



**INVESTIGASI VISKOSITAS KINEMATIK DAN KONSTANTA
DIELEKTRIK MINYAK TRANSFORMATOR
BERDASARKAN PERBEDAAN WARNA**

SKRIPSI

Oleh

Tis'atul Lutfiah

111810201061

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS JEMBER

2016



**INVESTIGASI VISKOSITAS KINEMATIK DAN KONSTANTA
DIELEKTRIK MINYAK TRANSFORMATOR
BERDASARKAN PERBEDAAN WARNA**

SKRIPSI

Diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Fisika (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Sains

Oleh:

**Tis'atul Lutfiah
111810201061**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS JEMBER
2016**

PERSEMBAHAN

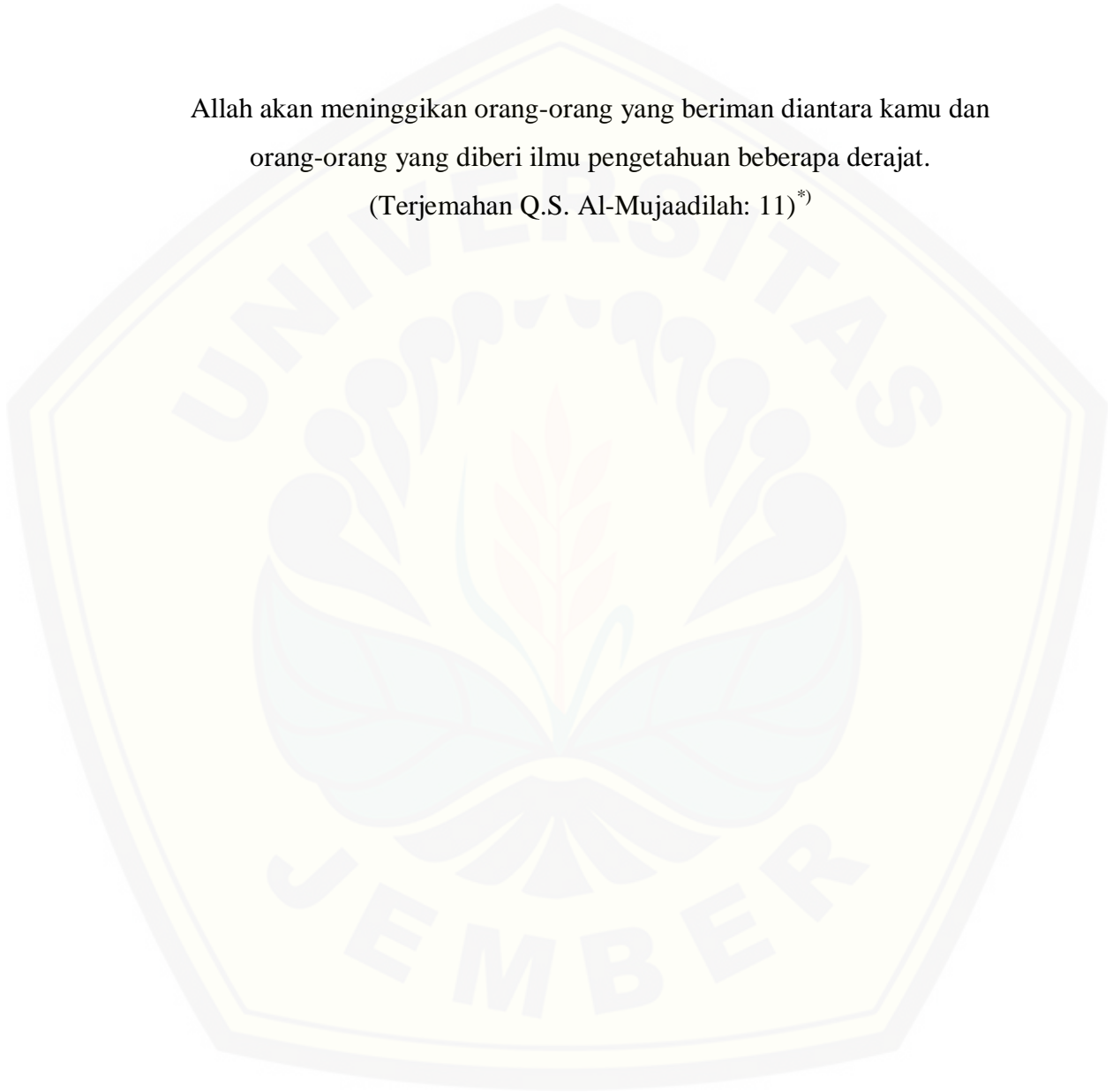
Skripsi ini saya persembahkan dengan penuh rasa cinta, syukur, dan terimakasih kepada:

