

Analisis Karakteristik Fenomena *Pre-Breakdown Voltage* Berbasis Pengujian pada Media Isolasi Minyak

I Made Yulistya Negara¹, Daniar Fahmi², Dimas Anton Asfani³, Dwi Krisna Cahyaningrum⁴

Abstract— Pre-breakdown voltage is a phenomenon of dielectric breakdown that could affect insulation's performance. The faster an insulation experiences the phenomenon of pre-breakdown voltage then the dielectric strength of the insulation is decreasing. In this paper, pre-breakdown voltage in oil insulation was investigated by using DC high voltage in laboratory scale. Under testing, the streamer development was recorded by using a high-resolution camera. The measured current was synchronized with an image that was picked up during the oil insulation testing. By this experiment, the characteristics of the current in phenomenon pre-breakdown voltage at oil insulation was studied. The results showed that the measured current of pre-breakdown phenomenon in oil insulation under 28 kV to 30 kV excitation voltage is in a range 100 mA - 150 mA.

Intisari— Fenomena pre-breakdown voltage merupakan suatu fenomena yang dapat mempengaruhi kinerja suatu media isolasi. Semakin cepat suatu media isolasi mengalami fenomena pre-breakdown voltage maka kekuatan dielektrik media isolasi tersebut mengalami penurunan. Dalam pengujian ini akan dilakukan pengamatan fenomena pre-breakdown voltage pada isolasi minyak dengan menggunakan pembangkitan tegangan tinggi DC skala laboratorium. Dalam proses pengujian, fenomena pre-breakdown voltage akan direkam menggunakan kamera beresolusi tinggi agar didapatkan gambar yang maksimal. Data arus yang dihasilkan akan dicocokkan dengan gambar yang terambil oleh kamera pada isolasi minyak selama pengujian. Dengan eksperimen ini akan diketahui karakteristik arus pada saat fenomena pre-breakdown voltage pada isolasi minyak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fenomena pre-breakdown voltage terjadi pada isolasi minyak pada tegangan pembangkitan antara 28 kV hingga 30 kV dan nilai arus yang terukur pada akuisisi data ketika terjadi fenomena ini adalah 100 mA - 150 mA.

Kata Kunci— *Isolasi cair, Karakteristik fenomena prebreakdown voltage*

I. PENDAHULUAN

Media isolasi merupakan suatu media yang digunakan untuk memisahkan dua atau lebih elektroda bertegangan. Secara umum media isolasi dibagi menjadi 3 (tiga) macam yaitu isolasi padat, cair dan gas [1]. Minyak merupakan jenis isolasi cair. Isolasi cair yang digunakan pada peralatan sistem tenaga biasanya digunakan sebagai bahan isolasi maupun sebagai bahan pendingin [2-4]. Alasan isolasi cair banyak digunakan sebagai isolasi peralatan listrik, pertama adalah memiliki kekuatan dielektrik yang lebih baik dibandingkan dengan media isolasi gas menurut hukum Pashen, kedua isolasi cair akan mengisi celah atau ruang yang akan diisolasi

dan secara serentak melalui proses konversi menghilangkan panas yang timbul akibat rugi energy, dan yang ketiga yaitu isolasi cair cenderung dapat memperbaiki diri sendiri (self healing) jika terjadi pelepasan muatan (discharge). Namun kekurangan utama isolasi cair yaitu mudah terkontaminasi. Cair juga dapat mengalami proses kegagalan media isolasi. Kontaminasi ini dapat menyebabkan terjadinya kegagalan pada isolasi cair. Fenomena kegagalan isolasi yang sering terjadi pada isolasi antara lain streamer breakdown, corona dan breakdown voltage atau tegangan tembus [5]. Kegagalan ini menunjukkan bahwa media isolasi cair yang digunakan memiliki kekuatan dielektrik yang menurun, sehingga dapat mempengaruhi kinerja dari peralatan yang menggunakan media isolasi ini. Kegagalan yang sering terjadi pada isolasi cair yaitu breakdown voltage (tegangan tembus). Sebelum terjadinya kegagalan ini, terjadi suatu fenomena yang menunjukkan akan terjadinya breakdown voltage yaitu fenomena pre-breakdown voltage. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menganalisis fenomena pre-breakdown voltage pada isolasi minyak [6-9].

Untuk mengetahui karakteristik dari fenomena prebreakdown voltage pada isolasi cair maka dilakukan pengujian dengan menggunakan elektroda jarum-plat dan sumber tegangan DC serta dilakukan perekaman berupa data arus dan gambar agar dapat melihat karakteristik yang terjadi pada minyak yang sedang diuji.

