2	Analisis Pengaruh Diameter .....	67
4.3	Analisis Hubungan Korona dengan Harmonik Suatu Gelombang .....	68
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>		<b>73</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>		<b>74</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>75</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>76</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Proses Dasar Ionisasi dengan cara Pemberian Tegangan .....	6
Gambar 2.2	Grafik Probabilitas Ionisasi untuk udara .....	8
Gambar 2.3	Grafik Proses Townsend (Perubahan Arus antara dua plat sejajar sebagai fungsi dari kuat medan) .....	9
Gambar 2.4	Grafik Ionisasi Karena Cahaya 10 .....	10
Gambar 2.5	Proses rekombinasi 16 .....	16
Gambar 2.6	Proses Pembentukan Gelombang Harmonik dengan $f_0 = 60$ Hz .....	30
Gambar 2.7	Spektrum Harmonik .....	30
Gambar 2.8	Karakteristik gelombang arus pada beban linier .....	33
Gambar 2.9	Karakteristik gelombang arus pada beban non linier .....	34
Gambar 3.1	Power Quality Meter 37 .....	37
Gambar 3.2	Penghantar dalam kubikel model .....	38
Gambar 3.3	Rangkaian pengujian 38 .....	39
Gambar 4.1	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 4 cm .....	43
Gambar 4.2	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 4 cm .....	43
Gambar 4.3	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 6 cm .....	44
Gambar 4.4	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 6 cm .....	45
Gambar 4.5	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 8 cm .....	46
Gambar 4.6	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 8 cm .....	46
Gambar 4.7	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 10 cm .....	47
Gambar 4.8	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 4 mm dan r 10 cm .....	48
Gambar 4.9	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 4 cm .....	49
Gambar 4.10	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 4 cm .....	49
Gambar 4.11	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 6 cm .....	51
Gambar 4.12	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 6 cm .....	51
Gambar 4.13	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 8 cm .....	52
Gambar 4.14	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 8 cm .....	53
Gambar 4.15	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 10 cm .....	54
Gambar 4.16	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 8 mm dan r 10 cm .....	54
Gambar 4.17	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 4 cm .....	56
Gambar 4.18	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 4 cm .....	56
Gambar 4.19	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 6 cm .....	57
Gambar 4.20	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 6 cm .....	58
Gambar 4.21	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 8 cm .....	59
Gambar 4.22	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 8 cm .....	59
Gambar 4.23	Grafik (%) THD $V_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 10 cm .....	61
Gambar 4.24	Grafik (%) THD $I_{sumber}$ dengan d 15 mm dan r 10 cm .....	61
Gambar 4.25	Grafik hubungan perubahan jarak terhadap $V_{korona}$ dan kegagalan isolasi udara .....	62
Gambar 4.26	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonic gelombang $V_s$ untuk penghantar d 4 mm .....	64
Gambar 4.27	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonic gelombang $V_s$ untuk penghantar d 8 mm .....	64
Gambar 4.28	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonic gelombang $V_s$ untuk penghantar d 15 mm .....	65

Gambar 4.29	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonik gelombang Is untuk penghantar d 4 mm .....	66
Gambar 4.30	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonik gelombang Is untuk penghantar d 8 mm .....	66
Gambar 4.31	Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonik gelombang Is untuk penghantar d 15 mm .....	67
Gambar 4.32	beda tegangan AC yang sangat tinggi antara elektroda .....	69
Gambar 4.33	Nilai % Distorsi harmoni gelombang Vs dengan f 450 Hz .....	71
Gambar 4.34	Nilai % Distorsi harmoni gelombang Is dengan f 450 Hz .....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Faktor Permukaan Penghantar .....	20
Tabel 4.1	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 4cm .....	42
Tabel 4.2	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 6cm .....	44
Tabel 4.3	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 8cm .....	45
Tabel 4.4	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 10cm .....	47
Tabel 4.5	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 4cm .....	48
Tabel 4.6	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 6cm .....	50
Tabel 4.7	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 8cm .....	52
Tabel 4.8	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 10cm .....	53
Tabel 4.9	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 4cm .....	55
Tabel 4.10	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 6cm .....	57
Tabel 4.11	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 8cm .....	58
Tabel 4.12	Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 10cm .....	60
Tabel 4.13	Pengaruh perubahan jarak penghantar terhadap perubahan % distorsi harmonik pada tegangan sumber Vs untuk frekuensi (50, 150, 250, 350, 450 Hz) .....	63
Tabel 4.14	Pengaruh perubahan jarak penghantar terhadap perubahan % distorsi harmonik pada arus sumber Is untuk frekuensi (50, 150, 250, 350, 450 Hz) .....	65

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Sejalan dengan meningkatnya laju pertumbuhan penduduk dan perkembangan dunia informasi dan teknologi serta pembangunan di Indonesia khususnya di kota-kota besar seperti di Jakarta, kebutuhan akan energi listrik pun mengalami peningkatan yang tajam terutama disektor industri. Berdasarkan data dari biro statistic, kebutuhan akan energy listrik mengalami peningkatan 18% melebihi yang direncanakan 8,2%<sup>[4]</sup>. Berbagai upaya telah dilakukan oleh PT PLN (Persero) selaku pengelola kelistrikan negara untuk dapat memenuhi kebutuhan tersebut, diantaranya adalah dengan pembangunan pusat-pusat pembangkit listrik baru sebagai sumber energi dan melakukan berbagai macam inovasi serta perbaikan baik itu disisi transmisi maupun saat pendistribusian listrik ke masyarakat.

Salah satu upaya yang dilakukan ialah dengan penggunaan tegangan tinggi pada saluran transmisi yang bertujuan untuk mengurangi rugi daya akibat panas yang dihasilkan pada saluran transmisi. Untuk saat ini penerapan tegangan tinggi di Indonesia pada saluran transmisi telah mencapai tegangan 500 kV. Hal ini tentunya dapat mengurangi besar rugi daya yang dapat terjadi pada saluran transmisi bila dibandingkan sebelumnya. Namun ada persoalan baru yang bermunculan akibat dari penggunaan tegangan tinggi ini, antara lain: adanya persoalan isolasi penghantar, persoalan isolasi peralatan serta gejala korona pada daerah sekitar penghantar. Tidak hanya pada saluran transmisi baik itu tegangan tinggi maupun ekstra tinggi, fenomena korona ini juga sering dijumpai pada gardu induk, gardu distribusi serta kubikel tegangannya.

Keberadaan korona yang ditimbulkan ini memberikan efek permasalahan baru baik itu bagi lingkungan sekitar yang berupa peralatan dan isolasinya. Tidak hanya itu, kubikel tempat ditempatkannya penghantar tersebut.serta kualitas daya dari sistem tenaga listrik secara keseluruhan mendapatkan pengaruh negatifnya.

Gangguan yang dapat langsung dirasakan berbentuk interferensi gelombang radio, suara bising, rugi-rugi daya dan penurunan kualitas isolasi

bahan serta kehandalan peralatan dan juga kepada kubikelnya itu sendiri yang bisa terbakar atau bahkan bisa hingga meledak. Gangguan lainnya adalah terjadinya kenaikan besar distorsi harmonisa baik pada gelombang sumber maupun gelombang keluarannya.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan pembahasan skripsi ini adalah untuk mengetahui pengaruh yang ditimbulkan oleh korona terhadap nilai distorsi harmonisa baik itu gelombang arus maupun tegangan pada sumber tegangan tinggi pada model kubikel dengan memvariasikan nilai jarak antar penghantar dan diameter dari penghantar yang digunakan.

## **1.3 Batasan Masalah**

Pada penulisan skripsi ini pembahasan akan difokuskan pada gangguan yang ditimbulkan oleh fenomena korona terutama pada sistem tenaga listrik berupa kualitas daya. Analisis yang dilakukan akan dibagi menjadi dua bagian yaitu pengaruh korona terhadap harmonisa gelombang arus dan juga pengaruhnya terhadap bentuk gelombang tegangan pada sumber dari kubikel model.

Analisis pada pembahasan skripsi ini akan terfokus pada orde dari gelombang yang memiliki besar persentase harmonisa yang cukup signifikan terhadap nilai distorsi harmonisa total (%THD) dari gelombang.

## **1.4 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan skripsi ini terdiri dari lima bab yaitu Pendahuluan, Fenomena Korona dan Harmonisa yang dihasilkan, Metode dan Prosedur Pengujian, Hasil Pengujian dan Analisis serta Kesimpulan.

Bab pertama merupakan pendahuluan, yaitu merupakan pembahasan mengenai latar belakang, tujuan pembahasan yang dilakukan penulis, batasan masalah dalam melakukan penelitian serta sistematika penulisan yang menjadi penuntun dalam penulisan skripsi ini. Bab kedua memuat landasan teori yang digunakan dalam melakukan analisis data pengujian. Bab ini antara lain mencakup

fenomena korona yang terdiri dari proses ionisasi, proses terbentuknya korona, jenis-jenis korona dan efek yang ditimbulkan oleh korona, yang difokuskan pada distorsi harmonisa dari bentuk gelombang. Bab ketiga berisikan metode dan prosedur pengujian yang dilakukan tentang bagaimana langkah-langkah dalam pengujian ini baik itu pada proses persiapan maupun pada saat pengambilan data. Bab keempat merupakan data hasil pengujian yang dilengkapi dengan analisis dari hasil yang diperoleh selama pengujian. Sedangkan bab kelima adalah kesimpulan dari skripsi ini.

## **BAB 2**

### **KORONA DAN HARMONISA YANG DIHASILKANNYA**

#### **A. Fenomena Korona**

Dalam suatu konstruksi peralatan tegangan tinggi, keberadaan isolasi merupakan suatu hal yang signifikan. Semakin tinggi tegangan yang dimiliki oleh suatu peralatan, maka akan dibutuhkan suatu isolasi yang semakin baik pula kualitasnya. Pada kondisi tertentu dimana tegangan mencapai tingkatan tertentu, maka pada bahan isolasi yang sedang digunakan tersebut dapat mengalami pelepasan muatan atau sering dikenal dengan istilah *discharge*. Pada saat terjadi pelepasan muatan itu maka dapat dikatakan isolasi mengalami kegagalan. Proses *discharge* ini menyebabkan hilangnya tegangan dan terjadinya lompatan muatan atau aliran arus pada isolasi tersebut. Proses ini dikenal dengan istilah korona<sup>[3]</sup>.

Salah satu isolator listrik yang cukup baik adalah udara. Jika proses pelepasan muatan itu terjadi pada isolator udara maupun gas maka akan terjadi ionisasi. Proses ionisasi itu sendiri meliputi dua hal, antara lain proses pembangkitan dan kehilangan ion, baik yang terjadi dalam bentuk tunggal maupun kombinasi <sup>[1]</sup>. Proses pembangkitan ion antara lain melalui: tumbukan (*collision*) antar elektron, fotoionisasi, ionisasi oleh tumbukan ion-positif, ionisasi termal, pelepasan elektron, ionisasi kumulatif, dan efek  $\gamma$  sekunder. Sedangkan proses kehilangan ion antara lain dengan cara: penggabungan elektron, rekombinasi, dan difusi.

Pada sistem yang menggunakan tegangan tinggi sering kita temui fenomena korona. Korona biasanya terjadi sebelum terjadinya proses kegagalan pada suatu isolasi yang disebut *breakdown*. Dengan adanya realitas ini, korona sering disebut juga sebagai peristiwa pelepasan sebagian. Pada peristiwa korona sering kita temui beberapa fenomena seperti timbulnya cahaya dan bunyi-bunyi desis pada peralatan tersebut, atau bahkan hingga menghasilkan lompatan-lompatan listrik yang kecil. Timbulnya cahaya dan bunyi pada isolator udara disebabkan dari pergerakan elektron di udara akibat terjadinya ionisasi pada

medium tersebut. Ionisasi ini terjadi akibat dari tegangan yang telah diterapkan pada konduktor (elektroda).

Fenomena korona dapat kita analogikan dengan proses kegagalan udara sebagai isolator yaitu proses pelepasan muatan yang terjadi apabila terdapat beda potensial pada konduktor tersebut. Perbedaan potensial ini akan mengakibatkan partikel-partikel yang berada disekitar penghantar akan mengalami proses ionisasi. Meskipun demikian, tetap ada perbedaan yang cukup signifikan antara korona dan *sparkover* pada udara atau gas. Besarnya tegangan yang diterapkan untuk terjadinya korona tidak sama dengan tegangan yang dibutuhkan untuk terjadinya kegagalan isolasi (*sparkover* atau *flashover*) pada sebuah peralatan. Selain itu proses kegagalan atau *sparkover* dapat menimbulkan kerusakan pada isolasi secara langsung atau seketika. Namun pada proses korona, isolasi akan mengalami kerusakan secara tidak langsung atau setidaknya mengalami suatu proses yang cukup lama.

Pada kondisi tertentu, nilai tegangan yang diterapkan pada penghantar dapat mengakibatkan terjadinya korona. Nilai tegangan dengan beberapa kV akan menimbulkan medan listrik disekeliling kawat penghantar. Di daerah dengan intensitas medan yang tinggi, akan terlihat perbedaan antara titik korona (yakni titik bercahaya sepanjang suatu penghantar) dan sampul korona (sampul cahaya mengelilingi penghantar).

Terjadinya korona pada suatu penghantar (elektroda) dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya kondisi udara, keadaan permukaan kawat penghantar, jenis penghantar, jarak antar penghantar, dan diameter kawat penghantar. Dengan demikian perlu dipahami bagaimana pengaruh dari masing-masing kondisi tersebut terhadap terbentuknya korona pada suatu elektroda penghantar.

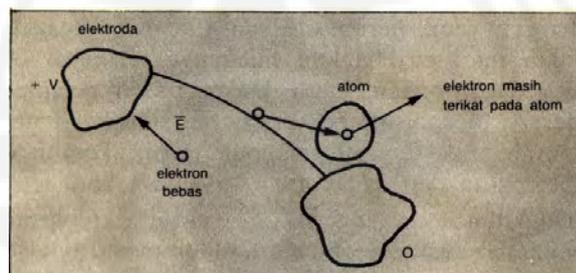
## **2.1 Mekanisme Ionisasi pada Isolasi Udara**

Pada dasarnya, udara ideal yang kita temui dalam keseharian merupakan gas yang hanya terdiri dari molekul-molekul netral. Udara tidak memiliki kemampuan untuk mengalirkan arus listrik pada kondisi normal. Namun dalam

realitanya, udara yang kita jumpai tidaklah hanya terdiri dari molekul-molekul yang netral saja melainkan ada sebagian kecil dari padanya berupa ion-ion dan elektron-elektron bebas yang mampu untuk mengalirkan arus walaupun hanya sedikit.

Proses ionisasi udara mula-mula dipengaruhi oleh jumlah elektron bebas yang berada di udara atau gas. Dalam kondisi normal, konsentrasi elektron bebas sangatlah kecil. Nilai konsentrasinya ditentukan juga oleh pengaruh radioaktif dari lingkungan sekitar. Pengaruh ini berupa radiasi ultra violet dari matahari ataupun radioaktif dari bumi. Tidak hanya itu, ada juga pengaruh radiasi sinar kosmik dan lain sebagainya yang mana semuanya dapat menyebabkan terjadinya proses ionisasi pada udara.

Proses ionisasi molekul udara ini tidak hanya ditimbulkan oleh faktor alam, namun kita juga bisa melakukannya dengan memberikan suatu beda tegangan  $V$  diantara elektroda yang berada di udara atau gas maka dengan begitu akan timbul suatu medan listrik  $\vec{E}$  yang mempunyai besar dan arah tertentu. Di dalam medan listrik yang ditimbulkan oleh beda tegangan yang kita berikan, elektron-elektron bebas tersebut akan mendapat energi yang cukup kuat sehingga dapat merangsang timbulnya proses ionisasi.



Gambar 2.1 Proses Dasar Ionisasi dengan cara Pemberian Tegangan <sup>[1]</sup>

Besar energi yang dibutuhkan tersebut adalah:

$$U = e.V = \frac{1}{2} . m_e . v_e^2 \quad (2.1)$$

Universitas Indonesia

dimana:  $e$  = muatan elektron  
 $V$  = beda potensial antara kedua elektroda  
 $m_e$  = massa elektron  
 $v_e$  = kecepatan elektron

### 2.1.1 Ionisasi Karena Tumbukan Elektron (*collision*)

Ionisasi karena tumbukan ini mungkin merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan udara atau gas. Proses ionisasi ini terjadi diantara dua elektroda yang dipisahkan dengan isolasi udara dan diantara keduanya terdapat beda tegangan yang cukup besar. Jika gradient tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang akan ditangkap menjadi molekul oksigen. Tiap-tiap elektron ini kemudian akan berjalan dari katoda menuju anoda secara kontinu akibat dari adanya pengaruh medan listrik akibat beda tegangan ini, sambil membuat tumbukan-tumbukan yang kemudian akan membebaskan lebih banyak lagi elektron.

Pada proses tumbukan electron ini, sebuah elektron tunggal yang dibebaskan oleh pengaruh luar berpotensi memicu terjadinya banjir elektron (*avalanche*), yaitu fenomena dimana kelompok elektron yang akan bertambah secara cepat dan bergerak maju meninggalkan ion positif pada lintasannya.

Efektifitas ionisasi karena tumbukan (tumbukan) elektron ditentukan oleh energi atau kecepatan dari elektron penumbuk yang nilainya sebesar <sup>[1]</sup>:

$$v_e = \sqrt{\frac{2.e.V}{m_e}} \quad (2.2)$$

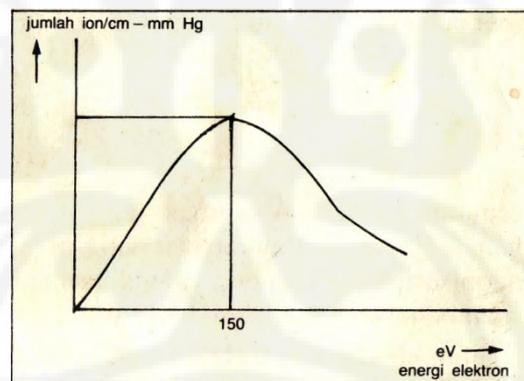
Dari persamaan diatas dapat dilihat bahwa efektifitas ionisasi karena tumbukan dipengaruhi oleh besar energi (dalam hal ini potensial listrik  $V$ ) atau kecepatan elektron penumbuk ( $v_e$ ).

Perlu diketahui tidak semua tumbukan antara elektron dengan molekul dapat menghasilkan elektron bebas. Jika yang terjadi kecepatan elektron  $v_e$  sangat

lambat, misalkan disebabkan oleh tegangan  $V$  yang rendah, maka tidak akan terjadi proses ionisasi. Hal ini dikarenakan energi yang dihasilkan tidaklah cukup kuat untuk membebaskan elektron yang terikat pada molekul gas.

Begitu pula sebaliknya, jika kecepatan elektron  $v_e$  terlalu tinggi, maka ionisasi juga sulit terjadi. Hal ini terjadi karena elektron pada kulit terluar yang akan diionisasi memiliki tingkat energy tertentu. Oleh karena itu dalam kondisi seperti ini, ada kemungkinan elektron bebas tersebut dalam pergerakannya akan mendekati sesuatu atom tanpa menghasilkan elektron bebas lainnya.

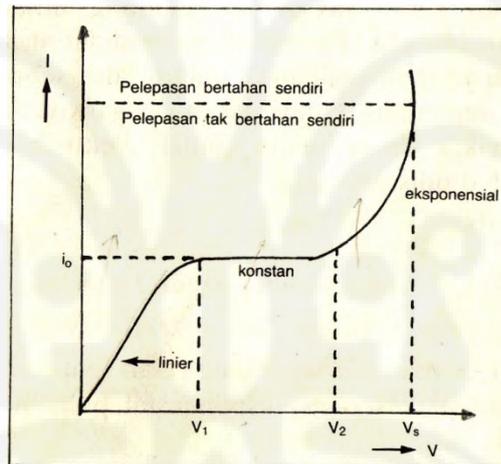
Dengan demikian pada proses ionisasi ada suatu nilai kecepatan elektron bebas yang optimum dimana probabilitas untuk menghasilkan elektron-elektron bebas lainnya adalah maksimum. Dalam kondisi kecepatan optimum ini diharapkan tumbukan dari setiap elektron bebas mampu membebaskan elektron-elektron lainnya dalam tumbukan selanjutnya.



Gambar 2.2 Grafik Probabilitas Ionisasi untuk udara <sup>[1]</sup>

Gerakan elektron bebas ini merupakan fungsi dari tegangan dan arah geraknya berlawanan arah dengan gerakan arus listrik. Oleh karena itu jika suatu tegangan diberikan diantara dua elektroda (katoda dan anoda) maka arus akan bergerak menuju katoda yang konsentrasinya bertambah perlahan-lahan sesuai dengan Bergeraknya elektron. Gerakan ini sesuai dengan arah kuat medan yang

ada. Perubahan arus antara dua elektroda pelat yang sejajar sebagai fungsi dari kuat medan. Menurut Townsend<sup>[3]</sup> arus mula-mula naik sebanding dengan tegangan yang diterapkan. Hal ini dapat dilihat pada bagian awal grafik yang menunjukkan bahwa penambahan elektron yang dibebaskan sebanding dengan naiknya tegangan yang diterapkan. Selanjutnya, penambahan tegangan dari  $V_1$  ke  $V_2$  tidak akan menyebabkan penambahan arus. Arus Konstan pada harga  $i_0$ , yaitu arus foto listrik yang dihasilkan di katoda oleh penyinaran ultra violet. Arus yang konstan ini terjadi karena semua elektron yang dibebaskan oleh karena adanya penyinaran tersebut sudah habis dan kondisi ini disebut dengan kondisi kejenuhan.