1. kedua orangtuaku bapak Nur Cholis dan ibu Siti Rusmini, yang senantiasa dengan tulus selalu memberikan doa, curahan rasa cinta, kasih sayang, dukungan, serta pengorbanan dalam mengiringi langkahku selama menuntut ilmu;
2. Kakakku Muhammad Agus Mukhsin, Adikku Muhammad Muhajir, dan Minabila Zakiya Nur Faiza yang membanggakan, dan selalu memberikan doa dan dukungan selama ini;
3. guru-guruku sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi yang telah mendidik dan membimbing dengan penuh kesabaran, terutama kepada Bu Pariyah S.Pd., Bpk. Akip Efendy M.Pd., Bpk. Mu'i Zudailah S.Pd., dan Bpk. Mistari S.Pd.;
4. Dinas Pendidikan dan Pemerintah Daerah Kabupaten Banyuwangi;
5. Almamater Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

MOTO

Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman diantara kamu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.

(Terjemahan Q.S. Al-Mujaadilah: 11)^{*)}



^{*)} Departemen Agama Republik Indonesia.2010. *Mushaf Al-Azhar : Al Qur'an dan Terjemah*. Bandung: Hilal.

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Tis'atul Lutfiah

NIM : 111810201061

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul "Investigasi Viskositas Kinematik dan Konstanta Dielektrik Minyak Transformator Berdasarkan Perbedaan Warna" adalah benar-benar merupakan hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang telah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Penelitian ini merupakan bagian dari penelitian bersama dosen dan mahasiswa dan hanya dapat dipublikasikan dengan mencantumkan nama dosen pembimbing.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, Juni 2016
Yang menyatakan,

Tis'atul Lutfiah
NIM 111810201061

SKRIPSI

**INVESTIGASI VISKOSITAS KINEMATIK DAN KONSTANTA DIELEKTRIK
MINYAK TRANSFORMATOR BERDASARKAN PERBEDAAN WARNA**

Oleh

Tis'atul Lutfiah
NIM 111810201061

Dosen Pembimbing Utama
Dosen Pembimbing Anggota

Pembimbing:
: Ir. Misto, M.Si.
: Puguh Hiskiawan, S.Si.,M.Si.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Investigasi Viskositas Kinematik dan Konstanta Dielektrik Minyak Transformator Berdasarkan Perbedaan Warna” telah diuji dan disahkan secara akademis pada:

Hari :
Tanggal :
Tempat : Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan
Alam Universitas Jember

Tim Penguji:

Ketua
(Dosen Pembimbing Utama)

Sekretaris
(Dosen Pembimbing Anggota)

Ir. Misto, M.Si.
NIP 19591121 199103 1 002

Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si.
NIP 19741215 200212 1 001

Dosen Penguji I

Dosen Penguji II

Dr. Lutfi Rohman, S.Si.,M.Si.
NIP 19720820 199802 1 001

Supriyadi, S.Si.,M.Si.
NIP 19820424 200604 1 003

Mengesahkan
Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Drs. Sujito, Ph.D.
NIP 19610204 198711 1 001

RINGKASAN

Investigasi Viskositas Kinematik dan Konstanta Dielektrik Minyak Transformator Berdasarkan Perbedaan Warna; Tis'atul Lutfiah, 111810201061: 62 halaman; Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Jember.

