

**Karakteristik Fisika Kimia**  
**Formulasi Minyak Lumas Trafo *Inhibited***  
***Chemical Physical Characteristics of***  
***Inhibited Transformer Oil***

**Shinta Sari Hastuningtyas dan Catur Yuliani Respatiningsih**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"  
Jl. Ciledug Raya Kav.109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan  
Telepon: +62-21-7394422, Fax.: +62-21-7246150  
e-mail: [shintas@lemigas.esdm.go.id](mailto:shintas@lemigas.esdm.go.id); [cyuliani@lemigas.esdm.go.id](mailto:cyuliani@lemigas.esdm.go.id)

Teregistrasi I tanggal 2 Januari 2015; Diterima tanggal 3 Februari 2015; Disetujui terbit tanggal: 30 April 2015

**ABSTRAK**

Transformator pada pembangkit listrik membutuhkan bahan dielektrik sebagai bahan isolasi untuk memisahkan dua atau lebih penghantar listrik yang bertegangan. Sehingga antar penghantar tersebut tidak terjadi hubung singkat yang dapat menyebabkan lompatan api atau percikan. Salah satu bahan dielektrik yang digunakan adalah minyak lumas transformator. Minyak di Indonesia masih impor, untuk itu perlu dilakukan formulasi minyak lumas trafo dengan berbagai komposisi. Kapasitas terpasang dan jumlah trafo di Indonesia cukup besar dan pemenuhan minyak trafo masih dengan cara impor. Dilakukan formulasi minyak trafo dengan berbagai komposisi untuk menghasilkan enam belas formula, kemudian diambil tiga formula yang mendekati sifat fisika kimia minyak trafo di pasaran. Dari tiga formula itu menunjukkan bahwa Formula 6 memiliki hasil uji terbaik dengan hasil uji viskositas kinematik pada temperatur 40°C 11,6 cSt, titik nyala 180°C, angka asam total 0,04 mgKOH/gr, dielectric breakdown voltage (DBV) 39 kV, dan interfacial tension (IFT) 41 mN/m. Sehingga formula ini memenuhi spesifikasi SNI 7069.18 : 2008 dan IEC 60296-2003.

**Kata Kunci:** *trafo, dielectric breakdown voltage, interfacial tension, angka asam total, minyak transformator.*

**ABSTRACT**

*Transformer of a power plant requires dielectric materials as insulation to separate two or more electrically conductive voltage substances. So that substance conductivity will not occur a short circuit that could cause fire or spark jumps. One of the dielectric material used is a lubricating oil transformer (transformer oil). Installed capacity and number of transformers in Indonesia is quite large and the fulfillment of transformer oil in Indonesia is still imported. Therefore it is necessary to formulate lubricating oil transformer with various compositions to produce at least sixteen formulas, and then it will be chosen three samples with the closest physicochemical properties of transformer oil in the market. Of the three formulas show that Formula 6 has the best test results according test results at temperatures of 40°C kinematic viscosity is 11.6 cSt, flash point is 180°C, the total acid number (TAN) is 0.04 mgKOH/g, the dielectric breakdown voltage (DBV) is 39 kV, and the interfacial tension (IFT) is 41 mN/m. And this formula meets the specifications of ISO 7069.18: 2008 and IEC 60296-2003.*

**Keywords:** *transformers, dielectric breakdown voltage, the interfacial tension, total acid number, transformer oil.*

**I. PENDAHULUAN**

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan dan mengubah daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan

frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu melalui suatu rangkaian magnet dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis, dimana perbandingan tegangan antara sisi primer dan sisi sekunder berbanding lurus dengan perbandingan

jumlah lilitan dan berbanding terbalik dengan perbandingan arusnya (Muchsin, 2013).

Minyak trafo sangat penting dalam sebuah transformator pembangkit karena kegagalan insulasi dapat menyebabkan masalah serius, dan kegagalan itu diantaranya disebabkan oleh panas, kontaminasi (debu, air, dan oksigen), tekanan mekanik dan tekanan listrik (Kiameh, 2001). Sebagian besar trafo yang beroperasi di dunia adalah trafo dengan insulasi minyak (Heathcote, 2007).

Kebutuhan minyak trafo semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kapasitas produksi beberapa perusahaan listrik di Indonesia yang dipengaruhi oleh rasio elektrifikasi. Berdasarkan data statistik PLN di Jawa Barat pada tahun 2011, kapasitas terpasang trafo gardu induk sebesar 71.615 MVA dengan jumlah trafo gardu induk sebanyak 1.233 unit, terdiri atas trafo sistem 500 kV sebanyak 47 unit, sistem 275 kV sebanyak 7 unit, sistem 150 kV sebanyak 980 unit, sistem 70 kV sebanyak 196 unit, dan sistem < 30 kV sebanyak 3 unit. Sedangkan kapasitas terpasang dan jumlah trafo gardu distribusi sebesar 39.277 MVA sebanyak 318.431 unit. Jumlah ini menggambarkan rasio elektrifikasi sebesar 71,2% (RUPTL 2013-2022). Dengan data ini menunjukkan bahwa kebutuhan minyak trafo di Indonesia cukup besar. Sejumlah komposisi tertentu antara minyak lumas dasar mineral dan sintetik dengan aditif, diharapkan mampu menghasilkan minyak lumas transformator yang baik.

Oleh karena itu penelitian mengenai perancangan minyak lumas transformator ini perlu dilakukan karena selama ini kebutuhan akan minyak lumas jenis ini hanya dapat dipenuhi dengan cara impor.