Gambar 2.3 Grafik Proses Townsend (Perubahan Arus antara dua plat sejajar sebagai fungsi dari kuat medan <sup>[1]</sup>)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa jika tegangan tetap dinaikkan terus hingga melebihi  $V_2$ , maka arusnya akan naik secara eksponensial. Kenaikan arus sesudah tegangan melebihi  $V_2$  menurut Townsend disebabkan oleh ionisasi gas karena tumbukan elektron. Pada waktu kuat medan naik, maka elektron-elektron yang meninggalkan katoda makin lama makin dipercepat, sehingga elektron-elektron ini memiliki cukup energi untuk memungkinkan terjadinya ionisasi akibat tumbukan dengan atom atau molekul gas. Tumbukan tersebut akan

menimbulkan elektron-elektron baru, yang kemudian juga memperoleh tambahan energi dari medan sehingga mampu pula melakukan ionisasi. Oleh karena itu jumlah elektron yang bebas pun semakin lama jumlahnya semakin banyak dan arus yang mengalir pun semakin besar. Jika tegangan telah mencapai suatu harga kritis  $V_s$ , maka akan terjadi pelepasan bertahan sendiri.

Dalam rangka mempermudah penjelasan mengenai kenaikan arus tersebut, Townsend memperkenalkan suatu faktor  $\alpha$ , yaitu jumlah elektron yang dihasilkan di dalam jalur sebuah elektron yang bergerak sepanjang 1 cm searah dengan medan. Dengan demikian, kenaikan  $dn$  terhadap jumlah elektron  $n$  sepanjang jarak  $dx$  dapat ditulis sebagai <sup>[1]</sup>

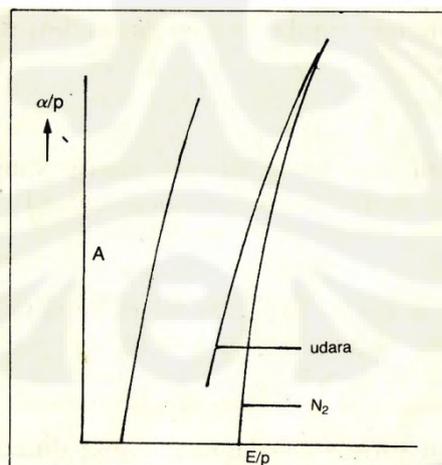
$$dn = \alpha n \cdot dx \quad (2.3)$$

Oleh karena itu, maka arus sepanjang celah antara katode dan anode akan naik secara eksponensial pula <sup>[1]</sup>

$$I = I_0 \varepsilon^{\alpha d} \quad (2.4)$$

Dengan  $I_0$  adalah arus yang meninggalkan katoda dan  $d =$  jarak celah

### 2.1.2 Ionisasi karena Cahaya (Fotoionisasi)



Gambar 2.4 Grafik Ionisasi Karena Cahaya <sup>[1]</sup>

Proses ionisasi karena fotoionisasi dapat berlangsung bila tersedia sumber energi cahaya yang cukup. Cahaya dengan frekuensi  $f$  akan mempunyai energi sebesar:

$$U = hf \quad (2.5)$$

dengan:  $h$  = konstanta Planck

Kuantum energi atau foton ini dapat menjadi sumber energi bagi keberlangsungan proses ionisasi molekul yang netral dalam gas jika energi yang dibawa oleh foton tersebut melebihi energi potensial ionisasi dari elektron tersebut <sup>(1)</sup>.

$$U = hf \geq eV_i \quad (2.6)$$

dimana  $V_i$  = potensial ionisasi

Oleh karena kondisi di atas harus terpenuhi untuk memungkinkan terjadinya proses ionisasi pada molekul gas, maka jika keadaan sebaliknya, lebih kecil, maka proses ionisasi tidak akan terjadi. Untuk kasus ini, energi yang dibawa oleh foton tersebut akan diserap sehingga tingkatan energi dari atom atau molekul tersebut akan naik dari semula.

$$A + hf = A_1 \quad (2.7)$$

Dengan  $A_1$  adalah molekul dengan energi yang lebih tinggi (Proses ini dikenal dengan sebutan fotoeksitasi)

Bila energi foton melebihi batas potensial dari energi ionisasi, maka kelebihan energi itu akan digunakan untuk membebaskan elektron dalam bentuk energi kinetik <sup>(1)</sup>

$$hf = eV_i + \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (2.8)$$

Atau secara umum proses ionisasi karena fotoionisasi dapat dinyatakan dalam bentuk <sup>(1)</sup> :



dimana  $A$  = Molekul mula-mula  
 $A^+$  = Molekul yang kehilangan 1 elektronnya  
 $e^-$  = Elektron yang dibebaskan oleh proses ionisasi

probabilitas sebuah foton mengionisasi sebuah atom atau molekul adalah maksimal jika  $hf - eV_i$  kecil antara  $0,1 - 1$  eV.

### 2.1.3 Ionisasi karena Panas (Ionisasi Termal)

Pada dasarnya proses ionisasi pada gas yang disebabkan oleh panas serupa dengan ionisasi karena tumbukan ataupun cahaya. Namun perbedaannya hanya terletak pada jenis energi yang diberikan kepada molekul atau atom dari gas netral. Jika gas dipanasi hingga mencapai suhu yang cukup tinggi, maka akan banyak atom netral yang akan memperoleh energi yang diperlukan untuk mengionisasi atom-atom yang mereka bentur.

Dalam menganalisis proses ionisasi termal, proses rekombinasi antara ion positif dan elektron harus dihitung. Dalam kondisi yang setimbang maka rata-rata formasi ion baru harus sama dengan rata-rata proses rekombinasinya. Proses ini telah dianalisis oleh **Saha** dan dapat dituliskan menjadi <sup>[3]</sup>:

$$U_i(T) + A \rightleftharpoons A^+ + e^- \quad (2.10)$$

Dimana

$U_i(T)$	= energi panas
$A$	= Molekul atau atom gas mula-mula
$A^+$	= Molekul atau atom yang bebas 1 elektronnya
$e^-$	= elektron yang dibebaskan oleh proses ionisasi

Adapun, ionisasi termal mencakup beberapa hal, antara lain <sup>[1]</sup>:

1. Ionisasi karena tumbukan antara molekul-molekul atau atom gas yang bergerak dengan kecepatan tinggi akibat suhu yang tinggi
2. Ionisasi karena radiasi panas atau tumbukan elektron

### 2.1.4 Proses Katoda

Elektroda yang merupakan bagian katoda memiliki peran penting dalam proses pelepasan gas. Proses katoda ini dapat berfungsi untuk menyediakan elektron yang mengawali, mempertahankan, dan menyelesaikan proses pelepasan. Pada kondisi normal elektron-elektron akan tertahan untuk meninggalkan

elektroda padat akibat adanya gaya elektrostatik diantara elektron dan ion di dalam *lattice*. Energi yang dibutuhkan untuk memindahkan sebuah elektron dari level Ferminya disebut sebagai fungsi kerja ( $W_a$ ) sebuah atom. Besarnya energi sangat bergantung terhadap karakteristik dari material yang digunakan. Untuk terjadinya proses katoda dapat dilakukan melalui berbagai cara yaitu sebagai berikut:

#### 2.1.4.1 Emisi Fotoelektrik

Cahaya yang mengenai permukaan katoda dengan energi foton yang melebihi dari fungsi kerja ( $hf > w_a$ ) dapat membuat elektron terlepas dari permukaan. Kebanyakan logam memiliki frekuensi kritis ( $f_o$ ) yang berada pada daerah frekuensi yang dimiliki ultra violet. Ketika besar energi dari foton melebihi dari fungsi kerja maka kelebihan energi tersebut akan dipindahkan ke elektron menjadi energi kinetik menurut teori Einstein:

$$\frac{1}{2} m v_e^2 = h f - h f_o \quad (2.11)$$

dengan  $m$  adalah massa elektron,  $v_e$  adalah kecepatan elektron dan  $hf_o$  adalah energi kritis yang dibutuhkan untuk melepaskan elektron ( $hf_o = w_a$ ).

#### 2.1.4.2 Emisi Elektron Karena Dampak Ion Positif

Elektron memungkinkan untuk teremis pada permukaan logam, akibat dari ion positif atau atom yang metastabil. Untuk menyebabkan sebuah emisi pada permukaan logam (sekunder) maka ion yang membentur katoda harus dapat membebaskan dua buah elektron. Dalam proses ini dua buah elektron yang dibebaskan terdiri dari satu elektron yang akan menetralkan ion tersebut dan elektron yang dilepaskan. Dari proses ini maka emisi elektron akibat ion positif membutuhkan energi dua kali dibandingkan fungsinya yang dapat dirumuskan menjadi:

$$W_p + W_k \geq 2W_a \quad (2.12)$$

dengan  $W_p$  dan  $W_k$  adalah energi potensial dan energi kinetik yang bekerja pada ion tersebut.

Emisi elektron akibat ion positif merupakan dasar pada mekanisme sekunder Townsend.

### 2.1.4.3 Emisi Termionik

Sebuah logam pada suhu kamar tidak mengalami emisi. Hal ini dikarenakan elektron-elektron yang terkonduksi tidak memiliki energi yang cukup besar sehingga elektron tidak akan meninggalkan permukaan. Jika elektron pada gas berada pada suhu kamar maka dapat dituliskan besar energi termal rata-ratanya yaitu:

$$\frac{mv_e^2}{2} = \frac{3kT}{2} = 3,8 \times 10^{-2} eV \quad (2.13)$$

Besar energi termal elektron pada suhu kamar lebih kecil jika dibandingkan dengan fungsi kerjanya sehingga takkan ada elektron yang terlepas. Namun apabila suhu pada logam naik mencapai 1500-2500 °K maka elektron akan mendapatkan energi. Energi ini berasal dari getaran kisi-kisi yang panas dan kasar. Dengan energi yang cukup ini maka elektron dapat melewati penghalang yang terdapat pada permukaan logam dan meninggalkannya. Kerapatan arus emisi memiliki hubungan dengan suhu dari logam yang teremisi. Hubungan antara kerapatan arus saturasi yang dipengaruhi oleh emisi termionik adalah:

$$J_s = \frac{4\pi m_e k^2}{h^3} T^2 \exp\left[-\frac{W_a}{kT}\right] A/m^2 \quad (2.14)$$

dengan  $e$  adalah muatan,  $m$  adalah massa elektron,  $h$  adalah konstanta Planck,  $k$  adalah konstanta Boltzman,  $T$  adalah temperatur absolut, dan  $W_a$  adalah fungsi kerja pada permukaan.

#### 2.1.4.4 Emisi medan

Pelepasan elektron dari permukaan logam dapat pula dilakukan dengan pemberian medan elektrostatis yang cukup kuat atau melebihi fungsi kerja dari logam. Bila hal ini tercapai akan terdapat arus yang mengalir pada permukaan elektroda. Dengan medan sebesar  $10^7$ - $10^8$  V/cm, pada permukaan logam tersebut akan mengalir beberapa mikro-ampere arus emisi dan untuk fungsi kerja logam sebesar 4,5 eV. Medan yang besar tersebut hanya akan terjadi pada kawat-kawat halus, ujung-ujung yang tajam, dan tegangan terapan yang cukup rendah (2,5 KV).

Menurut **Llewellyn Jones**, hanya dibutuhkan medan sebesar  $10^4$  V/cm untuk dapat membebaskannya elektron atau terjadinya emisi medan. Hal ini disebabkan persebaran medan yang terjadi pada konduktor tidak rata atau terkonsentrasi pada satu permukaan. Persebaran yang tak merata terjadi pada permukaan konduktor yang tidak sempurna. Selain itu banyaknya ion-ion positif yang menempel pada lapisan oksida permukaan konduktor juga dapat menyebabkan terjadinya terkonsentrasinya medan pada satu permukaan. Butir-butir debu yang menempel pada permukaan logam dapat juga meningkatkan emisi medan.

Menurut **Fowler** dan **Nordheim**, besarnya kerapatan arus yang terjadi karena medan elektrostatis dapat ditentukan oleh persamaan <sup>[1]</sup>:

$$J = AE^2 \varepsilon^{-\frac{D}{E}} \quad (2.15)$$

$$A = \frac{e}{2\pi h} \times \frac{u^{\frac{1}{2}}}{(u + \phi)\phi^{\frac{1}{2}}} \quad (2.16)$$

$$D = \frac{4k\phi^{\frac{3}{2}}}{3} \quad (2.17)$$

$$u = \left(\frac{3n}{\pi}\right)^{2/3} \times \frac{h^2}{8m_e} \quad (2.18)$$

$$k = \frac{8\pi^2 m_e}{h^2} \quad (2.19)$$

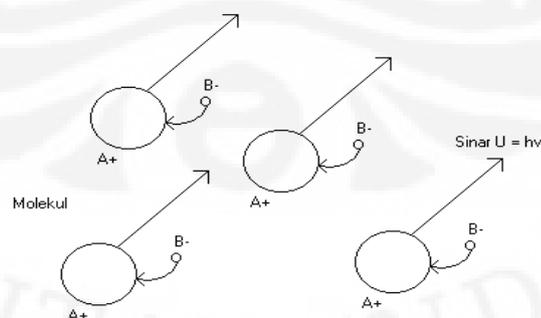
Dari persamaan di atas maka dapat disimpulkan bahwa besarnya arus akibat emisi medan akan naik secara eksponensial. Selain itu besarnya arus berbanding terbalik dengan negatifnya medan listrik.

### 2.1.5 Rekombinasi

Proses kegagalan isolasi gas meliputi beberapa mekanisme, yaitu ionisasi dan deionisasi. Mekanisme ini dapat terjadi secara tunggal maupun kombinasi. Rekombinasi merupakan mekanisme peleburan antara partikel muatan negatif dan muatan positif. Proses ini merupakan kebalikan dari proses ionisasi. Peleburan antar partikel yang bermuatan positif dan negatif akan memancarkan energi kinetik dan energi potensial yang dimilikinya dalam bentuk radiasi kuantum (foton) yang memiliki energi sebesar  $h\nu$ . Dari uraian di atas maka proses rekombinasi dapat ditulis menjadi:



dengan  $A^+$  adalah ion positif dan  $B^-$  adalah elektron.



Gambar 2.5 Proses rekombinasi <sup>[1]</sup>

Apabila proses rekombinasi terjadi didekat sebuah atom netral maka terdapat kemungkinan energi yang dipancarkan dari proses rekombinasi diserap oleh atom netral tersebut. Kemudian energi yang diserap dapat digunakan untuk membebaskan elektron. Inilah yang disebut sebagai proses kombinasi deionisasi dan ionisasi.

Tingkat laju proses rekombinasi memiliki kecepatan yang sebanding dengan konsentrasi keduanya yaitu ion positif dan ion negatif. Semakin banyak jumlah partikel untuk persatuan volume maka proses rekombinasi akan cepat terjadi. Hal ini dapat ditulis menjadi <sup>[1]</sup>:

$$\frac{dn_+}{dt} = \alpha_1 n_+ n_- \quad (2.21)$$

$$\frac{dn_-}{dt} = \alpha_2 n_- n_+ \quad (2.22)$$

dengan  $n_+$  adalah jumlah partikel muatan positif persatuan volume dan  $n_-$  adalah jumlah partikel muatan negative persatuan volume

Sejak besar  $n_+ = n_- = n$  dan besar  $\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$  maka persamaannya dapat ditulis menjadi <sup>[1]</sup>:

$$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = \alpha n^2 \quad (2.23)$$

dengan  $\alpha$  sebagai koefisien rekombinasi.

## 2.2 Mekanisme Pembentukan Korona

Fenomena korona akan terjadi ketika dua buah penghantar sejajar atau terpisah oleh suatu isolator dalam hal ini udara dengan kondisi luas penampang dari penghantar tersebut jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan jarak antara kedua penghantar diberikan tegangan bolak-balik yang tinggi. Ada batas nilai tegangan yang memungkinkan terjadinya korona, sehingga bila tegangan AC yang

diberikan diantara kedua penghantar tersebut memiliki nilai dibawahnya, maka fenomena ini tidak akan terjadi.

Kondisi korona ini bertambah seiring dengan penambahan beda tegangan yang berikan diantara kedua penghantar tersebut. Fenomena awal yang mungkin bisa kita amati yaitu terdengarnya suara mendesis (*hissing effect*) dan dihasilkannya ozon disekitar penghantar. Kemudian akan tampak Warna cahayanya adalah ungu muda (violet).

Kegagalan pertama terjadi didekat permukaan penghantar, yaitu dengan kondisi tekanan elektrostatis atau gradien tegangannya maksimum dan ketebalan lapisan udara bertambah dengan penambahan tekanan. Dan jika tegangan terus dinaikkan, gejala tersebut akan semakin jelas terlihat, yakni cahaya bertambah terang terutama pada bagian yang runcing, kasar, dan kotor. Namun, kenaikan tegangan tidak boleh melebihi batasan tertentu karena dapat menyebabkan terjadinya lompatan api. Bila tegangan masih juga dinaikkan, maka dapat terjadi busur api dan korona mengeluarkan panas, yang dapat dibuktikan dengan menggunakan wattmeter. Dalam keadaan udara lembab, korona menghasilkan asam nitrogen (*nitrous acid*) yang menyebabkan kawat menjadi berkarat.

Korona terjadi karena adanya proses ionisasi dalam udara, yang ditandai dengan adanya kehilangan elektron dari molekul udara. Ketika disekitar daerah ionisasi terdapat medan listrik maka elektron bebas tersebut akan mengalami percepatan akibat dari adanya gaya coulomb yang dialaminya. Proses percepatan muatan ini memungkinkan terjadinya tumbukan dengan molekul lain yang berpotensi membebaskan elektron-elektron baru. Proses ini berjalan terus-menerus dan jumlah elektron dan ion bebas menjadi berlipat ganda bila gradien tegangan cukup besar.

Adanya ionisasi ini mengakibatkan perubahan pada besar gradien tegangan. Bila redistribusi ini sedemikian rupa, sehingga gradien udara di antara dua kawat lebih besar dari gradien udara normal, maka terjadilah lompatan api. Bila hanya sebagian saja dari udara antara dua kawat terionisasikan, maka korona menimbulkan sampul yang mengelilingi kawat. Gradien tegangan seragam yang

**Universitas Indonesia**

dapat menimbulkan ionisasi kumulatif di udara normal (25<sup>0</sup>C, 760 mmHg) adalah 30 kV/cm.

### 2.3 Faktor yang Memengaruhi Korona

Terjadinya korona pada penghantar dengan tegangan tinggi dapat disebabkan oleh beberapa faktor baik dari segi fisik penghantar maupun dari kondisi lingkungan sekitar.

#### 2.3.1 Pengaruh Tekanan Udara

Pada saat proses ionisasi berlangsung, ion-ion bergerak bebas dengan kecepatan yang berbeda. Kecepatan ini dipengaruhi oleh kuat medan listrik yang mempengaruhinya, serta kerapatan udara yang dilaluinya (makin besar tekanan maka makin besar kerapatan udara). Arah pergerakan dari ion ini juga tidaklah tetap. Nilai kecepatan rata-rata ion dapat dinyatakan melalui persamaan:

$$V_d = \frac{A.E}{p} \quad (2.24)$$

Dimana: E = Kuat medan listrik (kV/m)

P= kerapatan udara (partikel/m<sup>3</sup>)

A= konstanta

V<sub>d</sub>= kecepatan rata-rata ion (m/det)

Dari persamaan tersebut dapat dilihat bila nilai tekanan gas tinggi dimana ditandai dengan semakin padatnya jumlah molekul bila dibandingkan dengan gas bertekanan rendah maka kecepatan ion-ion akan menurun dan arahnya menjadi tidak menentu seiring dengan tumbukan yang terjadi antar ion dengan molekul tersebut[arismunandar].

### 2.3.2 Pengaruh Bentuk Permukaan Penghantar

Permukaan penghantar yang kasar menyebabkan kuat medan listrik di ujung permukaan yang lebihkasar lebih besar bila dibandingkan dengan permukaan yang halus. Sehingga pada permukaan penghantar yang kasar korona yang terjadi lebih besar.

Pada kondisi cuaca buruk atau udara yang memiliki tingkat polutan tinggi, zat pengotor tersebut dapat menyebabkan tingginya gradien medan. Sebagai contoh bila terdapat tetesan air pada permukaan penghantar, kondisi ini dapat menyebabkan peningkatan tegangan permukaan antara air dan konduktor. Hal ini dinyatakan oleh Wilson dan Taylor melalui persamaan

$$E \geq 0,047 \sqrt{\frac{s}{r}} \quad (2.25) \text{ dimana:}$$

E= gradien medan permukaan penghantar (kV/cm)

s= tekanan permukaan (dyne/cm) (75,6 dyne/cm 0°C dan 58,8 dyne/cm 100°C)

r= radius partikel air (cm)

Pada penghantar transmisi dikenal istilah faktor permukaan penghantar ( $m_0$ ) yang nilainya tergantung pada kondisi permukaan penghantar pada udara normal. Dibawah ini merupakan rangkumannya:

Tabel 2.1 Faktor Permukaan Penghantar <sup>[9]</sup>

Kondisi Permukaan Penghantar	$m_0$
Halus	1,0
Penghantar Padat Kasar	0,93-0,98
Penghantar tembaga rongga	0,90-0,94
Penghantar pilin 7	0,83-0,87
Penghantar pilin 19-61	0,80-0,85

### 2.3.3 Diameter Penghantar

Semakin besar nilai diameter penghantar maka kuat medan listrik pada permukaan penghantar akan semakin kecil karena nilai jari-jarinya akan semakin besar. Jika kita mengasumsikan penghantar yang kita gunakan adalah berbentuk silinder, dan mempunyai muatan yang terpusat pada titi pusatnya dengan jari-jari  $r$ , maka kuat medan pada permukaan penghantar tersebut dapat dinyatakan dengan:

$$E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (2.26)$$

dimana:

$E$ = Kuat medan (kV/m)

$Q$ = Muatan (C)

$r$ = Jari-jari penghantar (m)

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m

Dengan mengacu pada persamaan diatas, korona yang dibangkitkan akan lebih besar terjadi pada penghantar dengan diameter besar bila dibandingkan dengan diameter kecil karena kemungkinan untuk titik air menempel menjadi lebih besar. Namun untuk nilai operasi tegangan yang sama, korona yang dibangkitkan oleh penghantar dengan diameter kecil lebih besar karena padanya nilai gradien tegangannya lebih tinggi.