Minyak transformator berfungsi sebagai isolator maupun medium pendingin dalam transformator. Minyak transformator yang digunakan secara terus-menerus dapat mengalami perubahan karakteristik. Ditinjau dari sifat fisis, ditandai dengan adanya perubahan warna yang semakin keruh dan menghitam. Kemampuan minyak transformator sebagai isolator salah satunya dapat ditunjukkan dengan besar kecilnya nilai konstanta dielektrik, sedangkan kemampuannya sebagai medium pendingin ditunjukkan dengan besar kecilnya nilai viskositas kinematik. Standar minyak transformator yang digunakan adalah memiliki nilai viskositas kinematik $< 25 \text{ cSt}$ pada suhu 20°C dan nilai konstanta dielektrik 2,2-2,3. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai viskositas kinematik (ν) dan nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator berdasarkan perbedaan warna.

Penelitian menggunakan dua metode yaitu metode Ostwald untuk penentuan nilai viskositas kinematik (ν) dan metode kapasitor plat sejajar untuk penentuan nilai konstanta dielektrik (κ). Sampel bahan penelitian terdiri dari tiga minyak transformator dengan warna yang berbeda, yaitu warna A, B, dan C. Ketiga warna tersebut dibedakan berdasarkan warna standar ASTM D1500.

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa nilai viskositas kinematik (ν) untuk minyak transformator warna A, B, dan C sesuai dengan teori yaitu menurun dengan adanya kenaikan suhu. Selanjutnya, nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator warna A, B, dan C terhadap adanya perubahan frekuensi sumber

tegangan mengalami kenaikan hanya pada rentang frekuensi 50 kHz-150 kHz, sedangkan pada rentang frekuensi 150 kHz-950 kHz nilainya tetap. Perubahan yang serupa ditunjukkan pula pada seluruh pengamatan suhu. Pengaruh suhu terhadap nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator warna A, B, dan C juga sesuai teori, yaitu menurun dengan adanya kenaikan suhu, namun karakteristik perubahan antara ketiganya tidak sama. Pada pengamatan suhu 20°C-40°C minyak transformator warna A mengalami dua kali perubahan, warna B tiga kali, dan warna C empat kali. Hal ini menunjukkan bahwa minyak transformator warna A memiliki struktur kimia yang lebih stabil dibanding kedua minyak transformator lainnya. Berdasarkan hasil pengamatan warna minyak transformator mengacu pada standar warna ASTM D1500, minyak transformator warna A berada pada kelompok warna dengan skala 0,5 yaitu kuning pucat. Transformator dengan minyak pada kelompok skala tersebut menunjukkan isolator maupun pendingin transformator masih baik. Hal ini didukung dengan hasil pengolahan data nilai viskositas kinematik (ν) yang sesuai dengan standar PLN yaitu 14,062 *cSt* pada suhu 20°C. Minyak transformator warna B berada pada kelompok warna dengan skala 1,5-2,0 yaitu kuning terang, sebagai indikasi telah terjadi endapan asam tipis pada lilitan transformator, hal ini juga didukung dengan nilai viskositas kinematik (ν) yang masih sesuai dengan standar yaitu 16,301 *cSt*. Minyak transformator warna C berada pada kelompok skala warna 5,5-6,5 yaitu coklat kehitaman sebagai indikasi telah terdapat endapan yang menyumbat sirip-sirip transformator yang ketika digunakan akan menyebabkan kenaikan temperatur sampai 20°C. Hal ini juga didukung dengan nilai viskositas kinematik (ν) yang telah melebihi standar yaitu 31,441 *cSt*. Selanjutnya, berdasarkan hasil pengolahan data nilai konstanta dielektrik (κ) juga menunjukkan bahwa minyak transformator warna A dan B dari frekuensi 50 kHz-950 kHz pada suhu 20°C-40°C sesuai dengan nilai standar minyak transformator pakai yaitu (2,23-2,28) – (2,21-2,22) dan (2,34-2,43) – (2,20-2,28), sedangkan minyak transformator warna C melebihi standar nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator pakai yaitu (2,89-2,95) – (2,66-2,67).