## II. BAHAN DAN METODE

Perancangan formula minyak lumas dilaksanakan dengan metode sebagai berikut :

### Pemilihan Bahan Dasar (Minyak Lumas Dasar dan Aditif)

Bahan dasar berupa base oil dan aditif, diperoleh dari produsen minyak lumas dasar dari dalam dan luar negeri serta produsen aditif. Base oil yang digunakan merupakan jenis parafinik dan karakteristik yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihannya antara lain viskositas kinematik pada temperatur 40°C, angka asam total, kadar air (water content), titik nyala dan dielectric breakdown voltage (DBV). Aditif yang digunakan dalam

formulasi minyak trafo sebaiknya merupakan aditif yang mampu menangkap radikal bebas atau bersifat fenolik atau deaktivator metal amina dan nitrogen heterosiklik. Karena menggunakan aditif paket rust and oxidation inhibitor maka jenis minyak trafo ini termasuk jenis inhibited oil. Aditif ini merupakan alkil ester ditiofosfat dan merupakan deaktivator metal turunan dari tolutriazole. Digunakan empat jenis base oil dari Grup-III dan Grup-IV serta dua jenis aditif penghambat oksidasi.

### Perancangan Formula

Formula dirancang untuk memenuhi spesifikasi yang tercantum dalam SNI 7069.18:2008 dan IEC 60296:2003 yaitu spesifikasi minyak insulasi mineral untuk trafo dan switchgear. Campuran base oil dan aditif dihitung berdasarkan persen berat dan selanjutnya digunakan sebagai ukuran untuk blending skala laboratorium.

### Blending

Proses blending minyak trafo dilaksanakan pada skala laboratorium, dengan cara pengadukan menggunakan stirrer berbahan silika, selama 1 jam dengan disertai pemanasan pada suhu 65-70°C. Proses pengadukan ini merupakan proses yang umum dilakukan dalam suatu tahapan formulasi minyak lumas. Oleh karena minyak lumas dasar yang digunakan memiliki kandungan air yang tinggi, maka diperlukan perlakuan tambahan berupa vakum. Vakum dilakukan selama 3 jam, pada temperatur 75-80°C dan tekanan -10 inHg (-0,34 bar).

### Pengujian dan evaluasi

Karakteristik produk minyak lumas selanjutnya diuji sifat fisika kimianya. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan formula yang telah dibuat. Hasil uji sebanyak satu formula terbaik yang kemudian dibandingkan spesifikasi yang ada dipasaran. Oleh karena itu dipilih beberapa sifat yang mewakili masing-masing karakteristik minyak trafo yang sesuai dengan IEC 60296-2003, yaitu :

- Fungsi, diwakili oleh sifat viskositas pada temperatur 40°C dan dielectric breakdown voltage (DBV).
- Kestabilan, diwakili oleh sifat tegangan antar muka atau interfacial tension (IFT) dan angka asam total.
- Kesehatan dan keselamatan kerja, diwakili oleh titik nyala.

### III. HASIL DAN DISKUSI

Pada umumnya minyak lumas trafo terdiri atas 95-99,5% minyak lumas dasar dan 5% aditif (Lapopolo, 2005). Menurut Bock (2007), minyak lumas trafo yang digunakan pada saat ini terdiri dari minyak lumas dasar parafinik antioksidan serta sifat penghambatan korosi yang baik. Titik tuang yang rendah akan membuat minyak trafo mampu bekerja pada temperatur rendah. Sifat viskositas yang rendah, stabilitas oksidasi dan kelarutan yang tinggi diperlukan untuk mempertahankan dielectric strength dan memperpanjang masa pakai minyak trafo tersebut. Penggunaan minyak lumas dasar yang stabil secara termal seperti jenis API Grup-III atau minyak lumas dasar sintetik terbukti memiliki sifat ketahanan terhadap oksidasi yang baik (Pirro, 2001).

#### Minyak Lumas Dasar

Pemilihan base oil BO-1 dan BO-2 menjadi salah satu bahan pertimbangan utama dalam penelitian ini. BO-1 dan BO-2 memiliki nilai indeks viskositas yang tinggi sehingga membuat minyak lumas dasar tahan terhadap perubahan temperatur sistem. Base oil ini juga memiliki sifat ketahanan terhadap oksidasi yang baik karena memiliki kadar molekul hidrokarbon aromatik dan non-hidrokarbon seperti sulfur, nitrogen dan oksigen yang rendah pula (Wartawan, 1981). Minyak lumas dasar yang diperoleh dari hasil proses perengkahan hidrogen (hydrocracking) memiliki sifat gassing tendency atau kecenderungan minyak untuk mengadsorpsi dan mendesorpsi atom hidrogen, sehingga dapat digunakan dalam formulasi minyak trafo (Olavessen et al., 1992). Terdapat beberapa karakteristik utama yang perlu diperhatikan dalam formulasi ini yaitu viskositas kinematik pada temperatur 40°C, angka asam total (total acid number), titik nyala dan dielectric breakdown voltage (DBV).

Dalam proses formulasi suatu minyak lumas, diperlukan suatu jenis minyak lumas dasar yang memiliki sifat viskositas (untuk temperatur tertentu)

dan satu paket aditif untuk membentuk suatu karakteristik (Hsu dan Gates, 2001). Menurut spesifikasi minyak trafo dalam IEC 60296-2003, karakteristik viskositas kinematik dibatasi maksimal 12 cSt. BO-1 dan BO-2 memiliki viskositas kinematik lebih besar dari nilai tersebut sehingga dalam proses formulasi dibutuhkan minyak lumas dasar BO-3 atau BO-4 yang memiliki nilai viskositas kinematik lebih rendah dari 12 cSt (Tabel 1).

