

**DAMPAK CAIRAN NANODIELEKTRIK TERHADAP MINYAK
DEDAK PADI SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI CAIR
TRANSFORMATOR**

*THE EFFECT OF NANO-DIELECTRIC LIQUID ON RICE
BRAN OIL AS AN ALTERNATIVE TO TRANSFORMER LIQUID
INSULATION*

RAHMAT HARIANTO



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2021

**DAMPAK CAIRAN NANODIELEKTRIK TERHADAP MINYAK
DEDAK PADI SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI CAIR
TRANSFORMATOR**

TESIS

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

Disusun dan dikerjakan oleh

RAHMAT HARIANTO

Kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

TESIS

**DAMPAK CAIRAN NANODIELEKTRIK TERHADAP MINYAK
DEDAK PADI SEBAGAI ALTERNATIF ISOLASI CAIR
TRANSFORMATOR**

Disusun dan diajukan oleh

RAHMAT HARIANTO

Nomor Pokok D03272017

Telah dipertahankan didepan Panitia Ujian Tesis

Pada tanggal 3 Maret 2021



Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T.

Ketua

Ketua Program Studi S2
Departemen Teknik Elektro,

Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.

Anggota

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Hasanuddin,

Prof Dr. Eng. Syafaruddin, ST. M.Eng.

NIP. 19740530199031003

Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT.

NIP. 196012311986091001

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertanda tangan dibawah ini;

Nama : Rahmat Harianto

Nomor mahasiswa : D032172017

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S2 Teknik Energi

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis berjudul "Dampak Cairan Nanodielektrik Terhadap Minyak Dedak Padi Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator" beserta seluruh isinya benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan/plagiat tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 3 Maret 2021



Yang Menyatakan

Rahmat Harianto

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala, yang telah memberikan limpahan rahmat dan karunia-Nya, juga Shalawat dan salam semoga terlimpahkan kepada Baginda tercinta Nabi Muhammad Sallallohu Alaihi Wasallam yang telah mengantarkan manusia dari masa jahiliah ke masa yang berilmu hingga saat ini sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul "Dampak Cairan Nanodielektrik Terhadap Minyak Dedak Padi Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator". Gagasan yang melatari tajuk permasalahan ini timbul dari hasil pengamatan penulis terhadap pemanfaatan sekam padi diolah sebagai minyak dengan kualitas yang dapat membantu pendapatan petani dan meningkatkan penggunaan bahan isolasi cair ramah lingkungan. Berdasarkan kendala yang dihadapi penulis dalam rangka penyusunan tesis ini, berbagai pihak yang turut serta memberikan bantuan dan dukungan, maka tesis ini selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada para pihak:

1. Kedua orang tua penulis, Ayahanda ABD. Rahman, H. dan Ibunda Nurmiah yang telah mendidik dengan ikhlas sepenuh hati dan memberikan dukungan finansial maupun moral. Semoga kalian berdua selalu diberi umur panjang dan senantiasa dikaruniai kesehatan. Serta seluruh Keluarga Besar yang selalu mendoakan, memberikan nasehat, mendukung, dan memotivasi kepada penulis.

2. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA. selaku Rektor Universitas Hasanuddin dan Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro dan Bapak Prof Dr. Eng. Syafaruddin, ST. M.Eng. selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T. selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Ir. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan senantiasa membimbing, memberikan gagasan serta ide-ide kepada penulis dalam tesis ini.
5. Bapak Dr. Yusran, ST. MT., Bapak Muhammad Bachtiar Nappu, ST. M. Phil. MT. Ph.D dan Bapak Yusri Syam Akil, ST. MT. Ph. D. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan banyak masukan dan kritikan kepada penulis dalam penyelesaian tesis ini.
6. Seluruh Dosen Teknik Elektro, Staf Pengajar, dan Staf Administrasi serta Laboran Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan, dan kemudahan yang diberikan kepada penulis selama menempuh masa studi.
7. Kepala Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Ujung Pandang yang telah memberikan izin serta pelayanan dan petunjuk berharga selama penulis melakukan penelitian tesis.

8. Rekan-rekan angkatan 2018 Pascasarjana Departemen Teknik Elektro UNHAS yang telah banyak memberikan semangat kebersamaan, pemikiran, motivasi dan dukungan doa.
9. Rekan mahasiswa Teknik Elektro S1 di Laboratorium Riset Tegangan Tinggi dan Infrastruktur Ketenagalistrikan Taufiq Hidayat, Rifaldy Abdillah S., Muhammad Wahyu Santoso, Evander Steanly Paongan, Wahyudi, Muhammad Irvan, dan Abdi Ihlas yang telah membantu penulis selama proses perkuliahan sampai penyelesaian tesis.
10. Seluruh pihak yang tidak dapat kami sebutkan satu-persatu yang telah membantu dan mendukung kami dalam penyusunan tesis ini.

Pada penyusunan kali ini penulis menyajikan beberapa hal yang menyangkut judul yang telah penulis angkat dan telah melalui proses pencarian dari berbagai sumber baik jurnal penelitian, buku, maupun dari situs-situs di internet. Sehingga kritik dan saran yang sifatnya memperbaiki sangat kami harapkan dan menerimanya dengan senang hati. Semoga hasil penelitian tesis ini nantinya dapat bermanfaat bagi orang lain yang membutuhkannya.

Makassar, 3 Maret 2021

Rahmat Harianto

ABSTRAK

Rahmat Harianto. *Dampak Cairan Nanodielektrik Terhadap Minyak Dedak Padi Sebagai Alternatif Isolasi Cair Transformator* (Pembimbing oleh **Salama Manjang dan Ikhlas Kitta**)

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh hasil pengukuran dan pengamatan pengaruh penambahan nanofluid sebagai peningkatan sifat dielektrik dengan nanopartikel filler berbeda tipe seperti alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), dan magnetite (Fe_3O_4) ke minyak dedak padi (RBO) tiap sampel menggunakan yaitu sebanyak 0.05 % mg, lalu dibandingkan dengan RBO murni dan minyak mineral. Kemudian dilakukan pengujian sifat kimia, fisik, dan sifat elektrik. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Riset Tegangan Tinggi/Infrastruktur Ketenagalistrikan Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Teknik Kimia Politeknik Negeri Ujung Pandang. Metode pengujian sifat fisik yaitu viskositas dan densitas, pengujian sifat kimia yaitu kadar air dan kadar asam. Pengujian sifat elektrik yaitu tegangan tembus (*Breakdown Voltage*) menggunakan elektroda setengah bola (tembereng) dan pelepasan sebagian (*Partial Discharge*) menggunakan kondisi steady-state dengan elektroda jarum-plat. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pada pengujian sifat fisik nilai viskositas dan densitas tidak memenuhi standar ASTM D6871 dan SPLN 49-1. Pengujian sifat kimia yaitu pengujian kadar air RBO murni maupun yang ditambahkan filler Al_2O_3 dan TiO_2 lebih rendah dari minyak mineral yang baru. Sedangkan pengujian kadar asam memenuhi nilai standar ASTM D6871. Pengujian sifat elektrik di tegangan tembus RBO yang menggunakan filler Al_2O_3 meningkatkan 30% ketahanan isolasi, sedangkan minyak yang menggunakan filler TiO_2 turun 27% dan Fe_3O_4 dapat menurunkan 42% ketahanan isolasi pada RBO. Adapun pada pengujian peluahan sebagian RBO menunjukkan peningkatan resistensi peluahan sebagian pada RBO yang menggunakan nanofluid Al_2O_3 dibandingkan dengan RBO murni.

Kata kunci: Nanofluid, Minyak Dedak Padi, Tegangan Tembus, Peluahan Sebagian.

ABSTRACT

Rahmat Harianto. *The Effect Of Nano-Dielectric Liquid On Rice Bran Oil As An Alternative To Transformer Liquid Insulation* (Supervised by **Salama Manjang** and **Ikhlas Kitta**)

The study aims to obtain the results of measurements and observations of the effect of nanofluids on Rice Bran Oil to improve dielectric properties by utilizing several different types of filler nano-particles such as alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), and magnetite (Fe_3O_4). Each study sample had 0.05% mg. The sample was compared with pure Rice Bran Oil and Mineral Oil and tested for chemical, physical, and electrical properties. The study was carried out at High Voltage Research Laboratory / Electrical Infrastructure of Hasanuddin University and Chemical Engineering Laboratory of Politeknik Negeri Ujung Pandang. The physical properties testing includes the viscosity and density tests, while the chemical properties include the water and acid level. Electrical properties testing involves Breakdown Voltage with segment and Partial Discharge using steady-state conditions and needle-plate electrodes. The results of physical properties analysis show the viscosity and density values do not meet ASTM D6871 and SPLN 49-1 standards. The chemical property testing with pure RBO and Al_2O_3 and TiO_2 filler mixtures produces lower values than the new mineral oil. The acid level testing confirms the value meets ASTM D6871 standards. Breakdown Voltage Testing on RBO utilizing Al_2O_3 fillers increases 30% of RBO insulation resistance, Al_2O_3 reduces insulation resistance by 27% and Fe_3O_4 also decreases it by 42%. Partial Discharge testing on RBO reveals the increase resistance of modified RBO with Al_2O_3 nanofluids compared to pure RBO.

Keywords: Nanofluid, Rice Bran Oil, Breakdown Voltage, Partial Discharge.

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	
HALAMAN PENGANTAR	
LEMBAR PENGESAHAN	
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	
PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. LATAR BELAKANG	1
B. RUMUSAN MASALAH	5
C. TUJUAN PENELITIAN	6
D. RUANG LINGKUP	7
E. MANFAAT PENELITIAN	7
F. SISTEMATIKA PENULISAN	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
A. LANDASAN TEORI	10
1. Minyak Transformator	10
2. Tanaman Padi dan Minyak Dedak Padi	18
3. Sifat Fisik Minyak Transformator	25
4. Sifat Kimia Minyak Transformator	27
5. Sifat Elektrik Minyak Transformator	28
6. Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair	31
7. Nanofluida	49
8. Mekanisme <i>Partial Discharge</i>	57
9. Distribusi <i>Weibull</i>	68
B. HIPOTESA STATE OF THE ART	71

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	74
A. Waktu dan Lokasi Penelitian	74
B. Alat dan Bahan Penelitian	75
C. Persiapan Nanofluid pada RBO	76
D. Metode Pengujian	78
E. Diagram Alir Penelitian	93
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	94
A. Hasil Pengujian Sifat Fisik Minyak	94
B. Hasil Pengujian Sifat Kimia Minyak	98
C. Hasil Pengujian Sifat Elektrik Minyak	102
D. Analisis Pola Penyebaran Data dengan Weibull	111
E. Pembahasan	123
BAB V PENUTUP	128
A. Kesimpulan	128
B. Saran Penelitian	131
DAFTAR PUSTAKA	132
LAMPIRAN	138

DAFTAR TABEL

Nomor	halaman
Tabel 2.1 Komposisi asam lemak dan kandungan RBO	24
Tabel 2.2 Beberapa nilai permitivitas dan kekuatan bahan isolator	62
Tabel 2.3 Sinyal PD, sensor dan aplikasi	66
Tabel 2.4 <i>State Of The Art</i>	71
Tabel 3.1 Peralatan pengujian	75
Tabel 3.2 Bahan pengujian	76
Tabel 4.1 Hasil pengujian viskositas diukur pada temperatur 30°C dan 40°C minyak dedak padi (RBO) dimodifikasi dengan nanofluid yang berbeda	94
Tabel 4.2 Hasil pengujian massa jenis minyak	96
Tabel 4.3 Hasil pengujian kadar air minyak	98
Tabel 4.4 Hasil Pengujian kadar asam Minyak	100
Tabel 4.5 Data hasil pengujian tegangan tembus minyak dengan variasi temperatur	102
Tabel 4.6 Hasil pengukuran <i>partial discharge</i> RBO menggunakan 0.05% mg nanofluid Al ₂ O ₃ dan sebelum menggunakan	106
Tabel 4.7 Hasil Probabilitas Weibull dan Normal (50%) Tegangan Tembus	114
Tabel 4.8 Hasil Probabilitas Weibull dan Normal (50%) <i>Partial Discharge</i>	118
Tabel 4.9 Komprehensif Hasil Pengujian dan Analisis Statistik Uji Probabilitas Kegagalan dan Keandalan	122

DAFTAR GAMBAR

Nomor	halaman
Gambar 2.1 Struktur hidrokarbon pada minyak mineral. (a) Struktur dari <i>Parafinis</i> , (b) struktur dari <i>Neftinis</i> , dan (c) struktur dari Aromatik	13
Gambar 2.2 Struktur Triglicerida	15
Gambar 2.3 Proses pengolahan minyak dedak padi	20
Gambar 2.4 Medan listrik dalam dielektrik	29
Gambar 2.5 Kegagalan elektronik	33
Gambar 2.6 Pengaruh medan terhadap gelembung udara	35
Gambar 2.7 Grafik perbandingan hasil perhitungan sesuai dengan teori kekuatan gagal medan gelembung	36
Gambar 2.8 Medan listrik bentuk sferoida	38
Gambar 2.9 Grafik hubungan kuat medan listrik terhadap nilai γ	39
Gambar 2.10 Bola air yang memanjang memicu kegagalan	40
Gambar 2.11 Kegagalan butiran padat	41
Gambar 2.12 Resistivitas dielektrik minyak kertas terhadap kandungan air	45
Gambar 2.13 Rugi dielektrik pada minyak-kertas	46
Gambar 2.14 Lapisan EDL nanopartikel dalam minyak	51
Gambar 2.15 Scanning Electron Microscope (SEM) partikel nano Al_2O_3 , TiO_2 , dan Fe_3O_4	52
Gambar 2.16 PD internal dan PD eksternal (permukaan dan korona)	57
Gambar 2.17 Proses peluahan (a) <i>avalanche</i> elektron dan (b) tipikal arus peluahan (korona)	60
Gambar 2.18 (a) Isolasi dengan rongga, (b) rangkain ekivalen, dan (c) pulsa partial discharge	61
Gambar 2.19 Energi yang dihasilkan oleh <i>partial discharge</i>	65
Gambar 2.20 Pola diagram Partial Discharge (a) elips, (b) sinusoidal, dan (c) linear	67
Gambar 3.1 Pengadukan nanofluid pada Minyak dedak padi menggunakan <i>magnetic stirrer</i>	77

Gambar 3.2 Minyak dedak padi yang telah di modifikasi	77
Gambar 3.3 Viskometer <i>Brookfield</i> dan <i>Hotplate</i>	78
Gambar 3.4 Pengujian Massa jenis menggunakan Timbangan Analitik Digital dan <i>Syringe</i>	79
Gambar 3.5 Pengujian kadar air menggunakan Timbangan Analitik Digital, Piknometer, dan Oven uap	80
Gambar 3.6 <i>TAN Content Meter</i>	81
Gambar 3.7 Rangkaian pengujian tegangan tembus	83
Gambar 3.8 Rangkaian tegangan tinggi pengukuran <i>Partial Discharge</i>	84
Gambar 3.9 Peralatan tegangan tinggi dan kotak uji <i>Partial Discharge</i>	85
Gambar 3.10 Diagram alir penelitian	93
Gambar 4.1 Grafik pengujian viskositas diukur pada temperatur 30°C dan 40°C minyak dedak padi (RBO) dimodifikasi dengan nanofluid yang berbeda	95
Gambar 4.2 Grafik pengujian massa jenis minyak	97
Gambar 4.3 Grafik kandungan air pada Minyak	99
Gambar 4.4 Grafik Kadar Asam Minyak	101
Gambar 4.5 Grafik Tegangan Tembus Minyak pada variasi suhu 30°C - 60°C	103
Gambar 4.6 Aktivitas <i>Partial Discharge</i> minyak dedak padi murni (RBO) pada 15 kV	107
Gambar 4.7 Aktivitas <i>Partial Discharge</i> minyak dedak padi dimodifikasi 0.05% mg nanofluid Al ₂ O ₃ pada 15 kV	107
Gambar 4.8 Histogram Weibull Tegangan Tembus Minyak pada temperatur ruang 30°C dengan enam data pengujian	112
Gambar 4.9 Histogram Normal Tegangan Tembus Minyak pada temperatur ruang 30°C dengan enam data pengujian	112
Gambar 4.10 Probabilitas Plot Weibull (50% <i>Cumulative Probabilities</i>) data Tegangan Tembus Minyak pada suhu ruang 30°C	113
Gambar 4.11 Probabilitas Plot Normal (50% <i>Cumulative Probabilities</i>) data Tegangan Tembus Minyak pada suhu ruang 30°C	113
Gambar 4.12 Probabilitas Plot Weibull korelasi reliabilitas Tegangan Tembus Minyak pada suhu ruang 30°C	115

Gambar 4.13 Histogram Weibull <i>Partial Discharge</i> Minyak pada suhu ruang 30°C dengan enam data pengujian	116
Gambar 4.14 Histogram Normal <i>Partial Discharge</i> Minyak pada suhu ruang 30°C dengan enam data pengujian	116
Gambar 4.15 Probabilitas Plot Weibull (50% <i>Cumulative Probabilities</i>) data <i>Partial Discharge</i> Minyak pada suhu ruang 30°C	117
Gambar 4.16 Probabilitas Plot Normal (50% <i>Cumulative Probabilities</i>) data <i>Partial Discharge</i> pada suhu ruang	117
Gambar 4.17 Probabilitas Plot Weibull korelasi reliabilitas <i>Partial Discharge</i> Minyak pada suhu ruang 30°C	119

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	halaman
Lampiran 1 Alat dan Bahan Persiapan Minyak Dedak Padi dan Nanofluida	138
Lampiran 2 Alat Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Minyak Dedak Padi dan Nanofluida	141
Lampiran 3 Alat Pengujian Sifat Elektrik Minyak Dedak Padi dan Nanofluida	144
Lampiran 4 Hasil Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Minyak Dedak Padi dan Nanofluida	148
Lampiran 5 Hasil Pengujian Sifat Elektrik Minyak Dedak Padi dan Nanofluida	149

BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Peralatan utama penyaluran listrik salah satunya yaitu transformator sebagai penunjang ketersediaan pasokan listrik konsumen dengan menaikkan atau menurunkan tegangan pada jaringan distribusi dan transmisi, kerusakan transformator tentu akan menyebabkan terputusnya aliran listrik. Kerusakan transformator untuk peralatan rumah tangga memang tidak terlalu merugikan, namun untuk kebutuhan industri pasti sangat merugikan. Biaya perbaikan kerusakan transformator bisa sangat mahal. Pada artikel internasional tentang kerusakan transformator, penyebab terbanyak adalah kegagalan isolasi yang termasuk pemasangan yang kurang baik, isolasi yang buruk, dan *short circuit*. Pemeliharaan tidak saja merupakan pekerjaan fisik yang langsung terhadap peralatan yang bersangkutan, melainkan diperlukan suatu perencanaan yang baik dan pengawasan terhadap pelaksanaannya (Bartley, 2013).

