

Perancangan Alat dan Pengujian Tegangan Tembus dengan Minyak Isolasi RBDPO Olein Menggunakan Elektroda Bola-Bola

Rudi Setiawan^[1], Fri Murdiya^[2]

^[1]Mahasiswa Program Studi Teknik Elektro S1, ^[2]Dosen Teknik Elektro
Laboratorium Teknik Elektro Universitas Riau
Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km 12,5 Simpang Baru, Panam, Pekanbaru 28293
Email: rudi.setiawan3224@student.unri.ac.id

ABSTRACT

The crude oil based transformer insulation has several issues i.e. non-environment friendly, non-biodegradable, non-renewable, and rarely. Vegetable oil is an alternative transformer insulation which is Crude Palm Oil based RBDPO Olein. This paper proposes study to investigate characteristic the AC breakdown voltage referring to IEC 60156-95 standard to apply sphere electrode of RBDPO Olein prior water content reduction, post water content reduction, and converting fatty acids into Methyl Ester. Breakdown voltage also look into the effect of gap electrode and affectivity of sphere electrode scheme. The experiment has shown the breakdown voltage have increased significantly after various samples of RBDPO Olein being reduction the water content, has compared to IEC 156 standard with the value of (30 kV/2.5 mm). The gap of electrode has shown a significant value on breakdown voltage measurement result. In the mean time to measure the effectivity breakdown voltage of sphere electrode scheme, the Mineral Oil is deployed with complied to IEC 156 standard. The measurement result shows lower than IEC 60156-95 standard was 68,73 %. The experiment also shown the density measurement, the viscosity measurement, the dissolved gas analysis measurement, and dielectric dissipation factor measurement achieve RBDPO Olein less water concentration.

Keywords: RBDPO Olein, Breakdown Voltage, Sphere Electrode, IEC 156 standard, and IEC 60156-95 standard.

1. PENDAHULUAN

Penyediaan sumber energi listrik haruslah handal dan berkesinambungan terutama pada peralatan transformator yang membutuhkan perhatian dan perawatan pada minyak transformator, sebab minyak transformator berfungsi sebagai isolasi dan pendingin didalam transformator. Minyak transformator yang berasal dari minyak bumi memiliki beberapa kekurangan yaitu kurang ramah terhadap lingkungan, sulit terdegradasi secara biologis, produk minyak bumi sewaktu-waktu dapat habis, dan membutuhkan waktu yang lama untuk mendapatkannya [2]. Perlu dipertimbangkan dalam mencari alternatif minyak

transformator yang memenuhi kekurangan dari minyak transformator yang berasal dari minyak bumi. Minyak nabati adalah jenis minyak yang ramah terhadap lingkungan, mudah terdegradasi secara biologis, persediaannya yang melimpah, dan mudah untuk mendapatkannya. Salah satunya minyak nabati yang dipilih adalah minyak berasal dari biji buah kelapa sawit, karena Indonesia merupakan salah satu penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia.

Minyak kelapa sawit adalah jenis minyak nabati yang saat ini diselidiki sebagai minyak isolasi cair pengganti alternatif minyak transformator. Berbagai jenis minyak kelapa sawit

dapat diekstraksi dari biji buah kelapa sawit seperti CPO (*Crude Palm Oil*) dapat diperoleh dari daging buah sawit. CPO dapat lebih disempurnakan menjadi RBDPO Olein (*Refined Bleached and Deodorized Palm Oil*) melalui fraksinasi proses RBDPO [13][16]. RBDPO Olein dapat diperoleh dari produk minyak goreng yang banyak tersedia di pasar tradisional maupun modern. Minyak goreng yang dipilih dalam penelitian ini adalah minyak goreng dengan merek Sunco.

Untuk menyelidiki karakteristik minyak isolasi sebagai pengganti alternatif minyak transformator, peneliti melakukan pengujian tegangan tembus AC terhadap minyak isolasi sesuai dengan standar IEC 60156-95 menggunakan elektroda bola-bola (*sphere*) dengan jarak sela 2,5 mm. Perancangan alat (elektroda bola-bola) yang akan diterapkan dalam pengujian tegangan tembus dibuat dengan ukuran diameter 12,5 mm sesuai standar IEC 156 [9][14]. Perancangan elektroda bola-bola digunakan untuk mengetahui efektifitas terhadap tegangan tembus minyak isolasi yang akan dibandingkan dengan standarisasi yang sama yaitu standar IEC 60156-95. Untuk mengetahui pengaruh jarak sela elektroda bola-bola terhadap tegangan tembus, maka dilakukan pengujian dengan jarak sela 2 mm, 2,5 mm, dan 3 mm.

RBDPO Olein diberikan perlakuan khusus (konversi) dengan pengurangan kadar air dan mengontrol asam lemak, melalui proses reaksi transesterifikasi metanol dengan trigliserida (RBDPO Olein), sehingga menghasilkan 3 molekul Metil Ester yang mungkin berbeda satu sama lain. Kondisi yang sudah terbedakan ini dipandang lebih mudah dikontrol dibandingkan dengan mengontrol rantai asam lemak minyak dalam struktur trigliserida [8]. Hasil dari karakteristik tegangan tembus RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, dan RBDPO Olein setelah menjadi Metil Ester akan dibandingkan dengan jenis Shell Diala B yaitu *Mineral Oil* (MO) untuk menentukan perbandingan

kelayakan RBDPO Olein sebagai pengganti alternatif minyak transformator. Melihat hal-hal di atas, penulis meneliti mengenai: “Perancangan Alat dan Pengujian Tegangan Tembus dengan Minyak Isolasi RBDPO Olein Menggunakan Elektroda Bola-Bola”. Peneliti juga akan melengkapi syarat-syarat yang harus dipenuhi yaitu dengan pengujian densitas, pengujian viskositas, pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA), dan pengujian faktor disipasi dielektrik ($\tan \delta$) [10].

2. TINJAUAN PUSTAKA

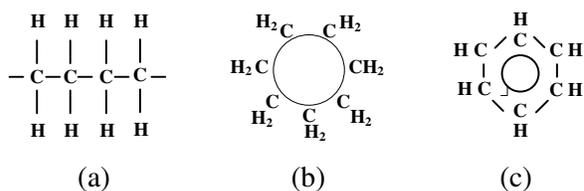
2.1 Minyak Transformator

Isolator atau isolasi merupakan suatu sifat bahan yang mampu untuk memisahkan dua buah penghantar atau lebih yang mempunyai jarak yang berdekatan untuk mencegahnya adanya kebocoran arus atau hubung singkat, dan dapat melindungi sebagai pelindung mekanik dari kerusakan diakibatkan oleh korosif atau tekanan, baik tekanan elektrik ataupun tekanan mekanik. Salah satu isolator pada transformator yaitu isolasi minyak transformator.

Minyak bumi 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 destilasi. 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 [6].