Nilai TAN dibatasi maksimal 0,01 mgKOH/gr sampel, sedangkan hasil pengujian BO-1, BO-2, BO-3 menunjukkan nilai TAN yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh pengaruh kadar air dalam minyak lumas dasar akibat penyimpanannya yang tidak baik. Sedangkan spesifikasi membatasi kadar air dalam minyak lumas maksimal sebesar 30 mg/kg (ppm). Tingginya kadar air dalam minyak lumas dasar mempengaruhi nilai karakteristik dielectric breakdown voltage (DBV), yaitu salah satu karakteristik utama dari unjuk kerja minyak trafo dalam menahan breakdown listrik dalam suatu instrumen.

Nilai karakteristik DBV dibatasi minimal 30 kV. Sedangkan pada Tabel 1, nilai DBV cukup rendah untuk ketiga jenis base oil. Tingginya kadar air yang mempengaruhi nilai TAN dan nilai DBV menyebabkan perlunya dilakukan suatu tahapan untuk mengurangi kadar air dalam minyak trafo dalam proses blending.

Karakteristik titik nyala menunjukkan kondisi penguapan jenuh diatas permukaan minyak lumas sehingga memungkinkan untuk menyala sesaat. Seperti halnya minyak lumas yang lain, minyak trafo juga memerlukan pengujian titik nyala untuk memastikan tingkat kontaminasi bahan bakar minyak dan gas-gas yang mudah terbakar. Minyak trafo sangat rentan terhadap polutan gas berpotensi menimbulkan ledakan dari hasil oksidasi sehingga dibatasi nilai minimumnya. Pada ketiga jenis base oil ini yaitu BO-1, BO-2, BO-3 (Tabel 1) menunjukkan

**Tabel 1**  
**Hasil Uji Karakteristik Minyak Lumas Dasar (Base Oil) dan Aditif Rust and Oxidation Inhibitor**

| No. | Karakteristik                          | Metode Uji  | Hasil Uji Minyak Lumas Dasar (Base Oil) |       |        |       | Hasil Uji Aditif |      |
|-----|--|-------------|---|-------|--------|-------|------------------|------|
|     |  |             | BO-1                                    | BO-2  | BO-3   | BO-4  | RO-1             | RO-2 |
| 1.  | Viskositas pada 40°C, cSt              | ASTM D 445  | 18,56                                   | 33,27 | 5,048  | 1,64  | 10,92            | 80   |
| 2.  | Angka asam total, mgKOH/g              | ASTM D 664  | 0,0702                                  | 0,094 | 0,0856 | 0,065 | --               | --   |
| 3.  | Titik nyala, °C                        | ASTM D 92   | 240                                     | 260   | 178    | 92    | --               | --   |
| 4.  | Kadar air, gr/cm <sup>3</sup>          | ASTM D 1298 | 47,31                                   | 28,75 | 38,17  | 31,4  | --               | --   |
| 5.  | Dielectric breakdown voltage (DBV), kV | ASTM D 877  | 16,40                                   | 27,00 | 18,80  | 23,00 | --               | --   |

**Tabel 2**  
**Spesifikasi Minyak Trafo Menurut IEC 60296-2003**

| No.  | Property            | Test Method            | Transformer oil            |
|--|---------------------|------------------------|----------------------------|
| <b>1. Function</b>                             |                     |                        |                            |
| a.   | Viscosity at 40°C   | ISO 3104               | Max. 12 mm <sup>2</sup> /s |
| b.   | Pour point          | ISO 3018               | Max. -40°C                 |
| c.   | Water content       | IEC 60814              | Max. 30 mg/kg              |
| d.   | Breakdown voltage   | IEC 60158              | Min. 30 kV                 |
| e.   | Density at 20°C     | ISO 3675 or ISO 12185  | Max. 0,895 g/ml            |
| f.   | DDF at 90°C         | IEC 60247 or IEC 61620 | Max. 0,005                 |
| <b>2. Refining/stability</b>                   |                     |                        |                            |
| a.   | Acidity             | IEC 62021              | Max. 0,01 mgKOH/g          |
| b.   | Interfacial tension | ISO 6295               | No general requirement     |
| <b>3. Health, safety and environment (HSE)</b> |                     |                        |                            |
| a.   | Flash point         | ISO 2719               | Min. 135°C                 |

hasil uji diatas 135°C, kecuali untuk BO-4 yang berada di bawah spesifikasi IEC 60296-2003 (Tabel 2) dan SNI 7069.18:2008 (Tabel 3).

Sehingga BO-4 untuk formulasi minyak trafo tidak digunakan dalam penelitian ini. Menurut Fein (1992), karakteristik minyak lumas bergantung pada base oil (campuran berbagai base oil) dan aditif yang digunakan. Aditif dan minyak lumas dasar sering berinteraksi satu dengan lainnya dengan reaksi yang sulit untuk dimengerti sehingga proses formulasi juga kebanyakan dilakukan melalui proses trial and error (Hsu, 2001).