### 2.3.4 Pengaruh Partikel di sekitar Penghantar

Suatu penghantar yang padanya diterapkan tegangan tinggi, ketika ada partikel-partikel lain disekitarnya seperti debu, air dan gas lainnya, maka akan timbul pelepasan yang berasal dari partikel tersebut akibat perubahan medan yang dialami. Partikel yang mendekati penghantar tersebut akan mengalami induksi

oleh medan listrik dan menyebabkan distribusi muatan pada ujung partikel dan hal ini menyebabkan potensi untuk terjadinya pelepasan menjadi lebih tinggi.

## **2.4 Jenis-jenis korona menurut polaritasnya**

### **2.4.1 Korona Positif**

Sebuah korona positif banyak digambarkan sebagai sebuah plasma yang tidak seragam sepanjang konduktor. Sering kali plasma tersebut bercahaya biru atau putih tergantung besarnya emisi yang terjadi akibat sinar ultraviolet. Ketidakteraturan plasma bergantung pada kehomogenan sumber elektron sekunder yang telah dijelaskan pada mekanisme korona di atas. Dengan besaran dan tegangan yang sama, plasma tersebut muncul dengan ukuran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan korona negatif. Besar korona positif bergantung dari kurangnya daerah plasma yang tidak terionisasi antara batas luar dan dalam. Pada korona positif, elektron bebas yang dimilikinya berjumlah lebih sedikit dibandingkan dengan korona negatif kecuali pada permukaan elektroda yang tidak datar. Hal ini disebabkan pada permukaan elektroda yang tidak datar terkumpul ratusan sampai ribuan elektron.

Pada korona positif, elektron terkonsentrasi dekat pada permukaan konduktor yang tidak datar dan pada daerah dengan beda potensial yang cukup besar (elektron-elektron tersebut mendapatkan energi yang cukup tinggi). Jika elektron tersebut digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan energi aktifasi yang cukup tinggi maka korona positif dapat mendukung untuk reaksi yang memerlukan energi lebih dibandingkan dengan korona positif. Korona sangat efisien dalam memproduksi ozon pada udara. Namun pada korona positif, ozon yang dibangkitkan lebih sedikit dikarenakan energi untuk reaksi yang dibutuhkan dalam produksi ozon relatif kecil.

Mekanisme terjadinya korona positif diawali dengan proses ionisasi yang beragam pada daerah yang memiliki gradien tegangan cukup tinggi. Elektron bebas yang dihasilkannya kemudian ditarik menuju permukaan elektroda yang

**Universitas Indonesia**

tidak datar. Ion positif yang ditinggalkan elektron akan ditolak sehingga menjauhi permukaan elektroda tersebut. Dengan proses tumbukan yang tidak elastis maka semakin banyak molekul yang terionisas akibat tumbukan ini sepanjang perjalanan menuju permukaan elektroda.

Pada korona positif, elektron sekunder yang berfungsi untuk mempertahankan terjadinya tumbukan berikutnya akan dibangkitkan secara dominan dari aliran elektron tersebut. Pembangkitan tersebut dapat terjadi pada daerah di luar plasma atau di dalam daerah tumbukan. Elektron-elektron sekunder ini diciptakan dari proses ionisasi oleh emisi cahaya pada plasma dengan tingkat de-eksitasi yang beragam. Proses ini terjadi ketika tumbukan elektron telah selesai. Proses ionisasi oleh cahaya akan membebaskan energi termal pada plasma sehingga menciptakan foton yang akan teradiasi ke dalam gas. Elektron yang telah bebas dari molekul udara netral kemudian di tarik kembali menuju konduktor dan juga ditarik ke dalam plasma. Pada saat itulah akan dimulainya proses tumbukan di dalam plasma.

Korona positif dibagi menjadi dua daerah yang terkonsentrasi pada permukaan elektroda yang lancip. Daerah yang pertama yaitu daerah dalam atau daerah plasma, mengandung elektron akibat ionisasi dan ion positif. Daerah ini juga merupakan daerah terbentuknya pasangan ion atau elektron akibat tumbukan elektron yang terjadi di dalamnya. Daerah yang kedua adalah daerah luar atau daerah unipolar yang secara umum banyak mengandung ion positif yang bergerak menuju ke permukaan elektroda yang datar. Pada daerah ini tidak banyak terdapat elektron dikarenakan elektron sekunder yang terbentuk oleh foton dari plasma akan dipercepat kembali menuju plasma tersebut.

#### **2.4.2 KoronaNegatif**

Mekanisme korona negatif lebih kompleks jika dibandingkan dengan korona positif dalam konstruksinya. Korona positif akan diawali dengan proses ionisasi yang beragam dan menghasilkan elektron primer yang diikuti dengan proses tumbukan elektron. Namun pada korona negatif, ionisasi elektron pada

molekul udara yang netral tidak dapat berfungsi dalam mempertahankan proses korona negatif. Hal ini disebabkan karena pergerakan elektron pada korona negatif adalah menjauhi dari elektroda yang tidak datar.

Pada korona negatif, proses yang dominan dalam membangkitkan elektron sekunder adalah dengan efek fotolistrik dan emisi ion positif. Elektron tersebut keluar dari permukaan elektroda karena besar fungsi kerja pada permukaan elektroda lebih kecil jika dibandingkan dengan energi ionisasi yang dihasilkan dari udara pada suhu dan tekanan standar. Sumber energi yang membebaskan elektron adalah energi foton yang berasal dari atom pada badan plasma setelah tereksitasi pada tumbukan sebelumnya. Namun pada korona negatif, ionisasi pada udara yang netral sebagai sumber ionisasi akan semakin berkurang karena konsentrasi yang tinggi dari kumpulan-kumpulan ion positif yang berada di sekitar permukaan elektroda yang tidak datar. Hal inilah yang menyebabkan korona negatif tidak akan bertahan. Untuk mempertahankan korona negatif maka elektron sekunder berasal dari emisi ion positif. Emisi ini terjadi akibat tingginya konsentrasi ion positif pada permukaan elektroda sehingga ion positif akan menabrak permukaan elektroda. Tumbukan ini akan mengakibatkan terlepasnya elektron sekunder yang kemudian bergerak menjauhi elektroda.

Perbedaan mendasar dari korona positif dan negatif adalah sumber elektron sekundernya dan pergerakannya. Dalam korona positif, elektron sekundernya berasal dari udara yang berada di sekeliling daerah plasma. Lalu elektron sekundernya akan bergerak masuk dan mendekati elektroda. Pada korona negatif elektron sekundernya berasal dari elektroda tersebut. Lalu elektron yang keluar dari elektroda tersebut akan bergerak keluar atau menjauhi elektroda.

Struktur lain yang dimiliki oleh korona negatif adalah ion negatif. Ion ini dapat terbentuk akibat pergerakan elektron yang menjauhi elektroda dan menjumpai molekul netral yang memiliki sifat elektronegatif seperti oksigen atau uap air. Kemudian elektron tersebut akan berkombinasi dengan molekul netral dan menghasilkan ion-ion negatif. Ion-ion negatif ini akan ditarik menuju permukaan elektroda yang bersifat positif untuk melengkapi "rangkaiannya". Selain itu molekul

elektronegatif diperlukan oleh korona negatif untuk mempertahankannya. Dengan adanya molekul elektronegatif maka semua elektron bebas yang berada di dekatnya akan ditangkap sehingga tidak terjadinya lompatan listrik.

Korona negatif dapat dibagi menjadi tiga daerah yaitu berada disekitar elektroda yang runcing. Daerah pertama yaitu daerah dalam, daerah yang elektronnya memiliki energi yang tinggi untuk menabrak secara inelastis dengan atom netral dan menyebabkan ionisasi tumbukan. Sementara itu elektron yang terluar dari elektron tersebut akan berkombinasi dengan atom netral menjadi ion negatif. Lalu daerah tengah merupakan tempat berkombinasinya elektron untuk menghasilkan ion negatif, namun elektron tersebut tidak memiliki cukup energi untuk menyebabkan ionisasi. Daerah ini juga termasuk ke dalam bagian plasma yang memiliki polaritas yang berbeda tergantung muatannya yang berada pada daerah tersebut. Akan tetapi daerah ini memiliki kemampuan untuk turut serta dalam reaksi plasma. Daerah terluar merupakan daerah mengalirnya ion negatif. Selain itu daerah tersebut adalah tempat elektron bebas bergerak menuju bagian elektroda yang positif. Daerah dalam merupakan daerah plasma ionisasi, daerah tengah adalah daerah plasma yang tidak berionisasi dan kedua daerah tersebut merupakan bagian dari daerah plasma, sedangkan daerah terluar merupakan daerah muatan tunggal (unipolar).

### **2.5 Efek yang Ditimbulkan Korona**

Timbulnya korona menimbulkan masalah baik bagi lingkungan sekitar maupun bagi performa peralatan listrik. Gangguan terhadap lingkungan berupa suara bising, interferensi radio dan interferensi televisi. Sedangkan bagi peralatan listrik dapat menimbulkan kerusakan pada material dan juga gangguan pada peralatan komunikasi, kontrol dan alat ukur. Bahkan pada kondisi tertentu korona dapat menyebabkan kegagalan isolasi yang bisa menyebabkan terjadinya kebakaran atau ledakan.

Pengalaman pada pengoperasian peralatan dan sistem kelistrikan menunjukkan bahwa korona dapat memperpendek umur peralatan kelistrikan.

**Universitas Indonesia**

Oleh karena itu, timbulnya korona bisa menjadi salah satu penyebab kerugian ekonomi yang serius. Hal ini dikarenakan korona bisa menyebabkan keharusan untuk memperbaiki dan mengganti peralatan listrik secara prematur, menurunkan faktor keselamatan dan efisiensi pada saat pengoperasian, dan juga bisa mengakibatkan terjadinya interupsi pada proses produksi yang pada akhirnya akan menyebabkan kerugian yang besar.

### **2.5.1 Efek korona Pada Lingkungan Sekitar**

Belakangan ini masyarakat dunia mulai mengkhawatirkan permasalahan lingkungan yang timbul akibat penggunaan tegangan tinggi oleh perusahaan listrik. Masyarakat menganggap penggunaan tegangan tinggi bisa mengganggu lingkungan sekitar dalam bentuk suara bising dan interferensi radio serta televisi.

#### **2.5.1.1 Cahaya Tampak**

Salah satu bentuk tahapan yang terjadi pada proses korona adalah tampaknya cahaya pada disekitar permukaan penghantar. Cahaya yang berwarna ungu muda ini berasal dari pengaruh tekanan yang berlebihan dari medan listrik. Cahaya ini hanya dapat dilihat pada kondisi yang gelap. Seperti yang telah disebutkan di atas bahwa cahaya ini berasal dari proses rekombinasi antara ion nitrogen dengan elektron bebas.

Korona dalam bentuk cahaya dibagi menjadi tiga buah jenis yaitu pelepasan berbentuk plum, pelepasan berbentuk sikat, dan pelepasan berbentuk pemancaran. Ketiga jenis ini terjadi pada permukaan kawat tegangan tinggi. pelepasan berbentuk plum dan pelepasan berbentuk sikat merupakan jenis cahaya yang muncul akibat polaritas korona yang terjadi. Pelepasan berbentuk plum terjadi pada setengah siklus positif sehingga ion positif membentuk ruang muatan positif sedangkan untuk pelepasan bentuk sikat pada setengah siklus negatif yang membuat kuat medan listrik semakin tinggi sehingga tumbukan antara elektron bebas dengan molekul semakin banyak dan hal ini menyebabkan melebarnya

ruang muatan negatif. Sedangkan pada pelepasan berbentuk pemancar tidak dihasilkan bunyi apapun, tidak seperti kedua lainnya.

### **2.5.1.2 Interferensi Radio dan Televisi**

Sinyal noise pada jalur komunikasi baik itu radio maupun televisi merupakan efek radiasi dari emisi energi yang dihasilkan oleh proses korona. Mekanisme interferensi saluran komunikasi ini diawali dengan adanya tumbukan-tumbukan yang diakibatkan oleh pergerakan elektron. Aliran arus tersebut akan menghasilkan medan magnet dan medan elektrostatis di sekitar pergerakannya. Karena kedua medan terjadi dalam waktu singkat maka keduanya memiliki frekuensi yang tinggi. Hal ini menyebabkan medan tersebut dapat menginduksi pulsa tegangan di dekat antena radio dan kemudian menghasilkan interferensi radio..

Tidak hanya dipengaruhi oleh level korona yang terjadi, interferensi radion ini juga bergantung pada unsur lain seperti tipe dari radio penerima dan tipe dari antenanya. Selain itu, interferensi juga dipengaruhi oleh polaritas. Pada korona positif akan menghasilkan interferensi radio sepuluh kali lebih besar jika dibandingkan pada korona negatif. Jenis modulasi dari gelombang radio juga berperan dalam proses interferensi. Untuk AM pengaruhnya akan terasa lebih bila dibandingkan dengan FM karena frekuensi yang dapat memodulasi nilainya lebih rendah dan memungkinkan untuk dihasilkan dari proses korona.

### **2.5.1.3 Gangguan Bising**

Pendeteksian korona lainnya adalah melalui bunyi-bunyi yang terjadi disekitar penghantar. Bunyi yang timbul ini dapat didengar langsung oleh manusia yang intensitasnya bergantung dari besar frekuensi yang dibangkitkannya. Bunyi yang biasa disebut dengan *acoustical noise* atau gangguan bising dapat diukur dengan satuan dB. Besar dB yang dihasilkan di sepanjang kawat konduktor dipengaruhi oleh konduktor yang digunakan dan juga

kondisi cuaca disekitar konduktor. Pengaruh akibat gradien tegangan merupakan faktor yang paling penting dalam menghitung besarnya level daya dari gangguan bising.

### **2.5.2 Efek Korona Pada Performa Peralatan Listrik**

Pada bahan isolasi, korona menyebabkan terjadinya transfer elektron dan lompatan-lompatan listrik di tempat yang seharusnya tidak boleh terjadi hal-hal tersebut. Dengan adanya kejadian ini akan menyebabkan adanya energi yang hilang. Pada saat yang sama, akibat adanya korona ini akan menyebabkan timbulnya panas di sekitar daerah terjadinya korona. Sedangkan pada bagian lain bahan isolasi, korona akan menghasilkan arus transien yang dapat mengalir ke peralatan yang terhubung dengan bahan isolasi tersebut. Menurut statistik IEEE, kegagalan isolasi merupakan penyebab utama terjadinya kerusakan pada sistem dan peralatan kelistrikan.

Secara garis besar korona memiliki dua efek yang sangat penting secara ekonomis karena dapat menyebabkan naiknya biaya operasional dan perawatan dari peralatan listrik. Efek yang pertama adalah korona dapat mengurangi usia pakai dari bahan isolasi yang digunakan. Sedangkan efek yang kedua adalah kemungkinan terjadinya arus transien yang dapat mengganggu aktivitas kerja dari peralatan komunikasi, kontrol dan alat ukur.

#### **2.5.2.1 Efek Korona Pada Material Listrik**

Pada proses korona terjadi formasi tumbukan elektron (*electron avalanche*) apabila tegangan yang diterapkannya telah melampaui besar dari nilai kritisnya. Bila hal ini dikombinasikan dengan panas yang ditimbulkan oleh korona maka dapat menyebabkan pengikisan pada material, mengganggu atau bahkan merubah susunan atom atau molekul dari material, sehingga bisa saja terbentuk material dengan susunan atom atau molekul yang baru.

Akibat adanya perubahan pada susunan atom atau molekul pada material listrik dapat menyebabkan perubahan sifat-sifat kimia dari material listrik tersebut. Misalnya jika sebelumnya material tersebut merupakan bahan yang tidak mudah berkarat, kini bisa menjadi mudah berkarat.

### 2.5.2.2 Efek Korona Pada Peralatan Komunikasi, Kontrol Dan Alat Ukur

Akibat terjadinya korona pada suatu material, dapat menimbulkan arus transien. Arus transien ini mungkin saja dapat mengalir ke peralatan elektronik yang berada di sekitar daerah terjadinya korona. Arus transien yang dihasilkan oleh korona mempunyai sifat sebagai berikut: memiliki *rise time* yang sangat singkat dan frekuensi pengulangan yang sangat tinggi. Selain itu arus transien ini juga memiliki amplitudo yang cukup untuk meniru, mengganggu, memalsukan atau mengakhiri suatu sinyal elektrik. Biasanya peralatan komunikasi, kontrol dan alat ukur menggunakan sinyal-sinyal elektrik saat pengoperasiannya, sehingga dengan adanya korona sinyal-sinyal yang terdapat pada peralatan tersebut bisa menjadi rusak atau memberikan informasi yang salah.

## B. Distorsi Harmonisa Gelombang Arus dan Tegangan

### 2.6 Pengertian Harmonisa

Distorsi gelombang (berdasarkan IEC 702-07-43) adalah perubahan bentuk sebuah sinyal yang tidak disengaja dan umumnya tidak disadari dengan referensi sinyal fundamental 50 Hz. Distorsi gelombang yang utama antara lain harmonisa, interharmonisa dan komponen DC <sup>[7]</sup>.

Pada pembahasan skripsi ini, jenis distorsi yang akan dibahas lebih detail hanya yang harmonisa. Secara pengertian harmonisa adalah gelombang yang mempunyai frekuensi kelipatan bilangan asli terhadap frekuensi dasar. Persamaan frekuensi harmonisa adalah :

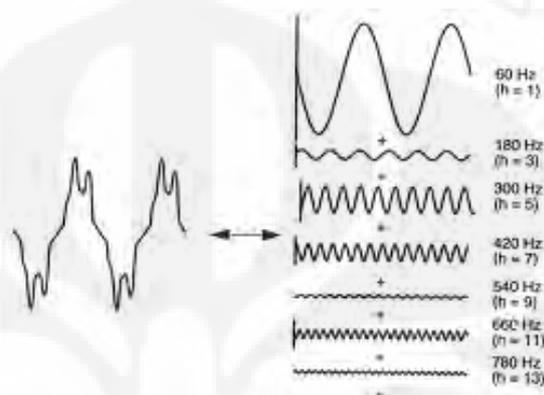
$$h = n \times F \text{ Hz} \quad (2.27)$$

Universitas Indonesia

dengan :

- $h$  : frekuensi harmonisa orde ke- $n$
- $F$  : frekuensi fundamental sistem (50 Hz atau 60 Hz)
- $n$  : orde harmonisa

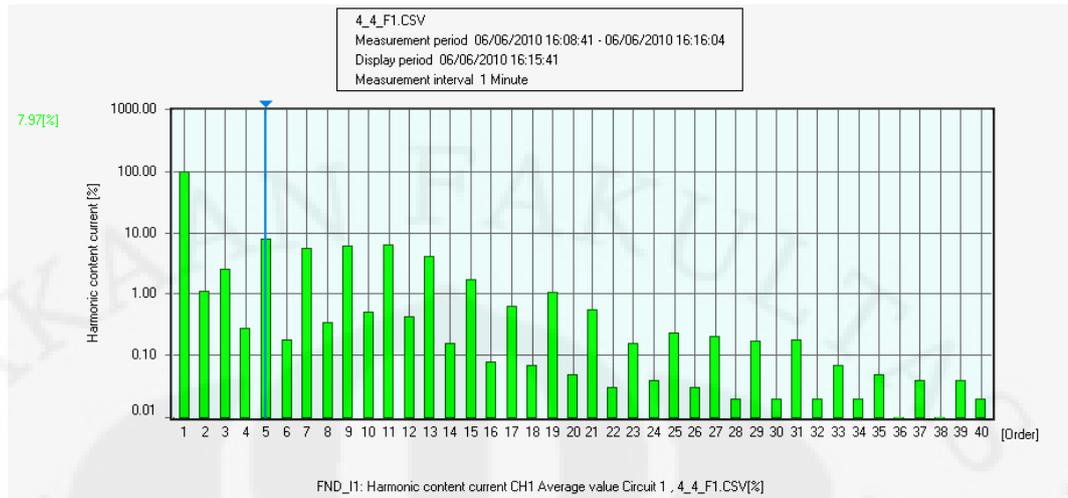
atau bila dinyatakan dalam grafik, gelombang harmonisa adalah sebagai berikut:



Gambar 2.6 Proses Pembentukan Gelombang Harmonisa dengan  $f_o = 60 \text{ Hz}$  <sup>[5]</sup>

Gelombang terdistorsi merupakan hasil penggabungan gelombang fundamental dengan beberapa gelombang harmonisa lainnya yang juga berbentuk sinusoidal. Besar amplitudo gelombang harmonisa bernilai beberapa persen dari amplitudo gelombang fundamental.

Spektrum harmonisa adalah distribusi semua amplitudo komponen harmonisa sebagai fungsi dari orde harmonisanya dan dapat diilustrasikan dengan menggunakan histogram. Gambar di bawah merupakan contoh spektrum harmonisa. Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa spektrum merupakan perbandingan arus atau tegangan frekuensi harmonisa terhadap arus atau tegangan frekuensi dasar.



