

**PENGARUH HETEROGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP
KEGAGALAN ISOLASI MINYAK KELAPA SAWIT TERKONTAMINASI**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

STYO BUDI UTOMO

Nim. 0510630097-63

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2010**

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH HETEROGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP
KEGAGALAN ISOLASI MINYAK KELAPA SAWIT TERKONTAMINASI**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

STYO BUDI UTOMO

Nim. 0510630097-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT.
NIP. 19600701 199002 1 001

Dosen Pembimbing II

Ir. Soemarwanto, MT.
NIP. 19500715 198003 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH HETEROGENITAS MEDAN LISTRIK TERHADAP
KEGAGALAN ISOLASI MINYAK KELAPA SAWIT TERKONTAMINASI**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

STYO BUDI UTOMO

NIM. 0510630097-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 4 Agustus 2010

Majelis Penguji :

DR. Rini Nur Hasanah, ST, M.Sc, Ph.D.

NIP. 19680122 199512 1 001

Ir. Chairuzzaini,

NIP. 19500627 197803 1 001

Hadi Suyono, ST, MT, Ph. D.

NIP. 19730520 200801 1 1013

Mengetahui :

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Rudy Yuwono, S.T., M.Sc.

NIP. 19710615 199802 1 003

DAFTAR ISI

	Halaman
PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan masalah	2
1.4. Tujuan	2
1.5. Manfaat	3
1.6. Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II DASAR TEORI	
2.1. Umum	4
2.1.1. Minyak sebagai pendingin.....	4
2.1.2. Minyak sebagai peredam busur listrik	5
2.1.3. Minyak sebagai isolator	5
2.2. Sifat Minyak Isolasi.....	5
2.2.1. Sifat fisika.....	5
2.2.2. Sifat kimia	6
2.2.3. Sifat elektrik	6
2.3. Minyak Kelapa Sawit	7
2.4. Mekanisme Kegagalan Isolasi.....	8
2.4.1. Kegagalan zat murni atau elektronik pada zat cair	10
2.4.2. Kegagalan gelembung atau kavitasi pada zat cair	10
2.4.3. Kegagalan bola cair dalam zat air.....	12
2.4.4. Kegagalan butiran padat dalam zat isolasi cair	14
2.5. Pengotor Pada Minyak Isolasi.....	16
2.6. Faktor Efisiensi Medan Listrik.....	18
2.7. Efek Polaritas	19

2.8. Pembangkitan dan Pengukuran Tegangan Tinggi Bolak-balik.....	20
2.9. Pembangkitan dan Pengukuran Tegangan Tinggi Searah	21

BAB III METODOLOGI

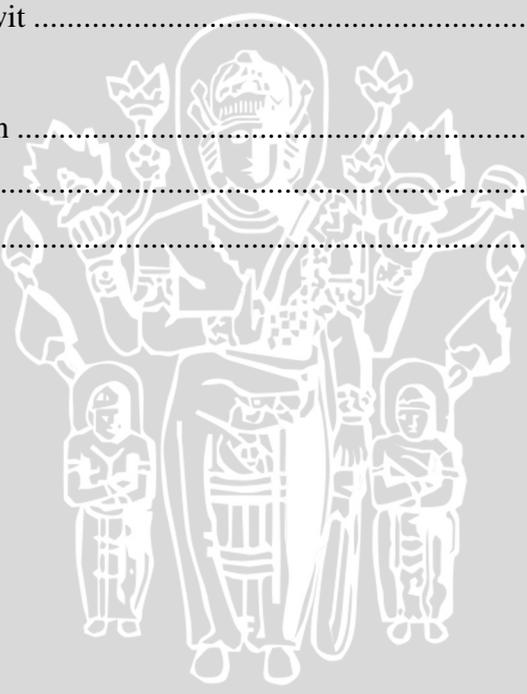
3.1. Studi Literatur	24
3.2. Objek Uji.....	24
3.3. Rangkaian Pengujian	25
3.4. Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit.....	26
3.5. Pengujian Resistivitas dan Permittivitas Minyak Kelapa Sawit	29
3.6. Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	31
3.7. Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	32
3.8. Pengujian Arus Bocor Minyak Kelapa Sawit	34
3.9. Pengujian Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	35

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum	38
4.2. Pengaruh Sudut Kelancipan Elektroda Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	38
4.3. Pengaruh Jarak Sela Antar Elektroda Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	44
4.4. Pengaruh Efek Polaritas Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	46
4.5. Resistivitas dan Permittivitas Minyak Kelapa Sawit.....	48
4.5.1. Resistivitas minyak kelapa sawit.....	48
4.5.2. Permittivitas minyak kelapa sawit	49
4.6. Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	50
4.6.1. Simulasi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°	50
4.6.2. Simulasi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 45°	53

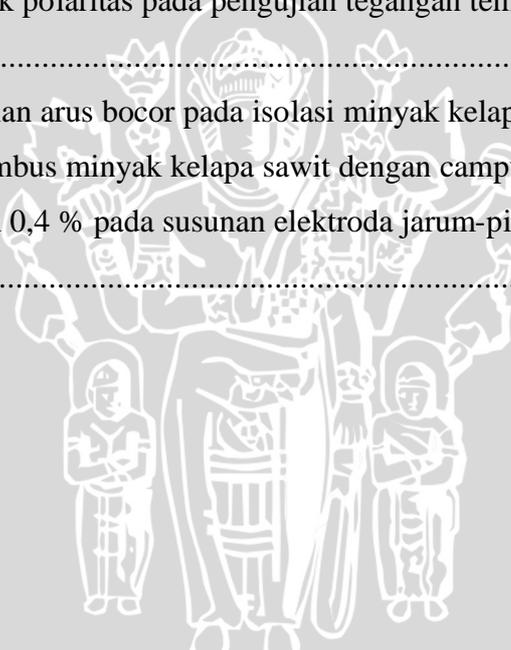


4.6.3. Simulasi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 60°	56
4.7. Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	59
4.7.1. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 0°	59
4.7.2. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	62
4.7.3. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	64
4.8. Arus Bocor Pada Isolasi Minyak Kelapa Sawit	66
4.9. Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit	68
BAB V PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Perbandingan sifat-sifat fisika minyak kelapa sawit dengan minyak standar IEC 80296.....	7
Tabel 2.2	Nilai H dan GH untuk berbagai nilai g	13
Tabel 4.1	Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit pada rangkaian AC	39
Tabel 4.2	Peningkatan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda jarum-piring pada jarak sela antar elektroda 2,5 mm	41
Tabel 4.3	Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit pada rangkaian DC	39
Tabel 4.4	Perbandingan jarak sela antar elektroda dengan tegangan tembusnya.	45
Tabel 4.5.	Pengaruh efek polaritas pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit.....	47
Tabel 4.6	Hasil pengujian arus bocor pada isolasi minyak kelapa sawit.....	67
Tabel 4.7	Tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan campuran komposisi air 0,2 % dan 0,4 % pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°	69



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Struktur kimia pada minyak kelapa sawit.....	8
Gambar 2.2	Struktur dari asam lemak jenuh dan asam lemak tidak jenuh.....	8
Gambar 2.3	Kegagalan isolasi cair karena gelembung-gelembung udara.....	11
Gambar 2.4	Sferoida bola cair.....	12
Gambar 2.5	Grafik persamaan (2-8) sebagai fungsi dari g untuk nilai e_2/e_1 yang berbeda.....	13
Gambar 2.6	Bola cair memanjang karena pengaruh medan elektrik.....	14
Gambar 2.7	Kegagalan butiran padat dalam zat isolasi cair.....	15
Gambar 2.8	Polarisasi partikel dalam medan listrik dengan permitivitas.....	15
Gambar 2.9	Model percobaan untuk memperlihatkan pembentukan jembatan serat dalam minyak isolasi.....	17
Gambar 2.10.	Nilai tekanan listrik tiga kali dari nilai rata-ratanya pada puncak suatu gundukan pengotor (dengan permitivitas yang tinggi) yang bentuknya setengah bola (<i>hemispherical</i>) pada salah satu elektroda	18
Gambar 2.11.	Efek polaritas pada susunan elektroda jarum-piring.....	20
Gambar 2.12.	Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik.....	21
Gambar 2.13.	Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan metode penyearah setengah gelombang.....	22
Gambar 3.1.	Wadah objek uji yang digunakan dalam pengujian.....	24
Gambar 3.2.	Elektroda jarum dengan beberapa sudut keruncingan.....	25
Gambar 3.3.	Jarak sela elektroda jarum-piring (s).....	27
Gambar 3.4.	Diagram alir pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit.....	28
Gambar 3.5.	Wadah uji yang digunakan untuk pengujian resistivitas dan permitivitas.....	29
Gambar 3.6.	Diagram alir pengujian resistivitas dan permitivitas minyak kelapa sawit.....	30
Gambar 3.7.	Sumbu poros dan irisan simetris pada elektroda simetris pada elektroda jarum sudut 0°	31
Gambar 3.8.	Diagram alir simulasi distribusi medan listrik pada pengujian minyak kelapa sawit dengan menggunakan program femm 4.2.....	32

Gambar 3.9.	Diagram alir perhitungan dan simulasi faktor efisiensi medan listrik pada pengujian minyak kelapa sawit	33
Gambar 3.10.	Diagram alir pengujian arus bocor pada minyak kelapa sawit	35
Gambar 3.11.	Diagram alir pengujian pengaruh pengotor atau kontaminan air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit	37
Gambar 4.1.	Grafik tegangan tembus sebagai fungsi sudut kelancipan elektroda dengan jarak sela yang berbeda pada rangkaian AC	39
Gambar 4.2.	Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada ujung elektroda jarum pada rangkaian AC	40
Gambar 4.3.	Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada elektroda jarum dengan sudut 0° pada rangkaian AC	41
Gambar 4.4.	Grafik tegangan tembus sebagai fungsi sudut kelancipan elektroda dengan jarak sela yang berbeda pada rangkaian DC	42
Gambar 4.5.	Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada ujung elektroda jarum	43
Gambar 4.6.	Wadah kaca yang pecah pada pengujian DC sebesar 78,8 kV	45
Gambar 4.7.	Grafik tegangan tembus sebagai fungsi jarak sela	46
Gambar 4.8.	Grafik pengaruh efek polaritas pada pengujian tegangan tembus minyak sawit pada elektroda jarum-piring	47
Gambar 4.9.	Jarak sela dan luas elektroda pada pengujian resistivitas minyak kelapa sawit	49
Gambar 4.10.	Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°	50
Gambar 4.11.	Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°	51
Gambar 4.12.	Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°	52
Gambar 4.13.	Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	53
Gambar 4.14.	Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	54
Gambar 4.15.	Hasil simulasi grafik potensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	54



Gambar 4.16. Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	55
Gambar 4.17. Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	56
Gambar 4.18. Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	57
Gambar 4.19. Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	58
Gambar 4.20. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya (<i>magnitude of field intensity, E </i>) pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°	59
Gambar 4.21. Langkah menjabarkan grafik dalam bentuk data tertulis (<i>write data to text file</i>)	60
Gambar 4.22. Data hasil dari (<i>write data to text file</i>) atau data tertulis dari grafik	60
Gambar 4.23. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°	61
Gambar 4.24. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	62
Gambar 4.25. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°	63
Gambar 4.26. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	64
Gambar 4.27. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°	65
Gambar 4.28. Grafik arus bocor dengan penaikan step tegangan uji pada beberapa susunan elektroda yang berbeda	67
Gambar 4.29. Kondisi air yang tidak stabil pada pengujian tegangan tembus 21,6 kV pada jarak sela 15,0 mm	70
Gambar 4.30. Grafik pengaruh pengotor air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit pada beberapa susunan elektroda yang berbeda	71
Gambar 4.31. Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan diberi kontaminan air yang berupa butiran-butiran air pada jarak 5,0 mm .	73



RINGKASAN

Styo Budi Utomo, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2010, **Pengaruh Heterogenitas Medan Listrik Terhadap Kegagalan Isolasi Minyak Kelapa Sawit Terkontaminasi**, Dosen Pembimbing: Ir. Drs. Moch Dhofir, MT. dan Ir. Soemarwanto, MT.

Skripsi ini menyampaikan hasil penelitian tentang pengaruh heterogenitas medan listrik terhadap kegagalan isolasi minyak kelapa sawit terkontaminasi sebagai bahan alternatif isolasi cair. Heterogenitas medan listrik direpresentasikan dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan tiga keruncingan yang berbeda yaitu sudut 0° , 45° , dan 60° . Sedangkan parameter untuk kontaminan minyak kelapa sawitnya adalah dengan menambahkan kandungan air dalam minyak kelapa sawit dengan prosentase 0,2% dan 0,4%. Kemudian untuk distribusi intensitas medan listriknya adalah dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *femm 4.2*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada pengujian dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring ternyata nilainya lebih kecil dari pada pengujian dengan menggunakan susunan elektroda batang-piring yaitu sebesar 13,9 kV (susunan elektroda jarum-piring sudut 60°) dan 18,0 kV (susunan elektroda jarum-piring sudut 0°) dengan jarak sela antar elektroda 5,0 mm. Kemudian pengujian pada rangkaian polaritas negatif ternyata nilai tegangan tembusnya lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian pada rangkaian polaritas positif. Pengotor atau kontaminan air dalam minyak kelapa sawit dapat menyebabkan nilai tegangan tembusnya turun drastis yaitu penurunannya sampai 43,88% untuk prosentase penambahan air sebesar 0,4%. Kemudian hasil simulasi distribusi medan listrik minyak kelapa sawit dengan nilai permitivitas sebesar 1,8 F/m, distribusi medan listrik pada susunan elektroda uji jarum-piring dengan sudut 45° dan 60° lebih heterogen dari pada susunan elektroda uji jarum-piring dengan sudut 0° .

Kata Kunci: heterogenitas medan listrik, tegangan tembus, minyak isolasi.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Minyak merupakan salah satu material isolasi yang mampu menahan tegangan listrik cukup tinggi, sehingga minyak banyak digunakan sebagai bahan isolasi untuk memisahkan bagian-bagian yang bertegangan dan yang tidak bertegangan pada suatu peralatan listrik. Sifatnya yang cair memberikan keunggulan tersendiri bila dibandingkan dengan isolasi padat. Kemampuan untuk mengisi maupun meresap pada celah-celah sempit meningkatkan kualitas isolasi yang diberikan. Sifat lain adalah kemampuan minyak dalam melepaskan panas dengan cepat sehingga dimanfaatkan juga sebagai pendingin.

Pada saat ini minyak yang digunakan sebagai minyak isolasi trafo daya antara lain minyak mineral, ester sintesis, atau minyak silikon. Sebagai alternatif lain untuk minyak isolasi adalah minyak kelapa sawit. Minyak kelapa sawit ramah lingkungan dan murah. Indonesia merupakan salah satu negara penghasil minyak kelapa sawit yang besar di dunia. Penggunaan minyak kelapa sawit sampai saat ini terbatas pada keperluan rumah tangga dan industri makanan. Jika penggunaan minyak kelapa sawit bisa diperluas, maka produksi minyak kelapa sawit akan meningkat.

Kemurnian minyak isolasi merupakan faktor yang sangat penting yang harus diperhatikan, sebab dalam prakteknya kegagalan isolasi (tembus) minyak juga tergantung oleh kehadiran kontaminan. Pengotor seperti air, arang, partikel debu, kelembaban atau serat selulosa dari sekeliling dielektrik padat yang tertinggal dan juga partikel metalik yang dipindahkan dari permukaan elektroda akibat pelepasan muatan (*discharge*) dapat merubah sifat-sifat molekul minyak isolasi. Bentuk-bentuk geometris elektroda dari suatu pengujian merupakan faktor yang sangat penting yang harus diperhatikan, sebab dalam prakteknya tidak semua bentuk geometris elektroda dari suatu pengujian mempunyai distribusi medan listrik yang sama. Sedangkan tingkat kegagalan isolasi (tembus) minyak pada distribusi medan listrik homogen dan non-homogen adalah berbeda, sebab kuat medan listrik yang menyebabkan terjadi tembus juga berbeda. Dengan latar belakang tersebut akan dilakukan suatu penelitian untuk menganalisa tingkat kegagalan isolasi (tembus) minyak kelapa sawit.



1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh heterogenitas medan listrik terhadap kekuatan dielektrik dalam hal ini adalah tegangan tembus minyak kelapa sawit.
2. Bagaimana pengaruh polaritas tegangan terhadap kekuatan dielektrik minyak kelapa sawit.
3. Bagaimana pengaruh pengotor air terhadap kekuatan dielektrik minyak kelapa sawit.
4. Bagaimana distribusi intensitas medan listrik dari susunan elektroda uji dalam minyak kelapa sawit.

1.3. Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam skripsi ini mencapai tujuan yang sesuai sasaran, maka pembahasan dibatasi sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Obyek uji yang digunakan adalah minyak kelapa sawit dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut keruncingan jarum sebesar 0° , 45° , dan 60° .
3. Minyak kelapa sawit yang digunakan adalah minyak kelapa sawit yang ada di pasaran.
4. Pengotor yang digunakan dalam pengujian adalah air.
5. Pengujian menggunakan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik dan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah.
6. Simulasi bentuk medan dan equipotensial minyak kelapa sawit menggunakan perangkat lunak *femm 4.2*.

1.4. Tujuan

Tujuan dari pembahasan skripsi ini adalah untuk menganalisis karakteristik tingkat kegagalan isolasi (tegangan tembus) minyak kelapa sawit dan distribusi intensitas medan listrik dari susunan elektroda uji dalam minyak kelapa sawit.

1.5. Manfaat

Manfaat yang didapat dari pembahasan skripsi ini adalah minyak kelapa sawit yang diuji ini disarankan sebagai alternatif lain dari minyak isolasi cair yang digunakan dalam peralatan-peralatan listrik, misalnya transformator.

1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang akan dilaksanakan dalam pembahasan skripsi ini dapat disusun sebagai berikut:

BAB I berisikan Pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, serta sistematika pembahasan skripsi ini.

BAB II berisikan Tinjauan Pustaka yang mengarahkan tentang kegunaan minyak isolasi, sifat-sifat dari minyak isolasi, mekanisme dan faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya kegagalan pada minyak isolasi, pengotor pada minyak isolasi, faktor efisiensi medan listrik, serta efek polaritas.

BAB III berisikan Metode Penelitian yang menjelaskan tentang bahan yang dipakai dalam pengujian, metodologi pengujian tegangan tembus yang dilakukan dalam penelitian, metodologi pengujian arus bocor, kapasitansi dan resistivitas dari minyak isolasi, juga metodologi simulasi bentuk medan pada perangkat lunak femm.

BAB IV berisikan Data dan Analisis yang mengarahkan tentang hasil penelitian serta pembahasan hasil penelitian berdasarkan parameter yang dibahas yaitu jarak sela elektroda, sudut kelancipan elektroda (bentuk geometris elektroda), efek polaritas, resistivitas dan permitivitas minyak kelapa sawit, faktor efisiensi dari bentuk elektroda, arus bocor, dan pengotor minyak. Serta hasil simulasi bentuk medan dan equipotensial dari minyak isolasi yang dipakai dalam pengujian ini.

BAB V merupakan Kesimpulan dan Saran dari hasil analisis dalam skripsi ini.

BAB II DASAR TEORI

2.1. Umum

Minyak isolasi sebagai bentuk dari dielektrik cair biasanya digunakan sebagai lapisan atau penahan dalam kabel dan kapasitor tegangan tinggi serta untuk mengisi minyak transformator juga *circuit breaker*. Disamping fungsinya sebagai dielektrik cair, minyak isolasi mempunyai fungsi tambahan untuk pemakaian khusus. Sebagai contoh, dielektrik cair dalam transformator terutama digunakan untuk menghantarkan panas dan sebagai media pemadam busur listrik dalam *circuit breaker*. Minyak *petroleum* paling sering digunakan sebagai dielektrik cair, sedang *hidrokarbon sintetik* dan *hidrokarbon fluor* digunakan untuk pemakaian khusus untuk temperatur sangat tinggi disamping minyak silikon. Disamping itu juga telah digunakan dielektrik minyak dari tumbuhan dan ester.

Minyak transformator yang digunakan umumnya terbuat dari hasil pemurnian minyak mentah, dan ada juga yang terbuat dari bahan organik seperti *piranol* dan silikon. Sebagai isolator, minyak transformator harus mempunyai ketahanan elektrik yang baik. Ketahanan elektrik minyak transformator dapat menurun jika ada pengotor dalam minyak transformator, misalnya air dan karbon. (Muhaimin, 1999 : 17)

2.1.1. Minyak sebagai pendingin

Semua bentuk konversi energi, baik mekanik maupun elektrik, tidak semua energi bisa dikonversi secara sempurna, selalu ada sebagian energi yang hilang atau terkonversikan dalam bentuk energi lain yang pada umumnya dalam bentuk panas. Dalam banyak kasus hal ini sangat merugikan sehingga diperlukan suatu sistem pendinginan untuk mengurangi akibat yang ditimbulkan.

Minyak sebagai dielektrik cair merupakan media yang sangat sempurna dalam menyerap panas yang dimbulkan oleh inti besi dan kumparan, dan secara bersamaan melepaskan panas tersebut secara konveksi. Minyak mempunyai kemampuan melepaskan panas ini 10 kali lebih efisien dibandingkan dengan nitrogen. Sehingga selain berfungsi sebagai isolator minyak juga dimanfaatkan sebagai pendingin. (Naidu dan Kamaraju, 1995: 65)

2.1.2. Minyak sebagai peredam busur listrik

Minyak isolasi mempunyai titik nyala (*flash point*) tinggi dan tidak menguap (titik uap tinggi), sehingga selain dimanfaatkan sebagai isolator dalam peralatan penghubung rangkaian (*switchgear*), minyak juga meredam busur listrik selama proses membuka dan menutup saklar atau pemutus rangkaian (*circuit breaker*). Khususnya ketika pemutus rangkaian membebaskan sistem dari gangguan, sehingga bunga api bisa terjadi dalam waktu yang singkat. Tetapi saat ini pemanfaatan minyak isolasi untuk peralatan penghubung (*switchgear*) telah berkurang dan digantikan oleh gas SF₆. (Muhaimin, 1999 : 15)

2.1.3. Minyak sebagai isolator

Ada beberapa kelebihan isolasi cair bila dibandingkan dengan isolasi padat dan gas sehingga isolasi cair banyak digunakan saat ini, antara lain; isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum Paschen yaitu 10^7 V/cm. Tetapi dalam prakteknya kekuatan dielektrik ini dicapai hanya sampai 100 kV/cm.

Kelebihan yang lain adalah kemampuan isolasi cair untuk memperbaiki diri sendiri (*self healing*) jika terjadi pelepasan muatan juga menambah dari kelebihan isolasi cair dibandingkan dengan yang lain. Selain itu isolasi cair mampu mengisi celah atau ruang yang akan diisolasinya. (<http://elektroindonesia.com/elektro/energi12.html>)

2.2. Sifat Minyak Isolasi

Sifat minyak isolasi terdiri atas sifat kimia, sifat fisika dan sifat elektrik. Struktur kimia dari minyak isolasi terdiri dari bagian yang sangat kompleks. Minyak terdiri dari campuran hidrokarbon dan zat-zat non hidrokarbon, seperti nitrogen, belerang, dan ester. Jenis-jenis minyak bumi di samping untuk minyak transformator, didapat bahan isolasi lain yang mempunyai kekentalan, pemurnian serta sifat-sifat lain yang berbeda. Sebagai contoh, minyak untuk kabel yang beisolasi kertas, dibuat lebih kental daripada minyak transformator. (Muhaimin, 1999: 25)

2.2.1. Sifat fisika

Sifat fisika minyak yang penting antara lain daya hantar panas (*konduktivitas termal*), titik nyala api (*flash point*), kerapatan, koefisien muai volume, massa jenis, daya melarutkan zat-zat lain, tekanan uap minyak, viskositas, warna, dan tegangan

permukaan. Umumnya minyak isolasi memiliki viskositas (kekentalan) yang rendah, titik nyala yang tinggi sehingga tidak mudah tersulut api. Selain itu minyak mempunyai kerapatan yang tinggi bila dibandingkan dengan nitrogen dan gas. Dan bukan hanya itu saja, minyak isolasi mempunyai daya hantar panas yang baik sehingga dimanfaatkan sebagai pendingin.

2.2.2. Sifat kimia

Sifat kimia minyak adalah angka kenetralan, kestabilan oksidasi minyak dan kandungan air. Oksigen yang terdapat dalam udara yang berhubungan dengan minyak yang panas dapat mengakibatkan terjadinya oksidasi dan terbentuknya bahan asam dan endapan. Endapan ini sangat mengganggu karena melekat pada semua permukaan transformator dan mempersulit proses pendinginan. Lagi pula endapan-endapan itu akan meningkatkan kemungkinan terjadinya bunga api antara bagian-bagian transformator yang terbuka. Sehingga minyak yang baik adalah minyak yang tahan terhadap oksidasi.

2.2.3. Sifat elektrik

Sifat-sifat elektrik minyak yang menentukan unjuk kerja minyak sebagai isolasi cair antara lain adalah sebagai berikut: (Muhaimin, 1999: 3)

1. *Resistivitas*, sesuai dengan fungsinya, bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang mempunyai resistivitas yang tak terhingga. Tetapi pada kenyataannya bahan yang demikian itu belum bisa diperoleh. Sampai saat ini semua bahan isolasi pada teknik listrik masih mengalirkan arus listrik (walaupun kecil) yang lazim disebut arus bocor. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya. Besarnya resistivitas bahan isolasi sesuai dengan persamaan (2-1):

$$r = \frac{R \cdot A}{l} \quad (2-1)$$

$$R_i = \frac{V}{I_b} \quad (2-2)$$

dengan:

r : resistivitas (\bullet m)

R_i : resistansi isolasi (*ohm*)

V : tegangan yang diberikan (*volt*)

I_b : arus bocor (*ampere*)

A : luas permukaan elektroda (m^2)

l : jarak sela elektroda (m)

2. *Permitivitas*, setiap bahan isolasi mempunyai permitivitas yang berbeda. Permitivitas dari minyak petroleum bervariasi antara 2 atau 2,5. Permitivitas minyak isolasi dapat dihitung dari kapasitansi minyak isolasi tersebut dengan persamaan sebagai berikut:

$$e_r = \frac{C \cdot 36\pi \cdot h}{10^{-9} \cdot s} \quad (2-3)$$

C : kapasitansi dari bahan dielektrik (F)

e_r : permitivitas bahan dielektrik (F/m)

h : jarak antar keping kapasitor (m)

s : luas permukaan keping kapasitor (m²)

3. *Sudut kerugian dielektrik*, pada saat bahan isolasi diberi tegangan bolak-balik, maka terdapat energi yang diserap oleh bahan tersebut. Akibatnya terdapat faktor kapasitif.

2.3. Minyak Kelapa Sawit

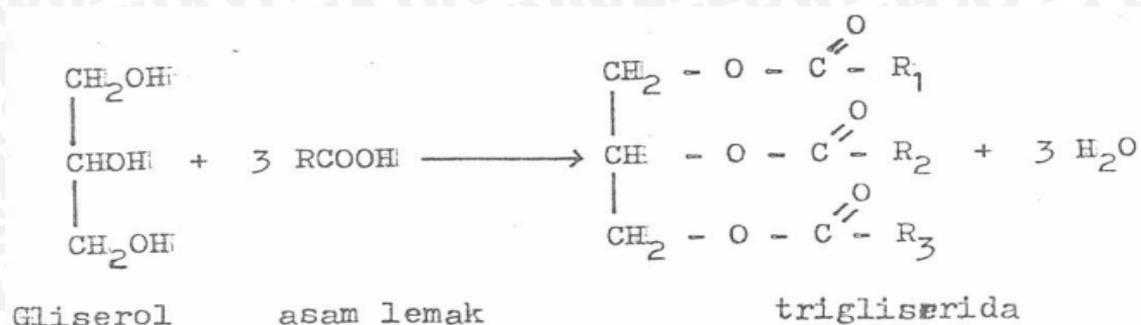
Minyak kelapa sawit berwarna kuning bening. Minyak kelapa sawit mempunyai titik nyala pada suhu sekitar 270°C. Massa jenis minyak kelapa sawit 0.869 kg/dm³ pada suhu 20°C. Kekentalan minyak kelapa sawit pada suhu 40°C adalah 29 cSt. Perbandingan sifat-sifat fisika minyak kelapa sawit dengan minyak standar IEC 80296 dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1. Perbandingan sifat-sifat fisika minyak kelapa sawit dengan minyak standar IEC 80296

Sifat Fisika	Minyak Kelapa Sawit	Minyak Standar
Titik nyala (°C)	270	140
Kandungan uap air (mg/kg)	1	1,5
Berat jenis (kg/dm ³)	0.869	0,91
Kekentalan (cSt) pada suhu 40°C	29	12

Minyak kelapa sawit terdiri atas trigliserida yang merupakan ester dari gliserol dengan tiga molekul asam lemak. Asam lemak yang terkandung dalam minyak kelapa sawit berupa asam lemak jenuh dan asam lemak tak jenuh. Asam lemak merupakan rantai hidrokarbon, yang setiap atom karbonnya mengikat satu atau dua atom hidrogen, kecuali atom karbon terminal yang mengikat tiga atom hidrogen, sedangkan atom

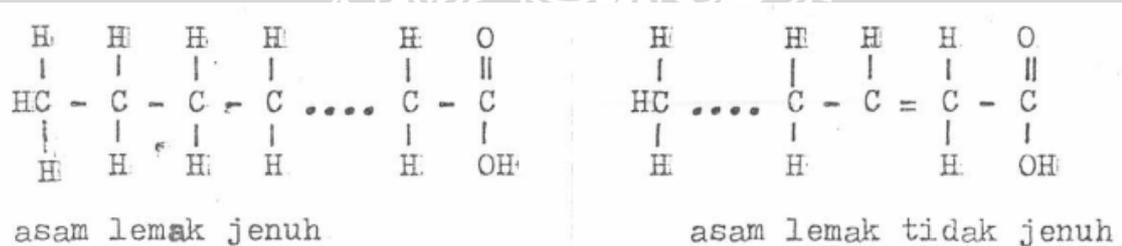
karbon terminal lainnya mengikat gugus karboksil. Struktur kimianya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Struktur kimia pada minyak kelapa sawit

Sumber: <http://library.usu.ac.id/download/fmipa>

Asam lemak yang pada rantai hidrokarbonnya terdapat ikatan rangkap disebut asam lemak tidak jenuh, dan apabila tidak terdapat ikatan rangkap pada rantai hidrokarbonnya disebut dengan asam lemak jenuh. Secara umum struktur asam lemak dapat digambarkan seperti Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Struktur dari asam lemak jenuh dan asam lemak tidak jenuh

Sumber: <http://library.usu.ac.id/download/fmipa>

Semakin jenuh molekul asam lemak dalam molekul trigliserida, maka semakin tinggi titik beku atau titik cair minyak tersebut, sehingga pada suhu kamar biasanya berada pada fase padat. Sebaliknya semakin tidak jenuh asam lemak dalam molekul trigliserida maka semakin rendah titik beku atau titik cair minyak tersebut, sehingga pada suhu kamar berada pada fase cair.