### Produk Hasil Formulasi

Dari hasil seleksi base oil tadi maka digunakan tiga jenis minyak lumas dasar yaitu dua jenis minyak lumas dasar Grup-III (BO-1 dan BO-2) dan satu jenis minyak lumas dasar Grup IV (BO-3). Semua karakteristik minyak lumas dasar serta aditif tersebut ditunjukkan dalam Tabel 1. Berbagai komposisi bahan dasar yang terdiri dari base oil dan

aditif kemudian dicampur sehingga total dari persen berat satu formula mencapai seratus persen berat. Diharapkan 16 formula yang kemudian dievaluasi karakteristik fisika kimia yang mengacu pada spesifikasi SNI 7069.18 : 2008 dan IEC 60296-2003. Dari semua formula itu kemudian diambil tiga formula terbaik yaitu Formula 2, Formula 6 dan Formula 15 untuk dibandingkan dengan produk sejenis yang ada dipasaran. Komposisinya dapat dilihat pada Tabel 4. Produk yang ada di pasaran dipilih berdasarkan merk yang paling populer serta memiliki tingkat kerja yang sama dengan ketiga formula minyak lumas yang dirancang. Pengambilan sampel produk minyak trafo di pasaran menghasilkan 3 jenis yaitu MT-1, MT-2, dan MT-3 (Tabel 5).

- Viskositas kinematik pada temperatur 40°C (ASTM D 445). Karakteristik ini merupakan hal penting dalam penentuan tingkat viskositas yang telah ditetapkan dalam ISO 3448. Dari Gambar 1 dapat disimpulkan bahwa semua minyak lumas hasil formulasi memiliki nilai yang berada dalam

**Tabel 3**  
**Spesifikasi Minyak Lumas Trafo Menurut SNI 7069.18 : 2008**

| Tabel 3. Spesifikasi Minyak Lumas Trafo Menurut SNI 7069.18 : 2008 |                                  |         |                             |        |             |
|--|----------------------------------|---------|-----------------------------|--------|-------------|
| No.  | Karakteristik                    | Satuan  | Batasan                     |        | Metode Uji  |
|  |                                  |         | Tipe 1                      | Tipe 2 |             |
| 1.   | Aniline Point                    | °C      | Sesuai spesifikasi produsen |        | ASTM D 611  |
| 2.   | Warna, maks                      | --      | Sesuai spesifikasi produsen |        | ASTM D 1500 |
| 3.   | Titik nyala, min                 | °C      | 145                         | 145    | ASTM D 92   |
| 4.   | Titik tuang, maks                | °C      | Sesuai spesifikasi produsen |        | ASTM D 97   |
| 5.   | Gravitasi spesifik               | --      | 0,91                        | 091    | ASTM D 1298 |
| 6.   | Viskositas kinematik 0 °C, maks  | cSt     | Sesuai spesifikasi produsen |        | ASTM D 445  |
|  | Viskositas kinematik 40°C, maks  | cSt     |                             |        |             |
|  | Viskositas kinematik 100°C, maks | cSt     |                             |        |             |
| 7.   | Kadar air, maks                  | ppm     | 35                          | 35     | ASTM D 1533 |
| 8.   | Angka asam total, maks           | mgKOH/g | 0,03                        | 0,03   | STM D 974   |
| 9.   | Sulfur korosif                   | --      | Tidak korosif               |        | ASTM D 1275 |
| 10.  | Kandungan PCB                    | --      | Tidak terdeteksi            |        | ASTM D 4059 |

**Tabel 4**  
**Komposisi Minyak Lumas Dasar, dan Aditif dalam Formula 2, Formula 6 dan Formula 15**

| No. | Nama Produk | Jenis              | Tipe                | Dosis, % berat |           |            |
|-----|-------------|--------------------|---------------------|----------------|-----------|------------|
|     |             |                    |                     | Formula 2      | Formula 6 | Formula 15 |
| 1.  | BO-1        | Minyak lumas dasar | Sintetik/Grup-III   | 0              | 0         | 79         |
| 2.  | BO-2        |                    | Sintetik/Grup-III   | 45             | 45        | 0          |
| 3.  | BO-3        |                    | PAO/Grup-IV         | 54,95          | 54,95     | 20,97      |
| 4.  | RO-1        | Aditif             | Penghambat oksidasi | 0,05           | 0         | 0          |
| 5.  | RO-2        |                    | Penghambat oksidasi | 0              | 0,05      | 0,03       |
|     |             | Jumlah             |                     | 100            | 100       | 100        |

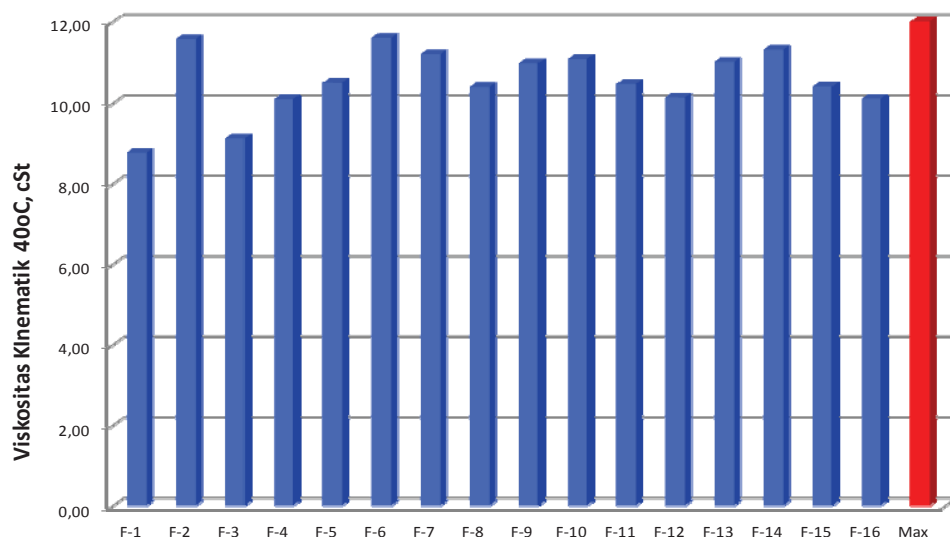
batasan yang ditetapkan yaitu maksimum 12 cSt. Kekentalan yang rendah ini diharapkan minyak trafo mampu bersirkulasi secara maksimum sesuai tugasnya sebagai pendingin maupun bahan isolasi. Pada saat minyak bersirkulasi, panas yang berasal dari belitan akan dibawa oleh minyak sesuai jalur sirkulasinya dan akan didinginkan pada sirip-sirip radiator.

