

# RESISTIVITAS DAN INDEKS POLARISASI MINYAK TRANSFORMATOR BEKAS DENGAN PENAMBAHAN NANOPARTIKEL ZnO DAN Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Hendra Zulkarnain, Mikel Simanjuntak**

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik USU

HP: 08126562177

[hzdamanik@gmail.com](mailto:hzdamanik@gmail.com)

## Abstrak

Penambahan material nanopartikel pada minyak transformator merupakan upaya untuk memperbaiki sifat listrik isolasi tersebut agar didapatkan isolasi yang memiliki sifat listrik yang lebih baik. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan campuran nanopartikel ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada minyak transformator bekas pakai terhadap resistivitas dan indeks polarisasi minyak tersebut. Pengujian dilakukan dengan standar IEC 60247 dan standar IEC 61620. Minyak diuji pada temperatur 20°C sampai 90°C dengan kenaikan 10°C. Hasil penelitian menunjukkan semakin tinggi konsentrasi campuran nanopartikel ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditambahkan kedalam minyak mineral bekas pakai maka semakin tinggi nilai resistivitas dan indeks polarisasinya

**Kata Kunci:** Minyak Transformator, Resistivitas, Indeks Polarisasi, Nanopartikel ZnO, Nanopartikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

## I. PENDAHULUAN

Isolasi minyak transformator bukan merupakan dielektrik sempurna sehingga pada bahan tersebut terdapat elektron-elektron bebas yang jika isolasi memikul medan listrik (tegangan) yang besar akan menimbulkan aliran arus bocor (leakage current) pada isolasi minyak transformator. Arus bocor akan meningkat sesuai dengan besar tegangan yang dipikul oleh isolasi dan arus bocor juga akan berubah nilainya seiring dengan lamanya paparan medan listrik pada isolasi tersebut. Penyebab berubahnya besar arus bocor pada saat 1 menit dengan pada saat 10 menit disebabkan berubahnya nilai resistansi dari isolasi minyak transformator. Perubahan nilai resistansi isolasi pada 1 menit terpapar medan listrik dengan 10 menit terpapar medan listrik didefinisikan sebagai indeks polarisasi.

Resistivitas dan indeks polarisasi minyak transformator merupakan sifat listrik dari isolasi yang menentukan kualitas isolasi minyak.

Pada penelitian ini dianalisis pengaruh penambahan campuran nanopartikel ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada minyak transformator yang sudah terpakai dengan berbagai konsentrasi campuran material nanopartikel dan dilakukan pada berbagai keadaan suhu minyak transformator.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Minyak Transformator

Minyak transformator harus memenuhi spesifikasi sesuai standar IEC60296:2012 seperti ditunjukkan pada Tabel 1[1].

**Tabel 1. Spesifikasi Minyak Isolasi Menurut Standar IEC60296:2012**

No	Sifat Minyak	Batas yang Diizinkan
1	Viskositas pada 40 °C	Max. 12 mm <sup>2</sup> /s
2	Viskositas pada -30 °C	Max. 1800 mm <sup>2</sup> /s
3	Titik Tuang	Max -40 °C
4	Kandungan Air	Max.30 mg/kg
5	Tegangan Tembus	Min. 30 kV
6	Densitas pada 20 °C	Max. 0.895 g/ml
7	Faktor Kebocoran Dielektrik pada 90 °C	Max. 0.005
8	Sedimen	Tidak terukur Bersih dan bebas dari sedimen dan benda-benda tersuspensi
9	Kejemihan	Max. 0.01 mg KOH/g
10	Keasaman	Tidak korosif
11	Korosi Belerang	Min 135 °C
12	Titik Nyala	

### 2.2 Arus Bocor dan Resistivitas

Arus bocor pada isolasi timbul akibat isolasi yang tidak sempurna sehingga elektron-elektron lepas dari ikatan atomnya apabila terpapar medan listrik yang kuat. Arus bocor dapat mengakibatkan peningkatan suhu isolasi dan jika suhu isolasi yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan isolasi bahkan terbakar [2]. Besar arus bocor sudah tentu tergantung pada besar tegangan yang dipikul isolasi dan resistansi atau resistivitas isolasi tersebut.