II. FENOMENA *PRE BREAKDOWN VOLTAGE*

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 gagalannya 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, dan teori butiran padat pada isolasi cair. Apabila suatu tegangan dikenakan terhadap dua elektroda yang dicelupkan kedalam minyak (isolasi cair) maka terlihat adanya konduksi arus yang kecil. Apabila tegangan dinaikkan secara kontinyu maka pada titik kritis tertentu akan terjadi lucutan diantara kedua elektroda. Lucutan dalam zat cair ini akan terdiri dari unsur-unsur berikut :

- 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
- Terjadi lubang pada elektroda

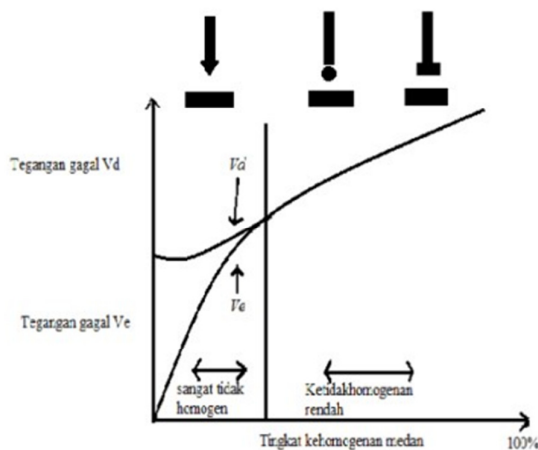
Mekanisme kegagalan dielektrik pada isolasi cair dipengaruhi oleh berbagai hal antara lain jenis isolasi cair, lama pemakaian dan besar tegangan yang dikenakan. Selain itu bentuk dan material dari elektroda pengujian juga menjadi

^{1,2,3} Dosen, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Keputih Sukolilo kota Surabaya 60111 (tlp: 031-5947302; fax: 031-5931237; e-mail: yulistya@ee.its.ac.id)

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 kavitas, teori kegagalan bola cair, dan teori butiran padat pada isolasi cair.

Fenomena Pre-Breakdown Voltage yaitu suatu fenomena yang terjadi pada proses menuju kegagalan suatu bahan isolasi. Kegagalan yang terjadi yaitu breakdown voltage. Salah satu penyebab terjadinya kegagalan pada bahan isolasi dipengaruhi oleh jenis bahan isolasi, jenis elektroda yang digunakan, jarak sela elektroda, kontaminasi udara sekitar dan kekuatan dielektrik bahan isolasi itu sendiri [6].

Fenomena pre-breakdown voltage dapat dilihat pada pemakaian elektroda yang memiliki bentuk tidak sama, misalnya elektroda jarum-plat. Hal ini disebabkan karena medan listrik akan berkumpul pada salah satu titik yang memiliki bentuk lebih runcing atau membentuk sudut sikusiku. Sehingga pada pengujian dengan menggunakan elektroda jenis jarum-plat akan ditemukan jenis kegagalan pada medan tidak seragam [10]. Jika pada pengujian yang dilakukan, tegangan dinaikkan pada tingkat pra-peluahan maka akan berkembang menjadi peluahan yang menghubungkan kedua elektroda. Gambar 1 menunjukkan tingkat kegagalan berdasarkan ketidakhomogenan medan dan tegangan gagal. Pada elektroda yang sangat tajam akan terbentuk muatan ruang melalui pra-peluahan yang mengakibatkan efek polaritas. Efek polaritas adalah adanya perbedaan peluahan dan perbedaan pergerakan elektron dan ion yang bergantung pada polaritas ujung elektroda. Seiring dengan peningkatan tegangan, pada susunan elektroda dengan tingkat ketidakhomogenan yang tinggi akan terjadi peluahan yaitu korona, streamer, leader, dan kegagalan.



Gambar 1: Tegangan gagal dan tegangan pra peluahan tergantung pada tingkat kehomogenan medan.