Kelompok minyak bumi berdasarkan struktur molekul hidrokarbon dapat dilihat pada Gambar 1.

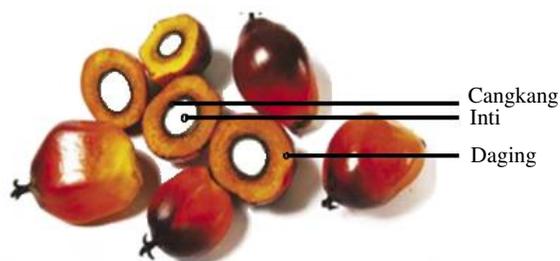


Gambar 1. Struktur hidrokarbon pada minyak mineral. (a) Struktur dari Parafinis, (b) Struktur dari Neftinis, dan (c) struktur dari Aromatik [6].

Minyak bumi memerlukan proses penyulingan sehingga menjadi minyak yang mempunyai kegunaan untuk aplikasi tertentu. Proses minyak bumi menggunakan unit destilasi vakum melalui beberapa proses, yaitu ekstraksi, filtrasi, re-distalasi, 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. Sehingga isolasi minyak harus memiliki beberapa karakteristik supaya dapat menjalankan fungsi sebagai bahan isolasi pada transformator.

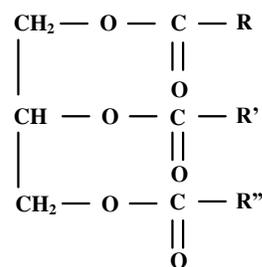
2.2 Minyak Kelapa Sawit

Minyak kelapa sawit dapat diekstraksi dari biji buah kelapa sawit yang tersusun dalam sebuah tandan, biasa disebut dengan TBS (Tandan Buah Segar). Buah sawit dibagian sabut (Daging Buah atau *Mesocarp*) dapat menghasilkan minyak sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO) sebanyak 20 – 24 %. Sementara itu, bagian inti biji sawit dapat diekstraksi menjadi minyak inti sawit atau *Palm Kernel Oil* (PKO) sebanyak 3 – 4 % [11].



Gambar 2. Biji Buah Kelapa Sawit [16].

Minyak sawit mentah atau *Crude Palm Oil* (CPO) dapat di sempurnakan menjadi RBDPO Olein (*Refined Bleached and Deodorized Palm Oil*) yang artinya proses pemurnian, pemucatan dan menghilangkan bau. RBDPO Olein dapat di produksi melalui fraksinasi proses RBDPO [16].

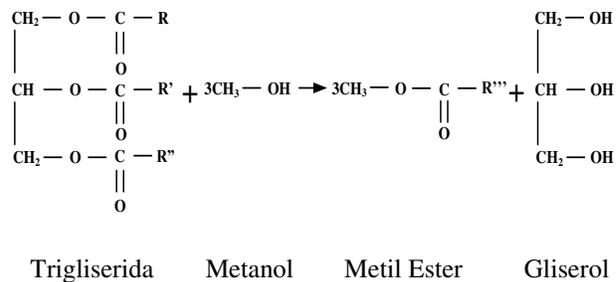


Gambar 3. Struktur Trigliserida Minyak Nabati (Ester Alami) [13].

2.3 Metil Ester

Asam lemak di dalam RBDPO Olein dapat lebih mudah di kontrol dengan proses reaksi transesterifikasi metanol dengan trigliserida

(RBDPO Olein) sehingga menghasilkan 3 molekul Metil Ester yang mungkin berbeda satu sama lain. Kondisi yang sudah terbedakan ini dipandang lebih mudah dikontrol dibandingkan dengan mengontrol rantai asam lemak minyak dalam struktur trigliserida. Reaksi transesterifikasi trigliserida menjadi Metil Ester adalah sebagai berikut:



Gambar 4. Struktur kimia proses transesterifikasi [8].

Transesterifikasi juga menggunakan katalis dalam reaksinya. Tanpa adanya katalis, konversi yang dihasilkan maksimum namun reaksi berjalan dengan lambat. Katalis yang biasa digunakan pada reaksi transesterifikasi adalah katalis asam kuat atau katalis basa kuat, karena katalis ini dapat mempercepat reaksi.

2.4 Mekanisme Kegagalan Isolasi Cair di Transformator

Isolasi berfungsi sebagai pemisah antara bagian yang mempunyai beda potensial sehingga diantara bagian tersebut tidak terjadi percikan (*spark over*) atau lompatan listrik (*flash over*). Kegagalan isolasi pada peralatan listrik dapat menyebabkan kerusakan sehingga kontinuitas pada sistem tenaga listrik terganggu. Kegagalan isolasi cair berupa lompatan listrik pada media isolasi cair akan menyebabkan pembentukan gelembung gas, pembentukan butiran zat padat hasil dekomposisi zat cair, dan pembentukan lubang pada konduktor.

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, dan teori butiran padat pada isolasi cair [6].

2.5 Syarat Minyak Transformator

Berikut adalah persyaratan yang harus dipenuhi oleh minyak transformator agar dapat menjalankan fungsinya dengan baik, antara lain: Kekuatan isolasi tinggi, massa jenis (*density*) yang rendah, viskositas kinematik rendah, titik nyala (*flash point*) tinggi, titik tuang (*pour point*) serendah mungkin, angka kenetralan yang baik, stabilitas oksidasi tinggi, kandungan air yang rendah, tegangan tembus (*breakdown voltage*) tinggi, faktor kebocoran dielektrik (DDF) yang baik, dan tahanan jenis (*resistivity*) tinggi [10].

3. METODE PENELITIAN

3.1 Peralatan dan Prosedur Penelitian

Eksperimen dilakukan dengan tahap sebagai berikut: pengurangan kadar air, pembuatan metil ester, pengujian tegangan tembus termasuk pengaruh jarak sela elektroda dan efektifitas perancangan alat (elektroda bola-bola), pengujian densitas, pengujian viskositas, pengujian DGA, dan pengujian $\tan \delta$.

3.1.1 Pengurangan Kadar Air

Peralatan penting dalam pengurangan kadar air pada minyak adalah: Oven, neraca analitik, dan gelas kimia. Oven digunakan untuk memanaskan dan mengurangi kadar air minyak isolasi dengan suhu 105 °C. Neraca analitik digunakan untuk menimbang gelas ukur (*glass breaker*) yang nantinya akan di isi dengan minyak isolasi. Gelas kimia digunakan sebagai wadah untuk mengukur dan menampung bahan kimia atau larutan ke dalam oven.

Pengurangan kadar air dilakukan dengan cara mengoven RBDPO Olein (minyak goreng Sunco) dengan suhu 105 °C selama ± 15 menit, kemudian diukur menggunakan neraca analitik

sampai berat minyak isolasi konstan (pengukuran dilakukan secara berulang-ulang agar minyak benar-benar dalam keadaan konstan).