Gambar 2.7 Spektrum Harmonisa

Ada metode lain yang dapat digunakan dalam menjelaskan gelombang harmonisa, yaitu dengan menggunakan analisis Fourier. Gelombang periodik yang tidak berbentuk sinusoidal dapat dinyatakan sebagai jumlah seri harmonisa frekuensi dasar yang dinyatakan dengan analisis Fourier sebagai berikut <sup>[6]</sup> :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (2.28)$$

dengan :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_0 t dt \quad n = \text{indeks harmonisa}$$

Persamaan Fourier tersebut dapat digunakan untuk memecah gelombang yang telah terdistorsi menjadi gelombang dasar dan gelombang harmonisa. Hal ini menjadi dasar dalam menganalisis harmonisa pada sistem tenaga listrik.

Sebaliknya jika kita mengetahui nilai amplitudo tegangan atau arus tiap orde, maka dapat diperoleh tegangan atau arus total sebagai berikut :

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_1 \quad \text{dan} \quad I_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_1$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} V_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{\max}}^2} \quad (2.29)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{\max}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} I_h \right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{\max}}^2} \quad (2.30)$$

## 2.7 Total Harmonisa Distortion

Ada dua istilah yang sering digunakan dalam mengukur persentase harmonisa pada suatu gelombang, yaitu *total harmonic distortion (THD)* dan *total demand distortion*. Dua parameter tersebut menunjukkan nilai efektif dari suatu gelombang baik objeknya berbentuk arus maupun tegangan.

Distorsi Harmonisa Total atau THD (*Total Harmonic Distortion*) menyatakan tingkat distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonisa atau nilai efektif dari komponen-komponen harmonisa pada suatu gelombang yang terdistorsi. Nilai ini dapat dihitung baik untuk tegangan maupun arus dan besarnya didefinisikan sebagai berikut :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}}{M_1} \quad (2.31)$$

dengan :

$THD$  = Total Harmonic Distortion

$M_n$  = Nilai RMS arus atau tegangan pada frekuensi ke-n

$M_1$  = Nilai RMS arus atau tegangan pada frekuensi dasar

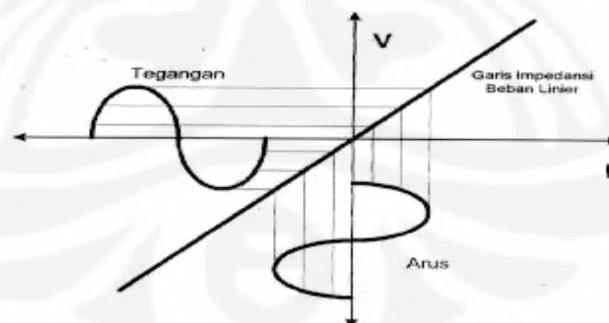
Nilai THD sering kali digunakan untuk menggambarkan distorsi harmonisa pada tegangan. Tegangan harmonisa hampir selalu dibandingkan terhadap nilai dasar dari gelombang pada saat dilakukan sampling. Nilai THD tegangan hampir selalu memiliki angka yang berarti karena nilai tegangan pada frekuensi dasar biasanya hanya berubah sedikit sekali [7].

Untuk memudahkan analisis harmonisa pada sistem tenaga listrik, komponen harmonisa dapat dibagi ke dalam tiga komponen simetris. Pembagian tersebut didasarkan pada orde masing-masing sebagai berikut :

1. Harmonisa urutan positif, terdiri dari harmonisa orde 1, 7, 13,.....
2. Harmonisa urutan negatif, terdiri dari harmonisa orde 5, 11, 17,.....
3. Harmonisa urutan nol, terdiri dari harmonisa orde 3, 9, 15,....

## 2.8 Sumber Harmonisa

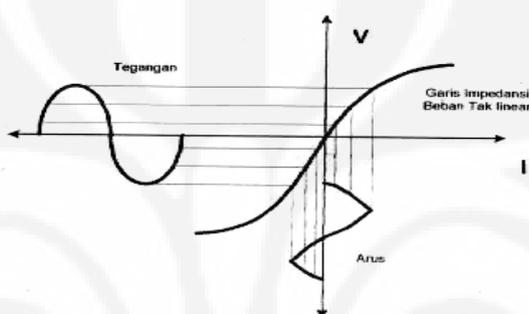
Pada sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban linier dan beban non linier. Arus yang mengalir pada beban linier sebanding dengan perubahan tegangan sebagaimana terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.8 Karakteristik gelombang arus pada beban linier [5]

Sebaliknya, pada beban non-linier, bentuk gelombang arus tidak sebanding dengan bentuk tegangan dasar setiap setengah siklus. Beban non-linier umumnya merupakan komponen semikonduktor yang pada proses kerjanya berlaku sebagai

saklar yang bekerja pada setiap setengah siklus gelombang atau beban yang membutuhkan arus yang tidak tetap pada setiap periode waktunya. Beban-beban seperti pengontrol motor listrik, *ballast* lampu TL, transformator, dan peralatan elektronika daya lainnya merupakan jenis beban non-linier. Proses kerja ini akan menghasilkan gangguan/distorsi gelombang arus yang tidak sinusoidal. Bentuk gelombang ini tidak menentu dan dapat berubah menurut pengaturan pada parameter beban-beban non-linier yang terpasang. Perubahan bentuk gelombang ini tidak berkaitan dengan sumber tegangannya.



Gambar 2.9 Karakteristik gelombang arus pada beban non linier [5]

Berdasarkan jenis peralatannya, sumber harmonisa dapat dibagi menjadi dua kategori, yaitu [7] : peralatan yang mengalami saturasi dan peralatan elektronika daya. Pada peralatan yang mengalami saturasi, harmonisa disebabkan oleh inti besi yang mengalami saturasi. Contohnya adalah transformator dan motor listrik. Sedangkan harmonisa pada peralatan elektronika daya antara lain disebabkan oleh *switch-mode power supplies*, lampu *flourescent* (dengan *ballast* elektronik), *voltage source converters*, *pulse-width modulated converters*, dan sebagainya.

Tidak hanya itu, sumber harmonisa lainnya juga berupa beban komersial dan beban industri [5]. Yang tergolong kedalam jenis beban komersial antara lain adalah *Single-phase power supplies*, Lampu penerangan *flourescent* (dengan ballast elektronik), *Adjustable-Speed Drives (ASD)* untuk HVAC dan elevator. Disisi lain, yang termasuk kategori beban industry *Three-phase power converter*, *Arcing Devices* dan *Saturable device*.

## 2.9 Dampak Harmonisa

Efek yang ditimbulkan oleh harmonisa dalam hal ini harmonisa arus pada sistem tenaga listrik dapat berakibat serius, hal ini dikarenakan kenaikan yang terjadi pada arus yang mengalir pada sistem. Dengan kata lain, arus harmonisa tidaklah mengandung daya, keberadaannya hanyalah mengurangi jumlah load yang dapat diberikan daya <sup>[8]</sup>. Pada kenyataannya, arus harmonisa ini dapat mengakibatkan peralatan listrik menjadi rusak, distorsi data, kerusakan isolasi motor dan trafo, panas berlebih pada bus netral, trip pada *circuit breaker*, serta kerusakan lainnya. Untuk lebih jelasnya efek tersebut dibagi menjadi beberapa kategori <sup>[5]</sup> :

Efek Negatif Jangka Pendek yang antara lain terdiri dari:

1. Menyebabkan kesalahan pada alat ukur listrik yang menggunakan prinsip induksi magnetik.
2. Mengganggu kontrol yang digunakan pada sistem elektronika.
3. Mengganggu alat-alat proteksi dalam sistem tenaga listrik seperti relay.
4. Mengganggu saluran komunikasi yang dekat dengan sistem tenaga listrik.
5. Menyebabkan getaran dan suara pada mesin-mesin berputar seperti generator dan motor.

Efek Negatif Jangka Panjang:

1. Menimbulkan pemanasan lebih pada kapasitor
2. Menimbulkan pemanasan lebih dan rugi daya pada motor listrik.
3. Meningkatkan pemanasan lebih dan rugi daya pada transformator.
4. Meningkatkan pemanasan pada kabel dan peralatan lainnya.

## **BAB 3**

### **METODE DAN PROSEDUR PENGUJIAN**

#### **3.1 Metode Pengujian**

Dalam rangka mengetahui pengaruh yang dihasilkan korona terhadap besar perubahan distorsi harmonisa gelombang arus maupun tegangan sumber listrik AC maka dilakukan pengujian dengan membangkitkan tegangan tinggi di dalam kubikel model. Penggunaan tegangan tinggi bermaksud untuk menimbulkan proses ionisasi di dalam kubikel model yang selanjutnya akan menyebabkan timbulnya korona hingga terjadi *breakdown* isolasi udara.

Ketika korona pertama kali terdeteksi, dengan indikasi suara bising yang ditimbulkan oleh korona, besar tegangan pada sumber dicatat untuk dianalisis hubungannya dengan harmonisa yang terjadi pada gelombang. Pengujian dilakukan dengan tiga tahap menggunakan tiga penghantar dengan diameter yang berbeda yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh jarak penghantar serta besar diameter penghantar terhadap nilai harmonisa gelombang sumber baik itu arus maupun tegangan. Pengujian dilakukan pada Laboratorium Tegangan Tinggi Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

#### **3.2 Peralatan Pengujian**

Peralatan-peralatan yang digunakan dalam pengujian korona dan kegagalan udara pada kubikel model ini adalah sebagai berikut:

1. Satu buah Trafo Penguji 100 kV/10 kVA (TEO 100/10)
2. Satu buah *Support Insulator*
3. Satu buah *Measuring Capacitor* 100 kV, 100 pF
4. Satu buah *Grounding Switch*
5. Kawat penghantar dengan diameter 4 mm, 8 mm, dan 15 mm
6. Kubikel model
7. Satu set unit pengendali DMI 551 dan OT 275

8. Satu set unit pengukur kualitas daya (HIOKI)



Gambar 3.1 Power Quality Meter

9. Satu unit oscilloscope
10. Satu unit multimeter
11. Satu unit humidity dan temperature meter
12. Komputer jenis PC
13. Microsoft Office Excel 2007
14. Supprot Software Power Measurement 9625 (Interface HIOKI 9625 dengan PC)

### 3.3 Prosedur Pengujian

Proses pengujian dilakukan terhadap penghantar dalam model kubikel dengan tiga besar diameter yang berbeda. Variasi diameter yang digunakan pada pengujian kali ini adalah penghantar dengan diameter 4 mm, 8 mm dan 15 mm. pengujian yang dilakukan pada masing-masing penghantar dalam model kubikel ini dilakukan sebanyak 3 kali, dimana masing-masing penghantar dalam kubikel dilakukan 4 variasi jarak yakni untuk jarak 4 cm, 6 cm, 8 cm, dan 10 cm terhadap dinding kubikel. Oleh karena itu total pengujian yang dilakukan pada penelitian kali ini sebanyak 36 kali pengujian.

Jenis penghantar yang digunakan untuk diameter 4 mm adalah tembaga sedangkan untuk 8 mm dan 15 mm adalah baja.



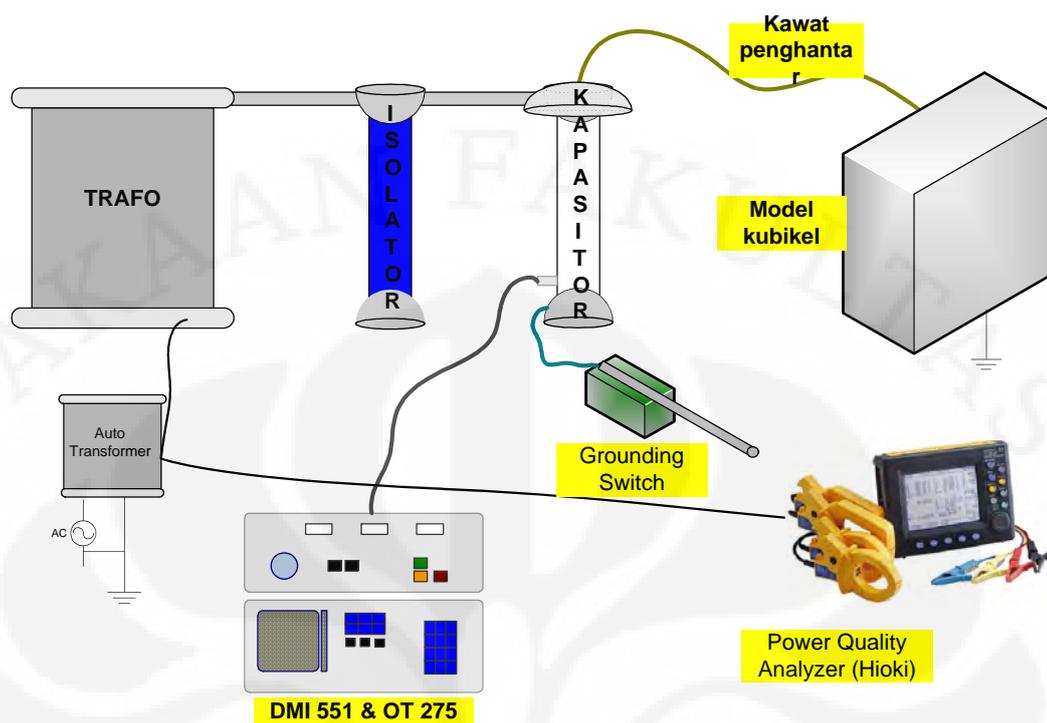
Gambar 3.2 Penghantar dalam Kubikel Model

### 3.3.1 Persiapan awal

Ada beberapa persiapan awal yang telah dilakukan terlebih dulu sebelum melakukan pengujian. Beberapa persiapan tersebut antara lain:

1. Menyediakan model kubikel  
Kubikel yang digunakan berbentuk balok dengan ukuran 1,5 x 0,6 m yang permukaan depannya berbahan kaca untuk memudahkan proses observasi dan disamping kirinya terdapat lubang sebagai jalur bagi penghantar menuju model kubikel.
2. Mencari penghantar dengan beda ukuran diameter
3. Melapisi penghantar dengan isolasi yang kuat untuk mencegah terjadinya korona pada sisi lubang kubikel.
4. Mempersiapkan rangkaian pengujian

Rangkaian pengujian dirangkai seperti pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Rangkaian pengujian

### 3.3.2 Jalannya Pengujian

Setelah persiapan awal pengujian telah selesai dilakukan, langkah selanjutnya yang kami lakukan adalah melakukan pengujian. Adapun langkah-langkah yang kami lakukan selama proses pengujian adalah sebagai berikut:

1. Kubikel yang akan digunakan sebagai tempat pengujian ditempatkan pada lokasi yang telah disediakan.
2. Memastikan semua rangkaian pengujian sudah terkoneksi dengan benar dan tidak lupa memastikan sistem pentanahan bekerja dengan baik.
3. Memasang kawat penghantar untuk pengujian pertama dan mengatur jarak penghantar dengan bodi model kubikel.
4. Menghidupkan peralatan pengukur (DMI 551) dan pengendali (OT 275).
5. Mencatat suhu dan kelembaban awal di dalam kubikel sebelum proses pengujian dilakukan.

6. Melakukan pengujian awal untuk mendapatkan nilai tegangan awal korona dan tegangan gagal untuk setiap pengujiannya untuk mendapatkan data awal yang digunakan sebagai nilai acuan dalam pengujian.
7. Menaikkan tegangan secara perlahan hingga 10 kV kemudian secara konstan menaikkan dengan rata-rata kenaikan 2-5 kV per menit dan mulai melakukan observasi, pencatatan dan perekaman data hasil pengujian dengan alat ukur hioki
8. Ketika mendekati nilai tegangan kritis *dicharge*, rata-rata kenaikan nilai tegangan diperkecil guna mendapatkan nilai THD pada saat tegangan kritis.
9. Setelah terjadi proses *discharge* pada penghantar, tegangan pada sisi primer segera diturunkan guna menghindari kerusakan pada alat.
10. Semua circuit breaker di-open dan peralatan pengujian terutama kapasitor segera di-ground-kan guna membuang sisa-sisa muatan listrik yang terdapat pada kapasitor.
11. Setelah di-ground-kan, suhu serta humiditas udara di dalam model kubikel kembali dicatat.
12. Setelah satu pengujian selesai dilakukan, kemudian cover pada dinding kubikel dibuka lebar untuk membuang pengaruh karbon dan mengganti udara di dalam kubikel dengan udara disekitar dengan tujuan agar sisa-sisa muatan dari pengujian sebelumnya benar-benar habis.
13. Pengujian kembali dilakukan dengan memvariasikan jarak penghantar kepada model kubikel sebanyak 4 kali (4cm, 6cm, 8cm, dan 10 cm) dan mengganti penghantar dengan penghantar lainnya yang berbeda diameter (4mm, 8 mm dan 15 mm).

## **BAB 4**

### **HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS**

#### **4.1 Hasil Pengujian**

Berdasarkan pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan karakteristik pengaruh korona terhadap distorsi harmonisa gelombang, didapatkan data berupa nilai distorsi harmonisa baik untuk gelombang arus maupun tegangan sumber listrik AC pada model kubikel. Data nilai harmonisa ini didapatkan dari hasil rekaman alat power quality meter yang digunakan, yaitu HIOKI. Hasil rekaman ini kemudian dibaca dengan menggunakan software interface *9625 Power Measurement Support Software* yang kemudian diolah dengan menggunakan microsoft excel untuk mendapatkan nilai rata-rata dari masing-masing pengujian. Pengujian ini dilakukan dengan dua variabel yaitu jarak (4cm, 6cm, 8cm dan 10 cm) dan diameter penghantar (4mm, 8mm, dan 10mm).

Setiap pengujian dilakukan 7 kali sampling yang intervalnya ditentukan oleh nilai tegangan dimulainya korona dan tegangan gagal isolasi udara (breakdown voltage) pada kondisi tekanan dan temperature normal. Sampling dilakukan permenitnya yang dimulai pada nilai tegangan sumber sebesar 10 kV atau ekuivalen dengan 23 V hingga mencapai tegangan gagalnya. Nilai tegangan dimulainya korona dan kegagalan isolasi udara ini besarnya relatif. Akan naik nilainya seiring dengan pertambahan jarak pisah antara elektroda dengan dinding kubikel dan juga besar diameter penghantar.

Pengolahan data ini difokuskan pada gelombang sumber baik arus maupun tegangan AC yang memiliki kontribusi besar pada terjadinya distorsi harmonisa. Berdasarkan hasil yang didapat, untuk pengolahan data gelombang tegangan, proses pengolahan difokuskan pada gelombang dengan orde 3, 5, 7, dan 9 atau dengan frekuensi 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz dan 450 Hz. Sedangkan untuk gelombang arus fokus dari pengolahan data adalah pada gelombang dengan frekuensi 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, 450 Hz dan 550 Hz.

Secara umum dengan adanya kenaikan besar tegangan, nilai harmonisa dari masing-masing gelombang pun ikut naik. Namun kenaikan ini semakin tinggi

perubahannya seiring dengan terjadinya korona. Pengaruh korona ini lebih dalam akan dibahas pada bagian analisis data.

#### 4.1.1 Hasil Pengujian dengan Diameter 4 mm

##### 4.1.1.1 Jarak 4cm

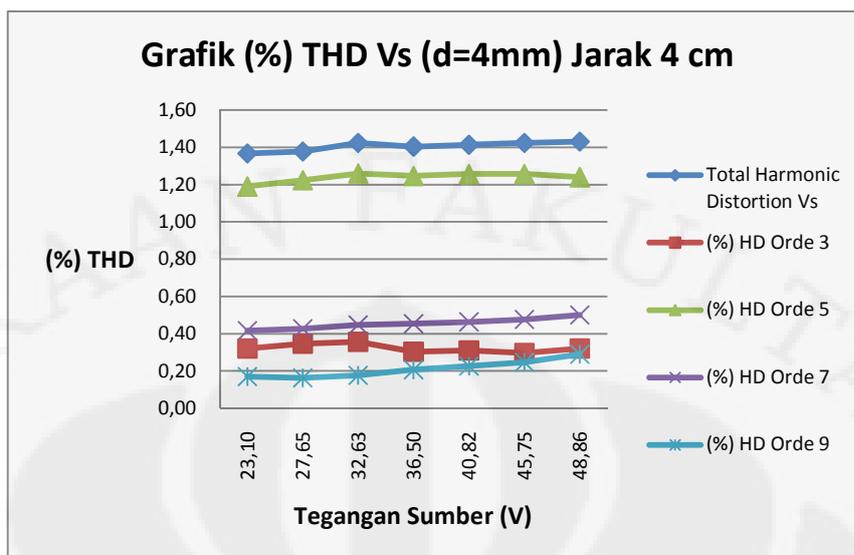
Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 4 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 4 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 32,63 V atau sebanding dengan 14,48 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 45,75 V atau setara dengan 20,71 kV.

Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber yang terjadi saat korona sebelum terjadi korona sebesar 0,01 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 1,59 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,11% untuk  $V_s$  dan 2,39% untuk  $I_s$ .