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Investigasi Viskositas Kinematik dan Konstanta Dielektrik Minyak Transformator Berdasarkan Perbedaan Warna”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, pengarahan dan bimbingan berbagai pihak. Oleh Karena itu, dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Ir. Misto, M.Si., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Puguh Hiskiawan, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Dr. Lutfi Rohman, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji I dan Supriyadi, S.Si., M.Si., selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu untuk menguji dan memberikan masukan demi kesempurnaan skripsi ini;
3. Endhah Purwandari S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
4. seluruh staf pengajar dan karyawan Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Jember;
4. kedua orangtuaku tercinta Bapak Nur Cholis dan Ibu Siti Rusmini yang telah memberikan cinta, kasih sayang serta doa dan semangat;
6. Dinas Pendidikan dan Pemerintah Daerah Kabupaten Banyuwangi;
7. P.T PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Jember;
8. Muhammad Ali Mas'ud S.Si yang selalu memberikan doa, motivasi, bantuan, dan dukungan;

9. Umi Mar'atus S S.Si., Novi Dwi A S.Si., Ria Fitriani S.Si., Miftahul J., Abdul Hamid S.Si., Rofiatun, Vivin A., Dyanir K.A., Yahya E., Nehemia F., Devi Septian R.A S.Si., Nur Rimafatin, Luluk M., Abdul R., dan semua teman-teman GP-11 (*Gold-Physics* 2011) yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini;
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis juga berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca untuk perkembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Jember, Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN.....	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan.....	4
1.5 Manfaat.....	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Transformator	6
2.2 Minyak Transformator	7
2.3 Fungsi Minyak Transformator	9
2.3.1 Minyak sebagai Pendingin	9
2.3.2 Minyak sebagai Isolator	10
2.4 Karakteristik Minyak Transformator	10
2.4.1 Standar Karakteristik Minyak Transformator	10

2.4.2 Warna Minyak Transformator	11
2.5 Viskositas	13
2.5.1 Viskositas Dinamik (<i>Absolute viscosity</i>).....	13
2.5.2 Viskositas Kinematik	14
2.6 Kapasitor	15
2.7 Konstanta Dielektrik	17
2.8 Metode Ostwald	22
2.9 Rangkaian AC	25
BAB 3. METODE PENELITIAN	28
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	28
3.1.1 Tempat Penelitian	28
3.1.2 Waktu Penelitian.....	28
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	28
3.2.1 Alat Penelitian	28
3.2.2 Bahan Penelitian	29
3.3 Prosedur Penelitian	30
3.3.1 Diagram Alir Penelitian	30
3.3.2 Susunan Alat Penelitian	31
3.3.3 Perlakuan Bahan	34
3.3.4 Kalibrasi Alat.....	36
3.4 Pengambilan Data	37
3.4.1 Penentuan Nilai Viskositas Kinematik (ν)	37
3.4.2 Penentuan Nilai Konstanta Dielektrik (κ)	37
3.5 Analisis Data	38
3.5.1 Analisis Data Viskositas Kinematik (ν)	38
3.5.2 Analisis Data Konstanta dielektrik (κ).....	40
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil	41
4.1.1 Hasil pengolahan data viskositas kinematik (ν)	41

4.1.2 Hasil pengolahan data nilai konstanta dielektrik (κ).....	42
4.1.3 Hasil uji statistik hubungan konstanta dielektrik (κ) terhadap kenaikan frekuensi pada setiap kenaikan suhu	47
4.1.4 Data hubungan nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) minyak transformator	48
4.2 Pembahasan	50
BAB 5. PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	65

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Standar minyak transformator yang digunakan	11
2.2 Kondisi transformator berdasarkan warna minyak transformator	13
2.3 Rentang waktu pemeriksaan minyak transformator.....	13
2.4 Konstanta dielektrik dan kuat dielektrik beberapa material	22
2.5 Rapat jenis atau densitas air berbagai suhu	25
2.6 Nilai viskositas (η) air pada berbagai suhu.....	25
4.1 Uji statistik hubungan nilai konstanta dielektrik (κ) terhadap kenaikan frekuensi pada setiap kenaikan suhu	47