3.1.2 Pembuatan Metil Ester

Peralatan penting yang digunakan dalam pembuatan Metil Ester adalah sebagai berikut: *Water bath*, reaktor, gelas kimia, corong pemisah, neraca analitik pipet tetes, dan termometer. *Water bath* merupakan peralatan yang berisi air yang bisa mempertahankan suhu air pada kondisi tertentu selama selang waktu yang ditentukan berfungsi sebagai pemanasan pada suhu rendah 30 °C sampai 100 °C dan menguapkan zat atau larutan dengan suhu yang tidak terlalu tinggi. Reaktor merupakan tangki berpengaduk untuk mencampurkan minyak RBDPO Olein, metanol, dan katalis. Gelas kimia digunakan sebagai wadah untuk mengukur dan menampung bahan kimia atau larutan. Corong pemisah digunakan untuk memisahkan larutan dan gas. Neraca analitik digunakan untuk mengukur berat bahan kimia, larutan dan sebagainya. Pipet tetes digunakan untuk memindahkan beberapa tetes zat cair. Termometer digunakan untuk mengukur suhu (temperatur) didalam minyak.

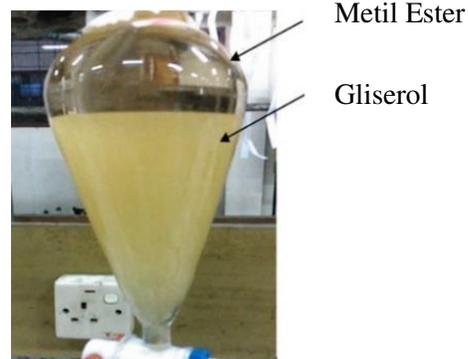
Sedangkan bahan yang digunakan untuk pembuatan Metil Ester adalah sebagai berikut:

1. RBDPO Olein (Minyak Sunco).
2. Metanol Teknis.
3. Asam Sulfat (H_2SO_4).
4. Aquades.

Prosedur dalam pembuatan Metil Ester secara singkat dapat dijelaskan sebagai berikut : RBDPO Olein sebanyak 600 gr dimasukkan ke dalam reaktor transesterifikasi, memanaskan minyak sampai suhu 60 °C, menambahkan metanol dengan perbandingan 1:6 molar ratio terhadap minyak, memasukan katalis H_2SO_4 sebanyak 3 % massa minyak, melakukan proses pengadukan selama 1 jam dalam reaktor transesterifikasi disertai pemanasan pada suhu 60 °C, memasukkan serta

mendiamkan campuran pada corong pemisah selama 2 jam atau lebih, memisahkan lapisan atas (Metil Ester) dengan lapisan bawah (Gliserol). Selanjutnya adalah proses pencucian yaitu melakukan pencucian di dalam corong pemisah dan dilakukan penambahan aquades dengan perbandingan 1 : 3 dan dikocok selama 15 menit, kemudian dilakukan proses pemisahan dari corong pemisah tersebut sehingga terpisah antara metil ester dan gliserol serta metanol yang terlarut.

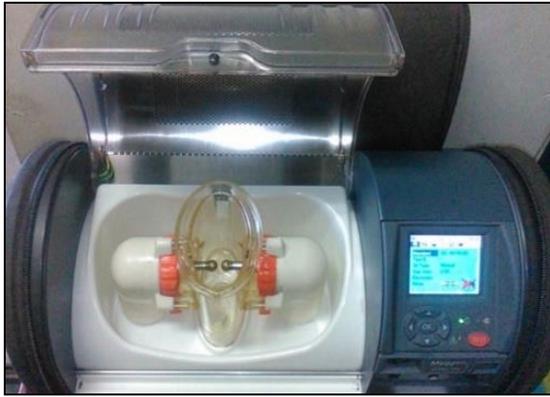
Gambar 5. merupakan hasil dari proses transesterifikasi yang telah dimasukkan kedalam corong pemisah. Terlihat bahwa Metil Ester terpisah dengan gliserol.



Gambar 5. Terpisahnya Metil Ester dan Gliserol.

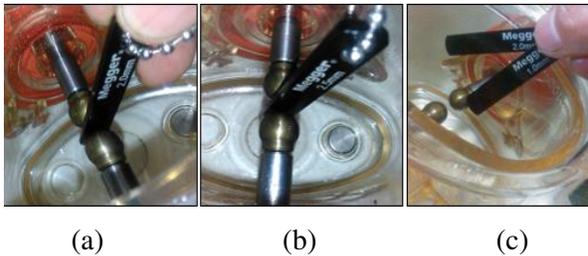
3.1.3 Pengujian Tegangan Tembus

Setelah sampel RBDPO Olein sudah dilakukan konversi pengurangan kadar air dan mengontrol asam lemak minyak menjadi Metil Ester, sampel dilakukan pengujian tegangan tembus dengan alat Megger OTS80PB menggunakan elektroda bola-bola (*sphere*) dengan standar IEC 60156-95 sumber tegangan AC (bolak-balik). Berikut merupakan gambar dari alat Megger OTS80PB di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper*, Perawang lihat Gambar 6. dibawah ini.



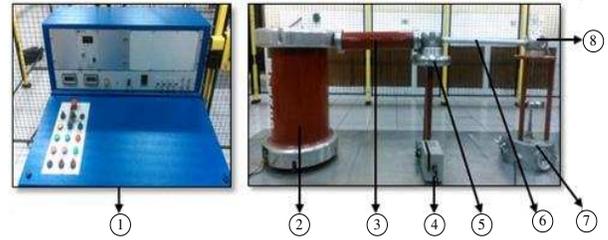
Gambar 6. Megger OTS80PB.

Dalam melakukan pengujian tegangan tembus peneliti memvariasikan jarak sela elektroda yaitu 2,5 mm (standar IEC 60156-95), 2 mm, dan 3 mm. Berikut Gambar 7. dibawah ini merupakan pengukuran jarak sela elektroda bola.



Gambar 7. Pengukuran jarak sela elektroda bola. (a) Jarak 2 mm, (b) Jarak 2,5 mm, dan (c) Jarak 3 mm.

Untuk mengetahui efektifitas tegangan tembus dari perancangan alat berupa elektroda bola-bola (lihat Gambar 9.) yang dibuat peneliti, maka hasil perancangan elektroda bola-bola dibandingkan dengan pengujian tegangan tembus yang dilakukan berdasarkan standar IEC 60156-95 dengan jarak yang sama yaitu 2,5 mm. Berikut merupakan peralatan pengujian tegangan tembus (TERCO Test tegangan tinggi AC) di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau.



Gambar 8. TERCO Test tegangan tinggi AC.