Dalam produksinya, jika kerusakan suatu material tertentu dapat ditemukan, maka *life time* dari transformator dapat ditingkatkan. Terdapat dua jenis isolasi pada transformator yaitu isolasi padat berupa mika dan kertas sedangkan isolasi cair berupa minyak. Isolasi cair memiliki kelebihan pengahantar panas yang baik sebagai media pendingin dibandingkan bahan isolasi padat juga kelebihan lainnya memeperbaiki sifatnya setelah

terjadinya pelepasan muatan karena kerapatan dielektrik cair lebih tinggi daripada dielektrik gas. Isolasi bertujuan untuk melindungi dan memisahkan bagian konduktif seperti belitan, inti, dan tangki transformator dari terjadinya pelepasan muatan bila medan dalam isolasi melebihi nilai kritis tertentu akibat tekanan beda potensial maka disertai munculnya peristiwa peluahan sebagian (*partial discharge*) tidak sampai menghubungkan kedua konduktor secara sempurna tetapi awalan yang nantinya menimbulkan *streamer breakdown*, pemohonan listrik (*electrical treeing*), *corona*, hingga lompatan listrik (*flashover*) (Kind, 1993; Arismunandar, 1983).

Faktor utama yang mempengaruhi kualitas isolasi yaitu adanya ketidakmurnian (*impurities*) dan degradasi kekuatan dielektrik terhadap meningkatnya temperatur karena transformator mengikuti perubahan beban tiap waktunya. Umumnya, minyak mineral adalah campuran hidrokarbon cair yang diperoleh dari minyak mentah dengan metode distilasi dan pemurnian tertentu. Struktur minyak mineral cukup kompleks yang mengandung berbagai macam ketidakmurnian molekuler dari senyawa sulfur, oksigen, dan nitrogen. Karena belitan dan inti direndam dalam minyak mineral yang diperoleh dari minyak bumi, ada kekhawatiran serius terkait risiko kebakaran, ketersediaan terbatas, membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkannya, dan masalah lingkungan. Oleh karena itu, pengembangan konduktivitas termal tinggi minyak transformator untuk aplikasi kritis diperlukan. Hal ini menjadi topik masalah pengembangan teknologi material pada minyak isolasi, popularitas minyak nabati telah

diketahui berpotensi dapat menggantikan minyak mineral karena memiliki sifat biodegradable, tidak beracun, ketahanan panas yang tinggi, ketersediaan yang melimpah, dan mudah di temukan dari tumbuhan atau biji-bijian alami yang dapat diperbaharui (Kumar et al., 2016; Mehta et al., 2016). Salah satunya minyak nabati yang dipilih adalah minyak dedak padi dari hasil ekstraksi hasil ekstrasi dedak padi karena Indonesia merupakan berada pada urutan ketiga terbesar didunia menghasilkan 36,7 juta ton gabah pertahun (Shahbandeh, 2020). Namun, minyak nabati dapat terdegradasi seiring lamanya penggunaan sebagai minyak transformator (Maneerot et al., 2018). Para peneliti berupaya meningkatkan karakteristik listrik dan dielektrik pada minyak nabati, salah satu inisiatifnya adalah dengan menerapkan nanoteknologi meningkatkan karakteristik termal minyak isolasi serta meningkatkan kinerja kelistrikannya. Istilah nanoteknologi dikonseptualisasikan dalam pidato Feynman pada tahun 1959 telah diterapkan dalam beberapa aplikasi terutama dalam fisika, kimia, biologi, elektronik, dll (Dean, 2005). Awalnya, ide terkait dengan manipulasi materi pada tingkat skala nano. Dalam penelitian ini, tinjauan umum tentang konsep fluida (mineral dan minyak nabati) dengan alternatif nanoteknologi yang dikenal sebagai nanofluida dibahas untuk minyak transformator generasi berikutnya. Nanofluida didefinisikan sebagai fluida atau cairan yang dibuat dengan cara mendispersikan bahan partikel solid berukuran nanometer ke dalam fluida dasar, istilah yang telah dikemukakan oleh (Choi and Eastman, 1995). Ini dapat dianggap sebagai fluida perpindahan panas

generasi berikutnya karena menawarkan sifat yang sangat baik dengan potensi yang sangat besar. Tidak hanya memiliki kemampuan untuk meningkatkan perpindahan panas dari fluida tersebut yang menunjukkan konduktivitas termal yang lebih tinggi tetapi juga mampu bertahan dalam fluida dasar (minyak) untuk waktu yang lebih lama dibandingkan dengan partikel berukuran mikro atau milimeter (Suhaimi et al, 2020). Penelitian yang dilakukan Aulia et al, (2018) variasi penambahan partikel nano seperti nanoalumina (Al_2O_3) pada minyak nanonynas menunjukkan bahwa hasil tegangan tembus meningkat sebesar 6% dan nilai tegangan insepasi dan peluahan sebagian lebih tinggi dibandingkan dengan minyak murni. Begitupula Zakaria et al (2017) Hasilnya menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel silica mampu meningkatkan tegangan tembus pada minyak mineral. Penulis lain juga telah menganalisis pengaruh tiga nanopartikel berbeda (Fe_3O_4 , ZnO, dan SiO_2) menyimpulkan bahwa tegangan tembus nanofluida menggunakan minyak nabati (minyak biji bunga matahari dan minyak rapseed) lebih tinggi bila dibandingkan dengan minyak mineral. Dengan mempertimbangkan peningkatan titik didih (fire point), minyak nabati dengan nanopartikel memperoleh kinerja yang sangat baik dibandingkan dengan nanofluida berbasis minyak mineral (Sujatha, 2017). Hingga saat ini, masih kurangnya studi terperinci tentang pengaruh minyak nabati menggunakan nanofluida berbeda tipe mengenai sifat listrik, kimia, dan fisik. Berdasarkan uraian diatas penulis berkeinginan untuk merancang dan melakukan suatu penelitian dengan mengusulkan minyak dedak padi

sebagai fluida dasar terhadap nano partikel berbeda karakteristik, mencoba menggambarkan secara diskriptif sifat fisik termasuk viskositas dan densitas, sifat kimi termasuk kadar air dan kadar asam, juga sifat listrik termasuk peluahan sebagian dan tegangan tembus terintegrasi keandalan analisis distribusi Weibull. Tiga tipe nanopartikel berbeda yang digunakan yaitu nanoalumina (Al_2O_3) tipe nonkonduktif, nanotitania (TiO_2) tipe semikonduktif, dan nanomagnetite (Fe_3O_4) tipe konduktif. Isolasi cair yaitu minyak dedak padi sebagai dasar pencampur, Peneliti juga akan memenuhi syarat yang harus dipeuhi mengikuti standar SPLN, IEC, dan ASTM kemudian nantinya akan di bandingkan dengan minyak dedak padi murni dan minyak mineral.

B. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang masalah yang dikemukakan, maka timbul beberapa permasalahan dapat dirumuskan antara lain:

- 1) Bagaimana kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida serta dibandingkan minyak mineral berdasarkan sifat fisik sehingga dapat memenuhi standar ASTM?
- 2) Bagaimana kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan sifat kimia sehingga dapat memenuhi standar ASTM?
- 3) Bagaimana kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan sifat elektrik untuk meningkatkan kekuatan dielektrik

terhadap tegangan tembus dan resistensi *partial discharge* dari bentuk pola sehingga dapat memenuhi standar IEC?

- 4) Bagaimana kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan analisis statistik probabilitas kegagalan dan keandalan terhadap sifat elektrik menggunakan distribusi Weibull?

C. TUJUAN PENELITIAN

Penulis memiliki beberapa tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian:

- 1) Mengetahui pengaruh kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan sifat fisik sehingga dapat memenuhi standar ASTM D6781.
- 2) Mengetahui pengaruh kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan sifat kimia sehingga dapat memenuhi standar ASTM D6871.
- 3) Mengetahui pengaruh kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan sifat elektrik untuk meningkatkan kekuatan dielektrik terhadap tegangan tembus dan resistensi *partial discharge* dari bentuk pola sehingga dapat memenuhi standar SPLN 49-1 dan IEC TR 61294.
- 4) Mengetahui kinerja pada RBO murni dan penambahan nanofluida berdasarkan analisis statistik probabilitas kegagalan dan keandalan terhadap sifat elektrik menggunakan distribusi Weibull sehingga memenuhi standar IEC 62539.

D. RUANG LINGKUP

Penelitian ini berfokus pada analisis kemampuan nanofluida berdasarkan karakteristik untuk menghasilkan kinerja minyak nabati (minyak dedak padi) yang berdasarkan pada uji kimia, fisik, dan elektrik yang dipadukan menggunakan analisis statistik distribusi Weibull untuk mengetahui keandalan pada tegangan tembus dan *partial discharge*.

E. MANFAAT PENELITIAN

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah:

- 1) Dapat meningkatkan performa isoasi cair pada transformator dengan menggunakan nanofluid dan minyak nabati ramah lingkungan.
- 2) Mendapatkan informasi bagi perencanaan dan pengembangan isolasi cair transformator tentang karakteristik fisik, kimia, dan elektrik berkaitan fenomena partial discharge dan tegangan tembus dalam rangka untuk memenuhi listrik konsumen.
- 3) Memudahkan menganalisa keandalan isolasi cair dengan analisa distribusi Weibull.
- 4) Penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu bahan studi banding bagi penelitian-penelitian berikutnya dalam bidang isolasi cair.

F. SISTEMATIKA PENULISAN

Adapun sistematika dalam penelitian ini antara lain:

BAB I : PENDAHULUAN

Berisi penjelasan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah serta sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Berisi penjelasan tentang landasan teori yang digunakan dalam penelitian dan kerangka pemikiran. Diuraikan pula tentang penelitian terkait yang berisi penjelasan tentang hasil-hasil penelitian yang menjadi acuan dengan penelitian yang akan dilakukan. Landasan teori seperti buku, artikel, berita, jurnal, prosiding, dan tulisan asli lainnya untuk mengetahui perkembangan penelitian yang relevan dengan judul atau tema penelitian yang dilakukan dan juga sebagai arahan dalam memecahkan masalah yang diteliti. Kerangka pikir juga diuraikan dalam bab ini yang berisi penjelasan untuk memecahkan masalah yang sedang diteliti, termasuk menguraikann objek penelitian.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang waktu dan tempat pelaksanaan, penjelasan tentang metode penelitian, tahapan penelitian yang akan dilakukan dari awal hingga akhir, bahan/alat yang digunakan,

prosedur penelitian, metode pengumpulan data, metode analisis data, serta diagram alir pengujian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil dari penelitian yang telah dilakukan berdasarkan prosedur yang tertera di Bab III.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi pernyataan secara general atau spesifik ringkasan rangkuman keseluruhan dari inti yang telah dilakukan, serta mengacu pada hasil yang diperoleh. Saran merupakan pernyataan atau rekomendasi peneliti yang berisi hal-hal penting yang perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. LANDASAN TEORI

1. Minyak Transformator

Isolasi adalah sifat bahan yang berfungsi dapat memisahkan secara elektrik dua atau lebih penghantar listrik bertegangan yang berdekatan, sehingga tidak terjadi kebocoran arus, tidak terjadi lompatan api atau lewat denyar (*Flashover*), ataupun percikan api (*sparkover*) dan sebagai pelindung mekanik dari kerusakan diakibatkan oleh korosif atau tekanan, baik tekanan elektrik ataupun tekanan mekanik. Sedangkan isolator adalah alat yang digunakan untuk mengisolasi. Penggunaan transformator dimanapun adalah sama, khususnya untuk tranformator daya, yaitu sebagai penaik atau penurun tegangan menyesuaikan tegangan dari mesin itu sendiri. Pada industri / laboratorium banyak diperlukan transformator, karena untuk pemakaian daya yang besar (misalnya untuk industri/ laboratorium) itu biasanya tegangan yang masuk adalah diatas 380 V (biasanya 20 kV), jadi diperlukan transformator step down/penurun tegangan menyesuaikan tegangan mesin, misalnya tegangan untuk motor-motor listrik itu biasanya 380 V 3 phase, dsb. Jadi diperlukan transformator 20 kV/ 380 Volt. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua terhubung dengan belitan

sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan gaya gerak listrik (ggl) dalam belitan sekunder. Jika efisiensi sempurna, semua daya pada belitan primer akan dialirkan ke lilitan sekunder. Didalam transformator ada dua bagian yang secara aktif membangkitkan panas yaitu tembaga (kumparan) dan besi (inti). Panas-panas ini bila tidak disalurkan atau diadakan pendinginan akan menyebabkan tembaga atau besi itu mencapai suhu yang terlalu tinggi, sehingga bahan-bahan isolasi yang ada pada tembaga (kertas minyak) akan rusak, untuk itu diperlukan isolasi cair dimasukkan ke dalam dan mengisi celah kosong di antara lapisan berbahan selulosa lainnya yang dinamakan minyak isolasi (transformator). Ada beberapa alasan mengapa isolasi cair digunakan, antara lain yang pertama adalah isolasi cair memiliki kerapatan 1000 kali atau lebih dibandingkan dengan isolasi gas, sehingga memiliki kekuatan dielektrik yang lebih tinggi menurut hukum Paschen. Kedua isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energy melalui proses konveksi. Ketiga isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (*self healing*) setelah terjadi pelepasan muatan (*discharge*), namun kekurangan utama isolasi cair adalah mudah terkontaminasi. Transformator sering dioperasikan untuk jangka waktu yang pendek diatas tegangan ratingnya untuk menahan sistem yang sedang mengalami transien karena peristiwa *switching* atau geombang petir. Untuk itu komponen dari transformator, baik isolasi padat maupun minyak harus dapat beroperasi pada tekanan tegangan setinggi

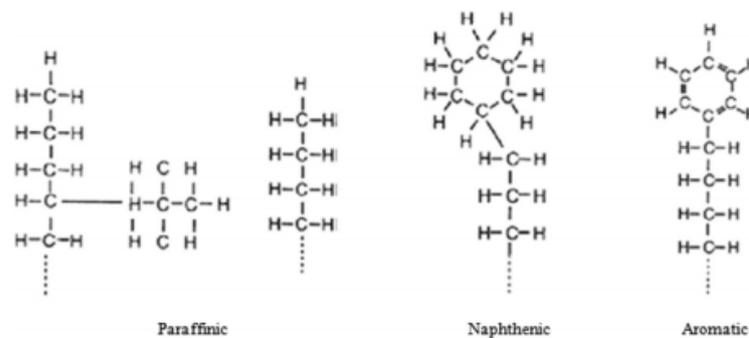
mungkin maupun kenaikan temperatur pada inti dan belitan yang dihasilkan dari panas rugi-rugi energi sehingga tidak mengganggu suplai energi ke konsumen. Belitan yang terbakar sering berhubungan dengan kerusakan email. Short circuit antar belitan mengakibatkan arus yang sangat besar melaluinya dan menyebabkan panas berlebih. 80% kerusakan mesin listrik disebabkan dari kerusakan isolasinya (Cash dan Habetler, 1998; Manjang S., 2019).

Minyak isolasi terdiri dari beberapa jenis yang dibedakan berdasarkan dari cara pembuatan dan bahan pembuatan yaitu:

a) Minyak Isolasi Mineral

Minyak bumi atau minyak mineral telah digunakan pada tahun 1891 oleh Sebastian de Ferranti pada isolasi minyak transformator. Minyak bumi merupakan campuran dari beberapa hidrokarbon yang terdapat dalam fase cair dalam reservoir di bawah permukaan tanah dan yang tetap cair pada tekanan atmosfer melalui fasilitas distilasi. Minyak bumi terdiri dari senyawa hidrokarbon dan sedikit sulfur. Berdasarkan susunan rantai hidrokarbon, maka senyawa inti dalam minyak bumi dibedakan menjadi beberapa kelompok utama, yaitu: (1). Linear (Senyawa *Parafinis*), rumus umum pada senyawa *Parafinis* adalah C_nH_{2n+2} , misalnya metana CH_4 dalam bentuk gas dan normal butana C_4H_{10} . Minyak bumi linear digolongkan sebagai fraksi hidrokarbon jenuh yang mempunyai titik didih relatif rendah. (2). Sikloalifatik (Senyawa *Naftenis*), rumus umum pada senyawa *Naftenis* adalah C_nH_{2n} . Minyak bumi *Sikloalifatik* mempunyai struktur ikatan berbentuk lingkaran

dengan enam atom karbon atau 14 atom karbon dengan tiga kelompok lingkaran. (3). Aromatik, minyak bumi aromatik merupakan senyawa yang mempunyai struktur enam atom karbon, terbagi menjadi dua golongan yakni monoaromatik (satu ikatan lingkaran) dan poliaromatik (dua atau lebih ikatan lingkaran). Minyak bumi Aromatik digolongkan dengan fraksi hidrokarbon paling berbahaya, dikarenakan mempunyai titik didih tinggi dan mudah terlarut dalam air laut. Kelompok minyak bumi berdasarkan struktur molekul hidrokarbon dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Struktur hidrokarbon pada minyak mineral (Pattanadech, 2013).

