

ANALISIS PERBANDINGAN NILAI TEGANGAN TEMBUS DIELEKTRIK UDARA PADA KONDISI BASAH DENGAN PEMODELAN CAIRAN YANG DOMINAN ASAM, BASA, GARAM, SERTA AIR HUJAN PEGUNUNGAN DENGAN MENGGUNAKAN ELEKTRODA BOLA-BOLA DAN JARUM-JARUM

Mukhamad Arif Winoto¹, Abdul Syukur, ST, MT², Mochamad Facta ST, MT³

Teknik Elektro
Universitas Diponegoro
Semarang

ABSTRAK

Isolasi adalah salah satu bentuk peralatan tegangan tinggi yang berfungsi sebagai tahanan atau pelindung agar tidak terjadi tembus yang tidak diinginkan. Secara umum isolasi dibagi menjadi 3 (tiga) macam yaitu isolasi padat, cair dan gas. Kemampuan isolasi dalam menahan tegangan mempunyai batas-batas tertentu sesuai dengan material penyusun dan lingkungan sekitarnya. Apabila tegangan yang diterapkan melebihi kuat medan isolasi maka akan terjadi tembus atau breakdown yang menyebabkan terjadinya aliran arus antara peralatan tegangan tinggi.

Kekuatan isolasi gas dipengaruhi beberapa hal antara lain temperatur, kelembaban, angin, tingkat kontaminasi udara dan besar tegangan yang diterapkan. Adanya kondisi hujan asam, hujan basa, hujan garam, serta hujan di pegunungan akan mempengaruhi kekuatan isolasi dalam mencegah terjadinya tembus antar dua peralatan tegangan tinggi yang diisolasi. Pemodelan peralatan tegangan tinggi dengan elektroda jarum homogen dan elektroda bola homogen digunakan untuk mengetahui tegangan tembus gas antara keduanya jika terjadi perubahan terhadap lingkungan sekitar, selama pengujian isolasi di laboratorium tegangan tinggi. Contoh penggunaan peralatan tegangan tinggi yang menyerupai elektroda jarum adalah arcing horn (busur api) yang dipasang di tiap ujung renteng isolator.

Teknik analisis data menggunakan cara analisis data kualitatif interpretatif dan analisis statistik secara elementer. Kedua metode ini digunakan sejak awal penelitian dimulai, diantaranya dalam memilih obyek, sample, mengklasifikasikan simbol hingga kesimpulan akhir penelitian. Analisis data secara statistik digunakan untuk menaksir prosentase tembus yang terjadi. Hasil percobaan menunjukkan bahwa tegangan tembus udara berbanding lurus dengan tekanan, prosentase karbondioksida dan kelembaban udara tetapi berbanding terbalik dengan kenaikan temperatur.

Kata kunci : Isolasi, tegangan tembus

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Udara termasuk isolasi jenis gas yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Isolasi berfungsi memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar tidak terjadi lompatan api (*flashover*) atau percikan api (*spark over*). Mekanisme kegagalan isolasi pada peralatan tegangan tinggi pada saat digunakan disebabkan banyak hal. Salah satu kegagalan di antaranya adalah pada isolasi gas yang mengalami kerusakan karena pengaruh lingkungan berupa hujan.

Hujan adalah suatu fenomena alam dimana air hujan tersebut dapat mengakibatkan tegangan tembus karena air hujan akan dapat menghantarkan arus. Dalam kenyataan tetesan air hujan dapat menyebabkan breakdown. Kandungan air hujan sendiri dapat mengandung asam, basa, ataupun garam tergantung di wilayah mana hujan itu turun.

1.2 Tujuan

Tujuan penelitian adalah untuk mengamati karakteristik dan menganalisa perubahan tegangan tembus pada isolasi udara pada kondisi basah dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, serta kondisi hujan di wilayah pegunungan menggunakan elektroda jarum-jarum dan elektroda bola-bola

1.3 Pembatasan Masalah

Pembahasan tugas akhir ini terbatas pada hal-hal sebagai berikut.

1. Penempatan elektroda jarum-jarum dan elektroda bola-bola masing-masing 90° secara horizontal dengan elektroda terbuat dari aluminium (Al), yang mempunyai sudut kelancipan total 20° untuk elektroda jarum-jarum, dan diameter 2 cm untuk elektroda bola-bola.
2. Tegangan yang diterapkan adalah tegangan AC (bolak-balik) frekuensi 50 Hertz.
3. Jarak sela antara elektroda besarnya bervariasi untuk berbagai keadaan pengujian yaitu 0,3cm, 0,5cm, dan 1,0cm.
4. Tekanan udara mengikuti tekanan udara sekitar.
5. Analisa terbatas pada proses terjadinya tembus pada isolasi udara.

II. DASAR TEORI

2.1 Proses Dasar Ionisasi

Ionisasi adalah proses munculnya ion disekitar elektroda karena meningkatnya tegangan yang diterapkan. Tegangan yang menyebabkan elektron keluar untuk pertama kalinya disebut tegangan insepasi. Kegagalan listrik yang terjadi di udara tergantung dari jumlah elektron bebas yang ada di udara.

Penyebab tembus antara lain tekanan, temperatur, kelembaban, konfigurasi medan, tegangan yang diterapkan, material elektroda, kondisi permukaan elektroda. Pembangkitan ion antara lain dengan cara

1. Mahasiswa teknik elektro
2. Pembimbing 1
3. Pembimbing 2

benturan (*collision*) elektron, ionisasi thermal, fotoionisasi dan pelepasan (*detachment*) elektron.

2.2 Proses De-Ionisasi

Proses de-ionisasi adalah kebalikan dari proses ionisasi. Proses ini terdiri dari kehilangan elektron dengan cara rekombinasi, penggabungan (*attachment*) elektron dan difusi.

2.3 Proses Dasar Kegagalan Gas

Proses dasar ada dua jenis yaitu :

- Proses atau mekanisme primer, yang memungkinkan terjadinya banjir (*avalanche*) elektron.
- Proses atau mekanisme sekunder, yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir elektron.