Keterangan:

1. Meja Kontrol
2. Transformator Uji
3. *Grounding Switch*
4. *Conncting Cup*
5. *Floor Padestal*
6. Tongkat Penghubung
7. Resistor 2,5 MΩ
8. *Eart Rod*

3.1.3.1 Perancangan Alat

Perancangan alat dalam penelitian ini adalah merancang elektroda bola-bola yang akan diterapkan untuk pengujian tegangan tembus. Ukuran elektroda dirancang dengan ukuran diameter 12,5 mm dan material bahan elektroda terbuat dari bahan kuningan (sesuai standar IEC 156) lihat Gambar 9. Elektroda bola juga dirancang agar dapat memvariasikan jarak sela elektroda bola. Berikut merupakan gambar dari perancangan elektroda bola-bola dan wadah uji yang digunakan dalam pengujian tegangan tembus menggunakan peralatan TERCO Test dengan sumber tegangan AC:



Gambar 9. Perancangan elektroda bola-bola dan wadah uji.

3.1.3.2 Prosedur Pengujian Tegangan Tembus

Prosedur pengujian yang harus diperhatikan sebelum melakukan pengujian tegangan tembus isolasi cair menurut IEC 156 antara [1]: (1). Persiapan Sampling: Sesegera mungkin sebelum mengisi kotak uji, sampling harus dikocok berulang kali secara lembut untuk memastikan adanya homogenisasi kontaminan cairan tanpa menimbulkan gelembung udara pada cairan. (2). Pengisian Kotak Uji: Sebelum melaksanakan pengujian, bersihkan kotak uji, dinding-dindingnya, elektroda dan komponen lainnya. Kemudian tuang kedalam kotak uji secara perlahan dan hindari terjadinya gelembung-gelembung udara. (3). Pemberian Tegangan: Berikan tegangan pada elektroda dengan kenaikan yang seragam (konstan) dimulai dari 0 V sampai sekitar 2,0 kV/dt \pm 0.2 kV/dt sampai timbul tegangan tembus. (4). Pencatatan data: Melakukan 6 kali percobaan tembus pada kotak uji yang sama dengan jeda sekurang-kurangnya 2 menit dari setiap pengujian baru kemudian diulang kembali. Pastikan tidak muncul gelembung udara diantara jarak sela. Kecuali jika menggunakan pengaduk maka percobaan dapat dilakukan secara terus-menerus. Dalam penelitian ini percobaan diulangi sebanyak 3 kali menjadi 18 kali percobaan untuk memastikan hasil. (5). Laporan: Data yang dimasukkan dalam laporan adalah hasil dari nilai rata-rata dari 18 kali percobaan yang sudah dilakukan.

3.1.4 Pengujian Densitas

Peralatan penting dalam pengujian densitas adalah: Neraca analitik digunakan untuk menimbang gelas ukur (*glass breaker*) yang nantinya akan di isi dengan minyak isolasi. Piknometer digunakan sebagai wadah minyak isolasi yang sudah disertai termometer untuk mengukur suhu uji. Prosedur untuk melakukan pengujian densitas adalah sebagai berikut: Menimbang piknometer dengan neraca analitik nyatakan hasilnya sebagai m_1 , mengisi gelas ukur

dengan minyak sampai volume tertentu (v), mengukur massa piknometer yang berisi minyak menggunakan neraca analitik lalu nyatakan hasilnya sebagai m_2 , menghitung massa minyak dari selisih m_2 dan m_1 , selanjutnya menghitung massa minyak (ρ).

3.1.5 Pengujian Viskositas

Peralatan penting dalam pengujian viskositas (kekentalan) adalah: Viskometer digunakan untuk mengukur viskositas minyak. Gelas ukur digunakan sebagai wadah minyak. Termometer digunakan untuk mengukur suhu minyak. *Stopwatch* untuk menghitung waktu lama laju minyak. Prosedur dari pengujian viskositas adalah sebagai berikut: Minyak dimasukkan kedalam viskometer, memasang *ball filler* pada ujung viskometer tempat laju aliran (titik S), keluarkan oksigen pada *ball filler* dengan cara menekan pada titik A (batas atas) di *ball filler*, tekan titik S pada *ball filler* agar minyak laju melewati batas atas viskometer, menghitung laju minyak dari titik A (batas atas) ke titik B (batas bawah) menggunakan *stopwatch*, dan selanjutnya mencatat angka dan hitung menggunakan rumus.

3.1.6 Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA)

Alat yang digunakan untuk mengetahui kandungan gas terlarut didalam minyak adalah TRANSPORT X. Prosedur untuk melakukan pengujian *Dissolved Gas Analysis* minyak isolasi: memastikan *syringe*, *lid assembly*, dan botol yang bersih, membaca dan mengikuti instruksi di *display* alat TRANSPORT X secara hati hati, sampel minyak dimasukkan ke dalam *syring* maksimal sebanyak 50 mL, meletakkan satu *magnetic stirrer piece* di dalam botol sampel agar analisa sampel benar, mengikuti proses injeksi sampel dan jangan menggerakkan botol sampai pengujian selesai, jika botol digerakkan maka akan mempengaruhi hasil, minyak didalam *syrenge* dimasukkan kedalam botol sampel, ketika berisi minyak botol sampel

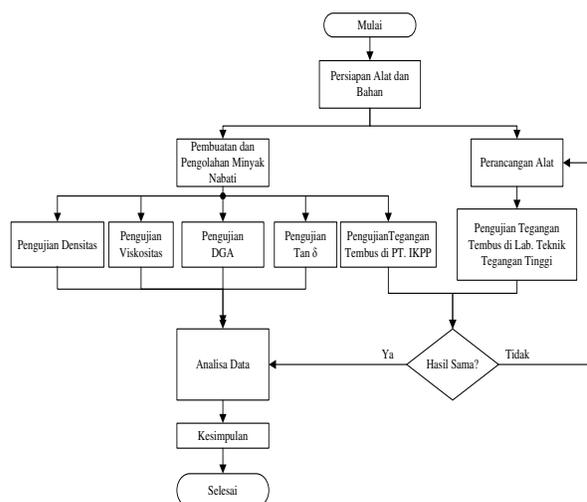
harus pada posisi tegak atau berdiri untuk menghindari minyak masuk ke dalam pipa *inlet* dan *outlet*, menunggu waktu selama ± 20 menit untuk mendapatkan hasil analisa dari alat TRANSPORT X, dan setelah hasil keluar menganalisa kondisi kandungan didalam minyak.

3.1.7 Pengujian Faktor Disipasi Dielektrik (Tan δ)

Peralatan yang digunakan untuk mengukur faktor disipasi dielektrik minyak isolasi adalah *Doble Test Analysis (DTA) M4100*. Prosedur untuk melakukan pengujian faktor disipasi dielektrik minyak isolasi: mempersiapkan peralatan *Doble Test Assistant (DTA) M4100* dan *Software M 4000*, minyak dimasukkan kedalam wadah, menginjak tegangan sebesar 5 kV menggunakan *Software M 4000* dan peralatan DTA, kemudian lakukan percobaan terhadap minyak, dan setelah mendapatkan hasil dengan menginjak tegangan sebesar 5 kV, tegangan dinaikkan sebesar 6 kV, 7 kV, dan 10 kV untuk mendapatkan hasil *power factor* setiap kenaikan tegangan.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan gambar diagram alir pada penelitian ini:



Gambar 12. Diagram alir penelitian.