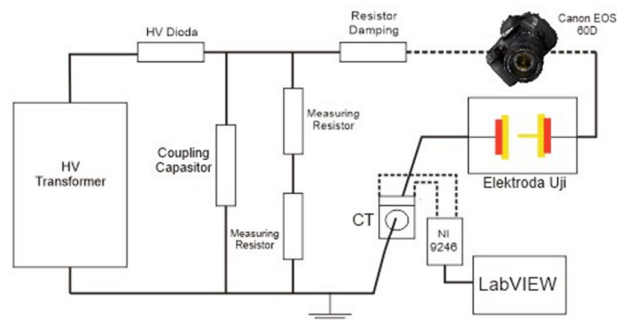
Streamer dapat terbentuk ketika media isolasi (misalnya udara) terkena beda potensial yang besar. Ketika medan listrik yang diciptakan oleh tegangan yang diberikan cukup besar, elektron dipercepat menyerang molekul udara dengan energi

yang cukup untuk menarik elektron hingga elektron yang tertarik dapat menarik elektron lainnya dan terbentuklah banjir elektron yang terionisasi. Muatan ruang yang diciptakan oleh banjir elektron menimbulkan medan listrik tambahan yang dapat meningkatkan pertumbuhan banjir elektron baru dengan arah tertentu. Sedangkan elektron yang terionisasi mengalami perkembangan dengan cepat ke arah banjir elektron yang terbentuk dan membentuk pita-pita seperti jala yang disebut streamer.

Pada media isolasi minyak, awal mula terjadinya fenomena pre-breakdown ditandai dengan munculnya streamer, streamer ini mengalami perkembangan hingga munculnya gelembung udara yang mempunyai permeabilitas bahan lebih rendah dari sekelilingnya. Pada rongga udara yang terbentuk terjadi efek kapasitansi secara sebagian yang menyebabkan intensitas medan yang besar dapat menyebabkan loncatan muatan. Sebelum terjadinya loncatan muatan, pada isolasi minyak terjadi pergerakan minyak yang menunjukkan bahwa adanya efek kapasitansi. Loncatan muatan akan terendam dan mulai melakukan pengisian muatan sampai menemukan rongga lagi untuk melepaskannya kembali. Fenomena pelepasan muatan yang singkat ini dan pengisian yang lama terjadi secara berulang ini disebut sebagai fenomena pre-breakdown voltage. Apabila fenomena ini terjadi secara terus-menerus akan mengakibatkan kegagalan yang dapat merusak bahan isolasi.

III. PENGUJIAN DAN PENGAMBILAN DATA

A. Alat Pengujian



Gambar 2 : Skema alat pengujian pre-breakdown voltage pada isolasi minyak



Gambar 3 : Alat pengujian yang digunakan



Untuk mengetahui karakteristik fenomena pre-breakdown voltage pada isolasi minyak dibutuhkan suatu alat pengujian untuk melakukan pengujian. Skema perencanaan alat pengujian dan peralatan yang digunakan untuk fenomena prebreakdown voltage pada isolasi minyak ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3 diatas.

Dari Gambar 2 di atas, Tegangan Tinggi DC diperoleh dari HV Transformer yang disearahkan oleh HV Dioda. Selanjutnya tegangan DC tersebut terhubung ke elektroda uji melalui damping resistor. Sebuah kamera beresolusi tinggi digunakan untuk menangkap fenomena pre-breakdown yang terjadi.

Peralatan yang digunakan untuk mendapatkan karakteristik fenomena pre-breakdown voltage pada isolasi minyak terdiri dari pembangkitan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan, current transformer (CT) 250/5 A sebagai penghubung dengan alat akuisisi data, elektroda uji, minyak isolasi Shell Diala B, Canon EOS 60D sebagai perekam fenomena pre-breakdown voltage, dan NI 9246 sebagai perekam arus. Selain itu diperlukan software yang mendukung alat pengujian ini yaitu software LabVIEW yang telah disinkronkan dengan fitur DAQ Assist, untuk human interface sekaligus sebagai akuisisi data saat proses pengambilan data berlangsung.

B. Pengambilan Data

Proses pengambilan data dilakukan di Laboratorium Tegangan Tinggi Teknik Elektro ITS secara langsung, yaitu dengan melakukan pengujian breakdown voltage berskala laboratorium. Pengujian ini dilakukan dengan membangkitkan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang terhubung dengan modul pengujian isolasi minyak. Akuisisi data meliputi arus dan representasi berupa gambar saat terjadi fenomena pre-breakdown voltage.