Resistivitas isolasi minyak tergantung dari sifat listrik asli (original) material isolasi dan pada isolasi minyak resistivitas dipengaruhi juga oleh partikel-partikel (kontaminan) yang terkandung pada isolasi minyak tersebut. Resistivitas yang rendah menunjukkan bahwa minyak tersebut sudah

mengalami kontaminasi oleh bahan yang bersifat konduktif seperti air, asam, partikel bermuatan lainnya. Sesuai dengan fungsinya, bahan isolasi yang baik adalah bahan isolasi yang resistivitasnya besar sehingga arus bocor yang mengalir pada isolasi akan sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa resistansi bahan isolasi bukan tidak terbatas besarnya [2].

Besarnya resistansi bahan isolasi dapat adalah seperti pada persamaan (1).

$$R = \frac{V}{I_b} \tag{1}$$

dimana:

R = resistansi isolasi (Ohm)

V = tegangan yang digunakan (Volt)

I<sub>b</sub> = arus bocor (Ampere)

Nilai resistansi isolasi diperoleh dari pengukuran nilai arus bocor isolasi minyak dan setelah mendapatkan nilai resistansinya barulah dihitung nilai resistivitas isolasi minyak transformator dengan menggunakan persamaan (2).

$$\rho = R \frac{A}{L} \tag{2}$$

dimana :

ρ = resistivitas (Ωm)

R = resistansi (Ohm)

A = luas permukaan elektroda (m<sup>2</sup>)

L = jarak celah elektroda pengukuran (m)

Besar resistivitas minyak transformator menurut standar IEC 60422-2013 [3] yang harus dipenuhi suatu isolasi agar dapat dikatakan baik dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2 . Standar Resistivitas Minyak Transformator Resistivitas pada 20<sup>0</sup> C (GΩm)**

Kategori	Bagus	Sedang	Buruk
O, A	>200	20-200	<20
B, C	>60	4-60	<4
D	>800	250-800	<250
E	>60	7-60	<7
Resistivitas pada 90 <sup>0</sup> C (GΩm)			
Kategori	Bagus	Sedang	Buruk
O, A	>10	1-10	<1
B, C	>3	0,2-3	<0,2
D	>50	10-50	<10
E	>3	0,4-3	<0,4

**2.3 Indeks Polarisasi**

Nilai pengukuran resistansi isolasi akan berbeda-beda jika diukur pada waktu yang berbeda. Besar resistansi tergantung berapa lama waktu pengukuran dilakukan setelah tegangan diterapkan pada isolasi tersebut. Hal ini diakibatkan oleh adanya arus absopsi yang terjadi pada dielektrik pada saat diberi tegangan. Jika pada saat t = 1 menit arus absopsi dua bahan dielektrik adalah sama maka resistansi kedua bahan isolasi pada saat itu adalah sama. Jika pada saat waktu

pengukuran t = 10 menit, arus absopsi bahan isolasi bahan A lebih besar daripada arus absopsi bahan isolasi B maka pada saat itu resistansi isolasi bahan A lebih kecil daripada resistansi isolasi bahan B. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa pertambahan nilai resistansi isolasi bahan A lebih kecil dibandingkan isolasi bahan B. Nilai resistansi bahan isolasi seharusnya semakin besar agar arus absopsi sama dengan nol sehingga bahan isolasi semakin baik jika pertambahan nilai resistansinya semakin besar. Perubahan nilai resistansi tersebut pada berbagai jenis bahan isolasi dinyatakan dengan indeks polarisasi yaitu perbandingan nilai resistansi suatu bahan yang diukur pada saat t = 1 menit dengan nilai resistansi yang diukur pada saat t = 10 menit.

Besar indeks polarisasi dinyatakan seperti pada persamaan (3).

$$\alpha_p = \frac{R_{10menit}}{R_{1menit}} \tag{3}$$

dimana:

α<sub>p</sub> = indeks polarisasi

R<sub>1menit</sub> = resistansi pada saat t = 1 menit (Ohm)

R<sub>10menit</sub> = resistansi pada saat t = 10 menit (Ohm)

Bahan isolasi yang baik adalah bahan yang arus absorpsinya kecil atau yang mempunyai R10menit besar atau indeks polarisasinya besar. Saat indeks polarisasi suatu bahan isolasi menurun, hal ini menunjukkan bahwa kualitas bahan isolasi tersebut semakin buruk.

