

# PERBANDINGAN KONSTANTA DIELEKTRIK DAN PERMITIVITAS RELATIF MINYAK SAWIT DENGAN MINYAK ISOLASI MINERAL PASCA PENUAAN TERMAL

**Abdul Rajab**

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas teknik  
Universitas Andalas  
Email: [abdul\\_rajab@ft.unand.ac.id](mailto:abdul_rajab@ft.unand.ac.id)

## ABSTRAK

Sifat ramah lingkungan, dalam arti mudah terbiodegradasi, dan faktor ketersediaan yang melimpah membuat minyak sawit diusulkan menjadi alternatif minyak isolasi. Dengan demikian maka karakteristik dielektrik minyak sawit akibat tekanan termal perlu dievaluasi. Makalah ini memaparkan konstanta dielektrik dan permitivitas relatif minyak sawit pasca penuaan termal. Hasilnya dibandingkan dengan minyak mineral pada kondisi perlakuan dan pengujian yang sama. Minyak dipanaskan selama 1 hingga 7 hari dalam sebuah oven listrik sebelum faktor disipasi dan konstanta dielektriknya diuji. Viskositas minyak juga turut dievaluasi untuk mengantisipasi kemungkinan adanya degradasi molekul minyak pasca penuaan. Perlakuan penuaan termal dilakukan mengacu pada standar IEC-61125, sedangkan prosedur pengujian dilakukan dengan mengacu pada standar IEC247. Hasilnya menunjukkan bahwa faktor disipasi kedua minyak naik dengan naiknya durasi penuaan termal. Hal ini ditengarai sebagai akibat dari semakin banyaknya pembawa muatan hasil degradasi minyak maupun degradasi kontaminan. Konstanta dielektrik minyak sawit dan minyak mineral juga mengalami kenaikan yang diduga diakibatkan oleh kehadiran senyawa polar hasil hidrolisis minyak sawit dan oksidasi minyak mineral.

*Kata Kunci : Minyak isolasi, penuaan termal, faktor disipasi, konstanta dielektrik*

## I. PENDAHULUAN

Sampai saat ini jenis minyak isolasi yang paling banyak digunakan adalah minyak mineral. Minyak mineral diekstrak dari minyak bumi, sehingga berasal dari sumber yang tidak terbarukan (Suwarno dkk., 2003). Kelemahan lain dari minyak mineral adalah memiliki titik kilat dan titik bakar rendah, sekitar 146 °C dan 162 °C. Minyak mineral dianggap rentan terhadap kebakaran, sehingga muncul minyak isolasi kelompok *less-flammable*. Minyak isolasi kelompok *less-flammable* tersebut kurang diminati, karena tergolong bahan kimia berbahaya dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan (McShane, 2002).

Akhir-akhir ini para peneliti dan praktisi isolasi sedang ramai menyelidiki penggunaan minyak nabati sebagai alternatif minyak isolasi transformator, karena dipandang ramah lingkungan dan dapat terbiodegradasi secara alami baik ketika terjadi kebocoran atau ketika minyak dibuang. Selain itu, minyak nabati

juga unggul dalam hal titik kilat dan titik bakar yang tinggi dan mudah diperoleh sehingga ketersediaannya terjamin (Claiborne, 1999; Oommen dan Claiborne, 2000). Salah satu jenis minyak nabati yang dianggap berpotensi untuk digunakan sebagai minyak isolasi adalah minyak sawit.