Akuisisi data pada pengujian ini menggunakan NI 9246 yang terhubung dengan personal komputer yang dilengkapi dengan perangkat lunak LabVIEW untuk merekam arus dan bentuk arus saat terjadi perubahan arus. Akuisisi data ini dimulai pada saat minyak telah menunjukkan tanda-tanda akan terjadi breakdown voltage misalnya adanya desis dan nilai tegangan pembangkitan mendekati nilai breakdown voltage. Sehingga data yang terekam hanya data sesaat sebelum terjadi breakdown voltage atau tegangan tembus. Dalam proses pengambilan data, data keluaran dari proses data logging pada alat akuisisi data (perangkat lunak LabVIEW) saat pengujian pre-breakdown voltage yang dilakukan adalah data dalam format '.tdms'. Perangkat lunak yang membantu dalam pemotongan sinyal yang akan difilter adalah DIAdem. Pemotongan sinyal perlu dilakukan karena pada saat pengambilan data sampling data yang tersimpan terlalu banyak.

Proses pengambilan gambar ini dimulai pada saat minyak telah menunjukkan tanda-tanda akan terjadi breakdown voltage misalnya adanya desis dan nilai tegangan pembangkitan mendekati nilai breakdown voltage dan mode yang digunakan yaitu pengambilan gambar secara kontinyu. Sehingga data yang terekam hanya data sesaat sebelum terjadi breakdown voltage atau tegangan tembus. Sehingga gambar

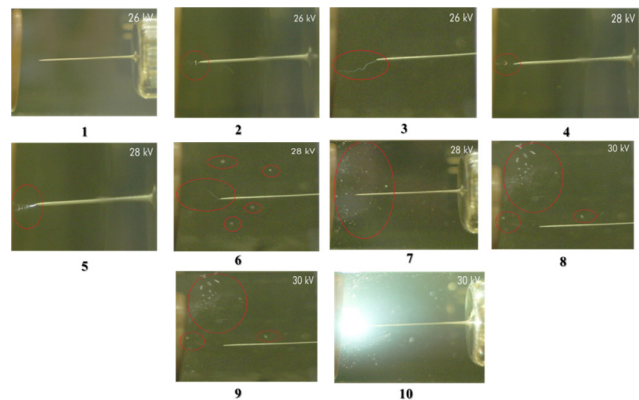
yang terambil hanya gambar sesaat sebelum terjadinya breakdown voltage.

IV. HASIL DAN ANALISIS

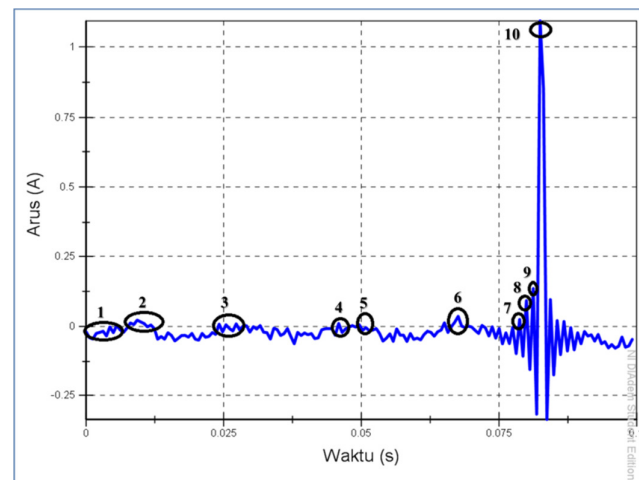
A. Mekanisme Pre Breakdown Voltage pada Isolasi Minyak

Mekanisme yang terjadi pada proses pengambilan data yaitu mekanisme pre-breakdown voltage yang menunjukkan proses menuju kegagalan media isolasi minyak. Proses pengambilan data ini berlangsung menggunakan kamera guna mengambil gambar dan melihat perubahan pada kondisi minyak. Hal ini dilakukan dengan membangkitkan tegangan tinggi DC sebagai sumber tegangan yang disambungkan dengan modul pengujian yang telah dilengkapi elektroda set dan minyak yang diletakkan pada wadah akrilik. Pembangkitan tegangan secara bertahap dinaikkan dengan memutar charging range pada control box maka tegangan yang dibangkitkan mengalami kenaikan.