Indeks polarisasi yang harus dipenuhi suatu isolasi agar dapat dikatakan baik dapat dilihat pada Tabel 3 berikut [4].

**Tabel 3 Standar Indeks Polarisasi Minyak Transformator**

Hasil pengujian	Keterangan	Rekomendasi
<1	Berbahaya	Ditindaklanjuti
1-1,1	Jelek	Ditindaklanjuti
1,1 – 1,25	Dipertanyakan	Uji kadar minyak, uji tan delta
>1,25 - 2	Baik	-
>2	Sangat baik	-

**2.4 Hubungan Resistivitas Dengan Suhu**

Besar resistansi isolasi juga dipengaruhi oleh temperatur material isolasi pada saat pengukuran. Hal ini disebabkan oleh adanya koefisien temperatur bahan isolator. Persamaan (4) menyatakan hubungan linear antara temperature dengan resistansi suatu bahan [5].

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha(t_2 - t_1)] \tag{4}$$

Jika disubstitusi dengan persamaan (2), maka diperoleh persamaan:

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)] \quad (5)$$

dimana

$\rho_2$  = Resistivitas pada temperatur  $t_2$  (Ohm)

$\rho_1$  = Resistivitas pada temperatur  $t_1$  (Ohm)

$t$  = suhu ( $^{\circ}C$ )

$\alpha$  = Koefisien temperatur resistansi isolasi ( $\frac{1}{^{\circ}C}$ )

### 2.5 Nanopartikel Seng Oksida (ZnO) dan Aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Nanopartikel merupakan partikel yang memiliki ukuran yang sangat kecil yaitu antara 1 dan 100 nanometer. Pada material listrik, nanopartikel bertindak sebagai penghalang hamburan elektron dan menjadi penghalang dijalur pembawa muatan serta membatasi mobilitas elektron. Ukuran nanopartikel yang sangatkecil memberikan kepadatan yang lebih besar pada isolasi sehinggal nanopartikel dapat berperan menangkap elektron bebas[6].

Nanopartikel Seng oksida(ZnO) merupakan bahan semikonduktor berupa bubuk putih yang banyak digunakan sebagai aditif dalam berbagai material dan produk termasuk karet, plastik, keramik, kaca, semen, pelumas.

Aluminium oksida atau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> adalah senyawa kimia yang terbentuk dari aluminium dan oksigen. Nama mineral dari senyawa ini adalah alumina. Aluminium oksida merupakan nanopartikel jenis insulasi sebab dapat menghambat panas dan listrik dengan baik. Selain memiliki ketahanan temperatur dan listrik yang baik, aluminium oksida juga tahan terhadap lingkungan korosif.

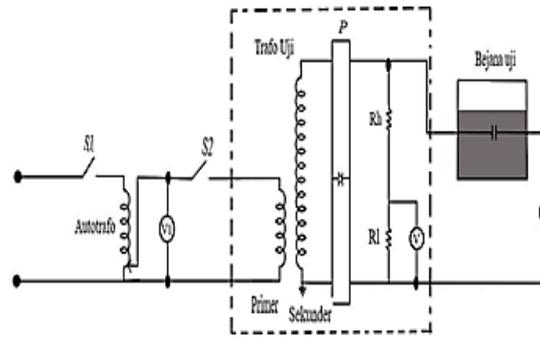
## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Resistivitas Isolasi Minyak

Sampel uji campuran material yang diperlukan untuk melakukan pengujian dibuat seperti terlihat pada Tabel 4. Adapun prosedur pengujian resistansi dan resistivitas dilakukan menurut standar IEC 60156[7], sedangkan rangkaian pengujian dibuat seperti terlihat pada Gambar 1.