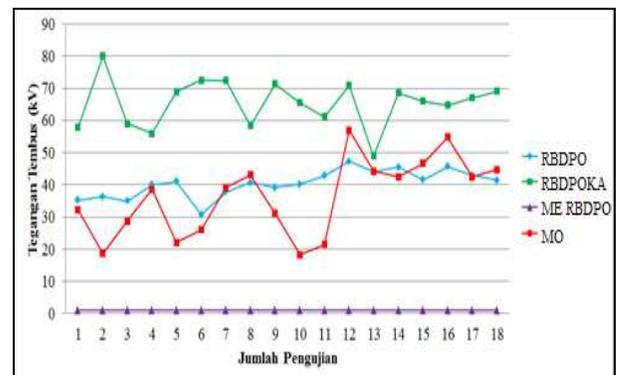
4. HASIL PENELITIAN

4.1 Karakteristik Pengujian Tegangan Tembus

Karakteristik pengujian tegangan tembus dilakukan berdasarkan standar IEC 60156-95 menggunakan elektroda bola-bola (*sphere*) dengan jarak sela elektroda 2,5 mm. Karakteristik yang diteliti pada eksperimen ini adalah karakteristik terhadap minyak isolasi dan pengaruh jarak sela elektroda bola-bola.

4.1.1 Karakteristik Pengujian Tegangan Tembus Minyak Isolasi

Berikut Gambar 13. merupakan kurva karakteristik pengujian tegangan tembus AC pada minyak isolasi RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air (disingkat RBDPO), RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air (disingkat RBDPOKA), Metil Ester (disingkat ME RBDPO), dan *Mineral Oil* sebagai pembanding (disingkat MO):



Gambar 13. Kurva karakteristik pengujian tegangan tembus minyak isolasi.

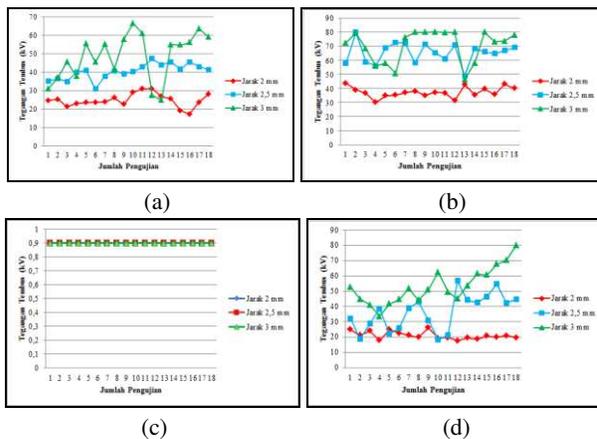
Dari hasil kurva diatas dapat disimpulkan bahwa karakteristik minyak yang paling baik adalah RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air yaitu 65,44 kV, selanjutnya RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air mencapai 40,4 kV, kemudian *Mineral Oil* yang digunakan sebagai

pembandingan mencapai 36,19 kV, dan Metil Ester mencapai 0,9 kV.

Sesuai dengan standarisasi IEC 156 tegangan tembus yang harus dipenuhi untuk spesifikasi minyak isolasi baru adalah 30 kV/2.5 mm, dapat disimpulkan bahwa minyak yang paling memenuhi standart tersebut adalah RBDPO Olein setelah dan RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air.

4.1.2 Karakteristik Pengujian Tegangan Tembus Pengaruh Jarak Sela Elektroda Bola-Bola

Berikut merupakan gambar grafik hasil pengujian tegangan tembus minyak isolasi dengan variasi jarak sela elektroda bola-bola:



Gambar 14. Kurva karakteristik pengujian tegangan tembus pengaruh jarak sela elektroda bola. (a) RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, (b) RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, (c) Metil Ester, dan (d) *Mineral Oil*.

Dari gambar grafik diatas memperlihatkan bahwa jarak sela elektroda bola-bola terhadap tegangan tembus minyak isolasi. Dapat ditunjukkan bahwa bertambahnya jarak sela elektroda diikuti dengan semakin besarnya tegangan tembus yang dihasilkan, sehingga dapat disimpulkan bahwa kekuatan kegagalan dari minyak isolasi tergantung pada besarnya jarak sela antar kedua elektroda.

Hubungan antara tegangan tembus dan besar jarak sela elektroda dapat dilihat pada persamaan 1 berikut [7]:

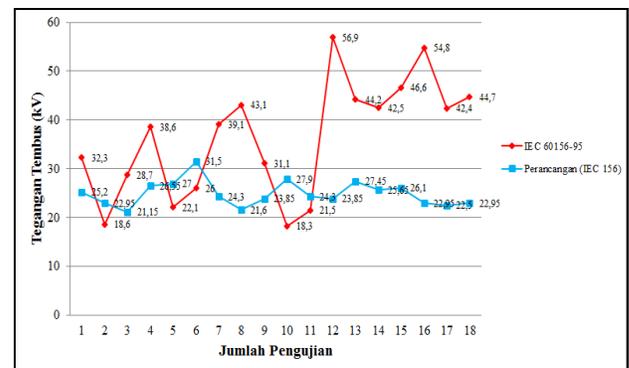
$$V_b = A \cdot d^n \dots \dots \dots (1)$$

Dari persamaan diatas dapat diketahui bahwa besar jarak sela berbanding lurus dengan tegangan tembusnya. Hal ini dapat dianalisa sebagai berikut apabila jarak sela antar elektroda bola semakin besar, maka dibutuhkan energi yang semakin besar pula untuk mencapai terjadinya kegagalan pada minyak isolasi yang membuat nilai tegangan tembus juga semakin besar.

Hasil Metil Ester tidak berpengaruh terhadap jarak sela elektroda bola, hal ini disebabkan hasil dari pengujian tegangan tembus minyak tersebut sangat kecil yaitu sebesar 0,9 kV. Kecilnya tegangan tembus minyak ini membuat alat Megger OTS80PB tidak mampu mengukur secara akurat.