Proses terpenting dalam mekanisme primer adalah proses katoda, yaitu salah satu elektroda melepaskan elektron yang mengawali terjadinya kegagalan percikan. Fungsi kerja elektroda ada 2 (dua) yaitu elektroda dengan potensial tinggi (anoda) dan elektroda dengan potensial yang lebih rendah (katoda). Fungsi elektroda pelepas elektron adalah menyediakan elektron awal yang harus dilepaskan, mempertahankan pelepasan dan menyelesaikan pelepasan.

2.3.1 Mekanisme Kegagalan Townsend

Pada mekanisme primer, medan listrik yang ada di antara elektroda akan menyebabkan elektron yang dibebaskan bergerak cepat, sehingga timbul energi yang cukup kuat untuk menimbulkan banjir elektron. Jumlah elektron n_e yang terdapat dalam banjir elektron pada lintasan sejauh dx akan bertambah dengan dn_e elektron. Persamaan ambang dapat ditulis sebagai berikut :

$$V_s = h \text{ (pd)} \dots\dots\dots(2.1)$$

Hubungan ini dikenal dengan hukum Paschen.

2.3.2 Mekanisme Kegagalan Streamer

Mekanisme Streamer (Raether, Loeb dan Meek) menjelaskan pengembangan pelepasan percikan langsung dari banjir tunggal dimana muatan ruang yang terjadi karena banjir itu sendiri mengubah banjir tersebut menjadi streamer plasma. Sesudah itu daya hantar naik dengan cepat dan kegagalan terjadi dalam alur banjir ini.

Ciri utama teori kegagalan streamer, disamping proses ionisasi benturan (α) Townsend, adalah postulasi sejumlah besar fotoionisasi molekul gas dalam ruang di depan streamer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan ruang ion pada ujung streamer. Muatan ruangan ini menimbulkan distorsi medan dalam sela. Ion-ion positif dapat dianggap stationer dibandingkan dengan elektron-elektron yang bergerak lebih cepat, dan banjir terjadi pada sela dalam bentuk awan elektron yang membelakangi muatan ruang ion positif. Streamer dibedakan menjadi 2 (dua) jenis yaitu :

- Positif, atau streamer yang mengarah ke katoda.
- Negatif, atau streamer yang menuju ke anoda.

Teori tentang streamer positif menjelaskan bahwa pada waktu banjir telah menyeberangi sela, elektron-elektron tersedot ke dalam anoda, ion-ion tinggal dalam sela membentuk kerucut. Medan muatan ruang yang tinggi terjadi dekat anoda tetapi di tempat lain dengan kerapatan ion rendah, dan karena itu kehadiran ion-ion positif saja

tidak akan menimbulkan kegagalan dalam sela. Namun, akan timbul fotoelektron-fotoelektron dalam gas yang mengelilingi banjir yang disebabkan oleh pancaran foton-foton gas yang terionisasi pada tangkai (*stem*) banjir. Elektron-elektron ini mengawali timbulnya banjir bantu (*auxiliary*), yang jika medan muatan ruang yang terjadi karena banjir utama kira-kira sama besarnya dengan medan luar, akan mengarah kepada tangkai banjir utama. Pelipat ganda terbesar dalam banjir bantu ini terjadi sepanjang sumbu banjir utama di mana medan muatan ruang menunjang medan luar. Ion-ion positif yang tertinggal di belakang banjir akan memanjang dan mengintensitas muatan ruang banjir utama kearah katoda, dan proses ini berkembang menjadi streamer atau kanal yang merambat sendiri, artinya tindakan ini membentuk plasma penghantar yang memperdekat jarak antara katoda dan anoda. Sesudah itu streamer terus memanjang sehingga merentangi sela membentuk saluran penghantar berupa gas terionisasi antara elektroda.

2.4 Udara

Udara di alam yang secara umum terdiri dari 78 % nitrogen, 21 % oksigen dan 1 % uap air, karbondioksida, dan gas-gas lainnya. Gas ideal adalah gas yang hanya terdiri dari molekul-molekul netral, sehingga tidak dapat mengalirkan arus listrik.

2.5 Faktor Koreksi Keadaan Udara

Untuk mengoreksi hasil pengujian terhadap tekanan dan suhu dipakai rumus sebagai berikut :

$$V_s = \frac{V_B}{d} \dots\dots\dots(2.2)$$

$$d = \frac{b_B}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + t_B} = \frac{0,386 b_B}{273 + t_B} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

- V_s = tegangan lompatan pada keadaan standar (kV)
- V_B = tegangan lompatan yang diukur pada keadaan sebenarnya (kV)
- d = kepadatan udara relatif (*relative air density*)
- b_B = tekanan udara pada waktu pengujian (mm Hg)
- t_B = suhu keliling pada waktu pengujian ($^{\circ}$ C)

Hal ini karena, pengujian tidak dilakukan pada temperatur dan tekanan standar. Sebagai koreksi terhadap kelembaban udara mutlak dipakai rumus empiris sebagai berikut :

$$V_s = V_B \cdot k_H \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

- k_H = nilai faktor koreksi terhadap kelembaban udara

Apabila persamaan (2.2) dan (2.4) digabungkan, maka didapat rumus koreksi untuk mendapatkan keadaan atmosfer standar :

$$V_s = V_B \frac{k_H}{d} \dots\dots\dots(2.6)$$

Oleh karena sifatnya yang empiris, maka faktor koreksi terhadap kelembaban udara k_H tidak dapat dianggap tepat dan tidak selalu dapat dipakai. Oleh sebab itu, hanya persamaan (2.3) yang dipergunakan, dengan keterangan tambahan harga kelembaban udara pada waktu pengujian dilakukan.

2.6 Kelembaban

Kelembaban didefinisikan sebagai besarnya kandungan uap air dalam udara. Rasio kelembaban (ω) adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering.