Jika minyak sawit akan digunakan sebagai minyak isolasi di masa depan, karakteristik dielektrik minyak harus tetap berada dalam rentang nilai yang bisa ditoleris jika minyak mengalami tekanan termal sampai ke level tertinggi yang diperbolehkan. Hal ini karena selama pengoperasiannya dalam transformator, minyak isolasi terus mengalami tekanan termal (panas), akibat rugi-rugi yang timbul saat pembebanan. Secara umum material isolasi akan mengalami penurunan kualitas seiring dengan berjalannya waktu pakai yang bisa berujung pada situasi dimana material tidak lagi mampu mengemban fungsinya sebagai isolasi. Oleh karena itu karakteristik dielektrik minyak sawit akibat tekanan termal atau pemanasan perlu dilakukan.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian-penelitian tentang penuaan termal minyak nabati telah banyak mendapat perhatian para peneliti. McShane (2001) melakukan penuaan dipercepat dengan memanaskan minyak nabati bersama isolasi kertas dalam wadah tertutup dengan menyertakan tembaga dan aluminium sebagai katalis. Wadah berisi minyak tersebut dipanaskan pada temperatur 130 °C, 150 °C dan 170 °C, selama 500, 1000, 2000 dan 4000 jam. Fokus dari penelitian ini adalah mengevaluasi tingkat degradasi isolasi kertas pasca penuaan termal dan dibandingkan dengan minyak mineral. Parameter yang diuji adalah derajat polimerisasi dan kekuatan tarik. Hasilnya menunjukkan bahwa isolasi kertas dalam minyak nabati mengalami penuaan lebih lambat dibandingkan dengan dalam minyak mineral. Butuh waktu sekitar lima sampai delapan kali lebih lama bagi isolasi kertas dalam minyak nabati untuk mencapai tingkat degradasi yang sama dengan isolasi kertas dalam minyak mineral. Penelitian ini tidak menyentuh karakteristik dielektrik minyak pasca penuaan.

Fofana (2003) melakukan penelitian tentang penuaan termal dengan memanaskan minyak nabati dan isolasi kertas dalam oven pada temperatur 100 °C selama 1000 jam dengan/tanpa kehadiran oksigen. Logam-logam seperti seng, tembaga, aluminium dan besi ditambahkan sebagai katalis. Senada dengan McShane (2001), Fofana lebih memilih isolasi kertas sebagai bahan yang diteliti. Sementara McShane menguji tingkat degradasi isolasi kertas akibat penuaan, Fofana lebih memilih tegangan tembus dan faktor disipasi isolasi kertas dalam minyak nabati sebagai parameter yang diteliti dan hasilnya dibandingkan dengan hasil pengujian isolasi kertas dalam minyak mineral. Fofana melaporkan bahwa keberadaan oksigen cenderung menurunkan tegangan tembus dan menaikkan faktor disipasi isolasi kertas lewat proses oksidasi dan pembentukan asam.

Penelitian tentang penuaan minyak nabati yang fokus pada pengujian minyaknya dilakukan oleh Perrier dan Beroual (2009). Penuaan dipercepat dilakukan berdasarkan standar IEC-61125, dengan memanaskan minyak pada temperatur 120 °C selama 14 hari.

Perrier dan Beroual lebih fokus pada pengaruh penuaan termal terhadap viskositas dan keasaman minyak. Mereka menyimpulkan bahwa angka keasaman minyak nabati meningkat cukup signifikan akibat penuaan termal, demikian pula dengan viskositasnya. Penelitian ini hanya mengevaluasi viskositas dan keasaman minyak diakhir periode penuaan dan membandingkannya dengan kondisi awal sebelum penuaan. Tidak ada upaya untuk melihat tahapan perubahan viskositas dan keasaman minyak akibat penuaan. Karakteristik dielektrik minyak juga tidak menjadi kajian dalam penelitian ini

Endah Yulastuti (2010) juga telah melakukan penelitian tentang pengaruh penuaan termal terhadap minyak ester sintetis dan minyak mineral berdasarkan standar IEC-61125. Meskipun tidak meneliti minyak nabati, namun peninjauan ini relevan oleh karena minyak ester sintetis memiliki banyak kesamaan dengan ester alami (minyak nabati). Sebagaimana ester alami minyak nabati, ester sintetis merupakan hasil sintesa alkohol dengan asam-asam lemak rantai panjang. Penuaan termal dilakukan melalui pemanasan pada temperatur 100 °C selama 1440 jam. Parameter-parameter seperti tegangan tembus, faktor disipasi, konstanta dielektrik dan kandungan air relatif diuji setiap periode pemanasan selama 46, 94, 190, 286, 430, 598, 766, 1102 dan 1438 jam. Endah Yulastuti terlihat berupaya menginvestigasi tahapan penuaan termal dan pengaruhnya terhadap parameter-parameter seperti tegangan tembus, faktor disipasi, konstanta dielektrik dan kandungan air relatif minyak. Pembahasan hasil penelitian ini fokus pada analisis kecenderungan perubahan parameter-parameter tersebut terhadap penuaan.