2.4. Mekanisme Kegagalan Isolasi Cair

Beberapa faktor yang turut mempengaruhi tembus pada minyak isolasi adalah (T.J.Gallagher, 1974: 70):

- a. prosedur pengujian
- b. bentuk geometris permukaan elektroda

- c. kontaminan dan gas yang hadir dalam cairan isolasi
- d. temperatur dan tekanan hidrostatik
- e. durasi (lamanya) tegangan yang diberikan

Teori mengenai kegagalan dalam zat cair dewasa ini kurang banyak diketahui dibandingkan dengan teori kegagalan gas dan zat padat. Hal tersebut disebabkan karena sampai saat ini belum didapatkan teori yang dapat menjelaskan proses kegagalan dalam zat cair yang benar-benar sesuai antara keadaan secara teoritis dengan keadaan sebenarnya. Banyak segi kegagalan zat cair telah diselidiki oleh para ahli, tetapi hasil-hasil dan kesimpulannya tidak dapat dipertemukan untuk memperoleh teori umum yang berlaku untuk semua zat isolasi cair, karena data-data yang dihasilkan berbeda dan bahkan bertentangan satu sama lain. Hal ini disebabkan karena tidak adanya teori yang bersifat komprehensif yang berlaku untuk semua kasus mengenai dasar-dasar fisika keadaan cair untuk digunakan sebagai dasar perbandingan hasil penelitian.

Yang sudah dimengerti hanyalah fenomena fisika lucutan kegagalan dalam zat cair. Bila suatu tegangan diterapkan pada sepasang elektroda yang dicelup dalam zat isolasi cair, maka terlihat arus konduksi yang kecil. Bila tegangan dinaikkan lagi (*continuously*), maka pada suatu tegangan kritis tertentu akan terjadi lucutan di antara kedua elektroda tersebut. Lucutan dalam zat cair ini terdiri dari unsur-unsur sebagai berikut (Arismunandar, 1983: 70):

- a. aliran listrik yang besarnya ditentukan oleh karakteristik rangkaian
- b. lintasan cahaya yang cerah dari elektroda yang satu ke yang lain
- c. pembentukan gelembung gas dan butir-butir zat padat hasil dekomposisi zat cair (tergantung dari sifat kimiawi zat cair)
- d. pembentukan lubang pada elektroda
- e. tekanan implusif dalam zat cair disertai suara ledakan

Beberapa teori telah dikemukakan untuk dapat menjelaskan tahap-tahap kegagalan zat cair. Sebagian teori ini menganggap zat isolasi cair sebagai bahan dielektrik yang homogen, sedang teori-teori lainnya mengemukakan bahwa kegagalan diakibatkan oleh adanya ketidakmurniaan dalam zat cair. Teori kelompok pertama yang menganggap zat cair sebagai zat yang homogen dan mengabaikan adanya ketidakmurniaan hanya dapat diterapkan secara terbatas saja, karena dalam praktek tidak ada zat-zat semacam itu. Di pihak lain, teori-teori kelompok kedua yang

mencakup kegagalan zat-zat tidak murni cenderung mengabaikan kenyataan bahwa pada akhirnya zat isolasi cair itu sendiri yang mengalami kegagalan.

Berdasarkan uraian diatas, maka teori kegagalan zat isolasi cair dapat dibagi menjadi empat jenis sebagai berikut (Arismunandar, 1983: 72):

- a. Teori kegagalan zat murni atau elektronik, yang merupakan perluasan teori kegagalan dalam gas, artinya proses kegagalan dalam zat cair dianggap serupa dengan yang terjadi dalam gas.
- b. Teori kegagalan gelembung udara atau kavitasi di mana ketidakmurnian (misalnya gelembung udara) itu mempunyai tegangan gagal yang lebih rendah dari zat cair, di sini adanya gelembung udara dalam cairan, merupakan awal dan pencetus kegagalan total daripada zat cair.
- c. Teori kegagalan bola cair, di mana ketidakmurnian yang tidak stabil dalam medan listrik (misalnya bola-bola air) dapat merupakan jembatan bertahanan rendah di antara elektroda dan dapat mengakibatkan kegagalan.
- d. Teori kegagalan ketidakmurnian padat, di mana ketidakmurnian (misalnya butiran penghantar padat) dapat menyebabkan pembesaran medan listrik setempat, bila medan dalam zat cair melebihi nilai kritis tertentu maka di tempat itu zat cair akan gagal dan ini dapat mengakibatkan kegagalan total.

2.4.1. Kegagalan zat murni atau elektronik pada zat cair

Karena dianggap zat cair berkelakuan seperti gas, maka supaya terjadi kegagalan diperlukan elektron awal yang dimasukkan dalam zat cair. Elektron awal inilah yang akan memulai proses kegagalan. Walaupun kuat medannya cukup besar, tetapi jika tidak terdapat elektron awal maka tidak akan terjadi kegagalan. Jika di antara elektroda diterapkan suatu kuat medan yang kuat, sedangkan pada elektroda tersebut terdapat permukaan yang tidak rata (runcing), maka kuat medan yang terbesar adalah yang terdapat di bagian yang runcing tersebut. Kuat medan maksimum tersebut kemudian akan mengeluarkan elektron e_1 yang akan memulai terbentuknya banjir elektron. Dalam teori kegagalan elektronik dianggap bahwa elektron-elektron tertentu akan memperoleh energi dari medan yang lebih besar, yang kemudian digunakan untuk mengionisasikan molekul karena benturan dan mengawali banjir.

2.4.2. Kegagalan gelembung atau kavitasi pada zat cair

Kegagalan gelembung atau kavitasi atau gas merupakan bentuk kegagalan zat air yang disebabkan oleh adanya gelembung-gelembung gas di dalamnya. Menurut **Kao** dan **Krasucki**, sebab-sebab timbulnya gelembung gas adalah sebagai berikut (Arismunandar, 1983: 74):

- permukaan elektroda tidak rata, sehingga terdapat kantong-kantong udara di permukaannya
- adanya tabrakan elektron, sehingga terjadi produk-produk baru berupa gas
- pengupan cairan karena adanya lucutan pada bagian-bagian elektroda yang tajam dan tidak teratur
- zat cair dikenai perubahan suhu dan tekanan

Medan listrik dalam gelembung gas yang ada dalam zat isolasi cair dinyatakan oleh persamaan berikut (Arismunandar, 1983: 74):

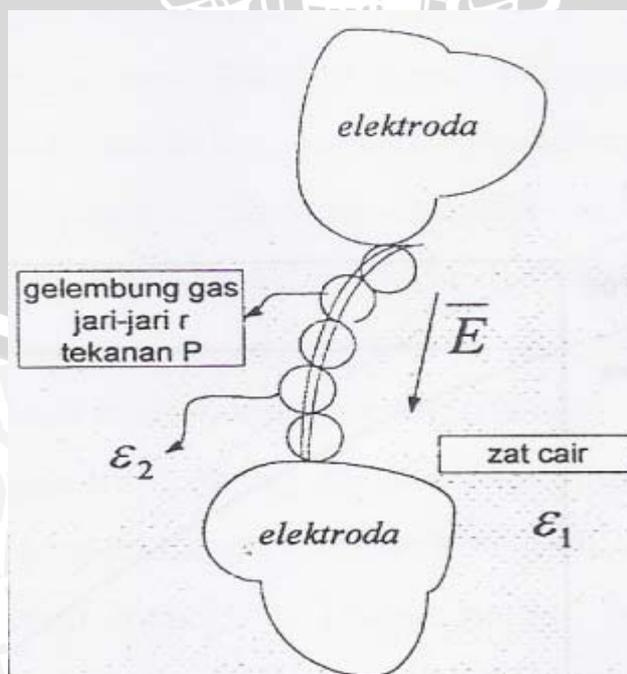
$$E_b = \frac{3e_1 E_0}{2e_1 + 1} \quad (2-4)$$

dengan:

e_1 : permitivitas zat cair

E_0 : medan listrik dalam zat cair tanpa gelembung

Karena pengaruh medan yang kuat di antara elektroda, gelembung-gelembung udara yang ada dalam cairan tersebut akan berubah menjadi memanjang searah dengan medannya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. Gelembung-gelembung yang

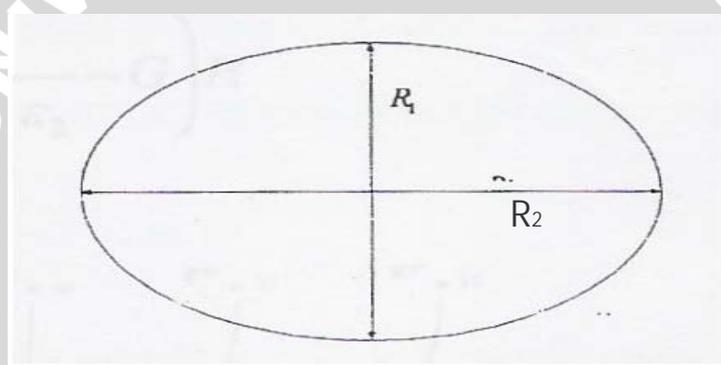


Gambar 2.3. Kegagalan isolasi cair karena gelembung-gelembung udara
 Sumber: Arismunandar, 1983: 75

memanjang tersebut kemudian akan saling sambung menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan.

2.4.3. Kegagalan bola cair dalam zat cair

Jika suatu zat isolasi cair mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, maka dapat terjadi kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan elektrik. Medan ini akan mempunyai pengaruh kepada bentuk bola cair. Bola cair yang terkena medan listrik E akan berubah bentuk menjadi sferoida seperti pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Sferoida bola cair

Sumber: Arismunandar, 1983: 77

Kuat medan listrik dalam zat isolasi cair dapat dihitung, yaitu sebesar (Arismunandar, 1983: 77):

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\rho S}{e_1 R} \left(\frac{e_1}{e_1 - e_2} - G \right) H \right)} \quad (2-5)$$

dengan:

$$G = \frac{1}{g^2 - 1} \left\{ g \cosh^{-1} g - 1 \right\} \quad (2-6)$$

$$H = 2g^{1/3} (2g - 1 - 1/g^2) \quad (2-7)$$

$$g = \frac{R_2}{R_1}$$

$$R = \frac{3}{4\rho} \text{ volume sferoida}$$

$$S = \text{gaya tegang permukaan}$$

dengan:

R_1 : jari-jari pendek sferoida

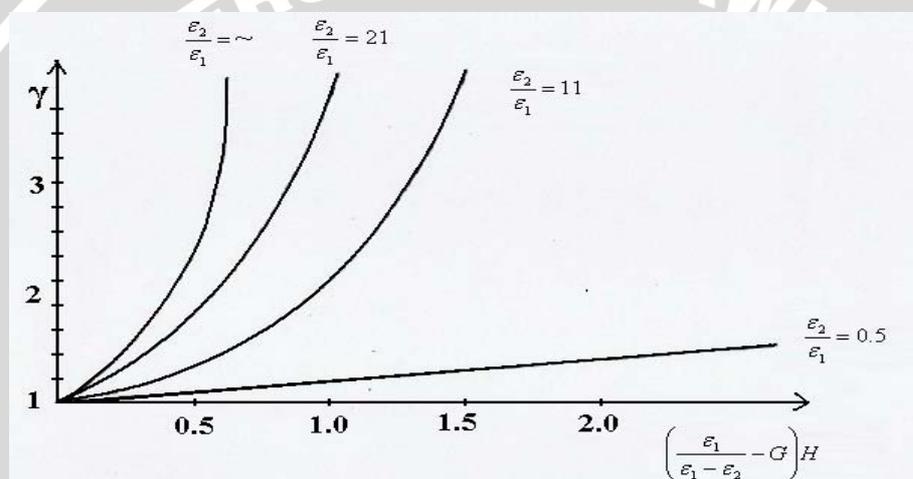
R_2 : jari-jari panjang sferoida

e_1 : permitivitas zat isolasi cair

e_2 : permitivitas bola cair

Bentuk persamaan (2-6) yang ditulis sebagai fungsi dari g terlihat pada Gambar 2.5.

$$\frac{E}{600 \sqrt{\frac{\rho S}{e_1 R}}} = \sqrt{\left(\frac{e_1}{e_1 - e_2} - G \right) H} \quad (2-8)$$



Gambar 2.5. Grafik persamaan (2-8) sebagai fungsi dari g untuk nilai e_2/e_1 yang berbeda

Sumber: Arismunandar, 1983: 78

Dari gambar ini untuk nilai e_2/e_1 melebihi 20, nilai E melewati maksimum bila g naik, yang berarti bahwa tidak ada bentuk sferoida yang stabil di atas tekanan listrik kritis. Juga dapat dilihat bahwa untuk nilai e_2/e_1 kurang dari 20 tidak ada medan kritis meskipun g dapat melonjak cepat dengan kenaikan medan. Untuk bola cair yang menghantarkan listrik maka $e_2/e_1 = \sim$ dan persamaan (2-6) menjadi,

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\rho S}{e_1 R} \right) GH} \quad (2-9)$$

Tabel 2.2 memberikan nilai H dan GH untuk berbagai nilai g . Dari Tabel ini dapat dilihat bahwa nilai maksimum untuk GH adalah 0,45856 untuk $g = 1,85$

Tabel 2.2. Nilai H dan GH untuk berbagai nilai g

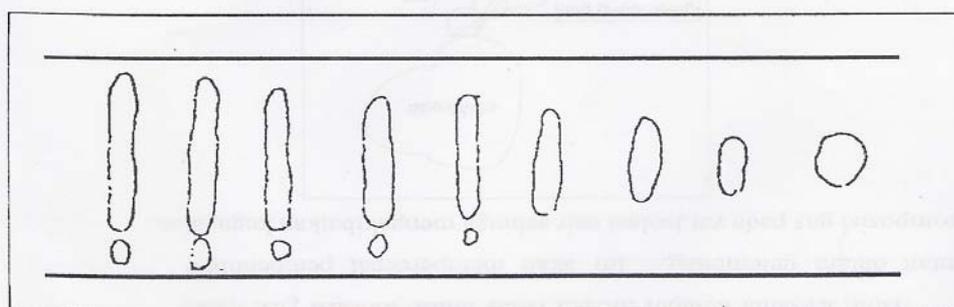
g	G	H	GH
1,10	0,30828	0,8782	0,27040
1,82	0,19184	2,3894	0,45839
1,85	0,1886	2,4314	0,45856
1,87	0,18644	2,4590	0,45846
2,00	0,17356	2,6324	0,45689
3,00	0,10871	3,7553	0,40823
4,00	0,07541	4,6930	0,35389

Sumber: Arismunandar, 1983: 79

Karena itu medan kritis di mana bola cair menjadi tidak stabil adalah:

$$E_k = 487,7 \sqrt{\frac{S}{Re_1}} \text{ V/cm} \quad (2-10)$$

Sebagai contoh, untuk bola air dalam minyak dengan $S = 43 \text{ dyn/cm}$, $e_1 = 2$ dan $R = 1 \text{ m m}$, maka medan kritisnya adalah $E_k = 0,226 \text{ MV/cm}$. Medan kritis ini jauh lebih rendah daripada kekuatan gagal isolasi cair yang bersih, dan karena itu merupakan sumber kegagalan penting pada zat isolasi. Bola air yang sangat kecil pun (misalnya $0,05 \text{ m m}$) masih dapat mengakibatkan kegagalan medan $E_k = 1 \text{ MV/cm}$. Contoh kegagalan dielektrik (silikon) cair karena adanya bola air terlihat pada gambar 2.6.



Gambar 2.6. Bola cair memanjang karena pengaruh medan elektrik

Sumber: Arismunandar, 1983: 80

Sesudah menjadi tidak stabil bola cair cepat memanjang, dan bila panjangnya telah mencapai duapertiga celah elektroda maka saluran-saluran lucutan akan timbul sehingga kemudian kegagalan total terjadi.

2.4.4. Kegagalan butiran padat dalam zat isolasi cair

Kegagalan butiran padat adalah jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya butiran (partikel) zat padat di dalam isolasi cair yang akan memulai terjadinya kegagalan. Butiran padat, biasanya mempunyai permitivitas berlainan dengan permitivitas zat isolasi air. Jika butiran-butiran itu mempunyai permitivitas e_2

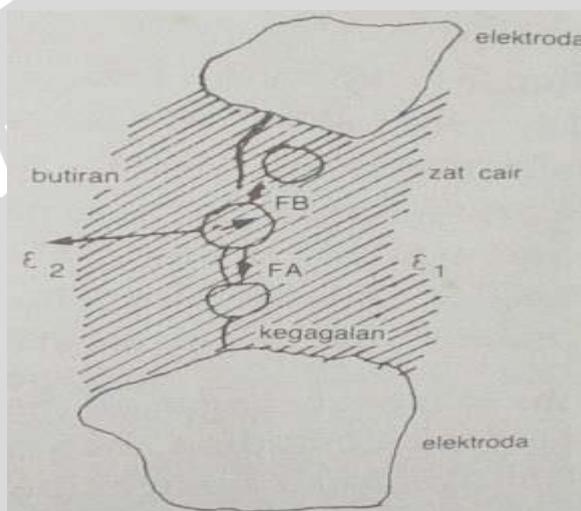
sedangkan permitivitas zat isolasi cair adalah ϵ_1 , maka seperti pada Gambar 2.7. Menurut *Kok* besarnya gaya yang bekerja pada butiran dalam medan yang tidak seragam adalah (Arismunandar, 1983: 80):

$$F = r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \text{ grad } E \quad (2-11)$$

dengan:

r : jari-jari butiran

E : gardien tegangan

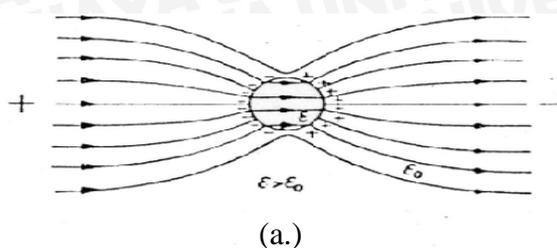


Gambar 2.7. Kegagalan butiran padat dalam zat isolasi cair
Sumber: Arismunandar, 1983: 81

Untuk persamaan di atas terdapat dua kemungkinan yang terjadi yaitu sesuai pada Gambar 2.7:

- if $\epsilon_2 > \epsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran searah dengan tekanan listrik (stress) maksimum (F_A)
- if $\epsilon_2 < \epsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (F_B)

Bila diasumsikan partikel pengotor berbentuk bola dengan jari-jari r dan nilai permitivitas ϵ , berada dalam minyak yang mempunyai permitivitas ϵ_0 , dalam medan elektrik partikel tersebut akan menjadi terpolarisasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



(b.)

Gambar 2.8. Polarisasi partikel dalam medan listrik dengan permitivitas:

(a.) $e > e_0$

(b.) $e < e_0$

Sumber: J.A.KOK, 1961 : 42

Adanya butiran penghantar di antara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam zat isolasi cair di dekat permukaan butiran. Pembesaran ini ditentukan oleh bentuk butiran, yaitu:

- a. untuk butiran bulat ($g = 1$) : $E_1 = 3 E$
- b. untuk butiran sferoida ($g = 2$) : $E_1 = 5,8 E$
- c. untuk butiran sferoida ($g = 5$) : $E_1 = 18 E$

di mana, g = perbandingan jari-jari panjang terhadap jari-jari pendek sferoida (Gambar 2.5.)

E = medan dalam cairan tanpa butiran

E_1 = medan dalam cairan pada ujung butiran

Apabila E_1 melebihi tegangan gagal cairan maka akan terjadi kegagalan setempat yang kemudian menimbulkan gelembung-gelembung yang akhirnya dapat mengakibatkan kegagalan total cairan.

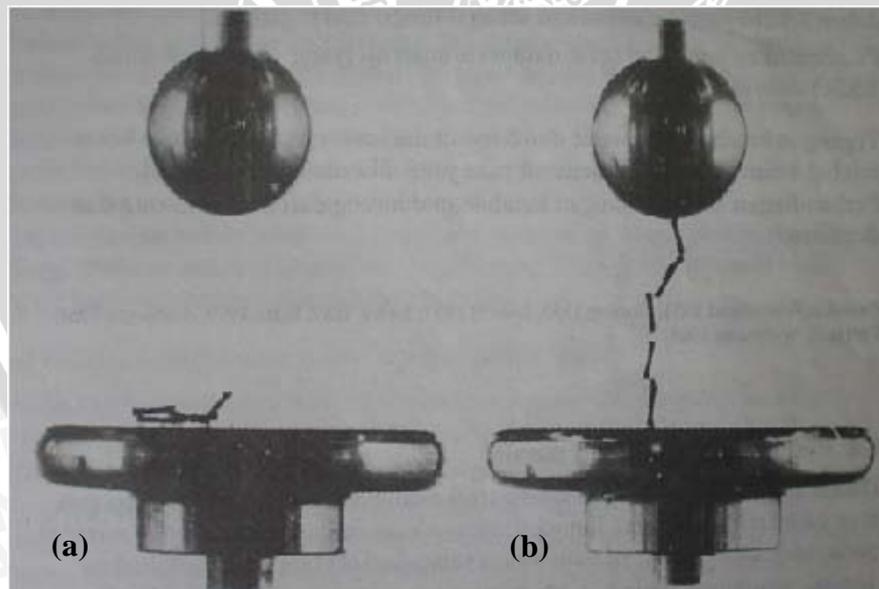
2.5. Pengotor Pada Minyak Isolasi

Minyak isolasi murni adalah isolasi minyak yang murni secara kimiawi dan tidak mengandung pengotor dan mempunyai struktur yang sederhana. Beberapa contoh cairan isolasi murni adalah *n-hexane*, *n-heptane*, dan *hidrokarbon parrafin*.

Kontaminan pada minyak isolasi merupakan suatu hal yang tidak bisa dihindari yang bisa muncul selama proses pembuatan, penyimpanan, maupun selama proses pemakaian. Meskipun minyak telah dibuat melalui proses pemurnian yang benar, beberapa pengotor masih mungkin tertinggal di dalam cairan yang akhirnya dapat mempengaruhi kestabilan minyak tersebut.

Sampel pengujian yang dilakukan oleh Child dan Stannlet menunjukkan bahwa 25-50 % dari komponen hadir dalam bentuk endapan partikel besi dengan ukuran lebih besar dari 10 mikro dan sebagian kecil lainnya dengan ukuran antara 3-10 mikro. Dan pemurnian minyak dari partikel besi dapat memperbaiki kemampuan tembus listriknya dan mempunyai pengaruh yang kecil terhadap konduktivitas minyak isolasi tersebut. (J.A.KOK, 1961: 8)

Kertas-kertas isolasi di sekeliling belitan transformator menjadi sumber penyebab hadirnya partikel serat selulosa dalam minyak transformator. Selain itu kertas penyaring yang digunakan sebagai penyerap kelembaban atau air dari minyak isolasi seringkali menjadi sumber munculnya serat selulosa yang mempunyai permitivitas yang tinggi. Penampakan pertama dengan mikroskop menunjukkan bahwa serat selulosa basah mengumpul di daerah yang mempunyai intensitas medan maksimum dan membentuk sebuah jembatan sepanjang garis medannya. Pembebasan minyak isolasi dari serat selulosa dengan filter yang baik dapat menyebabkan kenaikan tegangan tembusnya (J.A.KOK, 1961: 27). Pengujian jembatan serat dalam minyak isolasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 dengan menggunakan susunan elektroda bola-piring.



Gambar 2.9. Model percobaan untuk memperlihatkan pembentukan jembatan serat dalam minyak isolasi

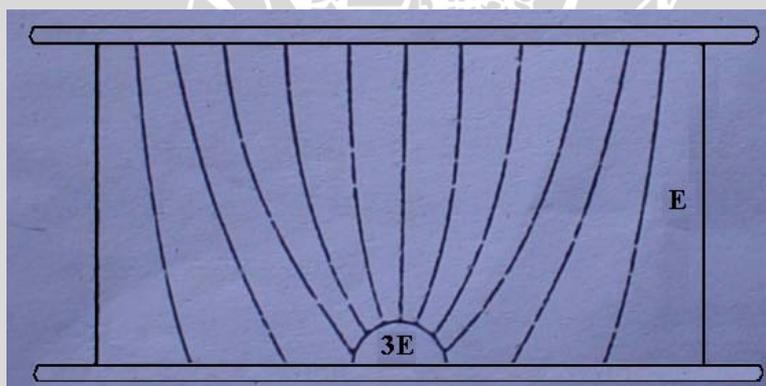
(a) Serat sebelum saklar tegangan masuk

(b) Jembatan serat 1 menit setelah saklar tegangan masuk

Sumber: Dieter kind, 1993: 153

Pengotor minyak isolasi lainnya adalah air dan kelembaban. Namun demikian pada kondisi operasi normal, peralatan cenderung untuk mambatasi kelembaban hingga nilainya kurang dari 10 %. Medan listrik akan menyebabkan air yang tertahan di dalam minyak menjadi memanjang searah medan dan pada medan yang kritis pengotor air itu menjadi tidak stabil. Kanal kegagalan akan menjalar dari ujung pengotor air yang memanjang sehingga menghasilkan kegagalan total. Bila dalam minyak terdapat kelembaban, maka hal ini dapat membentuk lajur-lajur yang membuka jalan terhadap terjadinya hubung singkat. Kelembaban tidak saja menurunkan daya isolasi minyak, melainkan kelembaban itu dapat pula diserap oleh bahan isolasi lainnya, sehingga seluruh dari bagian tranformator akan menjadi terancam karena kelembaban ini. (<http://elektroindonesia.com/elektro/energi12.html>)

Dalam semua keadaan di prakteknya kita temui dua factor yang secara bersama-sama menyebabkan terjadinya tembus. Kedua faktor ini adalah ketidakseragaman medan dan pengotor dengan permitivitas yang tinggi misalnya air. Pada Gambar 2.10 dapat dilihat bahwa pada puncak suatu gundukan pengotor (dengan permitivitas yang tinggi) yang bentuknya setengah bola (*hemispherical*) pada salah satu elektroda mempunyai nilai tekanan listrik tiga kali dari nilai rata-ratanya. (J.A.KOK, 1961:39)



Gambar 2.10. Nilai tekanan listrik tiga kali dari nilai rata-ratanya pada puncak suatu gundukan pengotor (dengan permitivitas yang tinggi) yang bentuknya setengah bola (*hemispherical*) pada salah satu elektroda

Sumber: J.A.KOK, 1961 : 39

2.6. Faktor Efisiensi Medan Listrik

Pengujian tegangan tinggi pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu akan mempunyai karakteristik tegangan tembus yang berbeda-beda. Hal ini disebabkan karena pada susunan elektroda dengan bentuk geometris yang berbeda, distribusi medan listriknya juga berbeda. Misalnya pada

susunan elektroda batang-piring distribusi medan listriknya pasti berbeda dengan susunan elektroda jarum-piring. Besar faktor efisiensi medan listrik (h) pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan menurut Schwaiger yaitu sebagai berikut (Schwaiger, 2005):

$$h = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \quad (2-12)$$

atau dapat juga ditulis,

$$E_{rata-rata} = h \cdot E_{maksimum} \quad (2-13)$$

$$E_{rata-rata} = \frac{U_d}{s} \quad (2-14)$$

dengan:

h : efisiensi medan listrik pada susunan elektroda

$E_{rata-rata}$: kuat medan listrik rata-rata (kV/cm)

$E_{maksimum}$: kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm)

U_d : tegangan tembus pada susunan elektroda (kV)

s : jarak sela antar elektroda (cm)

Pada susunan elektroda keping sejajar, distribusi medan listriknya homogen sehingga besar $E_{maksimum}$ sama dengan $E_{rata-rata}$. Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat kuat medan listrik lokal pada daerah tertentu yang nilainya lebih besar dari kuat medan listrik rata-ratanya. Dengan demikian, maka batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu memenuhi syarat: $h \leq 1$

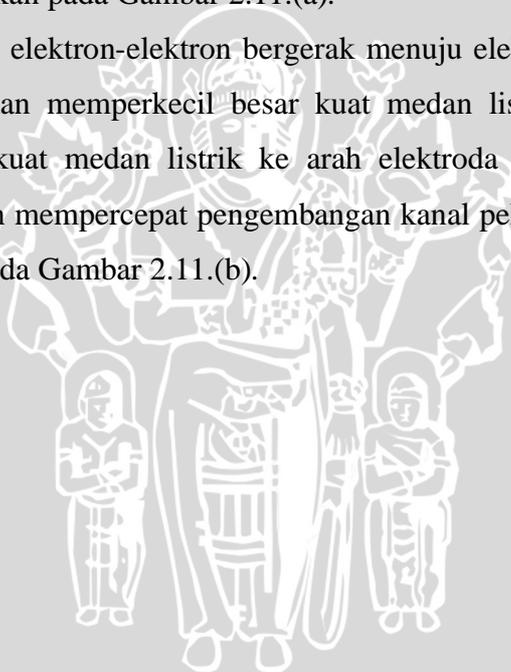
Besar faktor efisiensi medan listrik bergantung pada bentuk geometris dari susunan elektroda, yaitu untuk susunan elektroda yang memberikan distribusi medan listrik homogen, misalnya susunan pelat sejajar, maka $h = 1$. Sedangkan pada susunan elektroda yang menghasilkan distribusi medan listrik non homogen seperti jarum-piring, maka nilai $h < 1$.

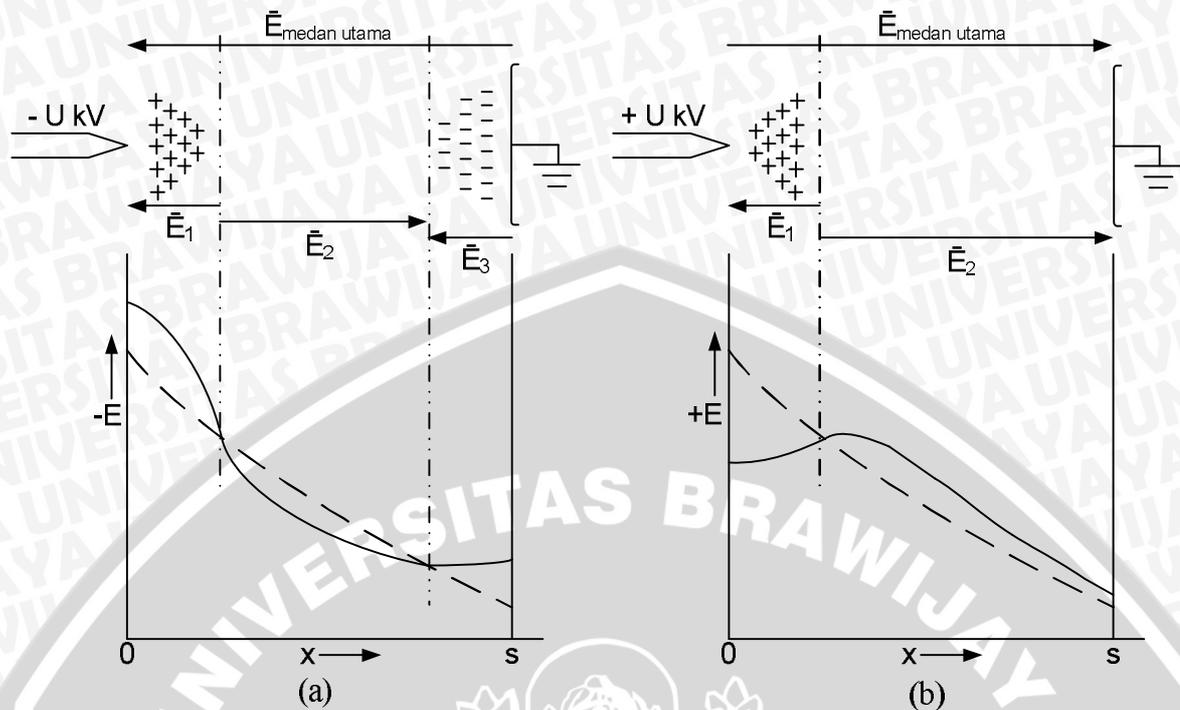
2.7. Efek Polaritas

Pada medan listrik sangat tidak homogen seperti pada susunan elektroda jarum-piring, di depan elektroda tajam terjadi ionisasi setelah tegangan anjaknya (*inception voltage*) terlewati. Elektron-elektron karena mobilitasnya yang tinggi akan secara cepat meninggalkan daerah ionisasi, sedang ion-ion positif yang bergerak lamban akan membentuk muatan ruang positif di depan elektroda tajam, sehingga distribusi medan listriknya berubah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.