4.2 Efektifitas Perancangan Alat

Hasil dari efektifitas perancangan elektroda bola-bola standar IEC 156 terhadap pengujian tegangan tembus dibandingkan dengan alat Megger OTS80PB di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper* menggunakan elektroda bola-bola (*stirer*) sesuai standar IEC 60156-95, lihat pada Gambar 15. berikut ini merupakan hasil efektifitas perancangan elektroda bola-bola yang menggunakan *Mineral Oil* (MO) sebagai media isolasinya:

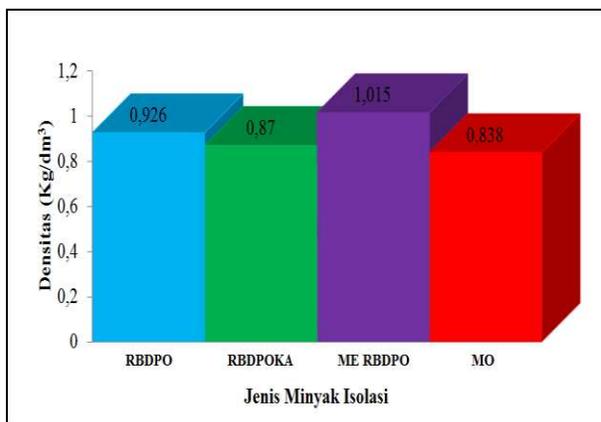


Gambar 15. Efektifitas perancangan elektroda bola-bola terhadap tegangan tembus dengan MO.

Hasil pengujian tegangan tembus dari perancangan alat sesuai standar IEC 156 hasil rata-ratanya mencapai 24,88 kV sementara hasil pengujian tegangan tembus berdasarkan standar IEC 60156-95 hasil rata-ratanya mencapai 36,2 kV. Persentase efektifitas alat mencapai 68,73 % selisih 11,32 kV, hasil ini mandekati dan memiliki selisih yang tidak terlalu jauh dari pengujian tegangan tembus berdasarkan standar IEC 60156-95. Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengujian yaitu dari minyak isolasi, pengaruh suhu, kontaminasi alat, permukaan elektroda yang tidak rata, dan kualitas peralatan pengujian tegangan tinggi di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Teknik Elektro, Universitas Riau berbeda dengan alat di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper*, Perawang, Kabupaten Siak, Riau.

4.3 Pengujian Densitas

Hasil pengujian densitas (massa jenis) minyak isolasi dapat dilihat pada Gambar 16. berikut ini:



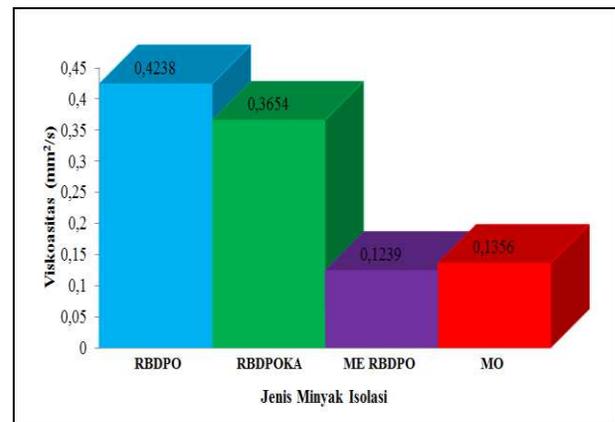
Gambar 16. Hasil pengujian densitas minyak isolasi.

Berdasarkan ISO 12186 hasil pengujian densitas maksimal yang harus diperoleh adalah 0,875 kg/dm³ [6]. Hasil pengujian densitas terhadap RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air menunjukkan bahwa nilai melebihi standar ISO 12186 yaitu mencapai 0,926 kg/dm³, tetapi semakin

baik RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air yaitu mencapai 0,870 kg/dm³, sedangkan hasil RBDPO Olein menjadi Metil Ester hasilnya kurang begitu baik yaitu mencapai 1,015 kg/dm³ dan sedangkan *Mineral Oil* sebagai pembanding mencapai 0,838 kg/dm³. Maka dapat disimpulkan bahwa pengujian densitas RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air memiliki densitas yang baik untuk menjadi alternatif minyak transformator, karena hasil menunjukkan < 0,875 kg/dm³.

4.4 Pengujian Viskositas

Hasil pengujian viskositas (kekentalan) minyak isolasi dapat dilihat pada Gambar 17. berikut ini:

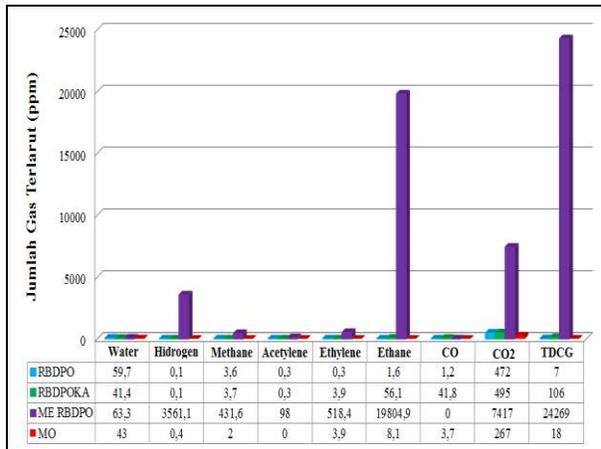


Gambar 17. Hasil pengujian viskositas minyak isolasi.

Berdasarkan ISO 3104 hasil pengujian viskositas maksimal yang harus diperoleh adalah 9,6 mm²/s [6]. Hasil pengujian viskositas menunjukkan bahwa RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, setelah pengurangan kadar air, dan Metil Ester menunjukkan hasil yang baik yaitu < 9,6 mm²/s. Hasil pengujian terhadap RBDPO Olein mencapai 0,4238 mm²/s, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air mencapai 0,3654 mm²/s, Metil Ester mencapai 0,1239 mm²/s, dan *Mineral Oil* sebagai pembanding mencapai 0,1356 mm²/s.

4.5 Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA)

Gambar 18. berikut merupakan grafik dari hasil dari pengujian analisis kandungan gas terlarut (*Dissolved Gas Analysis*) didalam minyak isolasi:



Gambar 18. Hasil pengujian *Dissolved Gas Analysis* minyak isolasi.

Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) dilakukan untuk mendeteksi gangguan gas terlarut didalam RBDPO Olein sebelum dan RBDPO Olein setelah hasil konversi yaitu pengurangan kadar air dan menjadi Metil Ester, pengujian DGA juga dapat mendeteksi kandungan air didalam RBDPO Olein sebelum dan setelah hasil konversinya. Hasil pengujian RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air memiliki kandungan air 59,7 ppm, hidrogen (H_2) 0,1 ppm, methane (CH_4) 3,6 ppm, acetylene (C_2H_2) 0,3 ppm, ethylene (C_2H_4) 0,3 ppm, ethane (C_2H_6) 1,6 ppm, carbon monoxida (CO) 1,2 ppm, carbon dioxide (CO_2) 472 ppm, dan TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*) atau total gas terlarut yang mudah terbakar 7 ppm. Hasil ini dapat disimpulkan sangat baik, karena tidak melebihi batas *High Limit* yaitu 720 ppm (IEEE std.C57-104.2008).