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Transformator dengan lilitan primer (N_1) dan lilitan sekunder (N_2)	6
2.2 Struktur kimia senyawa Parafin	8
2.3 Struktur kimia senyawa Naftena	9
2.4 Struktur kimia senyawa Aromatik	9
2.5 Skala warna minyak transformator standar ASTM D1500	12
2.6 Kapasitor dua plat sejajar dengan dielektrik udara	16
2.7 Muatan dielektrik polar (a) tanpa medan listrik luar, (b) diberi medan listrik, dan (c) terpolarisasi akibat medan listrik luar	19
2.8 Muatan dielektrik nonpolar (a) tanpa medan listrik, (b) dipengaruhi medan listrik luar, dan (c) induksi muatan permukaan menghasilkan medan listrik dalam	19
2.9 Viskometer Ostwald	22
2.10 Kapasitor seri dengan sumber tegangan AC	26
3.1 Diagram alir kegiatan penelitian	30
3.2 Skema susunan peralatan pengukuran waktu alir bahan	31
3.3 Rangkaian penelitian untuk penentuan nilai kapasitansi	32
3.4 Skema susunan peralatan penelitian untuk penentuan nilai kapasitansi	33
4.1 Grafik hubungan viskositas kinematik (ν) terhadap perubahan suhu pada sampel minyak transformator warna A, B dan C	42
4.2 Grafik hubungan konstanta dielektrik (κ) setiap perubahan frekuensi terhadap suhu pada minyak transformator warna A	43
4.3 Grafik hubungan konstanta dielektrik (κ) setiap perubahan frekuensi terhadap suhu pada minyak transformator warna B	44
4.4 Grafik hubungan konstanta dielektrik (κ) setiap perubahan frekuensi	

terhadap suhu pada minyak transformator warna C.....	46
4.5 Hubungan nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) (a) pada frekuensi 50 kHz, (b) 950 kHz minyak transformator warna A.....	48
4.6 Hubungan nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) (a) pada frekuensi 50 kHz, (b) 950 kHz minyak transformator warna B.....	49
4.7 Hubungan nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) (a) pada frekuensi 50 kHz, (b) 950 kHz minyak transformator warna C.....	49

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
A. Nilai viskositas kinematik (ν) untuk bahan kalibrasi dan sampel Bahan Penelitian	68
B. Kalibrasi alat penentuan nilai konstanta dielektrik (κ)	69
C. Perhitungan konstanta dielektrik (κ) untuk sampel bahan penelitian....	71
D. Uji signifikansi pengaruh frekuensi terhadap nilai konstanta dielektrik (κ)	92
E. Nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) minyak Transformator warna A, B, dan C pada setiap perubahan suhu	104
F. Dokumentasi penelitian	105

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan peralatan penting dalam proses transmisi dan distribusi pada sistem tenaga listrik. Transformator berfungsi untuk mengubah tegangan listrik dari tegangan tinggi menjadi tegangan rendah atau sebaliknya (Sinuhaji, 2012). Berdasarkan panduan pemeliharaan transformator tenaga PLN P3B (2003), saat digunakan pada sistem tenaga listrik, transformator membutuhkan adanya bahan isolasi yang berupa isolasi cair. Bahan isolasi cair pada transformator berfungsi sebagai pemisah bagian-bagian yang mempunyai beda tegangan untuk mencegah terjadinya lompatan listrik atau percikan listrik, selain itu digunakan sebagai medium pendingin, serta sebagai pelindung terhadap kerentanan oksidasi pada isolasi kertas yang digunakan pada lilitan primer dan sekunder transformator (Tanteh *et al.*, 2014). Dalam hal ini, isolasi cair yang digunakan adalah minyak, yang disebut sebagai minyak transformator (Solikhudin, 2010).

Secara umum, ditinjau dari segi bahan pembuatannya minyak transformator merupakan minyak isolasi yang berasal dari olahan minyak bumi (*petroleum*), namun juga dapat berasal dari bahan organik (Wibowo, 2008). Saat digunakan dalam transformator, minyak transformator akan mengalami beban *electric* maupun *thermal*, sehingga pemakaian minyak transformator secara terus-menerus dapat menjadi penyebab perubahan karakteristik dielektrik, fisik, dan kimia minyak transformator itu sendiri. Faktor yang menjadi penyebab terjadinya perubahan karakteristik minyak transformator adalah besarnya beban yang diberikan. Semakin besar beban maka dapat menyebabkan semakin panas minyak transformator, sehingga akan mempercepat peningkatan kandungan gas terlarut, dan minyak akan cepat mengalami perubahan warna (Bandri, 2015). Berdasarkan hasil statistik di USA pada tahun 1997-2001, sebagian besar kerusakan transformator disebabkan oleh adanya

permasalahan pada bahan isolasi (Bartley, 2003). Oleh karena itu, Zen (2011) menyatakan bahwa cara yang dapat dilakukan untuk mempertahankan kondisi operasional suatu transformator yaitu dengan melakukan pemeliharaan dan pengujian pada bahan isolasinya, sehingga waktu pemanfaatan transformator menjadi relatif lebih lama.