Pada jarum negatif, elektron-elektron bergerak menuju elektroda piring atau pelat. Ion-ion positif yang tertinggal akan menyebabkan kenaikan kuat medan listrik sangat tinggi tepat pada ujung jarum, sedangkan pada daerah ruang medan listrik lainnya hanya memiliki kuat medan listrik yang lebih kecil. Dengan demikian pengembangan kanal peluahan muatan listrik ke arah elektroda pelat akan semakin lama, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.(a).

Pada jarum positif, elektron-elektron bergerak menuju elektroda jarum. Ion-ion positif yang tertinggal akan memperkecil besar kuat medan listrik di ujung jarum. Dengan demikian maka kuat medan listrik ke arah elektroda pelat akan meninggi sehingga memudahkan dan mempercepat pengembangan kanal peluahan muatan listrik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11.(b).





- Distribusi medan listrik sebelum adanya muatan ruang
 ----- Distribusi medan listrik setelah adanya muatan ruang
 E_1, E_2, E_3 Kuat medan listrik yang dibangkitkan oleh muatan ruang

Gambar 2.11. Efek polaritas pada susunan elektroda jarum-piring
 (a) Jarum negatif, (b) Jarum positif

Sumber: Dieter Kind, 1993: 120

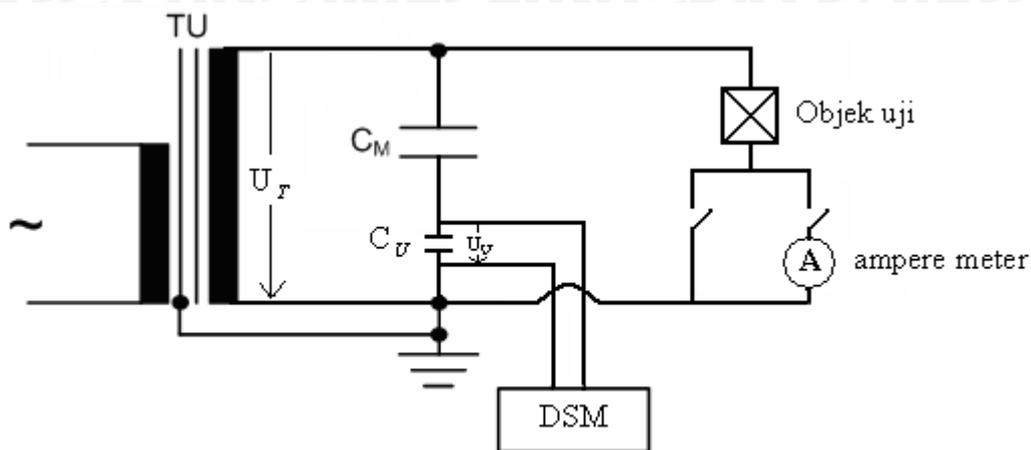
2.8. Pembangkitan dan Pengukuran Tegangan Tinggi Bolak-balik

Dalam laboratorium diperlukan tegangan tinggi bolak-balik untuk percobaan dan pengujian dengan arus bolak-balik serta untuk membangkitkan tegangan tinggi searah dan pulsa. Trafo uji yang biasa digunakan untuk keperluan tersebut memiliki daya yang lebih rendah serta perbandingan belitan yang jauh lebih besar daripada trafo daya.

Untuk membangkitkan tegangan tinggi bolak-balik di laboratorium, maka digunakan transformator uji tegangan tinggi tiga belitan (dapat digunakan untuk rangkaian bertingkat kaskade). Jenis transformator ini memiliki perbandingan belitan yang sangat besar antara belitan tegangan tinggi H dan belitan tegangan rendah atau eksitasi E.

Transformator uji tegangan tinggi tersebut mampu menghasilkan tegangan yang sangat tinggi namun menyerap daya yang lebih rendah dibanding dengan trafo daya. Keuntungan lainnya ialah dapat membangkitkan tegangan tinggi hingga di atas ratusan kV dengan menyusun beberapa trafo uji tersebut secara seri atau susunan kaskade.

Susunan rangkaian pembangkitan tegangan bolak-balik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik

Sumber: Dieter kind, 1993: 116

Keterangan:

TU : Trafo uji tegangan tinggi 1 fasa 3 belitan 220 V / 100 kV, 5kVA

C_M : Kapasitor tegangan tinggi

C_U : Kapasitor ukur

DSM : Alat ukur tegangan tinggi AC

Ampere meter pada rangkaian Gambar 2.12 hanya digunakan pada saat melakukan pengukuran arus bocor. Untuk melakukan pengukuran tegangan tinggi AC, ampere meter dilepas dari rangkaian. Hubungan antara nilai puncak tegangan tinggi dengan tegangan terukur \hat{U}_U dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\hat{U}_U = \frac{C_M}{C_M + C_U} \hat{U}_T \quad (2-15)$$

dengan:

\hat{U}_U : Tegangan terukur

\hat{U}_T : Tegangan tinggi

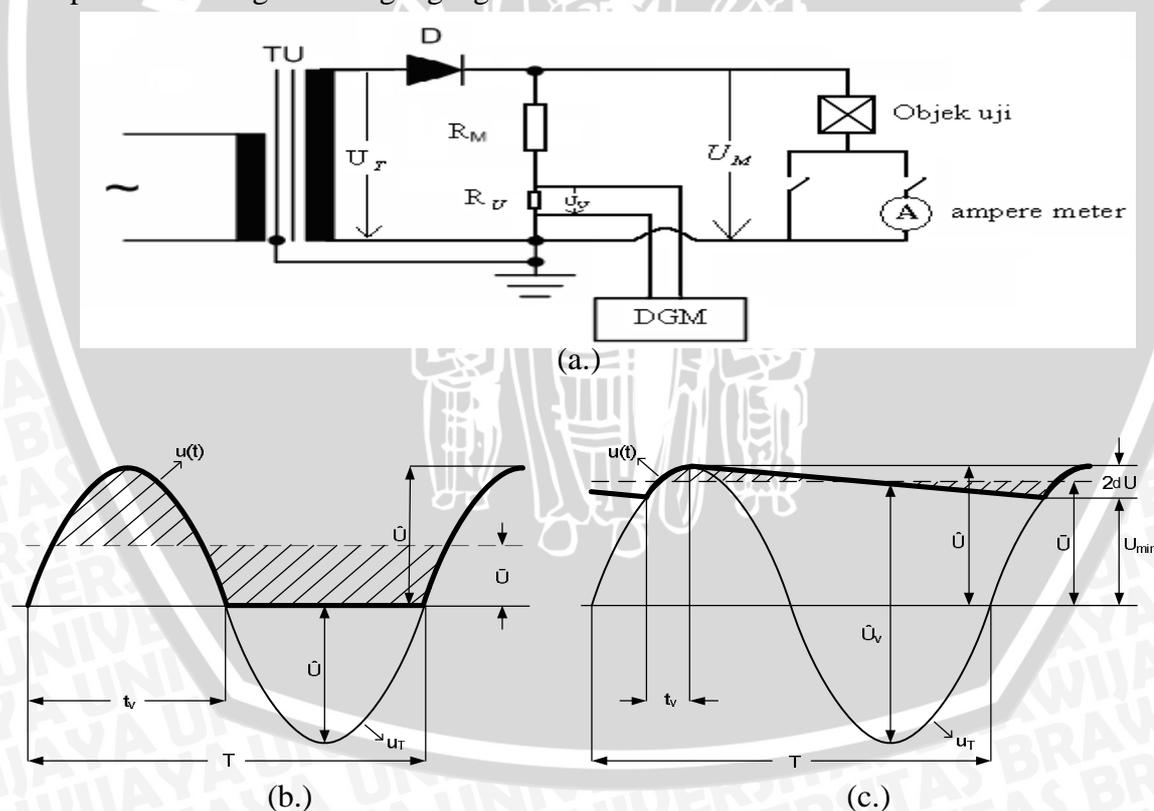
C_M : Kapasitor tegangan tinggi

C_U : Kapasitor ukur

2.9. Pembangkitan dan Pengukuran Tegangan Tinggi Searah

Dalam laboratorium banyak terdapat penerapan tegangan tinggi searah, misalnya untuk pengujian isolasi, pengujian kapasitor atau kabel, serta penelitian untuk gejala fisik dari peluahan dan perilaku dielektrik. Metode yang paling umum untuk membangkitkan tegangan tinggi searah ialah dengan menyearahkan tegangan tinggi bolak-balik. Pembangkitan tegangan tinggi searah yang paling sederhana diperlihatkan pada Gambar 2.13.a. Sebuah transformator uji tegangan tinggi dihubungkan dengan beban R melalui sebuah dioda penyearah ideal V . Tegangan sekunder trafo yang berbentuk sinusoida dengan nilai puncak \hat{U} akan disearahkan terlebih dahulu oleh dioda.

Bentuk keluaran gelombang tegangan yang telah disearahkan dapat dilihat pada Gambar 2.13.b dan 2.13.c. Terlihat pada Gambar 2.13.c, dengan memasang kapasitor C secara paralel dengan beban akan didapatkan gelombang tegangan yang rata dalam keadaan mantap dibanding tanpa kapasitor. Jadi fungsi kapasitor C ialah sebagai filter atau perata bentuk gelombang tegangan keluaran dari dioda.



Gambar 2.13. Rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan metode penyearah setengah gelombang

(a) Rangkaian pengganti

(b) Bentuk gelombang tegangan beban tanpa kapasitor perata C

(c) Bentuk gelombang tegangan beban dengan kapasitor perata C

Sumber: Dieter kind, 1993: 19

Keterangan:

TU : Trafo uji tegangan tinggi 1 fasa 3 belitan 220 V / 100 kV, 5kVA

D : Dioda atau penyearah

R_M : Resistor tegangan tinggi

R_U : Resistor ukur

DSM : Alat ukur tegangan tinggi DC

Ampere meter pada rangkaian Gambar 2.13.(a). hanya digunakan pada saat melakukan resistansi. Untuk melakukan pengukuran tegangan tinggi DC, ampere meter dilepas dari rangkaian. Besar tegangan rata-rata akan terbaca pada alat ukur yaitu DGM yang terhubung dengan resistor tegangan tinggi sebagai pembagi tegangan resistif. Hubungan antara nilai tegangan tinggi searah dengan tegangan terukur \bar{U}_U dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\bar{U}_U = \frac{R_U}{R_M + R_U} \bar{U}_M \quad (2-16)$$

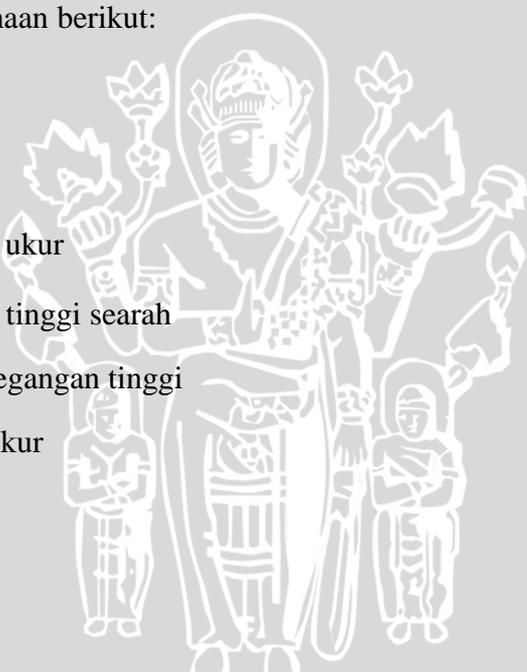
dengan:

\bar{U}_U : Tegangan ukur

\bar{U}_M : Tegangan tinggi searah

R_M : Resistor tegangan tinggi

R_U : Resistor ukur



BAB III METODOLOGI

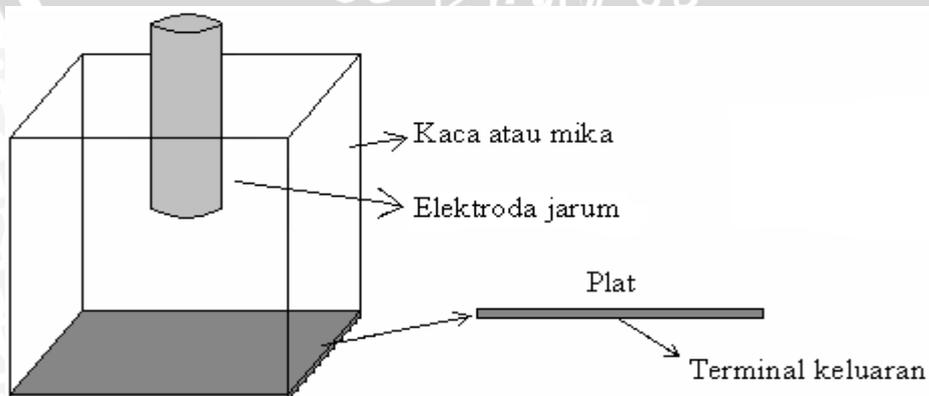
3.1. Studi Literatur

Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit sebagai alternative dari minyak isolasi bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan tembusnya pada heterogenitas distribusi medan listrik. Juga bertujuan untuk mengetahui karakteristik tegangan tembusnya pada kondisi minyak kelapa sawit masih murni dan sudah tercemar oleh polutan yang sering muncul pada minyak isolasi yang sedang beroperasi. Selain pengujian karakteristik tegangan tembusnya juga perlu dilakukan pengujian arus bocor, resistivitas, dan permitivitas dari minyak isolasi untuk mengetahui sifat elektrik dari minyak kelapa sawit yang diuji. Selanjutnya untuk mengetahui distribusi medan listriknya, dapat dilakukan simulasi dengan menggunakan perangkat lunak femm 4.2.

Literatur-literatur yang dipelajari, diperlukan untuk mendukung penelitian ini antara lain untuk mengetahui sifat-sifat dari minyak isolasi, mekanisme dan faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya kegagalan pada minyak isolasi, pengotor pada minyak isolasi, faktor efisiensi medan listrik, dan literatur-literatur pendukung lainnya.

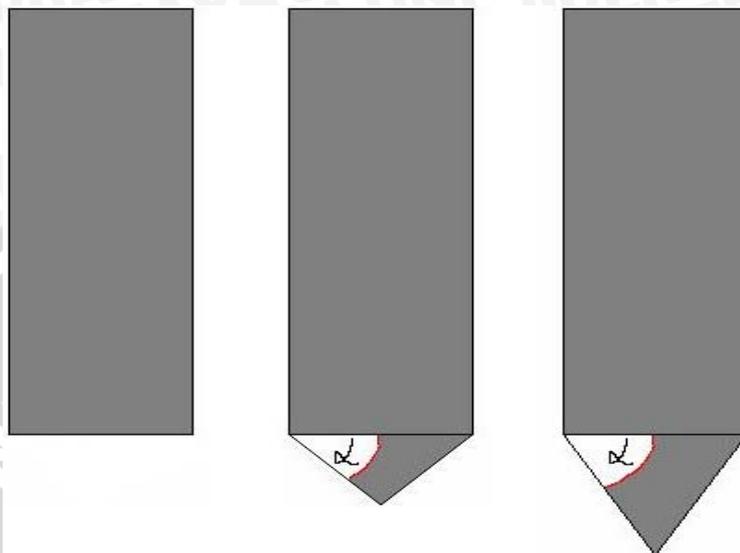
3.2. Objek Uji

Dalam penelitian ini, minyak dengan susunan elektroda digunakan sebagai objek ujinya dan minyak yang digunakan adalah minyak kelapa sawit yang ada di pasaran. Dalam pengujian, minyak kelapa sawit diletakkan dalam wadah objek uji. Wadah terbuat dari kaca atau mika dengan alas yang terbuat dari plat logam yang berfungsi sebagai elektroda piringnya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Wadah objek uji yang digunakan dalam pengujian
Sumber: Perencanaan

Susunan elektroda yang digunakan adalah susunan elektroda jarum-piring dengan diameter elektroda jarum sebesar 22,0 mm. Elektroda jarum yang digunakan terdiri dari 3 macam jenis dengan keruncingan yang berbeda yaitu sudut 0° , 45° , dan 60° , seperti yang ditunjukkan Gambar 3.2.



(a.) (b.) (c.)

Gambar 3.2. Elektroda jarum dengan beberapa sudut keruncingan:

(a.) sudut 0°

(b.) sudut 45°

(c.) sudut 60°

Sumber: Perencanaan

3.3. Rangkaian Pengujian

Rangkaian pembangkitan dan pengukuran tegangan tinggi AC digunakan untuk mengetahui karakteristik tingkat tegangan tembus AC dan arus bocor minyak kelapa sawit seperti yang ditunjukkan pada Bab 2 Gambar 2.12. Sedangkan rangkaian pembangkitan dan pengukuran tegangan tinggi DC digunakan untuk mengetahui karakteristik tingkat tegangan tembus DC, resistivitas minyak kelapa sawit, dan pengaruh efek polaritas di minyak kelapa sawit pada susunan elektroda yang sangat tidak homogen atau susunan elektroda jarum-piring seperti yang ditunjukkan pada Bab 2 Gambar 2.13.(a). Untuk susunan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah yang digunakan pada pengujian ini terdiri dari dua macam rangkaian yaitu rangkaian polaritas positif dan rangkaian polaritas negatif.

Komponen-komponen peralatan pengujian yang digunakan dalam rangkaian pengujian antara lain (Buku manual (*manual book*) peralatan tegangan tinggi Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya):

- a. Trafo uji (TU) sebagai sumber tegangan tinggi. Trafo uji yang ada di Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya adalah trafo tegangan tinggi 220 V / 100 kV, 3 belitan.
- b. Dioda (D) tegangan tinggi sebagai penyearah tegangan tinggi. Dioda yang tersedia mempunyai kemampuan menerima tegangan balik maksimum sebesar 140 kV, oleh karena itu dalam rangkaian diperlukan dua buah dioda untuk mengatasi tegangan balik yang besarnya dua kali dari tegangan puncak trafo uji.
- c. Kapasitor (C_M) dan resistor (R_M).
- d. DGM adalah alat ukur untuk tegangan tinggi searah. DGM dalam rangkaian diseri dengan resistor (R_M).

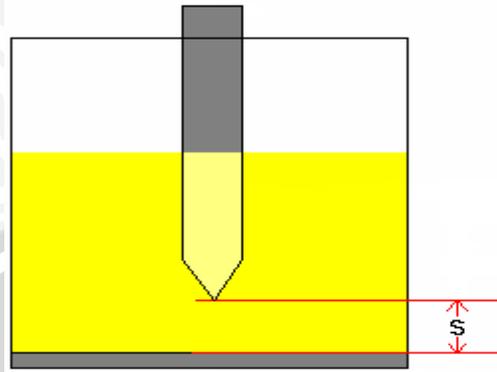
3.4. Pengujian Tegangan Tembus Minyak kelapa sawit

Pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dilakukan dengan menggunakan gelombang sinus soida tegangan tinggi AC dengan frekuensi 50 Hz dan sumber tegangan tinggi searah DC sehingga diperlukan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi AC dan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi DC.

Langkah-langkah dalam pengukuran atau pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dilakukan sebagai berikut:

- a. Bahan obyek uji yaitu minyak kelapa sawit diletakkan dalam wadah obyek uji.
- b. Pengujian menggunakan minyak kelapa sawit yang belum terkontaminasi atau masih baru.
- c. Pengujian pertama adalah pengujian kegagalan isolasi (tembus) minyak kelapa sawit pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah.
- d. Rangkaian percobaan pertama yang digunakan adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan polaritas positif.
- e. Susunan elektroda pertama adalah susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Setiap kali pengujian diambil tiga data untuk mendapatkan keakuratan dan ketelitian data.

- f. Jarak sela (s) pertama yang diterapkan pada susunan elektroda adalah sebesar 2,5 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3.

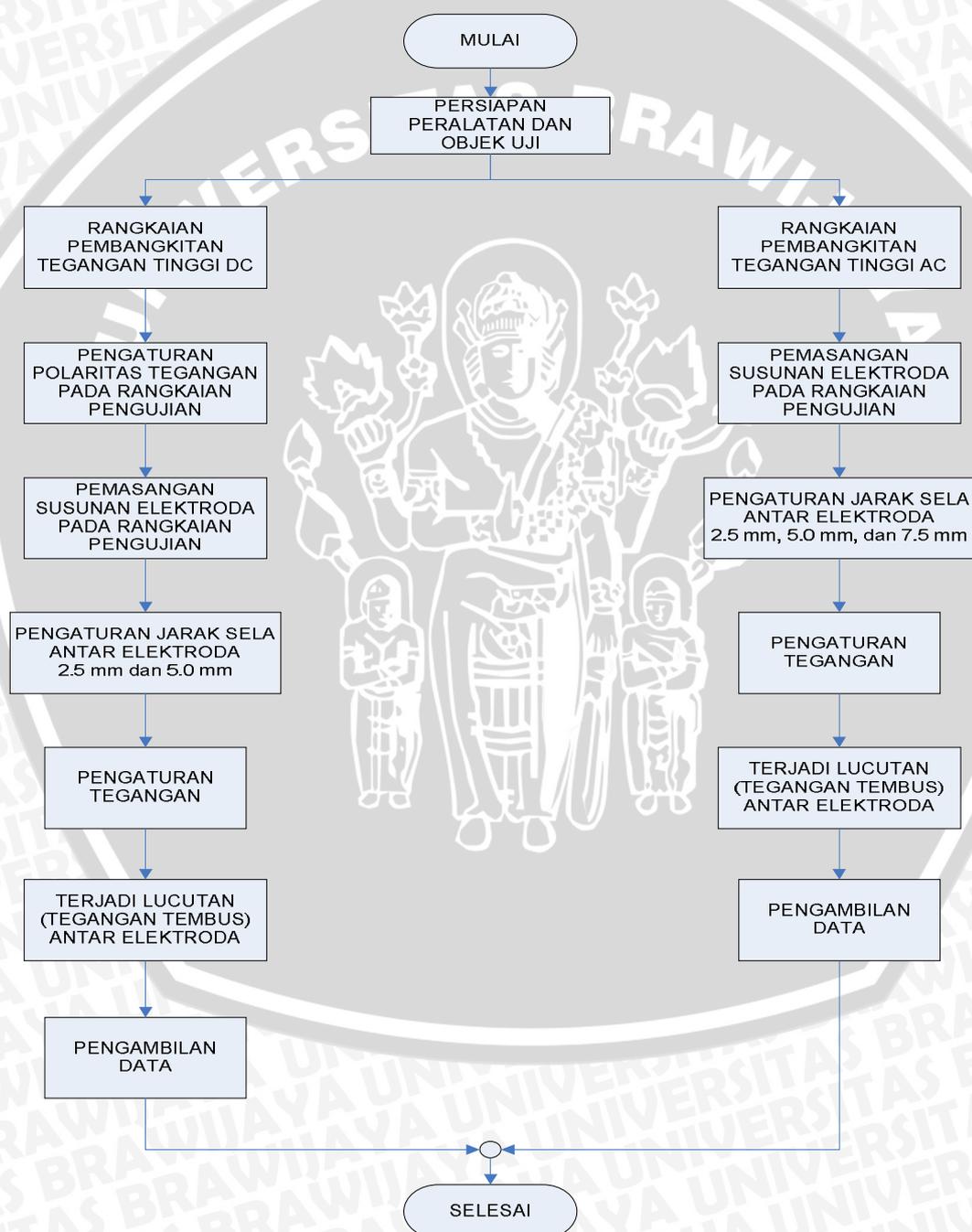


Gambar 3.3. Jarak sela elektroda jarum-piring (s)
Sumber: Perencanaan

- g. Dalam pengujian elektroda jarum dibenamkan dalam minyak kelapa sawit.
- h. Tegangan dinaikkan secara bertahap, ketika tepat terjadi loncatan bunga api atau lucutan cahaya (telah terjadi tembus) pada minyak kelapa sawit, maka nilai tegangan yang ditunjukkan pada peralatan ukur DGM adalah nilai tegangan tembusnya.
- i. Susunan elektroda kedua adalah susunan elektroda jarum-piring dengan dengan sudut elektroda jarum 60° .
- j. Susunan elektroda ketiga adalah susunan elektroda jarum-piring dengan dengan sudut elektroda jarum 0° .
- k. Jarak sela (s) kedua pada susunan elektroda yang diterapkan adalah sebesar 5,0 mm. Dan sebelum melakukan pengujian selanjutnya, elektroda dan wadah harus dibersihkan untuk mencegah agar minyak kelapa sawit tidak terkontaminasi dengan partikel lain seperti debu yang menempel pada elektroda dan wadah.
- l. Untuk mengetahui pengaruh efek polaritas, maka rangkaian percobaan kedua adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan polaritas negatif dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 45° dan 60° dan langkah pengujiannya seperti pada langkah sebelumnya.
- m. Pengujian kedua adalah pengujian kegagalan isolasi (tembus) minyak kelapa sawit pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik.

- n. Pada pengujian kegagalan isolasi (tembus) minyak kelapa sawit pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik, jarak sela antar elektroda yang diterapkan adalah 2,5 mm, 5,0 mm, dan 7,5 mm. Langkah pengujiannya seperti langkah yang telah dijelaskan sebelumnya.

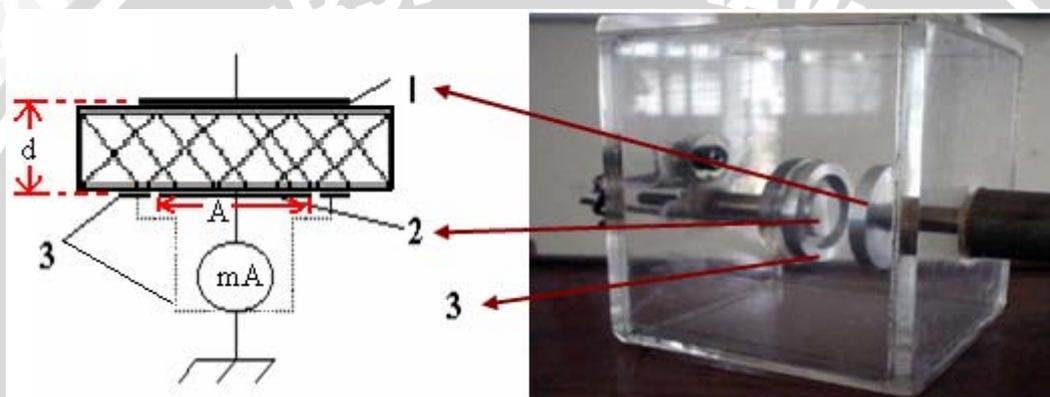
Diagram alir untuk pengujian karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit pada kondisi sebelum terkontaminasi atau kondisi murni, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Diagram alir pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit
Sumber: Perencanaan

3.5. Pengujian Resistivitas Dan Permittivitas Minyak kelapa sawit

Pengujian ini untuk mengetahui nilai resistivitas dan permitivitas yang dimiliki oleh minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini. Untuk mencari nilai resistivitasnya, perlu dilakukan pengukuran besar arus bocornya pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan menggunakan wadah yang telah didisain khusus, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. Nilai resistivitas dihitung dengan menggunakan persamaan (2-1). Sedangkan untuk mencari nilai permitivitasnya, perlu dilakukan pengukur nilai kapasitansi minyak kelapa sawit dengan menggunakan wadah uji yang sama. Nilai permitivitas dihitung dengan menggunakan persamaan (2-3).

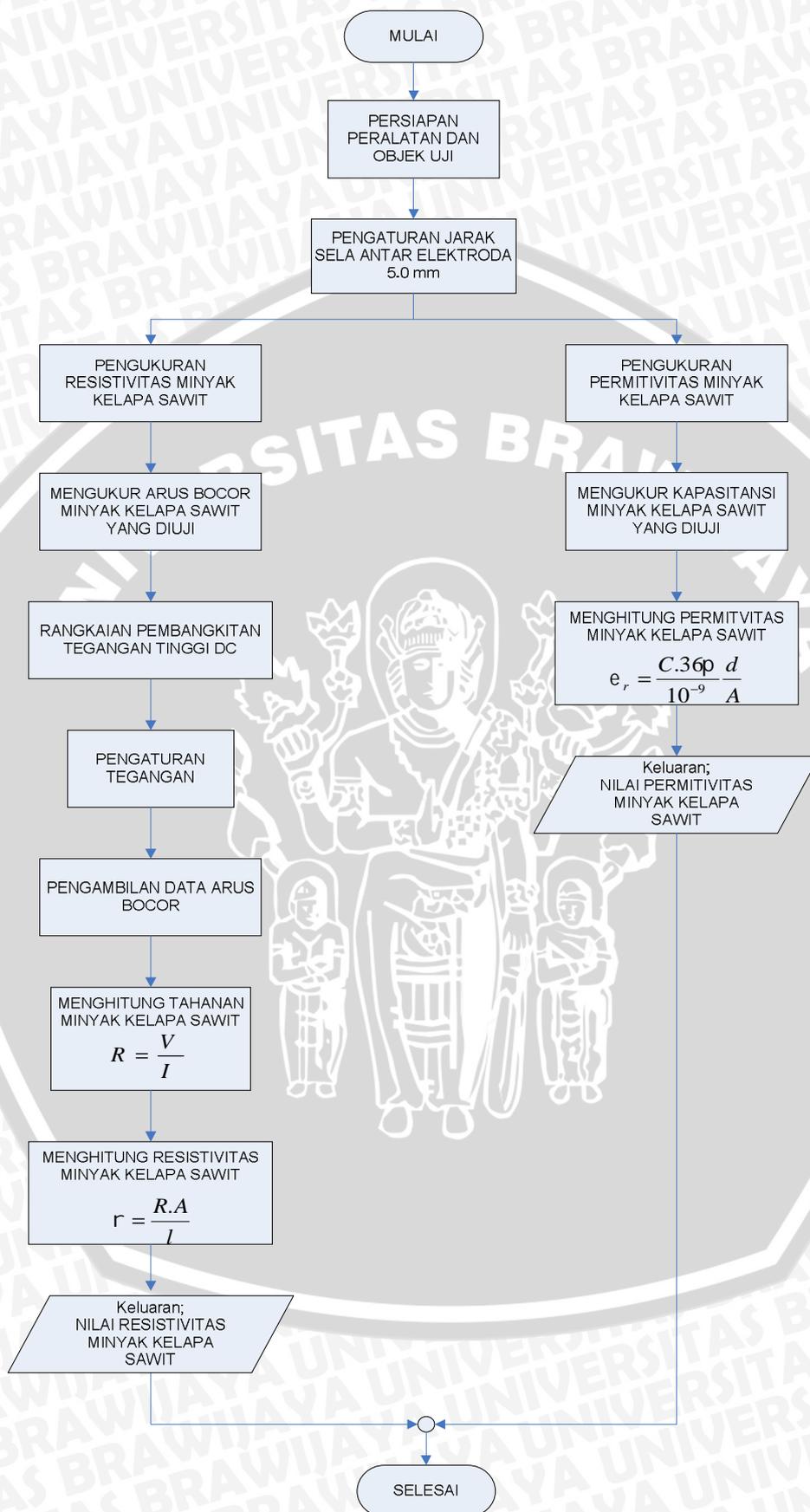


Gambar 3.5. Wadah uji yang digunakan untuk pengujian resistivitas dan permitivitas

1. Elektroda tegangan tinggi
2. Elektroda ukur
3. Elektroda cincin pengaman yang dihubungkan ke grounding

Sumber: Dieter kind 1993; 67

Gambar 3.5 adalah wadah uji yang digunakan dalam pengujian untuk mengetahui resistivitas dan permitivitas bahan isolasi. Wadah ini terdiri dari susunan elektroda yang terdiri dari elektroda tegangan tinggi, elektroda cincin pengaman, dan elektroda ukur dengan diameter 2 cm atau dengan luas dari elektroda ukur (A) $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$, dan jarak sela antar elektroda (d) 5mm. Rangkaian yang digunakan adalah rangkaian pembangkitan tegangan DC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.(a). Diagram alir untuk pengujian nilai resistivitas dan permitivitas dari minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.