Hasil pengujian RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air memiliki kandungan air sebanyak 41,4 ppm dan mengalami kenaikan kandungan gas didalamnya yaitu CH_4 menjadi 3,7 ppm, C_2H_4 menjadi 3,9 ppm, C_2H_6 menjadi 56,1

ppm, CO menjadi 41,8 ppm, CO_2 menjadi 495 ppm, dan TDCG menjadi 106 ppm. Hasil ini dapat disimpulkan bahwa pengaruh RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air dapat meningkatkan kandungan gas didalam minyak terlihat meningkatnya nilai TDCG, nilai TDCG RBDPO Olein < 720 ppm sehingga masih dikatakan sangat baik.

Hasil pengujian RBDPO Olein setelah menjadi Metil Ester memiliki kandungan air (63,3 ppm), dan mengalami kenaikan yang sangat signifikan terhadap kandungan gas yaitu H_2 menjadi 3561,1 ppm, CH_4 menjadi 431,6 ppm, C_2H_2 menjadi 98 ppm, C_2H_4 menjadi 518,4 ppm, C_2H_6 menjadi 19804,9 ppm, CO berkurang menjadi 0 ppm, CO_2 7417 ppm, dan TDCG 24269 ppm. Hasil Metil Ester terjadi pemburukan yang sangat besar, nilai TDCG melebihi batas *High High Limit* yaitu > 1920 ppm (IEEE std.C57-104.2008), dapat disimpulkan bahwa Metil Ester memiliki kandungan-kandungan gas yang sangat berbahaya sehingga tidak layak digunakan sebagai pengganti alternatif minyak transformator.

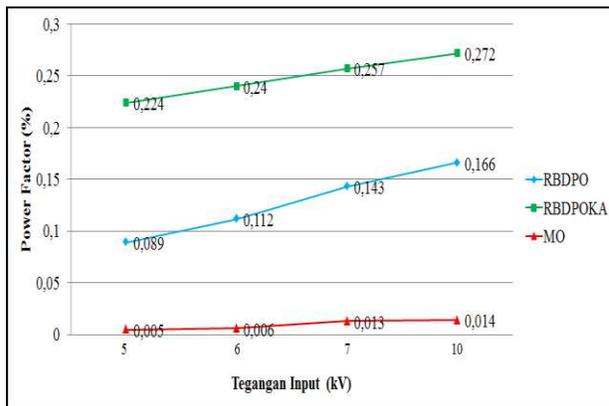
Mineral Oil (MO) yang digunakan sebagai pembanding memiliki kandungan air sebanyak 43 ppm, dan kandungan H_2 (0,4 ppm), CH_4 (2 ppm), C_2H_2 (0 ppm), C_2H_4 (3,9 ppm), C_2H_6 (8,1 ppm), CO (3,7 ppm), CO_2 (267 ppm), dan TDCG (18 ppm).

Dari hasil pengujian DGA dapat diambil kesimpulan bahwa nilai TDCG RBDPO Olein sebelum dan setelah hasil konversi mengalami kenaikan yang sangat signifikan, RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air nilai TDCG yaitu mencapai 7 ppm, setelah RBDPO Olein dilakukan pengurangan kadar air nilai TDCG mengalami kenaikan yaitu mencapai 106 ppm, dan nilai TDCG mengalami kenaikan dan terjadi pemburukan setelah RBDPO Olein di konversi menjadi Metil Ester yaitu mencapai 24269 ppm (melebihi batas *High High Limit*). Sedangkan MO yang digunakan sebagai pembanding nilai TDCG yaitu mencapai 18

ppm (tidak lebih baik dari RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air).

4.6 Pengujian Faktor Disipasi Dielektrik (Tan δ)

Hasil pengujian Faktor Disipasi Dielektrik (tan δ) RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, dan *Mineral Oil* sebagai pembandingan pada tegangan 5 kV, 6 kV, 7 kV, dan 10 kV dengan menggunakan alat *Doble Test Analysis* (DTA). Untuk mengetahui karakteristik tan δ terhadap peningkatan tegangan ditunjukkan pada Gambar 19. berikut:



Gambar 19. Hasil pengujian tan δ minyak isolasi.

Berdasarkan Gambar 19. menunjukkan peningkatan nilai pF (*power factor*) pada sampel RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air (0,089% hingga 0,166%), RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air (0,224% hingga 0,272%), dan *Mineral Oil* sebagai pembandingan (0,005% hingga 0,014%) memiliki pengaruh terhadap kenaikan tegangan yaitu tegangan 5 kV, 6 kV, 7 kV, dan 10 kV. Nilai pF yang semakin meningkat memberi arti bahwa kehilangan daya atau rugi-rugi bahan isolasi (RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, dan *Mineral Oil*) dalam bentuk panas (*dissipation losses*) menjadi besar.

Rugi-rugi bahan isolasi (RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, dan *Mineral Oil*) dalam bentuk panas akan menaikkan temperatur, dan pada akhirnya dapat mempercepat penuaan (memperburuk kualitas isolasi) minyak hidrolik sebagai isolasi cair [15]. Dengan demikian, peningkatan tegangan akan mengakibatkan rugi-rugi minyak isolasi dalam bentuk panas menjadi semakin besar.

Dari hasil pengujian tan δ yang diperoleh RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air dan RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, nilai *power factor* (pF) melebihi standarisasi dari minyak isolasi baru yaitu 0,05 % (standar C57-106.2006). Dibandingkan dengan *Mineral Oil* yang telah memenuhi persyaratan minyak isolasi baru. RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air dan RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air masih memiliki peluang sebagai pengganti alternatif minyak transformator karena nilai pF tidak melebihi standarisasi minyak isolasi yang sudah dipakai yaitu 0,5 % (standar C57-106.2006).

5. KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tegangan tembus minyak Sunco (RBDPO Olein) sebelum dan setelah mengurangi kadar air menunjukkan hasil yang sangat baik, RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air yaitu mencapai 40,4 kV dan RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air yaitu mencapai 65,44 kV artinya tegangan tembusnya melebihi 30 kV (standar IEC 156 dan SPLN 49-1 adalah 30 kV/2,5 mm), bahkan lebih baik dari *Mineral Oil* yang digunakan sebagai pembandingan yaitu mencapai 36,19 kV. Sedangkan pada RBDPO Olein setelah menjadi Metil Ester yaitu hanya mencapai 0,9 kV, hasil ini menunjukkan hasil yang sangat