Tabel 4. Sampel Uji Minyak Isolasi

Kode Sampel	Campuran Minyak Mineral	Konsentrasi Nanopartikel
S1	Tanpa penambahan nanopartikel.	-
S2	20% ZnO dan 80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05g/L
S3	50% ZnO dan 50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S4	80% ZnO dan 20% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S5	20% ZnO dan 80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2g/L
S6	50% ZnO dan 50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S7	80% ZnO dan 20 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S8	20% ZnO dan 80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3g/L
S9	50% ZnO dan 50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S10	80% ZnO dan 20 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S11	20% ZnO dan 80 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4g/L
S12	50% ZnO dan 50 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
S13	80% ZnO dan 20 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	



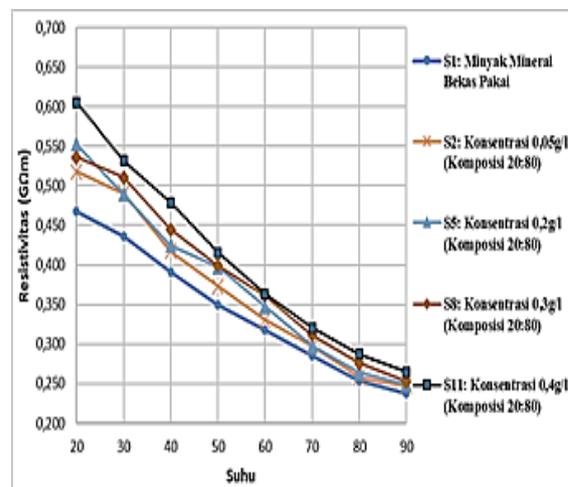
Gambar 1. Rangkaian Pengujian

Hasil pengujian resistivitas minyak mineral pada seluruh sampel dan variasi temperatur dapat dilihat pada Tabel 5.

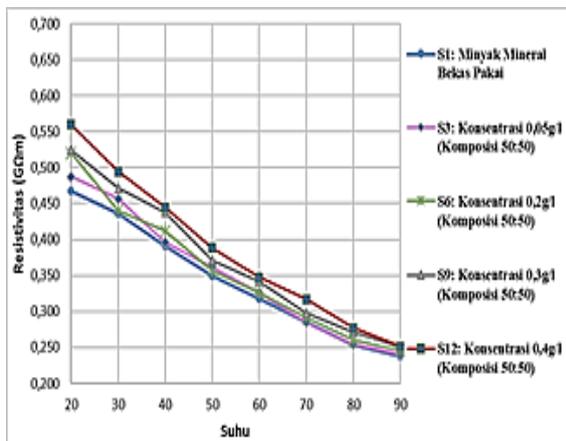
Tabel 5. Hasil Pengujian Resistivitas

Kode sampel	Indeks Polarisasi pada suhu							
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
S1	1,084	1,095	1,101	1,110	1,126	1,144	1,147	1,159
S2	1,109	1,111	1,121	1,134	1,137	1,142	1,160	1,167
S3	1,124	1,125	1,131	1,138	1,141	1,154	1,158	1,169
S4	1,090	1,108	1,111	1,119	1,139	1,142	1,154	1,164
S5	1,119	1,124	1,126	1,133	1,134	1,150	1,166	1,175
S6	1,135	1,131	1,138	1,149	1,148	1,159	1,168	1,171
S7	1,101	1,116	1,128	1,129	1,142	1,151	1,168	1,172
S8	1,131	1,140	1,147	1,152	1,159	1,169	1,175	1,191
S9	1,152	1,158	1,163	1,169	1,179	1,188	1,191	1,197
S10	1,124	1,128	1,131	1,141	1,156	1,169	1,175	1,193
S11	1,154	1,164	1,169	1,174	1,177	1,187	1,196	1,193
S12	1,176	1,179	1,182	1,190	1,193	1,201	1,209	1,220
S13	1,143	1,148	1,156	1,148	1,163	1,181	1,195	1,214

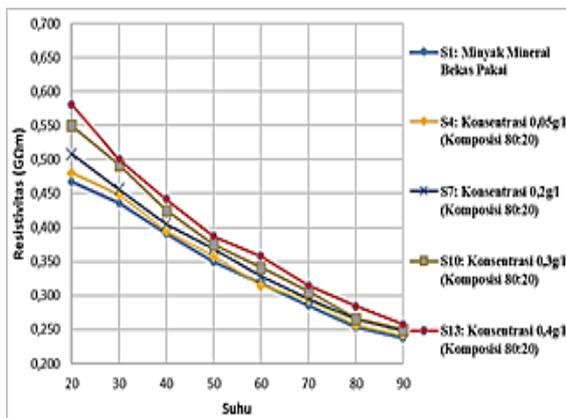
Perbandingan resistivitas minyak mineral bekas pakai dengan penambahan nanopartikel terhadap resistivitas dapat dilihat pada Gambar 2a, 2b dan 2c.