Kenaikan Tegangan Pembangkitan Secara Konstan



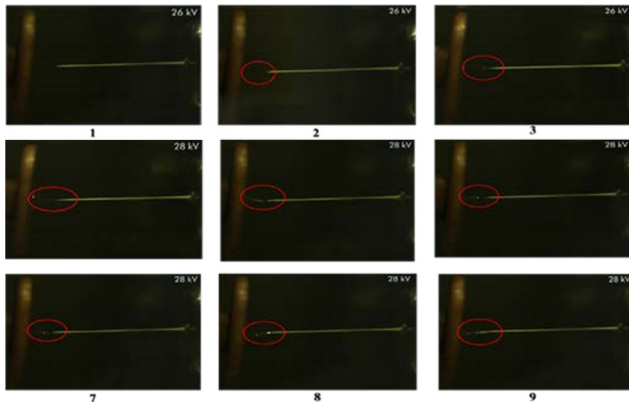
Gambar 4 : Mekanisme terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* hingga terjadinya *breakdown voltage*



Gambar 5 : Grafik arus hasil pengujian

Pada pengujian ini tegangan yang dibangkitkan pada pembangkitan tegangan tinggi DC dilakukan secara bertahap atau dinaikkan secara kontinyu, yaitu kenaikan 2 kV tiap 10 detik. Kenaikan ini dilakukan untuk mempercepat proses terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* pada minyak Shell Diala B. Awal mula tegangan dinaikkan pada nilai 2 kV selama 10 detik kemudian dinaikkan tiap 10 detik dengan kenaikan sebesar 2 kV. Hasil yang diperoleh dari pengujian ini adalah perubahan pada kondisi minyak terjadi dimulai pada nilai tegangan sebesar 26 kV. Sehingga perekaman gambar dilakukan mulai pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 26 kV. Gambar 4 ini adalah gambar dimana terjadi perubahan pada kondisi minyak ketika tegangan pembangkitan yang diberikan untuk pengujian sebesar 26 kV hingga 30 kV.

Tegangan Pembangkitan Konstan



Gambar 6 : Perubahan kondisi minyak pada pmbangkitan tegangan secara konstan

Pada pengujian ini dilakukan sama dengan pengujian sebelumnya, yang membedakan yaitu tegangan yang diberikan di tahan pada nilai 28 kV. Pada pengujian ini perekaman gambar tetap dimulai pada tegangan pembangkitan sebesar 26 kV. Pada Gambar 6 diatas terlihat adanya perubahan pada ujung elektroda jarum yaitu mulai muncul dan berkembangnya streamer. Hal ini terjadi pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 26 kV dan dalam waktu 10 detik. Sehingga fenomena ini berlangsung dalam waktu yang sangat cepat. Selanjutnya pada nilai tegangan pembangkitan sebesar 28 kV, *streamer* yang telah terbentuk terus mengalami perubahan misalnya semakin terlihat dan dengan arah pantulan yang berbeda. Pada kondisi ini tegangan ditahan hingga mengalami breakdown voltage dalam range waktu selama 1 menit.

Pada kondisi ini, stress tegangan yang ada pada isolasi minyak belum terlalu tinggi sehingga yang terjadi hanya perubahan pada *streamer*. Hal ini dikarenakan pemberian tegangan yang konstan pada waktu yang cukup lama dapat menyebabkan adanya perkembangan pada *streamer* yang menunjukkan bahwa terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage* yang terjadi sesaat sebelum terjadi kegagalan isolasi (*breakdown voltage*).

I Made Yulistya: Analisis Karakteristik Fenomena Pre-Breakdown ...

B. Karakteristik Arus Fenomena Pre-breakdown voltage pada Isolasi Minyak

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian breakdown voltage dengan tujuan untuk mendapatkan karakteristik fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak. Karakteristik yang didapatkan dari pengujian ini berupa akuisisi data yang terekam oleh LabVIEW dan representasi berupa gambar yang terekam oleh kamera. Minyak yang digunakan untuk pengujian adalah minyak trafo Shell Diala B.

Apabila suatu bahan isolasi diberikan tegangan maka akan terjadi perpindahan elektron-elektron dari satu molekul ke molekul lainnya. Apabila tegangan diberikan secara kontinyu dan bahan isolasi tidak mampu menahan tegangan yang terlalu tinggi hingga menimbulkan adanya stress tegangan pada isolasi tersebut maka timbul arus konduksi atau arus bocor.

Pada Gambar 5, data arus berupa grafik telah diolah dan disesuaikan dengan fenomena yang terjadi pada minyak yang terekam oleh kamera. Pencocokan ini bertujuan untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada minyak yang disertai dengan adanya perubahan arus pada alat ukur. Gambar 4 merupakan hasil gambar yang terekam yang telah dicocokkan dengan data arus sehingga diketahui bentuk fenomena yang terjadi ketika adanya perubahan nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data. Tabel 1 dibawah ini merupakan tabel yang menyajikan nilai arus yang terukur pada kondisi yang telah disesuaikan guna proses pencocokan.

