

# TELAAH PROSPEK MINYAK KELAPA SAWIT SEBAGAI MINYAK ISOLASI TRANSFORMATOR

Fri Murdiya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Kampus Binawidya KM.12,5 Panam, Pekanbaru, 28294, Indonesia

<sup>2</sup>Laboratorium Tegangan Tinggi, Universitas Riau  
Kampus Binawidya KM.12,5 Panam, Pekanbaru, 28294, Indonesia

E-mail : frimurdiya@gmail.com

## ABSTRAK

Minyak kelapa sawit sebagai isolasi transformator daya menjadi hal yang menarik bagi para peneliti. Minyak kelapa sawit lebih ramah lingkungan dan berkesinambungan tersedia di Indonesia. Minyak kelapa sawit cocok untuk diterapkan pada transformator daya sebagai pengganti minyak mineral yang memiliki beberapa kekurangan yang mendasar. Secara studi kelayakan minyak kelapa sawit atau turunannya memiliki sifat yang mirip dengan minyak mineral. Dari pengujian laboratorium untuk tegangan tembus, peluahan berlahan (*creeping discharge*) dan dinamika muatan ruang antara elektroda jarum dan pelat yang dicelupkan kedalam minyak kelapa sawit serta konduktivitas minyak, memberikan hasil yang baik. Sehingga prospek minyak kelapa sawit dikembangkan sebagai minyak isolasi pada transformator daya sangat menjanjikan.

Kata Kunci : *minyak kelapa sawit, tegangan tembus, peluahan melambat, dinamika muatan ruang, konduktivitas*

## ABSTRACT

*Palm oil as high voltage insulation filling power transformer can attract many researchers in the world at last decade. Palm oil is a biodegradable oil and renewable raw material and it is largely available in Indonesia. Basically, Palm oil is suitable for mineral oil substitution that mineral oil still has some disadvantages and palm oil is good performance in high voltage insulation and coolant to fill a power transformer. The feasible study on palm oil and derivative oils have relative similar in properties with mineral oil. Base on laboratory tests such as breakdown test, creeping discharge and space charge dynamics and oil conductivity show good performance in palm oil. In order to development of palm oil as high voltage insulation, it is shown that the promising of palm oil work as high voltage insulation and coolant is elegantly good.*

*Keywords : the prospect of palm oil, breakdown test, creeping discharge, space charge dynamics, conductivity*

## PENDAHULUAN

Isolasi listrik (isolasi padat dan cair) adalah bagian yang sangat penting dan khusus dalam transformator daya dan distribusi. Secara konvensional, sistem isolasi terpadu terdiri dari papan pres (*pressboard*), kertas kraft, kayu dan sebagainya yang dicelupkan di dalam minyak isolasi telah umum digunakan di dalam transformator daya lebih dari seabad. Untuk mendapatkan ketahanan dielektrik dan minyak isolasi sebagai pendingin yang baik pada transformator, minyak mineral (yang biasa disebut

minyak transformator) telah teruji dan memiliki kinerja yang baik dan lebih sering digunakan sebagai fluida dielektrik dalam sistem isolasi transformator daya. Namun, penggunaan minyak mineral memberikan resiko yang negatif terhadap lingkungan dikarenakan oleh sifat minyak mineral yang sulit terurai dan mengandung racun dan juga beberapa masalah seperti kelangkaan minyak mineral dalam waktu dekat ini, korosi tembaga sulfida yang menginduksi belitan transformator, polusi lingkungan akibat dari tumpahan minyak dan polusi atmosfer akibat dari kebakaran dan lain-lain.

Melihat permasalahan-permasalahan yang ada pada minyak mineral, banyak peneliti mulai mengembangkan minyak isolasi dari tumbuh-tumbuhan yang disebut minyak nabati sebagai pengganti minyak mineral (Oommen, 2002, Gockenbach dkk, 2002, Dolata dkk, 2007, Kano dkk, 2007, Martins, 2010) dan membuat perbandingan antara minyak mineral dengan minyak nabati pada percobaan peluahan sebagian (*partial discharge*), percobaan peluahan yang melambat (*creeping discharge*) serta tes ketahanan isolasi minyak dan fenomenanya, lebih dari sepuluh tahun ini (Shinke dkk, 2003, Duy dkk, 2009, Vukovic dkk, 2009, Yamamoto dkk, 2010, Muhamad dkk, 2012, Kasahara dkk, 2012).