Minyak trafo ini akan mengisi ruang-ruang diantara lilitan-lilitan (coil) pada belitan-belitan (winding) inti dan ruang-ruang lain didalam tangki transformator. Karena transformator tidak memiliki bagian yang berputar maka proses transfer panas dilakukan dengan cara sirkulasi. Sehingga dibutuhkan viskositas minyak trafo yang tidak tinggi yaitu tidak lebih dari 12 cSt.

- Titik nyala (ASTM D 92). Standar SNI 7069.18 : 2008 menetapkan nilai standar titik nyala dan dibatasi nilai minimum, yaitu 145oC, sedangkan IEC 60296-2003 membatasi nilai minium

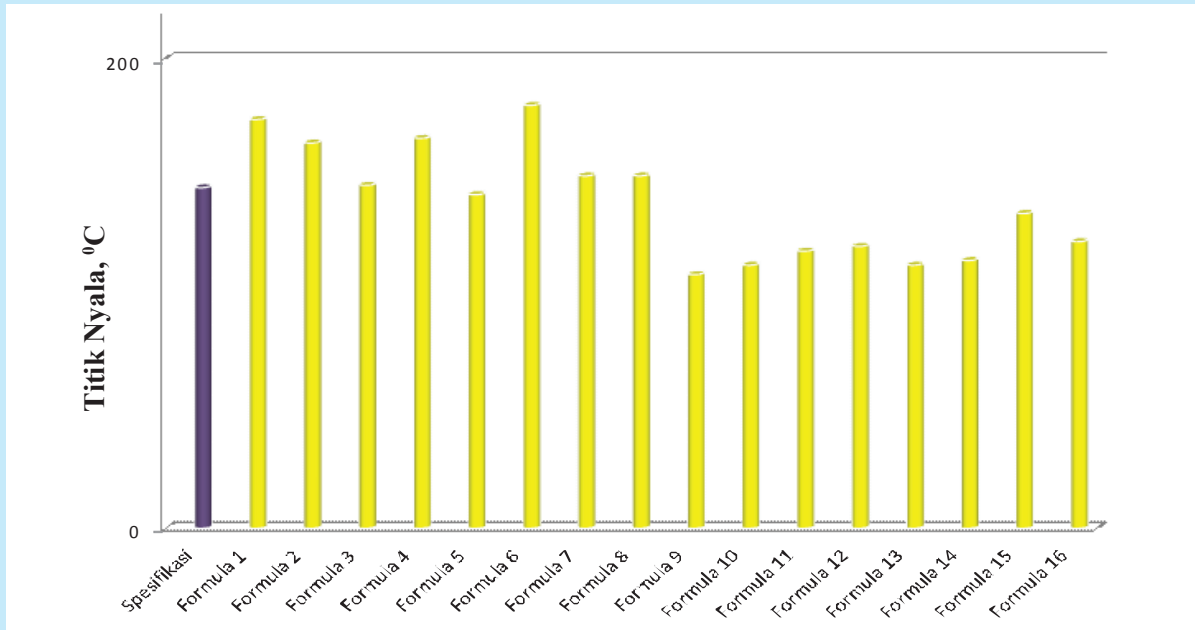
135°C. Titik nyala menunjukkan bahwa minyak trafo tersebut dapat menerima panas akibat kerja transformator sampai dengan temperatur tertentu sebelum uap yang timbul akibat panas. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui tingkat flammability minyak lumas sehingga digunakan sebagai acuan faktor keamanan. Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa minyak trafo mempunyai nilai titik nyala yang cukup tinggi kecuali Formula 5, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16. Sehingga semakin tinggi titik nyala dari suatu minyak trafo maka semakin baik kinerja yang diberikan minyak trafo tersebut pada suatu sistem tenaga listrik.

- Angka asam total (TAN – ASTM D 664) sering disebut juga angka netralisasi dan digunakan untuk menentukan tingkat kerusakan minyak lumas. Hasil uji menunjukkan bahwa untuk Formula 10, 12, 13, 14, 15 memiliki nilai TAN di atas spesifikasi (Gambar 3). Bahkan untuk Formula 1 memiliki nilai ekstrim tinggi. Nilai