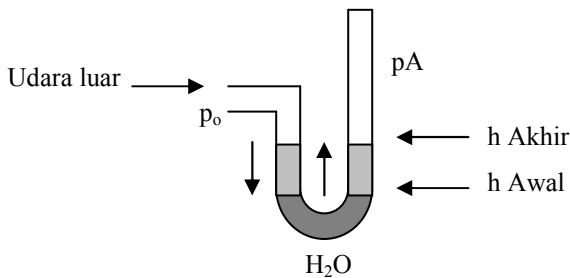
$$\omega = 0,622 \frac{p_s}{p_t - p_s} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

- ω = rasio kelembaban (kg uap air /kg udara kering)
 - p_t = tekanan atmosfer (kPa)
 - p_s = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh (kPa)
- Kelembaban relatif (ϕ) diperoleh dari pengukuran langsung dengan hygrometer.

2.7 Tekanan

Pengukuran tekanan pengujian menggunakan manometer air pipa U. Prinsip kerja manometer berdasarkan tekanan hidrostatik yang disebabkan oleh fluida diam.



Gambar 2.1 Manometer H₂O pipa U

$$pA = p_o + p \cdot g \cdot h \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana :

- p = massa jenis air = 1000 kg /m³
- p_o = tekanan udara luar (N /m²)
- pA = tekanan absolut yang diukur (N /m²)
- g = gravitasi, (9,8 m /detik²)

2.8 Standarisasi Untuk Isolasi Udara

Di Indonesia dan Eropa, frekuensi yang digunakan adalah 50 Hertz. Sejumlah standar baku (IEC-Publication 52 tahun 1960) telah menyatakan jarak bebas yang minimum serta nilai tegangan tembus pada kondisi baku ($b = 1013$ mbar, $t = 20^\circ$ C) untuk berbagai diameter bola D sebagai fungsi besar bola s adalah :

$$U_{do} = f(D,s) \dots\dots\dots (2.9)$$

Kelembaban udara tidak mempengaruhi tegangan tembus dari sela bola, tetapi nilainya perlu dicantumkan saat pengukuran. Standarisasi uji kegagalan dalam gas hanya untuk benda uji dengan elektroda bola sedangkan pengujian tugas akhir ini menggunakan elektroda bola dan jarum, oleh karena perbandingannya didasarkan pada besarnya tegangan tembus.

III. SPESIFIKASI PERALATAN DAN METODOLOGI PENGUJIAN

3.1 Peralatan Dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi unit pembangkit tegangan tinggi bolak-balik, elektroda jarum, termometer, box uji, heater yang berupa lampu 100 watt, tegangan

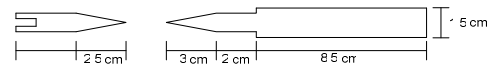
rendah bolak balik 220 V_{F-N} frekuensi 50 Hz, manometer air dan karbondioksida sebagai pengganti asap.

3.1.1 Kotak Uji

Kotak uji terbuat dari bahan plastik *acrylic*. Kotak uji mempunyai dimensi luar yaitu panjang 60 cm, lebar 40 cm dan tinggi 80 cm. Kotak uji digunakan untuk meletakkan elektroda jarum-jarum, elektroda bola-bola

3.1.2 Elektroda Jarum

Elektroda jarum yang digunakan untuk pengukuran tegangan tembus dielektrik udara mempunyai sudut 10° . Elektroda jarum dibuat dengan menggunakan bahan aluminium. Jarak elektroda akan mempengaruhi tegangan tembus yang diterapkan pada isolasi udara. Jarak elektroda pada pengujian adalah 10 mm, 5 mm, dan 3 mm. Jarak yang pendek digunakan untuk mengurangi penggunaan isolasi dan faktor keamanan dari peralatan serta lingkungan sekitar laboratorium uji tegangan tinggi.

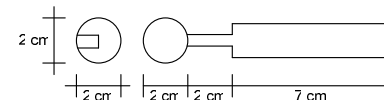


Gambar 3.1 Elektroda Jarum

- Diameter elektroda (d) = 30 mm
- Sudut kelancipan elektroda (α) = 10°
- Material bahan elektroda = aluminium (Al)

3.1.3 Elektroda Bola

Elektroda bola yang digunakan untuk pengukuran tegangan tembus dielektrik udara dibuat dengan menggunakan bahan aluminium dengan diameter 2 cm. Jarak elektroda akan mempengaruhi tegangan tembus yang diterapkan pada isolasi gas. Jarak elektroda pada pengujian adalah bervariasi.



Gambar 3.2 Elektroda bola

- Diameter elektroda (d) = 20 mm
- Material bahan elektroda = aluminium (Al)

3.1.4 Temperatur Pengujian

Temperatur pengujian didasarkan pada data temperatur rata-rata harian di laboratorosium tegangan tinggi Teknik Elektro Undip Semarang, mulai dari 26° C sampai dengan 30° C.

3.1.5 Pembuatan Model Hujan

Dalam penelitian ini dibuat kondisi basah dimana hujan diletakkan dalam box uji yang berukuran 60x40x80 cm.

Air dimasukkan ke dalam botol infus yang selanjutnya diatur curahnya dengan pipa infus. Pada pipa infus terdapat saklar untuk mengatur banyak sedikitnya air yang mengalir. Botol-botol infus diletakkan diatas box uji, ujung-ujung pipanya diletakkan didalam box uji dengan ketinggian 40cm dari elektroda uji.

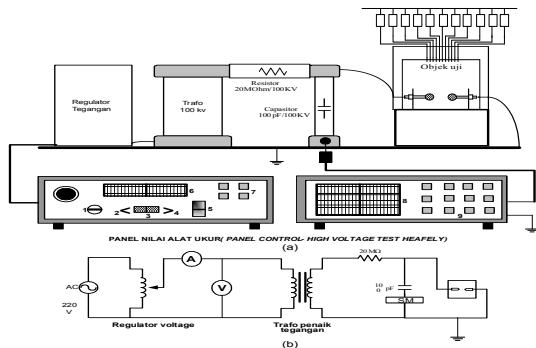
3.1.6 Variasi Pengujian

Variasi pengujian dalam percobaan diperlukan untuk mengetahui nilai tegangan tembus udara pada kondisi basah dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, serta kondisi basah dengan air hujan pegunungan. Variasi pengujian meliputi variasi jarak sela antara elektroda, dan variasi kondisi hujan.