Sebagaimana fungsinya sebagai isolator maupun pendingin, menurut Herviany *et al.* (2015), pengujian karakteristik minyak transformator dapat ditinjau dari beberapa parameter diantaranya adalah tegangan tembus, viskositas kinematik dan konstanta dielektrik. Minyak isolasi transformator memiliki viskositas kinematik tertentu. Viskositas kinematik minyak transformator berpengaruh pada banyaknya kontaminan partikel padat yang selanjutnya akan berpengaruh terhadap kemampuan minyak untuk bersirkulasi saat pendinginan. Minyak transformator yang baik adalah memiliki viskositas kinematik yang rendah, sehingga kemungkinan terkontaminasi kecil. Berdasarkan SPLN 49-1 (1982), standar nilai viskositas kinematik minyak transformator yaitu <25 cSt pada suhu 20°C . Selain viskositas kinematik, parameter lain yang juga perlu diperhatikan adalah konstanta dielektrik. Berdasarkan standar yang disyaratkan nilai konstanta dielektrik minyak transformator yang digunakan adalah 2,2 – 2,3. Konstanta dielektrik merupakan ukuran kemampuan bahan dalam menyimpan energi listrik (Turabi, *et al.*, 2010).

Bandri (2015), telah melakukan penelitian terhadap minyak transformator dengan hanya meninjau karakteristik dielektrik meliputi tegangan tembus, $\tan \delta$ dan karakteristik kimia meliputi kandungan air, kadar asam, dan viskositas dari minyak transformator dengan tingkat warna yang berbeda pada kondisi tropis. Hasil kesimpulan penelitian tersebut adalah tingginya nilai kadar asam dan viskositas tidak langsung berpengaruh terhadap tegangan tembus minyak, namun berpengaruh langsung terhadap kenaikan nilai $\tan \delta$, sedangkan tingginya nilai kadar air berpengaruh secara signifikan terhadap penurunan tegangan tembus minyak. Sedangkan Darvos *et al.* (2005), juga melakukan penelitian terkait nilai konstanta dielektrik dan $\tan \delta$ pada minyak transformator. Penelitian tersebut hanya dilakukan

pada minyak transformator baru dengan pengukuran pada frekuensi tegangan dari 20Hz sampai 1MHz pada setiap perubahan suhu dari 20°C-80°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa, nilai konstanta dielektrik mengalami kenaikan dengan adanya kenaikan frekuensi, namun menurun terhadap kenaikan suhu. Penelitian lain juga dilakukan oleh Herviany *et al.* (2015), yaitu penelitian terkait tegangan tembus, konstanta dielektrik, dan viskositas kinematik pada minyak transformator. Penelitian tersebut hanya dilakukan pada minyak transformator bekas dengan memberikan perlakuan suhu 26°C, 40°C dan 70°C. Karakteristik tersebut diamati pada saat sebelum dan sesudah minyak transformator dipurifikasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa untuk minyak transformator sebelum dan sesudah dipurifikasi menghasilkan nilai tegangan tembus yang naik seiring kenaikan suhu, namun untuk nilai konstanta dielektrik dan viskositas kinematik menurun dengan adanya kenaikan suhu.

Berdasarkan penjelasan di atas maka dilakukan penelitian terhadap minyak transformator dengan tiga warna berbeda yaitu warna A, B dan C pada setiap tahapan pemanasan dari suhu 20°C-40°C dengan rentang perubahan 5°C. Parameter yang diteliti dalam penelitian ini terdiri dari dua parameter yaitu viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ). Penentuan nilai viskositas kinematik (ν), pengukuran dilakukan dengan menggunakan metode Ostwald. Sedangkan penentuan nilai konstanta dielektrik (κ) pengukuran dilakukan menggunakan metode kapasitor plat sejajar, dimana pada setiap tahapan perubahan suhu diberi perlakuan frekuensi sumber tegangan dari 50 kHz sampai 950 kHz dengan interval 100 kHz.