**Gambar 1**  
**Hasil Uji Viskositas Kinematik Pada Temperatur 40°C Hasil Formulasi Minyak Lumas Trafo**



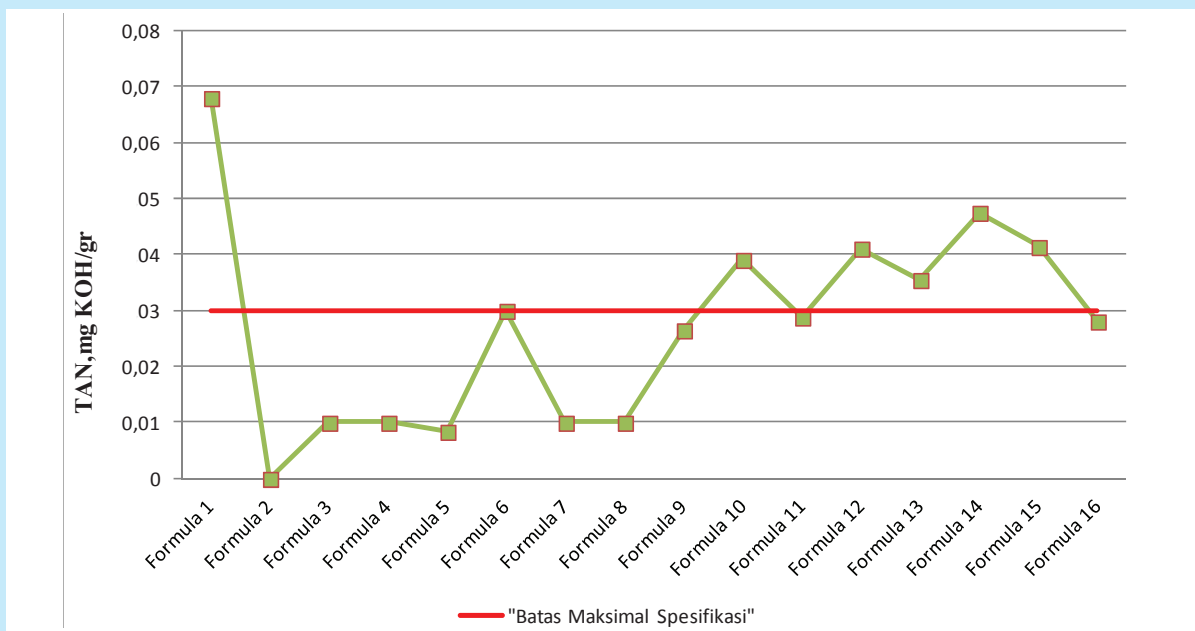


**Gambar 2**  
**Hasil Uji Titik Nyala Hasil Formulasi Minyak Lumas Trafo**

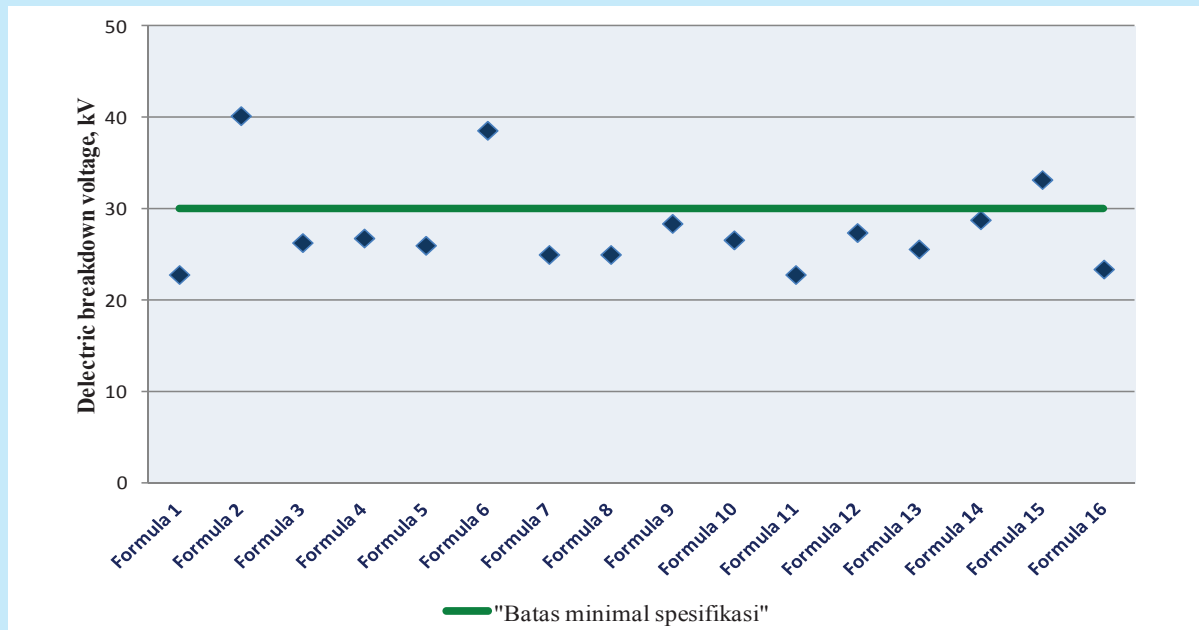
TAN minyak lumas dipengaruhi oleh nilai TAN bahan dasarnya (Stadtmiller, 1969). Oksigen yang terdapat dalam udara dan temperatur yang tinggi menyebabkan oksidasi yang cenderung meningkatkan tingkat keasaman yang merepresentasikan ukuran kerusakan (deterioration) dari suatu bahan isolasi. Jika keasaman tinggi maka endapan pada dinding transformator maupun pada

lapisan isolasi belitan akan mempersulit proses pendinginan. Sehingga Formula 1 tidak bisa dijadikan bahan insulasi dalam suatu transformator karena telah menunjukkan adanya perubahan kimia dalam aditifnya.

- Dielectric breakdown voltage (DBV – ASTM D 874). Analisis ini sangat penting dan menjadi salah satu tolok ukur mutu dari suatu minyak lumas trafo.