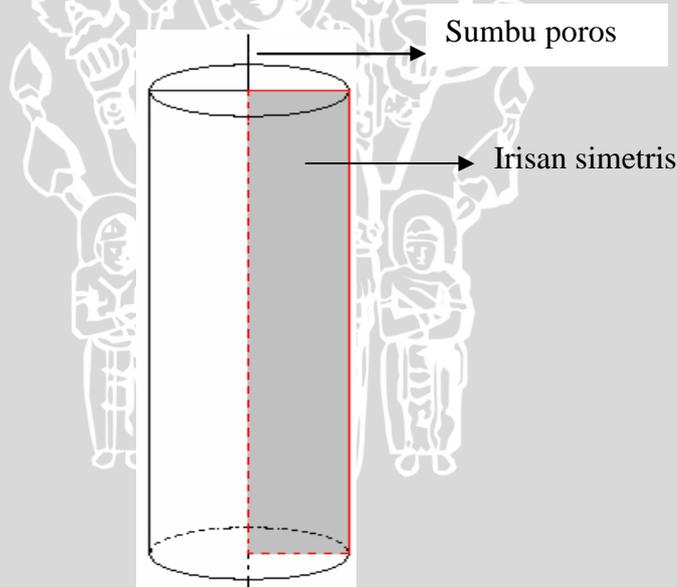


Gambar 3.6. Diagram alir pengujian resistivitas dan permitivitas minyak kelapa sawit
 Sumber: Perencanaan

3.6. Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak kelapa sawit

Distribusi medan listrik dari beberapa susunan elektroda pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak femm 4.2. Dengan menggunakan data-data dari hasil pengujian dan hasil perhitungan maka distribusi medan listrik dari minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini dapat disimulasikan. Data-data yang diperlukan untuk simulasi adalah bentuk geometris dari susunan elektroda, dimensi elektroda, jarak sela antar elektroda, tegangan tembus, dan permitivitas minyak sawit yang diuji.

Pada program femm 4.2, pertama yang dilakukan adalah menggambar susunan elektroda yang digunakan dalam pengujian. Pada simulasi ini jarak sela yang digunakan adalah 5,0 mm, dengan diameter elektroda jarum 22,0 mm. Karena elektroda jarum berbentuk silinder, maka simulasi menggunakan sistem *axisymmetric*, yaitu dengan cara membuat irisan simetrisnya dengan pusat elektroda sebagai pusat porosnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7.

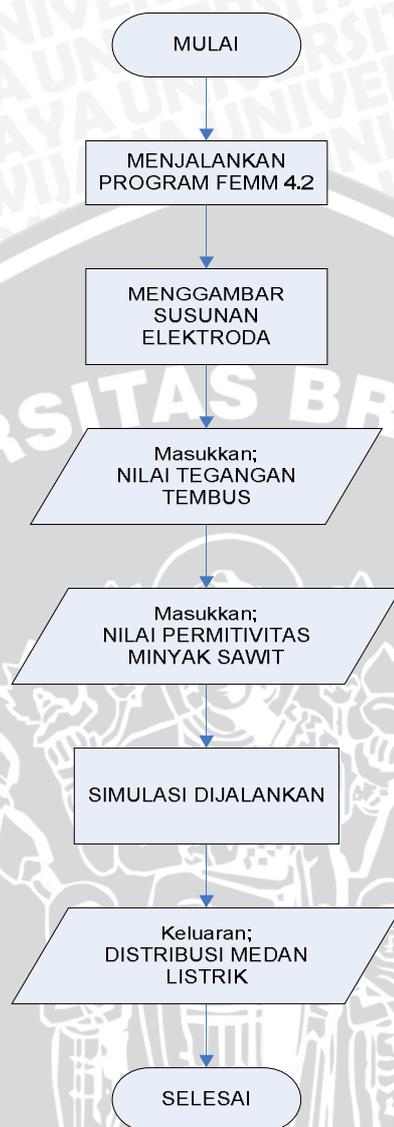


Gambar 3.7. Sumbu poros dan irisan simetris pada elektroda jarum sudut 0°

Sumber: Hasil perencanaan simulasi

Setelah menggambar susunan elektroda, kemudian memasukkan data pengujian yaitu tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda yang akan disimulasikan. Tegangan tembus yang dipakai adalah tegangan tembus pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik. Setelah itu memasukkan nilai permitivitas minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini. Kemudian program dijalankan maka akan didapatkan hasil simulasi distribusi medan listriknya.

Diagram alir untuk simulasi distribusi medan listrik dari minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8. Diagram alir simulasi distribusi medan listrik pada pengujian minyak kelapa sawit dengan menggunakan program femm 4.2

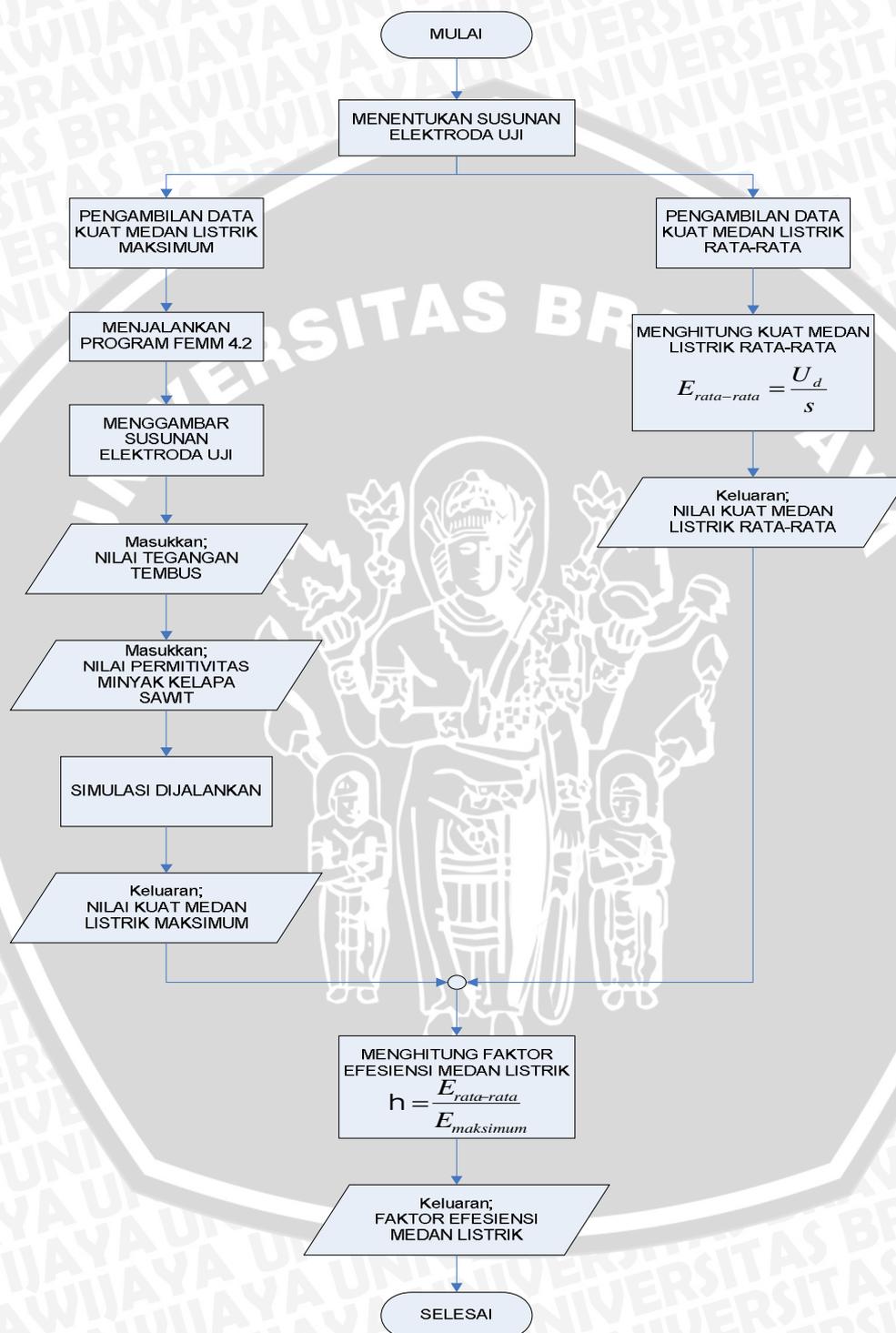
Sumber: Perencanaan

3.7. Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak kelapa sawit

Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi (kV/cm) $E_{maksimum}$ dapat diketahui dari grafik dan tabel hasil simulasi pada perangkat lunak femm 4.2. Sedangkan kuat medan listrik rata-rata (kV/cm) $E_{rata-rata}$ dapat dihitung dengan persamaan (2-13).

Pada simulasi, jarak sela yang diterapkan adalah 5,0 mm dan tegangan tembus yang dipakai adalah tegangan tembus pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi

bolak-balik. Diagram alir untuk mencari atau mendapatkan faktor efisiensi medan listrik pada beberapa susunan elektroda yang diuji dalam penelitian minyak kelapa sawit ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.9.



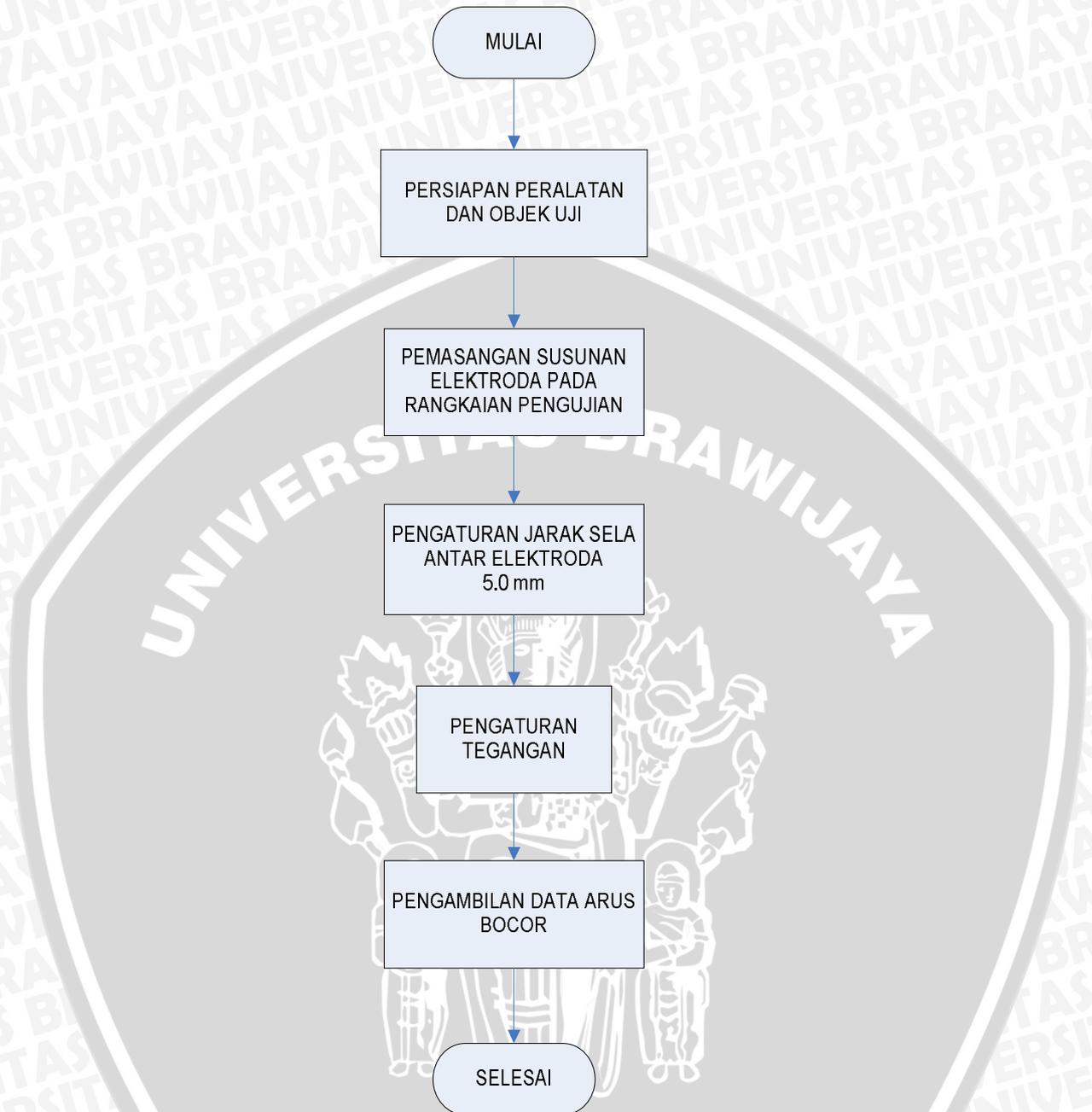
Gambar 3.9. Diagram alir perhitungan dan simulasi faktor efisiensi medan listrik pada pengujian minyak kelapa sawit
Sumber: Perencanaan

3.8. Pengujian Arus Bocor Minyak kelapa sawit

Pengujian arus bocor, bertujuan untuk mengetahui seberapa besar arus listrik yang mengalir pada tegangan kerja yang diberikan. Sebelum melakukan pengujian arus bocor, nilai tegangan tembus pada objek yang diuji harus diketahui terlebih dahulu. Tegangan yang diberikan pada saat pengujian arus bocor tidak boleh sampai melampaui nilai tegangan tembusnya. Pada saat terjadi tembus, arus yang mengalir bukan lagi arus bocor melainkan arus hubung singkatnya. Rangkaian pengujian arus bocor adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. Langkah-langkah pengukuran atau pengujian arus bocor minyak kelapa sawit dilakukan sebagai berikut:

- a. Bahan obyek uji yaitu minyak kelapa sawit diletakkan dalam wadah obyek uji.
- b. Minyak kelapa sawit yang diuji adalah minyak kelapa sawit murni atau tidak diberi pengotor.
- c. Rangkaian pengujian menggunakan rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik.
- d. Susunan elektroda pertama yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan sudut 0° . Setiap kali pengujian diambil tiga data untuk mendapatkan keakuratan dan ketelitian data.
- e. Jarak sela yang diterapkan antar elektroda adalah 5,0 mm.
- f. Tegangan dinaikkan pertahapnya sebesar 1 kV dan mencatat arus bocornya setiap kali kenaikan tegangan 1 kV. Tegangan dinaikkan tidak sampai melampaui tegangan tembusnya atau dibawah nilai tegangan tembusnya.
- g. Susunan elektroda kedua yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan dengan sudut jarum 45° dan susunan elektroda ketiga yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan dengan sudut jarum 60° . Langkah pengujian sama seperti langkah pengujian sebelumnya.

Diagram alir untuk pengujian arus bocor dari minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Diagram alir pengujian arus bocor pada minyak kelapa sawit
Sumber: Perencanaan

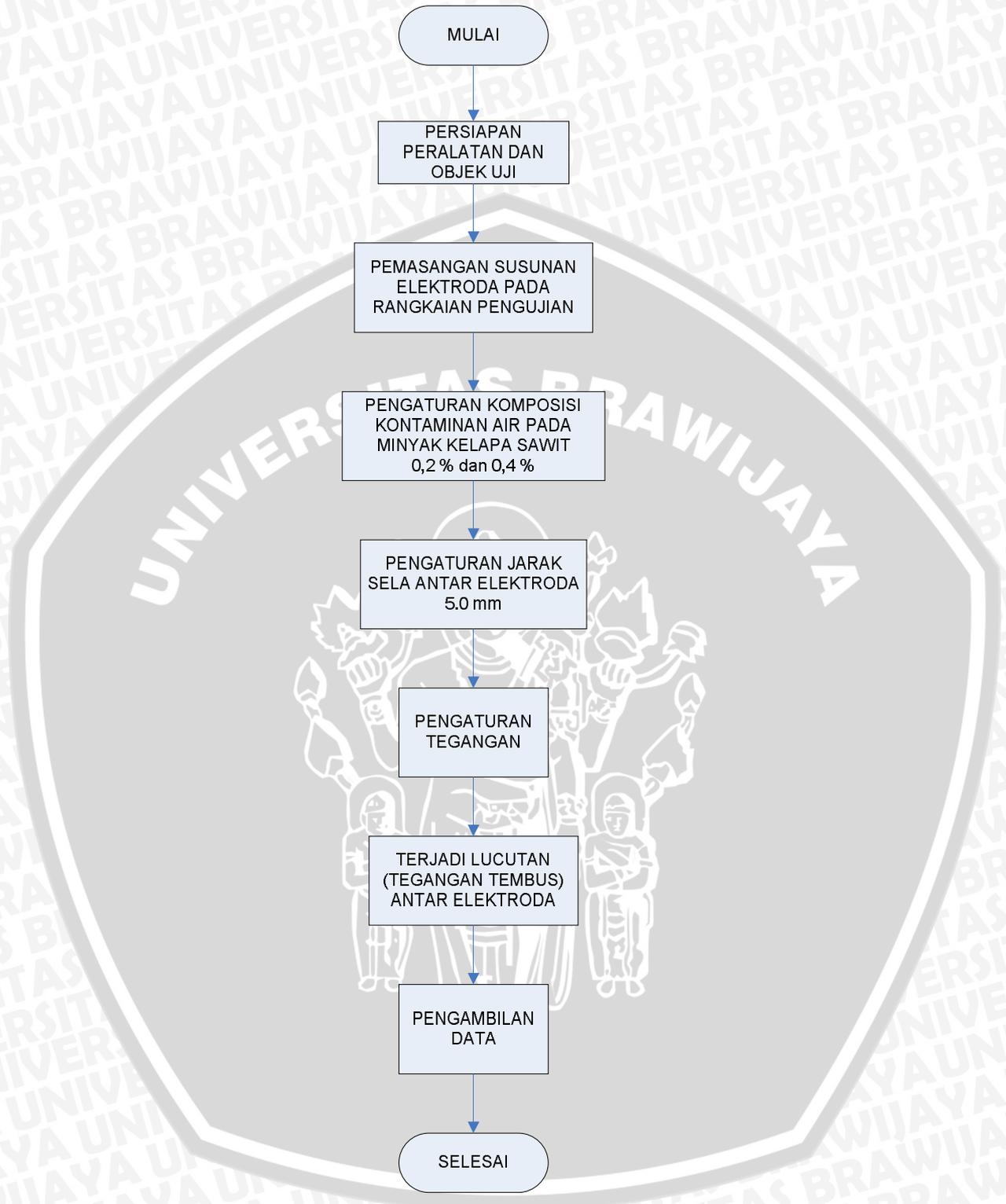
3.9. Pengujian Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Sawit

Pengujian minyak kelapa sawit yang telah diberi pengotor atau polutan dari minyak isolasi bertujuan untuk mengetahui seberapa besar dampak yang diakibatkan terhadap penurunan nilai tegangan tembusnya pada kondisi masih murni. Pengotor yang dipakai adalah air dan pengotor ini banyak didapati pada minyak isolasi dalam keadaan kotor.

Langkah-langkah pengukuran atau pengujian pengaruh pengotor air terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit dilakukan sebagai berikut:

- a. Bahan obyek uji yaitu minyak kelapa sawit diletakkan dalam wadah obyek uji sebanyak 500 ml.
- b. Diambil sampel minyak kelapa sawit sebanyak 200 ml yang akan diuji untuk dicampur dengan air, agar air mudah diaduk sebelum dicampur dengan minyak keseluruhan yang akan diuji.
- c. Air yang dicampurkan atau diberikan pada minyak yang akan diuji adalah sebesar 0,2 % (1 ml) dan 0,4 % (2 ml) dari volume minyak yang akan diuji.
- d. Sampel minyak yang telah diberi air diaduk secara perlahan-lahan selama kurang lebih 15 menit.
- e. Setelah sampel minyak yang telah diberi air diaduk, kemudian dicampur dengan minyak utama dan dilakukan pengadukan secara perlahan agar sampel yang telah diberi air menyebar merata dalam minyak keseluruhan.
- f. Rangkaian yang digunakan adalah rangkaian pembangkitan tegangan tinggi bolak-balik dengan jarak sela antar elektroda adalah 5,0 mm.
- g. Susunan elektroda pertama yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan sudut 0° , dan setiap kali pengujian diambil tiga data.
- h. Susunan elektroda kedua yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan sudut 45° dan susunan elektroda ketiga yang digunakan adalah elektroda jarum-piring dengan sudut 60° . Langkah pengujian sama seperti langkah pengujian sebelumnya.

Diagram alir untuk pengujian pengaruh pengotor atau kontaminan air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Diagram alir pengujian pengaruh pengotor atau kontaminan air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit
Sumber: Perencanaan

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1. Umum

Dalam bab ini, akan dianalisis pengaruh dari beberapa parameter terhadap karakteristik kualitas isolasi dari minyak kelapa sawit, parameter-parameter tersebut adalah: pengaruh sudut kelancipan elektroda dan jarak sela antar elektroda terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit, efek polaritas, resistivitas dan permitivitas minyak isolasi, arus bocor pada minyak kelapa sawit, pengotor minyak isolasi, dan faktor efisiensi dari bentuk geometris susunan elektroda. Susunan elektroda yang digunakan dalam pengujian minyak kelapa sawit ini terdiri dari beberapa macam susunan elektroda, antara lain yaitu susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0° , 45° , dan 60° . Elektroda jarum yang digunakan dalam penelitian ini mempunyai diameter yang sama yaitu 22,0 cm dan elektroda piringnya mempunyai ketebalan 1,0 mm.

Dalam menganalisis data yang diperoleh dari hasil pengujian, maka dalam pembahasan ini data tersebut disajikan secara pengelompokan sesuai dengan parameter yang dibahas. Pengelompokannya dibagi dalam bentuk subab-subab yang akan menjelaskan bagaimana pengaruh dari parameter-parameter yang akan dianalisis terhadap karakteristik kualitas isolasi dari minyak kelapa sawit.

Distribusi medan listrik dari pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan menggunakan beberapa susunan elektroda dapat disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak femm 4.2. Dengan menggunakan data-data yang diperoleh dari hasil pengujian dan hasil perhitungan, maka distribusi medan listrik dari minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini dapat disimulasikan pada penggunaan beberapa susunan elektroda yang berbeda.

4.2. Pengaruh Sudut Kelancipan Elektroda Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

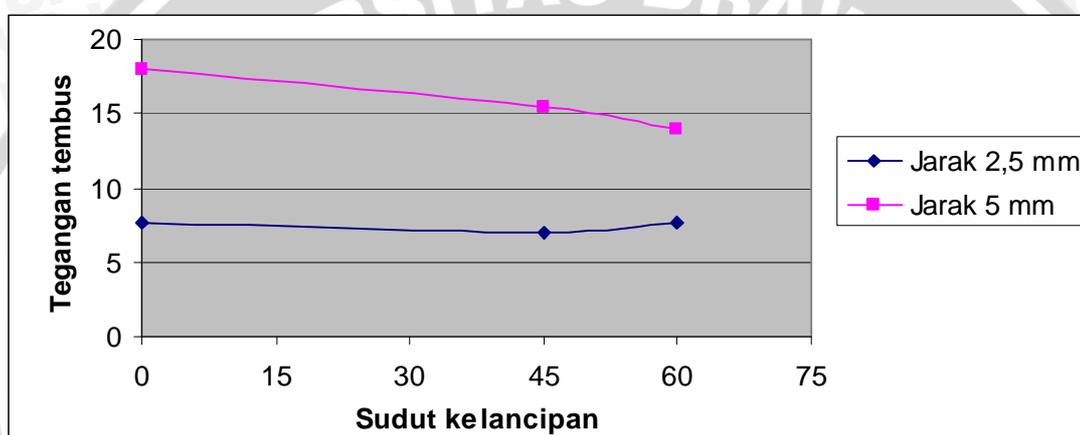
Pada pembahasan ini, tegangan tembus minyak kelapa sawit diuji dengan menggunakan beberapa bentuk elektroda dengan sudut kelancipan yang berbeda-beda. Diameter pada elektroda dibuat sama untuk diperoleh pengaruh dari sudut kelancipan elektroda pada tegangan tembusnya. Pengujian pada pembahasan ini dilakukan pada dua jenis rangkaian yaitu rangkaian AC dan DC. Data pada rangkaian AC dapat dilihat

pada Tabel 4.1. Karakteristik tegangan tembusnya dapat dilihat di grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Tabel 4.1. Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit pada rangkaian AC

Jarak sela (mm)	Data ke-	Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 0°			Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 45°			Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 60°		
		\bar{U}_{ac}	\bar{U}_{ac}	$U_{efektif}$	\bar{U}_{ac}	\bar{U}_{ac}	$U_{efektif}$	\bar{U}_{ac}	\bar{U}_{ac}	$U_{efektif}$
2,5	1	10,0	10,8	7,6	10,2	9,9	7,0	10,5	10,9	7,7
	2	10,7			9,5			11,3		
	3	11,7			10,1			11,0		
5,0	1	24,6	25,5	18,0	20,4	22,0	15,5	19,3	19,7	13,9
	2	25,2			23,9			19,6		
	3	26,6			21,6			20,1		

Sumber: Hasil pengujian



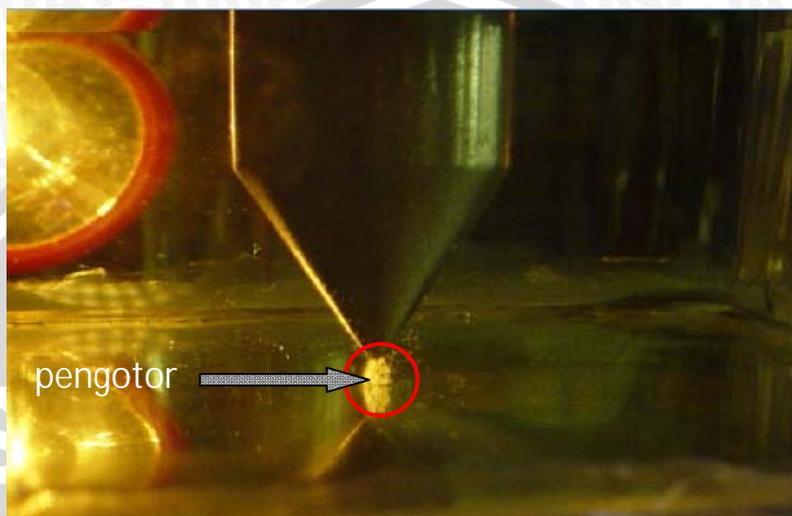
Gambar 4.1. Grafik tegangan tembus sebagai fungsi sudut kelancipan elektroda dengan jarak sela yang berbeda pada rangkaian AC

Sumber: Hasil pengujian

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dapat diamati bahwa pada jarak sela yang kecil yaitu pengujian pada jarak sela 2,5 mm, nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan sudut elektroda yang berbeda hasilnya hampir sama. Sedangkan pada jarak sela 5,0 mm terlihat dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 bahwa pada susunan elektroda dengan sudut elektroda yang semakin besar, maka nilai tegangan tembusnya juga semakin menurun. Hal ini disebabkan karena faktor efisiensi medan listriknya. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya tentang faktor efisiensi medan listrik, semakin kecil nilai faktor faktor efisiensi medan listrik maka bentuk geometris dari susunan elektroda juga semakin tidak homogen, seperti pada susunan elektroda jarum-piring. Dan semakin kecil nilai faktor efisiensi medan listriknya, maka nilai tegangan tembusnya juga semakin kecil.

Pada saat pengujian muncul fenomena yang dapat mempengaruhi nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit yaitu pada ujung elektroda jarum muncul pangotor internal

dari minyak kelapa sawit yang dan pengotor internal ini mengumpul pada ujung elektroda jarum. Dan hal ini menyebabkan nilai tegangan tembusnya menjadi besar. Bila pengotor tersebut dibiarkan saja pada saat pengujian, maka nilai tegangan tembusnya juga akan bertambah semakin besar. Kejadian ini dapat dilihat pada Gambar 4.2. Jadi pengotor internal yang ada pada minyak kelapa sawit ini bersifat sebagai isolasi.



Gambar 4.2. Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada ujung elektroda jarum pada rangkaian AC

Sumber: Hasil pengujian

Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa pengotor internal minyak kelapa sawit yang muncul dan mengumpul pada ujung elektroda jarum saat pengujian. Pengotor internal pada minyak kelapa sawit ini akan menghambat terjadinya tembus atau munculnya loncatan bunga api dari ujung dari elektroda jarum ke elektroda piring. Peningkatan dari nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda jarum-piring dengan perlakuan tidak menghilangkan atau membiarkan pengotor internalnya tetap ada pada ujung elektroda jarum setelah terjadi tembus pada saat pengujian, ternyata peningkatan nilai tegangan tembusnya dapat mencapai sampai dua kali bahkan lebih dari nilai tegangan tembus pengujian sebelumnya. Peningkatan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda jarum-piring pada jarak sela 2,5 mm dapat dilihat pada Tabel 4.2, dengan perlakuan tidak menghilangkan atau membiarkan pengotor internalnya tetap pada ujung elektroda jarum setelah terjadi tembus.

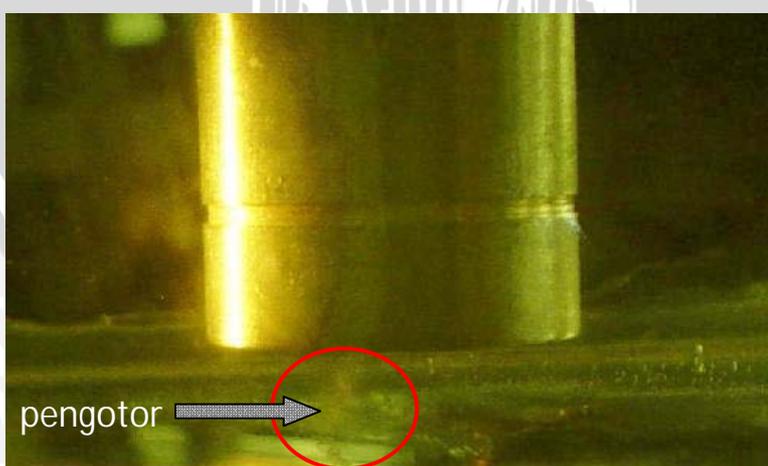
Tabel 4.2. Peningkatan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda jarum-piring pada jarak sela antar elektroda 2,5 mm

Data ke-	Tembus AC \bar{U}_{ac} (kV)* elektroda sudut 45°	Tembus AC \bar{U}_{ac} (kV)* elektroda sudut 60°
1	9,9	10,8
2	14,3	17,0
3	19,8	20,8
4	22,8	24,9

Sumber: Hasil pengujian

* Pengujian dengan perlakuan tidak menghilangkan atau membiarkan pengotor internalnya tetap pada ujung elektroda jarum setelah terjadi tembus.