Penuaan termal yang dilakukan dalam rangka penelitian ini dilakukan berdasarkan standar IEC-61125, sebagaimana yang dilakukan oleh Perrier dan Beroual (2009) dan Endah Yuslianti (2010). Minyak ditempatkan dalam sebuah gelas *beaker* terbuka dan dipanaskan dalam oven listrik pada temperatur 100 °C selama maksimal 7 hari (lama penuaan menurut IEC-61125/A adalah 164 jam). Kawat tembaga disertakan dalam minyak untuk mempercepat proses oksidasi. Faktor disipasi dan konstanta dielektrik diuji setiap selang 1 hari. Pengujian viskositas juga dilakukan untuk mengantisipasi fenomena yang mengikuti

perubahan karakteristik dielektrik minyak akibat penuaan. Berbeda dengan Perrier dan Beroual dan Yuslianti, penelitian ini lebih menekankan pada elaborasi fenomena fisik maupun kimiawi yang menyertai perubahan karakteristik dielektrik akibat penuaan.

### III. METODOLOGI

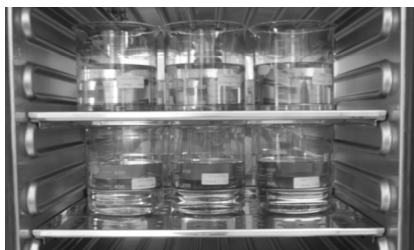
Metodologi yang digunakan meliputi penyiapan sampel, penuaan termal, pengujian-pengujian dan analisis hasil pengujian.

#### 3.1. Sampel

Sampel yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak sawit yang telah mengalami proses-proses seperti *Refining, Bleaching, Deodorizing dan Fractination*. Selain itu, minyak mineral juga diuji pada kondisi pengujian yang sama sebagai pembanding.

#### 3.2. Penuaan Termal

Penuaan termal disimulasikan dengan memanaskan sampel minyak dalam sebuah oven listrik, sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 1. Sampel minyak sebanyak 500 ml ditempatkan dalam gelas *beaker* tahan panas berukuran 1000 ml dan dipanaskan dalam sebuah oven listrik yang diset pada temperatur 100 °C. Gelas *beaker* berisi minyak dibiarkan terbuka supaya terjadi kontak dengan udara di dalam oven sehingga dimungkinkan untuk terjadi reaksi oksidasi. Kawat tembaga sekitar 2,2 gram ditambahkan ke dalam minyak untuk mempercepat proses oksidasi. Sampel pertama dikeluarkan setelah satu hari pemanasan. Sampel-sampel berikutnya dikeluarkan setelah 2, 3, 4, 5, 6 dan 7 hari. Sampel minyak yang telah diberi penuaan termal dibiarkan dingin secara alami sebelum pengujian dilakukan.



**Gambar 1.** Pemanasan minyak dalam sebuah oven listrik.

#### 3.3. Pengujian Faktor Disipasi dan Konstanta Dielektrik

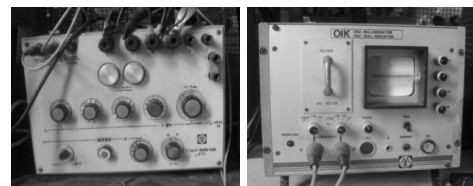
Konstanta dielektrik dan faktor disipasi dielektrik minyak diuji dengan menggunakan C-Tn $\delta$ -MeBbruck. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip rangkaian jembatan *Schering*, sesuai dengan standar pengujian IEC-247 (2004). Sampel minyak ditempatkan dalam sebuah sel uji yang terbuat dari bahan *stainless steel*, dari Tetttext Instruments. Sel uji ini terdiri dari dua buah elektroda konsentris sebagaimana ditunjukkan dalam gambar 2.

Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan AC 1 kVrms, 50 Hz pada kedua terminal jembatan Schering. Dengan jarak antara elektroda dalam dan elektroda luar 2 mm, maka medan listrik pada celah elektroda bernilai sekitar 0,5 kV/mm. Nilai ini sesuai dengan standar IEC-247 yang mensyaratkan medan listrik untuk pengujian faktor disipasi dan konstanta dielektrik minyak isolasi (jenis mineral) pada kisaran antara 0,03 kV/mm sampai dengan 1 kV/mm. Kesetimbangan jembatan schering diperoleh dengan mengatur tahanan dan kapasitor variabel pada alat uji C-Tn $\delta$ -MeBbruck seperti ditunjukkan pada gambar 3a. Indikasi kesetimbangan diketahui dari tampilan kurva lissajous berbentuk garis lurus pada osiloskop penunjuk nol seperti ditunjukkan oleh gambar 3b.