Pada Gambar 4 dan Gambar 5 menjelaskan urutan terjadinya fenomena *pre-breakdown voltage*. Dari penjelasan data diatas dapat diketahui bahwa fenomena *pre-breakdown voltage* dapat terjadi dan diamati pada media isolasi minyak dengan menggunakan elektroda jarum-plat. Nomor 1 sampai dengan 9 menunjukkan perkembangan dari *streamer* dan besarnya arus bocor yang mengalir. Nomor 10 merupakan kondisi dimana terjadinya *breakdown* sehingga arus yang mengalir menjadi sangat besar. Dengan diketahuinya fenomena ini, kegagalan pada isolasi minyak dapat dideteksi sejak awal sebelum terjadinya kegagalan yang sebenarnya, khususnya pada minyak trafo Shell Diala B.

TABEL 1

ARUS YANG TERUKUR KETIKA MINYAK DALAM KONDISI PERUBAHAN

Kondisi	Tegangan Pembangkitan (kV)	Arus Terukur (mA)
1	26	0
2	26	16.3
3	26	22.6
4	28	52.35
5	28	36.22
6	28	92.08
7	28	158.42
8	30	135.14
9	30	317.34
10	30	1009.86

p-ISSN: 1693 – 2951; e-ISSN: 2503-2372



V. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari eksperimen pre-breakdown voltage pada media isolasi minyak adalah sebagai berikut:

- a. Kenaikan nilai tegangan pembangkitan pada pengujian ini menentukan besar nilai arus yang terukur pada alat akuisisi data.
- b. Perubahan kondisi minyak pada saat pengujian menunjukkan bahwa adanya fenomena *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak.
- c. Gelembung yang terdapat pada minyak saat melakukan pengujian menunjukkan bahwa akan terjadi kegagalan isolasi minyak.
- d. Semakin panjang streamer yang terbentuk maka semakin besar pula arus bocor yang mengalir dan terukur.
- e. Nilai rata-rata terjadinya fenomena *pre-breakdown* sesuai dengan pengujian yang dilakukan terjadi pada tegangan pembangkitan 28 kV dengan arus yang terukur dalam rentang 100 – 150 mA.
- f. Proses terjadinya *pre-breakdown voltage* pada isolasi minyak merupakan suatu fenomena yang terjadi sesaat sebelum terjadinya breakdown voltage dan berlangsung dalam waktu yang sangat singkat.

REFERENSI

- [1] Arismunandar,A., 2001. Teknik Tegangan Tinggi, Pradnya Paramita, Jakarta.
- [2] T. V. Oommen, "Vegetable oils for liquid-filled transformers," IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 18, No. 1, pp. 6-11, 2002.
- [3] S. Lindren, "Environmentally acceptable transformer fluids, " in Technical Progress, Report 1000438, EPRI, 2000.
- [4] D. Cherry, "Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers," ABB Report, 2009.
- [5] Ershov A.P, kuperstokh A.L;"Flucuation Model of Liquid Dielectrics Breakdown with incomplete Charge Relaxation" Proceedings of the 11th Interational Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids ICDL pp 194-198, 1993 Baden-Dattwil, Switzerland.
- [6] A. Beroual, Hendry B.H. Sitorus, Rudy Setiabudy, and Setijo Bismo, "Pre-breakdown Phenomena in New Vegetable Oil-based Jatropa Curcas Seeds as Substitute of Mineral Oil in High Voltage Equipment," IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation Vol. 22, No. 5, October 2015.
- [7] F. Guerbas, A. Boubakeur and A. Beroual, "Pre-breakdown current in long point-plane transformer oil gaps with insulating barrier under AC voltage," 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Cancun, 2011, pp. 744-747.
- [8] M. Baur and M. Pompili, "Pre-energizing effect on breakdown voltage test for insulating liquids," 2014 IEEE 18th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), Bled, 2014, pp. 1-5.
- [9] G. D. Peppas, V. P. Charalampakos, E. C. Pyrgioti and I. F. Gonos, "Electrical and optical measurements investigation of the pre-breakdown processes in natural ester oil under different impulse voltage waveforms," in IET Science, Measurement & Technology, vol. 10, no. 5, pp. 545-551, 8 2016.
- [10] Negara, I Made Yulistya. 2013. Teknik Tegangan Tinggi Prinsip dan Aplikasi Praktis. Yogyakarta: Graha Ilmu.