Minyak bumi memerlukan proses penyulingan yang kompleks sehingga menjadi minyak yang mempunyai kegunaan untuk aplikasi tertentu. Proses minyak bumi menggunakan unit distilasi vakum melalui beberapa proses, yaitu ekstraksi, filtrasi, re-distilasi, dan hidrogenasi. Minyak mineral hasil penyulingan dari minyak bumi diketahui baik sebagai bahan isolator untuk peralatan listrik, khususnya pada peralatan listrik transformator, karena memiliki karakteristik fisik dan elektrik yang baik. Tetapi dalam permasalahan dalam penggunaan minyak mineral pada

transformator dapat membahayakan lingkungan dan memicu ledakan pada transformator (Jauhari, 2017)

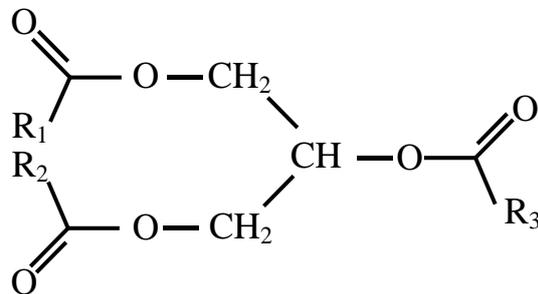
b) Minyak Isolasi Sintesis

Minyak isolasi yang diolah dengan proses kimia untuk mendapatkan karakteristik yang baik. Kelebihan utamanya adalah bersifat tidak mudah terbakar. Namun minyak isolasi jenis ini memiliki kekurangan yaitu mudah terkontaminasi dengan udara. Sifat-sifat penting dari minyak isolasi sintesis bila dibandingkan dengan minyak isolasi mineral adalah memiliki kekuatan dielektriknya di atas 40 kV. Berat jenisnya adalah 1.56 dan jika dicampur dengan air, minyak isolasi berada di bawah permukaan air sehingga mempermudah dalam proses pemurnian dan pemisahan kadar air dalam minyak. Pada kondisi pemakaian yang sama dengan minyak mineral, uap lembab akan menyebabkan oksidasi yang berlebih serta penurunan kekuatan dielektrik lebih cepat pada minyak sintesis bila dibandingkan dengan minyak mineral. Contoh minyak sintesis di antaranya adalah askarel, silicon cair, *poly alpha olefins*, *poly glycols* dan ester sintesis.

c) Minyak Isolasi Nabati

Kelompok minyak yang berasal dari sari tumbuhan misalnya jenis minyak sayur. Jenis minyak ini mulai banyak dipakai sebagai bahan isolasi pada akhir abad ke-19, terlebih dengan semakin menipisnya cadangan mineral tak terbarukan dan masih kecilnya pemakaian minyak sintesis sehingga minyak nabati mendapatkan perhatian lebih. Contoh minyak isolasi nabati yaitu minyak jarak, minyak kelapa murni, minyak kelapa sawit,

minyak kedelai dan minyak jagung, dan minyak dedak padi. Minyak nabati tersusun atas trigliserida dengan struktur sebagai berikut:



Gambar 2.2 Struktur Trigliserida (Riskayanti, 2016)

Trigliserida banyak terkandung didalam minyak dan lemak. Lemak dan minyak atau secara kimia adalah trigliserida merupakan bagian terbesar kelompok lipida. Secara umum, lemak diartikan sebagai trigliserida yang dalam kondisi suhu ruang berada dalam keadaan padat. Sedangkan minyak adalah trigliserida yang dalam suhu ruang berbentuk cair. Sifat minyak dan lemak tidak larut dalam air, hal ini disebabkan oleh adanya asam lemak berantai karbon panjang dan tidak adanya gugus- gugus polar. Viskositas minyak dan lemak biasanya bertambah dengan bertambahnya panjang rantai karbon, berkurang dengan naiknya suhu, dan tidak jenuhnya rangkaian karbon. Minyak dan lemak lebih berat dalam keadaan padat dari pada dalam keadaan cair. Berat jenisnya lebih tinggi untuk trigliserida dengan berat molekul rendah dan tidak jenuh. Berat jenis menurun dengan bertambah suhunya. Titik cair minyak dan lemak ditentukan beberapa faktor. Makin pendek rantai asam lemak, makin rendah titik cairnya. Cara- cara penyebaran asam-asam lemak juga mempengaruhi titik cairnya

(Rofiatun, 2016). Minyak nabati seperti halnya lemak dari hewani telah lama dikenal dan telah dimanfaatkan secara luas bukan hanya sebagai minyak yang dapat dikonsumsi (*edible oil*) akan tetapi juga sebagai bahan baku *oleochemical* seperti pembuatan sabun, deterjen, dan sebagainya selain itu merupakan bahan utama pembuatan margarin. Asam lemak yang terdapat dalam minyak nabati terdiri dari gliserida-gliserida asam lemak, akibat proses pemanasan dan terjadinya proses hidrolisis maka asam lemak akan terpisah menjadi *trigliserida*, *digliserida*, dan *monogliserida*. Minyak dikatakan trigliserida karena lemak membentuk ester dari tiga molekul asam lemak yang terikat pada molekul gliserol atau triester dari asam lemak dan gliserol.

Banyak asam karboksilat rantai lurus mula-mula dipisahkan dari lemak sehingga dijuluki asam lemak. Asam *propionat*, yaitu asam dengan tiga karbon, secara harafiah berarti "asam lemak pertama" (Yunani: *protos* = pertama; *pion* = lemak). Asam berkarbon empat atau asam butirat diperoleh dari lemak mentega. (latin: *butyrum* = mentega). Tata nama sistematis (IUPAC) yang paling sering dipakai adalah berdasarkan penamaan asam karboksilat menurut hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang sama dan diberi akhiran –oat, misalnya asam oktadekanoat $C_{18}H_{36}O_2$ (asam stearat). Sedangkan asam lemak tak jenuh yang mempunyai di antaikatan rangkap berakhiran dengan –enoat, misalnya asam oktadekanoat $C_{18}H_{34}O_2$ (asam oelat). Asam lemak adalah asam monokarboksilat yang berantai lurus dengan rantai atom mulai dari atom

C4 yang terdapat dalam lemak (C1-C3 biasanya tidak terdapat dalam lemak) dan ditemukan sebagai hasil hidrolisis dari lemak. Suatu lemak tertentu biasanya mengandung campuran dari trigliserida yang berbeda panjang dan ketidakjenuhan asam-asam lemaknya. Asam lemak yang mempunyai 4 sampai 6 atom karbon dan disebut asam lemak rantai pendek, sedangkan yang mengandung atom karbon dengan jumlah 8 sampai 12 disebut asam lemak rantai sedang. Rantai hidrokarbon yang mengandung atom karbon dari 14 sampai 26 digolongkan ke dalam asam lemak rantai panjang.

Minyak nabati pada umumnya merupakan sumber asam lemak, asam lemak terdiri dari asam lemak jenuh (*saturated fat acid*) dan asam lemak tak jenuh (*unsaturated fat acid*). Asam lemak jenuh memiliki ikatan tunggal di antara atom-atom karbon penyusunnya, Lemak hewani atau nabati yang mengandung banyak asam lemak rantai panjang dapat menyebabkan meningkatnya kadar kolesterol dalam darah akibat penimbunan asam lemak jenuh, namun asam lemak jenuh tersebut seperti *kaprilat*, *miristat*, *palmitate*, dan *stearat* dapat digunakan sebagai bahan baku pada industri oleochemical. Misalnya *stearat* dan *palmitat* digunakan sebagai bahan pembuatan deterjen maupun sebagai bahan kosmetika. Sedangkan asam lemak tak jenuh memiliki paling sedikit satu ikatan ganda di antara atom-atom karbon penyusunnya. Pada asam lemak tak jenuh terjadi isomerisasi geometri, yang tergantung pada orientasi atom dan gugus sekeliling sumbu ikatan rangkap. Jika rantai asal berapa pada sisi

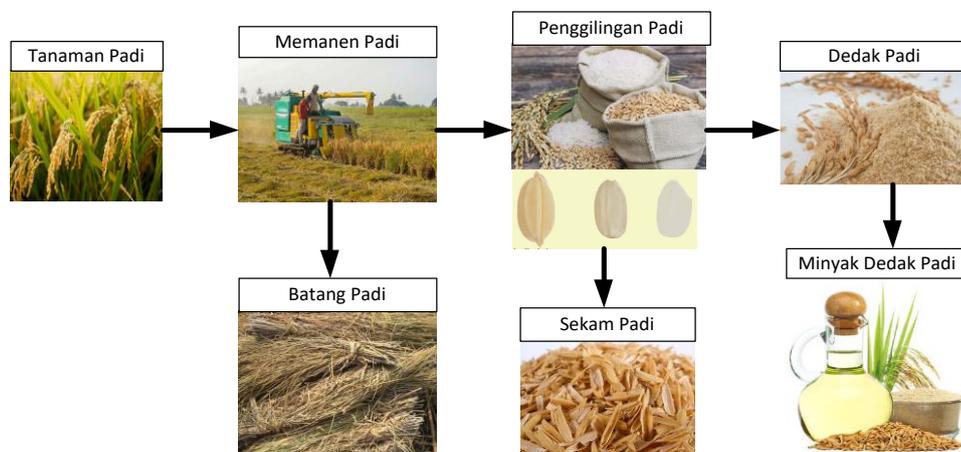
yang sama maka ikatan disebut tipe cis seperti asam *oleat*, jika berlawanan tipenya adalah trans seperti asam *elaidat*. Peningkatan jumlah ikatan rangkap cis dalam asam lemak menghasilkan sejumlah konfigurasi molekul yang mungkin, misalnya asam oleat dengan 1 ikatan rangkap cis. Asam lemak tak jenuh dibedakan dua bagian yaitu asam lemak tak jenuh tunggal (*mono unsaturated fatty acid*, MUFA) yang memiliki satu ikatan rangkap di antaranya yang penting adalah asam oleat (C18:1) yang letak ikatan rangkapnya dari gugus metil digolongkan dalam asam lemak omega 9 atau n-9 yang berdasarkan penelitian n-9 memiliki anti oksidan yang mampu menurunkan (*low-density lipoprotein*, LDL) kolesterol darah, juga *oryzanol* dengan n-3 dan n-6 meningkatkan (*high-density lipoprotein*, HDL) kolesterol yang lebih besar, lebih stabil dari dibandingkan PUFA. Sementara itu asam lemak tidak jenuh jamak (*poly unsaturated fatty acid*, PUFA) memiliki dua sampai enam ikatan rangkap misalnya adalah asam α -linolenat (C18:3), EPA (eicosapentaenoic acid, C20:5) dan DHA (docosahexaenoic acid, C22:6) (Jumari et al, 2015; Saragih, 2008).

2. Tanaman Padi dan Minyak Dedak Padi

Tanaman padi merupakan tanaman musiman, termasuk golongan rumput-rumputan dengan klasifikasi botani tanaman padi diklasifikasikan divisi (*Spermatophyta*), sub divisi (*Angiospermae*), kelas (*Monotyledonae*), keluarga *Gramineae* (*Poaceae*), genus (*Oryza*), dan spesies (*Oryza spp*). Terdapat 25 spesies *Oryza*, yang dikenal adalah *O. sativa* dengan dua subspecies yaitu *Indica* (padi bulu) yang ditanam di Indonesia dan *Sinica*

(padi cere). Padi dibedakan dalam dua tipe yaitu padi kering (gogo) yang ditanam di dataran tinggi dan padi sawah di dataran rendah yang memerlukan penggenangan tanaman padi dapat hidup dengan baik di daerah yang berhawa panas dan banyak mengandung uap air. Dengan kata lain, padi dapat hidup baik pada daerah beriklim panas yang lembab (Saragih, 2008). Menurut definisinya, dedak (*bran*) adalah hasil samping proses penggilingan padi, terdiri atas lapisan sebelah luar butiran padi dengan sejumlah lembaga biji. Sementara bekatul (*polish*) adalah lapisan sebelah dalam dari butiran padi, termasuk sebagian kecil endosperm berpati. Penggilingan padi menjadi beras menghasilkan produk samping antara lain menir, beras pecah, sekam, dan dedak. Menir dan beras pecah dapat digiling menjadi tepung sebagai bahan berbagai kue dan makanan lainnya. Sekam dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar serta kompos. Sementara itu dedak padi saat ini baru dimanfaatkan untuk pakan ternak dan belum banyak digunakan sebagai sumber pangan manusia. Penggilingan padi dapat menghasilkan beras giling sebanyak 47-60% dan limbah hasil gilingan sebanyak 35%, yang terdiri dari sekam 18-20%, dedak dan bekatul sebanyak 8-10%, untuk yang lainnya berupa kotoran seperti yang ditunjukkan **Gambar 2.3** Dalam proses penggilingan padi di Indonesia, dedak dihasilkan pada penyosohan pertama, sedangkan bekatul pada proses penyosohan kedua. Perbedaan dedak padi dan bekatul baik secara visual yaitu dilihat teksturnya bekatul lebih halus. Pada dedak padi masih terdapat rambut atau kulit padinya, sedangkan pada bekatul tidak

ada. Apabila direndam dengan air, hampir keseluruhan bekatul akan tenggelam didalam air, sedangkan pada dedak padi ada bagian-bagian kulit yang terapung. Harga untuk dedak dan bekatul pun juga berbeda, biasanya mempunyai selisih 500-1000 rupiah. Kandungan serat kasar dedak padi lebih tinggi daripada bekatul (Romadhoni, 2018). Dedak padi dapat dibuat sebagai bahan baku produk sereal. Dedak padi dapat dijadikan sumber minyak yang dapat diperoleh dari proses ekstraksi dedak ini tergolong berkualitas tinggi selain itu minyak dedak padi juga bermanfaat dalam pembuatan margarin.



Gambar 2.3 Proses pengolahan minyak dedak padi

Produksi dedak padi di Indonesia cukup besar dan hanya terbatas pada pakan ternak karena ketengikan yang disebabkan hidrolisis, yang dikatalisis oleh enzim lipase, terhadap minyak yang terkandung di dalam dedak padi. Minyak mentah dedak padi sulit dimurnikan karena tingginya kandungan asam lemak bebas dan senyawa-senyawa tak tersaponifikasikan. Peningkatan asam lemak bebas secara cepat terjadi

karena adanya enzim lipase aktif dalam dedak padi setelah proses penggilingan. Lipase dalam dedak padi mengakibatkan kandungan asam lemak bebas minyak mentah dedak padi lebih tinggi dari minyak mentah lain sehingga tidak dapat digunakan sebagai *edible oil*. Padahal dedak padi mengandung 6%-22% minyak tergantung varietas dan metode pemeraman (Riskayanti, 2016). Minyak yang diekstrak dari dedak dapat memiliki keasaman rendah atau tinggi. Keasaman tersebut tergantung pada kondisi dan durasi penyimpanan. Semakin lama waktu penyimpanan kandungan asam lemak bebas (FFA) semakin tinggi. Ada dua faktor utama dalam pengolahan dedak padi menjadi minyak yaitu stabilisasi secara kimia maupun dengan menggunakan panas. Perlakuan ini bertujuan untuk menghancurkan enzim lipase yang ada dalam dedak padi, sehingga rendemen minyak meningkat dan menurunkan kadar asam lemak bebas. Selanjutnya RBO hasil ekstraksi dipurifikasi atau dimurnikan. Pemurnian RBO tidak jauh berbeda dengan pemurnian minyak nabati lainnya dengan tujuan mengilangkan senyawa lilin, asam lemak bebas, pewarna dan bau. Terdapat dua metode ekstraksi minyak dedak padi atau *rice bran oil* (RBO). Metode pertama dengan menggunakan solvent/pelarut n-hexane rasio 1:2 suhu 20°C atau 1:3 ^{w/w} setelah pemanasan awal dan kemudian perendaman dalam penguapan vakum suhu konstan pelarut. Nantinya diperoleh RBO kasar, untuk mendapatkan RBO yang dimurnikan terdapat dua metode. Metode pertama yaitu dilakukan degumming atau pemisahan getah lendir fosfatida, netralisasi atau pemisahan asam lemak bebas dari

minyak, *bleaching* atau memperbaiki warna minyak untuk memisahkan (*pigmen* dan *fosfolipid*), *dewaxing* atau penghilangan *wax/lilin (n-parafin)*, deodorisasi atau memisahkan (*aldehida, keton, flavor* dan komponen yang menyebabkan bau pada minyak). Metode kedua yaitu dilakukan pengepresan ulir mekanis dalam temperatur panas ringan <50°C, filtrasi atau pemisahan partikel padat pada minyak dengan penyaringan kertas saring dua kali, kemudian sterilisasi menggunakan ultraviolet sterilisator. (Maurya dan Kushwaha, 2018).

Lemak dalam makanan berfungsi sebagai sumber energi dan secara biologis mempunyai arti sebagai penyimpan zat-zat cadangan. Jika makan melebihi kebutuhan, maka kelebihanannya akan diubah menjadi lemak. Lemak berbeda dengan karbohidrat dan protein karena tidak terdiri dari polimer satuan-satuan molekuler. Setiap gram lemak mengandung 2,25 kali dari jumlah kalori yang dihasilkan oleh protein atau karbohidrat. Lemak yang ditambahkan ke dalam bahan pangan membutuhkan persyaratan dan sifat-sifat tertentu. Berbagai bahan pangan seperti daging, ikan, telur, susu, alpokat, dan berbagai sayuran mengandung lemak atau minyak yang biasanya sebagai lemak tersembunyi. Lemak dan minyak sebagai bahan pangan adalah salah satu yang paling banyak dan paling utama dalam kehidupan sehari-hari. Minyak dan lemak merupakan zat makanan yang penting untuk menjaga kesehatan tubuh manusia. Selain itu lemak dan minyak juga merupakan sumber energi yang lebih efektif dibanding dengan karbohidrat dan protein. Satu gram minyak atau lemak dapat menghasilkan

9 kkal, sedangkan karbohidrat dan protein hanya menghasilkan 4 kkal/gram. Minyak atau lemak, khususnya minyak nabati, mengandung asam-asam lemak esensial seperti oryzanol, linoleat, lenolenat, dan arakidonat yang dapat mencegah penyempitan pembuluh darah akibat penumpukan kolesterol. Namun Kelebihan lemak dapat menyebabkan obesitas yang merupakan faktor risiko dalam penyakit kardiovaskuler karena dapat menyebabkan hipertensi dan timbulnya diabetes. Anak-anak yang terlalu banyak mengkonsumsi lemak dapat menimbulkan gejala sakit perut. Hal ini mungkin disebabkan oleh makanan yang banyak mengandung minyak dengan asam lemak trans (*Trans Fatty Acid*) meningkatkan kadar kolesterol jahat, serta menurunkan kadar kolesterol baik cenderung menyebabkan cepat haus dan banyak minum, yang dapat menyebabkan terjadinya emulsi. Selain itu Kelebihan asam lemak dapat meningkatkan kadar kolesterol dalam darah. Asam lemak dapat menyebabkan darah bersifat lengket pada saluran darah sehingga darah mudah menggumpal. Disamping itu, asam lemak mampu merusak dinding saluran darah sehingga terjadi penyempitan pembuluh darah dan akan mengakibatkan arteriosclerosis. Minyak dengan asam lemak trans banyak terdapat pada lemak hewan, margarin, mentega, minyak terhidrogenasi, dan terbentuk dari proses penggorengan (Rofiatun, 2016). Berikut komposisi asam lemak dan kandungan RBO pada **Tabel 2.1**

Tabel 2.1 Komposisi asam lemak dan kandungan RBO

Parameter	Kondisi
Warna	Kuning terang
Densitas (gr/ml)	0,89
Bilangan penyabunan	179,17
Titik nyala (°C)	Min 150
Titik pengasapan (°C)	254
Aroma dan rasa	Normal
Kelembaban (%)	0.1 - 0.15
Saturated fatty acid (%)	19.4
Monounsaturated fatty acid (%)	37.2
γ Oryzanol (%)	3,77
Vitamin E dan tocopherol (mg)	7.2
Polyunsaturated fatty acid (%)	31.4
Asam lemak jenuh & tak jenuh (%)	
Asam Stearat	1,0 - 3,0
Asam Miristat	0,1 – 10
Asam pentadekanoat	0.04
Asam Palmitat	12,0 - 22,0
Asam liknoserat	0.24
Asam Arakhidat	0,0 - 1,0
Asam lemak tak jenuh (%)	
Asam Linolenat (Omega 3)	0,0 - 1,0
Asam Linoleat (Omega 6)	20,0 - 42,0
Asam Oleat (Omega 9)	40,0 - 50,0
Asam Palmitoleat	0,2 - 0,6

Sumber : (Jumari et al, 2015; Riskayanti, 2016; Saragih, 2008)

RBO dapat dikonsumsi dan mengandung beberapa jenis lemak (**Tabel 2.1**). Minyak dedak padi juga kaya akan kandungan antioksidan alami dibandingkan minyak lain pada PUFA terdiri yaitu EPA (*eicosapentaenoic acid*, C20:5) dan DHA (*docosahexaenoic acid*, C22:6), terutama *oryzanol*, oelat (C18:1), dan asam α –linolenat (C18:3) dengan *tokoferol*, *tokotrienol* atau vitamin E yang bermanfaat dalam tubuh terutama manusia sebagai asam lemak esensial melawan radikal bebas sel kanker, serta membantu menurunkan kolesterol dalam darah, penyakit jantung coroner, mengurangi penyakit kardiovaskular (CVD), kolesterol liver, suplemen *autoimmune diseases*, diabetes, radang usus besar, *anorexia*

nervosa, luka terbakar, *osteoarthritis*, *osteoporosis*, serta menghambat menopause. RBO memiliki aroma dan tampilan yang baik serta nilai titik asapnya cukup tinggi (254°C) dan titik nyala min (150°C) suhu terendah dimana uap minyak mulai menyala lebih unggul dibandingkan minyak nabati lainnya. Minyak nabati lainnya seperti minyak kelapa murni (titik nyala 170°C; titik asap 225 °C), minyak sawit (titik nyala 170°C; titik asap 235 °C), (titik nyala 170°C; titik asap 225 °C), minyak zaitun (titik asap 193°C), minyak biji bunga matahari (titik asap 227 °C), minyak kedelai dan kanola (titik asap 238°C), dan minyak jagung (titik asap 232 °C). Titik nyala yang rendah menunjukkan adanya kontaminasi zat yang mudah terbakar. Titik nyala minyak yang diperbolehkan adalah lebih dari 135°C. (Nasir et al., 2009; Saragih, 2008).