- buruk dan tidak memenuhi syarat sebagai alternatif minyak transformator baru.
2. Pengaruh jarak sela elektroda bola-bola sangat mempengaruhi hasil pengujian tegangan tembus. Apabila jarak sela antar elektroda bola semakin besar, maka dibutuhkan energi yang semakin besar pula untuk mencapai terjadinya kegagalan pada minyak isolasi yang membuat nilai tegangan tembus juga semakin besar.
 3. Efektifitas perancangan alat mencapai 68,73 % memiliki selisih sebesar 11,32 kV menunjukkan kurang begitu baik, ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi hasil pengujian yaitu dari minyak isolasi, pengaruh suhu, kontaminasi alat, permukaan elektroda yang tidak rata, dan kualitas peralatan pengujian tegangan tinggi di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi, Teknik Elektro, Universitas Riau berbeda dengan alat di PT. Indah Kiat *Pulp and Paper*, Perawang, Kabupaten Siak, Riau.
 4. Pengujian densitas berdasarkan ISO 12186 hasil maksimal yang harus diperoleh $< 0,875 \text{ kg/dm}^3$ menunjukkan hasil baik terhadap RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air yaitu mencapai $0,870 \text{ kg/dm}^3$, sementara pada RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air dan Metil Ester hasilnya kurang baik, RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air mencapai $0,926 \text{ kg/dm}^3$, sedangkan Metil Ester mencapai $1,015 \text{ kg/dm}^3$.
 5. Pengujian viskositas RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air, RBDPO Olein setelah mengurangi kadar air, dan Metil Ester RBDPO Olein menunjukkan hasil yang sangat baik yaitu tidak melebihi batas berdasarkan ISO 3104 yaitu $< 9,6 \text{ mm}^2/\text{s}$. Hasil RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air yaitu mencapai $0,4238 \text{ mm}^2/\text{s}$, RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air mencapai $0,3654 \text{ mm}^2/\text{s}$, dan Metil Ester mencapai $0,1239 \text{ mm}^2/\text{s}$.
 6. Pengujian *Dissolved Gas Analysis* (DGA) menunjukkan hasil yang sangat baik terhadap RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air dan RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air, nilai TDCG tidak melebihi dari batas normal yaitu $< 720 \text{ ppm}$. Hasil dari pengujian DGA terhadap Metil Ester mencapai 24269 ppm, hasil melebihi dari kondisi *High High Limit* yaitu 1920 ppm, ini menunjukkan bahwa minyak ini tidak layak digunakan sebagai isolasi transformator.
 7. Pengujian faktor disipasi dielektrik terhadap RBDPO Olein sebelum pengurangan kadar air dan setelah pengurangan kadar air menunjukkan hasil bahwa *power factor* (pF) melebihi batas dari syarat untuk minyak isolasi baru yaitu $> 0,05 \%$ tetapi masih memiliki peluang karena pF tidak melebihi batas dari syarat minyak isolasi pemakaian $< 0,5 \%$.
 8. RBDPO Olein menunjukkan hasil yang begitu baik setelah dilakukan pengurangan kadar air, terlihat bahwa RBDPO Olein setelah pengurangan kadar air memenuhi standarisasi dari pengujian tegangan tembus, pengujian densitas, pengujian viskositas, pengujian DGA, dan pengujian $\tan \delta$. Sementara Metil Ester sangat tidak layak digunakan berdasarkan hasil pengujian tegangan tembus, pengujian densitas, dan pengujian DGA.

SARAN

Saran dari penelitian ini adalah perlu dilakukan pengujian-pengujian yang lain terhadap minyak Sunco (RBDPO Olein) sebelum dan setelah pengurangan kadar air berdasarkan syarat-syarat sebagai minyak transformator yang tidak tersedia pada penelitian ini, seperti: titik nyala (*flash point*), titik tuang (*pour point*), angka kenetralan, stabilitas oksidasi, dan tahanan jenis (*resistivity*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada kemristekdikti yang telah mendanai penelitian ini dalam Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) tahun 2017. Penulis juga berterimakasih kepada pihak perusahaan PT. Indah Kiat *Pulp and Paper*, Tbk. Perawang, Kabupaten Siak, yang telah mengizinkan peneliti untuk menggunakan alat sebagai proses penelitian dan segenap karyawan yang membantu proses berjalannya penelitian. Penulis juga berterimakasih kepada kepala Laboratorium Dasar Teknik Kimia UR, Laboratorium Teknologi Bahan Alam dan Mineral UR, dan Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi UR yang telah memberikan izin dan membantu untuk melakukan proses berjalannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abduh, Syamsir. (2003). *“Teori Kegagalan Isolasi”*. Universitas Trisakti.
- [2] Budiyanoro, Eko. (2011). *“Analisis Tegangan Tembus Minyak Kelapa Murni (Virgin Coconut Oil) Sebagai Isolasi Cair Dengan Variasi Elektroda Uji”*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [3] IEEE Std C57.104-2008. *“Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers”*.
- [4] IEEE Std C57.106-2006. *“Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment”*.
- [5] IEC-156. (1995). *“Insulating Liquid Determinan of Breakdown Voltage at Power Frequency Tes Method”*.
- [6] Jauhari, rifqi. (2017). *“Analisis Karakteristik Fisik dan Elektrik untuk Estimasi Umur Minyak Transformator Menggunakan Hukum Arrhenius”*. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- [7] Kind, Dieter. (1993). *“Pengantar Teknik Eksperimental Tegangan Tinggi”*. Terjemahan K.T. Sirait, Institut Teknologi Bandung.
- [8] Rajab, Abdul. (2014). *“Studi Penggunaan Metil Ester Minyak Sawit Sebagai Minyak Isolasi Peralatan Listrik”*. Universitas Andalas. Padang.
- [9] Sayogi, Hanung. (2005). *“Analisis Mekanisme Kegagalan Isolasi pada Minyak Trafo Menggunakan Elektroda Berpolaritas Berbeda pada Jarum Bidang”*. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [10] Setiawan, M, I, G dan Garniwa, Iwa. (2013). *“Analisis Kondisi Minyak Transformator Berdasarkan Uji Parameter Utama”*. Universitas Indonesia. Depok.
- [11] Sunarko, (2006). *“Petunjuk Praktis Budidaya dan Pengolahan Kelapa Sawit”*. Agromedia Pustaka. Jakarta. 79 hlm.
- [12] SPLN 49-1. (1982). *“Minyak Isolasi”*. Perusahaan Umum Listrik Negara.
- [13] S. S. Sinan. (2014). *“Investigation on the AC Breakdown Voltage of RBDPO Olein”*. IEEE Innovative Smart Grid Technologies–Asia (ISGT ASIA).
- [14] Tobing, Bonggas L. (2012) *“Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi Edisi Kedua”*. Penerbit Erlangga: Jakarta.
- [15] Tobing, Bonggas L. (2003). *“Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi”*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- [16] Y. V. Thien, N. Azis, J. Jasni, M. Z. A. Ab Kadir, R. Yunus. (2014). *“Investigation on the Lightning Breakdown Voltage of Palm Oil and Coconut Oil under Non-Uniform Field”*. IEEE International Conference Power & Energy (PECON). Universiti Putra Malaysia. Selangor.

Biodata Penulis



Rudi Setiawan (Nim. 1307113224)

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro S1,
Fakultas Teknik, Universitas Riau,
Pekanbaru.

Konsentrasi Sistem Tenaga.