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa bila pengotor internal minyak tidak dihilangkan atau dibairkan tetap ada pada ujung elektroda jarum setelah terjadi tembus, maka tegangan tembus minyak akan mengalami peningkatan sekitar 3 kV bahkan sampai sekitar 7 kV atau lebih dari setengah nilai tegangan tembus sebelumnya. Walaupun pengotor internal ini telah dihilangkan setelah tembus, pengotor internal ini akan muncul lagi di ujung elektroda jarum. Oleh karena itu pada waktu pengujian, setelah terjadi tembus perlu menghilangkan pengotor yang mengumpul di ujung elektroda jarum untuk mendapatkan nilai rata-rata tegangan tembus minyak kelapa sawit. Sedangkan pada elektroda dengan sudut 0°, pengotor internal yang mengumpul pada ujung elektroda lebih sedikit dibandingkan dengan elektroda jarum dengan sudut 45° dan 60°, kejadian ini dapat dilihat pada Gambar 4.3. Namun bila setelah terjadi tembus pengotor internalnya tidak dihilangkan, juga akan mengakibatkan terjadinya peningkatan tegangan tembus namun tidak sebesar pada elektroda jarum.



Gambar 4.3. Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada elektroda jarum dengan sudut 0° pada rangkaian AC

Sumber: Hasil pengujian

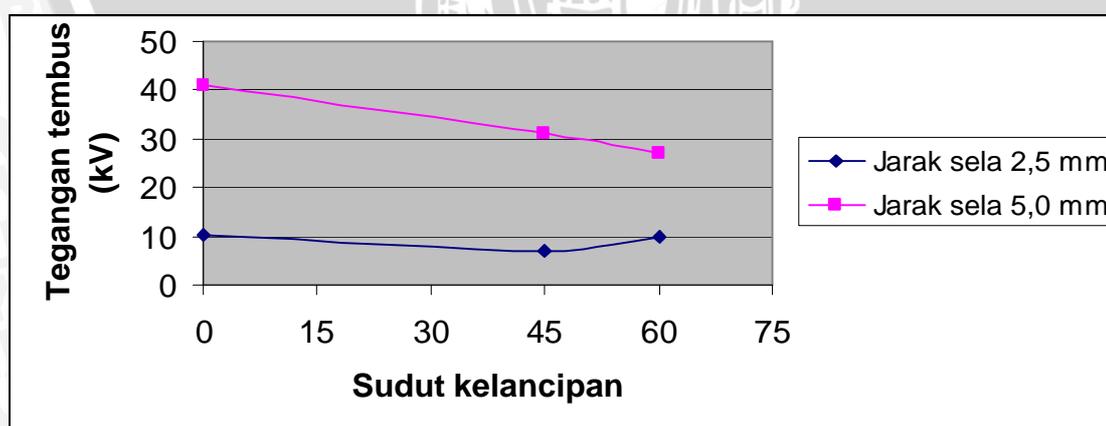
Pada jarak sela yang lebih besar yaitu pada kasus ini adalah 5,0 mm, pengaruh dari pengotor internal kecil. Sehingga tegangan tembusnya lebih dipengaruhi oleh nilai faktor efisiensi medan listriknya dari bentuk geometris susunan elektrodanya. Namun setelah terjadi tembus masih tetap perlu menghilangkan pengotor internal yang mengumpul di ujung elektroda jarum, karena bila dibiarkan, pengotor internal yang mengumpul pada ujung elektroda akan semakin banyak dan akan mengakibatkan peningkatan nilai tegangan tembusnya.

Pengujian karakteristik pengaruh sudut kelancipan elektroda terhadap tegangan tembus pada rangkaian DC, langkah-langkah yang dilakukan sama dengan pengujian karakteristik pengaruh sudut kelancipan terhadap tegangan tembus pada rangkaian AC. Data pengujian pada rangkaian DC dapat dilihat pada Tabel 4.3. Dan karakteristik tegangan tembusnya dapat dilihat di grafik pada Gambar 4.4.

Tabel 4.3. Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit pada rangkaian DC

Jarak sela (mm)	Data ke-	Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 0°		Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 45°		Tegangan tembus (kV) elektroda sudut 60°	
		U_{dc}	\overline{U}_{dc}	U_{dc}	\overline{U}_{dc}	U_{dc}	\overline{U}_{dc}
2,5	1	9,8	10,3	5,6	6,8	10,0	9,7
	2	11,1		7,3		9,0	
	3	10,1		7,5		10,2	
5,0	1	41,8	41,0	30,4	31,1	26,7	27,2
	2	41,0		31,0		27,2	
	3	40,1		31,8		27,7	

Sumber: Hasil pengujian



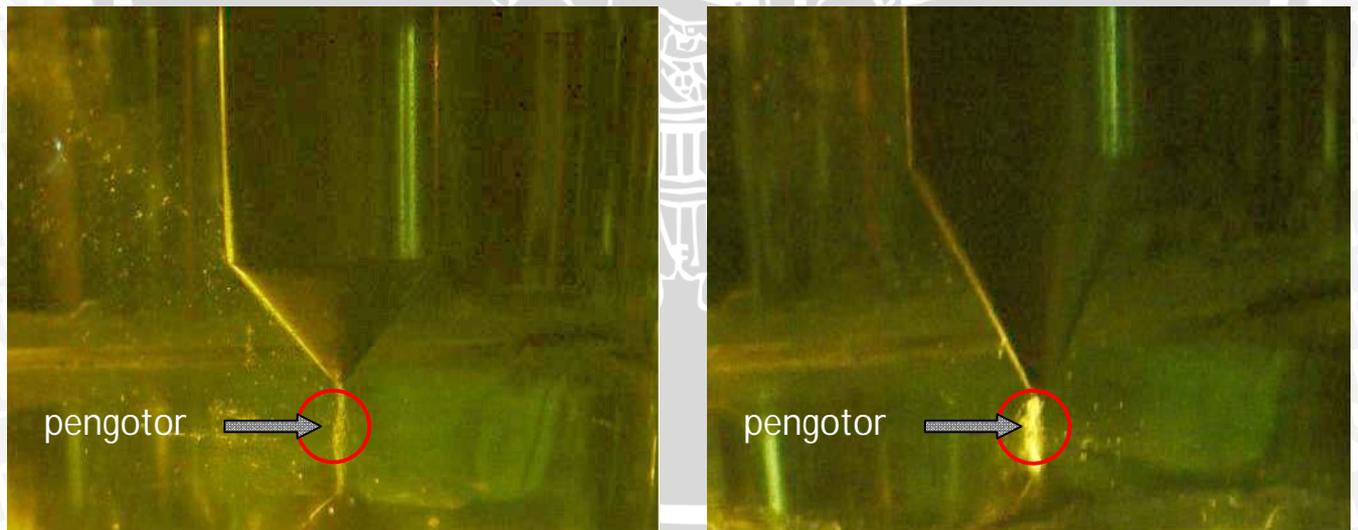
Gambar 4.4. Grafik tegangan tembus sebagai fungsi sudut kelancipan elektroda dengan jarak sela yang berbeda pada rangkaian DC

Sumber: Hasil pengujian

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 terlihat bahwa nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit pada susunan elektroda dengan sudut kelancipan yang

berbeda, karakteristik tegangan tembusnya hampir sama dengan karakteristik tegangan tembus pada rangkaian AC. Pada jarak sela 2,5 mm penurunan nilai tegangan tembusnya dari sudut 0° ke sudut 45° lebih besar dari pada pengujian pada rangkaian AC dan menaikkan tegangan dari sudut 45° ke sudut 60° juga lebih besar. Hal ini disebabkan karena pengaruh pengotor internal pada elektroda dengan sudut 0° sampai dengan elektroda dengan sudut 45° lebih kecil sehingga lebih dipengaruhi oleh faktor efisiensi medan listriknya. Sedangkan pada elektroda dengan sudut 45° sampai dengan elektroda dengan sudut 60° karakteristik tegangan tembusnya naik, karena pengaruh pengotor internal lebih besar dari pada faktor efisiensi medan listriknya.

Pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 60° nilai tegangan tembusnya hampir sama dengan nilai tegangan tembus pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° . Padahal semakin runcing atau semakin lancip ujung dari elektroda maka faktor faktor efisiensi medan listrik juga semakin kecil atau semakin tidak homogen, sehingga nilai tegangan tembusnya seharusnya lebih kecil. Kalau dilihat dari hasil pengamatan waktu pengujian, penyebab hal ini adalah pada elektroda dengan sudut jarum 60° pengotor internal minyak kelapa sawit sering muncul atau mengumpul pada ujung elektroda jarum, kejadian ini dapat dilihat pada Gambar 4.5. Sehingga pengaruh pengotor internal minyak kelapa sawit lebih besar dari pada nilai faktor efisiensi medan listriknya.



(a.)

(b.)

Gambar 4.5. Pengotor internal yang muncul dari minyak kelapa sawit pada ujung elektroda jarum dengan sudut jarum: (a.) sudut 45° (b.) sudut 60°

Sumber: Hasil pengujian

Dari Gambar 4.5 dapat diamati bahwa pada elektroda dengan sudut 60° pengotor internal minyak kelapa sawit lebih banyak dari pada elektroda dengan sudut 45° . Jadi

pengujian pada jarak sela yang kecil yaitu pada kasus ini adalah 2,5 mm, dengan bentuk elektroda yang semakin runcing pengotor internal yang mengumpul pada ujung elektroda juga akan semakin banyak. Sehingga bila jumlah pengotor internal ini lebih banyak, maka pengaruh dari pengotor internal ini lebih besar dari pada faktor efisiensi medan listriknya. Dan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawitnya juga akan lebih besar.

Pada jarak sela yang diperbesar yaitu pada jarak sela 5,0 mm, karakteristik tegangan tembusnya juga hampir sama dengan karakteristik tegangan tembus pada rangkaian AC. Pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.4 terlihat bahwa pada pengujian jarak sela 5,0 mm semakin runcing bentuk elektroda yang digunakan, maka nilai tegangan tembusnya juga semakin menurun. Hal ini disebabkan karena faktor efisiensi medan listriknya. Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya tentang faktor efisiensi medan listrik, semakin kecil nilai faktor efisiensi medan listriknya, maka nilai tegangan tembusnya juga semakin kecil. Pada jarak sela yang lebih besar yaitu pada pengujian dengan jarak sela 5,0 mm, pengaruh dari pengotor internal ini kecil. Sehingga tegangan tembusnya lebih dipengaruhi oleh nilai faktor efisiensi medan listriknya. Namun setelah terjadi tembus masih tetap perlu menghilangkan pengotor internal yang mengumpul di ujung elektroda jarum, karena bila dibiarkan, pengotor internal yang mengumpul pada ujung elektroda akan semakin banyak dan akan mengakibatkan peningkatan nilai tegangan tembusnya.

4.3. Pengaruh Jarak Sela Antar Elektroda Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

Pada pembahasan ini, tegangan tembus minyak kelapa sawit diuji dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° . Jarak sela antar elektroda diubah-ubah supaya dapat diperoleh pengaruh dari jarak sela antar elektroda terhadap tegangan tembusnya. Bila dilihat pada Tabel 4.3, kenaikan tegangan tembus terhadap jarak sela antar elektrodanya pada rangkaian DC sangat besar dibandingkan dengan tembus pada rangkaian AC. Pada rangkaian DC dengan jarak sela yang diperbesar, tegangan tembus sebesar 78,8 kV dapat memecahkan wadah uji yang terbuat dari kaca dengan ketebalan kaca sebesar 5,0 mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.6. Sehingga pengujian pada DC dibatasi pada jarak sela 5,0 mm.

Untuk mendapatkan karakteristik dari pengaruh jarak sela elektroda terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit, pengujian pada pembahasan ini dibatasi pada

rangkaian AC. Selain itu karena susunan elektroda jarum-piring mudah terpengaruh oleh pengotor internal minyak kelapa sawit, maka pada pengujian ini dibatasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° yang sifatnya lebih menuju atau mendekati pada sifat homogen.



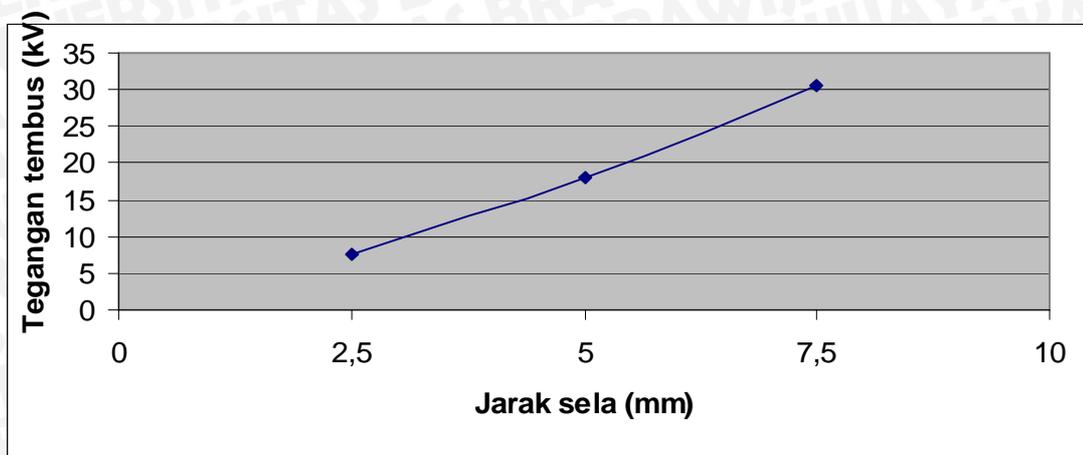
Gambar 4.6. Wadah kaca yang pecah pada pengujian DC sebesar 78,8 kV
Sumber: Hasil pengujian

Gambar 4.6 menunjukkan wadah dari bahan kaca dengan ketebalan 5,0 mm yang pecah akibat pengujian tegangan tembus DC dengan nilai tegangan tembus yang besar yaitu sebesar 78,8 kV. Data hasil pengujian pengaruh jarak sela antar elektroda terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit pada rangkaian AC dapat dilihat pada Tabel 4.4, dan karakteristik tegangan tembusnya dapat dilihat di grafik pada Gambar 4.7.

Tabel 4.4. Perbandingan jarak sela antar elektroda dengan tegangan tembusnya

Jarak sela (mm)	Data ke-	Tembus AC \bar{U}_{ac} (kV)	\overline{U}_{ac} (kV)	$U_{efektif}$ (kV)
2,5	1	10,0	10,8	7,6
	2	10,7		
	3	11,7		
5,0	1	24,6	25,5	18,0
	2	25,2		
	3	26,6		
7,5	1	42,5	43,1	30,5
	2	45,2		
	3	41,5		

Sumber: Hasil pengujian



Gambar 4.7. Grafik tegangan tembus sebagai fungsi jarak sela
Sumber: Hasil pengujian

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara perbandingan jarak sela antar elektroda dengan tegangan tembusnya. Dari gambar terlihat bahwa nilai tegangan tembus elektroda berbanding lurus dengan jarak selanya. Semakin besar jarak sela elektroda maka tegangan tembusnya juga semakin besar. Dari Tabel 4.4 dapat diamati bahwa untuk perubahan jarak sela elektroda sebesar dua kali dari jarak sebelumnya, perubahan tegangan tembusnya lebih dari dua kali tegangan tembus sebelumnya. Jadi untuk penggunaan jarak sela yang besar, minyak kelapa sawit ini aman untuk dijadikan isolasi cair.

4.4. Pengaruh Efek Polaritas Pada Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

Pada pembahasan ini, akan dianalisis bagaimana efek polaritas pada tegangan tembus minyak kelapa sawit. Seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya tentang efek polaritas bahwa pada medan listrik sangat tidak homogen seperti pada susunan elektroda jarum-piring, di depan elektroda tajam akan terjadi ionisasi setelah tegangan anjaknya (*inception voltage*) terlewati. Elektron-elektron karena mobilitasnya yang tinggi akan secara cepat meninggalkan daerah ionisasi, sedang ion-ion positif yang bergerak lambat akan membentuk muatan ruang positif di depan elektroda tajam, sehingga distribusi medan listriknya berubah. Jadi pada pengujian ini, susunan elektroda yang digunakan adalah susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° dan 60° . Rangkaian yang digunakan pada pengujian efek polaritas adalah rangkaian DC yang terdiri dari rangkaian DC polaritas positif dan rangkaian DC polaritas negatif. Data dari hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.5 dan karakteristik tegangan tembusnya dapat dilihat di grafik pada Gambar 4.8.

Tabel 4.5. Pengaruh efek polaritas pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit

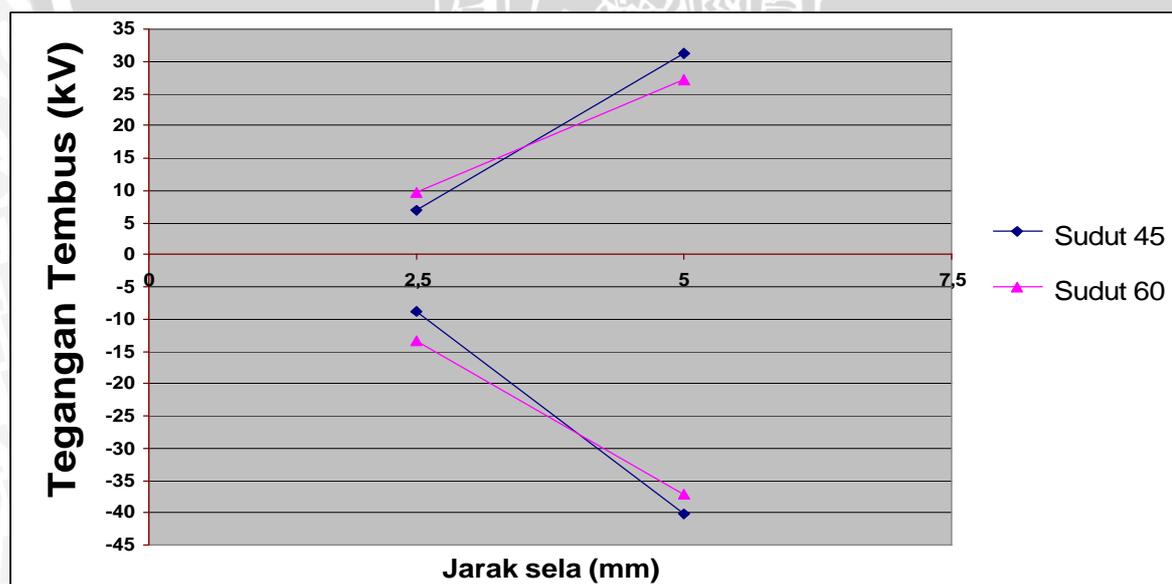
(a.) Polaritas positif

Jarak sela	Data ke-	Elektroda dengan sudut jarum 45°		Elektroda dengan sudut jarum 60°	
		Tembus DC (kV)	$\overline{U_{dc}}$ (kV)	Tembus DC (kV)	$\overline{U_{dc}}$ (kV)
2,5	1	5,6	6,8	10,0	9,7
	2	7,3		9,0	
	3	7,5		10,2	
5,0	1	30,4	31,1	26,7	27,2
	2	31,0		27,2	
	3	31,8		27,7	

(b.) polaritas negatif

Jarak sela	Data ke-	Elektroda dengan sudut jarum 45°		Elektroda dengan sudut jarum 60°	
		Tembus DC (kV)	$\overline{U_{dc}}$ (kV)	Tembus DC (kV)	$\overline{U_{dc}}$ (kV)
2,5	1	-8,1	-8,7	-12,5	-13,3
	2	-8,6		-13,4	
	3	-9,3		-14,0	
5,0	1	-39,9	-40,1	-35,7	-37,1
	2	-39,1		-38,2	
	3	-41,2		-37,4	

Sumber: Hasil pengujian



Gambar 4.8. Grafik pengaruh efek polaritas pada pengujian tegangan tembus minyak sawit pada elektroda jarum-piring

Sumber: Hasil pengujian

Dari data hasil pengujian pada Tabel 4.5 dan grafik pada Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa tegangan tembus minyak kelapa sawit pada polaritas negatif lebih besar dari pada polaritas positif. Pada polaritas negatif pengembangan kanal peluahan muatan listrik ke arah elektroda pelat yaitu piring akan semakin lama, karena pada polaritas negatif ion-ion positif yang tertinggal akan menyebabkan kenaikan kuat medan listrik sangat tinggi tepat pada ujung jarum, sedangkan pada daerah ruang medan listrik lainnya hanya memiliki kuat medan listrik yang lebih kecil. Sedangkan pada polaritas positif ion-ion positif yang tertinggal akan memperkecil besar kuat medan listrik di ujung jarum. Dengan demikian maka kuat medan listrik ke arah elektroda pelat akan meninggi sehingga memudahkan dan mempercepat pengembangan kanal peluahan muatan listrik. Dengan demikian tegangan tembus dengan menggunakan polaritas negatif lebih besar dari pada dengan menggunakan polaritas positif.

4.5. Resistivitas dan Permittivitas Minyak Kelapa Sawit

Pada pembahasan ini, akan dianalisis dan dihitung nilai resistivitas dan permittivitas yang dimiliki oleh minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini. Untuk mencari nilai resistivitas dari minyak kelapa sawit ini, pertama yang perlu dilakukan adalah mengukur besar arus bocor pada rangkaian pembangkitan tegangan tinggi searah dengan menggunakan wadah yang telah didesain khusus seperti yang telah dijelaskan pada bab 3. Sedangkan untuk mencari nilai permittivitas dari minyak kelapa sawit ini, pertama yang perlu dilakukan adalah mengukur besar kapasitansi pada minyak kelapa sawit ini dengan menggunakan wadah uji yang sama.

4.5.1. Resistivitas minyak kelapa sawit

Nilai resistivitas dapat dicari dari nilai tahanan (\bullet) dari minyak kelapa sawit yang diuji dengan cara mencari besar arus bocor pada tahanan yang diberikan. Rangkaian yang digunakan untuk mencari nilai resistivitas adalah rangkaian DC untuk mendapatkan nilai tahanan minyak kelapa sawit, karena bila menggunakan rangkaian AC yang didapat adalah nilai impedansinya bukan tahanannya.

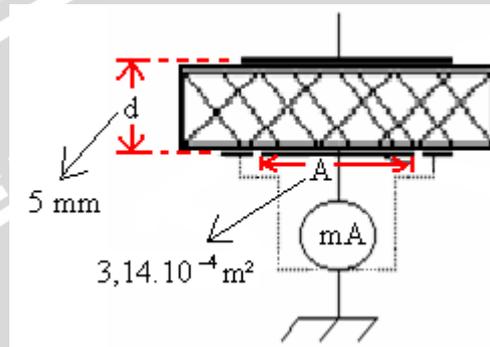
Data yang diperoleh dari hasil pengujian adalah pada jarak sela elektroda 5 mm dengan tegangan yang diberikan 7,4 kV, arus bocor yang terukur pada alat ukur adalah 0,01 mA. Dari data yang diperoleh, maka besar tahanan minyak kelapa sawit dapat dihitung dengan persamaan (2-2) yaitu,

$$R_i = \frac{V}{I_b} \longrightarrow R = \frac{7,4 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^{-5}}$$

$$R = 7,4 \cdot 10^8 \Omega$$

Dari hasil perhitungan, didapatkan tahanan minyak kelapa sawit sebesar $7,4 \cdot 10^8 \Omega$. Setelah tahanan dari minyak kelapa sawit didapatkan, maka resistivitas minyak kelapa sawit ini dapat dicari dengan persamaan (2-1) yaitu,

$$r = \frac{R \cdot A}{l}$$



Gambar 4.9. Jarak sela dan luas elektroda pada pengujian resistivitas minyak kelapa sawit

Diameter dari elektroda ukur ini adalah 20,0 mm, maka jari-jarinya adalah 10,0 mm. Sehingga luas permukaan elektroda ukurnya adalah,

$$A = \rho \cdot r^2$$

$$A = 3,14 \cdot 10^{-4} m^2$$

Sehingga resistivitas dari minyak kelapa sawit yang diuji ini adalah,

$$r = \frac{7,4 \cdot 10^8 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}}$$

$$r = 4,65 \cdot 10^7 \Omega m$$

Jadi dari hasil perhitungan nilai resistivitas dari minyak kelapa sawit yang diuji ini adalah sebesar $4,65 \cdot 10^7 \Omega m$.

4.5.2. Permittivitas minyak kelapa sawit

Setiap bahan isolasi seperti pada isolasi cair mempunyai permitivitas. Dengan mencari nilai kapasitansi dari minyak kelapa sawit ini, maka nilai permitivitas dari minyak kelapa sawit ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2-3). Dari data hasil percobaan besar kapasitansi pada minyak kelapa sawit ini adalah 0,01 nF atau 10^{-11} F pada pengukuran dengan jarak sela antar elektroda adalah 5 mm atau $5 \cdot 10^{-3}$ m.

Sedangkan luasan permukaan elektroda telah didapat pada perhitungan sebelumnya yaitu sebesar $3,14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$. Sehingga nilai permitivitas dari minyak kelapa sawit ini dapat dihitung dengan persamaan (2-3) yaitu,

$$e_r = \frac{C \cdot 36\pi \cdot h}{10^{-9} \cdot s}$$

$$10^{-11} = \frac{10^{-9} \cdot e_r \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{36\pi \cdot 5 \cdot 10^{-3}}$$

$$e_r = \frac{36\pi \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{10^{-11} \cdot 10^{-9} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}$$

$$e_r = 1,8 \text{ F/m}$$

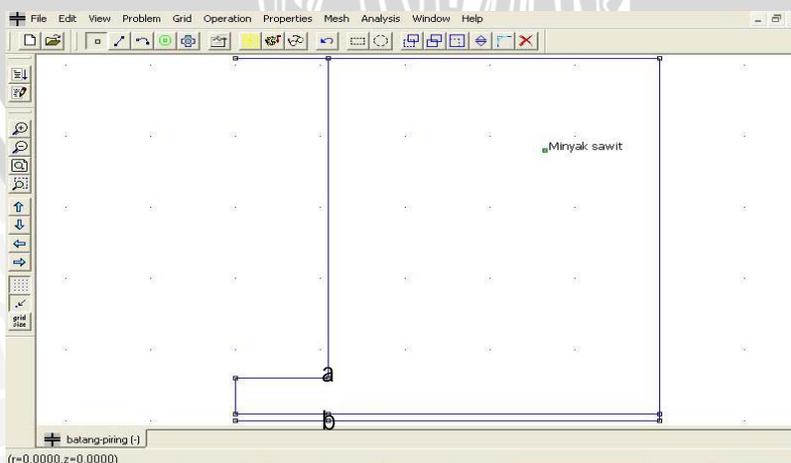
Jadi dari hasil perhitungan nilai permitivitas dari minyak kelapa sawit yang diuji ini adalah sebesar 1,8 F/m.

4.6. Simulasi Distribusi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

Distribusi medan listrik pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat disimulasikan dengan menggunakan program femm 4.2. Dari hasil simulasi dapat diketahui heterogenitas medan listrik dari susunan elektroda yang diuji.

4.6.1. Simulasi pada elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°

Gambar perencanaan simulasi pada program femm 4.2 untuk pengujian tegangan tembus dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0° adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.

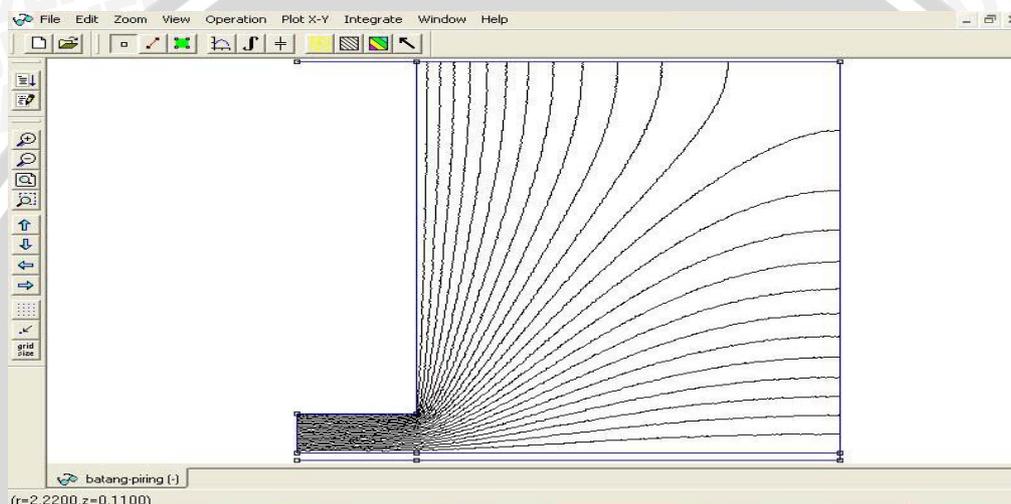


Gambar 4.10. Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°

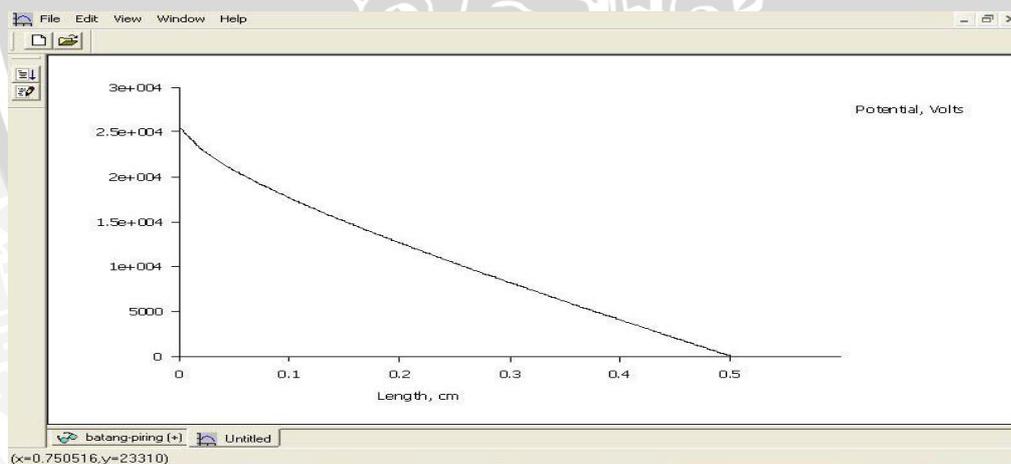
Sumber: Hasil perencanaan simulasi

Perencanaan simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.10 adalah perencanaan simulasi pengujian minyak kelapa sawit dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring dengan jarak sela 5,0 mm adalah 25,5 kV.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian dan hasil perhitungan, nilai permitivitas minyak kelapa sawit adalah 1,8 F/m. Maka bila gambar perencanaan simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 dijalankan pada perangkat lunak femm 4.2, maka hasil simulasinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 dan Gambar 4.12.



(a.)



(b.)