(a) (b)

**Gambar 2.** Sel uji untuk pengujian faktor disipasi dan konstanta dielektrik; (a) *Housing*, (b) pasangan elektroda luar dan elektroda dalam.



(a) (b)

**Gambar 3.** Alat Uji faktor disipasi dan konstanta dielektrik; (a) C-Tn $\delta$ -MeBbruck, (b) Osiloskop penunjuk nol.

### 3.4. Viskositas

Pengujian viskositas dimaksudkan untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya degradasi molekul minyak menjadi molekul-molekul yang lebih kecil, atau sebaliknya kemungkinan terjadinya polimerisasi membentuk molekul yang lebih besar. Panjang pendeknya rantai atom dalam suatu senyawa kimia akan menentukan viskositasnya karena terkait dengan gaya Van Der Waals yang bekerja pada dua molekul berdekatan (Fessenden & Fessenden, 1986).

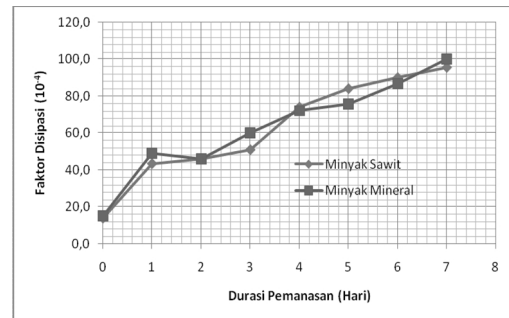
## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Faktor Disipasi

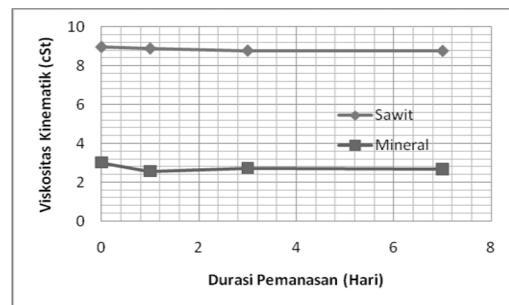
Penuaan termal atau pemanasan terhadap sampel minyak dilakukan selama 7 hari, dan setiap selang satu hari sampel dikeluarkan dari oven untuk dilakukan pengukuran faktor disipasi. Untuk setiap durasi pemanasan, pengukuran faktor disipasi dilakukan sebanyak 2 kali dan nilai rata-rata ke dua hasil pengukuran ditunjukkan dalam gambar 4.

Dari gambar 4 terlihat bahwa faktor disipasi kedua minyak meningkat seiring dengan bertambahnya durasi penuaan. Hasil pengukuran faktor disipasi ini mengindikasikan terjadinya pemotongan rantai atom karbon dalam struktur molekul minyak, baik minyak sawit maupun minyak mineral. Proses ini akan memperbesar kandungan senyawa ionik dalam minyak, yang diketahui merupakan salah satu faktor penyebab naiknya konduktivitas listriknya.

Dugaan terjadinya degradasi molekul minyak didukung oleh hasil pengujian viskositas, yang menunjukkan bahwa viskositas kedua minyak menurun dengan bertambahnya durasi penuaan, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5. Penurunan viskositas semakin memperbesar konduktivitas listrik karena meningkatnya mobilitas pembawa muatan. Konduktivitas listrik sendiri merupakan perkalian dari jumlah/konsentrasi pembawa muatan dengan mobilitasnya.



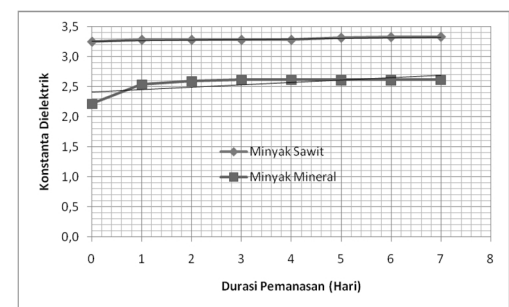
**Gambar 4.** Faktor Disipasi minyak sawit, minyak mineral dan minyak silikon sebagai fungsi dari durasi penuaan termal.