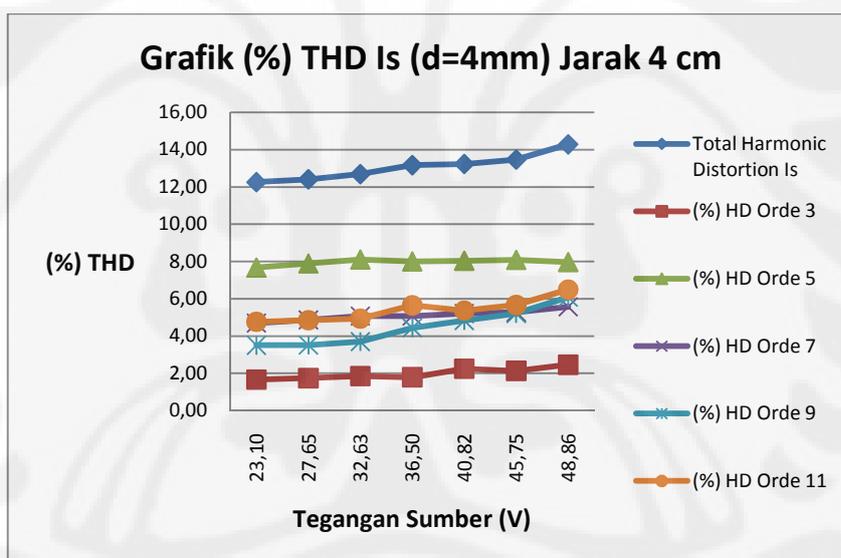
Ket: Untuk huruf yang italic pada tabel menandakan sudah dimulainya gejala korona

Tabel 4.1 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 4cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 4cm													
$V_s$ (kV)	$V_s$ (V)	THD $V_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	$I_s$ (A)	THD $I_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,46	23,10	1,37	0,32	1,19	0,42	0,17	0,53	12,26	1,66	7,67	4,70	3,51	4,77
12,48	27,65	1,38	0,35	1,22	0,43	0,16	0,64	12,41	1,74	7,90	4,86	3,51	4,85
14,82	32,63	1,42	0,36	1,26	0,45	0,18	0,76	12,69	1,85	8,11	5,07	3,70	4,93
16,50	36,50	1,40	0,30	1,25	0,45	0,21	0,85	13,17	1,79	8,01	5,08	4,44	5,65
18,58	40,82	1,41	0,31	1,26	0,46	0,23	0,95	13,23	2,24	8,04	5,21	4,84	5,37
20,71	45,75	1,42	0,30	1,26	0,48	0,25	1,07	13,47	2,13	8,09	5,28	5,21	5,66
22,28	48,86	1,43	0,32	1,24	0,50	0,29	1,15	14,28	2,46	7,97	5,57	6,09	6,49



Gambar 4.1 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 4mm dan r 4 cm



Gambar 4.2 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 4mm dan r 4 cm

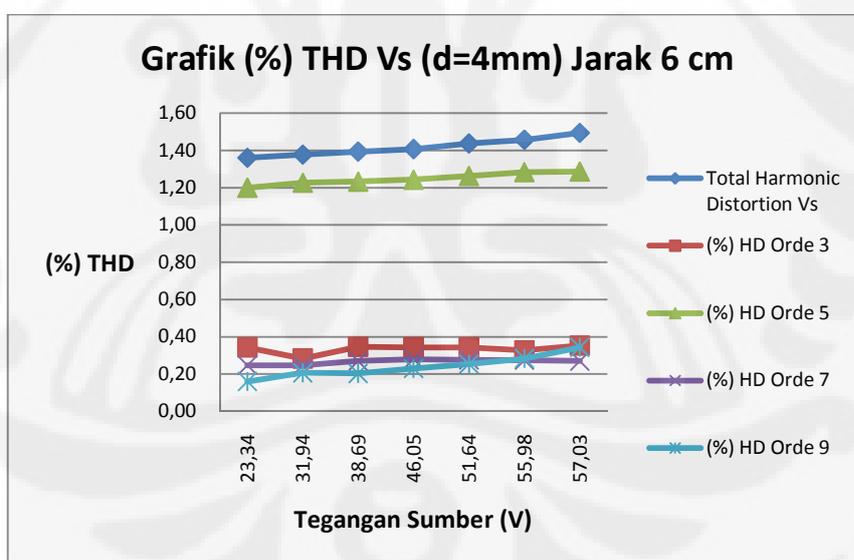
#### 4.1.1.2 Jarak 6cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 4 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 6 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 55,98 V atau sebanding dengan 25,26 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 57,03 V atau setara dengan 27,17 kV.

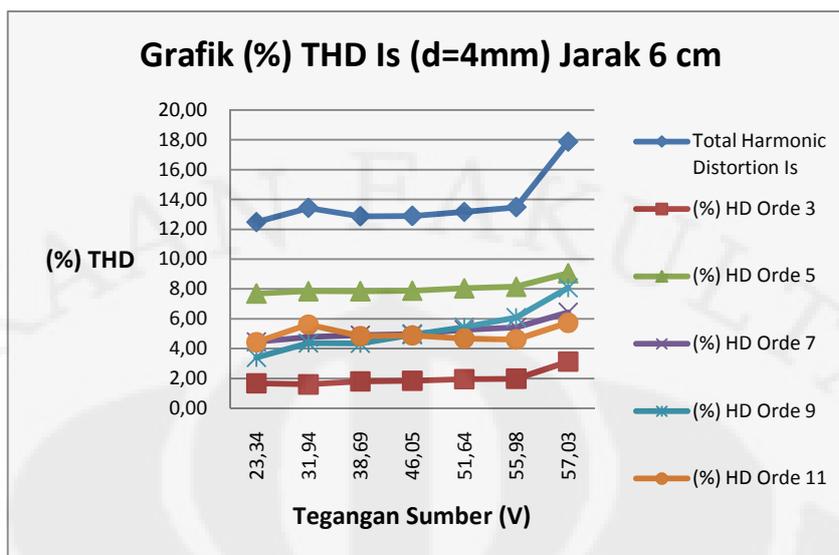
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,04 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 4,39 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,06% untuk  $V_s$  dan 1,99% untuk  $I_s$ .

Tabel 4.2 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4 mm dan r 6 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 6cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,52	23,34	1,36	0,34	1,20	0,39	0,16	0,53	12,48	1,68	7,70	4,46	3,42	4,43
14,63	31,94	1,38	0,28	1,23	0,43	0,21	0,74	13,44	1,60	7,85	4,77	4,38	5,61
17,62	38,69	1,39	0,35	1,23	0,44	0,20	3,60	12,87	1,79	7,85	4,90	4,36	4,84
20,87	46,05	1,41	0,34	1,24	0,45	0,23	1,08	12,89	1,85	7,88	4,98	4,94	4,89
23,57	51,64	1,44	0,34	1,26	0,48	0,25	1,21	13,16	1,94	8,04	5,26	5,44	4,68
25,26	55,98	1,46	0,33	1,28	0,49	0,28	1,32	13,48	1,98	8,15	5,41	6,08	4,61
27,17	57,03	1,49	0,35	1,29	0,51	0,34	1,41	17,87	3,12	9,05	6,43	8,07	5,73



Gambar 4.3 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 4mm dan r 6 cm



Gambar 4.4 Grafik (%) THD  $I_{sumber}$  dengan d 4mm dan r 6 cm

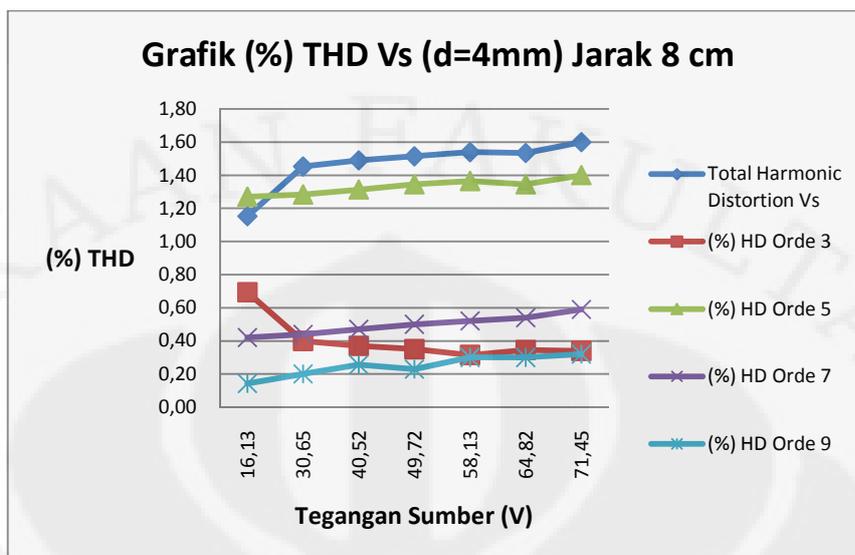
#### 4.1.1.3 Jarak 8cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 4 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 8 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 58,13 V atau sebanding dengan 26,49 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 64,82 V atau setara dengan 29,52 kV.

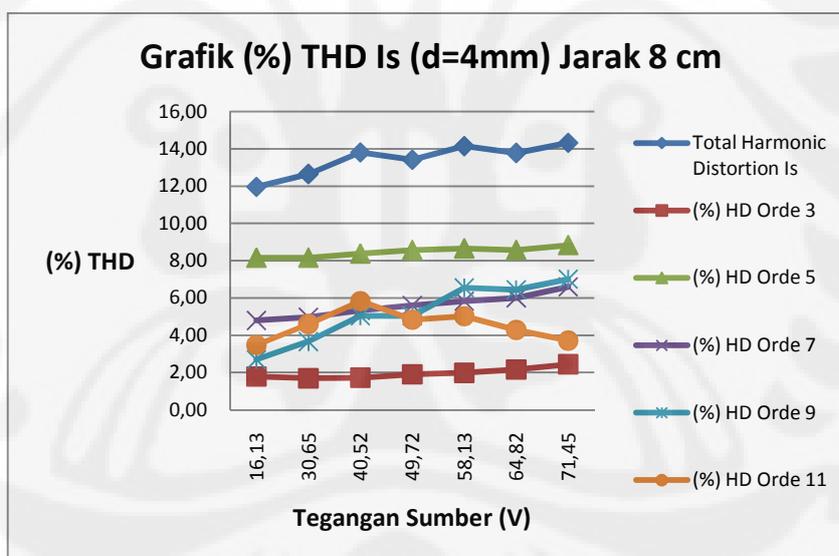
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,06 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 0,18 %. Namun pada orde ke tujuh ( $f = 350$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,07% untuk  $V_s$  dan 0,78% untuk  $I_s$ .

Tabel 4.3 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4 mm dan r 8 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 8cm													
$V_s$ (kV)	$V_s$ (V)	THD $V_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	$I_s$ (A)	THD $I_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,56	23,33	1,46	0,46	1,27	0,42	0,14	0,54	11,96	1,78	8,15	4,79	2,69	3,48
14,12	30,65	1,45	0,40	1,28	0,44	0,20	0,72	12,65	1,69	8,16	4,97	3,66	4,60
18,37	40,52	1,49	0,37	1,31	0,47	0,26	0,95	13,81	1,72	8,38	5,33	5,04	5,83
22,62	49,72	1,52	0,35	1,35	0,50	0,23	1,18	13,42	1,90	8,57	5,61	5,04	4,84
26,49	58,13	1,54	0,32	1,37	0,52	0,30	1,38	14,15	1,98	8,66	5,83	6,55	5,02
29,52	64,82	1,54	0,35	1,35	0,54	0,30	1,54	13,78	2,16	8,58	6,00	6,44	4,29
32,48	71,45	1,60	0,34	1,40	0,59	0,32	1,69	14,32	2,44	8,83	6,60	7,01	3,71



Gambar 4.5 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan  $d$  4mm dan  $r$  8 cm



Gambar 4.6 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan  $d$  4mm dan  $r$  8 cm

#### 4.1.1.4 Jarak 10cm

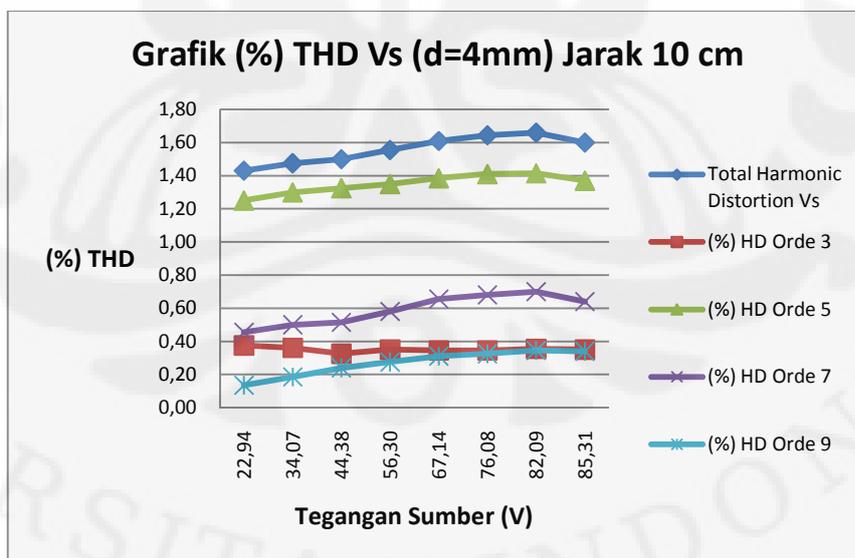
Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 4 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 10 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 67,14 V atau sebanding

dengan 30,66 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 76,08 V atau setara dengan 34,46 kV.

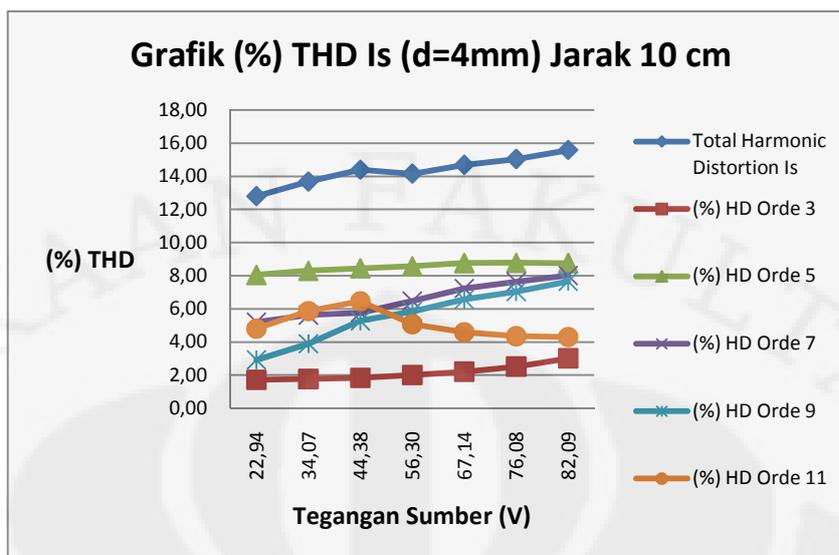
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,05 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 0,90 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,04% untuk  $V_s$  dan 1,09% untuk  $I_s$ .

Tabel 4.4 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4 mm dan r 10 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 4mm dan r 10cm													
$V_s$ (kV)	$V_s$ (V)	THD $V_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	$I_s$ (A)	THD $I_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,34	22,94	1,43	0,38	1,25	0,46	0,14	0,53	12,80	1,71	8,05	5,21	2,92	4,80
15,61	34,07	1,48	0,36	1,30	0,50	0,19	0,79	13,68	1,77	8,30	5,62	3,90	5,87
20,29	44,38	1,50	0,33	1,33	0,52	0,24	1,04	14,39	1,84	8,45	5,76	5,28	6,46
25,57	56,30	1,56	0,35	1,35	0,58	0,28	1,33	14,16	2,01	8,58	6,48	5,85	5,08
30,66	67,14	1,61	0,35	1,39	0,66	0,31	1,60	14,69	2,21	8,77	7,23	6,57	4,59
34,46	76,08	1,65	0,35	1,41	0,68	0,33	1,82	15,04	2,52	8,78	7,64	7,04	4,35
37,78	82,09	1,66	0,36	1,42	0,70	0,35	1,96	15,58	3,02	8,76	8,01	7,66	4,30
39,09	85,31	1,60	0,35	1,37	0,64	0,34	2,04	15,06	3,15	8,55	7,31	7,56	4,16



Gambar 4.7 Grafik (%) THD  $V_{sumber}$  dengan d 4mm dan r 10 cm



Gambar 4.8 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 4mm dan r 10 cm

## 4.1.2 Hasil Pengujian dengan Diameter 8 mm

### 4.1.2.1 Jarak 4cm

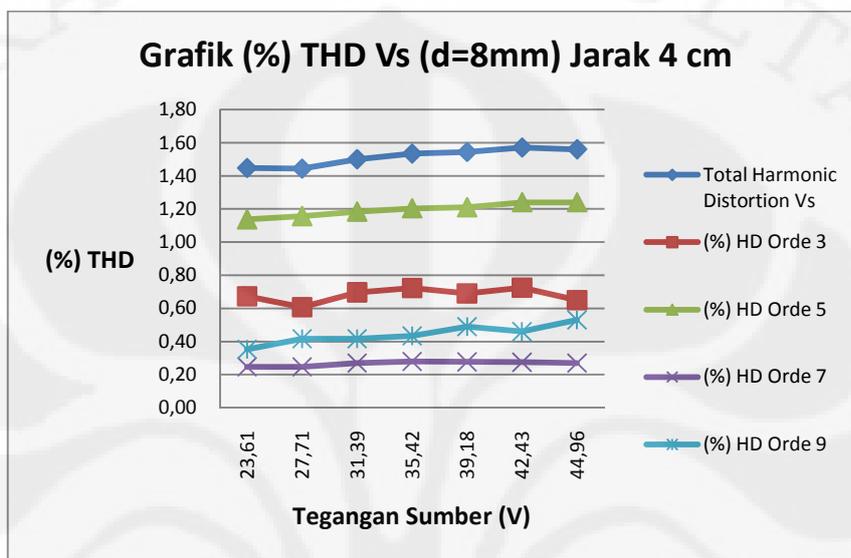
Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 8 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 4 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 31,39 V atau sebanding dengan 14,09 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 44,96 V atau setara dengan 20,82 kV.

Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,06 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 1,70 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,11% untuk  $V_s$  dan 2,44% untuk  $I_s$ .

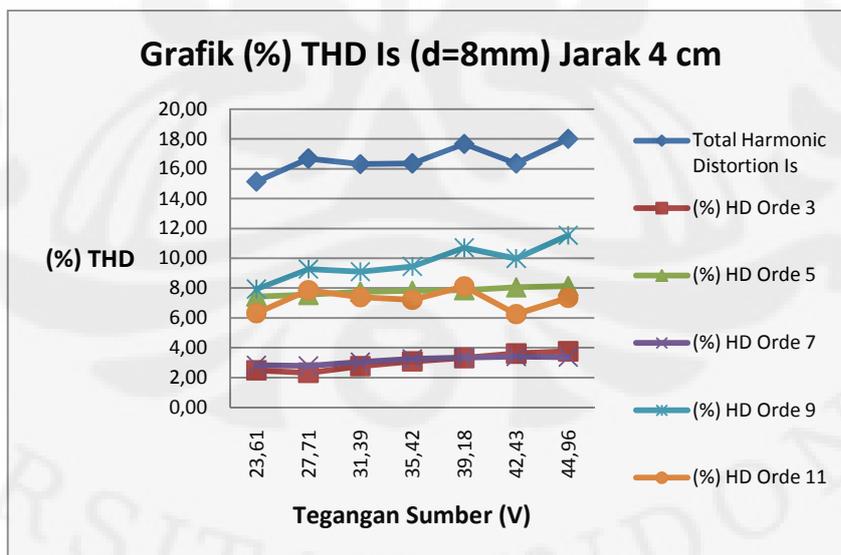
Tabel 4.5 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8 mm dan r 4 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 4cm													
$V_s$ (kV)	$V_s$ (V)	THD $V_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	$I_s$ (A)	THD $I_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,47	23,61	1,45	0,67	1,14	0,25	0,35	0,55	15,14	2,48	7,44	2,83	7,93	6,31
12,46	27,71	1,44	0,61	1,16	0,25	0,42	0,65	16,69	2,32	7,55	2,78	9,27	7,86
14,09	31,39	1,50	0,70	1,18	0,27	0,42	0,73	16,31	2,76	7,75	3,03	9,11	7,39

15,88	35,42	1,53	0,72	1,20	0,28	0,43	0,83	16,37	3,08	7,82	3,25	9,45	7,22
17,56	39,18	1,54	0,69	1,21	0,28	0,49	0,93	17,67	3,31	7,86	3,33	10,71	8,12
19,83	42,43	1,57	0,73	1,24	0,28	0,46	1,00	16,36	3,61	8,05	3,41	9,99	6,26
20,82	44,96	1,56	0,65	1,24	0,27	0,53	1,07	18,01	3,76	8,13	3,37	11,55	7,34



Gambar 4.9 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan  $d$  8 mm dan  $r$  4 cm



Gambar 4.10 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan  $d$  8 mm dan  $r$  4 cm

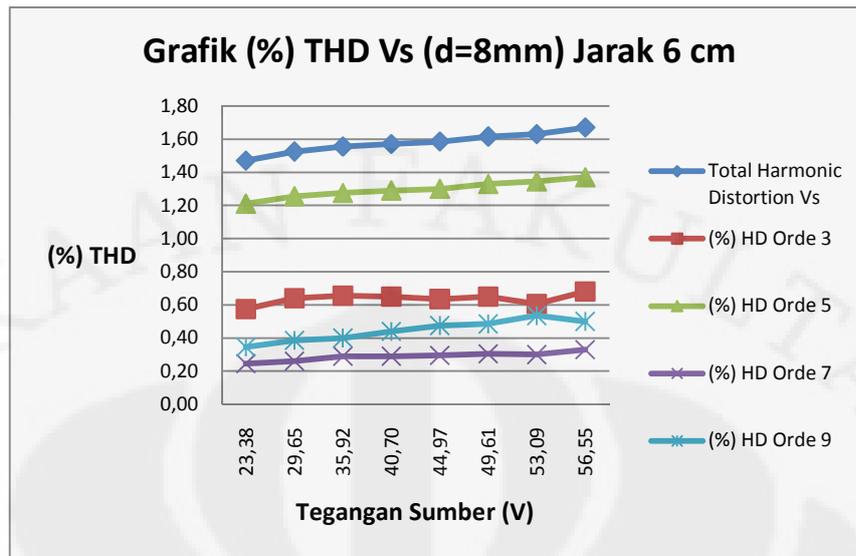
#### 4.1.2.2 Jarak 6cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 8 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 6 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 35,92 V atau sebanding dengan 16,14 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 56,55 V atau setara dengan 25,33 kV.