(a)



(b)



Gambar 2. Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel campuran ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada resistivitas (a) Komposisi 20:80, (b) Komposisi 50:50, (c) Komposisi 80:20

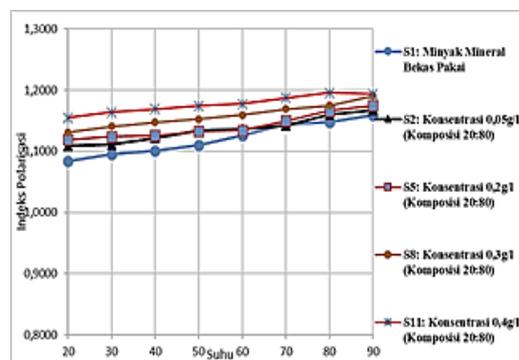
Dari hasil pengujian terlihat semakin tinggi konsentrasi campuran nanopartikel ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditambahkan kedalam minyak mineral bekas pakai maka semakin tinggi nilai resistivitas. Pada suhu 20°C, persentase kenaikan nilai resistivitas pada konsentrasi 0,05 g/l, 0,2 g/l, 0,3 g/l dan 0,4 g/l adalah 5,80%, 12,57%, 14,72%, dan 24,43%. Pada suhu 90°C, persentase kenaikan nilai resistivitas pada konsentrasi 0,05 g/l, 0,2 g/l, 0,3 g/l dan 0,4 g/l adalah 2,61%, 4,53%, 5,89%, dan 8,83%. Nilai resistivitas rata-rata kenaikan nilai resistivitas sebesar 12,82% dengan persentase kenaikan tertinggi terdapat pada sampel S11 yaitu sebesar 29,42% pada suhu 20°C. Dari grafik dapat dilihat juga bahwa nilai resistivitas akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya suhu minyak mineral, namun nilai resistivitasnya masih lebih tinggi dibandingkan dengan nilai resistivitas minyak mineral bekas pakai tanpa penambahan nanopartikel campuran. Nanopartikel ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berfungsi sebagai penghalang terjadinya banjir elektron pada isolasi minyak sehingga arus bocor semakin berkurang.

### 3.2 Indeks Polarisasi Isolasi Minyak

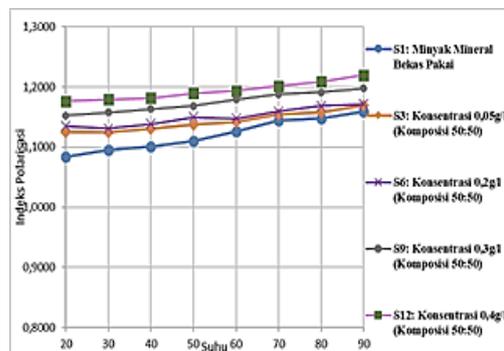
Hasil pengujian indeks polarisasi minyak mineral pada seluruh sampel dan variasi temperatur dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Indeks Polarisasi

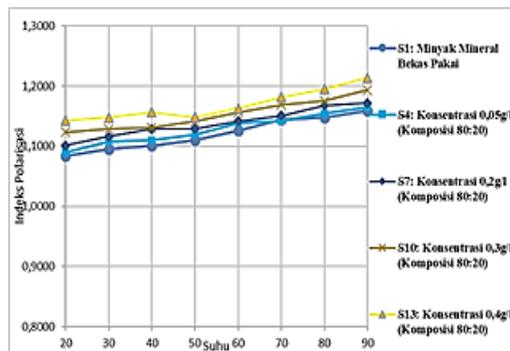
Kode sampel	Resistivitas (GΩm) pada suhu							
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
S1	0,468	0,436	0,391	0,349	0,319	0,285	0,254	0,237
S2	0,518	0,491	0,417	0,373	0,331	0,297	0,258	0,247
S3	0,487	0,457	0,396	0,361	0,326	0,285	0,255	0,241
S4	0,480	0,448	0,395	0,358	0,314	0,294	0,256	0,243
S5	0,552	0,489	0,425	0,398	0,348	0,298	0,264	0,250
S6	0,520	0,441	0,412	0,356	0,326	0,292	0,260	0,246
S7	0,508	0,457	0,405	0,369	0,328	0,295	0,265	0,248
S8	0,536	0,511	0,445	0,399	0,361	0,312	0,276	0,253
S9	0,525	0,472	0,438	0,371	0,342	0,298	0,272	0,251
S10	0,550	0,493	0,425	0,375	0,341	0,306	0,266	0,250
S11	0,606	0,532	0,479	0,416	0,363	0,321	0,288	0,265
S12	0,560	0,495	0,445	0,388	0,347	0,317	0,277	0,252
S13	0,581	0,500	0,442	0,387	0,358	0,314	0,284	0,258