Gambar 4.11. Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°

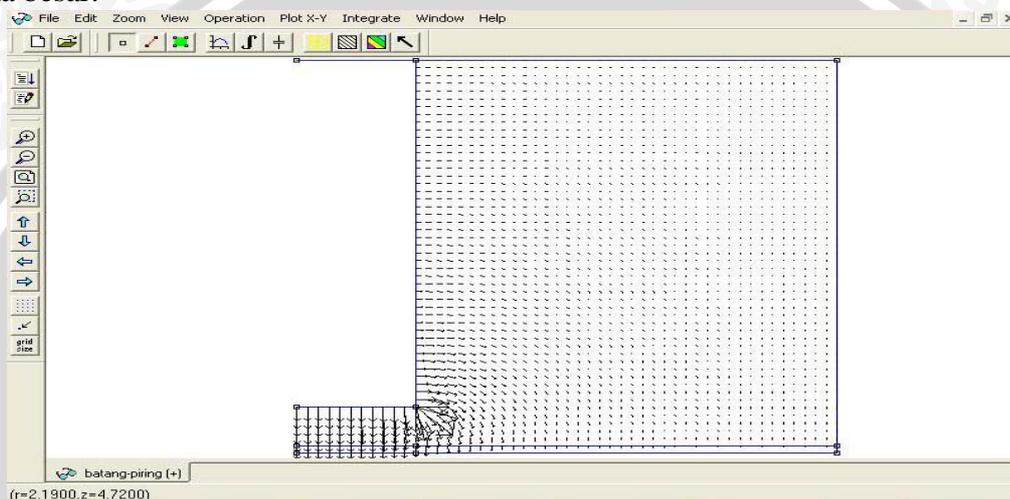
(a.) equipotensial

(b.) grafik potensial

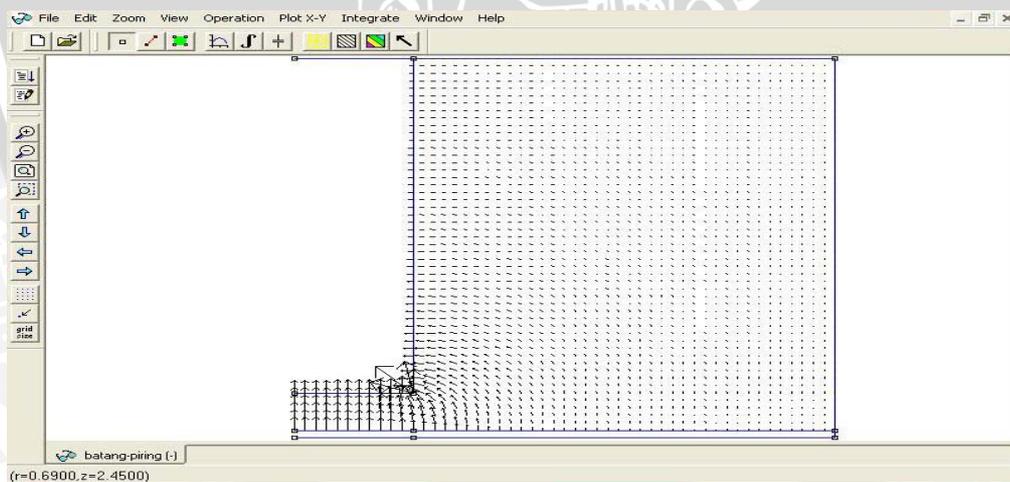
Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.11.(a) adalah hasil simulasi untuk equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dengan beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 25,5 kV dengan jarak sela antar elektroda sebesar 5,0 mm.

Hasil simulasi equipotensialnya untuk tegangan saat siklus positif dan negatif adalah sama. Gambar 4.11.(b) adalah hasil simulasi grafik potensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0° . Grafik disimulasikan dari ujung pinggir elektroda jarum (titik a) sampai lurus ke elektroda piring (titik b) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Gambar 4.11.(b) dapat dilihat bahwa grafik potensial sebagai fungsi jarak selanya adalah mendekati linier. Hal ini menunjukkan bahwa daerah equipotensialnya sama atau jarak antara garis-garis equipotensialnya antara elektroda jarum dan elektroda piring mempunyai jarak yang sama besar.



(a.)



(b.)

Gambar 4.12 Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0°
 (a.) siklus positif (b.) siklus negatif

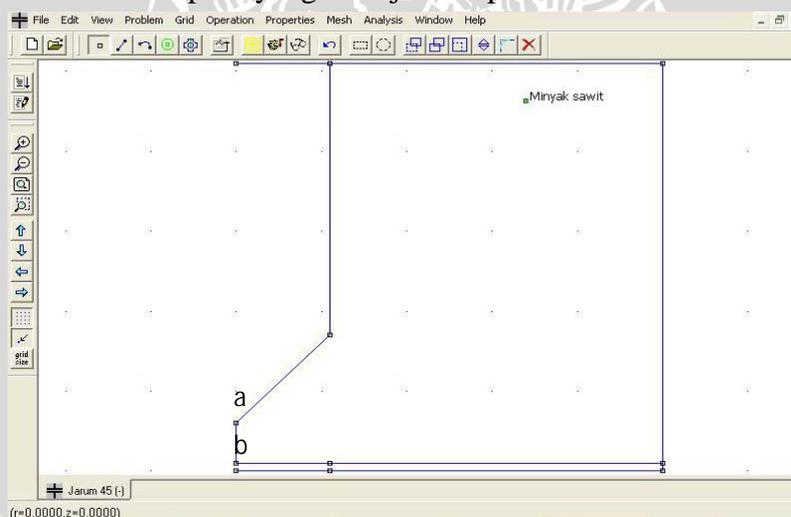
Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.12 adalah hasil simulasi untuk distribusi medan listriknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 0° dengan beda potensial antara

elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 25,5 kV dengan jarak antar elektroda sebesar 5,0 mm. Gambar 4.12(a) adalah hasil simulasi distribusi medan listriknya pada tegangan saat siklus positif sedangkan Gambar 4.12(b) adalah hasil simulasi distribusi medan listriknya pada tegangan saat siklus negatif. Dari Gambar 4.12.(a) dapat dilihat bahwa pada siklus positif arah medan listriknya dari elektroda jarum yang diberi muatan positif menuju ke elektroda piring, sedangkan pada Gambar 4.12.(b) dapat dilihat bahwa pada siklus negatif arah medan listriknya dari elektroda piring menuju ke elektroda jarum yang diberi muatan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa pada elektroda bermuatan positif arah medan listriknya keluar dari posisi elektroda sedangkan pada elektroda bermuatan negatif arah medan listriknya masuk dari posisi elektroda. Pada Gambar 4.12 dapat diamati juga bahwa distribusi medan listriknya di daerah sekitar poros antara elektroda jarum dan elektroda piring adalah seragam.

4.6.2. Simulasi pada elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 45°

Gambar perencanaan simulasi pada program femm 4.2 untuk pengujian tegangan tembus dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.



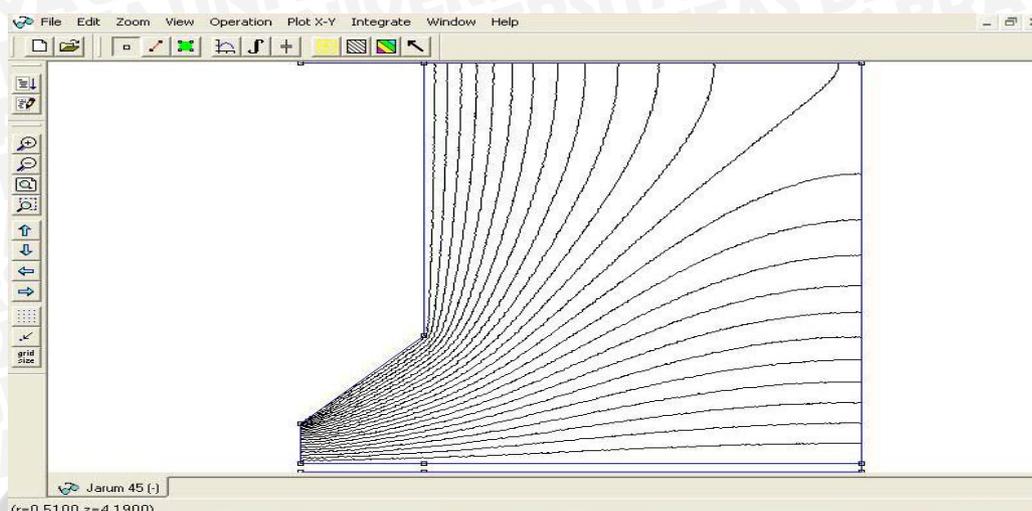
Gambar 4.13. Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

Sumber: Hasil simulasi

Perencanaan simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.13 adalah perencanaan simulasi pengujian minyak kelapa sawit dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring dengan jarak sela 5,0 mm adalah 22,0 kV.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian dan hasil perhitungan, nilai permitivitas minyak kelapa sawit adalah 1,8 F/m. Maka bila gambar perencanaan

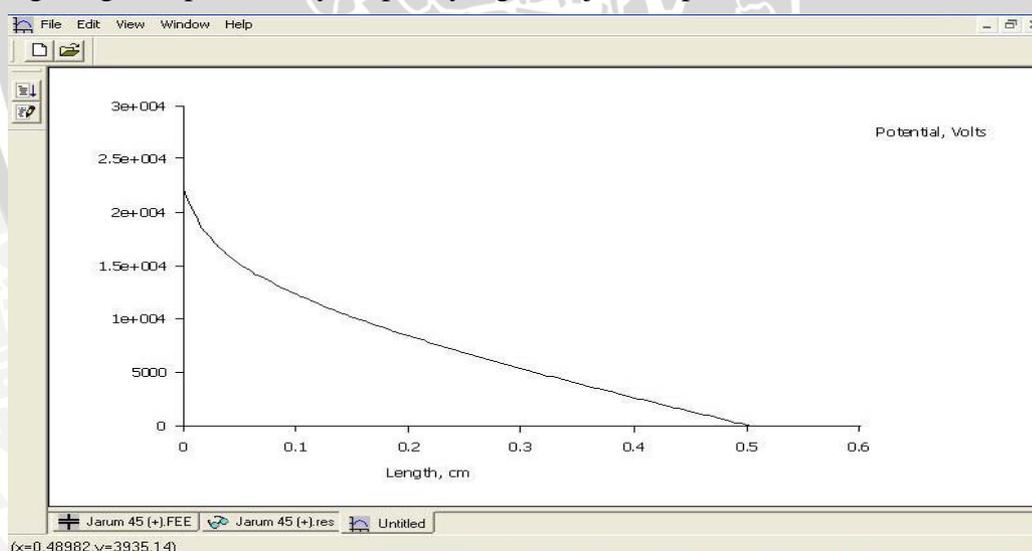
simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 dijalankan pada perangkat lunak femm 4.2, maka hasil simulasinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.16.



Gambar 4.14. Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.14 adalah hasil simulasi untuk equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 22,0 kV dengan jarak sela antar elektroda sebesar 5,0 mm. Sedangkan grafik potensialnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15.

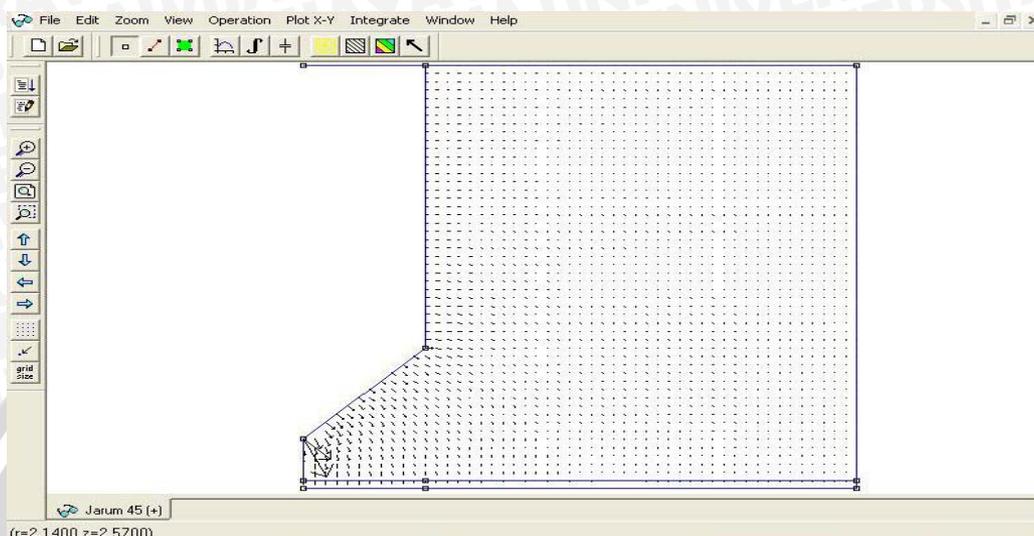


Gambar 4.15. Hasil simulasi grafik potensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

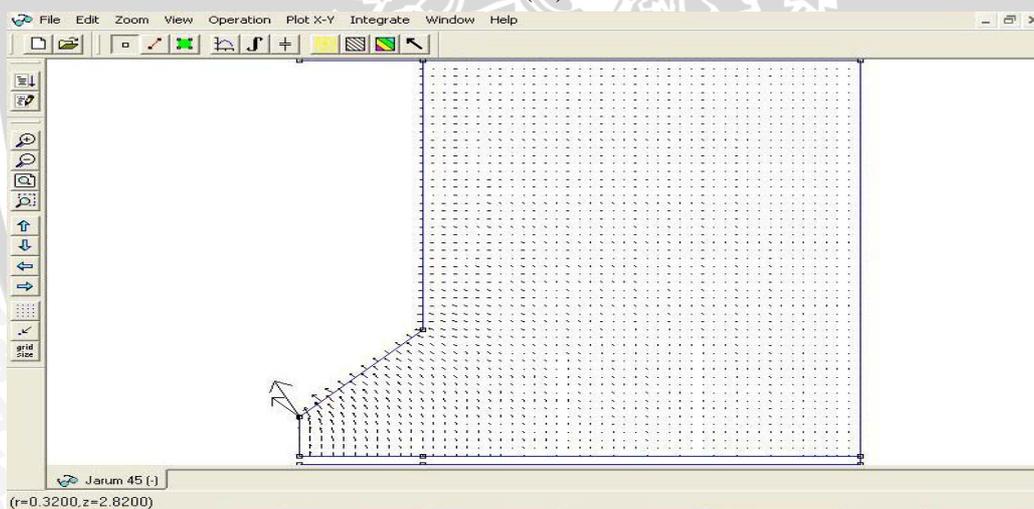
Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.15 adalah hasil simulasi grafik potensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Grafik disimulasikan dari ujung elektroda jarum (titik a) sampai lurus ke elektroda piring (titik b) seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 4.13 dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Gambar 4.15 dapat dilihat bahwa grafik potensial sebagai fungsi jarak selanya adalah tidak linier atau pada ujung elektroda jarum penurunan potensialnya lebih curam. Hal ini menunjukkan bahwa daerah equipotensialnya pada ujung elektroda jarum lebih kecil atau jarak antara garis-garis equipotensialnya pada ujung elektroda jarum mempunyai jarak yang lebih rapat.



(a.)



(b.)

Gambar 4.16. Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°
(a.) siklus positif (b.) siklus negatif

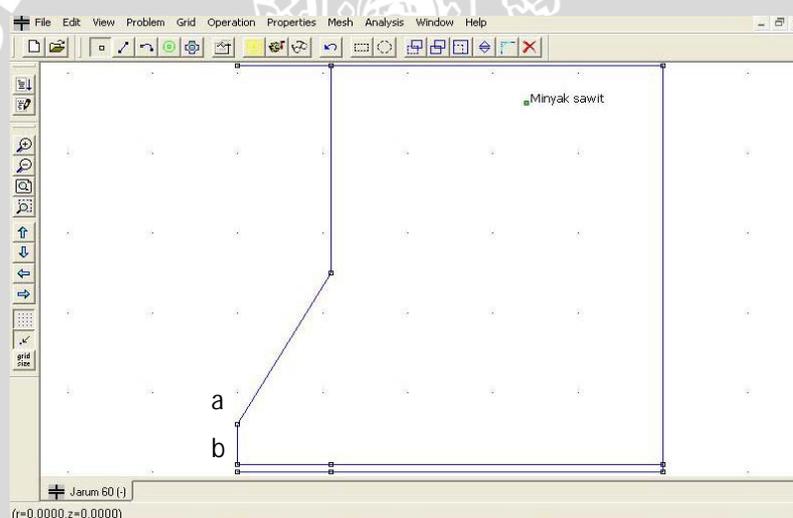
Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.16 adalah hasil simulasi untuk distribusi medan listriknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 22,0 kV dengan jarak sela antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 5,0 mm. Gambar 4.16.(a) adalah hasil simulasi distribusi medan listriknya pada siklus positif sedangkan Gambar 4.16.(b) adalah hasil

simulasi distribusi medan listriknya pada siklus negatif. Dari Gambar 4.16.(a) dapat dilihat bahwa pada siklus positif arah medan listriknya dari elektroda jarum yang diberi muatan positif menuju ke elektroda piring, sedangkan pada Gambar 4.16.(b) dapat dilihat bahwa pada siklus negatif arah medan listriknya dari elektroda piring menuju ke elektroda jarum yang diberi muatan negatif. Dan dari Gambar 4.16 dapat diamati juga bahwa distribusi medan listriknya di daerah ujung jarumnya menyebar atau tidak seragam. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada pengujian dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° adalah tidak seragam.

4.6.3. Simulasi pada elektroda jarum-piring dengan sudut jarum 60°

Gambar perencanaan simulasi pada program femm 4.2 untuk pengujian tegangan tembus dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17.



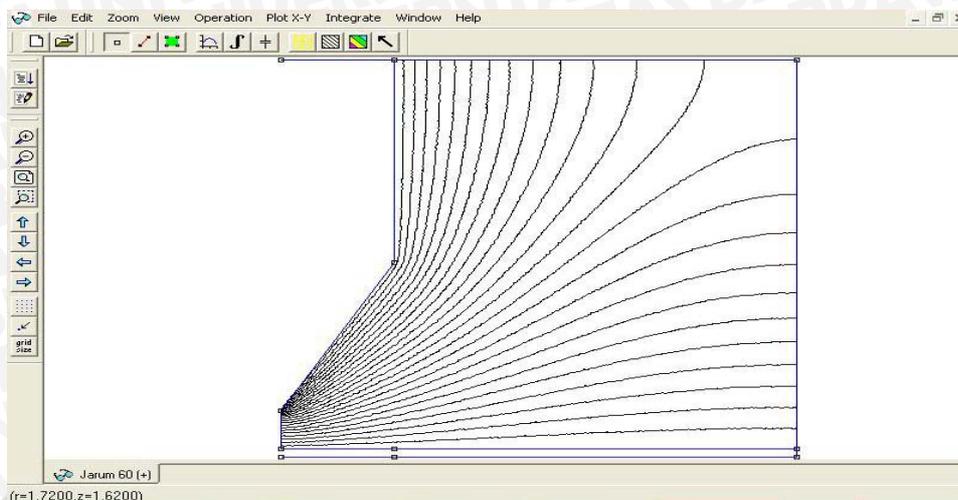
Gambar 4.17. Perencanaan simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

Sumber: Hasil simulasi

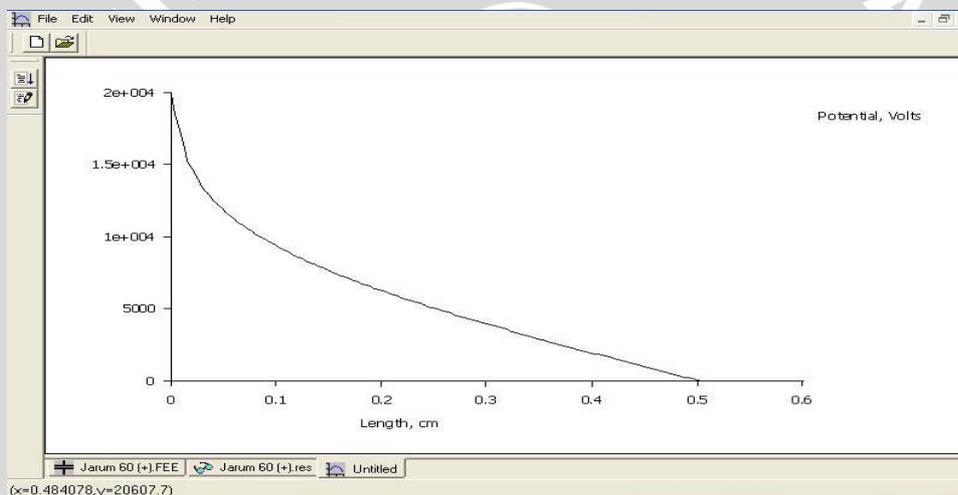
Perencanaan simulasi yang digambarkan pada Gambar 4.17 adalah perencanaan simulasi pengujian minyak kelapa sawit dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Beda potensial antara jarum dan elektroda piring dengan jarak sela 5,0 mm adalah 19,7 kV. Karena elektroda yang digunakan bentuknya silindris dengan diameter 2,2 cm.

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengujian dan hasil perhitungan, nilai permitivitas minyak kelapa sawit adalah 1,8 F/m. Maka bila gambar perencanaan simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.19 dijalankan pada perangkat lunak femm

4.2, maka hasil simulasinya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19.



(a.)



(b.)

Gambar 4.18. Hasil simulasi equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

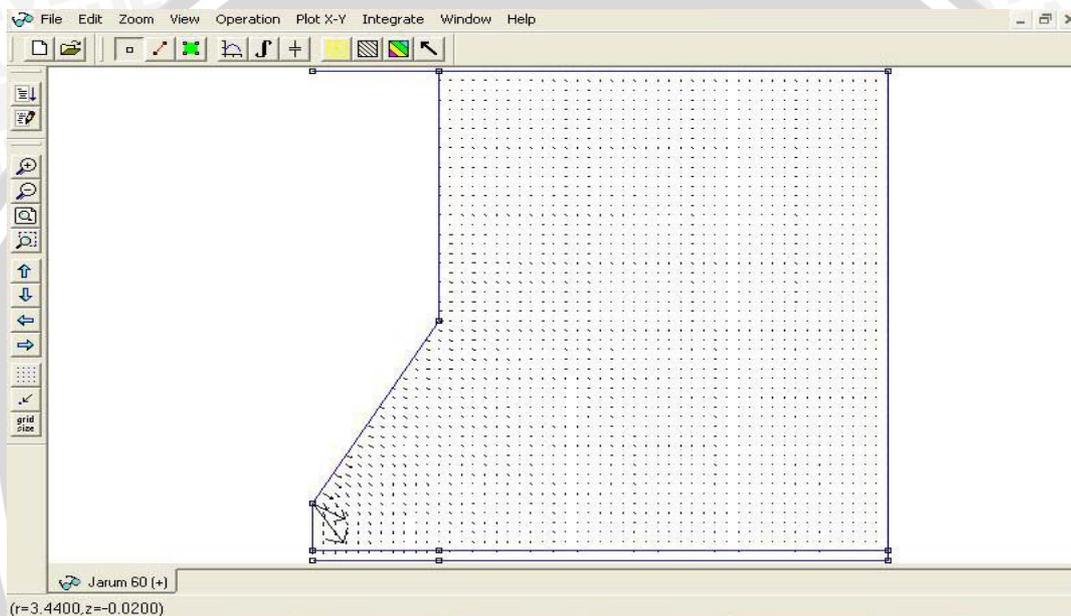
(a.) equipotensial

(b.) grafik potensial

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.18.(a) adalah hasil simulasi untuk equipotensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 19,7 kV dengan jarak sela antar elektroda sebesar 5,0 mm. Gambar 4.18.(b) adalah hasil simulasi grafik potensial pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Grafik disimulasikan dari ujung elektroda jarum (titik a) sampai lurus ke elektroda piring (titik b) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Gambar 4.18.(b) dapat dilihat bahwa grafik potensial sebagai fungsi jarak selanya adalah tidak linier atau pada

ujung elektroda jarum penurunan potensialnya lebih curam. Hal ini menunjukkan bahwa daerah equipotensialnya pada ujung elektroda jarum lebih kecil atau jarak antara garis-garis equipotensialnya pada ujung elektroda jarum mempunyai jarak yang lebih rapat. Bila dibandingkan dengan hasil simulasi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° , hasil simulasi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° penurunan potensialnya pada daerah di ujung elektroda jarum lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa daerah equipotensialnya pada ujung elektroda jarum dengan sudut elektroda jarum 60° lebih rapat dari pada di ujung elektroda jarum dengan sudut elektroda jarum 45° .



Gambar 4.19. Hasil simulasi distribusi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.19 adalah hasil simulasi untuk distribusi medan listriknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 19,7 kV dengan jarak sela antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 5,0 mm. Pada Gambar 4.19 dapat diamati juga bahwa distribusi medan listriknya di daerah ujung jarumnya menyebar atau tidak seragam seperti pada simulasi dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada pengujian dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° adalah tidak seragam.

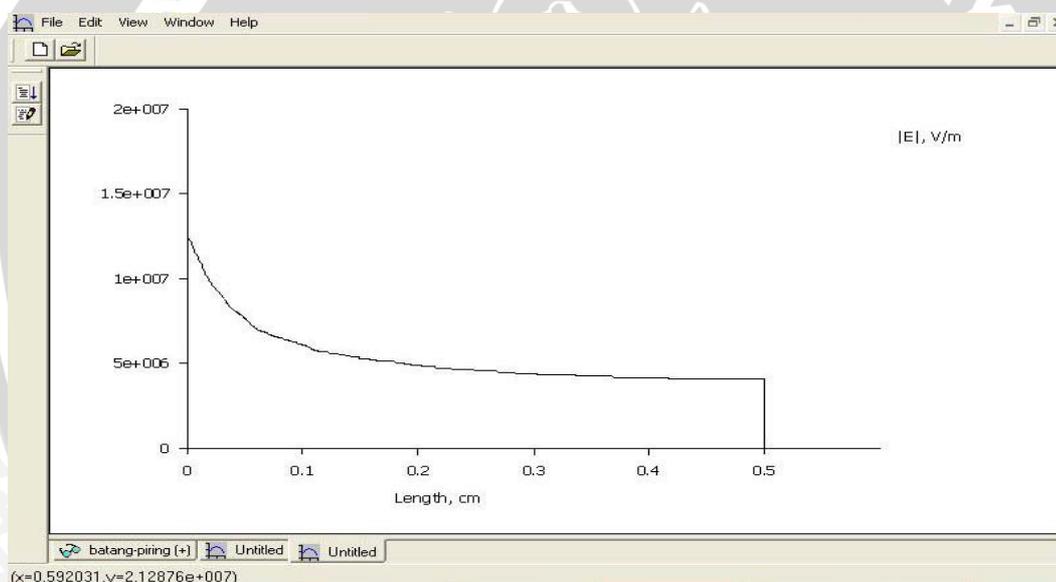
4.7. Faktor Efisiensi Medan Listrik Pada Beberapa Susunan Elektroda Dalam Pengujian Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

Dalam analisis ini, faktor faktor efisiensi medan listrik yang akan dianalisis adalah faktor faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

- Susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 0°
- Susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°
- Susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

4.7.1. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 0°

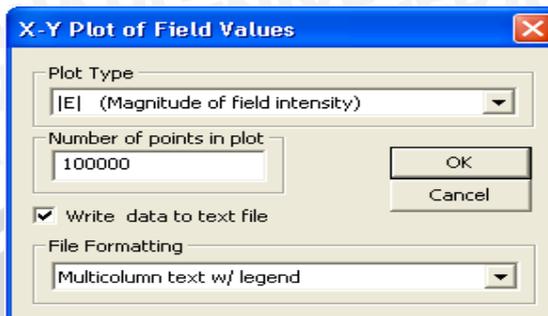
Grafik simulasi kuat medan listrik mutlakunya (*magnitude of field intensity, |E|*) pada pengujian tegangan tembus dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlakunya (*magnitude of field intensity, |E|*) pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°
Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.20 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlakunya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 25,5 kV. Grafik disimulasikan dari ujung pinggir elektroda jarum (titik a) sampai lurus ke elektroda piring (titik b) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10. dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Gambar 4.20 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik $|E|$ adalah sedikit lengkung. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik pada pengujian minyak kelapa sawit dengan menggunakan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dengan diameter elektroda jarum 22,0 mm

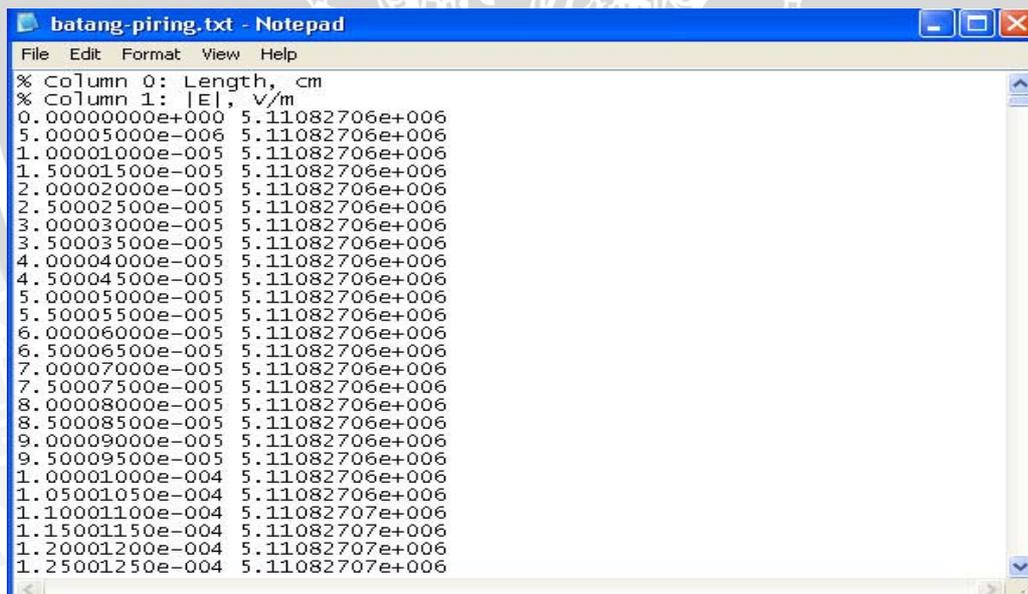
adalah lebih mendekati sifat homogen atau seragam. Untuk mendapatkan data yang lebih detail lagi dari grafik hasil simulasi pada Gambar 4.22, adalah dengan metode menjabarkan grafiknya dalam bentuk data tertulis (*write data to text file*), dan langkahnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Langkah menjabarkan grafik dalam bentuk data tertulis (*write data to text file*)

Sumber: Simulasi

Gambar 4.21 adalah langkah dalam menjabarkan grafik kuat medan listrik mutlaknya dalam bentuk data tertulis (*write data to text file*). Maksud dari (*Number of points in plot* 100000) pada Gambar 4.21 adalah data dari grafik hasil simulasi dijabarkan menjadi 100000 data. Hasil data tertulis yang diperoleh dari *write data to text file* adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22. Data hasil dari (*write data to text file*) atau data tertulis dari grafik
Sumber: Simulasi

Gambar 4.22 adalah data hasil dari (*write data to text file*) atau mengubah data dalam bentuk grafik menjadi data dalam bentuk tertulis. Kolom sebelah kiri pada Gambar 4.22 (*% Column 0: Length, cm*) menunjukkan jarak antara elektroda yang

dimulai elektroda jarum. Kolom sebelah kanan menunjukkan kuat medan listrik mutlaknya (% Column 1: $|E|$, V/m). Karena jumlah penjabarannya (*number of points in plot*) yang dipakai adalah 100000, sedangkan jarak sela antar elektroda adalah 5,0 mm, maka data yang diambil dari tiap jaraknya adalah $5/100000$ mm atau data kuat medan listrik mutlaknya yang diambil adalah pada jarak setiap $5 \cdot 10^{-5}$ mm. Dari Gambar 4.24 dapat dilihat bahwa data kuat medan listrik mutlaknya tidak benar-benar konstan atau ada perubahan namun sangat kecil sedangkan skala untuk sumbu kuat medan listrik mutlaknya pada grafik adalah besar sehingga grafik pada Gambar 4.20 terlihat seperti konstan. Sesuai persamaan (2-12) untuk menghitung nilai efisiensi medan listriknya, maka perlu dicari terlebih dahulu kuat medan listrik lokal tertingginya dari data tertulis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.23.

```

1 - Notepad
File Edit Format View Help
% Column 0: Length, cm
% Column 1: |E|, V/m
0.00000000e+000 1.20520121e+007
5.00005000e-006 1.25761653e+007
1.00001000e-005 1.25753950e+007
1.50001500e-005 1.25746247e+007
2.00002000e-005 1.25738545e+007
2.50002500e-005 1.25730842e+007
3.00003000e-005 1.25723140e+007
3.50003500e-005 1.25715438e+007
4.00004000e-005 1.25707737e+007
4.50004500e-005 1.25700036e+007
5.00005000e-005 1.25692334e+007
5.50005500e-005 1.25684633e+007
6.00006000e-005 1.25676933e+007
6.50006500e-005 1.25669232e+007
7.00007000e-005 1.25661532e+007
7.50007500e-005 1.25653832e+007
8.00008000e-005 1.25646132e+007
8.50008500e-005 1.25638433e+007
9.00009000e-005 1.25630734e+007
9.50009500e-005 1.25623034e+007
1.00001000e-004 1.25615336e+007
1.05001050e-004 1.25607637e+007
1.10001100e-004 1.25599939e+007
1.15001150e-004 1.25592241e+007
1.20001200e-004 1.25584543e+007

```

Gambar 4.23. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.23 adalah nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yang diperoleh dari hasil data tertulis grafik pada Gambar 4.20. Dari Gambar 4.23 dapat dilihat bahwa nilai kuat medan listrik lokal tertinggi (yang ditandai warna biru) adalah $1,25761653 \cdot 10^7$ V/m atau 125,761653 kV/cm dan pada jarak $5,00005000 \cdot 10^{-6}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan persamaan (2-12). Dengan U_d sebesar 25,5 kV dan jarak sela (s) sebesar 5,0 mm, sehingga kuat medan listrik rata-ratanya adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{25,5}{0,5}$$

$$E_{rata-rata} = 51,0 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi 51,1082811 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 51,0 kV/cm, maka sesuai persamaan (2-14), faktor faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° adalah:

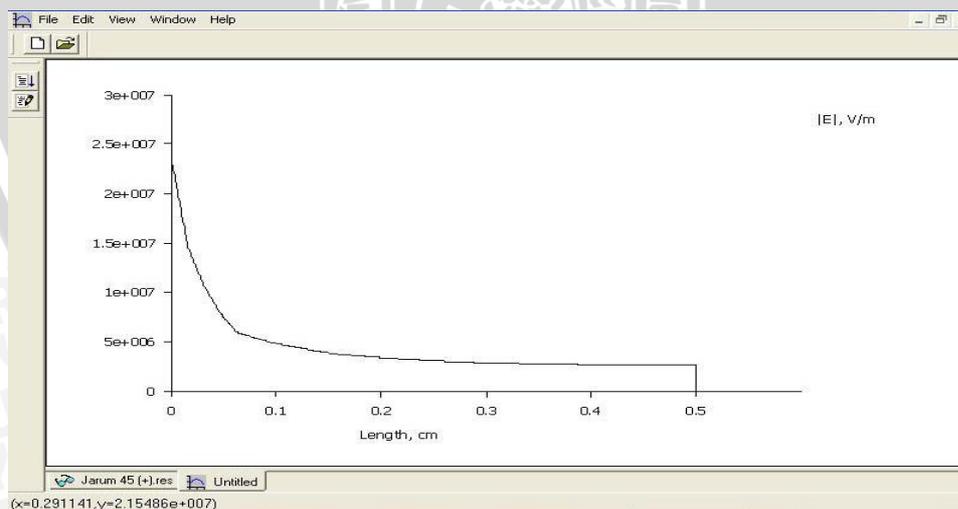
$$h = \frac{51,0}{125,761653}$$

$$h = 0,406$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° adalah 0,406. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dengan diameter elektroda jarum 22 mm dan jarak sela 5,0 mm pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit ini adalah non-homogen.