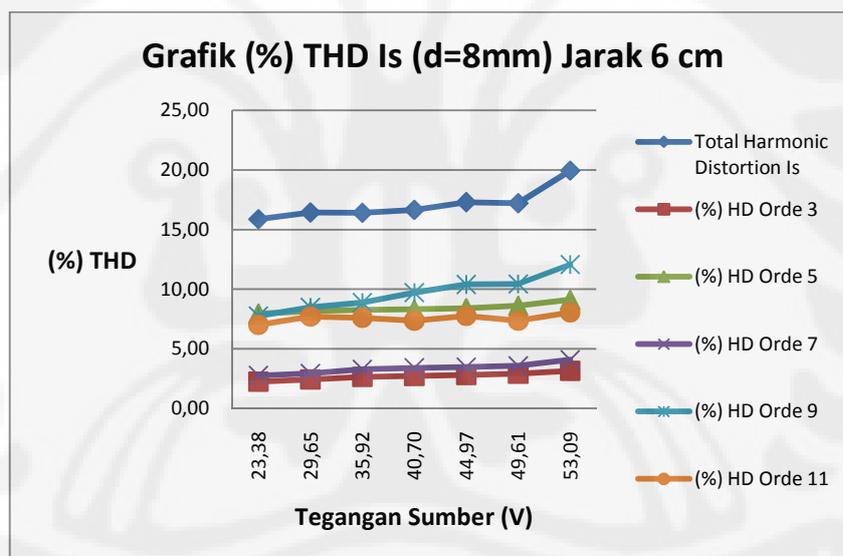
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,07 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 3,54 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,14% untuk Vs dan 3,20% untuk Is.

Tabel 4.6 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8 mm dan r 6 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 6cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,33	23,38	1,47	0,58	1,21	0,25	0,35	0,54	15,87	2,26	7,95	2,77	7,76	7,02
13,48	29,65	1,53	0,64	1,26	0,26	0,39	0,69	16,43	2,44	8,17	2,95	8,48	7,71
16,14	35,92	1,56	0,66	1,28	0,29	0,40	0,85	16,41	2,66	8,27	3,30	8,88	7,60
18,27	40,70	1,57	0,65	1,29	0,29	0,44	0,96	16,65	2,74	8,32	3,41	9,72	7,36
20,17	44,97	1,59	0,64	1,30	0,30	0,48	1,07	17,30	2,81	8,41	3,49	10,41	7,76
22,10	49,61	1,62	0,65	1,33	0,31	0,49	1,18	17,21	2,92	8,62	3,58	10,45	7,37
23,60	53,09	1,63	0,61	1,35	0,30	0,54	1,31	19,95	3,17	9,13	4,09	12,08	8,05
25,33	56,55	1,67	0,68	1,37	0,33	0,50	1,34	16,93	3,18	8,96	3,81	10,74	6,08



Gambar 4.11 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 8 mm dan r 6 cm



Gambar 4.12 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 8 mm dan r 6 cm

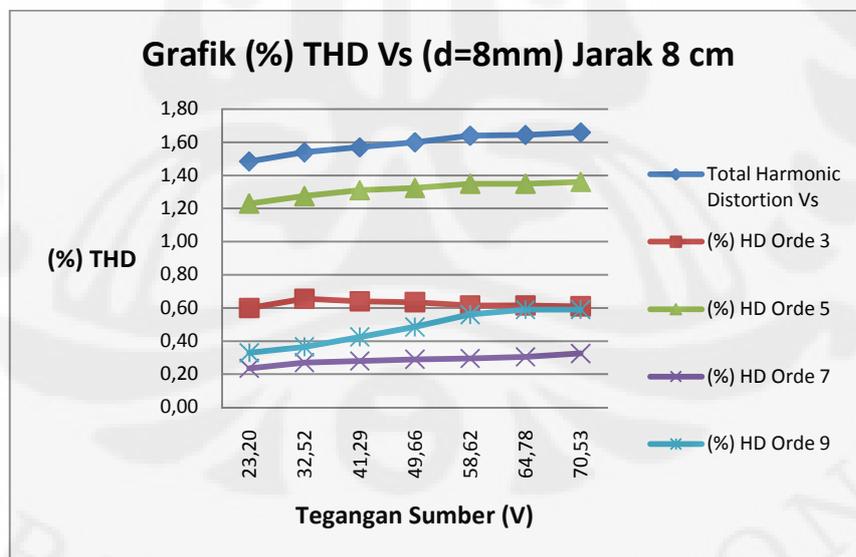
#### 4.1.2.3 Jarak 8cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 8 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 8 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 49,66 V atau sebanding dengan 22,50kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 70,53 V atau setara dengan 31,77 kV.

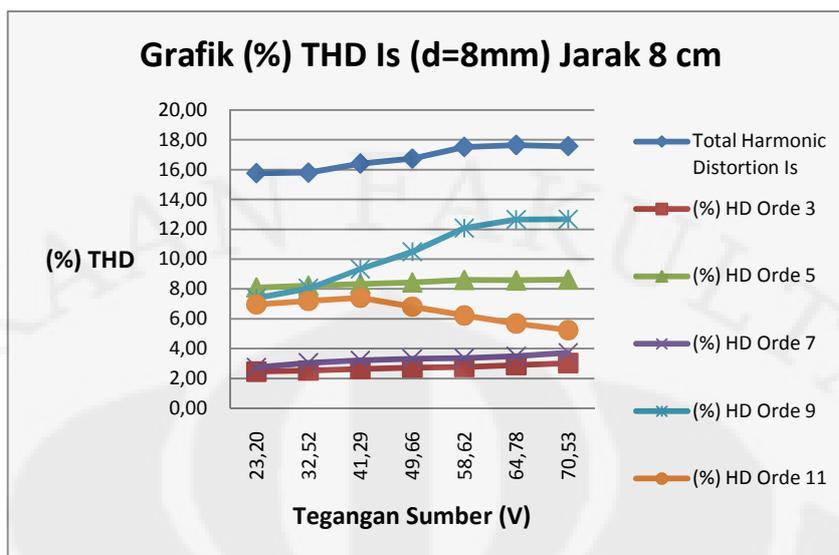
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,06 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 0,83 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,11% untuk  $V_s$  dan 2,19% untuk  $I_s$ .

Tabel 4.7 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8 mm dan r 8 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 8cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,39	23,20	1,49	0,60	1,23	0,24	0,33	0,54	15,76	2,46	8,10	2,74	7,38	6,96
14,65	32,52	1,54	0,66	1,28	0,27	0,37	0,77	15,80	2,54	8,23	3,05	8,04	7,20
18,65	41,29	1,57	0,64	1,31	0,28	0,43	0,98	16,41	2,64	8,34	3,21	9,34	7,41
22,50	49,66	1,60	0,64	1,33	0,29	0,49	1,19	16,74	2,73	8,45	3,31	10,49	6,82
26,70	58,62	1,64	0,62	1,35	0,30	0,56	1,41	17,52	2,76	8,61	3,36	12,08	6,23
29,64	64,78	1,65	0,62	1,35	0,31	0,59	1,56	17,66	2,89	8,58	3,49	12,65	5,69
31,77	70,53	1,66	0,61	1,36	0,33	0,59	1,70	17,57	3,03	8,63	3,73	12,68	5,24



Gambar 4.13 Grafik (%) THD  $V_{sumber}$  dengan d 8 mm dan r 8 cm



Gambar 4.14 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 8 mm dan r 8 cm

#### 4.1.2.4 Jarak 10cm

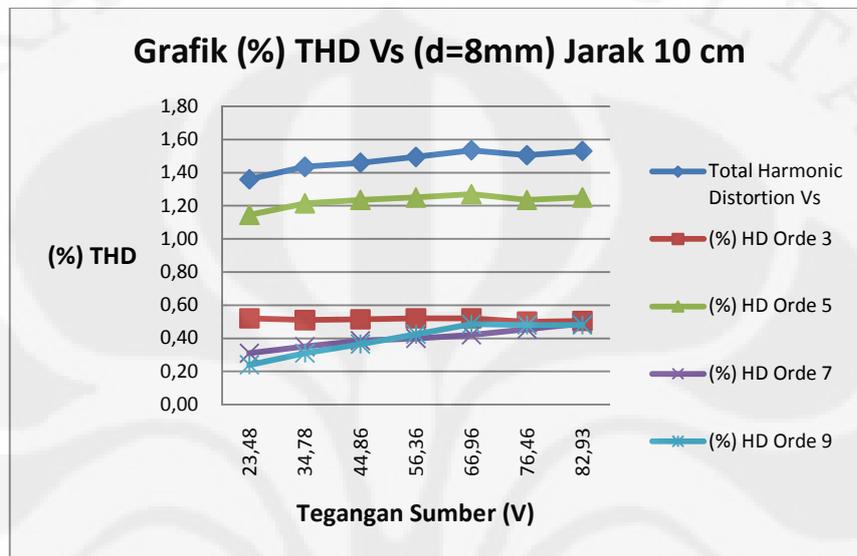
Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 8 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 10 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 56,36 V atau sebanding dengan 25,55 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 82,93 V atau setara dengan 38,54 kV.

Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,03 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 2,17 %. Namun pada orde ke tujuh ( $f = 350$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,09% untuk  $V_s$  sedangkan untuk gelombang arus pada orde sembilan sebesar 1,68%.

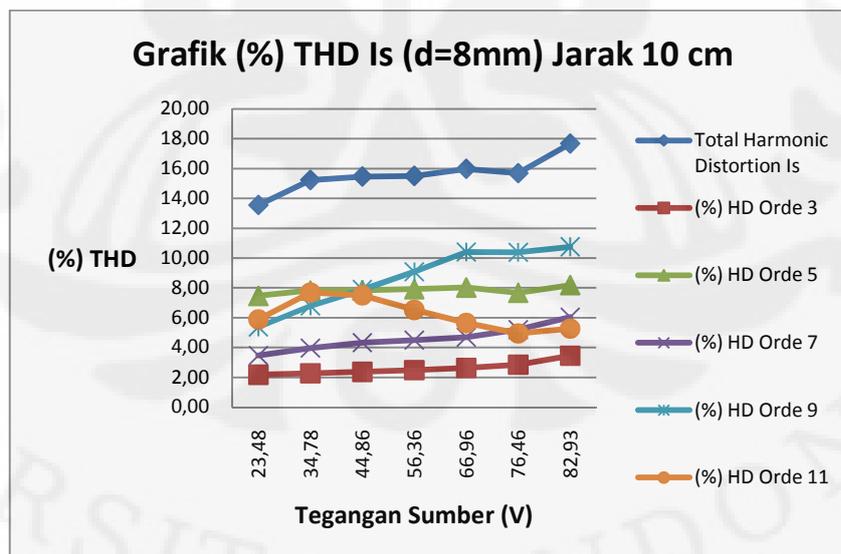
Tabel 4.8 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8 mm dan r 10 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 8mm dan r 10cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,54	23,48	1,36	0,52	1,15	0,31	0,24	0,55	13,56	2,18	7,47	3,48	5,37	5,89
15,71	34,78	1,44	0,51	1,22	0,35	0,31	0,82	15,24	2,27	7,83	3,97	6,80	7,69
20,41	44,86	1,46	0,52	1,24	0,39	0,37	1,07	15,47	2,37	7,84	4,33	7,89	7,51

25,55	56,36	1,50	0,52	1,25	0,40	0,43	1,35	15,51	2,48	7,92	4,51	9,09	6,53
30,34	66,96	1,54	0,52	1,27	0,42	0,49	1,61	15,99	2,64	8,03	4,69	10,42	5,65
34,91	76,46	1,51	0,50	1,24	0,46	0,48	1,85	15,69	2,86	7,68	5,21	10,39	4,95
38,54	82,93	1,53	0,51	1,25	0,49	0,48	2,07	17,68	3,46	8,19	6,05	10,76	5,27



Gambar 4.15 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 8 mm dan r 10 cm



Gambar 4.16 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 8 mm dan r 10 cm

### 4.1.3 Hasil Pengujian dengan Diameter 15 mm

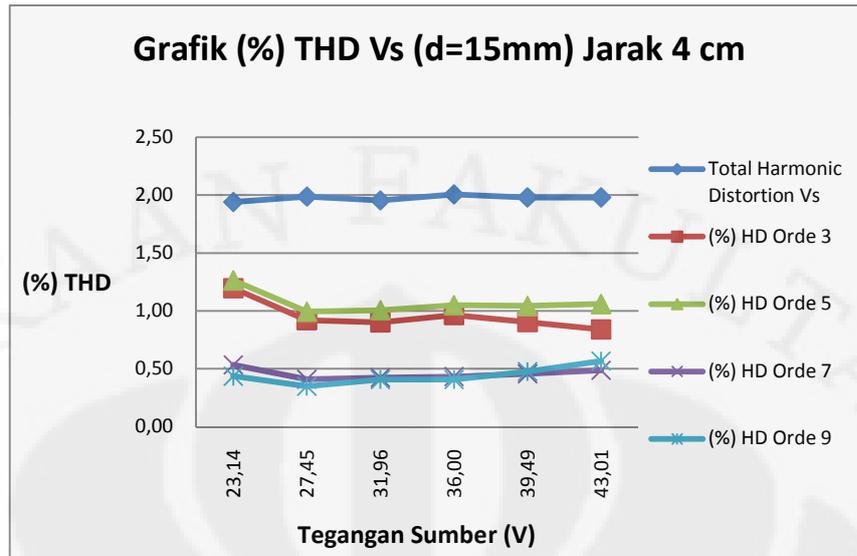
#### 4.1.3.1 Jarak 4cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 15 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 4 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 43,01 V atau sebanding dengan 20,78 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 44,35 V atau setara dengan 21,46 kV.

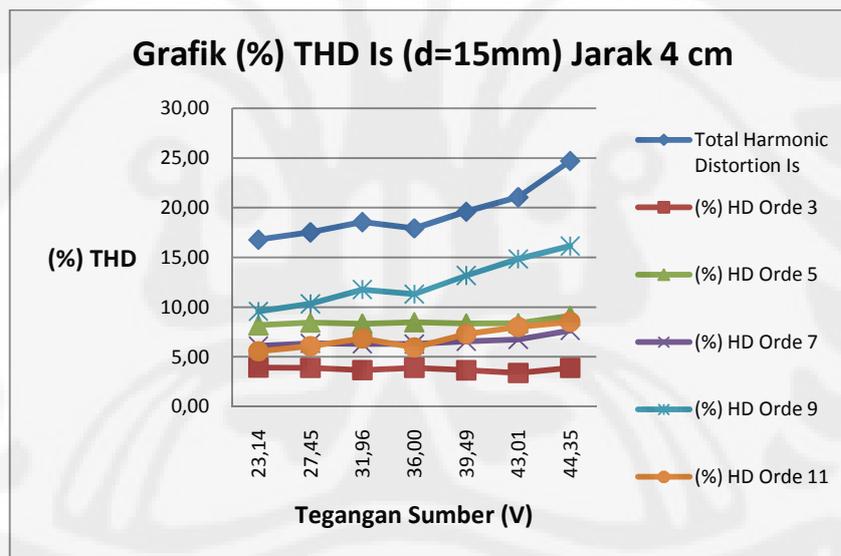
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,04 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 3,65 %. Namun pada orde ke tiga ( $f = 150$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,03% untuk Vs sedangkan untuk THD Is pada orde 9 ( $f = 450$  Hz) sebesar 1,30%.

Tabel 4.9 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15 mm dan r 4cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 4cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,36	23,14	1,94	1,20	1,26	0,53	0,44	0,54	16,79	3,92	8,18	6,09	9,57	5,55
12,54	27,45	1,99	0,92	0,99	0,41	0,35	0,64	17,54	3,89	8,45	6,35	10,33	6,07
14,85	31,96	1,95	0,90	1,01	0,42	0,41	0,75	18,56	3,67	8,34	6,31	11,77	6,84
16,69	36,00	2,01	0,96	1,05	0,43	0,41	0,85	17,94	3,90	8,50	6,29	11,30	5,95
18,58	39,49	1,98	0,90	1,04	0,46	0,48	0,94	19,61	3,65	8,35	6,56	13,19	7,29
20,78	43,01	1,98	0,84	1,06	0,49	0,57	1,03	21,06	3,38	8,39	6,74	14,85	8,00
	44,35	2,02	0,87	1,06	0,49	0,57	1,10	24,71	3,88	9,13	7,66	16,15	8,51



Gambar 4.17 Grafik (% THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 4 cm



Gambar 4.18 Grafik (% THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 4 cm

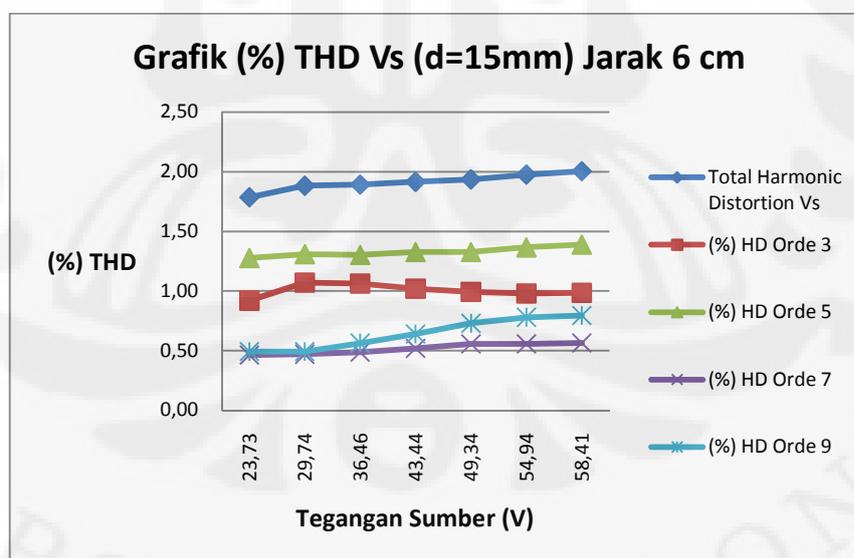
#### 4.1.3.2 Jarak 6cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 15 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 6 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 49,34 V atau sebanding dengan 22,84 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 63,09 V atau setara dengan 29,31 kV.

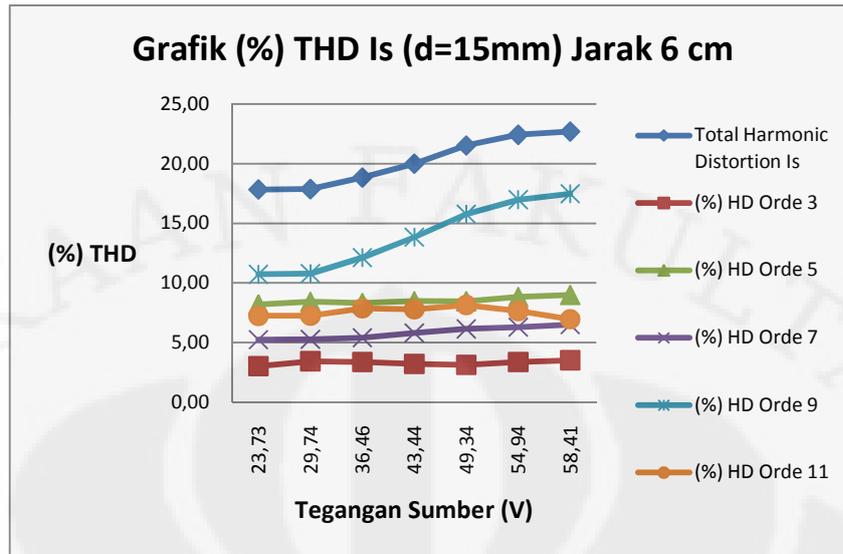
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,07 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 01,17 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,06% untuk  $V_s$  dan 1,72% untuk  $I_s$ .

Tabel 4.10 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15 mm dan r 6 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 6cm													
$V_s$ (kV)	$V_s$ (V)	THD $V_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	$I_s$ (A)	THD $I_s$	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,23	23,73	1,79	0,92	1,28	0,46	0,49	0,55	17,84	3,02	8,20	5,24	10,72	7,24
13,59	29,74	1,88	1,07	1,31	0,47	0,49	0,70	17,87	3,44	8,42	5,28	10,79	7,26
16,80	36,46	1,89	1,06	1,30	0,49	0,56	0,86	18,84	3,37	8,32	5,42	12,13	7,88
19,52	43,44	1,92	1,02	1,33	0,52	0,64	1,03	20,00	3,21	8,48	5,80	13,85	7,80
22,84	49,34	1,94	0,99	1,33	0,56	0,73	1,18	21,53	3,13	8,47	6,15	15,76	8,15
25,30	54,94	1,98	0,98	1,37	0,56	0,78	1,32	22,42	3,38	8,83	6,29	16,98	7,65
27,68	58,41	2,01	0,99	1,39	0,57	0,80	1,40	22,70	3,52	8,99	6,50	17,48	6,96
	63,09	2,05	1,04	1,41	0,56	0,82	1,42	22,11	3,69	9,02	6,39	16,87	6,62



Gambar 4.19 Grafik (%) THD  $V_{sumber}$  dengan d 15 mm dan r 6 cm



Gambar 4.20 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 6 cm

#### 4.1.3.3 Jarak 8cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 15 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 8 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 56,08 V atau sebanding dengan 25,52 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 82,77 V atau setara dengan 36,88 kV.