3. Sifat Fisik Minyak Transformator

a) Densitas

Densitas atau massa jenis minyak transformator adalah salah satu aspek dari karakteristik fisiknya. Densitas didefinisikan sebagai perbandingan massa zat dengan volume zat. Sederhananya, ini adalah perbandingan berat minyak dengan volume atau jumlah minyak. Densitas akan berdampak besar pada pengoperasian traformator. Oleh karena itu, penting untuk memperhatikan densitas minyak transformator saat pengisian awal atau pengisian ulang minyak transformator. Spesifikasi minyak transformator bervariasi berdasarkan pabrikan dan distrik atau daerah di mana minyak tersebut pada dasarnya akan digunakan. Secara

global industri transformator memiliki variasi standar nilai densitas minyak transformator yaitu tidak melebihi 900 kg/m^3 pada temperature yang telah ditentukan $+20^\circ\text{C}$ / $+68^\circ\text{F}$ atau dengan rasio $0.84 \sim 0.89 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Umumnya minyak mineral yang harus dipenuhi berdasarkan ASTM D3487 relatif densitasnya yaitu $\leq 0.91 \text{ gr/cm}^3$ namun pada minyak nabati berdasarkan ASTM D6871 relatif densitasnya yaitu $\leq 0.96 \text{ gr/cm}^3$. Densitas minyak transformator dapat berkurang dengan peningkatan temperatur. Densitas minyak transformator dianggap sebagai tolak ukur untuk menghitung banyak karakteristik lainnya yang mencakup viskositas kinematik, koefisien gesekan internal spesifik, dan rasio viskositas dinamis pada suhu dan densitas minyak transformator (Anonim, 2018; Voukelatos, 2017).

b) Viskositas

Viskositas adalah besaran yang menggambarkan kekuatan aliran zat cair, Viskositas kinematik didefinisikan sebagai nilai tahanan cairan untuk mengalirkan minyak secara kontinu dan menyeluruh tanpa timbulnya gaya gesekan ataupun gaya yang lain dengan satuan cSt (*centistoke*). Nilai viskositas pada minyak baru minimal yaitu $\leq 50 \text{ cSt}$ pada suhu 40°C ASTM D6871-03. Minyak transformator mempunyai unsur kekentalan dimana jika minyak tidak mampu bersirkulasi dengan baik maka akan berdampak tidak baik bagi transformator. Sirkulasi ini berfungsi sebagai pendingin membawa area yang panas untuk disirkulasikan sehingga dapat menjaga suhu yang ada di dalam transformator itu sendiri. Semakin rendah nilai viskositas dari

minyak, semakin baik konduktivitas termalnya, sehingga mempermudah sirkulasi dari minyak isolasi transformator (Anggraini et al., 2015).

4. Sifat Kimia Minyak Transformator

a) Kadar Air

Fungsi minyak transformator sebagai media isolasi di dalam transformator dapat menurun seiring banyaknya air yang mengotori minyak. Oleh karena itu dilakukan pengujian kadar air untuk mengetahui seberapa besar kadar air yang terlarut atau terkandung di minyak. Kandungan air dan oksigen yang tinggi, menghasilkan asam, endapan dan juga adanya air akan mempercepat kerusakan kertas pengisolasi (*insulating paper*). Kandungan air dalam transformator dapat berasal dari udara saat transformator dibuka untuk keperluan inspeksi, dan apabila terjadi kebocoran maka uap air akan masuk ke dalam transformator karena perbedaan tekanan parsial uap air. ASTM D6871-03 yaitu ≤ 200 ppm pada suhu 40°C , sedangkan SPLN 49-1 yaitu ≤ 30 mg/kg (Anggraini et al., 2015).

b) Kadar Asam

Pada saat minyak isolasi mengalami oksidasi, maka minyak akan menghasilkan asam. Asam ini apabila bercampur dengan air dan suhu yang tinggi akan mengakibatkan proses hydrolysis pada minyak isolasi menunjukkan indikasi korosi pada bahan logam maupun kertas minyak. Proses hydrolysis ini akan menurunkan kualitas isolasi. Nilai kadar asam terukur dengan jumlah *Miligram Potassium Hydroxide* (KOH) yang dibutuhkan untuk menitrasi semua unsur-unsur asam yang ada pada 1 g

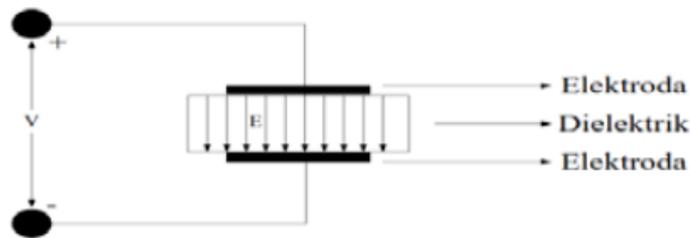
sampel minyak. Satuan dari bilangan asam adalah milligram KOH/gram minyak, nilainya tidak boleh melebihi dari 0,03 mg KOH/gr. (Anggraini et al., 2015).

5. Sifat Elektrik Minyak Transformator

a) Tegangan Tembus (*Breakdown Voltage*)

Minyak transformator yang baik diperlukan perhatian pada sifat elektriknya sehingga transformator berfungsi optimal. Tegangan tembus adalah nilai batas kemampuan sebagai bahan dielektrik untuk menahan tekanan elektrik, bila kuat medan yang dipikul melebihi kekuatan dielektriknya (kV/cm). Nilai tegangan tembus pada minyak baru minimal 30 kV dengan jarak sela 2,5 mm pada suhu ruang (30°C) menurut standar IEC 296. Beban dari dielektrik dapat disebut sebagai terpaan medan listrik. Misalnya suatu dielektrik ditempatkan di antara dua elektroda kemudian elektroda diberi tekanan elektrik atau tegangan, jika terpaan listrik melebihi batas kekuatan dielektrik dan berlangsung cukup lama, maka akan timbul medan listrik di dalam dielektrik. Medan listrik ini akan memberi gaya kepada elektron-elektron agar terlepas dari ikatannya dan menjadi elektron bebas, bila ikatan elektron-elektron terkait erat pada molekulnya putus terjadi perpindahan elektron-elektron dari suatu molekul satu ke molekul lain sehingga timbul arus konduksi. Maka dapat dikatakan bahwa medan listrik merupakan suatu beban yang menekan dielektrik agar berubah sifat menjadi konduktor. Pada minyak isolasi tegangan tembus bersifat sementara namun pada isolasi padat bersifat permanen tergantung

pengaruh material dari elektroda, suhu, jenis tegangan yang diberikan, gas yang terdapat dalam cairan dan sebagainya yang dapat mengubah sifat atom dan molekul cairan itu sendiri.



Gambar 2.4 Medan listrik dalam dielektrik (Arismunandar, 1983)

Pada penerapan tegangan kekuatan dielektrik didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan yang menyebabkan kerusakan atau tembus listrik $V(kV)$, dengan panjang ruang celah d (mm) yang memisahkan antara elektroda. Hal ini dapat dilihat dari persamaan 2.1:

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.1)$$

Proses tembus pada minyak dibawah medan listrik tertentu melibatkan banyak faktor. Salah satunya yaitu perpindahan bahan pencemar lain ke daerah bertekanan listrik di antara kedua elektroda. Kemudian terbentuk jembatan di antara elektroda yang pada awalnya hanya berupa benang tipis. Gelembung akan terbentuk sepanjang jembatan tersebut dan menyebabkan terjadinya konduksi, ionisasi, dan terjadinya tembus. Kejadian tembus isolasi diikuti oleh kenaikan arus yang sangat tinggi. Zat-zat pembentuk jembatan bermula dari partikel kecil pencemar yang menggumpal bergabung membentuk partikel besar dan kemudian bergerak di antara sela kedua elektroda. Penggabungan partikel-

partikel ini tergantung dari ukuran, permitivitas, dan muatannya. Sedangkan laju perpindahan tergantung pada densitas, medan listrik, suhu, jenis elektroda dan viskositasnya (Anggraini et al., 2015).

b) Peluahan Sebagian (*Partial Discharge*)

Partial discharge (PD) merupakan fenomena peluahan muatan elektrik pada medium isolasi yang terdapat di antaranya dua elektroda akibat adanya gas dalam void/rongga memiliki permitivitas rendah dibandingkan sekeliling dielektrik yang akan meningkatkan medan listrik didalam void sehingga terjadi pemecahan/ionisasi sebelum kekuatan dielektrik tercapai yang bisa menjembatani sistem isolasi, dimana peluahan tersebut tidak sampai menghubungkan kedua elektroda secara sempurna pada suatu bahan dielektrik. Fenomena tersebut timbul diakibatkan oleh banyak faktor di antaranya adalah kualitas bahan dielektrik, celah/rongga dalam bahan dielektrik, maupun adanya kerusakan ataupun ketidak sempurnaan dalam proses pengerjaan. Fenomena *Partial Discharge* dapat digambarkan sebagai pulsa listrik atau peluahan parsial pada suatu rongga pada sebuah permukaan dielektrik dari sistem isolasi cair, padat maupun gas. Proses perubahan pada arus PD yang terdiri dari muatan negatif (elektron) dan positif (ion) berlangsung aliran cepat antara satu sisi void yang berisi gas ke sisi lainnya, disebabkan oleh massa elektron lebih ringan daripada massa ion. Waktu kemunculan umum pulsa PD ini mempunyai rise time sekitar 1 ns dan berdurasi hingga ratusan ns. PD ini merupakan busur api yang cukup kecil yang terjadi hanya pada sebagian sistem isolasi

yang dapat mengawali kejadian kegagalan isolasi, apabila terjadi secara terus menerus maka akan menimbulkan panas berlebih pada daerah tertentu yang nantinya akan merusak bahan isolasi dan mengarah kepada terjadinya kegagalan sistem. Oleh karena itu, PD merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan awal kegagalan pada isolasi. Maka sangat penting dilakukan pendeteksian dan pengidentifikasian awal untuk mencari penyebab terjadinya peluahan elektrik yang dapat menurunkan kualitas bahan dielektrik. Pengujian PD berkaitan dengan nilai kualitas dan kuantitas. Nilai kualitas dianalisa dari kecenderungan data yang diperoleh dari karakteristik bahan pada pengujian tertentu. Sedangkan nilai kuantitas merupakan nilai nominal PD yang mempunyai dimensi piko Coloumb (pC) (Pattanadech, 2013; Muladi, 2009).

6. Mekanisme Kegagalan Dielektrik Cair

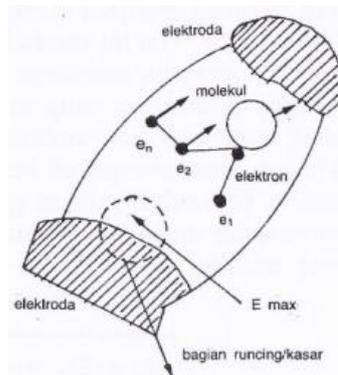
Kegagalan dielektrik pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi pengaruh gagalnya isolasi cair. Beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair antara lain partikel, air, dan gelembung. Apabila suatu tegangan dikenakan terhadap dua elektroda yang dicelupkan ke dalam minyak (isolasi cair) maka terlihat adanya konduksi arus yang kecil. Apabila tegangan dinaikkan secara kontinyu maka pada titik kritis tertentu akan terjadi lucutan di antara kedua elektroda. Lucutan dalam zat cair ini akan terdiri dari unsur-unsur yaitu aliran listrik

yang besarnya ditentukan oleh rangkaian, lintasan cahaya yang cerah dari elektroda satu ke elektroda yang lain, terjadi gelembung gas dan butir-butir zat padat hasil dekomposisi zat cair, dan terjadi lubang pada elektroda.

Mekanisme kegagalan dielektrik pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi pengaruh gagalnya isolasi cair. Beberapa faktor yang mempengaruhi kegagalan isolasi cair antara lain partikel, air, dan gelembung. Terdapat empat jenis teori kegagalan pada media isolasi cair, yaitu teori kegagalan zat murni atau elektronik, teori gelembung udara atau kavitasi, teori kegagalan bola cair, teori butiran padat pada isolasi cair, dan teori kegagalan cair-padat (Arismunandar, 1983).

a) Teori Kegagalan Zat Murni atau Elektronik

Teori kegagalan zat murni atau elektronik merupakan perluasan teori kegagalan pada media isolasi gas, sehingga kegagalan pada media isolasi cair dianggap serupa dengan media isolasi gas. Kegagalan zat murni atau elektronik diperlukan elektron awal yang dimasukkan ke dalam media isolasi cair, elektron awal inilah yang memulai proses kegagalan. Jika elektroda memiliki bagian permukaan tidak rata atau ada bagian yang runcing maka kuat medan terbesar terdapat pada bagian runcing tersebut, sehingga muncul kuat medan listrik yang tinggi di bagian runcing tersebut dan akan mengeluarkan elektron e^{-1} , awal terbentuknya banjir elektron (*avalanche*) yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Kegagalan elektronik (Arismunandar, 1983)

Dalam teori kegagalan elektronik dianggap bahwa elektron-elektron akan mendapatkan energi dari kuat medan listrik sehingga elektron dapat membentur molekul-molekul. Proses pembenturan elektron dengan molekul dapat dikatakan proses ionisasi, sehingga proses ionisasi akan memperbanyak elektron yang akan menyebabkan banjir elektron. Elektron yang dihasilkan berupa $e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$ yang kemudian akan menyebabkan timbulnya arus konduksi dalam media isolasi cair pada kuat medan listrik tinggi. Menurut Schottky, arus yang timbul tersebut mempunyai kerapatan sebesar:

$$J = J_t e^{\frac{4.4\sqrt{E}}{T}} \left[\frac{A}{cm^2} \right] \quad (2.2)$$

dengan,

$$J_t = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}} \quad (2.3)$$

dan,

$$E = ME_a \quad (2.4)$$

Dimana,

$$J = \text{Kerapatan arus konduksi } [Acm^{-2}]$$

J_t = Kerapatan arus termionik [Acm^{-2}]

E_a = Kuat medan yang diterapkan [Vcm^{-1}]

M = Faktor ketidakrataan permukaan (untuk permukaan halus =10)

Kondisi mulai terjadinya banjir diperoeh dengan menyamakan perolehan energi pada elektron yang menempuh lintasan rata-rata yaitu:

$$U_1 = F\lambda = eE\lambda \quad (2.5)$$

Dengan energi yang diperlukan untuk mengionisasi molekul

$$. U_2 = c h \quad (2.6)$$

Dimana,

E = Medan yang diterapkan [$V cm^{-1}$]

U = Energi [*Joule*]

F = Gaya [*Newton*]

λ = lintasan bebas rata-rata [*cm*]

h = kuantum energi untuk mengionisasikan molekul [*joule*]

c = konstanta

b) Teori Gelembung Udara atau Kavitasi

Teori kegagalan gelembung udara merupakan tidak kemurnian media isolasi cair yang bercampur dengan gelembung udara, gelembung udara merupakan pemicu dari tahap awal kegagalan total pada media cair.

Sebab-sebab timbulnya gelembung udara adalah sebagai berikut :

- Permukaan elektroda yang tidak rata, sehingga dapat menimbulkan kantong-kantong udara pada elektroda yang tidak rata pada permukaannya.
- Adanya tabrakan elektron pada media isolasi cair sehingga menimbulkan produk berupa gelembung udara.

- Penguapan cairan karena adanya tegangan tembus pada bagian elektroda yang tidak teratur
- Media isolasi cair mengalami perubahan suhu dan tekanan

Medan listrik dalam gelembung udara yang terdapat pada media isolasi cair dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini :

$$E_b = \frac{3\epsilon_1 E_0}{2\epsilon_1 + 1} \quad (2.7)$$

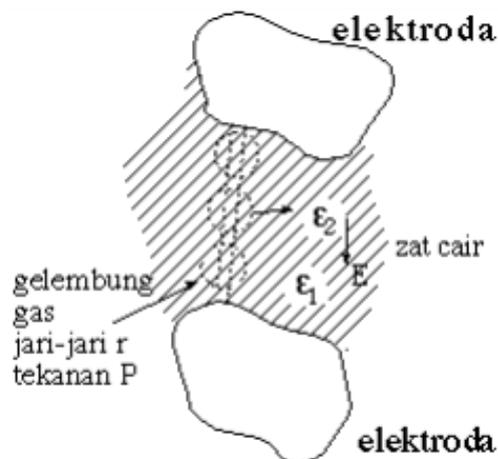
Dimana,

E_b = Medan listrik dalam gelembung udara [$V\ cm^{-1}$]

ϵ_1 = permitivitas media isolasi cair

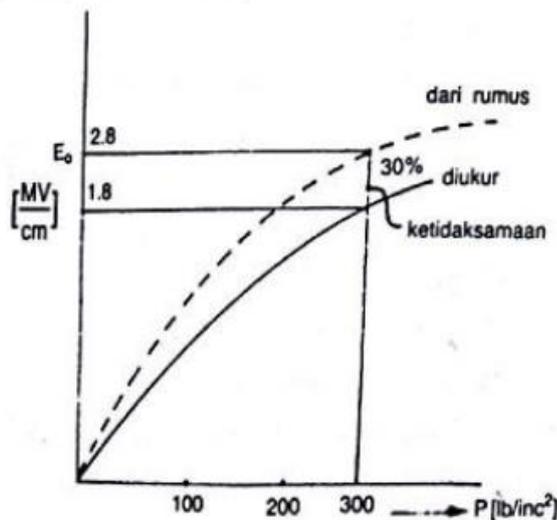
E_0 = medan listrik dalam media cair tanpa gelembung [$V\ cm^{-1}$]

Jika nilai E_b sama dengan medan batas untuk ionisasi gas, maka akan terjadi lompatan listrik dalam gelembung. Hal ini dapat mempercepat pembentukan gas karena dekomposisi media isolasi cair dan dapat menyebabkan terjadinya kegagalan. Bentuk pengaruh medan terhadap gelembung udara ditunjukkan pada **Gambar 2.6**.