**Gambar 3**  
**Hasil Uji Angka Asam Total Hasil Formulasi Minyak Lumas Trafo**

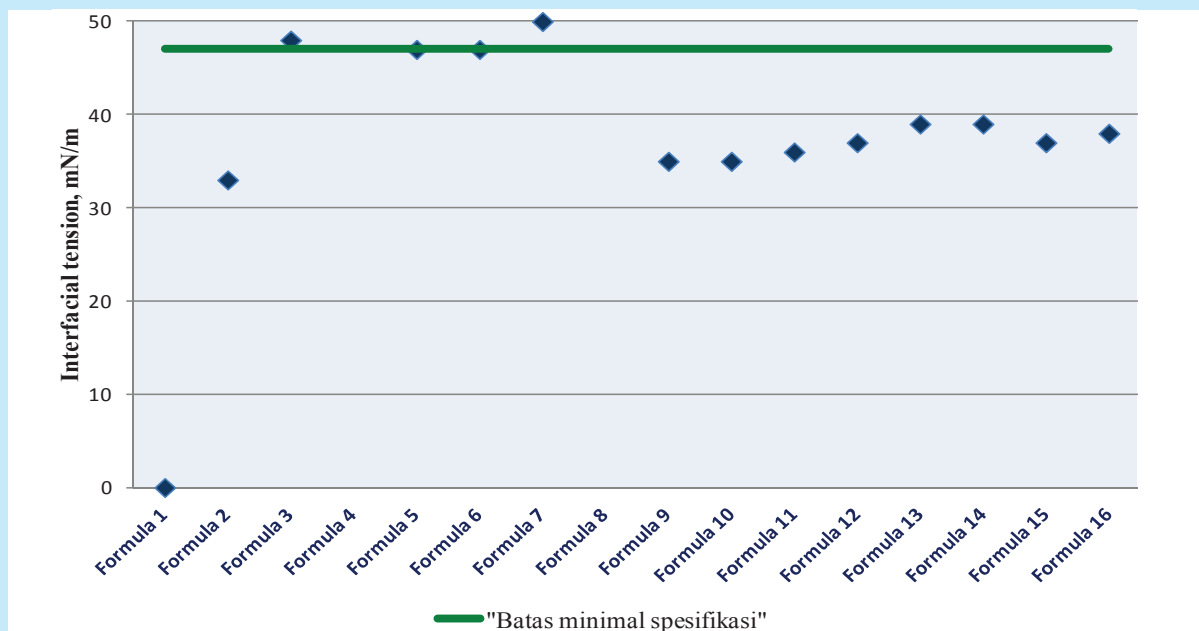


**Gambar 4**  
**Hasil Uji Dielectric Breakdown Voltage Hasil Formulasi Minyak Lumas Trafo**

Dibatasi nilai minimum 30 kV, dihasilkan tiga formula yang memiliki nilai dielectric breakdown voltage diatas 30 kV yaitu Formula 2, Formula 6 dan Formula 15(Gambar 4). Semakin tinggi hasil pengujian tegangan tembus suatu minyak trafo, maka kekuatan isolasi juga akan semakin tinggi. Namun tegangan tembus minyak trafo dapat mengalami penurunan seiring dengan

bertambahnya partikel-partikel hasil oksidasi dan kandungan airnya. Sehingga perlu dilakukan treatment purifikasi secara periodik untuk menghilangkan hasil oksidasi tersebut.

- Interfacial tension atau tegangan permukaan (ISO 6296). Adanya kontaminasi dengan zat yang terlarut (soluble contamination) atau hasil kerusakan minyak, umumnya menurunkan



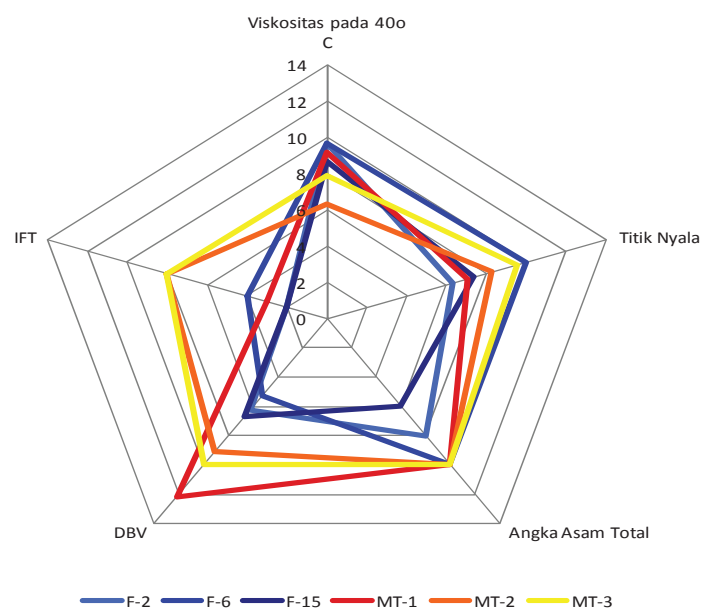
**Gambar 5**  
**Hasil uji interfacial tension (IFT) hasil formulasi minyak lumas trafo**