**Gambar 5.** Viskositas kinematik minyak sawit dan minyak mineral sebagai fungsi dari durasi penuaan termal

### 4.2. Konstanta Dielektrik

Parameter yang diukur pada pengujian konstanta dielektrik adalah kapasitansi sel uji, baik dalam kondisi berisi sampel minyak maupun kapasitansi sel uji dalam keadaan kosong. Pengukuran kapasitansi dilakukan pada beberapa durasi pemanasan, dari 0 hingga 7 hari. Untuk setiap durasi, pengukuran dilakukan sebanyak 2 kali dan nilai rata-rata konstanta dielektrik dari dua hasil pengukuran ditunjukkan dalam gambar 6.



**Gambar 6.** Konstanta dielektrik minyak sawit dan minyak mineral sebagai fungsi dari durasi penuaan termal.

Gambar 6 menunjukkan bahwa penuaan termal menyebabkan kenaikan tipis konstanta

dielektrik minyak sawit maupun minyak mineral. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadi peningkatan tingkat kepolaran minyak sawit dan minyak mineral. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh terjadinya proses hidrolisis pada minyak sawit dan reaksi oksidasi pada minyak mineral, meski dengan kadar rendah (tidak terjadi perubahan signifikan pada warna). Proses hidrolisis pada minyak sawit berlangsung berdasarkan persamaan (1) (Biermann, U. dan Metzger, J. O., 2007).



Reaksi hidrolisis pada minyak sawit mengkonsumsi air dan menghasilkan asam karboksilat dan gliserol, Bisa dipahami kalau terjadi penurunan tajam dalam kandungan air relatif minyak sawit sehingga tegangan tembusnya naik secara signifikan. Disamping berkurang dengan pemanasan, penurunan kadar air diperkuat oleh reaksi hidrolisis yang mengkonsumsi air.

Baik asam karboksilat maupun gliserol merupakan senyawa dengan tingkat kepolaran tinggi. Kehadiran gliserol meningkatkan kepolaran minyak yang berimbas pada kenaikan konstanta dielektrik. Meskipun secara struktur asam karboksilat merupakan molekul yang polar, namun kehadirannya tidak berpengaruh terhadap kepolaran minyak. Suatu molekul asam karboksilat biasanya bergabung dengan molekul asam karboksilat lain melalui ikatan hidrogen yang kuat membentuk dimer. Gabungan dua molekul asam karboksilat ini menghasilkan dimer yang nonpolar. Kepolaran keduanya hilang karena kesimetrian geometri dimer yang terbentuk. Gambar 7 menunjukkan dimer asam karboksilat yang terbentuk oleh ikatan hidrogen.

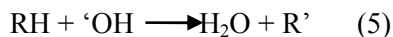
Reaksi oksidasi pada minyak mineral menghasilkan air dan asam karboksilat berdasarkan persamaan (2) sampai dengan persamaan (5). Reaksi pertama adalah terjadinya oksidasi pada molekul hidrokarbon penyusun minyak menghasilkan *hydroperoksida* (Suwarno, 2006):



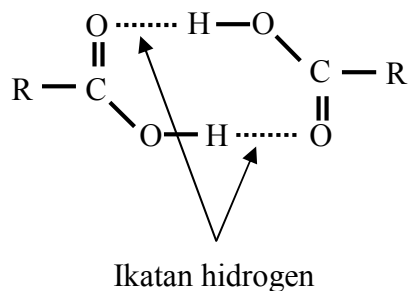
*Hydroperoksida* kemudian mengalami penguraian berdasarkan reaksi berikut :



Kedua radikal bebas hasil penguraian ini akan bereaksi kembali dengan molekul RH menghasilkan alkohol dan air berdasarkan reaksi berikut :



Berdasarkan persamaan (4) dan persamaan (5) maka hasil dari oksidasi minyak mineral yang memberi efek signifikan terhadap karakteristik dielektrik minyak adalah alkohol (ROH) dan air (H<sub>2</sub>O). ROH hasil reaksi diatas akan mengalami reaksi oksidasi lebih lanjut, tergantung pada jenis ikatan alkoholnya. Jika alkoholnya adalah alkohol primer, maka oksidasi akan menghasilkan aldehid (RCOH). Selanjutnya aldehid mengalami oksidasi membentuk asam karboksilat (RCOOH). Jika alkoholnya adalah alkohol sekunder, maka oksidasi akan menghasilkan keton (Suwarno, 2006).