4.7.2. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

Grafik simulasi kuat medan listrik mutlaknya $|E|$ pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.24 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya $|E|$ pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° . Beda potensial antara

elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 22,0 kV. Grafik disimulasikan dari ujung elektroda jarum (titik a) sampai lurus ke elektroda piring (titik b) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13 dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Gambar 4.24 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik $|E|$ sangat besar pada jarak yang kecil kurang dari 0,1 cm atau pada ujung elektroda jarumnya. Sedangkan pada jarak antara 0,1 sampai 0,5 cm kuat medan listriknya kecil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° dan diameter elektroda jarum 22,0 mm adalah lebih tidak seragam. Hasil data tertulis dari grafik pada Gambar 4.24 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.25.

```

jarum 45.txt - Notepad
File Edit Format View Help
% Column 0: Length, cm
% Column 1: |E|, V/m
0.00000000e+000 1.61604085e+007
5.00005000e-006 2.36861342e+007
1.00001000e-005 2.36832330e+007
1.50001500e-005 2.36803318e+007
2.00002000e-005 2.36774306e+007
2.50002500e-005 2.36745294e+007
3.00003000e-005 2.36716282e+007
3.50003500e-005 2.36687270e+007
4.00004000e-005 2.36658258e+007
4.50004500e-005 2.36629247e+007
5.00005000e-005 2.36600235e+007
5.50005500e-005 2.36571223e+007
6.00006000e-005 2.36542211e+007
6.50006500e-005 2.36513199e+007
7.00007000e-005 2.36484187e+007
7.50007500e-005 2.36455175e+007
8.00008000e-005 2.36426163e+007
8.50008500e-005 2.36397151e+007
9.00009000e-005 2.36368140e+007
9.50009500e-005 2.36339128e+007
1.00001000e-004 2.36310116e+007
1.05001050e-004 2.36281104e+007
1.10001100e-004 2.36252092e+007
1.15001150e-004 2.36223080e+007
1.20001200e-004 2.36194068e+007
1.25001250e-004 2.36165056e+007

```

Gambar 4.25. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.25 adalah nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yang diperoleh dari data tertulis dari grafik pada Gambar 4.24. Dari Gambar 4.25 dapat dilihat bahwa nilai kuat medan listrik lokal tertinggi (yang ditandai warna biru) adalah $2,36861342 \cdot 10^7$ V/m atau $236,861342$ kV/cm dan pada jarak $5,00005000 \cdot 10^{-6}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan persamaan (2-14). Dengan U_d sebesar 22,0 kV dan jarak sela (s) sebesar 5,0 mm, sehingga kuat medan listrik rata-ratanya adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{22,0}{0,5}$$

$$E_{rata-rata} = 44,0 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi 236,861342 kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata 44,0 kV/cm, maka sesuai persamaan (2-12), faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° adalah:

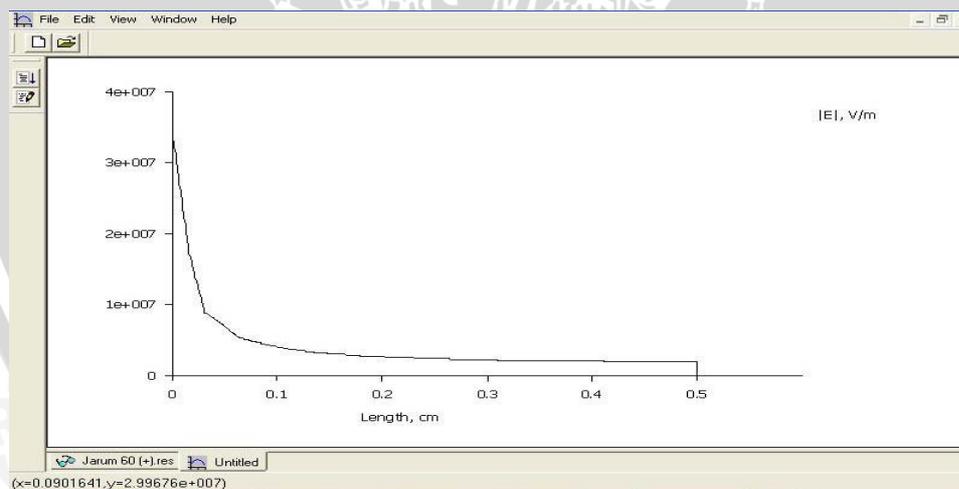
$$h = \frac{44,0}{236,861342}$$

$$h = 0,186$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° adalah 0,186. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° dengan diameter elektroda jarum 22,0 mm dan jarak sela 5,0 mm pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit ini adalah lebih non-homogen.

4.7.3. Faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

Grafik simulasi kuat medan listrik mutlaknya $|E|$ pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan penggunaan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26. Hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.26 adalah hasil simulasi grafik kuat medan listrik mutlaknya $|E|$ pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Beda potensial antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 19,7 kV dengan jarak antar elektroda sebesar 5,0 mm. Grafik disimulasikan pada poros antar elektrodanya dan diawali dari elektroda jarumnya. Dari Gambar 4.26 dapat diamati bahwa grafik kuat medan listrik $|E|$

sangat besar pada jarak yang kecil kurang dari 0,1 cm atau pada ujung elektroda jarumnya. Sedangkan pada jarak antara 0,1 sampai 0,5 cm kuat medan listriknya kecil. Seperti pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda 45° menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° dan diameter elektroda jarum 22,0 mm adalah lebih bersifat non-homogen atau tidak seragam. Hasil data tertulis dari grafik pada Gambar 4.26 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.27.

```

jarum 60.txt - Notepad
File Edit Format View Help
% Column 0: Length, cm
% Column 1: |E|, V/m
0.00000000e+000 2.31321226e+007
5.00005000e-006 3.45457723e+007
1.00001000e-005 3.45402896e+007
1.50001500e-005 3.45348069e+007
2.00002000e-005 3.45293242e+007
2.50002500e-005 3.45238415e+007
3.00003000e-005 3.45183588e+007
3.50003500e-005 3.45128761e+007
4.00004000e-005 3.45073934e+007
4.50004500e-005 3.45019107e+007
5.00005000e-005 3.44964280e+007
5.50005500e-005 3.44909454e+007
6.00006000e-005 3.44854627e+007
6.50006500e-005 3.44799800e+007
7.00007000e-005 3.44744973e+007
7.50007500e-005 3.44690147e+007
8.00008000e-005 3.44635320e+007
8.50008500e-005 3.44580493e+007
9.00009000e-005 3.44525667e+007
9.50009500e-005 3.44470840e+007
1.00001000e-004 3.44416014e+007
1.05001050e-004 3.44361187e+007
1.10001100e-004 3.44306361e+007
1.15001150e-004 3.44251534e+007
1.20001200e-004 3.44196708e+007
1.25001250e-004 3.44141882e+007

```

Gambar 4.27. Nilai kuat medan listrik lokal tertinggi dari hasil data tertulis pada elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60°

Sumber: Hasil simulasi

Gambar 4.27 adalah nilai kuat medan listrik lokal tertinggi yang diperoleh dari data tertulis dari grafik pada Gambar 4.26. Dari Gambar 4.27 dapat dilihat bahwa nilai kuat medan listrik lokal tertinggi (yang ditandai warna biru) adalah $3,45457723 \cdot 10^7$ V/m atau $345,457723$ kV/cm dan pada jarak $5,00005000 \cdot 10^{-6}$ cm.

Setelah diperoleh nilai kuat medan listrik lokal tertinggi, maka kuat medan listrik rata-ratanya dihitung dengan menggunakan persamaan (2-14). Dengan U_d sebesar 19,7 kV dan jarak sela (s) sebesar 5,0 mm, sehingga kuat medan listrik rata-ratanya adalah:

$$E_{rata-rata} = \frac{19,7}{0,5}$$

$$E_{rata-rata} = 39,4 \text{ kV/cm}$$

Dengan nilai kuat medan listrik lokal tertinggi $345,457723$ kV/cm dan kuat medan listrik rata-rata $44,0$ kV/cm, maka sesuai persamaan (4-12), faktor efisiensi

medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° adalah:

$$h = \frac{39,4}{345,457723}$$

$$h = 0,114$$

Jadi faktor efisiensi medan listrik pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° adalah 0,114. Bila dibandingkan dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° , nilai efisiensi pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi medan listrik untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° dengan diameter elektroda jarum 22,0 mm dan jarak sela 5,0 mm adalah lebih non-homogen atau lebih tidak seragam dibandingkan dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 45° .

4.8. Arus Bocor Pada Isolasi Minyak Kelapa Sawit

Sampai saat ini semua bahan isolasi pada teknik listrik masih mengalirkan arus listrik walaupun kecil yang lazim disebut dengan arus bocor. Arus bocor adalah arus yang mengalir pada bahan isolasi pada saat belum terjadi tembus dan nilainya sangat kecil. Data hasil pengujian arus bocor pada isolasi minyak kelapa sawit yang diuji dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.6.

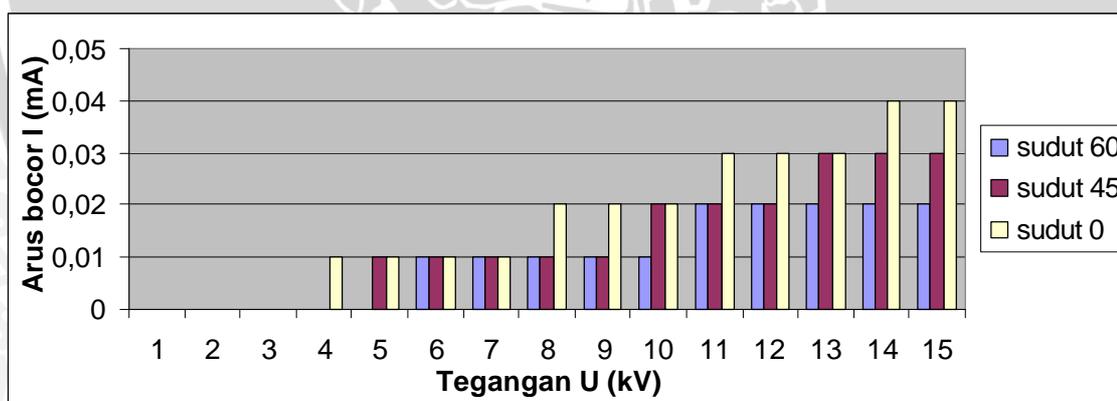
Tabel 4.6 adalah hasil pengujian arus bocor pada beberapa susunan elektroda yang berbeda dengan kenaikan tegangan uji dari 1 kV sampai 15 kV. Pengujian dilakukan pada rangkaian AC dengan jarak sela 5,0 mm. Dari Tabel 4.1 pengujian tegangan tembus AC, dapat diketahui bahwa pada jarak 5,0 mm nilai terendah tegangan tembus AC adalah 19,7 kV pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° . Sehingga pengukuran arus bocor dibatasi sampai dengan tegangan tertinggi 15 kV untuk menghindari terjadinya tembus. Saat terjadi tembus, arus yang mengalir sangat besar atau hubung singkat, sehingga bila pengukuran dilakukan sampai tembus dapat mengakibatkan kerusakan pada alat ukur arus (amperemeter).

Tabel 4.6. Hasil pengujian arus bocor pada isolasi minyak kelapa sawit

Tegangan U (kV)	I (mA) pada elektroda pengujian dengan sudut		
	sudut 0°	sudut 45°	sudut 60°
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0,01	0	0
5	0,01	0,01	0
6	0,01	0,01	0,01
7	0,01	0,01	0,01
8	0,02	0,01	0,01
9	0,02	0,01	0,01
10	0,02	0,02	0,01
11	0,03	0,02	0,02
12	0,03	0,02	0,02
13	0,03	0,03	0,02
14	0,04	0,03	0,02
15	0,04	0,03	0,02

Sumber: Hasil pengujian

Dari Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa arus bocor yang mengalir pada susunan elektroda sangat kecil tidak sampai 0,1 mA. Karakteristik arus bocor dengan kenaikan step tegangan uji sebesar 1 kV, seperti pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.28.



Gambar 4.28. Grafik arus bocor dengan kenaikan step tegangan uji pada beberapa susunan elektroda yang berbeda

Sumber: Hasil pengujian

Gambar 4.28 adalah grafik karakteristik arus bocor pada kenaikan step tegangan uji 1 kV sampai 15 kV pada beberapa susunan elektroda yang berbeda dengan jarak sela 5,0 mm. Dari grafik dapat dilihat bahwa besar arus bocor pada penggunaan susunan elektroda yang berbeda, nilainya juga berbeda. Pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° arus bocor mulai terukur atau terbaca pada amperemeter pada tegangan

uji 4 kV sebesar 0,01 mA. Dan pada tegangan uji 15 kV arus bocor yang terukur adalah 0,04 mA. Pada susunan elektroda jarum-piring (sudut 45°) arus bocor mulai terukur atau terbaca pada amperemeter pada tegangan uji 5 kV sebesar 0,01 mA. Dan pada tegangan uji 15 kV arus bocor yang terukur adalah 0,03 mA. Sedangkan pada susunan elektroda jarum-piring (sudut 60°) arus bocor mulai terukur atau terbaca pada amperemeter pada tegangan uji 6 kV sebesar 0,01 mA. Dan pada tegangan uji 15 kV arus bocor yang terukur adalah 0,02 mA. Hal ini menunjukkan bahwa pada susunan elektroda yang lebih homogen, arus bocor yang mengalir lebih besar dari pada susunan elektroda non-homogen.

4.9. Pengaruh Kontaminan Air Terhadap Tegangan Tembus Minyak Kelapa Sawit

Kontaminan pada minyak isolasi merupakan suatu hal yang tidak bisa dihindari yang bisa muncul selama proses pembuatan, penyimpanan maupun selama proses pemakaian. Salah satu pengotor yang sering muncul pada minyak isolasi adalah air. Air dalam minyak isolasi dapat menurunkan tegangan tembus minyak, sehingga kemampuan isolasi dari minyak akan menurun.

Pada pembahasan ini, akan dianalisis bagaimana pengaruh pengotor atau kontaminan air terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit. Pengujian dilakukan pada jarak sela 5,0 mm. Komposisi air sebagai pengotor atau kontaminan minyak kelapa sawit yang diberikan adalah 0,2 % dan 0,4 %. Sedangkan volume minyak kelapa sawit yang diuji adalah 500 ml, sehingga volume pengotor air yang dipakai adalah,

- a. volume air untuk komposisi 0,2 % adalah

$$V_{air} = \frac{0,2}{100} \cdot 500$$

$$V_{air} = 0,1 \text{ ml}$$

- b. volume air untuk komposisi 0,4 % adalah

$$V_{air} = \frac{0,4}{100} \cdot 500$$

$$V_{air} = 0,2 \text{ ml}$$

Pengujian pertama dilakukan pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dengan jarak sela 5,0 mm dan dengan komposisi air sebesar 0,2 % dan 0,4 % pada rangkaian AC. Hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7.

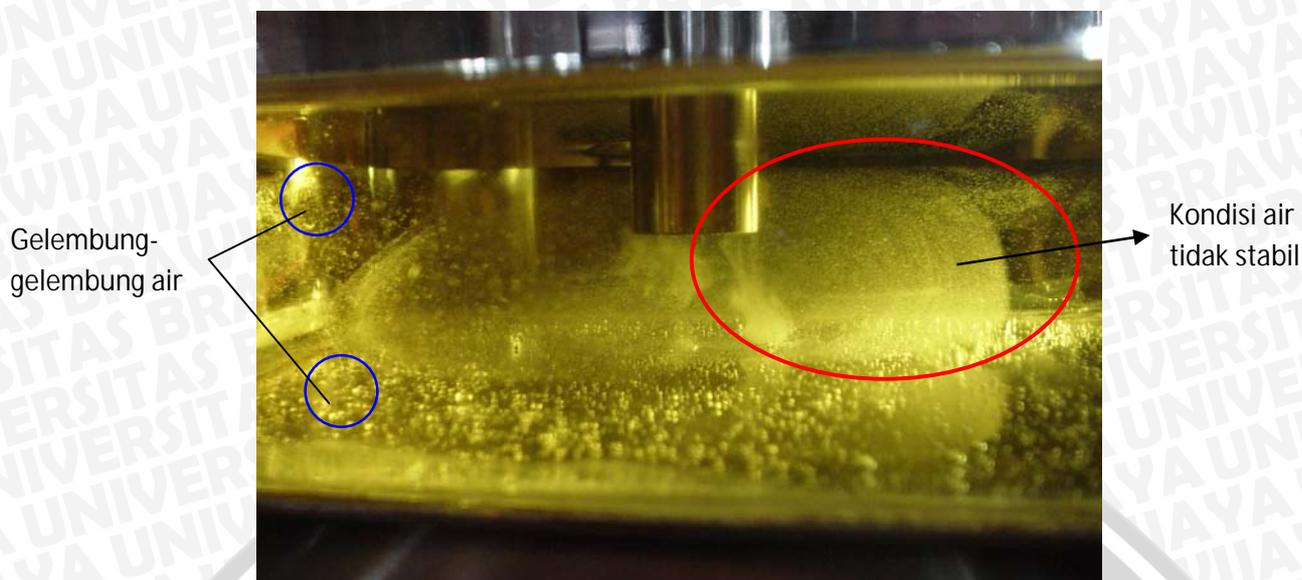
Tabel 4.7. Tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan campuran komposisi air 0,2 % dan 0,4 % pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°

Prosentase air	Data ke-	Tembus AC \bar{U}_{ac} (kV)	\bar{U}_{ac} (kV)	$U_{efektif}$ (kV)
0,2 %	1	3,0	3,1	2,2
	2	3,1		
	3	3,1		
0,4 %	1	2,1	2,2	1,6
	2	2,3		
	3	2,1		

Sumber: Hasil pengujian

Tabel 4.7 adalah hasil pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan campuran komposisi air sebesar 0,2 % dan 0,4 % pada rangkaian AC dengan susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dan dengan jarak sela 5,0 mm. Pada pengujian ini air diaduk secara perlahan-lahan sampai air berupa gelembung-gelembung air yang kecil dan sampai air menyebar dan merata diseluruh bagian minyak yang diuji. Dari Tabel 4.7 dapat dilihat bahwa nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit kecil yaitu tegangan puncaknya sebesar 3,1 kV dengan komposisi air pada minyak kelapa sawit sebesar 0,2 % dan sebesar 2,2 kV dengan komposisi air pada minyak kelapa sawit sebesar 0,4 %. Kemudian pengujian dilakukan pada jarak sela 15,0 mm dengan komposisi air yang diberikan sebesar 0,4 % dengan langkah pengadukan air yang sama sampai air berupa gelembung-gelembung air yang kecil. Dan hasil pengujian tegangan tembusnya adalah nilai untuk tegangan puncaknya sebesar 21,6 kV.

Pada pengujian dengan tegangan tembus yang besar yaitu dengan cara memperbesar jarak sela elektroda, ternyata kondisi pengotor air dalam minyak kelapa sawit menjadi tidak stabil, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.29. Gambar 4.29 adalah gambar kondisi air yang tidak stabil dalam minyak kelapa sawit pada pengujian dengan jarak sela antara elektroda jarum dan elektroda piring sebesar 15,0 mm dan dengan tegangan tembusnya sebesar 21,6 kV. Pengujian dilakukan pada rangkaian AC dengan air yang diberikan atau ditambahkan dalam minyak sebesar 0,2 ml atau 0,4 % dari volume minyak kelapa sawit. Dari Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa kondisi air sangat tidak stabil dan air menjadi butiran-butiran kecil yang menyerupai kabut, seperti yang ditunjukkan pada lingkaran warna merah pada Gambar 4.29. Sebelum air menjadi butiran-butiran kecil yang menyerupai kabut, bentuk air berupa gelembung-gelembung air yang kecil seperti yang ditunjukkan pada lingkaran warna biru pada Gambar 4.29.



Gambar 4.29. Kondisi air yang tidak stabil pada pengujian tegangan tembus 21,6 kV pada jarak sela 15,0 mm

Sumber: Hasil pengujian

Pada pengujian tegangan tembus yang besar sekitar 20 kV, kondisi air akan menjadi tidak stabil dan berubah menjadi butiran-butiran kecil yang menyerupai kabut. Sehingga pada pengujian pada jarak sela yang kecil yaitu 5,0 mm, kondisi air dibuat menjadi butiran-butiran kecil yang menyerupai kabut seperti kondisi air yang tidak stabil pada pengujian tegangan tembus sampai dengan tegangan uji 20 kV pada jarak sela yang besar. Kemudian dilakukan pengujian tegangan tembus pada rangkaian AC dengan jarak sela 5,0 mm. Hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8. Tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan campuran komposisi air 0,2 % dan 0,4 % pada beberapa susunan elektroda

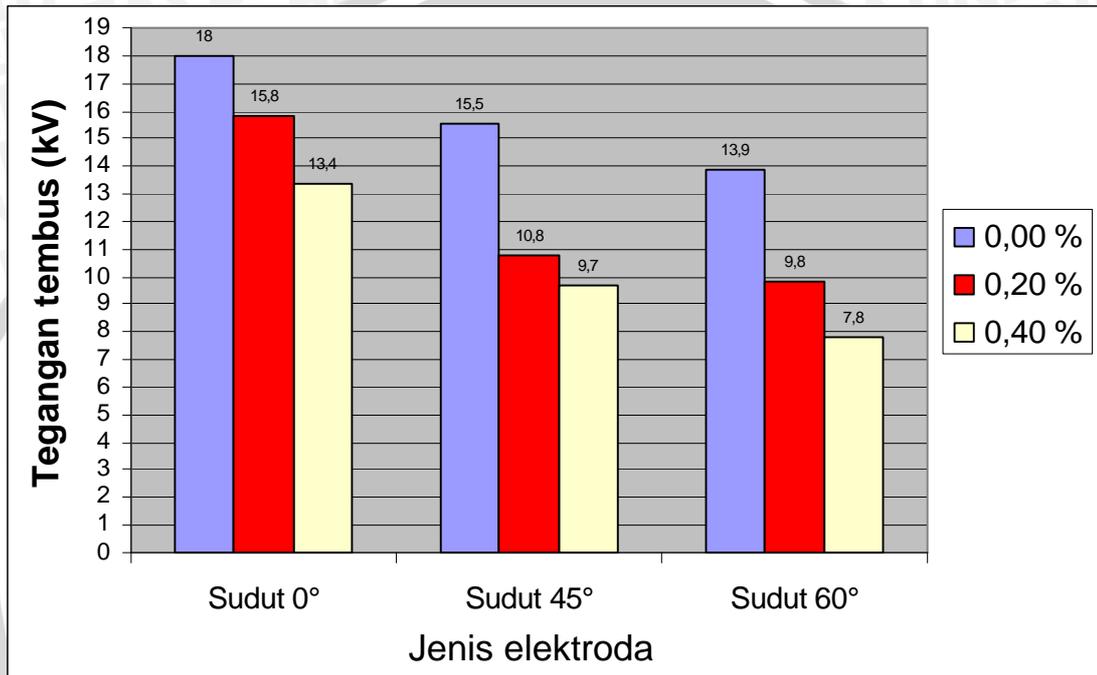
Prosentase air (%)	Data ke-	Elektroda sudut 0°		Elektroda sudut 45°		Elektroda sudut 60°	
		\bar{U}_{ac} (kV)	$U_{efektif}$ (kV)	\bar{U}_{ac} (kV)	$U_{efektif}$ (kV)	\bar{U}_{ac} (kV)	$U_{efektif}$ (kV)
0,2 %	1	22,3	15,8	15,3	10,8	13,9	9,8
	2	24,9	17,6	17,8	12,6	17,5	12,4
	3	25,7	18,2	19,6	13,9	18,5	13,1
0,4 %	1	19,0	13,4	13,7	9,7	11,1	7,8
	2	21,6	15,3	16,3	11,5	14,8	10,5
	3	23,3	16,5	17,5	12,4	15,5	11,0

Sumber: Hasil pengujian

Tabel 4.8 adalah hasil pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan kontaminan air dengan komposisi 0,2 % dan 0,4 % dari volume minyak kelapa sawit. Dari Tabel 4.8 dapat dilihat bahwa hasil pengujian pada beberapa susunan elektroda, hasil yang didapatkan pada data ke-1, ke-2, dan ke-3 adalah berbeda-beda dan nilai perbedaannya cukup besar dari pada pengujian tegangan tembus pada minyak kondisi murni. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor:

1. Pada tegangan yang besar, air dalam minyak kelapa sawit menjadi tidak stabil sehingga butiran-butiran air menjadi lebih kecil lagi.
2. Pengotor internal minyak kelapa sawit yang sulit dihilangkan pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan kondisi diberi pengotor atau kontaminan air.

Grafik pengaruh pengotor air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30.



Gambar 4.30. Grafik pengaruh pengotor air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit pada beberapa susunan elektroda yang berbeda

Sumber: Hasil pengujian

Gambar 4.30 adalah grafik pengaruh pengotor air terhadap karakteristik tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan komposisi air yang berbeda pada beberapa susunan elektroda yang berbeda dengan jarak sela 5,0 mm. Grafik warna biru menunjukkan pengujian pada kondisi minyak masih murni atau komposisi air 0,0%. Grafik warna merah menunjukkan pengujian minyak kelapa sawit dengan komposisi kontaminan air 0,2 % dan warna kuning menunjukkan pengujian minyak kelapa sawit dengan komposisi kontaminan air 0,4%. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi kenaikan tegangan tembus pada pengujian ke-2 dan ke-3, maka data dari grafik tegangan tembus untuk pengujian minyak kelapa sawit dengan kontaminan air merupakan data tegangan tembus pada pengujian pertama atau data ke-1. Dari grafik pada Gambar 4.30 dapat dilihat bahwa pengaruh kontaminan air sangat besar pada susunan elektroda yang lebih non-homogen.