1.2 Rumusan masalah

Rumusan-rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana nilai viskositas kinematik (ν) minyak transformator terhadap perubahan suhu?
2. Bagaimana nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator pada setiap perubahan frekuensi sumber tegangan terhadap perubahan suhu?

1.3 Batasan masalah

Berdasarkan rumusan masalah di atas, terdapat beberapa batasan masalah pada penelitian ini diantaranya:

1. Sampel yang diuji adalah minyak transformator yang digunakan oleh PT. PLN (Persero) distribusi Jawa Timur area Jember.
2. Sampel penelitian hanya dibedakan berdasarkan warna, yaitu warna A, B dan C.
3. Sampel penelitian diberi perlakuan suhu 20°C - 40°C dengan rentang perubahan 5°C .
4. Pada penentuan konstanta dielektrik, variasi frekuensi sumber tegangan yang digunakan yaitu 50 kHz-950 kHz dengan interval masing-masing 100 kHz.

1.4 Tujuan

Berdasarkan penjelasan yang terdapat pada latar belakang dan beberapa rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui nilai viskositas kinematik (ν) minyak transformator terhadap perubahan suhu.
2. Mengetahui nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator pada setiap perubahan frekuensi sumber tegangan terhadap perubahan suhu.

1.5 Manfaat

Beberapa manfaat yang diharapkan dari penelitian ini sebagai berikut:

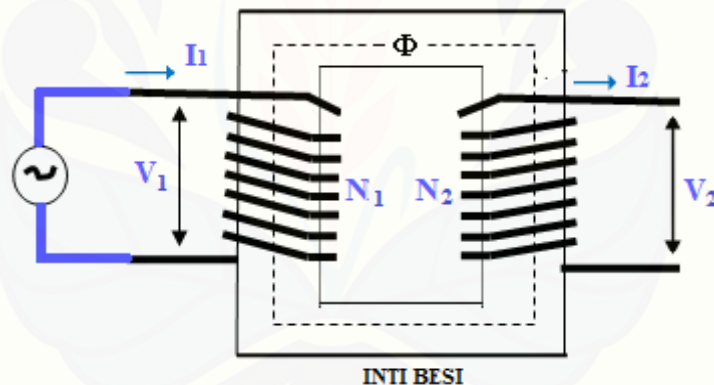
1. Sebagai informasi mengenai seberapa jauh perubahan warna minyak transformator berpengaruh terhadap nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) minyak transformator.
2. Mengetahui akan pentingnya pemeliharaan dan pengujian sifat minyak transformator, mengingat pentingnya minyak transformator dalam menjalankan fungsinya sebagai isolator maupun pendingin transformator.



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk menaikkan atau menurunkan tegangan listrik (Sinuhaji, 2012). Bentuk transformator secara umum, terdiri dari dua lilitan kawat yang saling terpisah yaitu lilitan primer (N_1) yang terhubung dengan input dan lilitan sekunder (N_2) yang terhubung dengan beban (Rijono, 1997). Berikut ini adalah gambar transformator dengan lilitan primer (N_1) dan sekunder (N_2):



Gambar 2.1 Transformator dengan lilitan primer (N_1) dan lilitan sekunder (N_2) (Sumber: Winders, 2002)

Transformator telah digunakan secara luas, baik dibidang elektronika maupun tenaga listrik. Contohnya digunakan sebagai gandengan impedansi antara sumber dan beban (Zuhal, 1995), selain itu digunakan untuk menurunkan tegangan tinggi dari tegangan pembangkit menjadi tegangan rumah, dan sebagainya (Giancoli, 2001). Prinsip kerja suatu transformator yaitu induksi bersama (*mutual induction*). Jika lilitan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik maka akan

menyebabkan terjadinya gaya gerak magnet di sekitar lilitan yang dapat menimbulkan fluks magnet bolak-balik dalam inti yang terhubung dengan kumparan sekunder. Akibat adanya fluks magnet bersama, pada ujung-ujung lilitan sekunder terjadi ggl (gaya gerak listrik) induksi sekunder, sehingga jika lilitan sekunder dihubungkan dengan beban maka pada lilitan sekunder muncul arus listrik bolak-balik yang menghasilkan tegangan sekunder. Berdasarkan induksi elektromagnet dari hukum Faraday, besarnya ggl induksi pada suatu lintasan yang tertutup adalah sebanding dengan laju perubahan fluks yang menembus lintasan (Serway dan Jewett, 2010).