Minyak nabati seperti minyak sawit (seperti turunan minyak kelapa sawit *palm fatty acid ester-PFAE dan refined, bleached and deodorized palm oil -RBDPO*) adalah memiliki prospek yang baik sebagai minyak isolasi dan pendingin yang ramah lingkungan dan cocok diterapkan pada transformator daya. Minyak kelapa sawit memiliki keuntungan-keuntungan seperti ramah lingkungan karena mudah terurai bila dibandingkan minyak mineral, tidak beracun, memiliki titik bakar yang tinggi, tidak bereaksi dengan belitan transformator daya karena minyak kelapa sawit tidak mengandung sulfur yang bisa menyebabkan korosi yang disebut tembaga sulfida, ketahanan isolasi yang baik pada tingkat kandungan air yang rendah bila dibandingkan dengan minyak mineral serta memiliki konstanta permitivitas yang tinggi yang membuat terpaan medan tinggi pada minyak kelapa sawit lebih kecil bila dibandingkan dengan minyak mineral dalam sistem isolasi berlapis padat dan cair. Namun, minyak kelapa sawit memiliki kekurangan pada kandungan air jenuh ~2500 ppm pada suhu 20 °C yang bisa menyebabkan kenaikan rugi-rugi dielektrik dan menurunkan tahanan volume minyak.

Untuk melihat prospek minyak kelapa sawit sebagai minyak isolasi, maka dilakukan kajian dari beberapa literatur yang memberikan hasil yang baik dan dapat dikembangkan sebagai minyak yang ramah lingkungan dan dapat diperbaharui.

Banyak peneliti sekarang mencari jenis baru bahan isolasi cair, yang umumnya jenis organik dan diperoleh dari alam. Cairan baru bahan isolasi harus dapat terurai dan ramah terhadap lingkungan. Banyak ester alami terdiri dari aditif paket kimia seperti penghambat oksidasi, *deactivator* logam, depresan untuk meminimalkan titik tuang dan stabilitas oksigen. Dalam beberapa kasus, isolasi cair alami memiliki antimikroba, sementara dalam

minyak mineral ada tidak ada tambahan zat aditif atau penghambat oksidasi (I. Fofana, 2011, L. Lewand, 2004).

## METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah studi literatur tegangan tembus pada minyak kelapa sawit atau turunannya berdasarkan standar IEC 60156 yang dibandingkan dengan minyak mineral (minyak transformator), perbandingan peluahan berlahan antara minyak kelapa sawit dengan minyak mineral dan dinamika muatan ruang yang bergerak antara elektroda jarum dan piring di dalam minyak kelapa sawit dan minyak mineral serta konduktifitas minyak.

Pengujian tegangan tembus (*breakdown test*) pada minyak isolasi adalah untuk mendapatkan kekuatan dielektrik minyak isolasi bila diberi tegangan tinggi. Metode yang digunakan adalah metode dua elektroda standar berdasarkan IEC 60156. Dalam pengujian ini yang telah dilakukan adalah membandingkan kekuatan dielektrik minyak mineral (sebagai referensi) dengan minyak kelapa sawit dalam kondisi kandungan air dan kondisi temperatur yang berbeda-beda. Karena kandungan air memengaruhi rugi-rugi dielektrik, dalam penelitian ini juga menjelaskan perubahan rugi-rugi dielektrik terhadap temperatur.

Pengujian peluahan berlahan (*creeping discharge*) adalah jenis pengujian dengan membandingkan panjang *streamer*, cahaya yang dihasilkan oleh *streamer* serta cabang *streamer* antara minyak kelapa sawit dengan minyak mineral. Pengujian ini juga memperhatikan perbandingan waktu tembus listrik pada *pressboard* yang dicelupkan di dalam minyak kelapa sawit atau minyak mineral.

Pengujian dinamika muatan ruang yang bergerak diantara elektroda jarum dan pelat yang dicelupkan didalam minyak bertujuan untuk mengukur medan listrik yang dihasilkan ketika dihubungkan ke tegangan tinggi searah. Pengujian ini diperlukan karena medan listrik secara matematika tidak bisa menjawab kondisi riil medan listrik yang sebenarnya terjadi pada minyak. Serta sifat muatan-muatan listrik yang terdistribusi di antara elektroda-elektroda yang dapat dijelaskan dengan teknik ini.