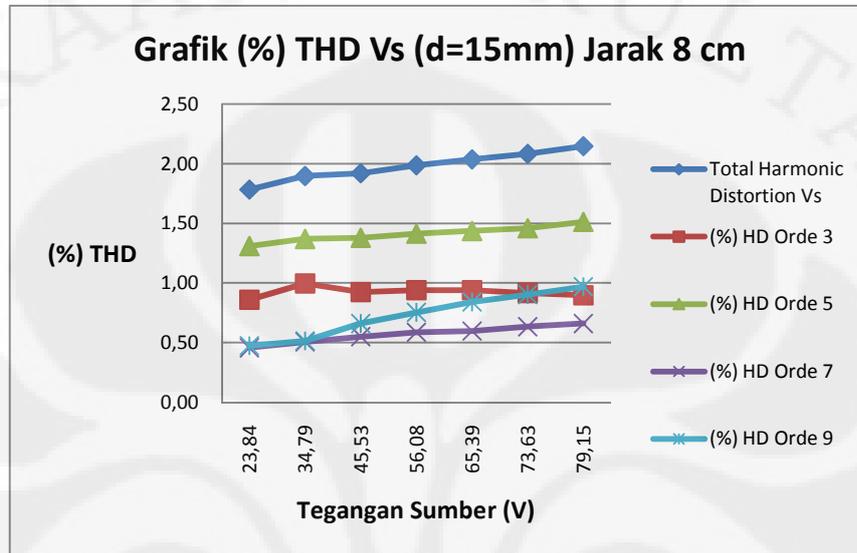
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,16 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 3,69 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,22% untuk Vs dan 4,76% untuk Is.

Tabel 4.11 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15 mm dan r 8 cm

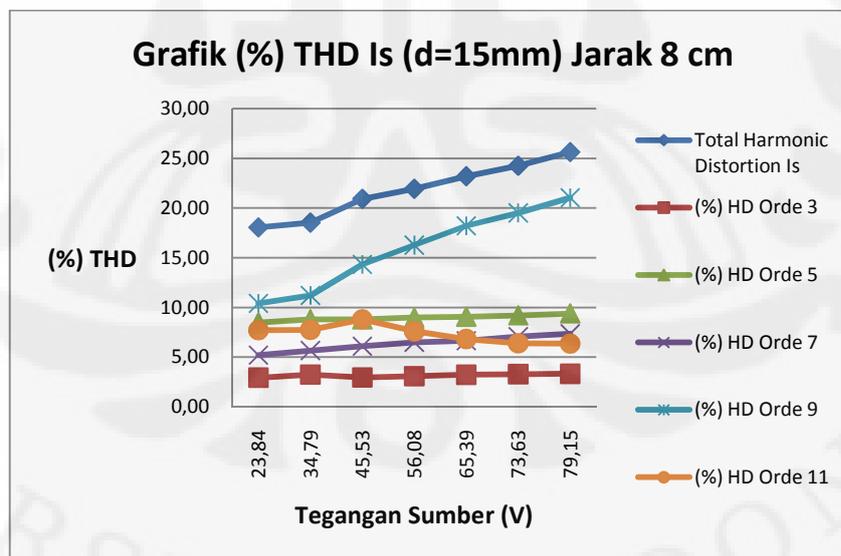
Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 8cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,46	23,84	1,78	0,86	1,31	0,46	0,47	0,55	18,05	2,94	8,47	5,21	10,42	7,72
15,53	34,79	1,90	1,00	1,37	0,51	0,51	0,82	18,53	3,25	8,80	5,67	11,21	7,76
20,77	45,53	1,92	0,92	1,38	0,55	0,66	1,09	20,93	2,96	8,80	6,11	14,32	8,80
25,52	56,08	1,99	0,94	1,41	0,59	0,75	1,35	21,94	3,09	8,99	6,50	16,27	7,60
29,25	65,39	2,04	0,94	1,44	0,60	0,84	1,58	23,20	3,23	9,06	6,65	18,21	6,83

Universitas Indonesia

33,26	73,63	2,08	0,92	1,46	0,63	0,90	1,79	24,25	3,29	9,20	7,07	19,51	6,40
35,88	79,15	2,15	0,90	1,51	0,66	0,97	1,94	25,63	3,33	9,40	7,34	21,04	6,35
	82,77	2,14	0,92	1,52	0,66	0,94	2,02	25,09	3,47	9,35	7,33	20,52	5,96



Gambar 4.21 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 8 cm



Gambar 4.22 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 8 cm

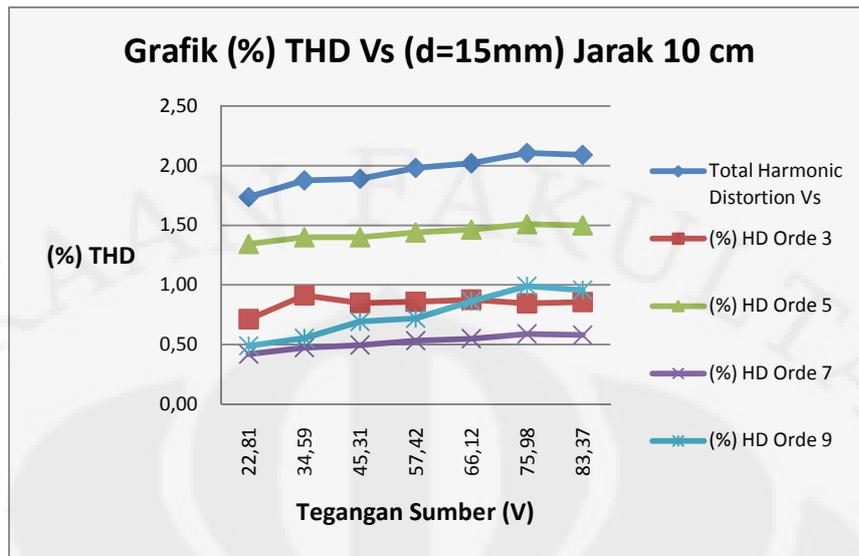
#### 4.1.3.4 Jarak 10cm

Mengacu pada hasil pengamatan saat pengujian, untuk pengujian dengan diameter 15 mm dan jarak pisah elektroda ke dinding kubikel sejauh 10 cm didapatkan tegangan awal dimulainya korona sebesar 66,12 V atau sebanding dengan 29,65 kV. Sedangkan besar tegangan breakdownnya 92,46 V atau setara dengan 40,27 kV.

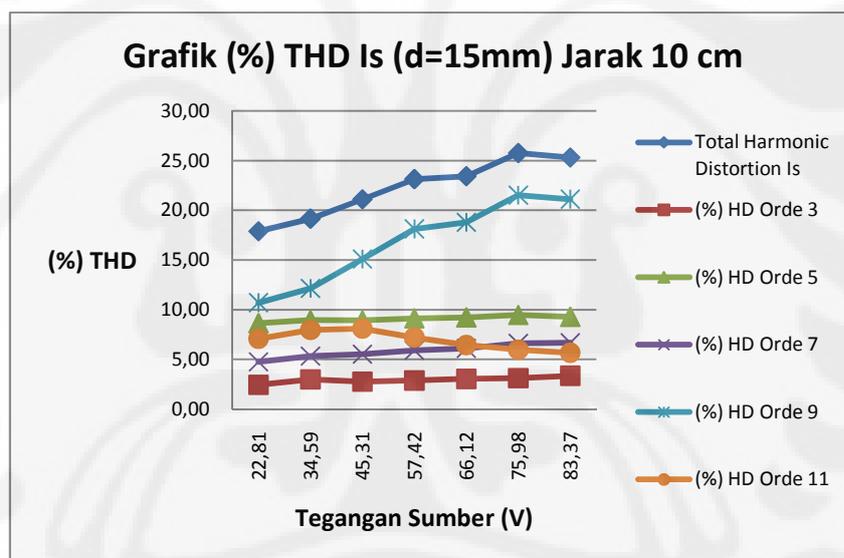
Besar perubahan nilai % THD untuk tegangan sumber sebelum terjadi korona sebesar 0,07 % mulai dari korona hingga tegangan gagal. Untuk gelombang arus 1,88 %. Namun pada orde ke sembilan ( $f = 450$  Hz) terjadi perubahan nilai %THD yang paling dominan, yaitu 0,09% untuk Vs dan 2,33% untuk Is.

Tabel 4.12 Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15 mm dan r 10 cm

Nilai Average Pengujian untuk Penghantar D 15mm dan r 10cm													
Vs(kV)	Vs(V)	THD Vs	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	Is (A)	THD Is	%HD 3	%HD 5	%HD 7	%HD 9	%HD11
10,70	22,81	1,74	0,71	1,34	0,42	0,49	0,53	17,90	2,44	8,64	4,76	10,71	7,08
15,39	34,59	1,88	0,91	1,40	0,47	0,55	0,82	19,16	2,99	8,96	5,33	12,15	7,97
20,31	45,31	1,89	0,85	1,40	0,50	0,69	1,09	21,10	2,77	8,92	5,52	15,10	8,09
25,72	57,42	1,98	0,86	1,44	0,53	0,72	1,38	23,13	2,88	9,14	5,92	18,13	7,21
29,65	66,12	2,02	0,88	1,46	0,55	0,86	1,60	23,43	3,04	9,22	6,11	18,78	6,44
34,17	75,98	2,11	0,85	1,51	0,59	0,99	1,86	25,75	3,12	9,46	6,61	21,53	5,98
38,35	83,37	2,09	0,86	1,50	0,58	0,96	2,03	25,31	3,36	9,29	6,67	21,12	5,67
40,27	92,46	2,06	0,92	1,48	0,57	0,89	2,24	24,02	3,67	9,37	6,74	19,56	5,01



Gambar 4.23 Grafik (%) THD  $V_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 10 cm



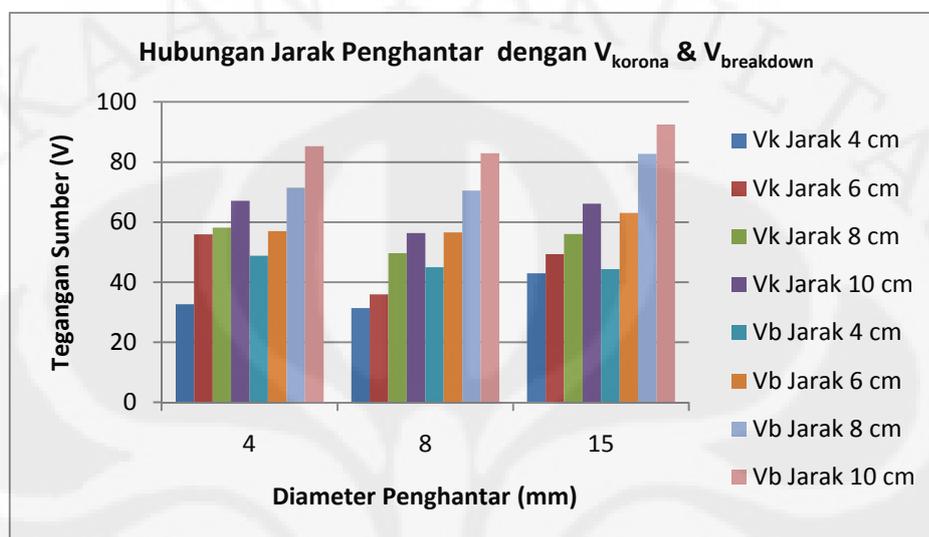
Gambar 4.24 Grafik (%) THD  $I_{\text{sumber}}$  dengan d 15 mm dan r 10 cm

## 4.2 Analisis Hasil Pengujian

### 4.2.1 Analisis Pengaruh Jarak

Berikut ini merupakan grafik karakteristik yang terbentuk berdasarkan data hasil pengujian pada variasi jarak antara elektroda penghantar dengan bodi

kubikel terhadap terjadinya korona dan tegangan gagal pada suatu gelombang sumber listrik AC baik itu gelombang arus maupun tegangan.



Gambar 4.25 Grafik hubungan perubahan jarak terhadap  $V_{korona}$  dan  $V_{kegagalan}$  isolasi udara

Dapat dilihat dari grafik bahwa dengan adanya penambahan jarak celah isolator udara untuk kondisi diameter yang sama, nilai tegangan awal terjadinya korona serta kegagalan isolasi udara mengalami peningkatan yang tidak linear (logaritmis).

Penambahan jarak celah antara penghantar dengan bodi kubikel menyebabkan distribusi medan menjadi tidak homogen. Penambahan besar tegangan diantara keduanya ini dapat menyebabkan terbentuknya pelepasan filamenter yang disebut dengan kanal atau streamer. Penambahan tegangan lebih jauh menyebabkan kanal menjadi berulang hingga aktivitas transien berhenti hingga pelepasan menjadi bertahan sendiri.

Penambahan nilai beda tegangan juga menyebabkan bunyi desis yang akan menjadi semakin kencang. Hal ini dikarenakan jumlah elektron yang terbebaskan melalui proses ionisasi menjadi semakin banyak. Proses discharge menjadi semakin besar dan hal ini mengawali terjadinya kegagalan udara secara

menyeluruh pada celah didalam model kubikel bila tegangan telah mencapai nilai tegangan breakdownnya.

Hal ini sesuai dengan grafik fungsi logaritma sesuai dengan persamaan tegangan kritis (V dimulainya korona)

$$E_o = 21,1 m_o r \delta \ln \frac{d}{r} \text{ kV ke Netral (RMS)}$$

dimana  $r$  merupakan jari-jari penghantar yang nilainya konstan,  $d$  adalah jarak antara elektroda dengan dinding kubikel. Kondisi lingkungan baik itu temperatur maupun tekanan bernilai konstan sehingga nilai  $\delta$  konstan. Sehingga nilai tegangan kritis permukaan penghantar bertambah besar secara logaritmis seiring membesarnya nilai diameter penghantar.

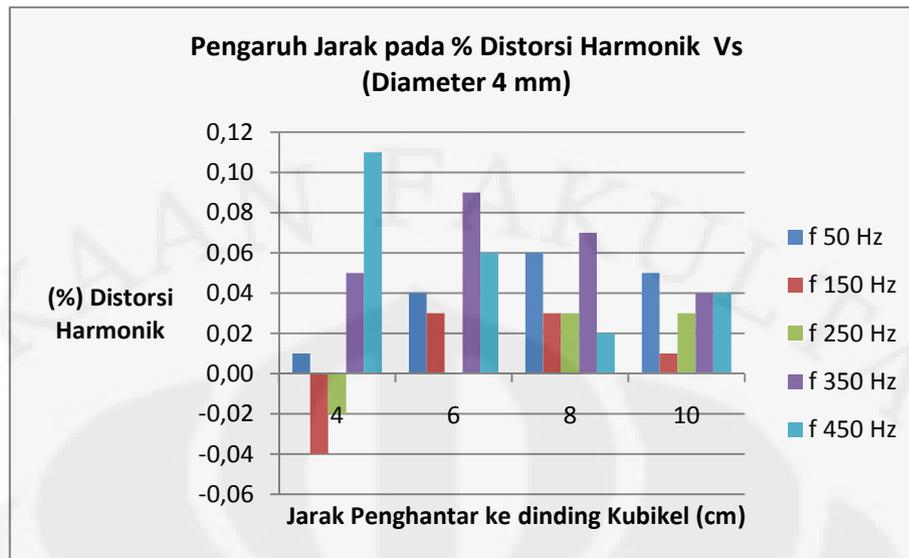
#### 4.2.1.1 Analisis Perubahan Jarak Penghantar terhadap Distorsi Harmonisa Pada Gelombang Sumber

##### 4.2.1.1.1 Gelombang Tegangan

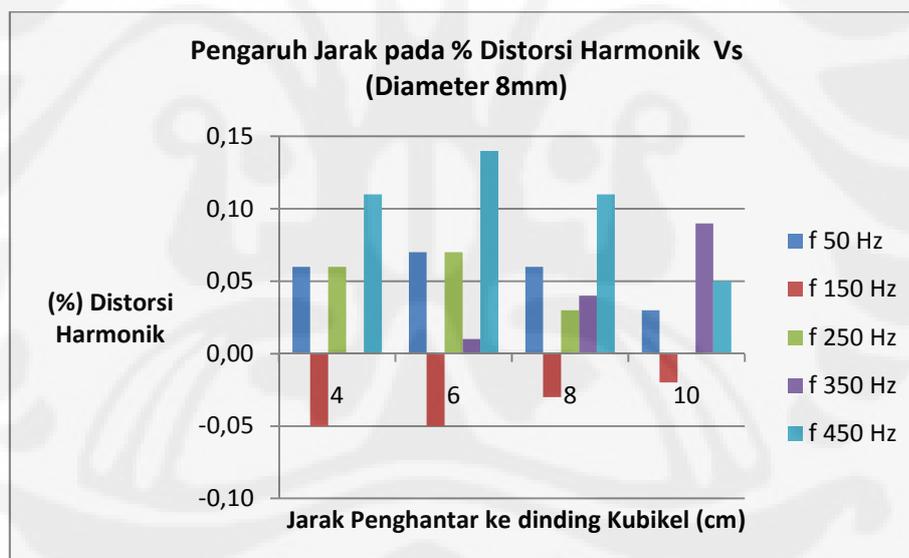
Bila hasil pengujian penulis rangkum berdasarkan perubahan jarak penghantar untuk mengetahui hubungannya terhadap besari distorsi harmonisa yang terjadi pada gelombang maka akan didapat tabel sebagai berikut:

Tabel 4.13 Pengaruh perubahan jarak penghantar terhadap perubahan % distorsi harmonisa pada tegangan sumber Vs untuk frekuensi (50, 150, 250, 350, 450 Hz)

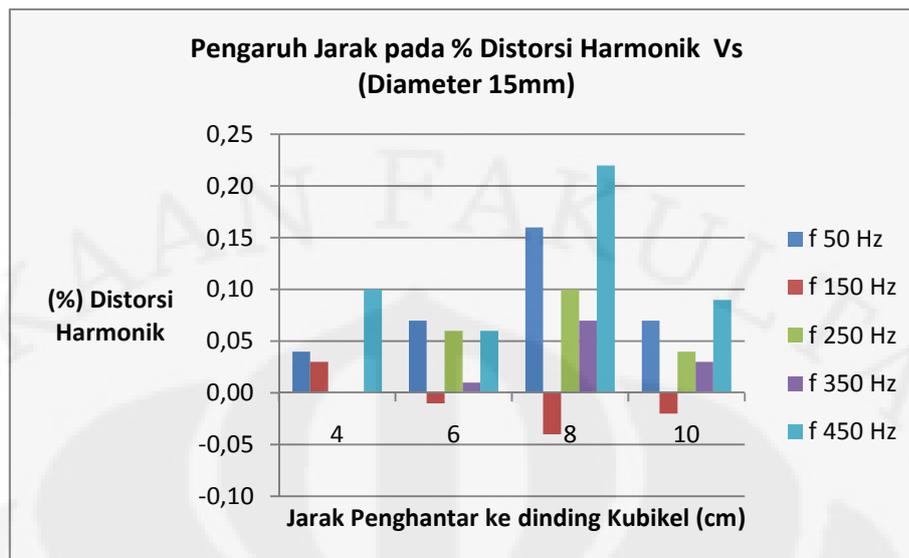
Diameter Penghantar (mm)	Jarak Penghantar (elektroda) ke dinding Kubikel (cm)																			
	4,00					6,00					8,00					10,00				
	Orde Gelombang					Orde Gelombang					Orde Gelombang					Orde Gelombang				
	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9	1	3	5	7	9
4	0,01	-0,04	-0,02	0,05	0,11	0,04	0,03	0,00	0,09	0,06	0,06	0,03	0,03	0,07	0,02	0,05	0,01	0,03	0,04	0,04
8	0,06	-0,05	0,06	0,00	0,11	0,07	-0,05	0,07	0,01	0,14	0,06	-0,03	0,03	0,04	0,11	0,03	-0,02	0,00	0,09	0,05
15	0,04	0,03	0,00	0,00	0,10	0,07	-0,01	0,06	0,01	0,06	0,16	-0,04	0,10	0,07	0,22	0,07	-0,02	0,04	0,03	0,09



Gambar 4.26 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Vs untuk penghantar d 4 mm



Gambar 4.27 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Vs untuk penghantar d 8 mm



Gambar 4.28 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Vs untuk penghantar d 15 mm

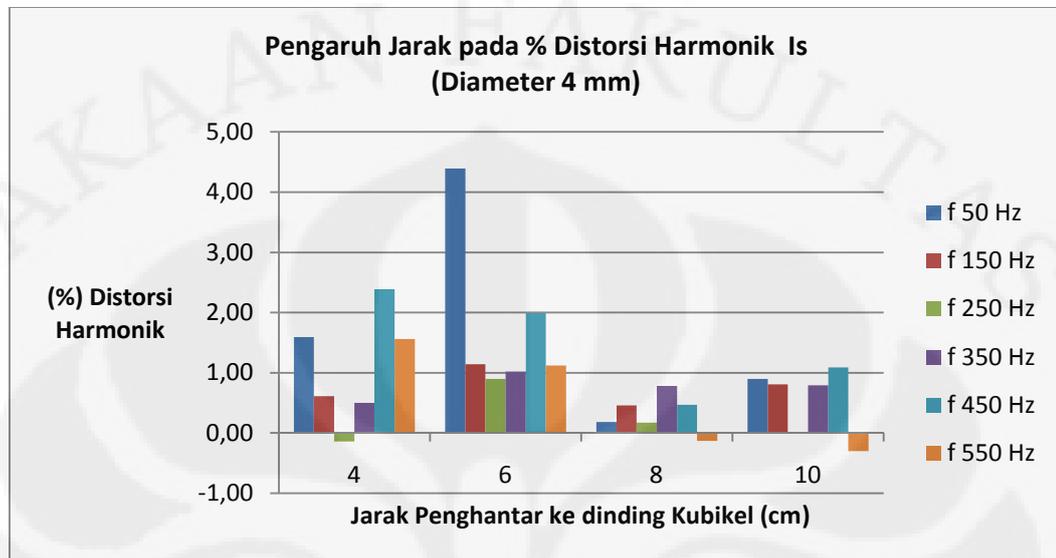
Berdasarkan hasil pengujian, dapat kita lihat bahwa dengan adanya penambahan jarak pisah antar elektroda maka akan terjadi kenaikan nilai % THD pada gelombang tegangan sumber. Hal ini demikian karena dengan kenaikan jarak maka tegangan yang dibutuhkan baik untuk dimulainya fenomena korona maupun kegagalan isolator udara juga mengalami peningkatan. Dengan adanya peningkatan nilai tegangan ini maka proses ionisasi yang berlangsung pada udara di celah antar elektroda semakin tinggi karena adanya bantuan dari proses tumbukan antara ion bebas dengan molekul.