**Gambar 7.** Dua molekul asam karboksilat membentuk dimer. Kepolaran masing-masing asam karboksilat saling meniadakan dengan struktur geometri dimer yang simetris.

Kehadiran asam karboksilat tidak berpengaruh terhadap kepolaran minyak mineral, karena dua molekul asam karboksilat cenderung membentuk dimer seperti pada kasus hidrolisis minyak sawit (Gambar 7). Tetapi kehadiran aldehid dan keton meningkatkan tingkat kepolaran minyak mineral. Hal inilah tampaknya yang menjadi alasan mengapa konstanta dielektrik minyak mineral sedikit meningkat dengan penuaan termal. Pemanasan seharusnya mereduksi kandungan air relatif minyak mineral, akan tetapi reaksi oksidasi kembali menghasilkan air dalam minyak mineral. Hal ini mengakibatkan kandungan air relatif minyak mineral tidak mengalami perubahan drastis sebagaimana terjadi pada

minyak sawit. Sebagai konsekuensinya, tegangan tembus minyak mineralpun tidak mengalami perubahan berarti, sebagaimana terjadi pada kasus minyak sawit.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan pada pembahasan di atas maka beberapa kesimpulan dapat diambil sebagai berikut:

1. Faktor disipasi kedua minyak naik dengan naiknya durasi penuaan termal. Degradasi molekul minyak maupun molekul kontaminan dalam minyak ditengarai sebagai penyebabnya. Disamping meningkatkan jumlah pembawa muatan, degradasi juga menurunkan viskositas minyak dan memperbesar mobilitas pembawa muatan dalam minyak.
2. Sedangkan konstanta dielektrik minyak sawit dan minyak mineral naik akibat kehadiran senyawa polar hasil hidrolisis minyak sawit dan oksidasi minyak mineral.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada LPPM Unand atas bantaun pembiayaan melalui Program Penelitian Dana DIPA Unand 2012.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Biermann, U. dan Metzger, J. O., *Application of Vegetable Oil-Based Fluids as Transformer Oil*, Oldenburg Fakultat V Mathematik und Naturwissenschaften, Carl Von Ossietzky Universitat, Hamburg (2007).
- [2] Claiborne, C.C., Wals, E.J. dan Oommen T.V., *An Agricultrally Based Biodegradable Dielectric Fluid*, Proceeding of IEEE/PES T&D Conference, New Orleans, 11-16 (1999).
- [3] Endah Yuliasuti, *Analysis of Dielectric Properties Comparison between Mineral Oil and Synthetic Ester Oil*, Master Thesis, Delf University of Technology (2010).
- [4] Fessenden dan Fessenden, *Kimia Organik*, Penerbit Airlangga (1986).
- [5] Fofana, I., dkk., *Results on Ageing of Aramid Paper under Selective Conditions*, XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands (2003).
- [6] IEC-61125, *Unused hydrocarbon based insulating liquids - Test methods for evaluating the oxidation stability* (1992).
- [7] IEC 60247, *Insulating Liquids – Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor and DC Resistivity* (2004).
- [8] McShane, C.P., dkk., *Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid*, 2001 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Atlanta GA (2001).
- [9] McShane, C.P., *Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolant*, IEEE Industry Applications Magazine, 8, 34-41 (2002).
- [10] Oommen, T.V., dan Claiborne. C.C., *A New Vegetable Oil Based Transformer Fluid : Development and Verification*, Proceeding of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 876-881 (2000).
- [11] Perrier C. dan Beroual A., *Experimental Investigations on Insulating Liquids for Power Transformers: Mineral, Ester, and Silicone Oils*, IEEE Electrical Insulation Magazine (2009).
- [12] Suwarno, Sitinjak, F., Suhariadi, I. dan Imsak, L., Study on the Characteristics of Palm Oil and it's Derivatives as Liquid Insulating Materials, Proceedings of the 7th Intemational Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Nagoya, 495-498 (2003).
- [13] Suwarno, Teknik Isolasi, Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung, Bandung (2006).

## Biodata Penulis

Penulis menyelesaikan pendidikan S1 tahun 1996 di Universitas Hasanuddin dan menyelesaikan pendidikan S2 di ITB tahun 2001. Saat ini penulis terdaftar sebagai dosen Teknik Elektro Universitas Andalas Padang. Minat penelitian adalah minyak isolasi pada peralatan listrik tegangan tinggi, monitoring dan diagnosis sistem isolasi