Besar prosentase penurunan tegangan tembus minyak kelapa sawit untuk susunan elektroda yang berbeda dengan komposisi air yang berbeda, berdasarkan grafik hasil pengujian, besar prosentase penurunan tegangan tembusnya adalah sebagai berikut:

a. susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0°

- komposisi air 0,20 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{18 - 15,8}{18} \times 100\%$$

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 12,22\%$$

- komposisi air 0,40 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{18 - 13,4}{18} \times 100\%$$

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 25,56\%$$

b. susunan elektroda jarum-piring (sudut 45°)

- komposisi air 0,20 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{15,5 - 10,8}{15,5} \times 100\%$$

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 30,32\%$$

- komposisi air 0,40 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{15,5 - 9,7}{15,5} \times 100\%$$

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 37,42\%$$

c. susunan elektroda jarum-piring (sudut 60°)

- komposisi air 0,20 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{13,9 - 9,8}{13,9} \times 100\%$$

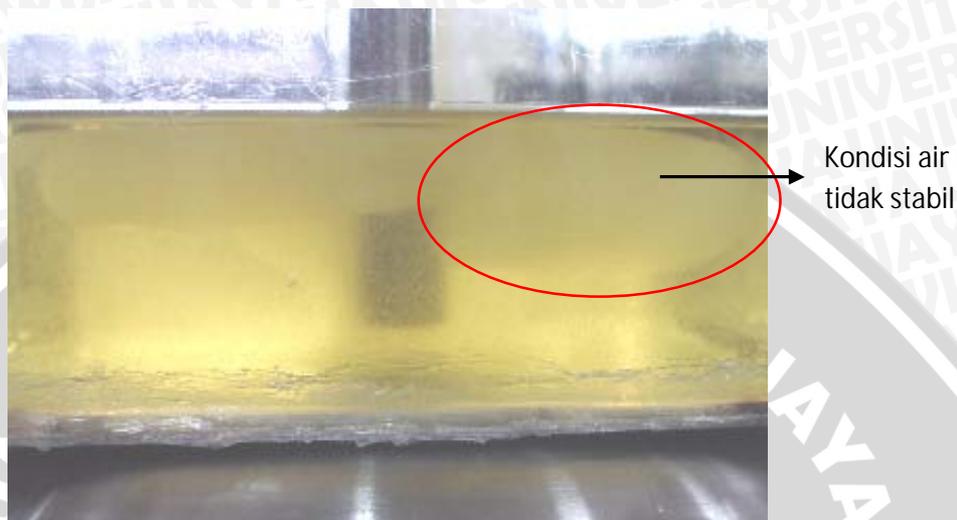
$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 29,50\%$$

- komposisi air 0,40 %

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = \frac{13,9 - 7,8}{13,9} \times 100\%$$

$$\% \Delta U_{\text{efektif}} = 43,88\%$$

Dari hasil yang diperoleh ternyata pengaruh kontaminan air terhadap tegangan tembus minyak kelapa sawit, pengaruhnya besar pada susunan elektroda yang lebih non-homogen atau pada susunan elektroda jarum-piring. Pada pengujian ini, pengotor air dalam minyak kelapa sawit juga mengalami ketidakstabilan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.31.



Gambar 4.31. Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan diberi kontaminan air yang berupa butiran-butiran air pada jarak 5,0 mm
Sumber: Hasil pengujian

Gambar 4.31 adalah gambar pada saat pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan diberi kontaminan air yang diaduk sampai berupa butiran-butiran air menyerupai kabut dengan jarak sela 5,0 mm pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut 0° dan pada rangkaian AC. Ternyata air yang diaduk sampai berupa butiran-butiran air yang kecil pada pengujian ini, air juga mengalami ketidakstabilan pada penerapan tegangan uji yang besar sekitar 20 kV. Dari Gambar 4.31 yang dilingkari warna merah dapat dilihat bahwa butiran-butiran air yang kecil berubah menjadi seperti awan yang menggumpal dalam minyak. Hal ini yang menyebabkan data pada pengujian ke-2 dan ke-3 nilai tegangan tembusnya lebih besar. Pada pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan kontaminan air yang dibuat menjadi butiran-butiran air yang kecil, minyak kelapa sawit terlihat lebih keruh dibandingkan pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit dengan kontaminan air yang dibuat berupa gelembung-gelembung air. Hal ini menyebabkan pengotor internal yang muncul pada saat pengujian sulit untuk diamati, sehingga pengotor internal sulit dihilangkan atau dibersihkan dari minyak kelapa sawit, sehingga dapat menyebabkan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit meningkat pada pengujian berikutnya. Jadi pengujian pengaruh pengotor atau kontaminan air terhadap tegangan tembus minyak

kelapa sawit, tegangan tembusnya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti proses pengadukan air, komposisi air, dan faktor-faktor yang mempengaruhi kenaikan tegangan tembus pada pengujian selanjutnya.



BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari data hasil penelitian dan analisis karakteristik isolasi minyak kelapa sawit, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

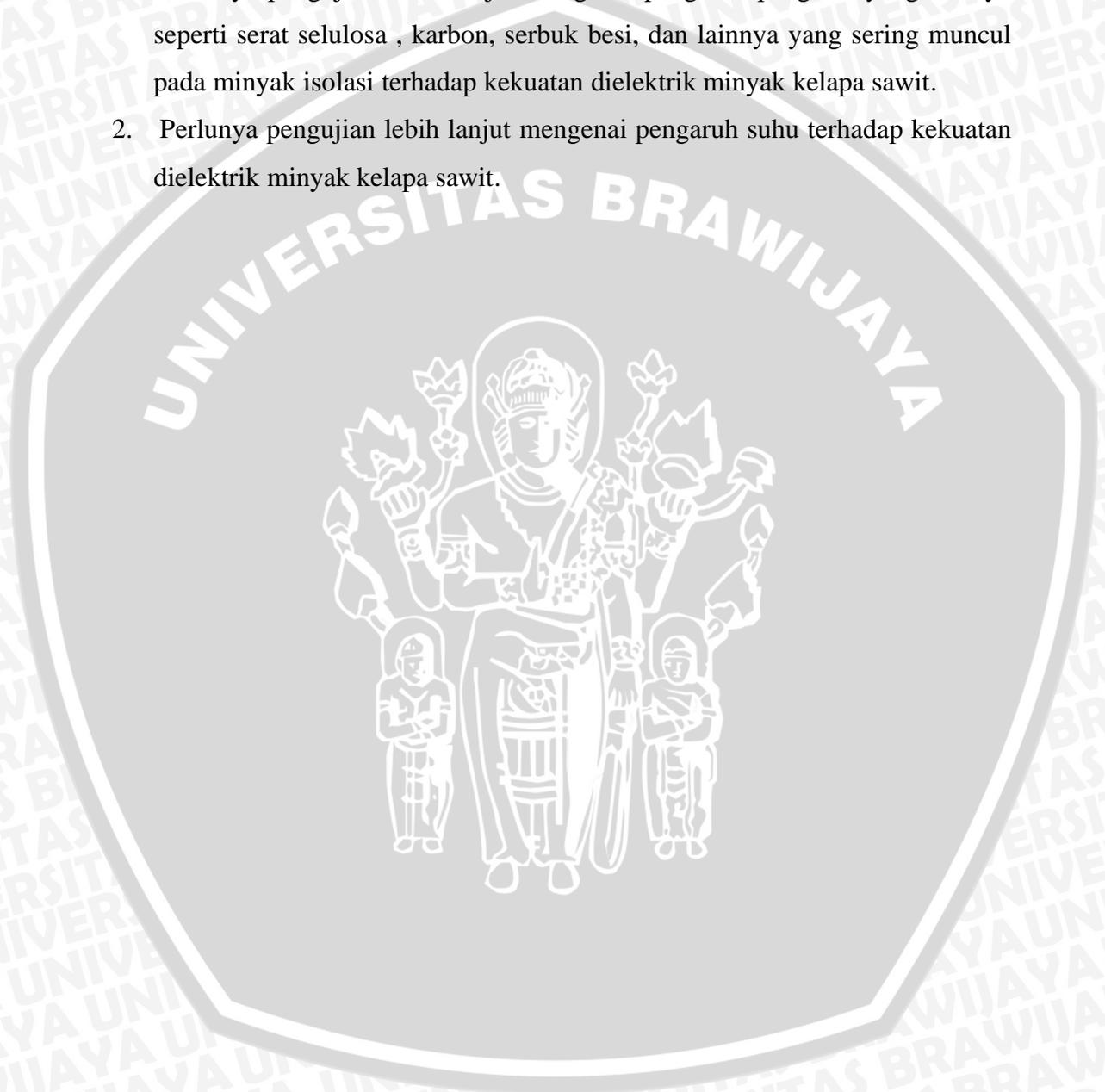
1. Semakin runcing elektroda jarum (nilai sudut membesar) menghasilkan distribusi medan yang semakin heterogen dan nilai tegangan tembusnya juga semakin kecil. Pada jarak sela 5 mm nilai tegangan tembus minyak kelapa sebesar 13,9 kV (susunan elektroda jarum-piring sudut 60°), 15,5 kV (susunan elektroda jarum-piring sudut 45°), dan 18,0 kV (susunan elektroda jarum-piring sudut 0°).
2. efek polaritas terjadi pada susunan elektroda jarum-piring dimana nilai mutlak tegangan tembusnya pada rangkaian polaritas negatif lebih besar dibandingkan dengan hasil pengujian pada rangkaian polaritas positif. Pada jarak sela 5 mm dan keruncingan 45° , tegangan tembus pada polaritas negatif sebesar -40,1 kV dan pada polaritas positif sebesar 31,1 kV. sedangkan untuk keruncingan 60° , tegangan tembus pada polaritas negatif sebesar -37,1 kV dan pada polaritas positif sebesar 27,2 kV.
3. Pengaruh dari kehadiran kontaminan dalam minyak kelapa sawit ini adalah:
 - a. Pengotor atau kontaminan air dalam minyak kelapa sawit dapat menyebabkan nilai tegangan tembus minyak kelapa sawit turun drastis yaitu penurunannya sampai 30,32% untuk prosentase penambahan air sebesar 0,2% dan 43,88% untuk prosentase penambahan air sebesar 0,4%.
 - b. Selain pengotor air yang sengaja ditambahkan dalam minyak kelapa sawit, muncul pengotor internal dari minyak kelapa sawit itu sendiri yang sifatnya seperti isolasi sehingga menyebabkan nilai tegangan tembusnya naik. Pengotor internal ini muncul karena pengaruh medan listrik dalam minyak kelapa sawit.
4. Semakin heterogen distribusi susunan elektroda, semakin kecil efisiensi medannya. Efisiensi medan dan intensitas medan sebesar 40,6% dan 125,8 kV/cm untuk susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 0° , 18,6% dan 236,9 kV/cm untuk susunan elektroda jarum-piring dengan

sudut elektroda jarum 45° sebesar, 11,4% dan 345,5 kV/cm pada susunan elektroda jarum-piring dengan sudut elektroda jarum 60° .

5.2. Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penyempurnaan penelitian ini adalah:

1. Perlunya pengujian lebih lanjut mengenai pengaruh pengotor yang lainnya seperti serat selulosa, karbon, serbuk besi, dan lainnya yang sering muncul pada minyak isolasi terhadap kekuatan dielektrik minyak kelapa sawit.
2. Perlunya pengujian lebih lanjut mengenai pengaruh suhu terhadap kekuatan dielektrik minyak kelapa sawit.



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1998. *Analisis Kegagalan Minyak Transformator*. Elektro Online. <http://elektroindonesia.com/elektro/energi12.html>. (diakses 7 April 2010)
- Anonim. 2003. *Paduan Pemeliharaan Trafo Tenaga*. PT PLN (Persero) P3B. <http://bops.pln-jawa-bali.co.id/artikel/pemeliharaantrafo.pdf> (diakses 10 April 2010)
- Arismunandar, A.1983. *Teknik Tegangan Tinggi Suplemen*, Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Dhofir, Moch. 1997. *Gejala Medan Tinggi*, Malang: Percetakan Unibraw
- Gallagher, T.J. 1975. *Simple Dielectric Liquids Mobility, Conduction, And Breakdown*, Oxford: Clarendon Press.
- Kind, Dieter. 1993. *Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi*, ITB Bandung.
- J.A.KOK. 1961. *Electrical Breakdown of Insulating Liquids*, London: Philips Technial Library.
- Muhaimin, 1999. *Bahan-bahan Listrik untuk Politeknik*, Pradnya paramita, Jakarta.
- Naidu, MS. Kamaraju, 1995. *High Voltage Engineering*, New Delhi.
- Pasaribu, Nurhida. 2004. *Minyak Buah Kelapa Sawit*, Universitas Sumatera Utara. <http://library.usu.ac.id/download/fmipa/kimia-nurhaida.pdf> (diakses 7 April 2010)

LAMPIRAN





Gambar 1. Elektroda uji



Gambar 2. Wadah uji (tampak depan)



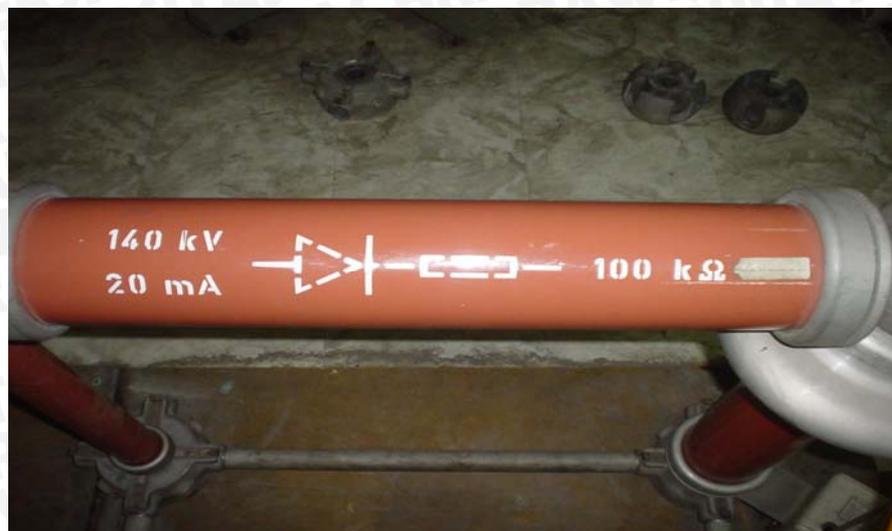
Gambar 3. Wadah uji (tampak atas)



Gambar 4. Trafo uji



Gambar 5. Data trafo uji



Gambar 6. Dioda tegangan tinggi



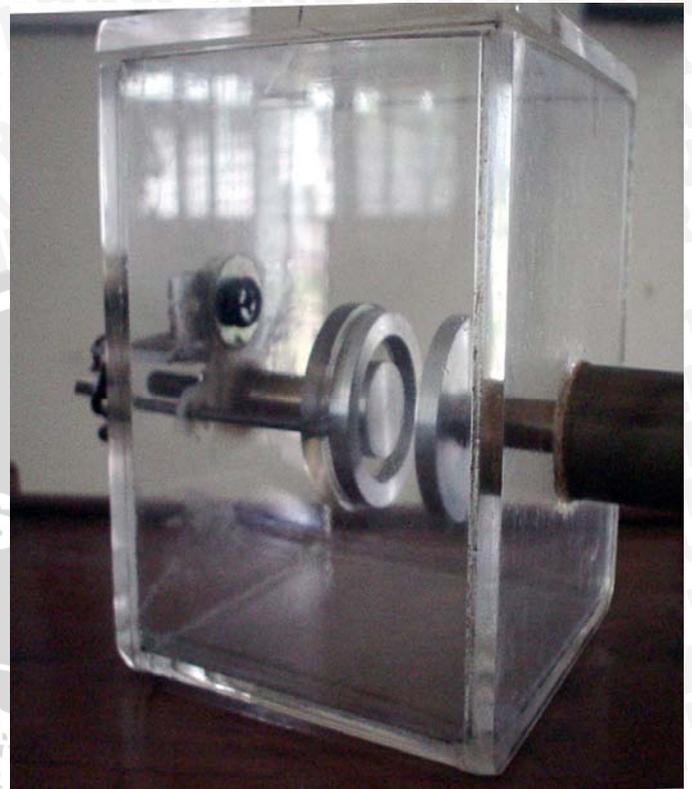
Gambar 7. Kapasitor (C_M)



Gambar 8. Resistor (R_M)



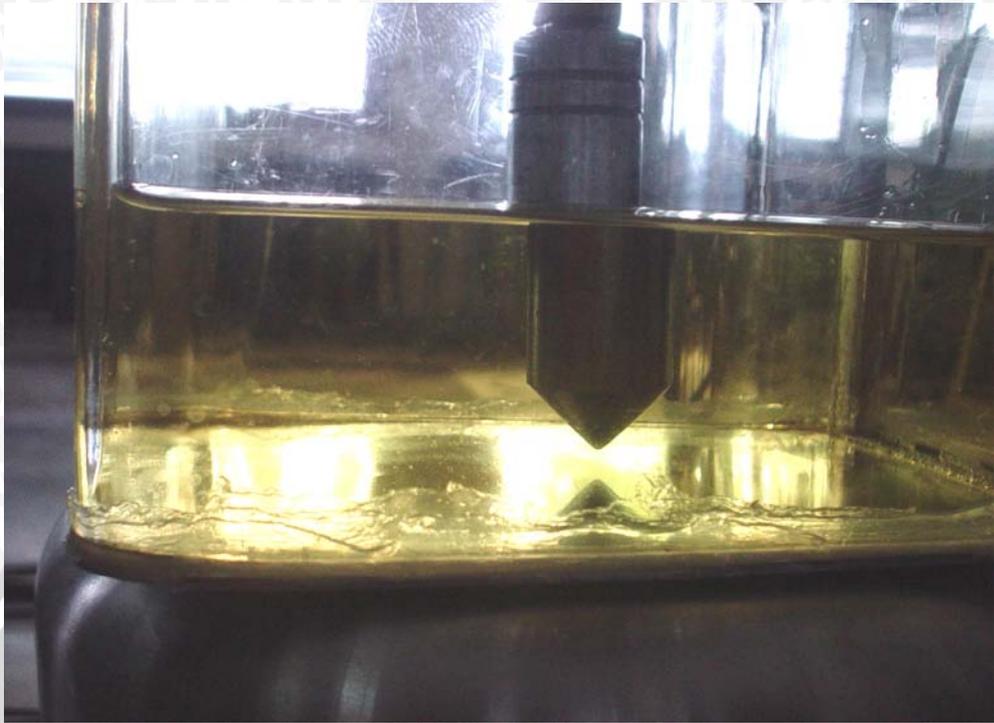
Gambar 9. Tempat objek uji



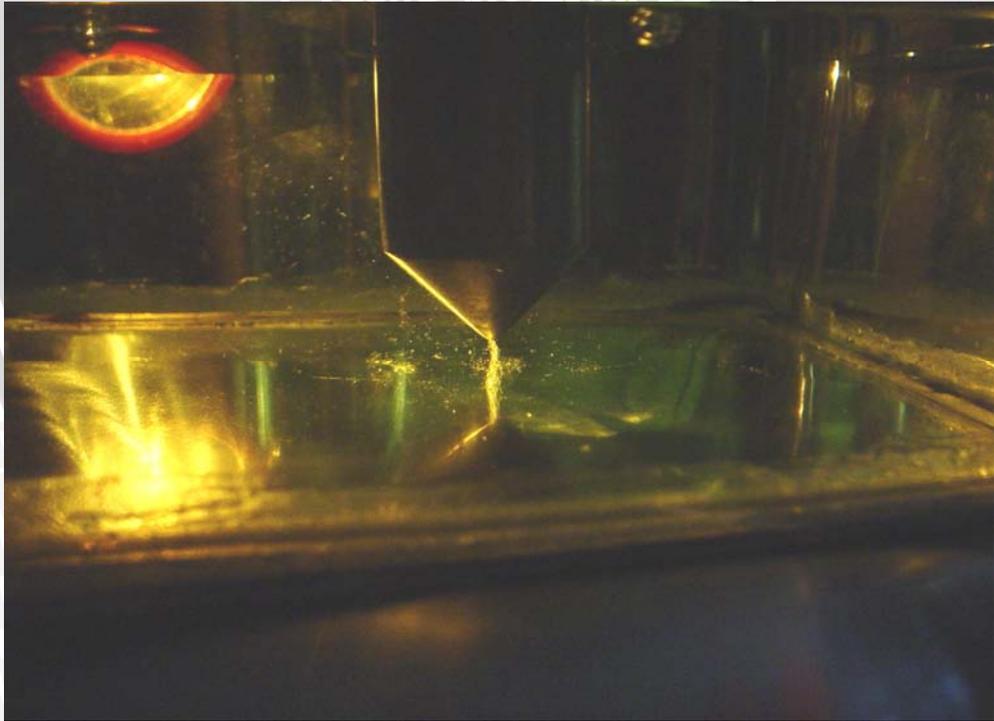
Gambar 10. Wadah ukur resistivitas dan permitivitas



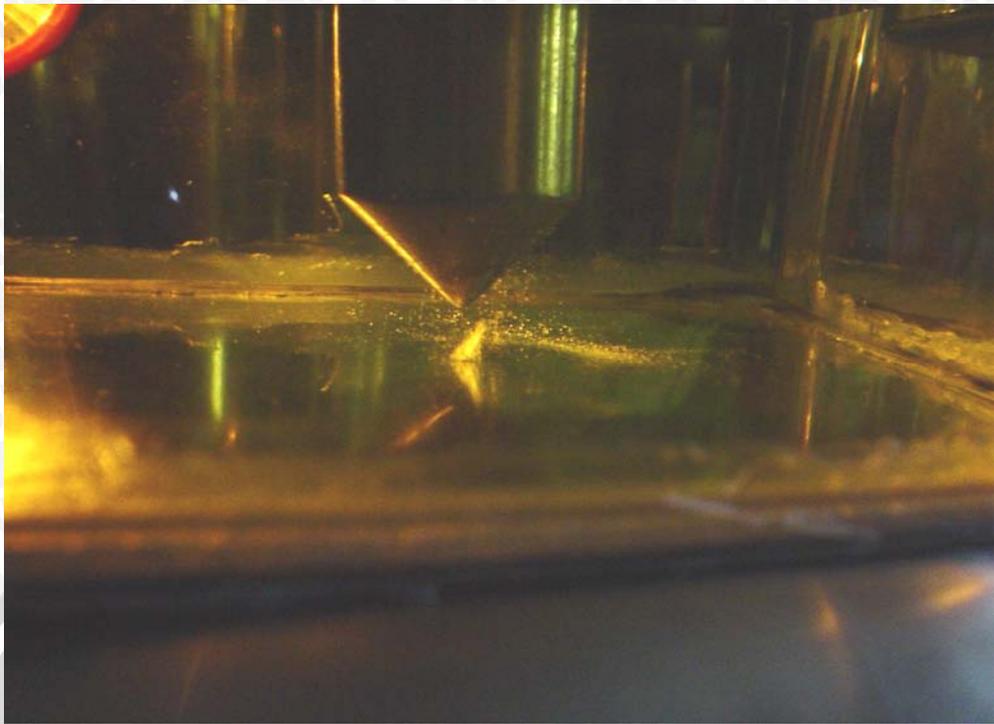
Gambar 11. Meja kontrol (*Control desk*)



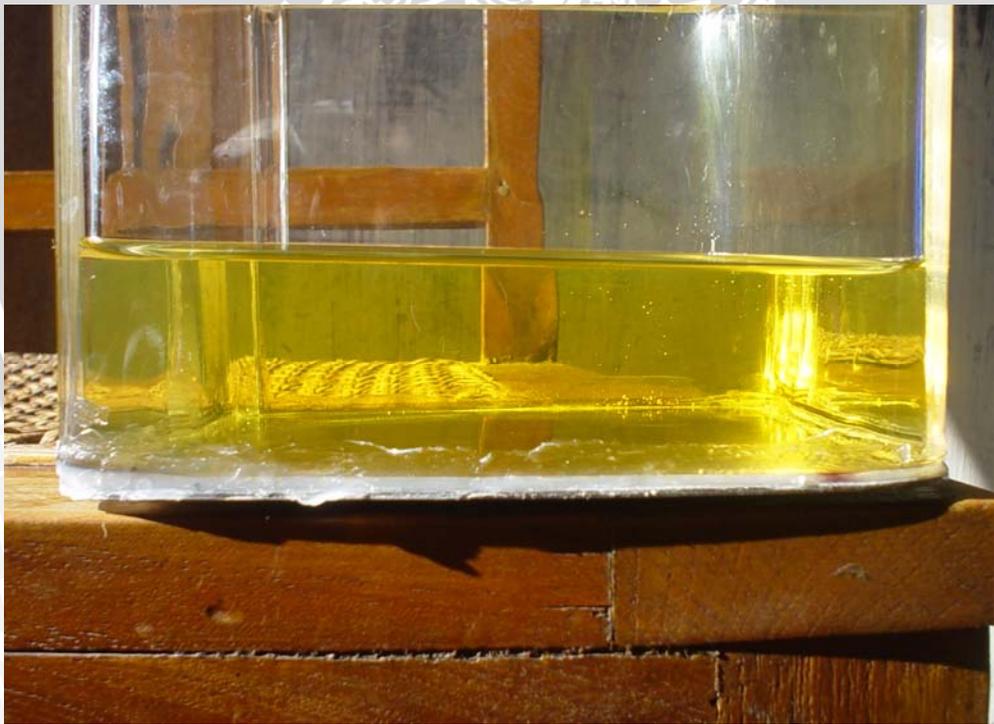
Gambar 12. Kondisi minyak kelapa sawit dengan tegangan 0 kV



Gambar 13. Kondisi minyak kelapa sawit dengan tegangan 14 kV



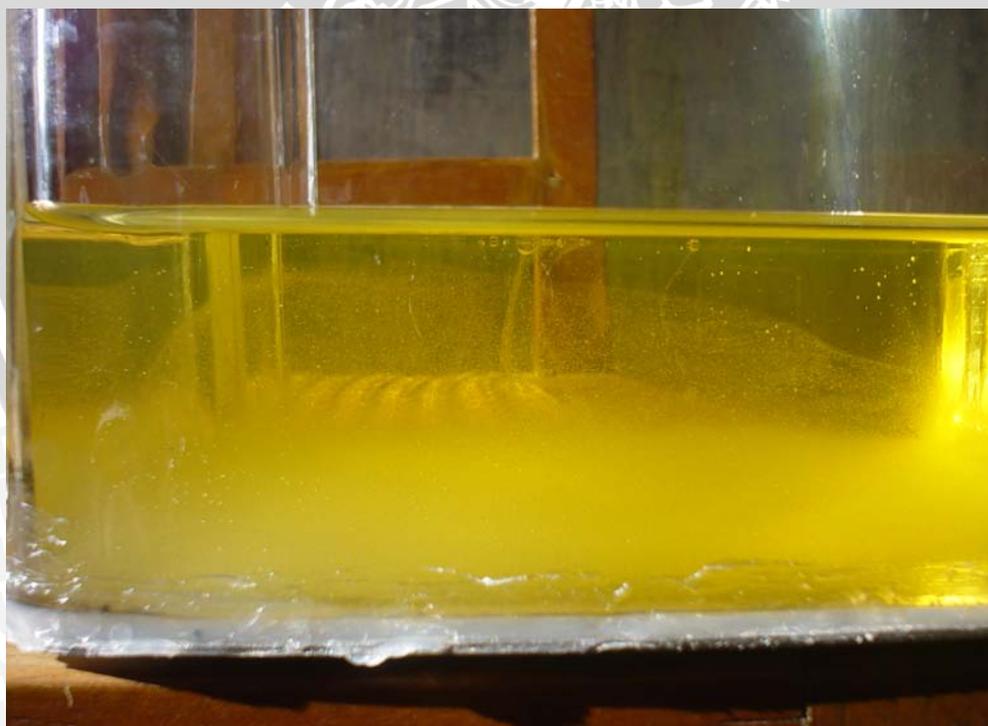
Gambar 14. Kondisi minyak kelapa sawit sesudah tegangan tembus



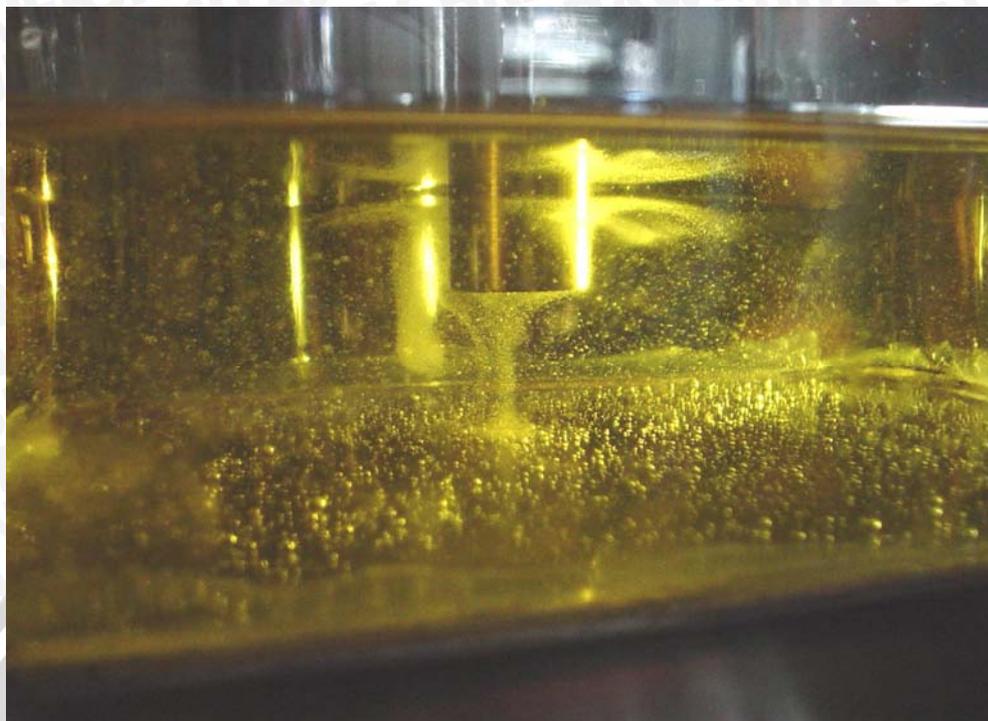
Gambar 15. Kondisi minyak kelapa sawit masih baru



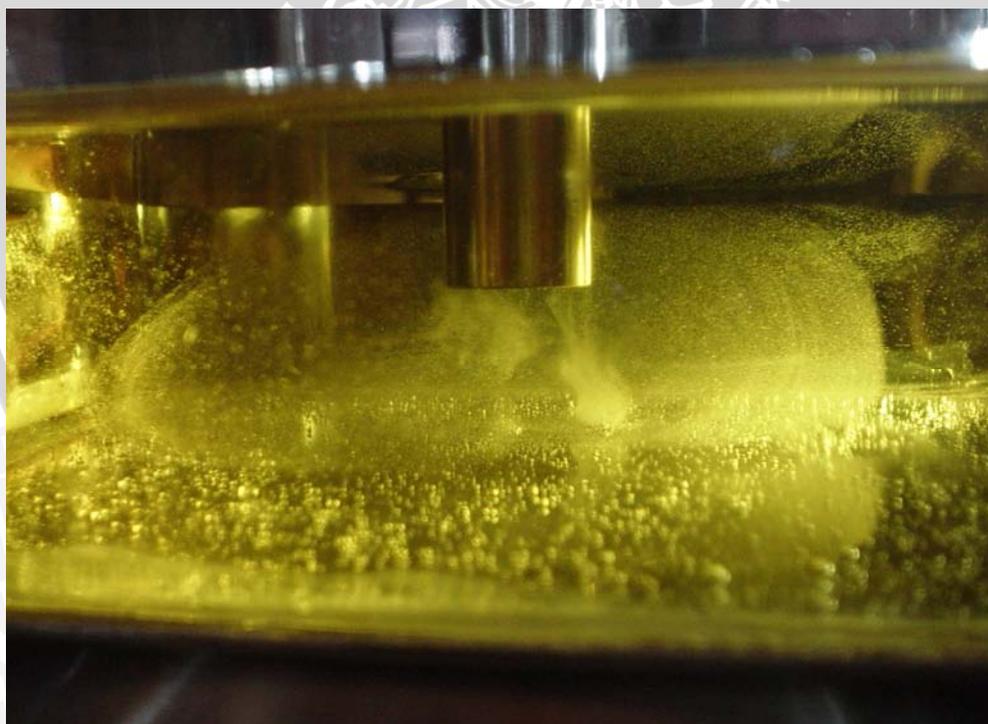
Gambar 16. Sampel minyak kelapa sawit yang diberi air



Gambar 17. Kondisi minyak kelapa sawit keseluruhan sesudah dicampur air



Gambar 18. Kondisi minyak kelapa sawit terkontaminan diberi tegangan tembus 8,6 kV



Gambar 19. Kondisi minyak kelapa sawit terkontaminan diberi tegangan tembus 15,3 kV