Pengujian konduktifitas minyak merupakan pengujian tidak merusak yang menggunakan teknik pengukuran arus polarisasi dan depolarisasi (*Polarization and Depolarization Current-PDC*) pada minyak. Teknik arus polarisasi dan depolarisasi juga dapat digunakan untuk

menentukan kandungan air pada bahan isolasi. Konduktifitas minyak dapat ditentukan dengan menggunakan amplitudo arus polarisasi/depolarisasi pada minyak (Amit Kumar dkk, 2011)

## HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

Tabel 1 menunjukkan karakteristik fisik minyak sawit (PFAE dan RBDPO) dan minyak mineral. Titik bakar minyak PFAE dan RBDPO lebih tinggi dari minyak mineral. Dan juga, PFAE dan RBDPO tidak beracun sedangkan minyak mineral sedikit beracun. Viskositas kinetik PFAE lebih rendah dari minyak mineral dan konduktifitas termal PFAE dan minyak mineral relatif sama. Dari Tabel 1 terlihat viskositas kinetik dan konduktifitas termal mempengaruhi daya hantar panas oleh minyak isolasi sehingga PFAE memiliki daya hantar panas yang baik. Kemampuan terurai alamiah PFAE dan RBDPO lebih baik dibandingkan dengan minyak mineral, sehingga PFAE dan RBDPO dikategorikan ramah lingkungan (Hanaoka, 2010, Nazera dkk, 2013)

Minyak kelapa sawit memiliki permitivitas yang tinggi dibandingkan dengan dengan minyak mineral dengan kenaikan temperatur, sehingga dengan permitivitas yang tinggi dapat mengurangi medan listrik pada minyak bila diaplikasikan pada dielektrik berlapis dengan papan pres (*pressboard*) di dalam transformator daya sesuai dengan laporan A. Rajab dkk, 2011. Semakin rendah medan listrik di dalam minyak maka tegangan tembus minyak semakin tinggi.

**Tabel 1 Karakteristik Fisik Minyak Kelapa Sawit (PFAE dan RBDPO) dan Minyak Mineral**

Karakteristik	Minyak mineral	PFAE	RBDPO
Densitas (20°) [kg/m <sup>3</sup> ]	0.88	0.86	-
Densitas (150°) [kg/m <sup>3</sup> ]	915.5	-	880.5
Viskositas kinetik (40°) [mm <sup>2</sup> /s]	8.13	5.06	-
Titik Tuang [°C]	-45.0	-32.5	-9
Titik Bakar [°C]	152	176	320
Konduktivitas termal [25°C] W/m.K	0.13	0.13	-
Beracun	Sedikit beracun	Tidak Beracun	Tidak Beracun
Kemampuan terurai	Rendah	Tinggi	Tinggi
Permitifitas reletif	2.2	2.9	-

### a. Pengujian tegangan tembus minyak kelapa sawit berdasarkan standar IEC

Pengujian tegangan tembus menggunakan elektroda-elektroda standar dengan jarak sela 2.5 mm menurut IEC 60156. Bejana pengujian yang terdapat sepasang elektroda dapat dilihat pada

Gambar 1 berikut ini. Bejana pengujian dihubungkan ke tegangan tinggi dengan pengaturan kenaikan tegangan secara perlahan dan hati-hati sekitar 2kV/s sampai terjadi tembus listrik.

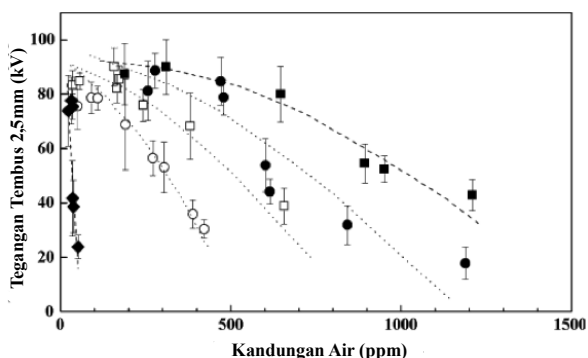


**Gambar 1. Konfigurasi elektroda berdasarkan standar IEC - 60156**

Dari hasil pengujian tegangan tembus pada minyak PFAE (turunannya) berkurang secara bertahap pada level kandungan air yang berbeda-beda sedangkan minyak mineral menurun dengan tajam untuk kondisi kandungan air yang berbeda juga. Kurva perbandingan antara minyak PFAE dengan minyak mineral dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini (Y. Kasahara, 2012)