3.1.7 Pengesetan Peralatan

Sebelum pengujian peralatan perlu diperiksa untuk memastikan rangkaian terpasang dengan benar.

1. Mempersiapkan alat dan bahan.
2. Pastikan sistem dalam keadaan Off.
3. Masuk kesangkar Faraday dengan membawa *stick grounding* yang terdapat disisi pintu masuk untuk membuang tegangan sisa.
4. Membuat rangkaian percobaan sebagai berikut :



Gambar 3.3 Gambar Rangkaian pengujian

5. Memastikan rangkaian telah tersusun dan terhubung dengan baik dan benar untuk menghindari kesalahan dalam pengujian.
6. Mengatur jarak sela antar elektroda.
7. Mengukur temperatur pada ruang uji.
8. Mengukur tekanan pada ruang uji.
9. Menghidupkan trafo uji dari panel kontrol dengan menggunakan kunci khusus sebagai saklar penghubung atau pemutus aliran.
10. Menekan tombol ready agar tegangan dapat menuju ke alat uji, kemudian tegangan dinaikkan dengan tombol penaik tegangan pada panel kontrol (Panel Control operating terminal OT 276) sampai terjadi tegangan tembus.
11. Menurunkan tegangan dengan tombol penurun tegangan pada panel kontrol (Panel Control operating terminal OT 276).
12. Mencatat nilai tegangan tembus yang muncul pada panel kontrol (Digital Measuring Instrumen DMI/551)
13. Pengujian dilakukan sebanyak 6 kali^[3].

IV. DATA DAN ANALISA

Proses pengambilan data dilakukan di laboratorium tegangan tinggi dengan beberapa kondisi pengujian untuk mengetahui karakteristik masing-masing keadaan pengujian.

4.1 Data pengujian.

a. Curah Hujan 25 ml/menit

Tabel 4.1 Data pengujian basah dengan curah hujan 25 ml/menit, elektroda bola-bola.

ELEKTRODA BOLA-BOLA		Jarak Sela (cm)			
		0.3	0.5	1	
Cairan yang dominan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,60	7,29	9,36
		VS (kV)	4,84	7,67	9,85
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	6,41	8,30	11,41
		VS (kV)	6,74	8,74	12,01
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	6,48	10,52	13,72
		VS (kV)	6,82	11,07	14,44
Cairan yang dominan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	6,53	8,19	14,10
		VS (kV)	6,87	8,62	14,48
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	7,58	11,44	14,33
		VS (kV)	7,98	12,04	15,08
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	9,51	13,70	17,71
		VS (kV)	10,01	14,42	18,64
Cairan yang dominan Garam (NaCl)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	5,55	7,63	10,59
		VS (kV)	5,84	8,03	11,15
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	6,72	8,78	12,26
		VS (kV)	7,07	9,24	12,91
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	7,34	11,37	14,41
		VS (kV)	7,73	11,97	15,17
Air hujan Pegunungan	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	8,29	11,53	14,59	
	VS (kV)	8,73	12,14	15,36	
Air Aquades	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	6,32	8,68	16,65	
	VS (kV)	6,65	9,14	17,53	

Tabel 4.2 Data pengujian basah dengan curah hujan 25 ml/menit, elektroda jarum-jarum.

ELEKTRODA JARUM-JARUM		Jarak Sela (cm)			
		0.3	0.5	1	
Cairan yang dominan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,06	5,21	6,09
		VS (kV)	4,27	5,48	6,41
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,12	4,70	6,20
		VS (kV)	4,34	4,95	6,53
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,22	5,37	6,28
		VS (kV)	4,44	5,65	6,61
Cairan yang dominan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,40	5,52	6,57
		VS (kV)	4,63	5,81	6,92
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,43	5,57	6,72
		VS (kV)	4,66	5,86	7,07
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,78	5,75	7,48
		VS (kV)	5,03	6,05	7,87
Cairan yang dominan Garam	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,35	5,24	6,17

ELEKTRODA JARUM-JARUM			Jarak Sela (cm)		
			0.3	0.5	1
(NaCl)	Molaritas 10 ⁻²	VS (kV)	4,58	5,52	6,49
		d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,46	5,52	6,46
	Molaritas 10 ⁻⁵	VS (kV)	4,69	5,81	6,80
		d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,68	5,56	6,55
	Air hujan Pegunungan	VS (kV)	4,93	5,85	6,89
		d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,47	5,59	6,81
Air Aquades	VS (kV)	4,71	5,88	7,17	
	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	3,68	4,72	6,49	
		VS (kV)	3,87	4,97	6,83

b. Curah Hujan 100 ml/menit

Tabel 4.3 Data pengujian hujan dengan curah hujan 100 ml/menit, elektroda bola-bola.

ELEKTRODA BOLA-BOLA			Jarak Sela (cm)			
			0.3	0.5	1	
Cairan yang dominan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	3,71	4,62	7,09	
		VS (kV)	3,90	4,86	7,46	
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	5,41	6,76	10,29	
		VS (kV)	5,70	7,12	10,83	
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	6,43	8,35	12,35	
		VS (kV)	6,77	8,79	13,00	
	Cairan yang dominan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
			VB (kV)	5,53	6,50	11,43
			VS (kV)	5,82	6,84	12,03
Molaritas 10 ⁻²		d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	6,47	8,37	12,89	
		VS (kV)	6,81	8,81	13,57	
Molaritas 10 ⁻⁵		d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	8,46	9,83	14,48	
		VS (kV)	8,91	10,35	15,24	
Cairan yang dominan Garam (NaCl)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,41	5,64	8,28	
		VS (kV)	4,64	5,94	9,26	
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	6,35	7,73	11,54	
		VS (kV)	6,68	8,14	12,15	
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	6,74	8,51	13,43	
		VS (kV)	7,09	8,96	14,14	
Air hujan Pegunungan	d	0,95	0,95	0,95		
	VB (kV)	7,35	8,61	13,48		
	VS (kV)	7,74	9,06	14,19		
Air Aquades	d	0,95	0,95	0,95		
	VB (kV)	5,59	6,41	15,59		
	VS (kV)	5,88	6,75	16,41		

Tabel 4.4 Data pengujian hujan dengan curah hujan 100 ml/menit, elektroda jarum-jarum.

ELEKTRODA JARUM-JARUM			Jarak Sela (cm)		
			0.3	0.5	1
Hujan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,77	4,25	5,38
		VS (kV)	2,92	4,47	5,66
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,71	4,55	5,81
		VS (kV)	3,91	4,79	6,12
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,80	4,62	5,84
		VS (kV)	4,00	4,86	6,15
Hujan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,90	5,21	6,32
		VS (kV)	4,12	5,48	6,65
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,20	5,25	6,33
		VS (kV)	4,42	5,53	6,66
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	4,34	5,49	6,55
		VS (kV)	4,57	5,78	6,89
Hujan Garam (NaCl)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,51	4,63	6,10
		VS (kV)	3,69	4,87	6,42
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,89	4,88	6,12
		VS (kV)	4,09	5,14	6,44
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,90	4,88	6,22
		VS (kV)	4,11	5,14	6,55
Air hujan Pegunungan	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	4,33	5,26	6,38	
	VS (kV)	4,56	5,54	6,72	
Air Aquades	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	3,17	3,91	5,79	
	VS (kV)	3,34	4,16	6,09	

c. Curah Hujan 250 ml/menit

Tabel 4.5 Data pengujian hujan dengan curah hujan 250 ml/menit, elektroda bola-bola.

ELEKTRODA BOLA-BOLA			Jarak Sela (cm)			
			0.3	0.5	1	
Cairan yang dominan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	2,75	3,30	6,20	
		VS (kV)	2,89	3,47	6,53	
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,23	5,22	6,71	
		VS (kV)	4,45	5,49	7,06	
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,43	5,27	7,58	
		VS (kV)	4,66	5,55	7,98	
	Cairan yang dominan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95
			VB (kV)	4,43	5,18	8,26
			VS (kV)	4,66	5,45	8,69
Molaritas 10 ⁻²		d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,82	6,63	8,70	
		VS (kV)	5,07	6,98	9,16	
Molaritas 10 ⁻⁵		d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	6,40	7,35	11,66	
		VS (kV)	6,74	7,74	12,27	
Cairan yang dominan Garam (NaCl)	Molaritas 10 ⁻¹	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	3,76	4,34	7,34	
		VS (kV)	3,96	4,57	7,73	
	Molaritas 10 ⁻²	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,61	5,66	7,68	
		VS (kV)	4,85	5,96	8,08	
	Molaritas 10 ⁻⁵	d	0,95	0,95	0,95	
		VB (kV)	4,74	6,44	8,36	
		VS (kV)	4,99	6,78	8,80	
Air hujan Pegunungan	d	0,95	0,95	0,95		
	VB (kV)	5,41	7,27	10,42		
	VS (kV)	5,69	7,65	10,97		
Air Aquades	d	0,95	0,95	0,95		
	VB (kV)	4,54	5,60	9,35		
	VS (kV)	4,78	5,89	9,84		

Tabel 4.6 Data pengujian hujan dengan curah hujan 250 ml/menit, elektroda jarum-jarum.

ELEKTRODA JARUM-JARUM		Jarak Sela (cm)			
		0,3	0,5	1	
Cairan yang dominan Asam (H2SO4)	Molaritas 10 ⁻¹ ₁	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,63	3,38	4,55
		VS (kV)	2,77	3,56	4,79
	Molaritas 10 ⁻² ₂	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,71	3,61	5,41
		VS (kV)	2,85	3,80	5,69
	Molaritas 10 ⁻⁵ ₅	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,83	3,74	5,45
		VS (kV)	2,98	3,94	5,74
Cairan yang dominan Basa (NaOH)	Molaritas 10 ⁻¹ ₁	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,91	4,31	5,68
		VS (kV)	3,06	4,54	5,99
	Molaritas 10 ⁻² ₂	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,64	4,68	5,74
		VS (kV)	3,83	4,93	6,04
	Molaritas 10 ⁻⁵ ₅	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,76	5,23	6,13
		VS (kV)	3,96	5,50	6,45
Cairan yang dominan Garam (NaCl)	Molaritas 10 ⁻¹ ₁	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,80	3,84	5,52
		VS (kV)	2,95	4,04	5,81
	Molaritas 10 ⁻² ₂	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	2,83	4,17	5,60
		VS (kV)	2,98	4,39	5,89
	Molaritas 10 ⁻⁵ ₅	d	0,95	0,95	0,95
		VB (kV)	3,63	4,81	5,77
		VS (kV)	3,82	5,06	6,07
Air hujan Pegunungan	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	3,70	4,77	5,87	
	VS (kV)	3,89	5,02	6,18	
Air Aquades	d	0,95	0,95	0,95	
	VB (kV)	3,09	3,36	4,84	
	VS (kV)	3,25	3,54	5,09	

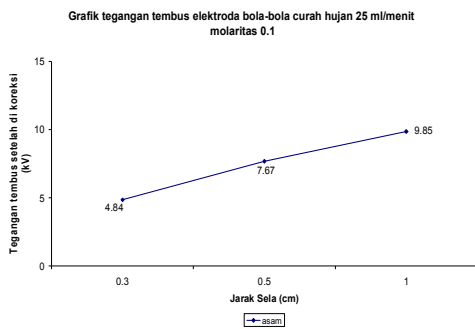
Faktor koreksi (d) digunakan untuk mendapatkan nilai tegangan tembus standar terhadap temperatur standar (20°C) dan tekanan standar (760 mm Hg). Perumusan nilai kepadatan udara relatif sesuai dengan IEC 52 tahun 1960.

4.2 Analisis

4.2.1 Analisa Jarak Sela Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

Berdasarkan gambar 4.1 dapat diketahui jarak antar elektroda mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola kondisi hujan asam dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10⁻¹ adalah 4,84 kV, 7,67 kV, 9,85 kV pada jarak sela 3 mm, 5 mm, dan 10 mm.



Grafik 4.1 Grafik tegangan tembus fungsi jarak sela elektroda bola-bola curah hujan 25 ml/menit molaritas 10⁻¹

Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila jarak sela antar elektroda bola-bola maupun pada elektroda

jarum-jarum semakin besar, maka dibutuhkan kuat medan listrik yang semakin besar pula untuk dapat melepaskan elektron dari ikatannya yang pada gilirannya membuat nilai tegangan tembus juga semakin besar, Analisa ini sesuai dengan persamaan hubungan tegangan tembus dengan jarak sela

yaitu :

$$V_b = A.d^n \dots\dots\dots(4.1)$$

dimana : d : panjang ruang celah

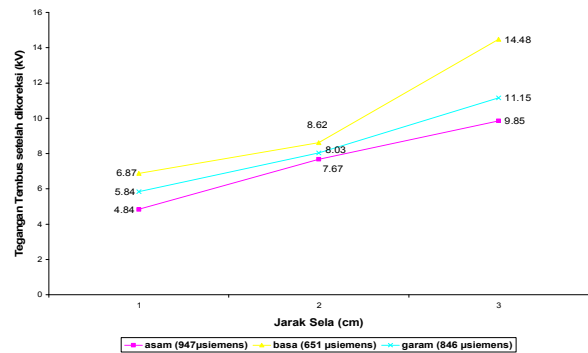
A : konstanta

n : juga konstanta yang nilainya < 1

4.2.2 Analisa Konduktivitas Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

Berdasarkan gambar 4.20 dapat diketahui bahwa konduktivitas mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola pemodelan cairan yang dominan asam (σ = 947µsiemens), basa (σ = 651 µsiemens) , garam (σ = 846 µsiemens) dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10⁻¹ pada jarak sela 3 mm, 5 mm, dan 10 mm.



Grafik 4.2 Grafik tegangan tembus elektroda bola-bola, curah hujan 25 ml/menit, dan molaritas 10⁻¹

Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila konduktivitas semakin tinggi, maka tegangan tembus akan semakin kecil, karena dibutuhkan kuat medan listrik yang semakin kecil untuk dapat melepaskan elektron dari ikatannya yang pada gilirannya membuat nilai tegangan tembus juga semakin kecil. Hal ini dikarenakan konduktivitas berbanding lurus terhadap rapat arus dan berbanding terbalik terhadap kuat medan listrik. Ini sesuai dengan rumus :

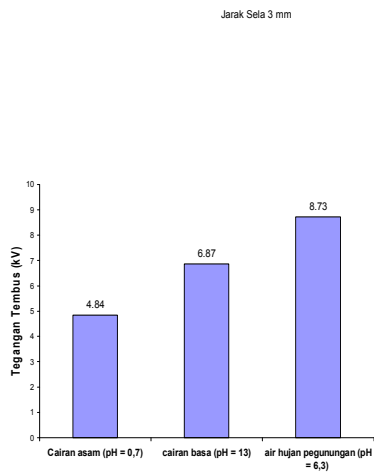
$$J = \sigma E$$

Konduktivitas dinyatakan dengan σ dan didefinisikan sebagai perbandingan antara rapat arus J terhadap kuat medan listrik E.

4.2.3 Analisa Derajat Keasaman Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

Berdasarkan gambar 4.21 dapat diketahui jarak antar elektroda mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola pemodelan cairan yang dominan asam (pH = 0,7), basa (pH = 13), dan air hujan pegunungan (pH = 6,3) dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10^{-1} pada jarak sela 3 mm.



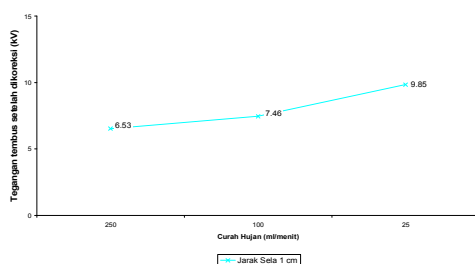
Grafik 4.3 Grafik tegangan tembus elektroda bola-bola, curah hujan 25 ml/menit, jarak sela 3mm, dan molaritas 10^{-1}

Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila pH semakin tinggi, maka tegangan tembus akan semakin besar. Ph dikatakan besar apabila nilainya mendekati 7, dan dikatakan kecil apabila nilainya menjauhi 7. karena semakin besar pH dibutuhkan kuat medan listrik yang semakin besar pula untuk dapat melepaskan elektron dari ikatannya yang pada gilirannya membuat nilai tegangan tembus juga semakin besar. Hal ini dikarenakan karena dengan pH yang semakin besar maka air hujan itu akan menjadi konduktif yang menghantarkan tegangan tembus, jadi semakin besar pH maka tegangan tembus akan semakin besar.

4.2.4 Analisa Curah Hujan Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

Berdasarkan gambar 4.2 dapat diketahui bahwa curah hujan mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola kondisi hujan asam dengan curah hujan 25 ml/menit, 100 ml/menit, 250 ml/menit dan molaritas 10^{-1} adalah 9,85 kV, 7,46 kV, 6,53 kV pada jarak sela 10 mm.



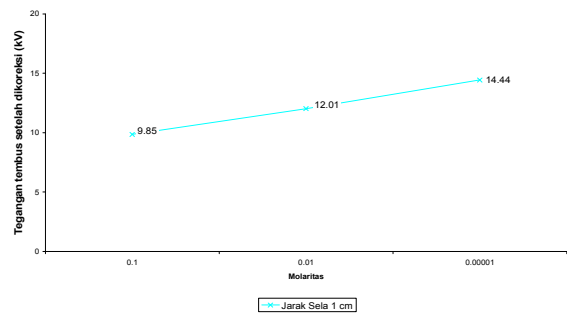
Gambar 4.4 Grafik tegangan tembus terhadap curah hujan pada jarak sela 1 cm untuk hujan asam dengan molaritas 0.1

Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila curah hujan semakin besar, maka tegangan tembus akan semakin kecil, karena dibutuhkan kuat medan listrik yang semakin kecil pula untuk dapat melepaskan elektron dari ikatannya yang pada gilirannya membuat nilai tegangan tembus juga semakin kecil. Hal ini dikarenakan karena dengan curah hujan yang semakin besar maka air hujan itu akan menjadi konduktif yang menghantarkan tegangan tembus, jadi semakin besar curah hujan maka tegangan tembus akan semakin kecil.

4.2.5 Analisa Molaritas Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

Berdasarkan gambar 4.3 dapat diketahui bahwa molaritas mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola kondisi hujan asam dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10^{-1} , 10^{-2} , 10^{-5} adalah 9,85 kV, 12,01 kV, 14,44 kV pada jarak sela 10 mm.



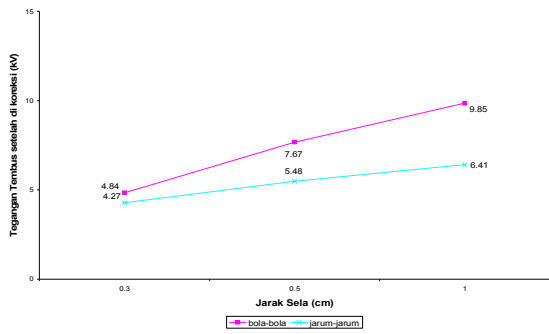
Gambar 4.5 Grafik tegangan tembus terhadap molaritas pada kondisi ujan asam dengan curah hujan 25 mm/menit pada jarak sela 1 cm

Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila molaritas semakin kecil, maka tegangan tembus akan semakin besar, karena semakin kecil molaritas dibutuhkan kuat medan listrik yang semakin besar pula untuk dapat melepaskan elektron dari ikatannya yang pada gilirannya membuat nilai tegangan tembus juga semakin besar. Hal ini dikarenakan karena dengan molaritas yang semakin besar maka air hujan itu akan menjadi konduktif yang menghantarkan tegangan tembus, jadi semakin kecil molaritas maka tegangan tembus akan semakin besar.

4.2.6 Analisa Bentuk Elektroda Terhadap Tegangan Tembus

Berdasarkan gambar 4.4 dapat diketahui bahwa bentuk elektroda mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.

Sebagai contoh pada pengujian elektroda bola-bola kondisi hujan asam dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10^{-1} adalah 4,84 kV, 7,67 kV, 9,85 kV. pada jarak sela 3mm, 5mm, 10 mm. Pada pengujian elektroda jarum-jarum kondisi hujan asam dengan curah hujan 25 ml/menit dan molaritas 10^{-1} adalah 4,27 kV, 5,48 kV, 6,41 kV, pada jarak sela 3mm, 5mm, 10mm.

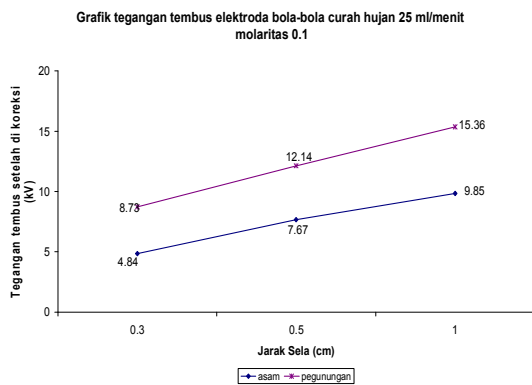


Gambar 4.6 Grafik tegangan tembus terhadap jenis elektroda pada kondisi hujan asam 25 mm/menit dengan molaritas 10^{-1}

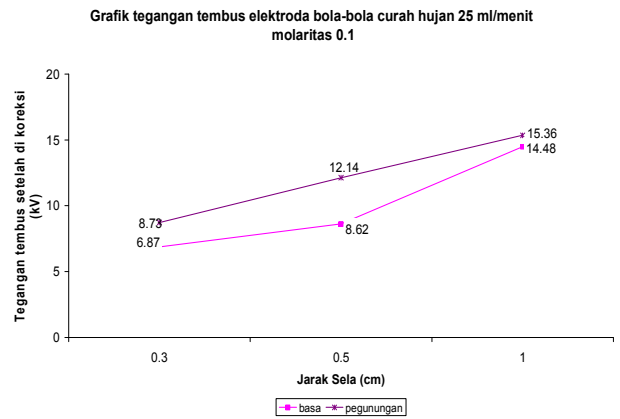
Hal ini dapat dianalisa bahwa elektroda jarum mempunyai penampang yang runcing jika dibandingkan dengan elektroda bola, pada material bahan yang sama komposisi jarum memungkinkan memiliki rapat muatan yang lebih sehingga untuk terjadinya proses tembus akan lebih mudah dibandingkan elektroda bola atau elektroda plat yang berdiameter hampir sama.