Gambar 2.6 Pengaruh medan terhadap gelembung udara (Arismunandar, 1983)

Karena pengaruh medan listrik kuat yang kuat antara kedua elektroda, maka gelembung udara yang terdapat pada media isolasi cair antara kedua elektroda tersebut akan menjadi memanjang searah medan. Hal ini disebabkan oleh gelembung udara berusaha membuat energi potensial minimum. Gelembung-gelembung yang memanjang tersebut akan menyambung dan membentuk jembatan yang akhirnya mengawali terjadinya kegagalan.



Gambar 2.7 Grafik perbandingan hasil perhitungan sesuai dengan teori kekuatan gagal medan gelembung (Arismunandar, 1983)

Grafik pada **Gambar 2.7** menunjukkan bahwa teori tersebut kurang relevan pada aktual karena misalnya untuk cairan n-heksana, ternyata terdapat perbedaan yang cukup besar antara perhitungan teori dengan percobaan. Sebab diakibatkan tidak memperhitungkan gelembung udara kecil awal sebelum terjadinya gelembung besar dengan jari-jari r .

Guna mendapatkan kriteria kegagalan, volume gelembung selama berubah menjadi memanjang dianggap konstan. Kekuatan gagal medan gelembung udara E_0 adalah, sebagai berikut:

$$E_0 = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \sqrt{\frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{r} \left[\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{vb}{2rE_0}} - 1 \right]} \quad (2.8)$$

Dimana,

σ = Gaya tegangan (tension) permukaan media cair [Nm^{-1}],

ε_1 = Permittivitas media isolasi cair,

ε_2 = Permittivitas gelembung,

r = Jari-jari awal gelembung (dianggap seperti bola) [cm],

V_b = Jatuh tegangan dalam gelembung [V]

Persamaan diatas dapat diartikan implisit dan sangat berpengaruh terhadap jari-jari awal gelembung r . Oleh karena r adalah fungsi dari tekanan suhu luar media isolasi cair, maka jika r besar akan mengakibatkan kekuatan gagal E_0 akan kecil sekali.

c) Teori Kegagalan Bola Cair dalam Media Isolasi Cair

Jika suatu media isolasi mengandung sebuah bola cair dari jenis cairan lain, maka akan menyebabkan kegagalan akibat ketidakstabilan bola cair tersebut dalam medan listrik. Medan listrik akan mempunyai pengaruh pada bentuk bola cair. Bola cair yang diberikan medan listrik E akan menjadi sferoida (*spheroid*) yang ditunjukkan pada **Gambar 2.8** dengan medan didalamnya sebesar E_2 , sehingga hubungan antara kedua medan dinyatakan sebagai berikut:

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1 E}{\varepsilon_1 - (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) G} \quad (2.9)$$

Dimana,

$$G = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left\{ \frac{\gamma \cosh^{-1} \gamma}{(\gamma^2 - 1)^{\frac{1}{2}}} - 1 \right\} \quad (2.10)$$

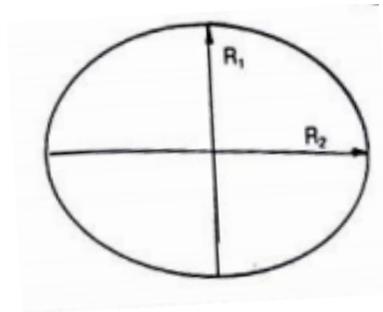
$$\gamma = \frac{R_2}{R_1} \quad (2.11)$$

R_1 = Jari-jari panjang sferoida [cm],

R_2 = Jari-jari pendek sferoida [cm],

ϵ_1 = Permittivitas media isolasi cair,

ϵ_2 = Permittivitas bola cair



Gambar 2.8 Medan listrik bentuk sferoida (Arismunandar, 1983)

Persamaan kuat medan listrik dalam media isolasi cair, yaitu :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi \sigma}{\epsilon_1 R} \right) \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - G \right)} H \quad (2.12)$$

Dimana, $H = 2\gamma^{\frac{1}{3}} \left(2\gamma - 1 \frac{1}{\gamma^2} \right) \quad (2.13)$

$R = \frac{3}{4\pi}$ volume sferoida [cm^3],

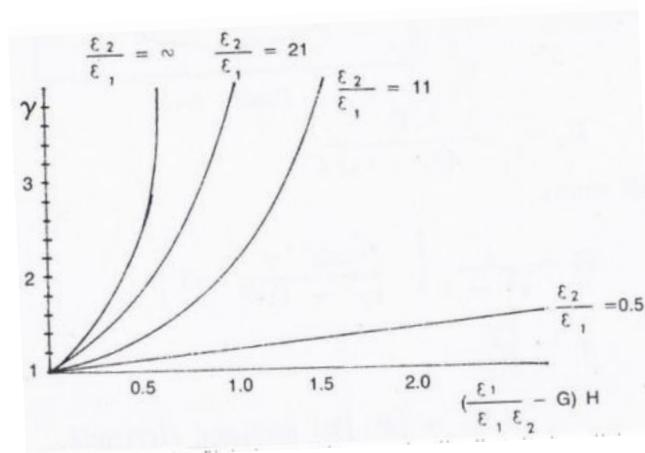
ϵ_1 = Permittivitas media isolasi cair,

σ = Gaya tegangan permukaan [Nm^{-1}]

Bentuk persamaan di atas dapat ditulis menjadi :

$$\frac{E}{600 \sqrt{\frac{\pi \sigma}{\epsilon_1 R}}} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} - G \right)} H \quad (2.14)$$

Persamaan 2.11 sebagai persamaan yang mempunyai hubungan fungsi γ yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**,



Gambar 2.9 Grafik hubungan kuat medan listrik terhadap nilai γ
(Arismunandar, 1983)

Dapat dilihat bahwa untuk nilai $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ apabila lebih dari 20, maka nilai E akan melewati maksimum jika γ naik, sehingga dapat dikatakan bahwa tidak ada bentuk sferoida yang stabil diatas tekanan listrik kritis. Pada **Gambar 2.9** juga dapat dilihat apabila $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ kurang dari 20, maka tidak ada medan kritis meskipun γ dapat melonjak cepat dengan kenaikan medan listrik. Untuk bola cair yang menghantarkan listrik, maka $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} = \infty$ sehingga persamaan menjadi :

$$E = 600 \sqrt{\left(\frac{\pi\sigma}{\epsilon_1 R}\right) \left(\frac{\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2}\right) GH} \quad (2.15)$$

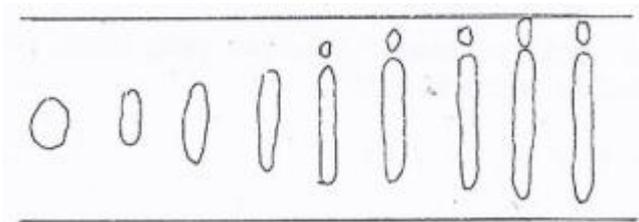
Sehingga dapat ditulis persamaan medan listrik kritis dimana bola cair menjadi tidak stabil sebagai berikut :

$$Ek = 487,7 \sqrt{\frac{\sigma}{\epsilon_1 R}} V/cm \quad (2.16)$$

Sebagai contoh untuk bola cair dalam media isolasi minyak dengan $\sigma = 43$ dyne/cm, $\varepsilon_1 = 2$ dan $R = 1 \mu\text{m}$, maka medan listrik kritisnya adalah $E_k = 0,266 \text{ MVcm}^{-1}$.

Medan listrik kritis ini jauh lebih rendah daripada kekuatan gagal media isolasi cair yang bersih, sehingga merupakan sumber kegagalan pada media isolasi cair. Bola air yang sangat kecil pun, misal $R = 0,05 \mu\text{m}$ masih dapat mengakibatkan terjadinya kegagalan pada medan listrik $E_k = 1 \text{ MVcm}^{-1}$.

Contoh kegagalan dielektrik diakibatkan bola cair pada media isolasi cair pada media silikon cair ditunjukkan pada **Gambar 2.10**. Setelah terjadi bola cair dan keadaan tidak stabil maka bola cair air akan memanjang, sehingga jika bola cair sudah mencapai dua pertiga celah elektroda, maka saluran-saluran lucutan akan timbul yang dapat mengakibatkan terjadi kegagalan total.



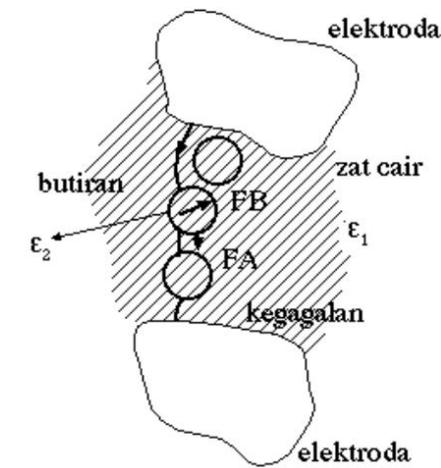
Gambar 2.10 Bola air yang memanjang memicu kegagalan

(Arismunandar, 1983)

d) Teori Butiran Padat dalam Media Isolasi Cair

Kegagalan butiran padat merupakan jenis kegagalan yang disebabkan oleh adanya partikel (*particle*) atau butiran zat padat pada media isolasi cair yang akan menyebabkan terjadinya kegagalan. Butiran

padat mempunyai sifat permitivitas berlainan dengan permitivitas zat isolasi cair. Jika butiran-butiran padat mempunyai permitivitas ϵ_2 dan permitivitas media isolasi cair adalah ϵ_1 , yang ditunjukkan pada **Gambar 2.11**.



Gambar 2.11 Kegagalan butiran padat (Arismunandar, 1983)

Besarnya gaya yang bekerja pada butiran padat dalam medan yang tak seragam dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$F = r^3 \epsilon_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + \epsilon_1} E \text{ grad } E \quad (2.17)$$

Dimana,

- F = Gaya [Newton],
- r = Jari-jari butiran [cm],
- E = Gradien tegangan [Vcm^{-1}],

Secara khusus, persamaan di atas dapat ditulis menjadi seperti:

$$F = \frac{1}{2} r^3 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + 2\epsilon_1} \text{ grad } E^2 \quad (2.18)$$

Untuk persamaan di atas terdapat dua kemungkinan yang terjadi, yaitu:

- Jika $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, maka arah gaya yang bekerja pada butiran padat menjadi searah dengan tekanan elektrik maksimum (FA), sehingga butiran padat akan terdorong ke arah medan yang paling kuat.
- Jika $\varepsilon_2 < \varepsilon_1$, maka arah gaya berlawanan dengan tekanan listrik maksimum (FB).

Gaya F semakin besar jika ε_2 besar. Untuk butiran yang mempunyai nilai $\varepsilon_2 = \infty$, maka akan menyebabkan gaya yang bekerja pada butiran padat dalam medan yang tak seragam menjadi:

$$F = \frac{1}{2} r^3 \text{grad } E^2 \quad (2.19)$$

Untuk medan yang seragam, seperti elektroda bola ataupun pada elektroda piringan sejajar dengan celah kecil, medan paling kuat bertempat pada tempat yang seragam. Dalam hal ini $\text{grad } E^2 = 0$ dan butiran dalam keadaan seimbang. Karena itu, butiran akan ditarik oleh gaya ke tempat dimana medan seragam. Akibatnya butiran padat akan menempati antara kedua elektroda dan seakan membuat jembatan yang dapat disebut jembatan serat, kemudian jembatan serat ini yang akhirnya akan mengawali terjadinya kegagalan pada media isolasi cair.

Adanya butiran penghantar di antara elektroda akan mengakibatkan pembesaran medan dalam media isolasi cair di dekat butiran padat.

Pembesaran medan ditentukan oleh bentuk butiran, yaitu :

1. Butiran padat bulat ($\gamma = 1$) ; $E_1 = 3 E$
2. Butiran padat sferoida ($\gamma = 2$) ; $E_1 = 5,8 E$
3. Butiran padat sferoida ($\gamma = 5$) ; $E_1 = 18 E$

Dimana, γ = Perbandingan jari-jari pendek sferoida,

E = Medan dalam cairan tanpa butiran [Vcm^{-1}],

E_1 = Medan dalam cairan pada ujung butiran [Vcm^{-1}]

Apabila E_1 melebihi tegangan gagal cairan maka akan terjadi kegagalan setempat yang kemudian menimbulkan gelembung-gelembung yang akhirnya dapat mengakibatkan kegagalan total pada cairan. Gerakan butiran yang disebabkan oleh gaya F , akan dihambat oleh kekentalan medan isolasi cair. Dalam hubungan ini dapat dihitung dalam rumus waktu yang diperlukan terjadinya kegagalan menurut Kok-Corbey besarnya adalah :

$$t_b = \frac{\eta^2 c}{g^4 r^7 (E_b^2 - E_0^2) N} \quad (2.20)$$

Dimana, E_b = Kekuatan gagal untuk waktu penerapan tekanan listrik singkat [Vcm^{-1}],

E_0 = Kekuatan gagal dalam waktu lama [Vcm^{-1}],

g = Faktor kekasaran (*asperity*), kekasaran berbentuk $\frac{1}{2}$ bola (3)

N = Konsentrasi butiran,

η = Kekentalan (viskositas) [mm^2s^{-1}],

r = Jari-jari butiran [cm],

c = Konstanta,

t_b = Waktu kegagalan [s]

Untuk waktu penerapan tegangan yang lama akan merubah persamaan, sehingga persamaan lamanya waktu kegagalan diatas berubah sebanding dengan $r^{-3/2}$ menjadi:

$$(g^1 - 1)r^3 E_0^2 = 2kT \quad (2.21)$$

Dimana kT adalah energi termal (Joule). Bila $r = 3$, yaitu bila kekasarannya berbentuk setengah bola, maka persamaannya menjadi:

$$r^3 E_0^2 = \frac{1}{4} kT \quad (2.22)$$

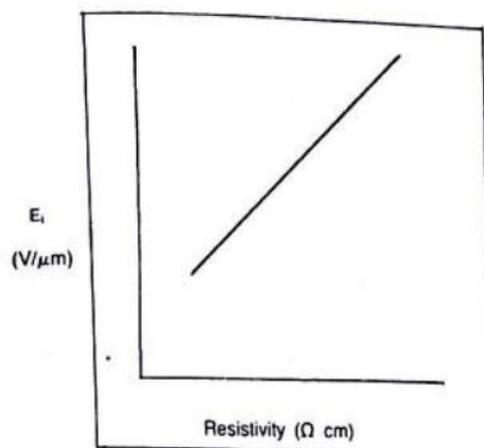
e) Kegagalan Campuran Zat Cair - Padat

Kegagalan isolasi cair-padat (isolasi kertas dicelup dalam minyak) biasanya disebabkan oleh proses pemburukan yang lamban oleh rugi-rugi dielektrik. Pemburukan yang dapat menyebabkan kegagalan isolasi cair-padat yaitu pemburukan karena pelepasan dalam (*internal discharge*) dan pemburukan elektro-kimia. Jika campuran dielektrik cair-padat memiliki kekuatan gagal yang berbeda maka jika tegangan listrik dinaikkan akan terjadi kegagalan pada zat yang paling lemah. Hal ini dapat mengakibatkan kegagalan parsial (*partial discharge*). Pelepasan ini mengakibatkan pemburukan perlahan yang disebabkan oleh:

- Disintegrasi dielektrik padat yang diakibatkan pemohonan oleh elektron dan ini yang dihasilkan
- Aksi kimiawi pada dielektrik karena ionisasi gas
- Suhu tinggi di daerah pelepasan.

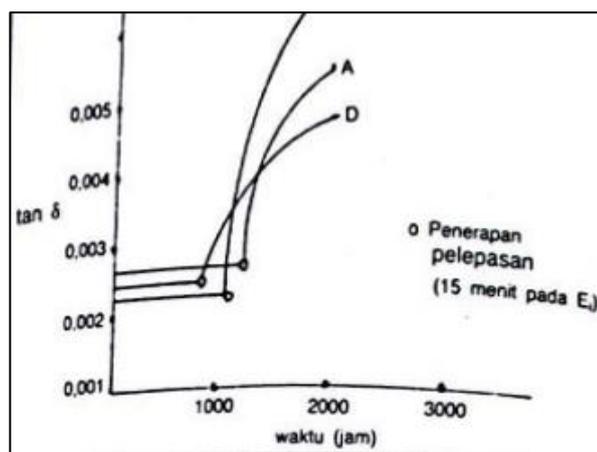
Pemburukan elektro-kimia terjadi karena ion-ion yang dibebaskan oleh arus pada elektroda bisa menyebabkan kerusakan. Derajat kerusakan yang terjadi tergantung pada sifat ion yang terbawa dan reaksi kimia dengan ionisasi. Kerusakan bisa terjadi pada tegangan *DC* maupun *AC*. Dalam bahan dielektrik tak organik dengan kestabilan kimia yang tinggi pelepasan dalam kandungan gas dapat merusak bahan karena pemanasan

setempat akibat pelepasan dapat menyebabkan tekanan-tekanan mekanis dalam bahan, Pemburukan melalui proses streamer yang mengakibatkan kegagalan. Pelepasan dapat terjadi apabila terdapat bahan dielektrik padat (kertas) pada dua buah elektroda dicelup dalam dielektrik cair (minyak) memiliki tekanan listrik (resistivitas) rendah daripada tekanan listrik nominal atau batas kritis bahan dielektrik, dan ini akan meningkatkan medan listrik mula pelepasan (*discharge inception stress*), medan listrik minyak kertas E_i nilainya tergantung dari proses yang menyebabkan gas terjadi. Tekanan yang menyebabkan dielektrik terjadi dari dielektrik kertas yang mengandung air memiliki $<10 \text{ V}/\mu\text{m}$. Tetapi nilai ini naik dengan meningkatnya temperatur bahan dan dapat mencapai $100 \text{ V}/\mu\text{m}$ atau 10^8 V/m , hal ini sesuai contoh kertas yang dikeringkan dengan suhu yang bervariasi dan dicelup dalam minyak menunjukkan bahwa tekanan mula-pelepasan naik sebanding dengan naiknya kekeringan seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 2.12**.



Gambar 2.12 Resistivitas dielektrik minyak kertas terhadap kandungan air (Arismunandar, 1983)

Dalam kasus ini, gas dapat terjadi meskipun kertas yang kandungan airnya rendah karena tingginya medan medan elektrik kegagalan yang muncul pada ujung kerajang (*foil*) elektroda atau bagian-baian pengahatar dalam minyak. Bila gelembung gas terjadi dalam dielektrik minyak-kertas pada tekanan mula pelepasan E_i , maka pelepasan dalam gelembung akibat pembentukan ion akan merusak dielektrik dan meningkatkan sudut rugi dielektrik (δ) atau faktor disipasi dielektrik $\tan \delta$. Terlihat pada **gambar 2.13** percobaan penambahan bahan dielektrik padat (kertas) dicelup ke dalam minyak memiliki efek kapasitansi, meskipun waktu pelepasan minyak-kertas singkat (15 menit) disusul waktu istirahat rugi-rugi tetap naik selama beberapa ratus jam pertama dan mencapai keadaan (*steady state*) setelah 1000 jam.