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel campuran ZnO dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> terhadap Indeks Polarisasi (a) Komposisi 20:80, (b) Komposisi 50:50, (c) Komposisi 80:20

Perbandingan indeks polarisasi minyak mineral bekas pakai dengan penambahan nanopartikel terhadap indeks polarisasi dapat dilihat pada Gambar 3a, 3b dan 3c.

Dari hasil pengujian dapat dilihat semakin tinggi konsentrasi campuran nanopartikel maka semakin tinggi juga persentase kenaikan indeks polarisasinya akan tetapi apabila suhu isolasi semakin tinggi maka persentase kenaikan indeks polarisasinya semakin kecil. Pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$ , persentase kenaikan indeks polarisasi pada konsentrasi 0,05 g/l, 0,2 g/l, 0,3 g/l dan 0,4 g/l adalah 2,24%, 3,19%, 4,78%, dan 6,85% dan pada suhu  $90^{\circ}\text{C}$ , persentase kenaikan indeks polarisasi pada konsentrasi 0,05 g/l, 0,2 g/l, 0,3 g/l dan 0,4 g/l adalah 0,64%, 1,17%, 2,99%, dan 4,29%. Untuk indeks polarisasi rata-rata kenaikannya sebesar 3,04% dan kenaikan tertinggi terdapat pada S12 yaitu sebesar 1,220 pada suhu  $90^{\circ}\text{C}$ ., Untuk nilai indeks polarisasi terendah terdapat pada sampel S1 pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  yaitu sebesar 1,0836 dimana sampel ini minyak bekas pakai tanpa adanya penambahan nanopartikel.

#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang dilakukan diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin tinggi konsentrasi campuran nanopartikel ZnO dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang ditambahkan kedalam minyak mineral bekas pakai maka semakin tinggi nilai resistivitas dan indeks polarisasi isolasi minyak.
2. Semakin tinggi suhu isolasi maka nilai resistivitas minyak mineral bekas pakai akan mengalami penurunan namun nilai indeks polarisasi akan semakin tinggi saat suhu semakin tinggi.
3. Rata-rata kenaikan nilai resistivitas adalah sebesar 12,82% sedangkan rata-rata kenaikan indeks polarisasi adalah sebesar 3,04%.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IEC 60296, 2012, *Fluids for Electrotechnical Applications - Unused Mineral Insulating Oils For Transformers and Switchgear*.
- [2]. Muhaimin, 1999, *Bahan-Bahan Listrik Untuk Politeknik*, Kedua., vol. 1382. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- [3]. IEC 60422, 2013, *Mineral Insulating Oils in Electrical Equipment - Supervision and Maintenance Guidance*.
- [4]. B. L. Tobing, 2017, *Dasar-Dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*, Edisi ke 3. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [5]. R.K. Rajput, 2002, *Basic Electrical and Electronics Engineering*, vol. 7, no. 1. New Delhi: Golden House.
- [6]. D. Amin, R. Walvekar, M. Khalid, M. Vaka, N. M. Mujawar, and T. C. S. M. Gupta, 2019, *Recent progress and challenges in transformer oil nanofluid development: A review on thermal and electrical properties*, IEEE Access, vol. 7, pp. 151422–151438, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946633
- [7]. IEC 60247, 2004, *Insulating Liquids - Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor ( $\tan \delta$ ) and DC Resistivity*.