Tabel 4.14 Pengaruh perubahan jarak penghantar terhadap perubahan % distorsi harmonisa pada arus sumber Is untuk frekuensi (50, 150, 250, 350, 450 Hz)

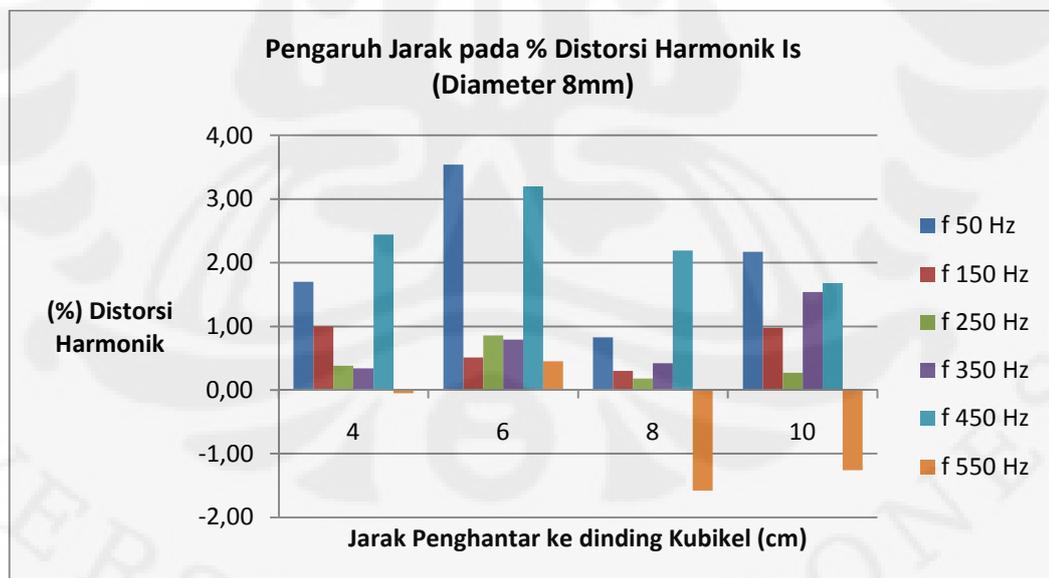
Diameter Penghantar (mm)	Jarak Penghantar (elektroda) ke dinding Kubikel (cm)																							
	4,00						6,00						8,00						10,00					
	Orde Gelombang						Orde Gelombang						Orde Gelombang						Orde Gelombang					
	1	3	5	7	9	11	1	3	5	7	9	11	1	3	5	7	9	11	1	3	5	7	9	11
4	1,59	0,61	-0,14	0,50	2,39	1,56	4,39	1,14	0,90	1,02	1,99	1,12	0,18	0,46	0,17	0,78	0,47	-0,13	0,90	0,81	-0,01	0,79	1,09	-0,30
8	1,70	1,00	0,38	0,34	2,44	-0,05	3,54	0,51	0,86	0,79	3,20	0,45	0,83	0,30	0,18	0,42	2,19	-1,58	2,17	0,98	0,27	1,54	1,68	-1,26
15	3,65	0,50	0,74	0,92	1,30	0,52	1,17	0,39	0,52	0,35	1,72	-0,19	3,69	0,24	0,41	0,84	4,76	-1,25	1,88	0,32	0,07	0,56	2,33	-0,78

Universitas Indonesia

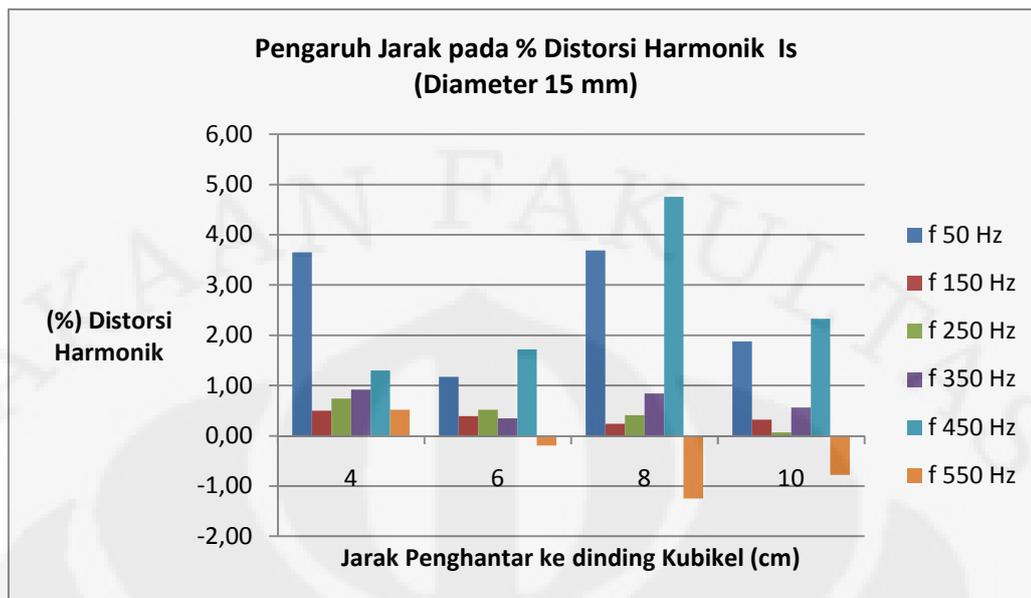
#### 4.2.1.1.2 Gelombang Arus



Gambar 4.29 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Is untuk penghantar d 4 mm



Gambar 4.30 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Is untuk penghantar d 8 mm



Gambar 4.31 Grafik pengaruh perubahan jarak terhadap perubahan % distorsi harmonisa gelombang Is untuk penghantar d 15 mm

Besar arus sebanding dengan besar tegangan yang diberikan. Dengan semakin tingginya beda potensial yang diberikan akibat penambahan jarak pisah antar elektroda maka semakin banyak ion-ion bebas yang dihasilkan dari proses ionisasi. Penambahan jumlah ion bebas ini menyebabkan muatan yang bergerak persatuan luas yang dipengaruhi oleh nilai medan listrik yang sama semakin besar. Karena adanya peningkatan jumlah muatan yang mengalir ini maka nilai arus pun semakin tinggi.

#### 4.2.2 Analisis Pengaruh Diameter

Berdasarkan gambar 4.25 serta tabel 4.13 dan 4.14 di atas juga kita bisa melihat bahwa dengan memvariasikan nilai diameter akan terjadi perubahan pada tegangan awal korona dan juga tegangan gagal dari isolator udara. Dengan ada penambahan nilai diameter untuk nilai jarak pisah yang sama akan terjadi penambahan pada beda tegangan yang dibutuhkan untuk mengawali fenomena korona dan tagangan breakdown padanya.

Pada kawat penghantar dengan diameter lebih kecil akan terjadi gradien tegangan yang bekerja lebih tinggi nilainya bila dibandingkan dengan gradien tegangan yang bekerja pada diameter penghantar yang lebih besar. Hal ini sesuai dengan persamaan tegangan kritis

$$E_v = 21,1 m_o r \delta \left( 1 + \frac{0,3}{\sqrt{\delta r}} \right) \ln \frac{d}{r} \text{ kV ke Netral (RMS)}$$

bahwa nilai tegangan awal korona berbanding terbalik dengan besar jari-jari penghantar. Oleh karena itu terbukti pada pengujian ini bahwa dengan adanya penambahan besar diameter penghantar beda tegangan yang dibutuhkan baik untuk memulai tegangan maupun menyebabkan terjadinya korona akan semakin tinggi.

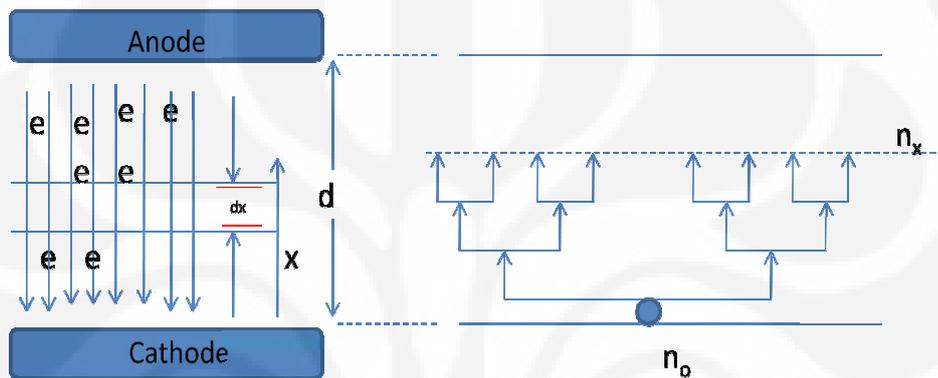
$$R = \rho \frac{L}{A} \text{ dimana } A = \pi r^2$$

Selain itu juga dengan adanya kenaikan diameter dari suatu penghantar maka nilai resistansi dari penghantar tersebut semakin mengecil. Sehingga nilai arus yang melewatinya semakin besar. Itulah salah satu alasan mengapa nilai THD arus selalu lebih besar dari nilai THD tegangan pada gelombang sumber.

#### **4.3 Analisis Hubungan Korona dengan Harmonisa Suatu Gelombang**

Penambahan tegangan yang diberikan pada suatu penghantar AC bertegangan tinggi yang dipisahkan oleh isolator udara akan membangkitkan lebih besar lagi medan listrik di celah udara diantara penghantar tersebut. Medan listrik yang nilainya mengalami peningkatan ini akan menyebabkan proses ionisasi udara semakin tinggi. Sehingga akan lebih banyak lagi molekul udara yang terionisasi menjadi ion-ion bebas bermuatan.

Dengan adanya peningkatan jumlah ion bebas pada celah udara, maka benturan antar ion dengan molekul udara akan semakin meningkat jumlahnya. Peningkatan ini berpotensi untuk membangkitkan lebih banyak lagi jumlah ion bebas. Berhubung beda tegangan yang diberikan antara dua elektroda ini adalah tegangan AC, maka muatan (ion bebas) yang bergerak pun juga akan membentuk arus AC (dengan intensitas kecil-Partial discharge).



Gambar 4.32 beda tegangan AC yang sangat tinggi antara elektroda

Muatan AC yang terus bergerak ini memiliki karakteristik yang unik dimana energy yang dimilikinya sesuai dengan nilai frekuensi yang dimilikinya. Semakin cepat ia bergerak maka energy kinetik fotonnya semakin besar dan ini berarti frekuensi yang dimilikinya juga tinggi.

$$hf = \frac{1}{2} m_e v^2 = eV$$

Dari persamaan diatas dapat dilihat hubungannya jika tegangan yang diterapkan mengalami peningkatan, maka kecepatan ion bebas dalam celah udara tersebut akan semakin tinggi dan akan berpotensi untuk membebaskan lebih banyak lagi ion pada saat terjadi tumbukan dengan molekul udara.

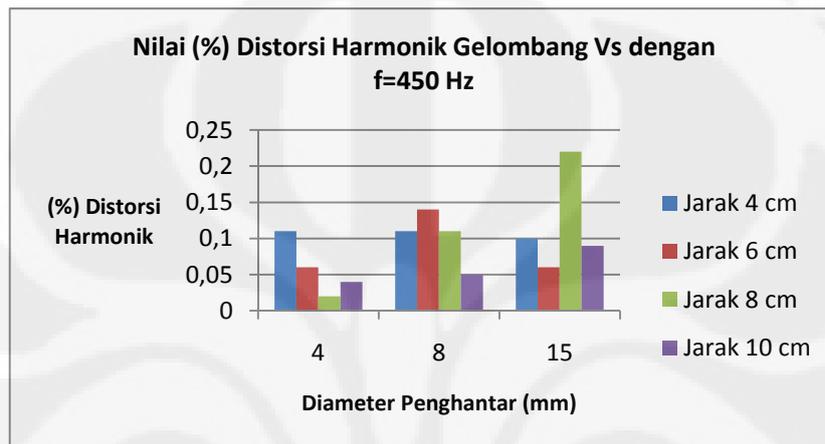
Semakin besar tegangan yang diberikan semakin banyak pula elektron yang terionisasi. Elektron-elektron bebas ini masing-masing memiliki tingkat energi foton yang berbeda yang dipengaruhi oleh besar kecepatan yang dimiliki. Energi foton ini juga dapat diwakilkan dengan nilai frekuensi yang mereka miliki. Sehingga dengan semakin tingginya nilai beda tegangan maka semakin beragam nilai kecepatan dari elektron-elektron bebas dan begitu pula dengan

Sedangkan amplitudo dari distorsi harmonisa untuk masing-masing gelombang yang terdistorsi merepresentasikan jumlah ion yang dihasilkan dari proses ionisasi akibat dari tumbukan yang terjadi oleh ion-ion dengan frekuensi tersebut. Karena adanya nilai kecepatan optimal dalam proses tumbukan untuk menghasilkan ionisasi, maka tidak semua kecepatan dapat melakukannya. Bila terlalu rendah tidak akan terjadi dan sebaliknya jika terlalu tinggi tidak berlangsung secara maksimal karena justru yang terjadi proses lain yang membutuhkan energi yang lebih tinggi seperti reaksi X-ray. Oleh karena itu ada nilai frekuensi optimum yang dihasilkan oleh kenaikan tegangan ini.

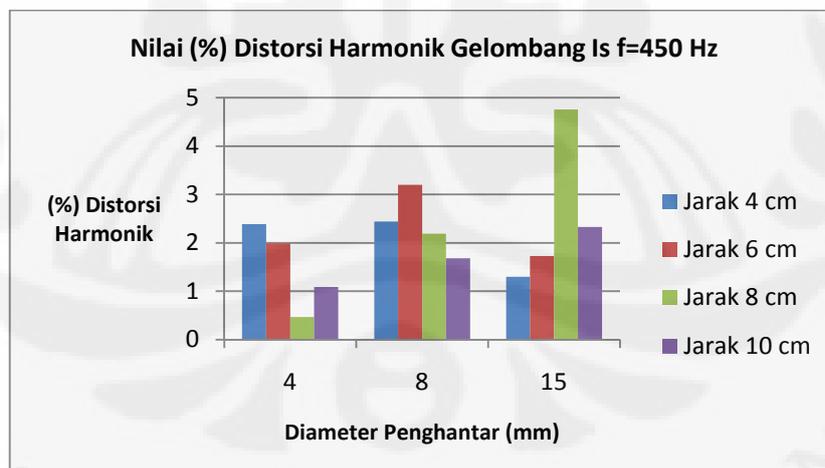
Jadi fenomena korona berperan dalam proses distorsi gelombang sumber AC baik itu gelombang tegangan maupun gelombang arus. Besar pengaruh yang diberikan oleh fenomena korona disesuaikan dengan nilai frekuensi dari ion-ion bebas AC (arus AC) yang bergerak diantara elektroda. Ada nilai frekuensi optimum, dan berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, gelombang dengan frekuensi optimum tersebut adalah 450 Hz.

Berdasarkan grafik proses Townsend dimana tegangan  $V_2$  adalah tegangan awal korona, maka dengan adanya penambahan besar tegangan antara kedua elektroda maka proses ionisasi akan berjalan makin cepat karena adanya bantuan dari benturan antar ion dengan molekul udara. Dengan proses ini maka jumlah ion bebas di udara semakin banyak. Keberagaman ion yang bebas ini dinyatakan dengan semakin banyaknya jumlah gelombang dengan frekuensi berbeda. Namun diantara yang beragam ini ada satu frekuensi gelombang yang memiliki nilai ionisasi optimum. Dan untuk hal ini gelombang dengan frekuensi 450 Hz lah yang dimaksud.

Pernyataan ini terbukti dengan hasil pengujian pada gelombang terdistorsi yang memiliki nilai frekuensi 450 Hz. Terjadi kenaikan besar amplitudo yang konstan baik itu untuk gelombang arus maupun gelombang tegangan dengan adanya fenomena korona. Seperti yang sudah disampaikan sebelumnya, nilai amplitudo ini menyatakan jumlah tumbukan dari ion yang terionisasi oleh tumbukan ion dengan frekuensi 450 Hz.



Gambar 4.33 Nilai % Distorsi harmoni gelombang Vs dengan f 450 Hz



Gambar 4.33 Nilai % Distorsi harmoni gelombang Vs dengan f 450 Hz

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan dengan memvariasikan nilai diameter penghantar dan juga jarak penghantar ke bodi kubikel didapatkan bahwa korona berpengaruh terhadap nilai harmonisa suatu gelombang. Dengan adanya kenaikan beda potensial maka akan terjadi peningkatan proses ionisasi. Peningkatan yang terjadi akan signifikan karena adanya pengaruh benturan ion-ion bebas dengan molekul udara pada proses ionisasi ketika tegangan tertentu telah tercapai. Tegangan tersebut adalah tegangan awal korona dan kecepatan optimum tersebut adalah pada gelombang dengan frekuensi 450 Hz.

## **BAB 5 KESIMPULAN**

1. Semakin tinggi nilai tegangan yang diberikan semakin tinggi pula besar *total harmonic distortion* yang terjadi pada gelombang sumber listrik AC
2. Gelombang dengan frekuensi 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz dan 450 Hz berperan lebih dalam penentuan nilai % THD pada gelombang sumber Vs
3. Gelombang dengan frekuensi 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, 450 Hz dan 550 Hz berperan lebih dalam penentuan nilai % THD pada gelombang sumber Is
4. Gelombang dengan frekuensi 250 Hz memiliki nilai distorsi yang tertinggi untuk setiap nilai Vs dan Is pada diameter 4 mm
5. Gelombang dengan frekuensi 450 Hz memiliki nilai distorsi tertinggi untuk nilai Is pada diameter 8 mm dan 15 mm
6. Fenomena korona berperan signifikan pada kenaikan nilai distorsi harmonisa gelombang arus dan tegangan dengan frekuensi 450 Hz
7. Pendeteksian korona dapat dilakukan dengan melihat perubahan nilai distorsi harmonisa dari gelombang arus maupun tegangan yang terdistorsi dengan frekuensi 450 Hz

## DAFTAR ACUAN

- [1] Arismunandar, Artono. 1982. "Teknik Tegangan Tinggi SUPLEMEN". Jakarta: Ghalia Indonesia.
- [2] Arismunandar, Artono. 1982. "Teknik Tegangan Tinggi". Jakarta: Pradnya Paramita.
- [3] Kuffel, E., Zaengl, W.S., *High Voltage Engineering Fundamentals*, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [4] *Ramalan Kebutuhan dan Ketersediaan Energi Listrik di Indonesia*.  
<http://www.elektroindonesia.com/elektro/energi5a.html>. Diakses pada tanggal 10 Desember 2009.
- [5] Fan Wang. 2001. *On Power Quality and Protection*. Göteborg : Chalmers University of Technology
- [6] Cahyadi, Rifky. 2003. *Upaya Menghemat Energi dengan Mereduksi Harmonik*. Depok : Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI
- [7] Theraja B.L et.al. 1997. *A Text Book of Electrical Technology*. New Delhi : S. Chand & Company Ltd
- [8] Suriadi. *Analysis Of Harmonics Current Minimization On Power Distribution System Using Voltage Phase Shifting Concept*. Malaysia: Tesis school of Electric and electronic Engineering USM
- [9] Anugerah, Hermanto. "Analisa Pengaruh Bentuk Elektroda Terhadap Terjadinya Korona". Depok: Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI

**DAFTAR PUSTAKA**

- E. Kuffel, W.S. Zaengl. 1984. "High-Voltage Engineering". Canada:Pergamon Press.
- Arismunandar, Artono. 1982. "Teknik Tegangan Tinggi SUPLEMEN". Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Tipler, Paul A. 1996. "Fisika untuk Sains dan Teknik". Jakarta: Gramedia.
- Arismunandar, Artono. 1982. "Teknik Tegangan Tinggi". Jakarta: Pradnya Paramita.
- Fan Wang. 2001. On Power Quality and Protection. Göteborg : Chalmers University of Technology
- Cahyadi, Rifky. 2003. Upaya Menghemat Energi dengan Mereduksi Harmonik. Depok : Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI
- Theraja B.L et.al. 1997. A Text Book of Electrical Technology. New Delhi : S. Chand & Company Ltd
- Jusmin Sutanto, Hernadi Buhron. 2001. Implikasi Harmonisa dalam Sistem Tenaga Listrik dan Alternatif Solusinya. Politeknik Negeri Bandung
- Anugerah,Hermanto. "Analisa Pengaruh Bentuk Elektroda Terhadap Terjadinya Korona". Depok: Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI
- Laksana, Osa."Karakteristik Gangguan Bising Sebagai Akibat dari Distorsi". Depok: Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI