

PENGUKURAN TEGANGAN TEMBUS DIELEKTRIK UDARA PADA BERBAGAI SELA DAN BENTUK ELEKTRODA DENGAN VARIASI TEMPERATUR SEKITAR

Sasmito Teguh Prihatnolo¹, Abdul Syakur, ST, MT², Mochammad Facta, ST, MT³

Teknik Elektro
Universitas Diponegoro
Semarang

Abstrak

Isolasi adalah hal yang paling penting dan tidak dapat dipisahkan pada peralatan tegangan tinggi. Isolasi ini berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar-penghantar tidak akan terjadi lompatan listrik atau percikan. Udara dalam kondisi normal (tekanan udara 1013 mBar dan temperatur 20°C) memiliki tegangan tembus tertentu terhadap tegangan tinggi bolak-balik. Bahan isolasi gas terutama udara merupakan bahan isolasi yang banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi karena udara pada keadaan yang ideal merupakan isolator yang sempurna dan juga paling banyak digunakan karena mudah, murah dan sederhana. Pada media isolasi udara peningkatan temperatur udara akan mempengaruhi penambahan energi yang dapat mempercepat pergerakan elektron-elektron di udara sehingga berakibat pada penurunan kekuatan dielektrik udara dan jarak sela antar penghantar yang bertegangan juga akan menentukan laju pergerakan elektron dalam dielektrik udara dalam fungsinya sebagai bahan isolasi.

Dalam pengujian ini kondisi temperatur ruang, kondisi diatas dan di bawah temperatur ruang diterapkan pada elektroda bola-bidang dan elektroda jarum-bidang dengan jarak sela yang berbeda, untuk melihat berapa besar pengaruh bentuk elektroda, temperatur, jarak sela dan polaritas tegangan terhadap kuat tembus dielektrik udara

Berdasarkan hasil pengukuran pada jarak sela yang berbeda maka didapatkan karakteristik peningkatan tegangan tembus udara akibat pengaruh jarak sela antar kedua elektroda. Hasil pengukuran pada polaritas yang berbeda diperoleh hasil bahwa pada elektroda yang lebih kasar, kecil dan runcing dengan polaritas positif akan lebih mudah melepaskan elektron. Hasil pengukuran pada temperatur yang berbeda maka didapatkan karakteristik penurunan tegangan tembus udara akibat pengaruh kenaikan temperatur. Hasil pengukuran maka didapatkan karakteristik penurunan tegangan tembus udara akibat bentuk elektroda bahwa pada elektroda yang lebih kasar, kecil dan runcing akan lebih mudah melepaskan elektron.

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Udara dan gas termasuk bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi karena biayanya lebih murah dibandingkan bahan isolasi yang lainnya. Isolasi dimaksudkan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar-penghantar yang bertegangan tidak terjadi lompatan listrik (*flashover*) atau percikan (*sparkover*).

Bahan isolasi gas terutama udara merupakan bahan isolasi yang banyak digunakan pada peralatan tegangan tinggi karena udara pada keadaan normal (udara yang ideal) merupakan isolator yang sempurna dan juga paling banyak digunakan karena murah, mudah dan sederhana. Menurut standart VDE (VDE 0433-2) bentuk elektroda yang digunakan dalam pengujian tegangan tembus gas adalah elektroda bola-bola. Untuk mengetahui pengaruh bentuk elektroda terhadap besarnya tegangan tembus pada isolasi udara perlu dilakukan pengujian pada bentuk elektroda yang lain. Bentuk elektroda yang dapat digunakan adalah elektroda bola-bidang dan jarum-bidang.

Namun pada kenyataannya, udara yang sesungguhnya tidak hanya terdiri dari molekul-molekul netral saja tetapi ada sebagian kecil didalamnya berupa ion-ion dan elektron-elektron bebas, yang akan mengakibatkan udara dan gas mengalirkan arus walaupun dalam kapasitas yang terbatas atau kecil. Jika gas dipanasi sampai suhu yang cukup tinggi, maka banyak atom netral akan memperoleh energi yang diperlukan untuk mengionisasikan atom-atom yang mereka bentur. Selain temperatur, jarak sela antar penghantar yang bertegangan juga akan menentukan laju pergerakan elektron dalam dielektrik

udara. Peningkatan temperatur akan mempengaruhi penambahan energi yang dapat mempercepat pergerakan elektron-elektron di udara sehingga berakibat pada penurunan kekuatan dielektrik udara dalam fungsinya sebagai bahan isolasi. Dan jarak sela yang semakin lebar akan menghambat laju pergerakan elektron sehingga diperlukan energi yang lebih besar untuk proses ionisasi.

Dalam pengukuran tegangan tembus dielektrik udara, dimaksudkan untuk mempelajari karakteristik isolasi udara terhadap tegangan yang diterapkan. Dengan mengetahui karakteristik tegangan tembusnya maka dapat diketahui seberapa besar kemampuan isolasi yang akan digunakan untuk mengisolasi suatu peralatan tegangan tinggi. Sehingga dapat digunakan untuk memilih jenis isolasi yang tepat untuk perlindungan dan tujuan dari isolasi itu sendiri dapat terpenuhi. Serta mengetahui berapa besar tegangan maksimum yang dapat diterapkan pada suatu peralatan sehingga peralatan tersebut dalam kondisi aman.

1.2. Tujuan

Tujuan penyusunan tugas akhir ini adalah :

- Mempelajari mekanisme tegangan tembus pada media isolasi udara.
- Mengamati dan mempelajari pengaruh jarak sela elektroda terhadap tegangan tembus pada isolasi udara.
- Mengamati dan mempelajari pengaruh polaritas tegangan terhadap tegangan tembus pada isolasi udara.
- Mengamati dan mempelajari pengaruh temperatur terhadap tegangan tembus pada isolasi udara.
- Mengamati dan mempelajari pengaruh bentuk elektroda terhadap tegangan tembus pada isolasi udara.

1.3. Pembatasan Masalah

Dalam tugas akhir ini diberikan beberapa pembatasan agar permasalahan yang akan dibahas menjadi terarah, pembatasan tersebut sebagai berikut:

- Pengujian dilakukan pada medan tidak seragam dengan menggunakan elektroda bola-bidang dan elektroda jarum-bidang, yang mana elektroda bola berdiameter 25 mm; elektroda plat dengan penampang berbentuk lingkaran, dengan penampang berdiameter 50 mm dan elektroda jarum dengan panjang jarum 50 mm dan ujung jarum membentuk sudut 30°, agar dapat diketahui perbandingan karakteristik tegangan tembus akibat pengaruh bentuk elektroda yang digunakan terhadap hasil pengujian menurut standar elektroda VDE, yaitu elektroda bola-bola untuk media isolasi udara[5].
- Pengujian dilakukan pada jarak sela 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, dan 20 mm, sehingga dapat diketahui karakteristik tegangan tembus pada jarak sela yang bervariasi. Dimana jarak sela standar menurut VDE 0433-2 adalah 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm, dan 50 mm yang pernah diujikan pada sela bola[5].
- Pengujian pada media isolasi udara dilakukan pada kondisi ruang dengan temperatur 30°C. Untuk mengetahui karakteristik tegangan tembus selain pada kondisi temperatur ruang dilakukan pengujian pada temperatur di atas dan di bawah temperatur ruang yaitu 40°C dan 20°C, agar dapat diketahui pengaruh temperatur udara terhadap tegangan tembus. Untuk isolasi udara menurut VDE 0433-2, keadaan udara atmosfer ialah $b = 1013$ mbar dan $v = 20^\circ\text{C}$ ($1 \text{ mbar} = 100 \text{ N} / \text{m}^2 = 0,75 \text{ Torr}$) [5]
- Tegangan yang diterapkan adalah tegangan AC dengan frekuensi 50 Hz
- Tekanan diabaikan karena pada saat pengujian tekanan belum diperhitungkan, yang mana tekanan disesuaikan dengan tekanan keadaan udara normal menurut VDE 0433-2 yaitu 1013 mbar.

II. Tegangan Tembus Dielektrik Udara

2.1. Proses Dasar Ionisasi

Ion merupakan atom atau gabungan atom yang memiliki muatan listrik, ion terbentuk apabila pada peristiwa kimia suatu atom unsur menangkap atau melepaskan elektron. Proses terbentuknya ion dinamai dengan ionisasi[9].

Dalam proses pelepasan listrik ada beberapa mekanisme pembangkitan atau kehilangan ion baik dalam bentuk tunggal maupun dalam kombinasi.

Proses dasar pelepasan dalam gas meliputi [9] :

- Pembangkitan ion dengan cara benturan (*collision*) elektron, fotoionisasi, ionisasi oleh benturan ion positif, ionisasi termal, pelepasan (*detachment*) elektron, ionisasi kumulatif dan efek γ sekunder.
- Kehilangan ion dengan cara penggabungan (*attachment*) elektron, rekombinasi dan difusi.

2.2. Ionisasi karena Benturan Elektron

Jika gradien tegangan yang ada cukup tinggi maka jumlah elektron yang diionisasikan akan lebih banyak dibandingkan jumlah ion yang ditangkap menjadi molekul oksigen. Sehingga tiap-tiap elektron yang mengalami ionisasi tersebut kemudian akan berjalan menuju anoda secara kontinu, sambil membuat benturan-benturan yang kemudian akan membebaskan lebih banyak elektron. Ionisasi karena benturan ini mungkin

merupakan proses yang paling penting dalam kegagalan udara atau gas.

Sebuah elektron tunggal yang dibebaskan oleh pengaruh luar pada proses ionisasi tersebut akan menimbulkan banjir elektron (*avalanche*), yaitu kelompok elektron yang bertambah secara cepat dan bergerak maju meninggalkan ion positif pada lintasannya.

Proses pelepasan (*discharge*) pada udara dan gas dapat dibagi menjadi 2 bagian [8,9] yaitu pelepasan bertahan sendiri (*self sustaining discharge*) dan pelepasan tak bertahan sendiri (*non sustaining discharge*). Dalam hal ini mekanisme kegagalan gas dan udara adalah suatu bentuk transisi dari keadaan pelepasan tak bertahan menuju pelepasan bertahan sendiri.

2.3. Proses-Proses Dasar dalam Kegagalan Gas

Mekanisme kegagalan dalam udara yang disebut percikan (*spark breakdown*) adalah peralihan dari peluahan tak bertahan sendiri ke berbagai jenis peluahan yang bertahan sendiri. Sifat mendasar dari kegagalan percikan ini adalah tegangan pada (*across*) sela antara elektroda akan menurun karena adanya proses yang menghasilkan konduktivitas tinggi antara anoda dan katoda.

Ada dua jenis mekanisme dasar yang berperan yaitu [9]:

- Mekanisme primer, yang memungkinkan terjadinya banjir (*avalanche*) elektron.
- Mekanisme sekunder, yang memungkinkan terjadinya peningkatan banjir (*avalanche*) elektron.

Pada mekanisme primer, proses yang terpenting adalah katoda. Dalam hal ini katoda akan melepas (*discharge*) elektron, yang akan mengawali terjadinya suatu kegagalan percikan (*spark breakdown*). Sehingga untuk hal ini elektroda yang mempunyai potensial yang lebih rendah, yaitu katoda akan menjadi elektroda yang melepaskan elektron.

Adapun fungsi katoda selaku elektroda pelepas elektron adalah [9] :

- Menyediakan elektron awal yang harus dilepaskan
- Mempertahankan pelepasan (*discharge*)
- Menyelesaikan pelepasan (*discharge*)

2.4. Mekanisme Kegagalan Townsend

Pada mekanisme primer, medan listrik yang ada di antara elektroda akan menyebabkan elektroda 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, sehingga elektron bebas tambahan yang terjadi dalam lapisan dx adalah $dn_e = \alpha \cdot n_e \cdot dx$

Ternyata jumlah elektron bebas dn_e yang bertambah akibat proses ionisasi sama besarnya dengan jumlah ion positif dn_+ baru yang dihasilkan, sehingga $dn_e = dn_+ = \alpha \cdot n_e \cdot dx = \alpha \cdot n_e \cdot (v_d \cdot dt)$ (2.1)

dn_+ = jumlah ion positif baru yang dihasilkan.

n_e = jumlah total elektron.

v_d = kecepatan keluyur elektro.

Pada medan uniform (α konstan, dengan syarat mula) $n_e = n_0$, $x = 0$ sehingga $n_e = n_0 \cdot \epsilon^{\alpha \cdot x}$. Jumlah elektron yang menumbuk anoda per detik sejauh d dari katoda sama dengan jumlah ion positif : $n_+ = n_0 \cdot \epsilon^{\alpha \cdot x}$ Selanjutnya jumlah elektron yang meninggalkan katoda dan mencapai anoda :

$$n_e = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$\text{atau } I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma (e^{\alpha d} - 1)} \dots\dots\dots (2.3)$$

dimana :

I_0 : arus yang meninggalkan katoda

d : jarak celah

Mekanisme Townsend menjelaskan tentang fenomena kegagalan yang hanya terjadi pada tekanan yang rendah dibawah tekanan atmosfer. Pada tekanan diatas tekanan atmosfer berlaku mekanisme strimer yang mempersyaratkan adanya distorsi medan karena muatan ruang.

2.5. Mekanisme Kegagalan Streamer

Mekanisme strimer (*streamer*) menjelaskan pengembangan pelepasan percikan langsung dari banjiran tunggal di mana muatan ruang (*space charge*) yang terjadi karena banjiran itu sendiri mengubah banjiran tersebut menjadi strimer plasma. Sesudah itu kehantaran naik dengan cepat dan kegagalan terjadi dalam alur (*channel*) banjiran ini.

Ciri utama teori kegagalan strimer, di samping proses ionisasi benturan (α) Townsend, adalah postulasi sejumlah besar fotoionisasi molekul gas dalam ruang didepan strimer dan pembesaran medan listrik setempat oleh muatan ruang ion pada ujung strimer, dimana ruangan ini menimbulkan distorsi medan dalam sela. Ion-ion positif dapat dianggap stasioner dibandingkan dengan elektron-elektron yang bergerak lebih cepat, dan banjiran terjadi dalam sela dalam bentuk awan elektron yang membelakangi muatan ruang ion positif.

Ada dua jenis strimer [9] :

1. Positif, atau strimer yang mengarah ke katoda
2. Negatif, atau strimer yang menuju ke anoda

2.6. Kegagalan dalam Medan Tak-Seragam

Didalam medan yang tak-seragam, misalnya dalam sela titik-bidang, sela bola-bidang atau silinder koaksial, medan yang diterapkan dan koefisien *Townsend* pertama berubah sepanjang sela. Dan daraban (*multiplication*) elektroda ditentukan oleh integral sepanjang lintasan. Pada tekanan rendah kriteria *Townsend* mempunyai bentuk [8,9]:

$$\gamma \left[\varepsilon^0 - 1 \right] = 1 \dots\dots\dots (2.4)$$

yang dapat ditulis sebagai :

$$\int_0^d \alpha \cdot dx = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \dots\dots\dots (2.5)$$

di mana d = sepanjang sela

2.7. Faktor Koreksi Keadaan Udara

Tabel-tabel normalisasi atau standarisasi menyatakan bahwa untuk macam alat berlaku suatu tegangan lompatan api tertentu pada keadaan standar. Misalnya, menurut Japanese Industri Standard (JIS) C 3801 dan Japanese Electrotechnical Committe (JEC) Standar 106 keadaan standar adalah [10]

Tekanan barometer760 mm Hg (1013 mbar)

Suhu sekeliling 20°C

Kelembaban mutlak.....11 gram/m³

Oleh karena tegangna lompatan api kering selalu dipengaruhi oleh keadaan udara, maka untuk dapat membandingkan hasil-

hasil pengujian dengan tabel-tabel normalisasi yang ada, diperlukan rumus-rumus yang dapat merubah hasil-hasil tersebut menjadi dalam keadaan standar. Hal ini diperlukan untuk dapat mengetahui apakah spesimen yang diuji memenuhi syarat atau tidak.

Untuk mengoreksi hasil pengujian terhadap tekanan dan suhu dipakai rumus :

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

dimana

V_S = tegangan lompatan pada keadaan standar

V_B = tegangan lompatan yang diukur pada keadaan sebenarnya

d = kepadatan udara relatif (relative air density)

$$= \frac{b_B}{760} \times \frac{273 + 20}{273 + t_B} = \frac{0,386 \cdot b_B}{273 + t_B} \dots\dots\dots (2.7)$$

sedangkan b_B = tekanan udara pada waktu pengujian (mm Hg) dan t_B = suhu keliling pada waktu pengujian (°C). Sebagai koreksi terhadap kelembaban udara mutlak dipakai rumus empiris :

$$V_S = V_B \cdot k_H \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

V_S = Tegangan tembus standar (kV)

V_B = Tegangan tembus yang diukur pada keadaan sebenarnya (kV)

k_H = Faktor koreksi

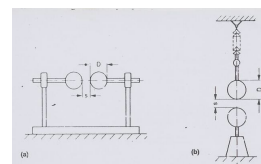
2.8. Standarisasi Menurut VDE pada Media Isolasi Udara.

Jika suatu tegangan yang diterapkan telah melampaui tegangan tembus statis, maka dalam waktu beberapa μs , sela percik akan tembus. Selama selang waktu tersebut puncak tegangan jaringan dapat dianggap konstan. Oleh karena itu tembus dalam gas selalu terjadi pada puncak tegangan bolak-balik frekuensi rendah. Dalam gambar 2.2 ditunjukkan dua susunan sela bola untuk pengukuran. Susunan horisontal digunakan untuk diameter $D < 50$ cm dengan rentang tegangan yang lebih rendah sedangkan untuk diameter yang lebih besar digunakan susunan vertikal yang mengukur besar tegangan terhadap bumi.

Sejumlah baku (VDE 0433-2; IEC- Publ.52; BS 358) telah menyatakan jarak bebas yang minimum serta nilai tegangan tembus pada kondisi baku ($b = 1013$ mbar, $v = 20^\circ C$) untuk berbagai diameter bola D sebagai fungsi besar sela s [5] :

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

Kelembaban udara tidak mempengaruhi tegangan tembus dari sela bola.



Gambar 2.1 Sela bola untuk mengukur tegangan
(a) susunan mendatar (b) susunan tegak

Nilai-nilai tegangan tembus U_{do} menurut VDE 0433-2 pada keadaan atmosferi ($b = 1013$ mbar dan $T = 293$ K) adalah sebagai berikut [5]:

s dalam mm	10	20	30	40	50
U_{do} dalam kV	31,7	59	84	105	123

Grafik tegangan tembus dengan sela bola pada media isolasi udara dapat dilihat pada gambar 2.2 sebagai berikut :



Gambar 2.2 Grafik tegangan tembus pada media isolasi udara menurut VDE

III Sistem Pengukuran Tegangan Tembus Dielektrik Udara

3.1. Pendahuluan

Udara dan gas termasuk bahan isolasi yang banyak digunakan untuk mengisolasi peralatan listrik tegangan tinggi. Isolasi dimaksudkan untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan, sehingga antara penghantar-penghantar yang bertegangan tidak terjadi lompatan listrik (*flashover*) atau percikan (*sparkover*). Pada tegangan yang semakin tinggi sudah barang tentu diperlukan bahan isolasi yang mempunyai kuat isolasi yang lebih tinggi pula. Jika tegangan yang diterapkan pada penghantar telah mencapai tingkat ketinggian tertentu, maka bahan isolasi tersebut akan mengalami pelepasan muatan (*lucutan, discharge*), yang merupakan suatu bentuk kegagalan listrik. Kegagalan ini menyebabkan hilangnya tegangan dan mengalirnya arus dalam bahan isolasi.

Peralatan dan Bahan

Adapun peralatan yang digunakan adalah : sumber tegangan ac 220 Volt, kit pembangkit tegangan tinggi ac, thermometer, elemen pemanas 250 watt yang digunakan untuk memanaskan temperatur ruang hingga temperatur 40°C, es batu digunakan untuk mendinginkan temperatur ruang hingga temperatur 20°C, boxs, kipas angin (*fan*), elektroda bola (aluminium), elektroda jarum (aluminium), elektroda bidang (*stainles steel*), konektor, dudukan elektroda, akrilik (dengan ketebalan 2 mm, 3 mm, 5 mm, 10 mm) untuk mengukur jarak sela antar kedua elektroda, regulator tegangan, resistor 20 Mohm, kapasitor 100 pF 100 kV.

3.2.1. Boxs dan Perlengkapannya

Boxs yang digunakan adalah terbuat dari bahan kayu yang mempunyai dimensi panjang 60cm, lebar 20 cm dan tinggi 30 cm dan dilengkapi kipas angin, elemen pemanas serta es batu. Boxs, es batu, elemen pemanas dan kipas angin digunakan untuk mengkondisikan temperatur udara pada kondisi di bawah temperatur ruang dan kondisi di atas temperatur ruang. Untuk memperoleh temperatur di bawah temperatur ruang (kondisi basah) maka diperlukan es batu yang dimasukkan ke dalam box dan menghidupkan kipas angin yang ada di dalamnya agar temperatur ruang dapat merata diseluruh ruangan boxs tersebut. Begitu pula halnya untuk memperoleh temperatur di atas temperatur ruang (kondisi kering) dengan cara meletakkan elemen pemanas di dalam boxs dan mengatur tegangan yang diterapkan pada elemen pemanas tersebut dengan menggunakan regulator tegangan untuk memperoleh temperatur yang diinginkan.

3.2.2. Elektroda Jarum

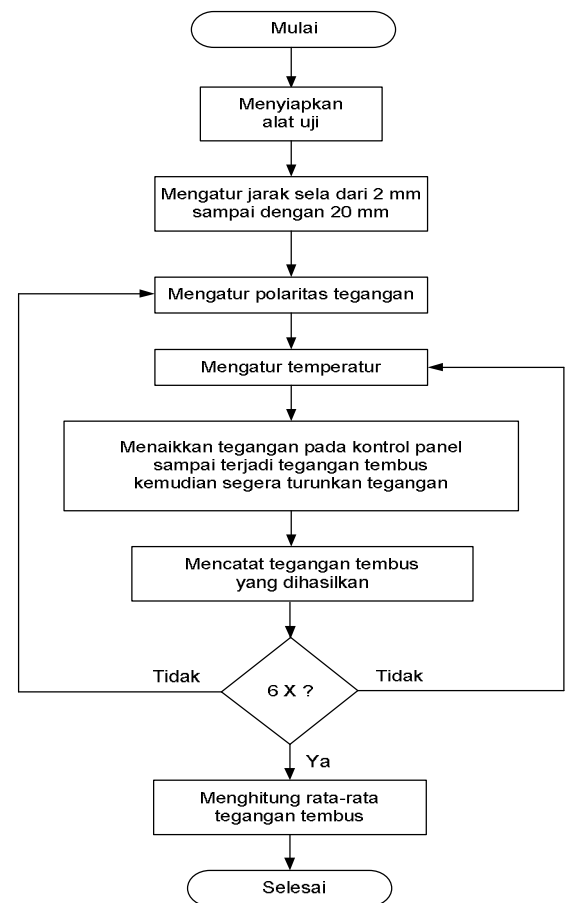
Adapun elektroda jarum digunakan untuk pengukuran tegangan tembus dielektrik udara pada elektroda jarum-plat (bidang). Elektroda jarum dibuat dengan menggunakan bahan Aluminium dengan panjang 5 mm dan mempunyai sudut 30°.

3.2.3. Elektroda Plat (Bidang)

Adapun elektroda bidang digunakan untuk pengukuran tegangan tembus dielektrik udara pada elektroda jarum-plat (bidang) dan elektroda bola-plat (bidang). Elektroda plat (bidang) dibuat dengan menggunakan bahan stainless steel dengan diameter 50 mm dan mempunyai ketebalan 10 mm.

3.4. Teknik Pengukuran Tegangan Tembus

Pengukuran tegangan tembus bertujuan untuk mengamati karakteristik tegangan tembus dielektrik udara pada berbagai temperatur dan jarak sela yang berbeda dengan menggunakan elektroda bola-bidang dan elektroda jarum-bidang. Pengukuran dilakukan dengan langkah-langkah sebagaimana diuraikan dalam flowchart sebagai berikut :



Gambar 3.1 Diagram alir proses pengukuran tegangan tembus pada isolasi udara

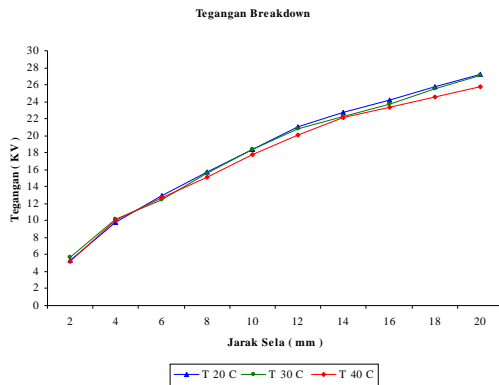
IV Hasil dan Analisa

4.1. Tegangan Tembus pada Elektroda Bola- Bidang

Berdasarkan hasil pengukuran di laboratorium yang dilakukan dengan menggunakan elektroda bola-bidang pada temperatur 20°C, temperatur 30°C, dan temperatur 40°C maka diperoleh data seperti dapat terlihat dalam tabel dan gambar sebagai berikut :

Tabel 4.1
Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas positif – negatif pada elektroda bola-bidang

Jarak Sela (mm)	Tegangan Rata-Rata (KV)		
	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)
	Temperatur 20°C	Temperatur 30°C	Temperatur 40°C
2	3,262	2,619	2,960
4	4,436	4,214	4,163
6	5,443	4,939	4,774
8	7,898	7,280	5,513
10	9,682	9,398	6,696
12	12,123	11,420	8,233
14	12,883	12,736	9,723
16	14,480	13,312	11,365
18	15,912	15,334	12,508
20	17,435	16,310	13,973

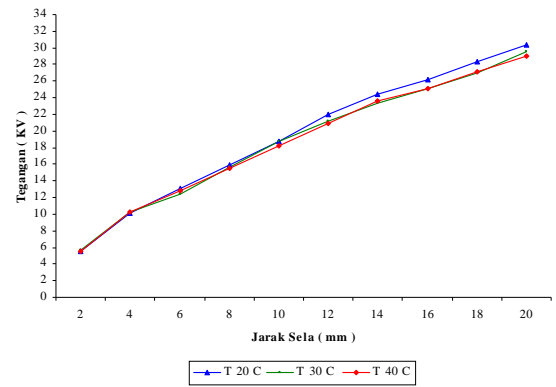


Gambar 4.1 Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas positif – negatif pada elektroda bola-bidang

Tabel 4.2
Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas negatif-positif pada elektroda bola-bidang

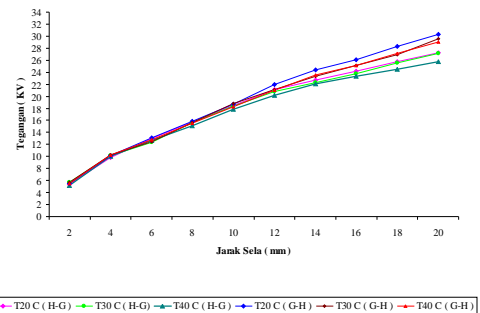
Jarak Sela (mm)	Tegangan Rata-Rata (KV)		
	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)
	Temperatur 20°C	Temperatur 30°C	Temperatur 40°C
2	5,485	5,683	5,491
4	10,169	10,192	10,205
6	13,045	12,430	12,757
8	15,862	15,630	15,505
10	18,715	18,752	18,233
12	21,982	21,152	20,965
14	24,418	23,348	23,553
16	26,130	25,092	25,097
18	28,310	26,920	27,105
20	30,327	29,596	29,023

Tegangan Breakdown



Gambar 4.2. Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas negatif-positif untuk elektroda bola-bidang

Tegangan Breakdown



Gambar 4.3 Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas positif-negatif dan polaritas negatif-positif pada elektroda bola-bidang

Gambar 4.1 dan gambar 4.2 menunjukkan karakteristik tegangan sebagai fungsi jarak sela. Dari gambar tersebut dapat diketahui karakteristik tegangan tembus cenderung mengalami kenaikan seiring dengan lebarnya jarak sela, semakin lebar jarak sela maka semakin besar pula tegangan tembusnya. Demikian halnya berlaku pada ketiga kondisi temperatur. Hal ini disebabkan jika di antara elektroda diterapkan suatu tegangan V, maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu. Karena adanya medan listrik tersebut, maka elektron-elektron bebas yang ada di udara akan mendapatkan energi yang cukup kuat untuk menimbulkan proses ionisasi. Jika jarak sela antar elektroda itu kecil maka energi yang diperlukan untuk proses ionisasi juga kecil, dan sebaliknya jika jarak sela semakin besar maka energi yang diperlukan untuk proses ionisasi akan semakin besar. Dengan demikian maka semakin besar jarak sela maka energi yang diperlukan semakin besar sehingga tegangan yang diterapkan juga akan semakin besar pula.

Dari grafik teoritis hubungan antara tegangan tembus dengan jarak sela berdasarkan standart VDE 0433-2 dapat diketahui bahwa tegangan tembus cenderung mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jarak sela. Hasil pengujian tegangan tembus dengan jarak sela pada udara cenderung mengikuti grafik teoritis berdasarkan standart.

Perbedaan polaritas tegangan yang diterapkan juga mempengaruhi karakteristik tegangan tembus yang terjadi. Dimana tegangan tembus pada polaritas negatif-positif nilainya lebih besar dari pada tegangan tembus pada polaritas positif-negatif.

Perbedaan ini dapat dijelaskan karena pada saat elektroda bola mendapat polaritas negatif, maka energi awal yang diterima oleh elektroda plat (bidang) akan terlebih dahulu berusaha melepaskan elektron-elektron yang ada pada elektroda plat (bidang). Karena elektroda plat (bidang) yang digunakan mempunyai penampang yang lebih besar dari pada elektroda bola, maka elektroda plat (bidang) akan lebih sulit melepaskan elektron. Karena tegangan yang digunakan untuk pengukuran adalah tegangan bolak-balik (ac), maka elektroda bola juga akan mendapatkan energi dari siklus tegangan balik. Sehingga elektroda bola juga mendapatkan cukup energi untuk melepaskan elektron, untuk mengawali proses ionisasi. Elektron-elektron yang ada pada elektroda bola akan bergerak menuju elektroda plat (bidang). Dengan adanya energi awal yang terserap didalam elektroda plat (bidang) maka dibutuhkan tegangan yang lebih besar pada elektroda bola untuk terjadinya tembus (*breakdown*).

Dan pada saat elektroda bola mendapatkan polaritas positif maka elektroda bola akan langsung mendapatkan energi awal yang lebih besar, karena elektroda bola secara geometris mempunyai penampang yang lebih kecil dari pada plat (bidang) sehingga elektron-elektron pada elektroda bola akan lebih mudah melepaskan elektron untuk proses ionisasi

Dengan temperatur yang berbeda baik pada polaritas positif-negatif maupun polaritas negatif-positif seperti terlihat pada gambar 4.3 telah menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur udara di sekitar elektroda pengukuran, maka untuk terjadi tegangan tembus (*breakdown*) lebih mudah atau tegangan tembusnya lebih kecil. Demikian berlaku pada ketiga kondisi temperatur. Hal ini disebabkan karena pada temperatur yang rendah elektron-elektron di udara akan mendapatkan sedikit energi termal dari udara sekitar, sedangkan pada temperatur yang tinggi maka elektron-elektron yang bergerak bebas di udara akan mendapatkan tambahan energi termal dari luar. Karena elektron-elektron mendapatkan tambahan energi maka molekul-molekul gas yang bergerak di udara akan bergerak dengan kecepatan tinggi akibat temperatur yang tinggi.

Pada umumnya istilah ionisasi termal mencakup hal-hal sebagai berikut [8,9] :

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

Untuk menjelaskan pengaruh temperatur pada tegangan tembus digunakan faktor koreksi keadaan udara. Oleh karena tegangan lompatan api kering selalu dipengaruhi oleh keadaan udara, maka untuk membandingkan hasil-hasil pengujian dengan tabel-tabel normalisasi yang ada, diperlukan rumus-rumus yang dapat merubah hasil-hasil tersebut menjadi dalam keadaan standar.

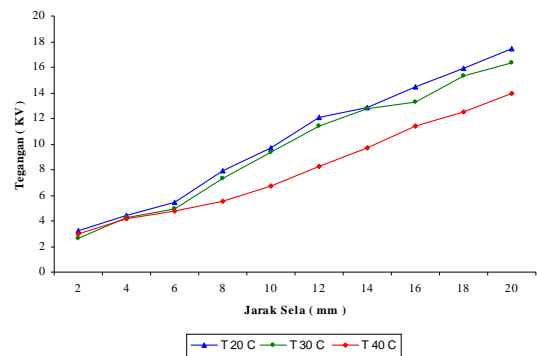
4.2. Tegangan Tembus pada Elektroda Jarum-Bidang

Berdasarkan hasil pengukuran di laboratorium yang dilakukan dengan menggunakan elektroda jarum-bidang pada temperatur 20°C, temperatur 30°C, temperatur 40°C maka diperoleh gambar sebagai berikut :

Tabel 4.3
Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C, dan T40°C dengan polaritas positif – negatif pada elektroda jarum-bidang

Jarak Sela (mm)	Tegangan Rata-Rata (KV)		
	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)	Polaritas Positif - Negatif (High - Ground)
	Temperatur 20°C	Temperatur 30°C	Temperatur 40°C
	2	3,262	2,619
4	4,436	4,214	4,163
6	5,443	4,939	4,774
8	7,898	7,280	5,513
10	9,682	9,398	6,696
12	12,123	11,420	8,233
14	12,883	12,736	9,723
16	14,480	13,312	11,365
18	15,912	15,334	12,508
20	17,435	16,310	13,973

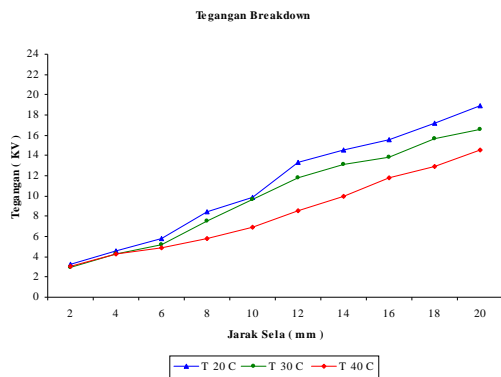
Tegangan Breakdown



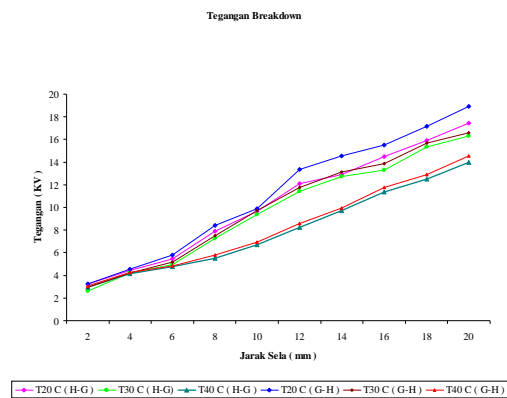
Gambar 4.4 Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas positif – negatif pada elektroda jarum-bidang

Tabel 4. 4
Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas negatif-positif pada elektroda jarum-bidang

Jarak Sela (mm)	Tegangan Rata-Rata (KV)		
	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)	Polaritas Negatif - Positif (Ground - High)
	Temperatur 20°C	Temperatur 30°C	Temperatur 40°C
	2	3,264	2,950
4	4,552	4,226	4,235
6	5,806	5,183	4,835
8	8,392	7,515	5,822
10	9,875	9,707	6,927
12	13,335	11,768	8,578
14	14,537	13,148	9,930
16	15,528	13,844	11,767
18	17,162	15,664	12,883
20	18,928	16,606	14,530



Gambar 4.5 Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas negatif-positif pada elektroda jarum-bidang



Gambar 4.6 Tegangan tembus pada T 20°C, T 30°C dan T 40°C dengan polaritas positif-negatif dan polaritas negatif-positif pada elektroda jarum-bidang

Gambar 4.4 dan gambar 4.5 menunjukkan karakteristik tegangan sebagai fungsi jarak sela. Dari gambar tersebut dapat diketahui karakteristik tegangan tembus cenderung mengalami kenaikan seiring dengan lebarnya jarak sela, semakin lebar jarak sela maka semakin besar pula tegangan tembusnya. Demikian halnya berlaku pada ketiga kondisi temperatur. Hal ini disebabkan jika di antara elektroda diterapkan suatu tegangan V , maka akan timbul suatu medan listrik E yang mempunyai besar dan arah tertentu. Karena adanya medan listrik tersebut, maka elektron-elektron bebas yang ada di udara akan mendapatkan energi yang cukup kuat untuk menimbulkan proses ionisasi. Jika jarak sela antar elektroda itu kecil maka energi yang diperlukan untuk proses ionisasi juga kecil, dan sebaliknya jika jarak sela semakin besar maka energi yang diperlukan untuk proses ionisasi akan semakin besar. Dengan demikian maka semakin besar jarak sela maka energi yang diperlukan semakin besar sehingga tegangan yang diterapkan juga akan semakin besar pula.

Dari grafik teoritis hubungan antara tegangan tembus dengan jarak sela berdasarkan standart VDE 0433-2 dapat diketahui bahwa tegangan tembus cenderung mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jarak sela. Hasil pengujian tegangan tembus dengan jarak sela pada udara cenderung mengikuti grafik teoritis berdasarkan standart.

Perbedaan polaritas tegangan yang diterapkan juga mempengaruhi karakteristik tegangan tembus yang terjadi.

Dimana tegangan tembus pada polaritas negatif-positif nilainya lebih besar dari pada tegangan tembus pada polaritas positif-negatif.

Perbedaan ini dapat dijelaskan karena pada saat elektroda jarum mendapat polaritas negatif, maka energi awal yang diterima oleh elektroda plat (bidang) akan terlebih dahulu berusaha melepaskan elektron-elektron yang ada pada elektroda plat (bidang). Karena elektroda plat (bidang) yang digunakan mempunyai penampang yang lebih besar dari pada elektroda jarum, maka elektroda plat (bidang) akan lebih sulit melepaskan elektron. Karena tegangan yang digunakan untuk pengukuran adalah tegangan bolak-balik (ac), maka elektroda jarum juga akan mendapatkan energi dari siklus tegangan balik. Sehingga elektroda jarum juga mendapatkan cukup energi untuk melepaskan elektron, untuk mengawali proses ionisasi. Elektron-elektron yang ada pada elektroda jarum akan bergerak menuju elektroda plat (bidang). Dengan adanya energi awal yang terserap didalam elektroda plat (bidang) maka dibutuhkan tegangan yang lebih besar pada elektroda jarum untuk terjadinya tembus (*breakdown*).

Dan pada saat elektroda jarum mendapatkan polaritas positif maka elektroda jarum akan langsung mendapatkan energi awal yang lebih besar, karena secara geometri elektroda jarum mempunyai ujung yang lebih runcing dan penampang yang lebih kecil dari pada elektroda plat, maka elektroda jarum mempunyai rapat muatan yang lebih besar sehingga elektron-elektron pada ujung elektroda jarum akan lebih mudah melepaskan elektron untuk proses ionisasi. Karena untuk proses ionisasinya lebih mudah maka dibutuhkan energi yang lebih kecil sehingga tegangan yang diterapkannya pun juga akan lebih kecil pula.

Dengan temperatur yang berbeda baik pada polaritas positif-negatif maupun polaritas negatif-positif seperti terlihat pada gambar 4.6 telah menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur udara di sekitar elektroda pengukuran, maka untuk terjadi tegangan tembus (*breakdown*) lebih mudah atau tegangan tembusnya lebih kecil. Demikian berlaku pada ketiga kondisi temperatur. Hal ini disebabkan karena pada temperatur yang rendah elektron-elektron di udara akan mendapatkan sedikit energi termal dari udara sekitar, sedangkan pada temperatur yang tinggi maka elektron-elektron yang bergerak bebas di udara akan mendapatkan tambahan energi termal dari luar. Karena elektron-elektron mendapatkan tambahan energi maka molekul-molekul gas yang bergerak di udara akan bergerak dengan kecepatan tinggi akibat temperatur yang tinggi.