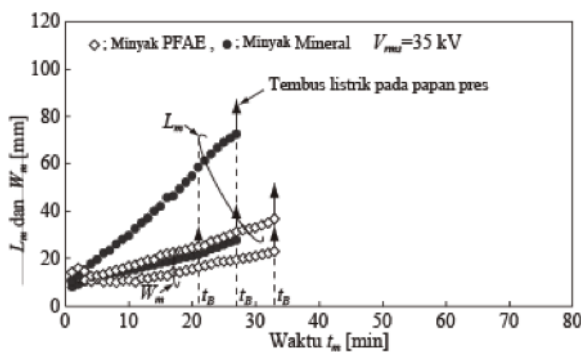
Jonathan dkk, 2014 melakukan pengujian tegangan tembus terhadap minyak mineral dan RBDPO. Untuk minyak mineral, awal permulaan pengujian menunjukkan 81,65 kV dan kemudian turun perlahan-lahan ke angka 76,80 kV di akhir periode pengujian. Sedangkan awal pengujian pada minyak RBDPO adalah 88,87 kV yang secara jelas lebih tinggi dari minyak mineral pada temperatur yang sama, dan kemudian turun ke angka 78,78 kV di akhir periode pengujian. Hasil ini menunjukkan minyak mineral dan RBDPO berkinerja diatas persyaratan standar VDE 03070 untuk tegangan tembus >50kV.

Pengujian berikutnya melihat  $\tan \delta$  kedua minyak diatas dengan waktu penuaan minyak yang sama pada masing-masing temperatur.  $\tan \delta$  digunakan untuk menentukan faktor rugi-rugi dielektrik dari minyak isolasi. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa  $\tan \delta$  sangat bergantung pada temperatur. Berdasarkan standar IEC 60247 menyatakan bahwa  $\tan \delta$  dari minyak harus berada pada level  $\leq 0.005$  pada temperatur 90°C. Minyak RBDPO masih berada dalam level persyaratan tersebut yaitu 0,003 pada temperatur 100°C (Jonathan dkk, 2014).



**Gambar 2.** Kurva tegangan tembus 2.5-mm dengan kandungan air pada minyak mineral (diamon hitam) dan berbagai turunan PFAE pada suhu kamar (~25 °C): C8-Me (persegi hitam), C12-Me (lingkaran hitam), C8-2EH (persegi putih), dan C12-2EH (lingkaran putih)

Metode pengurangan lemak polar adalah dengan teknik *bleaching* dan *deodorizing* atau yang dikenal dengan RBDPO. Kualitas minyak tergantung pada kandungan lemak dan *stearin*. Setelah dilakukan proses *bleaching* dan *deodorizing* pada minyak kelapa sawit, terjadi perubahan kenaikan tegangan tembus dan penurunan faktor rugi-rugi dielektrik (Suwarno dkk, 2003, 2005)



**Gambar 4.**  $L_m$  dan  $W_m$  sebagai fungsi waktu  $t_m$  pada berbagai level tegangan

### c. Pengujian dinamika muatan ruang pada minyak kelapa sawit

Dinamika muatan ruang dalam minyak dapat dijelaskan dengan karakteristik penurunan medan listrik dalam kondisi minyak mengalir dan tidak mengalir. Pengujian dilakukan pada dielektrik berlapis (padat dan cair) antara minyak dan papan pres (*pressboard*) yang berada diantara elektroda jarum dan pelat. Pada saat minyak tanpa muatan listrik, jumlah ion positif dan ion negatif adalah sama. Muatan positif di dalam minyak dapat

bergerak disebabkan oleh adanya medan listrik dan muatan ini terakumulasi diatas permukaan papan pres (*pressboard*), sedangkan muatan negatif tidak tersusun di bagian anoda. Dari hasil penelitian, penurunan medan listrik pada minyak mineral lebih cepat pada kondisi mengalir daripada tidak mengalir. Namun, penurunan medan listrik pada minyak PFAE dengan berkesinambungan terhadap waktu baik pada kondisi mengalir ataupun pada kondisi tidak mengalir.

Sifat muatan ruang pada minyak PFAE berubah sementara di dalam minyak pada kondisi mengalir yang sama dengan kondisi tidak mengalir. Karakteristik ini berbeda dengan minyak mineral. Hal ini ditunjukkan oleh resistivitas pada minyak PFAE lebih rendah dua tingkat dari pada minyak mineral tapi jumlah muatan yang ada pada minyak PFAE lebih banyak. Jumlah muatan yang banyak pada PFAE ini cukup untuk berakumulasi dengan cepat pada permukaan papan pres (*pressboard*) pada saat saturasi. Oleh sebab itu, penurunan medan listrik pada minyak PFAE pada kondisi mengalir dan tidak mengalir adalah sama (Kato dkk, 2009, Okubo, 2008)