Gambar 2.13 Rugi dielektrik pada minyak-kertas (Arismunandar, 1983)

Pemburukan karena ion-ion yang terbebas dari ikatannya oleh arus pada elektroda terjadi dari tegangan AC atau DC dapat menyebabkan kegagalan tergantung pada sifat ion yang terbawa dan pada reaksi kimia

dengan isolasi yang dikenal pemburukan reaksi elektro-kimia seperti kapasitor.

Adanya ion dalam lapisan tipis cairan di antara lapisan dielektrik padat menyebabkan berubahnya sudut rugi δ dengan berubahnya tegangan yang diterapkan pada dielektrik dinaikkan mulai dari nol maka sudut rugi akan naik mencapai maksimum, lalu turun, meskipun tegangan dinaikkan terus. Penurunan sudut rugi disebabkan karena pergerakan ion dalam dalpisan tipis (film) cairan pencelup (*impregnant*) terbatas. Penurunan $\tan \delta$ dengan naiknya tekanan listrik jika terdapat ion dinyatakan:

$$\tan \delta = \frac{8 e \mu N}{\varepsilon \omega} (\omega \tau - \sin \omega \tau \cos \omega \tau) \quad (2.23)$$

dimana,

$$\omega \tau = \cos^{-1} \left(1 - \frac{\omega d}{\mu e} \right) \quad (2.24)$$

Dimana, E = medan listrik (puncak) [Vcm^{-1}],

ω = Frekuensi medan yang diterapkan [Vcm^{-1}],

d = Tebal lapisan tipis cairan pencelup di antara lapisan dielektrik padat [C/m^2]

\mathcal{E} = Permittivitas cairan dielektrik [F/m],

μ = kelincahan ion dalam cairan (Permeabilitas) [C/Pm],

e = muatan ion [Q],

N = Konsentrasi ion (positif atau negatif) dalam cairan

Faktor disipasi dielektrik total dari satu lapisan tipis dalam cairan, dimana

factor disipasi dielektrik tanpa ada ion $\tan \delta_0$ dinyatakan:

$$\tan \delta_a = \tan \delta_0 + \tan \delta_1 \quad (2.25)$$

Jika $\tan \delta_s$ adalah factor disipasi dielektrik dari zat padat maka factor disipasi totalnya menjadi persamaan 2.26 dibawah:

$$\tan \delta = \gamma \frac{C_r}{C_s} \tan \delta_s + (\gamma + 1) \frac{C_r}{C_s} \left\{ \tan \delta_0 \frac{8 e \mu N}{\epsilon \omega} (\omega \tau - \sin \omega \tau \cos \omega \tau) \right\}$$

Dimana, C_t = Kapasitansi dielektrik total [F],

C_t = Kapasitansi efektif pada lapisan zat dielektrik padat [F],

C_a = Kapasitansi efektif setiap lapisan tipis zat cair di antara lapisan dielektrik padat [F]

γ = Jumlah lapisan dielektrik zat padat di antara elektroda

Persamaan 2.6 dapat ditulis dalam bentuk lain,

$$\tan \delta = P + \frac{RN}{E^{3/2} \mu^{1/2}} \left(1 + \frac{3 \omega d}{20 \mu E} \right) \quad (2.27)$$

dimana,

$$P = \gamma \frac{C_r}{C_s} \tan \delta_s + (\gamma + 1) \frac{C_r}{C_s} \tan \delta_0 \quad (2.28)$$

$$R = (\gamma + 1) \frac{C_r}{C_s} \frac{2^{1/2} e d^{3/2} \omega^{1/2}}{3c} \quad (2.29)$$

Jika δ persamaan 2.27 di gambarkan sebagai fungsi dari $E^{-3/2}$ maka untuk E cukup besar lengkungannya berbentuk garis lurus dengan lereng. Jika permeabilitas μ diketahui maka konsentrasi N dapat ditentukan dari persamaan

$$\sigma_0 = \frac{RN}{\mu^{1/2}} \quad (2.30)$$

Jika permeabilitas μ tidak diketahui maka konsentrasi N dapat ditentukan dari persamaan 2.27, dalam bentuk lain,

$$\tan \delta - P E^{3/2} = \frac{RN}{\mu^{1/2}} \left(1 + \frac{3 \omega d}{20 \mu E} \right) \quad (2.31)$$

Dengan menggambarkan ruas kiri sebagai fungsi dari I/E diperoleh garis lurus untuk jangkauan E tertentu dan lereng garis tersebut ($-\sigma_1$) dinyatakan;

$$\sigma_1 = \frac{RN}{\mu^{1/2}} \frac{3 \omega d}{20 \mu} \quad (2.32)$$

Dengan menggabungkan persamaan 2.30 dan persamaan 2.32, karena σ_0 dan σ_1 dapat diperoleh dari percobaan ketergantungan $\tan \delta$ dan tekanan (*stress*) maka konsentrasi ion N dapat ditentukan;

$$N = \frac{\sigma_0}{R} \sqrt{\frac{3 \omega d \sigma_0}{20 \sigma_1}} \quad (2.33)$$

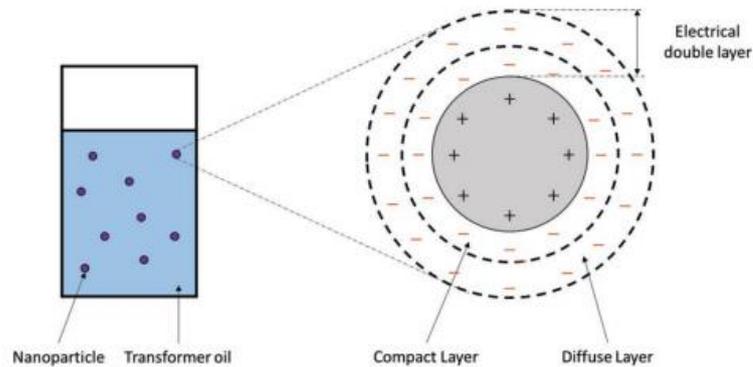
Secara sederhana besarnya polarisasi disebabkan oleh 4 sumber yaitu : (a) komponen elektronik yang disebabkan oleh induksi medan pada awan elektron yang mengelilingi tiap atom pada suatu material, (b) kontribusi ionik yang diasosiasikan dengan gerak relatif kation dan anion dalam medan elektrik, (c) Polarisasi orientasional disebabkan karena rotasi dipol molekul dalam medan. Selain ketiga penyebab tersebut, sumber polarisasi suatu material juga disebabkan oleh pergerakan pembawa muatan, yaitu perpindahan ion atau elektron dibawah pengaruh medan listrik.

7. Nanofluida

Nanofluida adalah suspensi yang terdiri dari serbuk fasa nano (nanopartikel) dan fluida dasar (minyak). Serbuk ini terdiri atas partikel nanokristal dengan ukuran partikel dalam skala nanometer. Nanopartikel adalah suatu padatan yang sangat kecil, ukuran nanopartikel tersebut antara 1 nm sampai dengan 100 nm. Partikel berukuran nano terdiri atas

10 sampai dengan 100.000 atom-atom penyusun. Nanopartikel memiliki sifat-sifat yang tidak biasa dengan ukuran yang sangat kecil yaitu 0,1-100 nm, yang akan memberikan sifat fisik, mekanik, elektronik, magnetik dan sifat kimia yang unik juga berbeda dengan partikel yang berukuran lebih besar. Nanofluida disintesis dengan mensuspensi nanopartikel dalam liquid sebagai fluida dasar. Nanofluida adalah suspensi serbuk nano logam atau nonlogam dalam fluida dasar dan dapat disintesis untuk meningkatkan laju perpindahan kalor dalam berbagai aplikasi (Kunju et al., 2019).

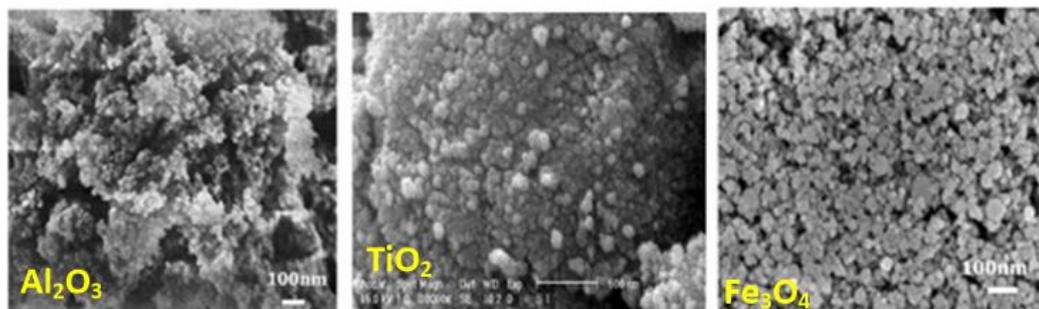
Nanopartikel mempunyai ukuran di antara ukuran molekuler dan keadaan struktur bulk padatan, memberikan sifat-sifat yang unik dan berbeda bila dibandingkan dengan material yang berukuran lebih besar. Beberapa contoh dari sifat-sifat nanopartikel adalah titik lebur yang rendah, tekanan transisi fasa padat yang lebih tinggi, koefisien difusi yang tinggi dan perubahan sifat termofisik pada partikel. Nanopartikel sangat reaktif dan sangat cepat bergabung dengan partikel lain yang ada disekitarnya sebagai contoh mendispersikan dengan nanopartikel lain, dan beraglomerasi terhadap cairan dasar disebut nanofluida. Nanofluida merupakan campuran yang dibentuk oleh nanopartikel sebagai inti dan dikelilingi oleh nanolayer sebagai pelindung (*shell*), yang kemudian akan tenggelam dicairan dasar, seperti pada **Gambar 2.14** (Primo, 2018).



Gambar 2.14 Lapisan EDL nanopartikel dalam minyak (Primo, 2018)

Ketika nanopartikel terdispersi ke dalam minyak, permukaan yang membentuk batas umum antara nanopartikel dan minyak akan muncul. Luas permukaan partikel berbentuk bola berbanding lurus dengan diameter partikel, yang volumenya berbanding lurus dengan diameter partikel, sehingga luas permukaan spesifik suatu partikel berbanding terbalik dengan diameter partikel. Dengan mengecilnya ukuran partikel, jumlah atom di permukaan meningkat mempengaruhi distribusi ion di sekitar daerah antar muka (*interface*) dan menyebabkan peningkatan konsentrasi ion dengan muatan berlawanan di sekitar permukaan. Lapisan cairan di sekitar partikel terdiri dari dua bagian, pertama di bagian dalam yang disebut *compact layer* di mana ion-ion terikat secara kuat (*immobile*), dan kedua, bagian luar yaitu daerah difusi (*diffuse region*) di mana ion-ion kurang terikat secara kuat (dapat berdifusi). Berdasarkan teori *Electric Double Layer* (EDL), ketika nanopartikel terdispersi ke dalam minyak, lapisan pertama partikel yang langsung berhubungan dengan permukaan minyak akan bermuatan sejenis, sedangkan lapisan berikutnya akan mempunyai muatan yang berlawanan dengan lapisan di depannya. Dengan

demikian seolah-olah tiap partikel dalam minyak dilindungi oleh dua lapisan pelindung listrik yang saling berlawanan. *Shell* tersebut akan menolak setiap usaha partikel minyak yang akan melakukan penggabungan menjadi satu molekul yang besar, karena susunan listrik yang menyelubungi setiap partikel minyak yang mempunyai susunan yang sama. Dengan demikian, antara sesama partikel akan tolak menolak, dan stabilitas suspensi akan bertambah karena adanya akumulasi muatan dalam EDL pada permukaan nanopartikel, besar momen dipol terinduksi yang dibentuk oleh deformasi ion di bawah medan listrik yang diterapkan dan waktu relaksasi kemunculan polarisasi pada frekuensi yang lebih rendah (102Hz-106Hz) karena momen dipol.



Gambar 2.15 Scanning Electron Microscope (SEM) partikel nano Al_2O_3 , TiO_2 , dan Fe_3O_4 (Khaled dan Beroual, 2019)

a. Alumina

Aluminium oksida adalah sebuah senyawa kimia dari aluminium dan oksigen dengan rumus kimia Al_2O_3 . Nama mineralnya adalah alumina dan dalam bidang pertambangan, keramik dan teknik material senyawa ini lebih banyak disebut dengan nama alumina. Berat molekul: 101,96 gr/mol, tampilannya zat padat putih sangat higroskopik, tidak berbau, titik leleh

2072°C, titik didih 2977°C, larut dalam air namun tidak larut pada etanol, konduktivitas termal yang relatif tinggi ($30 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) untuk bahan keramik, dan secara luas dapat digunakan untuk menghilangkan air dari aliran gas. Ion-ion oksigen hampir membentuk struktur heksagonal dengan ion aluminium mengisi dua-pertiga dari celah oktahedralnya. Setiap pusat Al^{3+} oktahedral. Dalam istilah kristalografi, korundum mengadopsi kisi trigonal bravais dengan sebuah gugus ruang R-3c (nomor 167 Daftar Internasional). Produksi alumina dunia per tahun mencapai 45 juta ton, lebih dari 90% digunakan dalam pengolahan logam aluminium. Penggunaan utama aluminium oksida sebagai cermin, keramik, dan aplikasi-aplikasi polishing dan abrasif. Dalam jumlah besar juga digunakan dalam pengolahan zeolit, pigmen pelapis titanium, dan sebagai pemadam api/penekan asap. Aluminium oksida adalah isolator (penghambat) panas dan listrik yang baik. Umumnya Al_2O_3 terdapat dalam bentuk kristalin yang disebut *corundum* atau *α -aluminium oksida*. Al_2O_3 dipakai sebagai bahan abrasif dan sebagai komponen dalam alat pemotong, karena sifat kekerasannya.

Aluminium oksida berperan penting dalam ketahanan logam aluminium terhadap perkaratan dengan udara. Logam aluminium sebenarnya mudah bereaksi dengan oksigen di udara. Aluminium bereaksi dengan oksigen membentuk aluminium oksida, yang berupa lapisan tipis yang dengan cepat menutupi permukaan aluminium. Lapisan ini melindungi logam aluminium dari oksidasi lebih lanjut. Ketebalan lapisan ini dapat ditingkatkan melalui proses anodisasi. Beberapa alloy (paduan logam),

seperti perunggu aluminium, memanfaatkan sifat ini dengan menambahkan aluminium pada alloy untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi. Al_2O_3 yang dihasilkan melalui anodisasi bersifat amorf, namun beberapa proses oksidasi seperti plasma *electrolytic oxydation* menghasilkan sebagian besar Al_2O_3 dalam bentuk kristalin, yang meningkatkan kekerasannya (Ansari, 2014).

b. Titania

Titanium dioksida adalah material semikonduktor oksida dari titanium (IV) oksida yang dikenal juga dengan nama titania dengan rumus molekul TiO_2 . Titania memiliki berat molekul 79,866 g/mol, tampilan warna putih padat, titik lebur 1843°C , titik didih 2972°C , . Titania memiliki keunggulan yaitu dapat digunakan pada level tinggi fotokonduktivitas, stabil terhadap korosi akibat foton, stabil terhadap korosi akibat kimia, tidak beracun, stabil terhadap kekuatan medan listrik yang lebih tinggi karena konstanta dielektrik relatif tinggi, harganya murah dengan aktivitas dan efisiensi fotokatalis tinggi. Semikonduktor adalah suatu bahan dengan daya hantar arus listrik (σ) berada di antara konduktor dan isolator, dengan nilai σ sebesar 10^{-5} – $10^3 \text{ ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$. Perbedaan antara ketiganya ini, bergantung pada struktur pita, pita valensi terisi penuh atau terisi sebagian, serta besarnya energi celah (*band gap energy*) antara pita valensi dan pita konduksi. Umumnya energi celah pada semikonduktor tidak terlalu besar (0,5–5,0eV), dibandingkan dengan isolator lebih besar dari 5,0 elektron volt (eV). Energi celah yang tidak terlalu besar ini memungkinkan beberapa

elektron naik ke pita konduksi. Keberadaan energi celah pada semikonduktor mencegah deaktivasi pasangan *elektron-hole* sehingga *lifetime* pasangan *elektron-hole* cukup lama untuk berperan pada transfer elektron antarmuka. Energi celah pita untuk semikonduktor menunjukkan energi cahaya minimum yang diperlukan untuk menghasilkan elektron pada pita konduksi, sehingga menghasilkan konduktivitas listrik dan *hole* pada pita valensi yang mengalami kekosongan elektron. *Hole* ini dapat bereaksi dengan air atau gugus hidroksil untuk menghasilkan radikal hidroksil. *Hole* dan radikal hidroksil merupakan zat pengoksidasi yang sangat kuat, yang dapat digunakan untuk mengoksidasi sebagian besar material organik. Penggunaan semikonduktor yang berukuran nano, dimana material tersebut memiliki keistimewaan karena luas permukaan yang lebih tinggi sehingga memberikan laju reaksi permukaan yang lebih tinggi selama degradasi bahan organik berlangsung. Tiga jenis bentuk kristal yaitu *anatase*, *brookite*, dan *rutile*. Di antara ketiganya yang paling umum digunakan adalah titania yang berada pada fase *rutile* dan *anatase* dimana keduanya berstruktur tetragonal. Namun apabila dilihat dari tingkat kestabilan, fase *anatase* lebih stabil daripada fase *rutile*. Proses fotokatalis fasa *anatase* memiliki potensi paling besar untuk digunakan sebagai fotokatalis karena ekonomis, memiliki *band gap energy* cukup lebar yaitu 3,2eV, memiliki stabilitas kimia dalam jangka waktu panjang, ramah lingkungan dan aktivitas fotokatalis yang tinggi. Struktur *anatase* lebih stabil pada suhu rendah dan struktur *rutile* pada suhu tinggi.

Kelebihan TiO₂ dibandingkan dengan material semikonduktor lain ialah tidak bersifat toksit, ketersediaannya cukup melimpah, dapat digunakan berulang kali tanpa kehilangan aktivitas fotokatalitiknya. Selain itu, fotokatalis terbilang mampu memanfaatkan cahaya matahari untuk mengubah senyawa-senyawa yang bersifat toksit menjadi senyawa yang tidak berbahaya.