4.2.2 Analisa Jenis Hujan Terhadap Tegangan Tembus Setelah di Koreksi

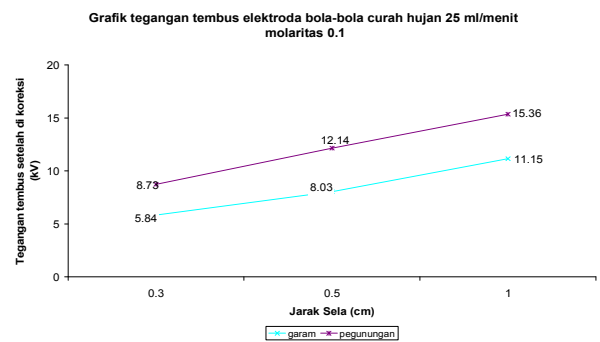
Berdasarkan gambar 4.5 sampai 4.7 dapat diketahui bahwa jenis hujan mempengaruhi besar nilai tegangan tembus pada saat terjadi hujan.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan tegangan tembus terhadap jenis hujan asam dan pegunungan elektroda bola-bola curah hujan 25 ml/menit molaritas 10^{-1}



Gambar 4.8 Grafik perbandingan tegangan tembus terhadap jenis hujan basa dan pegunungan elektroda bola-bola curah hujan 25 ml/menit molaritas 10^{-1}



Gambar 4.9 Grafik perbandingan tegangan tembus terhadap jenis hujan garam dan pegunungan elektroda bola-bola curah hujan 25 ml/menit molaritas 10^{-1}

Berdasarkan gambar 4.5 sampai 4.7 terlihat bahwa untuk jenis hujan pegunungan curah hujan 25 ml/menit dengan molaritas 0.1 maka tegangan tembusnya selalu lebih tinggi di bandingkan dengan jenis hujan asam, basa, garam, dan aquades. Hal ini di sebabkan karena tingkat konduktivitas jenis hujan pegunungan lebih rendah di bandingkan jenis hujan asam, basa, garam, aquades sehingga menyebabkan tegangan tembus jenis hujan pegunungan lebih tinggi.

V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pengujian tegangan tembus pada bahan isolasi udara dengan simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades. Pengujian dilaksanakan di laboratorium tegangan tinggi dengan menggunakan elektroda bola-bola dan elektroda jarum-jarum secara horizontal pada temperatur 26 - 30°C dengan kelembaban relative (RH) 60% -70% dan tekanan atmosfer 991 mbar dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh jarak sela. Semakin besar jarak sela maka semakin besar tegangan tembusnya.
2. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh konduktivitas. Semakin tinggi konduktivitas semakin besar tegangan tembusnya.
3. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh pH. Semakin tinggi pH semakin besar tegangan tembusnya.
4. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi molaritas. Semakin tinggi molaritas semakin kecil tegangan tembusnya.
5. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh bentuk elektroda. Untuk elektroda jarum-jarum tegangan tembusnya lebih kecil di bandingkan tegangan tembus elektroda bola-bola.
6. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh jenis hujan. Tegangan tembus untuk jenis hujan pegunungan lebih besar di bandingkan jenis hujan asam, basa, garam, dan aquades. Hal ini di pengaruhi tingkat konduktivitas jenis hujan.
7. Karakteristik tegangan tembus udara pada simulasi hujan dengan cairan yang dominan asam, basa, garam, air hujan pegunungan dan air aquades di pengaruhi oleh curah hujan, semakin besar curah hujan maka tegangan tembusnya semakin kecil.

5.2 Saran

Saran yang dapat dikemukakan bagi para pembaca dan peminat dalam bidang isolasi gas yang berupa udara, dapat meneruskan penelitian ini dengan berbagai jenis tegangan yang lain yaitu tegangan searah dan atau tegangan impuls.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abduh, Syamsir, "Dasar pembangkitan Dan Pengukuran ", Edisi Pertama, Salemba Teknika, Jakarta, 2001
2. Arismunandar, A, " Teknik Tegangan Tinggi Suplemen ", Ghalia, 1982
3. _____, " Teknik Tegangan Tinggi ", PT. Pradnya Paramita, Jakarta, 2001
4. <http://wida310186.wordpress.com/2007/01/26/hujan-asam/>
5. <http://www.balipost.co.id/>
6. http://id.wikipedia.org/wiki/hujan_asam
7. Kind, Dieter, " Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi " terjemahan K.T. Sirait, ITB, Bandung 1993
8. Naidu, M. S , et al, " High Voltage Engineering ", second edition, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1995
9. Retnowati, Priscilla, " Seribu Pena Kimia SMU kelas 2 ", Jilid 2, Erlangga, Jakarta, 1999
10. Schwenk, Klaus, "Operating Instruction PZTL Test Transformer Cylinder Type With Air Gap", HAEFELY High Voltage Test, 2002.
11. Sudjana, " Metoda Statistika ", edisi keenam, Tarsito, Bandung, 1996
12. Sulasno, " Dasar Teknik Konversi Energi Listrik Dan Sistem Pengaturan ", Universitas Diponegoro, Semarang, 2003
13. Syakur, Abdul, " Modul Praktikum Gejala Medan & Tegangan Tinggi ", Laboratorium Konversi Energi dan Sistem Tenaga Listrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik – UNDIP, Semarang, 2004
14. Jati, Suharso, " Pengaruh Kenaikan Temperatur Dan Kontaminasi Asap Terhadap Tegangan Tembus Pada Isolasi Gas Melalui Pengujian Menggunakan Elektroda Homogen Berbentuk Jarum ", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik – UNDIP, Semarang, 2006
15. Tobing, Bonggas L, "Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi", PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta 2003
16. _____, "Peralatan Tegangan Tinggi", PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta 2003
17. Voelker, David H et.al "Cliffs Quick Review Statistics", Pakar Raya Pustaka, Bandung
18. Wibowo, Arif, " Modul Praktikum Untuk Menguji Tegangan Tembus Udara Pada Temperatur dan Tekanan yang Bervariasi Menggunakan Elektroda Bola ", Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik – UNDIP, Semarang, 2007



Mukhamad Arif Winoto
(L2F304262)
Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro,
Fakultas Teknik universitas
Diponegoro Semarang dengan
pilihan Konsentrasi Tenaga Listrik

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Abdul Syakur, ST, MT
NIP. 132 231 132

Mochamad Facta, ST, MT
NIP. 132 231 134