### d. Pengujian konduktifitas minyak kelapa sawit

Aliff Ali Amran dkk, 2013 melaporkan hasil pengujian konduktifitas minyak dengan teknik pengukuran arus polarisasi dan depolarisasi pada minyak RBDPO dan minyak mineral. Minyak kelapa sawit memiliki kandungan air yang tinggi dari pada minyak mineral. Dari hasil penelitian ini dilaporkan bahwa konduktifitas minyak kelapa sawit (RBDPO) memiliki konduktifitas lebih rendah dari pada minyak mineral. Karakteristik minyak kelapa sawit ini sangat membantu dalam aplikasi isolasi cair minyak kelapa sawit dalam bidang teknik tegangan tinggi. Sehingga perlu dilakukan pengujian konduktifitas pada minyak terhadap pengurangan kandungan air pada minyak kelapa sawit.

## KESIMPULAN

Dari hasil pengujian tegangan tembus pada minyak PFAE (turunannya) berkurang secara bertahap pada level kandungan air yang berbeda-beda sedangkan minyak mineral menurun dengan tajam untuk kondisi kandungan air yang berbeda juga. Tegangan tembus minyak mineral dan minyak kelapa sawit masih berada pada level tegangan tembus yang disyaratkan IEC. Dari hasil pengujian peluahan berlahan pada kedua minyak terlihat bahwa *streamer* pada minyak PFAE lebih lambat memanjang dari pada minyak mineral. Dan juga,

waktu tembus listrik pada papan pres (isolasi berlapis minyak dan papan pres) lebih lama pada minyak PFAE dibandingkan pada minyak mineral. Sifat muatan ruang pada minyak PFAE berubah sementara pada saat kondisi mengalir dan tidak mengalir dan hal ini berbeda dengan minyak mineral. Penurunan medan listrik pada minyak mineral lebih cepat pada kondisi mengalir daripada tidak mengalir. Namun, penurunan medan listrik pada minyak PFAE dengan berkesinambungan terhadap waktu baik pada kondisi mengalir ataupun pada kondisi tidak mengalir. Konduktivitas minyak kelapa sawit lebih rendah daripada minyak mineral. Hal ini disebabkan oleh kandungan air di dalam minyak kelapa sawit lebih tinggi dibandingkan dengan minyak mineral. Dari beberapa hasil pengujian minyak kelapa sawit diatas, dapat disimpulkan bahwa minyak kelapa sawit dapat digunakan sebagai minyak transformator daya yang ramah lingkungan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rajab, Aminuddin Sulaeman, Sudaryatno Sudirham, Suwarno, 2011, "A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral"
- Aliff Ali Amran, Muhamad Nor Asiah, A. A. Suleiman, N. A. M. Jamail, 2013, "Study on Palm-Oil Based Insulation Oils Conductivity Using PDC Measurement Technique", World Academy of Science, Engineering and Technology vol. 77.
- Amit Kumar, J. Rattan, R.N Sharma, and Sushil Chauhan, 2011," Investigation of Polarization and Depolarization Current for Evaluation of Moisture in Oil-Pressboard Insulation", International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 3, No. 6.
- B. Dolata, H. Borsi, and E. Gockenbach, 2007, "Comparison of Electric and Dielectric Properties of Ester Fluids with Mineral Based Transformer Oil", Proc. of 15th Int. Sym. on High Voltage Engineering, T8-484, pp. 1-5
- B. Dolata, H. Borsi, and E. Gockenbach, 2007, "Comparison of Electric and Dielectric Properties of Ester Fluids with Mineral Based Transformer Oil", Proc. of 15th Int. Sym. on High Voltage Engineering, T8-484, pp. 1-5
- C. T. Duy, O. Lesaint, M. N. Ngoc, A. Denat, Y. Bertrand, W. Daoud and M. Hassanzadeh, 2009, "Streamer Initiation and Breakdown in Vegetable- Based Biodegradable Oil", Proc. of 16th Int. Sym. on High Voltage Engineering, C-47, pp. 1-5
- D. Vukovic and S. Tenbohlen, 2009, "Comparative Evaluation of Breakdown Strength of Natural Esters and Mineral Oil", Proc. of 16th Int. Sym. on High Voltage Engineering, C-14, pp. 1-6
- E. Gockenbach and H. Borsi, 2002, "Performance and New Application of Ester Liquid", Proc. of 14th Int. Conf. on Dielectric Liquids, pp. 203-2006
- F. Murdiya, R. Hanaoka, H. Akiyama, K. Miyagi, K. Takamoto and T. Kano, 2014 "Creeping discharge developing on vegetable-based oil / pressboard interface under AC voltage," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no. 5, pp. 2102-2110.
- H. Yamamoto, S. Otsuka, R. Hanaoka, S. Takata, N. Osawa, Y. Kanamaru and H. Koide, 2010, "Creeping Discharge in PFAE Oil Traveling over Pressboard Surface with Small Alien Substances", IEEJ Trans. FM, Vol. 130 (11), pp. 1019-1024
- I. Fofana, J. S. N'cho, J. C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, P. S. Georgilakis, 2011 "Comparative Studies of the Stabilities to Oxidation and Electrical Discharge between Ester Fluids and Transformer Oils," North American Power Symposium 2011 (NAPS'11), pp.1-4
- Jonathan O. Obande, Jonathan U. Agber, 2014, "Palm Oil as An Alternative Dielectric Transformer Coolant", International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES), Vol. 2, Issue 6, June 2014
- Kato, K.; Nara, T.; Okubo, H.; Endo, F.; Yamazaki, A; Koide, H.; Hatta, Y.; Hikosaka, T., 2009, "Space charge behavior in palm oil fatty acid ester (PFAE) by electro-optic field measurement," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on , vol.16, no.6, pp.1566,1573, December 2009
- L. Lewand, 2004 "Laboratory Testing of Natural Ester Dielectric Liquids," Neta World, pp. 1-4. <http://www.doble.com>
- M. A. G. Martins, 2010, "Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers – Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil", IEEE Electrical Insul. Mag., Vol. 26 (6), pp. 7-13,
- M. Shinke, K. Miyazato, T. Tada, Y. Takeuchi, Y. Nakagami, R. Shimizu, M. Kosaka, and M. Wada, 2003, "Fundamental Studies on Development of Environment Friendly Vegetable Oil Filled Transformer", IEEJ Trans. PE, Vol. 123 (2), pp. 187-193
- N. A. Muhamad, B. T. Phung and T. R. Blackburn, 2012, "Application of Common Transformers Faults Diagnosis Methodes on Biodegradable Oil-filled Transformers", Electr. Eng. pp. 207-216
- Nazera Ismail, Yanuar Z. Arief, Zuraimy Adzis, Shakira A. Azli, Abdul Azim A. Jamil, Noor Khairin Mohd., Lim Wen Huei, Yeong Shoot Kian, 2013, "Effect of Water on Electrical Properties of Refined, Bleached, and Deodorized Palm Oil (RBDPO) as Electrical Insulating Material", Jurnal Teknologi, Vol.64, No.4