Pada umumnya istilah ionisasi termal mencakup hal-hal sebagai berikut [8,9] :

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

Untuk menjelaskan pengaruh temperatur pada tegangan tembus digunakan faktor koreksi keadaan udara. Oleh karena tegangan lompatan api kering selalu dipengaruhi oleh keadaan udara, maka untuk membandingkan hasil-hasil pengujian dengan tabel-tabel normalisasi yang ada, diperlukan rumus-rumus yang dapat merubah hasil-hasil tersebut menjadi dalam keadaan standar. Hal ini diperlukan untuk mengetahui apakah spesimen yang diuji memenuhi syarat atau tidak.

4.3. Perbandingan Tegangan Tembus pada Elektroda Bola - Bidang dengan Tegangan Tembus pada Elektroda Jarum – Bidang

Untuk melihat lebih jauh karakteristik tegangan tembus pada medan yang tidak seragam. Maka kita dapat membandingkan studi laboratorium yang dilakukan pada masing-masing pengukuran.

Perbedaan nilai tegangan tembus pada elektroda bola-bidang dan elektroda jarum-bidang disebabkan karena bentuk elektrodanya. Pada elektroda jarum-bidang yang mana secara geometri elektroda jarum mempunyai ujung yang runcing sehingga rapat muatannya lebih besar maka elektroda jarum akan lebih mudah melepaskan elektron dan memerlukan energi yang lebih kecil untuk proses ionisasi, sehingga untuk terjadinya tembus lebih mudah. Sedangkan pada elektroda bola yang mempunyai permukaan halus dan penampang yang lebih besar maka akan lebih sulit melepaskan elektron sehingga diperlukan energi yang lebih besar untuk mengawali proses ionisasi. Dengan demikian semakin kecil, kasar dan runcing bentuk elektrodanya maka energi yang diperlukan semakin kecil sehingga tegangan yang diterapkan juga akan semakin kecil. Dan sebaliknya semakin besar dan halus bentuk elektrodanya maka energi yang diperlukan semakin besar sehingga tegangan yang diterapkan juga akan semakin besar pula.

V. Kesimpulan dan Saran

5.1. KESIMPULAN

Dari hasil pengukuran tegangan tembus dielektrik udara pada berbagai sela dan bentuk elektroda dengan variasi perbedaan temperatur sekitar, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Semakin lebar jarak sela antar kedua elektrodanya maka nilai tegangan tembus akan semakin tinggi karena dengan semakin lebar jarak selanya secara umum membuat elektron-elektron akan semakin sulit bergerak untuk proses ionisasi menuju anoda jika energinya tidak mencukupi.
2. Untuk hasil pengukuran pada polaritas yang berbeda maka didapatkan karakteristik penurunan tegangan tembus udara, yang mana pada elektroda yang lebih kasar, kecil dan runcing dengan polaritas positif akan lebih mudah melepaskan elektron akibat pergerakan elektron hanya memerlukan sedikit energi untuk membantu elektron mengalami proses ionisasi.
3. Akibat kenaikan temperatur disekitar elektroda maka nilai tegangan tembus udara semakin kecil karena temperatur yang tinggi membuat banyak elektron-elektron akan memperoleh energi termal, yang mana energi tersebut akan sangat membantu elektron-elektron mengalami proses ionisasi.
4. Pada medan yang tidak seragam bentuk elektroda memberikan kontribusi pada pelepasan elektron-elektron dimana elektroda yang mempunyai permukaan yang kasar, runcing, dan berdimensi kecil akan lebih mudah melepaskan elektron untuk mengawali proses terjadinya ionisasi.

5.2. SARAN

Saran yang dapat dikemukakan bagi para pembaca dan peminat dalam bidang isolasi udara, dapat meneruskan

penelitian ini dengan menggunakan bentuk elektroda setengah bola, bola, beji, plat (bidang), jarum dengan dimensi yang berbeda, bahan isolasi dan kondisi yang berbeda serta tingkat kekasaran yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

1. Abdul Syakur, Suwarno, “*Pengukuran Partial Discharge pada Void Menggunakan Elektroda Metode II CIGRE pada Tegangan Berbeda*” Majalah Ilmiah Teknik Elektro-ITB, Vol. 7, No. 2-Agustus 2001
2. Abdul Syakur, “ *Modul Praktikum Gejala Medan & Tegangan Tinggi* “, Laboratorium Konversi Energi dan Sistem Tenaga Listrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik – UNDIP, Semarang, 2004
3. Bogas L. Tobing, “ *Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi* “, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2003
4. J. Alexander Lesil, D. Felix Siahaan, “ *Pengaruh Cahaya Ultrafiolet Terhadap Kuat Tembus Dielektrik Udara* “, Seminar Nasional & Workshop Teknik Tegangan Tinggi IV, 13 – 14 November 2001
5. Kind Dieter, “*Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi* “ terjemahan K.T. Sirait, ITB, Bandung 1993
6. Kind Dieter. dan Karner Hermann “*High-Voltage Insulation Technology* “ terjemahan Narayana Rao, Madras, 1985
7. Kuffel, E. dan Abdullah, M.,” *High-Voltage Engeneering* “, Pergamon Press, 1970
8. M. S Naidu, et.al, “ *High Voltage Engeneering*”, Second edition, Tata McGraw-Hill Publising Company Limited, New Delhi, 1995
9. Prof. Dr. A. Arismunandar , “ *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*” Ghalia Indonesia
10. Prof. Dr. Artono Arismunandar , “ *Teknik Tegangan Tinggi*” PT. Pratnya Paramita, Jakarta, 2001
11. Syamsir Abduh, “ *Teori Kegagalan Isolasi* “, Universitas Trisakti, Jakarta, 2003
12. Tadjudin, “ *Partial Discharge dan Kegagalan Bahan Isolasi* “, Elektro Indonesia, Juni 1998, edisi 13

Sasmito Teguh Prihatnolo
(**L2F302524**) 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

Mochammad Facta, ST, MT
NIP 132.231.134