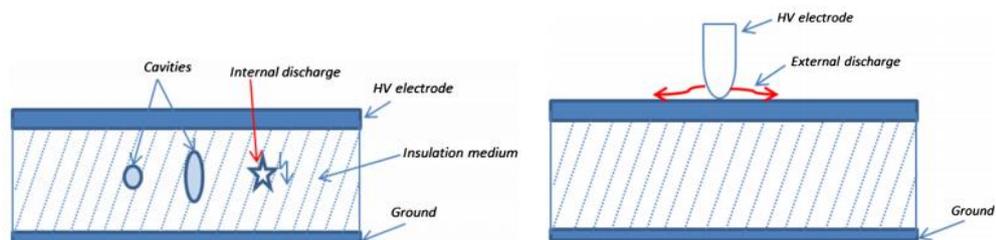
c. Magnetite

Magnetite merupakan salah satu bentuk oksida besi di alam selain *maghemite* (γ -Fe₂O₃) dan *hematite* (α -Fe₂O₃). Magnetite dikenal sebagai oksida besi hitam dengan formula kimia Fe₃O₄ yang merupakan oksida logam yang paling kuat sifat magnetisnya. Berat molekul 5.17 g/mol, titik didih 2.623°C, titik lebur 1.597°C, tampilannya bubuk berwarna hitam, dan tidak larut dalam air. Secara alamiah, magnetit termasuk dalam golongan bahan ferromagnetik. Pada ukuran *bulk*-nya, material ini merupakan kelompok bahan ferrimagnetik. Namun, pada ukuran nanometer, material ini menjadi bahan superparamagnetik, dan memiliki sifat-sifat yang lebih baik seperti magnetisasi saturasi yang tinggi (90 emu/gram), *biological compatibility*, dan *environmental stability*. Selain itu, pada ukuran dibawah 20 nm dengan morfologi partikel berbentuk bulat, material ini dapat diaplikasikan dengan lebih baik untuk kebutuhan biomedis karena kemampuannya untuk mempengaruhi nilai relaksasi proton pada air. Nilai relaksasi ini dapat menurunkan intensitas sinyal dari pengaruh penggelapan pada *magnetic resonance imaging* (MRI), sehingga dapat

menghasilkan citra yang lebih jelas. Peluang aplikasi Fe_3O_4 yang luas dalam berbagai bidang seperti medis digunakan sebagai *drug delivery*, dan terapi hyperthermia. Lalu dalam bidang industri digunakan sebagai katalis, sensor, dan pigmen warna (Olmo et al., 2019).

8. Mekanisme *Partial Discharge*

Secara umum *Partial Discharge* (PD) dapat terjadi pada bagian *internal* atau *external* isolasi saat produksi, pemasangan, dan pemeliharaan yang kurang optimal. PD *internal* di indikasikan ketidaksempurnaan terdapat berupa rongga atau gelembung berisi udara, gas, atau material lain yang terpendam didalam isolasi, sedangkan peluahan permukaan atau PD *external* terjadi di udara luar karena polusi, endapan/tetes air, dan retak/kasarnya permukaan isolasi, lalu korona disebabkan adanya ionisasi medium atau pelepasan elektron dari ikatannya pada permukaan kasar atau runcing pada sekeliling konduktor dengan ditandai dengan keluarnya cahaya plasma *luminous* berwarna ungu muda, sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.16**.

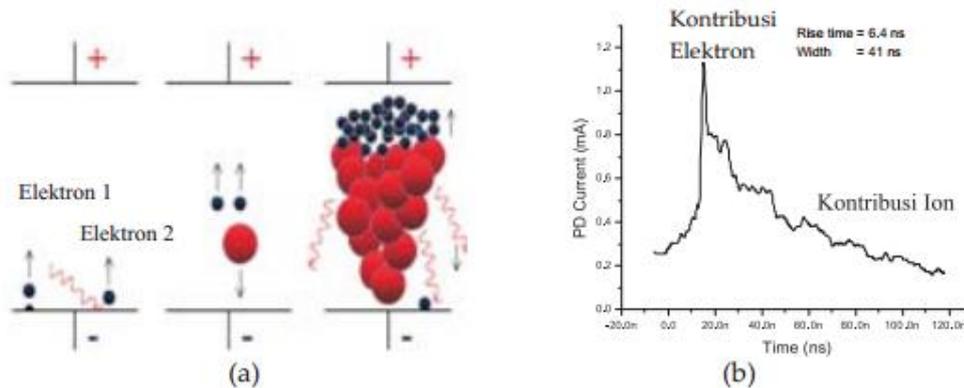


Gambar 2.16 PD internal dan PD eksternal (permukaan dan korona)

(Suwarno, 2011)

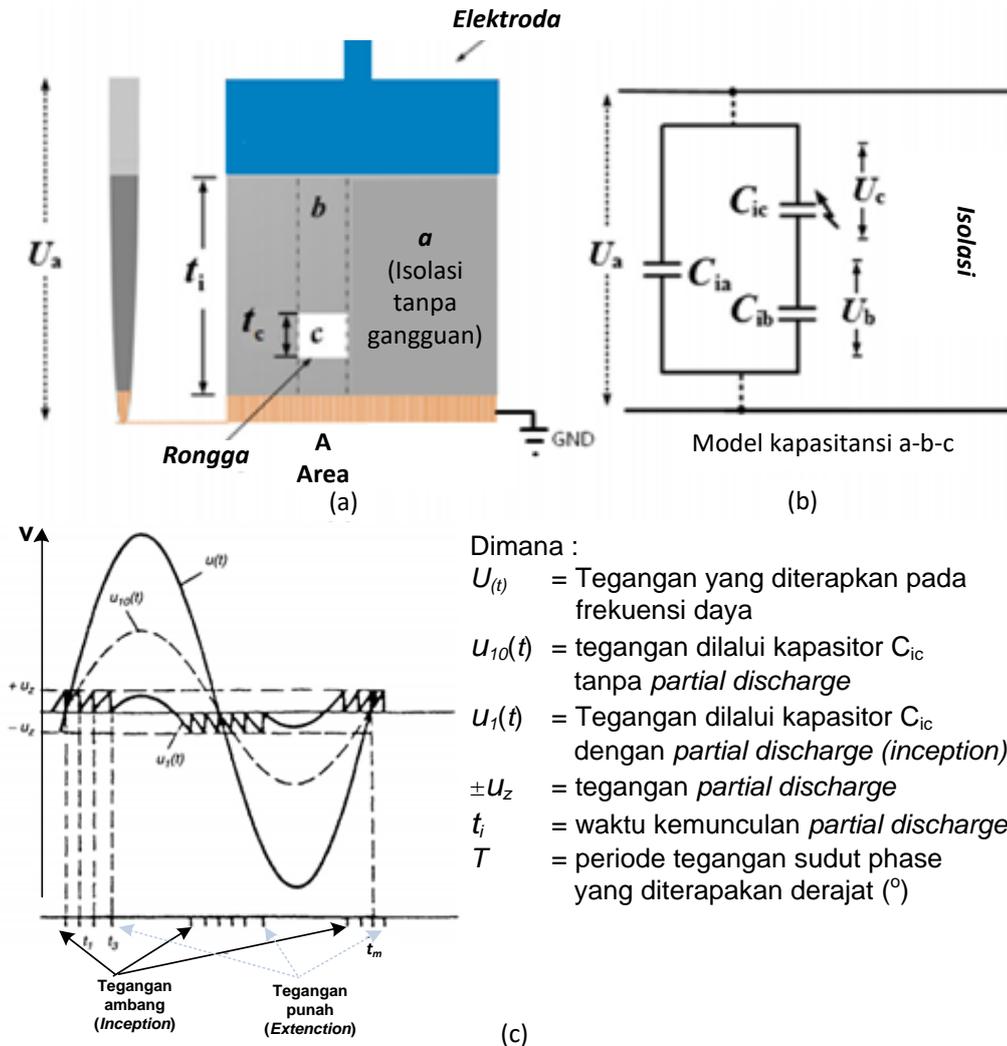
PD dalam isolasi cair terjadi dengan adanya medan listrik tinggi. Elektron dipercepat oleh medan listrik dan mendapatkan energi. Elektron ini mampu mentransfer energi ke molekul lain yang bertabrakan di sekitarnya terutama molekul tunggal. Kemudian, ionisasi atau degradasi molekul yang bertabrakan dapat terjadi. Disosiasi elektrolit yang ditingkatkan dalam medan listrik menyebabkan pembentukan ion dalam sebagian besar cairan. Konsekuensi dari proses PD dapat berupa pemotongan ikatan molekul cair yang mendegradasi dan memecah molekul menjadi lebih pendek. Kemudian, fasa gas dalam dielektrik cair dapat dibentuk dan rongga berisi gas dapat dihasilkan di area terjadinya PD. Tekanan gas di rongga ini awalnya sangat tinggi karena transisi fase sejumlah cairan isolasi ke dalam fase gas. Tekanan tinggi akan berkembang dan berkurang hingga tekanan di dalam sama dengan tekanan di luar cairan. Fenomena antarmuka (*interface*) logam-cair juga merupakan salah satu penyebab utama peningkatan konduktivitas dalam cairan isolasi. Antara permukaan logam-cair dianggap sebagai wilayah akumulasi. Ion dapat meninggalkan wilayah ini dengan meloloskan diri dari penghalang potensial kekuatan dielektrik. Arus injeksi ke dalam sebagian besar cairan tergantung pada tegangan yang diberikan. Pada bahan isolasi cair rongga yang terjadi berbentuk gelembung udara, sedangkan pada bahan isolasi padat, rongga yang terdapat pada bahan isolasi tersebut biasanya diisi oleh udara/gas yang mempunyai permeabilitas bahan lebih rendah dari sekelilingnya. Mekanisme terjadinya PD dapat dijelaskan lebih mendalam dengan

menggunakan ilustrasi seperti pada **gambar 2.16**, pada rongga udara yang terdapat pada bahan isolasi ini terjadi efek kapasitansi secara sebagian. Efek kapasitansi yang terjadi mempunyai kekuatan bahan yang lebih rendah, sehingga menyebabkan intensitas medan yang lebih besar pada rongga tersebut. Intensitas medan yang besar ini bisa menyebabkan busur api. Busur api ini menandakan loncatan muatan pada rongga tersebut. Selanjutnya Busur api akan teredam dan mulai melakukan pengisian muatan sampai menemukan rongga lagi untuk melepaskannya kembali. Fenomena pelepasan muatan yang singkat dan pengisian yang lama ini terjadi secara berulang seperti ini disebut sebagai peluahan sebagian (*partial discharge*). Apabila terjadi secara terus menerus maka akan dapat merusak bahan isolasi. Dalam melakukan pendeteksian PD terjadi pada level tegangan tertentu yang disebut sebagai Tegangan Ambang (*Inception Voltage*) dan tidak terjadi pada level tegangan tertentu yang disebut Tegangan Punah (*Extinction voltage*) apabila tegangan pada sumber yang diterapkan adalah sinusoidal. Syarat terjadinya PD yaitu adanya elektron (muatan) dan jika tekanan medan listrik yang diterapkan melebihi nilai kritis insepasi PD tidak akan ada peluahan sampai sebuah elektron penyebab kebanjiran elektron (*avalanche*) timbul untuk menginisiasi PD. Ketersediaan (*availability*) dari elektron penyebab ini merupakan proses yang stokastik, yang merupakan penyebab dari ciri stokastik dari PD.



Gambar 2.17 Proses peluahan (a) *avalanche* elektron, dan (b) tipikal arus peluahan (korona) (Suwarno, 2011)

Elektron awal dapat muncul dari katoda akibat emisi medan listrik tinggi (elektron 1) atau akibat efek fotoelektrik (elektron 2). Pada logam dengan suhu tinggi elektron-elektron konduksi dengan energi tinggi memiliki energi yang cukup besar terjadi emisi pada penghalang energi potensial yang ada di permukaan bergerak di dalam gas dan menyebabkan terjadinya *electron avalanche* terlihat pada **Gambar 2.17(a)**. Pergerakan elektron dan ion positif berkontribusi terhadap arus peluahan bagian tegangan ambang dan tegangan penuh. **Gambar 2.17(b)** menunjukkan tipikal arus peluahan pada susunan elektroda jarum 3 μm di udara adalah beberapa μA sampai mA sedangkan waktu terjadinya PD beberapa ns. Bagian muka hingga puncak gelombang merupakan arus elektron dengan kecepatan tinggi sedangkan bagian ekor merupakan arus ion positif dengan kecepatan yang lebih rendah. Suatu isolasi padat atau cair dengan rongga berupa gelembung gas atau udara di ilustrasikan dalam rangkaian ekivalen seperti ditunjukkan pada **gambar 2.18(a)** dan **2.18(b)**.



Gambar 2.18 (a) Isolasi dengan rongga, (b) rangkain ekivalen, dan (c) pulsa *partial discharge* (Suwarno, 2011)

Terlihat pada gambar **gambar 2.18(a)** menjelaskan terdapat rongga pada bagian isolasi bahan isolasi, direpresentasikan jarak antar elektroda atau lebar celah yang diisi bahan isolasi adalah sebesar (t_i), dengan luas area sebesar A dan lebar rongga udara yang terjadi adalah t_c . Pada **gambar 2.18(b)** rangkaian ekivalen jika terdapat rongga direpresentasikan C_{ic} adalah kapasitansi dari rongga, C_{ib} adalah kapasitansi yang rusak terjadi

pada daerah sekitar rongga, dan C_{ia} adalah kapasitansi dari bahan dielektrik yang tidak terkontaminasi oleh rongga (Muladi, 2009).

Jika permeabilitas rongga berisi udara adalah 1 maka nilai C_{ic} dapat dihitung dengan persamaan

$$C_{ic} = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{t_c} \quad (2.34)$$

Jika nilai permitivitas vakum (ϵ_0) yaitu $8.854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ dan permitivitas relative bahan (ϵ_r), nilai C_{ib} dihitung dengan persamaan;

$$C_{ib} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{t_i - t_c} \quad (2.35)$$

Maka tegangan pada kapasitor terdapat rongga/void yaitu;

$$U_c = U_a \cdot \left(\frac{C_{ib}}{C_{ib} + C_{ic}} \right) \quad (2.36)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 2.34 dan 2.35 ke dalam 2.12 maka didapatkan persamaan;

$$U_c = \frac{U_a}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \left(\frac{t_i}{t_c} - 1 \right)} \quad (2.37)$$

Maka Intensitas medan listrik yang melalui rongga E_c dihitung dengan persamaan;

$$E_c = E_a \frac{t_i}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \left(\frac{t_i}{t_c} - 1 \right)} \quad (2.38)$$

Dengan melakukan pendekatan $t_c < t_i$ dan $\epsilon_r < 1$ dapat terlihat bahwa tekanan elektrik di dalam rongga menjadi lebih besar dari bahan isolasi di sekelilingnya. Hal ini di dukung dengan fakta bahwa permitivitas bahan dari gas lebih kecil dari bahan isolasi sehingga dapat menimbulkan muatan

lompatan pada kondisi normal. **Tabel 2.2** menunjukkan permitivitas relatif dan kekuatan bahan.

Tabel 2.2 Beberapa nilai permitivitas dan kekuatan bahan isolator

Material	Relative permitivity	Breakdown strength kVmm ⁻¹
Udara (tekanan atmosfer)	1.0006	3
Minyak Transmormator	2.24	12
Bakelite	4,9	24
Polyethylene	2.3	24
Polyurethane	4.0	10
Polystyrene	2.55	24
Plexiglass	3.4	40
Porcelain	7	5.7
Kertas	3.0	9
Mika	6.0	42
Epoxy	4.7	12
Kaca	5.6	14
Neoprene	6.9	12
Paraffin	2.1 - 2.5	10

Sumber : Rubiyanto, 2019

Dari persamaan 2.38 dapat dilihat bahwa tegangan yang melintas sepanjang bahan isolasi di mana kekuatan bahan gas di dalam rongga (E_{cb}) aktivitas PD mulai terjadi pada rongga, dihitung dengan persamaan;

$$U_a = E_{cb} \cdot t_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \left(\frac{t_i}{t_c} - 1 \right) \right) \quad (2.39)$$

Pendekatan dilakukan dengan menganggap rongga berbentuk bola, dimana permitivitas relatif dari gas di dalam rongga (ϵ_{rc}) sehingga di dapatkan persamaan

$$E_c = \frac{3 \cdot \epsilon_r \cdot E_a}{\epsilon_{rc} + 2\epsilon_{rc}} \quad (2.40)$$

Ketika $\epsilon_r > \epsilon_c$ maka persamaan menjadi

$$E_c = \frac{3}{2} \cdot E_a \quad (2.41)$$

Perubahan muatan pada C_{ib} dikarenakan adanya rongga/void di sekitar wilayah kapasitor C_{ic} , sehingga nilai muatan Q_b sebelum tegangan tembus yaitu;

$$Q_b = U_c C_{ic} = U_a \frac{C_{ib}}{C_{ib} + C_{ic}} \quad (2.42)$$

Setelah tegangan tembus Q_b^* yaitu;

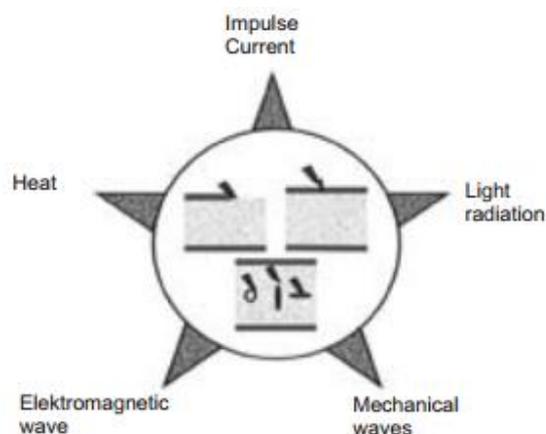
$$Q_b^* = U_a C_{ic} \quad (2.43)$$

Perbedaan muatan dapat dihitung sesuai dengan persamaan

$$\Delta Q = U_a \frac{C_{ib}^2}{C_{ib} + C_{ic}} \quad (2.44)$$

Setiap kali peluahan elektrik terjadi didalam rongga kapasitor C_{ic} akan mendapatkan muatan sampai muatan penuh. Setelah muatan penuh, maka terjadi lompatan atau pemindahan muatan akan dilepaskan menuju kapasitor C_{ib} . Pada saat pelepasan muatan oleh C_{ic} menuju C_{ib} , maka terjadi kekosongan muatan pada kapasitor C_{ic} . Hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan tegangan pada kapasitor C_{ib} dan C_{ia} . Dalam waktu yang cepat, terjadi perpindahan muatan untuk menstabilkan tegangan pada kapasitor C_{ib} . Besar muatan yang dikirim menuju kapasitor C_{ib} inilah yang disebut dengan *apparent charge*. Kenaikan tegangan U_t menyebabkan V_c juga naik hingga mencapai nilai inepsi U_z kemudian terjadi lompatan muatan.