- Okubo, H.; Yamamoto, S.; Nara, T.; Kato, K.; Endo, F.; Yamazaki, A; Hatta, Y.; Hikosaka, T.; Koide, H., 2008, "Charge behavior in Palm Fatty Acid Ester oil (PFAE) / pressboard insulation system under flow condition in power transformers," Dielectric Liquids, 2008. ICDL 2008. IEEE International Conference on , vol., no., pp.1,4, June 30 2008-July 3 2008
- R. Hanaoka, 2010, "Development of Promising Insulating Oil and Applied Techniques of EHD, ER • MR," IEEJ, vol. 130, pp. 24-28
- Suwarno, Aditama, 2005 "Dielectric Properties of Palm Oils as Liquid Insulating Materials: Effects of Fat Content", Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan.
- Suwarno, F. Sitingjak, I. Suhariadi, L. Imsak, 2003 "Study on the Characteristics of Palm Oil and its Derivatives as Liquid Insulating Materials", Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya.
- T. Kano, H. Iwabuchi, Y. Hashida, J. Yamada, T. Hikosaka, A. Yamazaki, Y. Hatta, and H. Koide, 2008, "Analysis of Electro-Chemical Characteristics of Palm Fatty Acid Esters as Insulating Oil", Proc. of 16th IEEE Int. Conf. on Dielectric Liquids, S4-01, pp. 307-310
- T. V. Oommen, 2002, "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers", IEEE Electrical Insul. Mag., Vol. 18 (1), pp. 6-11
- Y. Kasahara, M. Kato, S. Watanabe, M. Iwahashi, R. Wakamatsu, T. Suzuki, A. Kanetani, K. Kano and T. Tamura, 2012, "Consideration on the Relationship Between Dielectric Breakdown Voltage and Water Content in Fatty Acid Esters", J. Am Oil Chem., pp. 1223-1229.