**Tabel 2**  
**Spesifikasi Minyak Trafo Menurut IEC 60296-2003**

| No. | Karakteristik                      | Metode Uji | Satuan  | IEC 60296-2003 |      | F-2   | F-6   | F-15  | MT-1 | MT-2 | MT-3 |
|-----|------------------------------------|------------|---------|----------------|------|-------|-------|-------|------|------|------|
|     |                                    |            |         | Min            | Maks |       |       |       |      |      |      |
| 1.  | Viskositas 40°C                    | ASTM D445  | cSt     | --             | 12   | 11,57 | 11,60 | 10,41 | 11   | 7,6  | 9,4  |
| 2.  | Titik nyala                        | ASTM D92   | °C      | 135            | --   | 164   | 180   | 134   | 130  | 150  | 172  |
| 3.  | Angka asam total (TAN)             | ASTM D664  | mgKOH/g | --             | 0,01 | 0,02  | 0,04  | 0,04  | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| 4.  | Dielectric Breakdown Voltage (DBV) | ASTM D877  | kV      | 30             | --   | 40    | 39    | 33    | 55   | 42,6 | 46,3 |
| 5.  | Interfacial tension (IFT)          | ISO 6295   | nM/m    | --             | --   | 33    | 41    | 37    | 40   | 49   | 48   |

nilai tegangan permukaan. Penurunan tegangan permukaan juga menurunkan indikator yang peka bagi awal kerusakan minyak. Jika angka asam mengalami kenaikan maka tegangan permukaan akan mengalami penurunan akibat oksidasi, yang berasal dari oksigen di udara, air yang mencemari minyak trafo tersebut akibat kebocoran, panas dan tekanan elektrik. Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa Formula 2 dan 6, memiliki indikasi terkontaminasi hasil oksidasi namun cukup kecil karena masih diatas nilai IFT minimum 35 dyne/cm untuk jenis minyak trafo baru (Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment).

Hasil pengujian karakteristik fisika kimia dari enam belas rancangan formula minyak lumas trafo tersebut menunjukkan bahwa formula 2, formula 6 dan formula 15 merupakan produk terbaik (Tabel 5). Bila ketiga produk formula minyak lumas trafo tersebut dibandingkan dengan minyak lumas trafo dipasaran yaitu MT-1, MT-2, MT-3, maka Formula 6 menunjukkan nilai yang paling mendekati dan tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan diantara karakteristik fisika kimianya (Gambar 6), yaitu untuk nilai viskositas kinematik pada temperatur 40°C, titik nyala, interfacial tension, angka asam total (TAN) dan dielectric breakdown voltage (DBV). Meskipun untuk interfacial tension



**Gambar 3**  
**Hasil Uji Angka Asam Total Hasil Formulasi Minyak Lumas Trafo**



(IFT) menunjukkan kemampuan lebih rendah dari minyak trafo di pasaran (Gambar 3) namun masih termasuk dalam klasifikasi good oils karena memiliki IFT diatas 30 mN/m pada Transformers Oil Classification (Kiameh, 2001).

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Perancangan formula minyak trafo dapat dilakukan dengan memanfaatkan base oil serta aditif yang mampu menghasilkan minyak lumas transformator yang memenuhi sebagian besar spesifikasi IEC 60296:2003 dan SNI 7069.18:2008. Bila dibandingkan dengan minyak lumas trafo yang dipasaran, Formula 6 menunjukkan karakteristik viskositas kinematik, TAN, IFT, dan flash point yang sebanding dengan beberapa produk yang ada di pasaran. Namun demikian masih perlu dilakukan penelitian untuk memperbaiki kemampuan tegangan tembus dari hasil formula ini.

#### KEPUSTAKAAN

- Anonim, Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi.** Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2013-2022. (<http://www.djlpe.esdm.go.id>, diakses 1 November 2014).
- Anonim, Departemen Pertambangan dan Energi.** **Standar Perusahaan Umum Listrik Negara.** SPLN 49-1:1982. Minyak Isolasi. Bagian 1 : Pedoman Penerapan Spesifikasi dan Pemeliharaan Minyak Isolasi. Jakarta.
- Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment,** 2002. IEEE C57.106-2001. Institute of Electrical and Electronics Engineers. New York.

- Bock, Wolfgang. 2007. Turbine Oils. Lubricants and Lubrication 2nd Ed. Wiley-VCH. Weinheim. USA.
- Fein, Richard S,** 1992. Liquid Lubricants. ASM Handbook Vol. 18 Friction. Lube Wear Test. ASM International. USA. P : 82-87.
- Heathcote, J. Martin,** 2007. The J & P Transformer Book. Thirteen edition. Charon Tec Ltd. Chennai. India.
- Hsu, S.M. Gates, R.S,** 2001. Boundary Lubrication and Boundary Lubricating Films. In : Modern Tribology Handbook. CRC Press. New York.
- Kiameh, Phillip,** 2002. Power Generation Handbook: Selection, Applications, Operations and Maintenance . McGraw Hill Handbook. New York.
- Lapopolo, Vittoria,** 2005. Development and Testing of an Antiwear Gas Turbine Lubricant in Challenging Off-shore Environment. Proceeding of 16th Symposium on Industrial Application of Gas Turbine (IAGT) October 12-14 2005. IAGT Committee. Alberta. Canada.
- Muchsin, Ismail,** 2013. Tenaga Listrik dan Elektronika. Pusat Pengembangan Bahan Ajar-UMB. Jakarta.
- Olavesen et al,** 1992. Process for Producing Transformer Oil From Hydrocracked Stock. Paten United States No. US005167847.
- Pirro, D.M., A.A. Wessol,** 2001. Stationary Gas Turbine. Lubrications Fundamentals. 2nd Ed. CRC Press. Virginia.
- Stadtmiller, W.H,** 1969. The Lubrication of Steam and Gas Turbine "Standard Handbook of Lubrication Engineering" Editor by Eugene A. Avalone. Technical Consultant by John Boyd. ASSLE. New York.
- Wartawan, Anton L,** 1981. Dasar-dasar Pelumas dan Pelumasan. Gramedia. Jakarta.