Lompatan muatan menyebabkan jatuhnya tegangan U_c sampai pada titik tertentu dimana perbedaan potensial tidak bisa untuk memindahkan muatan. U_c kembali meningkat sejalan dengan kenaikan tegangan terapan U_t hingga mencapai nilai U_z dimana tegangan terapan terjadi kembali. Dalam hal ini peluahan terjadi selama periode naik positif (+) pada tegangan sinusoidal. Sama halnya dengan periode naik negatif (-) peluahan terjadi apabila tegangan rongga mencapai nilai U_z . Bentuk gelombang seperti pada **gambar 2.18(c)** terjadi apabila terdapat satu rongga tunggal pada bahan isolasi, bila tegangan yang diberikan cukup tinggi maka dimungkinkan terjadi peluahan berkali-kali dalam setengah siklus yang sama. Hal tersebut dapat memberikan pengaruh berupa kelompok pulsa negatif dan positif terhadap arus keluaran akibat kenaikan atau penurunan tegangan secara sinusoidal. *Partial discharge* pada suatu peralatan tegangan tinggi akan mengeluarkan energi dalam berbagai bentuk seperti ditunjukkan pada **gambar 2.19**.



Gambar 2.19 Energi yang dihasilkan oleh PD (Suwarno, 2011)

Aliran elektron dan ion menghasilkan arus peluahan berbentuk impuls. Apabila arus ini diintegrasikan maka diperoleh muatan peluahan. Peluahan akan mengemisikan radiasi terutama dalam kisaran ultra violet (UV). Intensitas UV sangat tergantung dari besar dan jumlah PD. PD merupakan fenomena impuls yang menghasilkan impuls mekanik yang akan merambat dalam bentuk gelombang akustik. Dalam kondisi khusus seperti pada (GIS) gelombang akustik cukup kuat dan dapat dideteksi dalam rangka diagnosis kondisi. PD juga mengemisikan gelombang electromagnet yang dapat dideteksi dengan antena. PD juga menghasilkan panas yang akan menaikkan temperatur di sekitar lokasi terjadinya PD. Sinyal PD dinyatakan dalam besar muatan (q) satuan pico coulombs, pC dan sudut phase $\Phi I = 360 (ti/T)$ dari tegangan dimana PD terjadi. Besarnya nilai PD, dipengaruhi oleh tegangan terapan serta nilai kapasitansi, dalam hal ini nilai kapasitansi dipengaruhi oleh keberadaan void, ukuran void, serta jenis bahan isolasi yang digunakan. Energi yang dihasilkan oleh PD dapat dijadikan sinyal untuk deteksi PD dengan menggunakan sensor yang sesuai seperti ditunjukkan pada **tabel 2.3**.

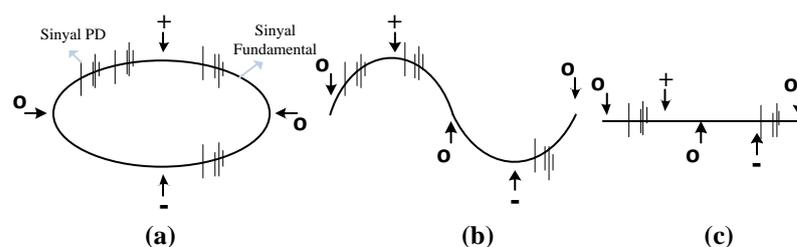
Tabel 2.3 Sinyal PD, sensor dan aplikasi

Sinyal PD	Sensor	Aplikasi
Gelombang Elektro Magnetik	Electroda, Ultra High Filter, & Antena	GIS, Switchgear, Saluran Udara
Tegangan dari impuls arus	Coupling Capacitor	Mesin listrik dan kabel

Arus Impuls	Transformer Arus Frekuensi Tinggi (HFCT)	Transformer & GIS
Suara/vibrasi	Sensor Pockels UV Camera	GIS, Isolator, Transformer
Cahaya	Infra red Camera	Isolator, Mesin listrik

Sumber : Suwarno, 2011

Selain itu adanya banyak sinyal gangguan yang terdeteksi pada detektor sebagai derau, bisa menimbulkan kesalahan persepsi dan berkurangnya sensitifitas pengukuran dalam pengujian. Gangguan yang dimaksudkan ini beraneka macam salah satunya mungkin bisa disebabkan oleh derau dari lingkungan maupun ketidaksempurnaan sistem. Pada suatu siklus tertentu PD disertai dengan komponen fundamental **gambar 2.20**. Pola peluahan elektrik disajikan dalam bentuk pulsa, oleh sebab itu lebar pulsa pada detektor peluahan elektrik sangat menentukan bentuk diagram yang ditampilkan menampilkan bentuk pulsa yang terjadi pada detektor dengan pulsa lebar (*wideband*) pada diagram elips, sinusoidal, dan linear (Suwarno, Partial Discharge in High Voltage Insulating Materials, 2016; Muladi, 2009)



Gambar 2.20 Pola diagram Partial Discharge (a) elips, (b) sinusoidal, dan (c) linear (Yangzhou, 2012)

9. Distribusi Weibull

Teknologi modern telah memungkinkan orang merancang banyak sistem yang rumit penggunaannya atau bergantung pada keandalan berbagai komponen dalam sistem tersebut. Komponen yang sama dalam lingkungan yang sama akan rusak dalam waktu yang berlainan yang tak dapat diramalkan. Salah satu distribusi kontinu dalam teori probabilitas dan statistika data, yaitu distribusi Weibull yang diperkenalkan oleh ahli fisika dari Swedia bernama Waloddi Weibull pada tahun 1939. Distribusi Weibull adalah distribusi penting terutama untuk keandalan (*reliability*) dan analisis rawatan (*maintainability*). Distribusi Weibull mempunyai aplikasi paling luas dalam menganalisa data uji hidup. Data uji hidup atau uji reliabilitas merupakan peluang bahwa komponen tersebut akan berfungsi sebagaimana mestinya, sampai jangka waktu tertentu dalam percobaan yang telah ditentukan. Dalam uji reliabilitas terdapat beberapa fungsi yang digunakan untuk menentukan reliabilitas suatu sistem di antaranya adalah fungsi ketahanan (*survival function*) dan fungsi kegagalan (*failure rate function*). Distribusi lain yang mempunyai aplikasi yang sama dengan distribusi Weibull adalah distribusi Gamma. Namun, kekurangan dari distribusi Gamma adalah memiliki fungsi ketahanan (*survival function*) yang tidak dapat ditentukan bentuk khususnya, kecuali jika parameter bentukannya berupa bilangan asli. Hal ini menyebabkan distribusi Gamma sedikit digunakan dibandingkan dengan distribusi Weibull karena mempunyai fungsi kegagalan dan ketahanan yang lebih sederhana.

Awalnya Weibull memiliki 3 parameter seperti yang di deskripsikan pada Fungsi Probabilitas Kepadatan (PDF) atau disebut juga dengan *reliability function* (Rinne, 2009), dengan persamaan:

$$f(t|\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^{(\beta-1)} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right), \quad t \geq \gamma; \alpha, \beta > 0 \quad (2.45)$$

Dimana β didefinisikan parameter bentuk, α didefinisikan parameter skala, γ didefinisikan parameter lokasi, dan t adalah variabel yang diukur seperti PD atau tegangan tembus. Adapun Weibull dengan versi 2 parameter pada *reliability function*, jika parameter lokasi ($\gamma = 0$) sebagai berikut:

$$f(t|\alpha, \beta, 0) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{(\beta-1)} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right), \quad t \geq 0; \alpha, \beta > 0 \quad (2.46)$$

Parameter skala ($\alpha = 1$);

$$f(t|1, \beta, \gamma) = \beta(t-\gamma)^{(\beta-1)} \exp(-(t-\gamma)^\beta), \quad t \geq \gamma; \beta > 0 \quad (2.47)$$

Parameter bentuk ($\beta = 1$);

$$f(t|\alpha, 1, \gamma) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t-\gamma}{\alpha}\right)\right), \quad t \geq \gamma; \alpha > 0 \quad (2.48)$$

Persamaan (2.46), adalah fungsi yang paling sering ditemukan, disebut versi bentuk skala, karena biasanya t dimulai dari nol. Persamaan (2.47) disebut versi lokasi bentuk, tidak berskala, tapi hanya bergeser. Kemudian persamaan (2.48) disebut versi lokasi skala tidak lain adalah distribusi eksponensial umum.

Selanjutnya Weibull dengan versi satu parameter pada *reliability function*, jika parameter lokasi ($\gamma = 0$) dan skala ($\alpha = 1$) sebagai berikut:

$$f(t|1, \beta, 0) = \beta(t)^{(\beta-1)} \exp(-(t)^\beta), \quad t \geq 0; \beta > 0 \quad (2.49)$$

Parameter lokasi ($\gamma = 0$) dan bentuk ($\beta = 1$) sebagai berikut:

$$f(t|\alpha, 1, 0) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\left(\frac{t}{\alpha}\right)\right), \quad t \geq 0; \alpha > 0 \quad (2.50)$$

Parameter lokasi ($\gamma = 0$) dan skala ($\alpha = 1$) sebagai berikut:

$$f(t|1, 1, \gamma) = \exp(-(t - \gamma)), \quad t \geq \gamma \quad (2.51)$$

Persamaan (2.50) dan persamaan (2.51) tidak lain adalah kasus distribusi eksponensial umum yang diberikan oleh persamaan (2.48), baik hanya bentuk atau skala yang bergeser. Jadi $\beta = 1$ selalu mengarah pada distribusi eksponensial. Persamaan (2.49) versi bentuk disebut kepadatan Weibull yang dikurangi atau dinormalisasi. Selanjutnya berdasarkan IEC 62539: 2007, fungsi distribusi kumulatif $F(t; \alpha, \beta)$ Weibull atau di kenal *unreliability function* sebagai berikut;

$$F(t; \alpha, \beta) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right\} \quad (2.52)$$

Estimasi posisi plot untuk penyelesaian data yang bagus, sederhana, dan cepat untuk persen kegagalan kumulatif yang paling mungkin dengan pendekatan Bernard Aproximation dalam menentukan Median Rank dinyatakan;

$$MR = \frac{j-0.3}{N+0.4} \times 100\% \quad (2.53)$$

Dimana N didefinisikan ukuran sampel dan j didefinisikan urutan sampel dari satu sampai N. Kemudian digambarkan pada kertas khusus disebut *plotting paper Weibull* untuk sumbu y (vertikal) yaitu persen kegagalan kumulatif dan sumbu x (horizontal) yaitu data percobaan (t) (Musdalifa, 2013).

B. HIPOTESA STATE OF THE ART

Adapun beberapa penelitian sejenis yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya adalah sebagai berikut:

Tabel 2.4 State Of The Art

No.	Judul	Penulis	Penerbit	Metode	Hasil
1	Pengaruh Penuaan Elektrik terhadap Karakteristik Tegangan Tembus dan PDIV Minyak NanoNynas	Aulia et al., (2018)	Jurnal Nasional Teknik Elektro, Vol. 7	Pengujian tegangan tembus dielektrik, tegangan insepasi partial discharge (PDIV) minyak nanonynas penambahan nanoalumina variasi konsentrasi suhu ruang	Hasil menunjukkan bahwa tegangan tembus minyak nanonynas meningkat sebesar 6% dan nilai tegangan insepasi dan peluahan sebagian lebih tinggi dibandingkan dengan minyak murni.
2	Statistical Investigation of AC Dielectric Strength of Natural Ester Oil-Based Fe ₃ O ₄ , Al ₂ O ₃ , and SiO ₂ Nano-Fluids	Khaled et al., (2019)	IEEE Access Vol. 7, King Saud University through the International Scientific	Analisis statistik distribusi Weibull dan Normal tegangan tembus minyak nabati MIDELE 1204 penambahan nanomagnetite, nano silica, dan nanoalumina variasi konsentrasi dan ukuran nanopartikel	Peningkatan terbaik tidak melebihi 7%; itu diperoleh dengan Fe ₃ O ₄ (50nm) pada konsentrasi 0,4 g / L dan Al ₂ O ₃ (13 nm) pada konsentrasi 0,05 g / L. Namun penurunan 15% dengan SiO ₂ pada konsentrasi 0,05 g / L. Sementara nilai tegangan tembus nanofluid mengikuti distribusi normal.
3	Statistical investigation of AC breakdown voltage of nanofluids compared with mineral and natural ester oil	Peppas et al., (2016)	IEEE, journal IET Sci. Meas. Technology, vol. 10	Analisis statistik distribusi Weibull dan Gumbel extreme value (GEV) tegangan tembus minyak nabati Envirotemp TM FR3 penambahan nanomagnetite pda variasi konsentrasi dan ukuran nanopartikel	melaporkan bahwa tegangan tembus AC optimal (BDV) dari minyak ester alami Envirotemp TM FR3 berbasis asam oleat berlapis Fe ₃ O ₄ nanofluida diperoleh dengan konsentrasi 0,008% yang mewakili peningkatan sekitar 20% sehubungan dengan minyak dasar (minyak ester alami). Distribusi Weibull lebih baik dari GEV.
4	Investigations on Partial Discharge, Dielectric and Thermal Characteristics of Nano SiO ₂ Modified Sunflower Oil	Nagendran dan Chandrasekar, (2018)	J. Electrical Engineering Technology	Analisa PD, tegangan tembus, viskositas dan konduktifitas minyak biji bunga matahari dengan nanosilika penambahan 0.01 wt% - 0.1	hasil percobaan terlihat bahwa pada saat penambahan nano filler dari 0,01wt% menjadi 0,1wt% dari nano SiO ₂ ke minyak biji buga matahari kemudian terjadi perbaikan pada pola PD, spektrum pulsa, kuat menahan

	for Power Transformer Applications			wt% yang akan dibandingkan minyak mineral	lightning impuls positif, kekuatan tegangan tembus.
5	Investigations on the suitability of rice bran oil and corn oil as alternative insulating liquids for transformers	Kumar et al.,(2015)	IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering Vol. 11	Membandingkan minyak dedak padi dan minyak jagung pada karakteristik tegangan tembus, flash point, fire point, viskositas, nilai asam, resistifitas, dan faktor rugi disipasi	Hasil yang ditunjukkan dengan desain koil didasarkan untuk memaksimalkan gain-bandwidth pada sensor yang terintegrasi maka pengukuran aktivitas dan lokasi PD pada kabel penyulang tegangan menengah lebih baik
6.	Effects of BN nanoparticles on space charge characteristics of vegetable oil	Du, B. X. et al., (2016)	IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)	Metode tahapan termal (TSM) diterapkan untuk menganalisis distribusi muatan ruang pada isolasi minyak nabati yang diperkuat dengan nanopartikel BN.	Kepadatan muatan ruang menunjukkan kecenderungan penurunan yang jelas dengan penambahan nanopartikel BN yang dapat disebabkan oleh peningkatan trap dangkal dan peningkatan transportasi muatan dan disipasi yang sesuai.
7.	Statistical Analysis of Partial Discharge, Lightning Impulse and BDV Characteristics of Nano SiO ₂ -Corn Oil for HV Insulation Applications	Rajeswari et al., (2019)	Journal of Electrical Engineering & Technology	Pengujian karakteristik isolasi minyak jagung yang di tambahkan Nano SiO ₂ pada kasus fenomena PD, Lightning Impulse, dan Breakdown Voltage menggunakan teknik distribusi Weibull	Terlihat bahwa penambahan SiO ₂ nano filler pada konsentrasi %wt berat yang lebih rendah pada kisaran 0,01-0,05% memiliki pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan PDIV, magnitudo PD, BDV dan tegangan gangguan Lightning Impulse dari minyak jagung.
8.	Effect Of Nano-SiO ₂ Particles On Partial Discharge Signal Characteristics Of FR3 Transformer Oil	Prasad & Chandrasekar (2017)	Journal of Advances in chemistry Volume 13 Number 5	Penambahan bahan pengisi nano-SiO ₂ pada isolasi minyak mineral FR3 dengan menggunakan pengujian elektroda jarum bidang dan elektroda batang diukur dengan tegangan yang berbeda.	Hasil pada pengujian menunjukkan penambahan nano-SiO ₂ tingkat konsentrasi %wt pada isolasi minyak FR3 sejumlah 0.01% dapat mengurangi dampak PD korona dan PD permukaan lebih baik dari sebelum penambahan.
9.	Characterization of high performance AlN nanoparticle-based transformer oil nanofluids	Liu et al., (2016)	IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 23	Nanopartikel aluminium nitrida (AlN) dengan 0,079% ϕ <math>< 0,159\%</math> disintesis dengan dua tahap yaitu ball-milling ditambah	Hasil pengukuran DC Tegangan tembus, impuls petir positif, dan PDIV meningkat sekitar 50% dan 20% dibandingkan dengan minyak mineral sementara tegangan tembus arus bolak-balik (AC) menurun

				dengan surface coating pada minyak mineral. Kemudian diuji tegangan tembus, PDIV, Lightning Impuls	sekitar 20-30%. Lebih lanjut, hasil eksperimen menunjukkan bahwa konduktivitas termal meningkat 3-7% karena penambahan nanopartikel AIN.
10.	Partial Discharge Characteristics of Nanofilled Mineral Oil	Jacob et al., (2019)	IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)	Penilaian stabilitas dan analisis karakteristik partial discharge penambahan nanoalumina (0.1 wt% dan 0.03 wt%) dengan dan tanpa surfaktan Oleic acid pada minyak mineral	Nanofluid dengan 0,03wt% nanopartikel dan 0,1wt% asam oleat menunjukkan stabilitas yang menguntungkan, meningkatkan partial discharge, dan kekuatan tegangan tembus yang lebih tinggi
11.	Breakdown and Partial discharge characteristics of Mineral oil-based nanofluids	Muangpratom dan Pattanadetch (2018)	IEEE The Institution of Engineering and Technology Vol. 12	investigasi tegangan tembus dan PD terhadap penambahan nanofluid TiO ₂ dan BaTiO ₃ (konsentrasi 0.01% dan 0.03%) pada minyak mineral	Hasil pengujian menunjukkan bahwa tegangan AC BD dari minyak yang dimodifikasi dengan BaTiO ₃ sedikit lebih unggul dari TiO ₂ dan minyak mineral murni. Selain itu, nanopartikel juga menunjukkan kecenderungan untuk meningkatkan PDIV dari nanofluida dibandingkan dengan PDIV dari MO
12.	Suppression Mechanism of TiO ₂ for the Partial Discharge of Oil-paper Insulation in Intensive Electric Field	Liu et al., (2019)	IEEE 20th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)	Isolasi minyak kertas selulosa yang dimodifikasi oleh nanopartikel TiO ₂ dengan diameter berbeda (5 nm, 10 nm, 20 nm, 30 nm) dan fraksi massa nanopartikel TiO ₂ yang berbeda (1%, 3%, 5%, 7% wt) diinvestigasi fenomena Partial Discharge.	Hasil pengamatan dan pengukuran menunjukkan PDIV meningkat pada awalnya dan kemudian menurun secara proporsional dengan bertambahnya fraksi massa nano-TiO ₂ . Sampel B3 (massa 3% dan diameter 10 nm) memiliki nilai tegangan awal maksimum, yaitu 22,8% lebih tinggi daripada kertas isolasi yang tidak dimodifikasi. Sampel B3 memiliki besaran PD minimum 1422 pC, yaitu 26,5% lebih rendah dibandingkan dengan salah satu kertas isolasi yang tidak dimodifikasi.