Dalam Zuhail (1995), berdasarkan penggunaan transformator dalam bidang tenaga listrik dapat dibedakan sebagai berikut:

1. Transformator penaik tegangan (*step up*) atau disebut transformator daya, untuk menaikkan tegangan pembangkit menjadi tegangan transmisi.
2. Transformator penurun tegangan (*step down*) yang disebut transformator distribusi, untuk menurunkan tegangan transmisi menjadi tegangan distribusi.
3. Transformator instrumen, untuk pengukuran yang terdiri dari transformator tegangan dan transformator arus, digunakan untuk menurunkan tegangan dan arus agar dapat masuk ke meter-meter pengukuran.

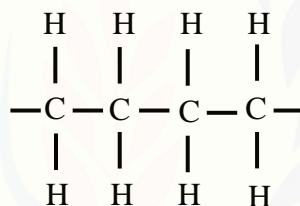
2.2 Minyak Transformator

Minyak transformator adalah minyak mineral yang diperoleh melalui pemurnian minyak mentah. Minyak isolasi transformator berbasis minyak mineral, merupakan salah satu media yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam menyerap dan mereduksi panas dalam transformator yang sangat baik. Selain berasal dari minyak mineral, minyak transformator juga dapat pula terbuat dari minyak organik, seperti minyak transformator piranol dan silikon (Ansar, 2010). Pada dasarnya menurut Riswiyanto (2009), komposisi minyak mineral terdiri dari molekul hidrokarbon yang diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama yaitu hidrokarbon parafinik,

hidrokarbon naftenik, dan hidrokarbon aromatik, sebagian kecil terdiri dari senyawa sulfur, oksigen, nitrogen dan logam (Heathcote, 2007).

1. Hidrokarbon parafinik

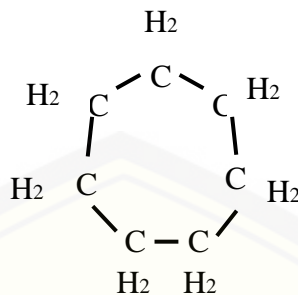
Parafin merupakan senyawa hidrokarbon jenuh yang dapat berupa rantai lurus atau bercabang. Parafin disebut juga sebagai senyawa rantai terbuka atau senyawa alifatik dengan rumus empiris C_nH_{2n+2} . Sifat dari parafin adalah bersifat nonpolar, dan dapat mengalami pembakaran dengan menghasilkan karbon dioksida dan air (Fessenden dan Fessenden, 1986). Berikut merupakan struktur kimia senyawa parafin:



Gambar 2.2 Struktur kimia senyawa parafin (Sumber: Yuliasuti, 2010)

2. Hidrokarbon naftenik

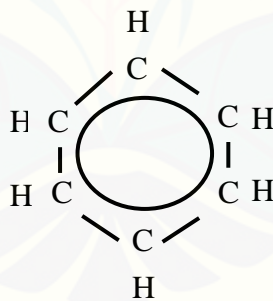
Senyawa naftena digolongkan sebagai senyawa hidrokarbon yang mempunyai rantai tertutup atau struktur berbentuk cincin. Senyawa ini juga disebut sebagai senyawa alisiklik dengan rumus empiris C_nH_{2n} . Naftena merupakan senyawa yang tidak reaktif, dan bersifat nonpolar (Fessenden dan Fessenden, 1986). Berikut adalah struktur kimia senyawa naftena:



Gambar 2.3 Struktur kimia senyawa naftena (Sumber: Yuliasuti, 2010)

3. Hidrokarbon Aromatik

Hidrokarbon aromatik merupakan senyawa hidrokarbon yang dikelompokkan berdasarkan bau. Benzena adalah senyawa aromatik yang paling sederhana, yang mempunyai rumus empiris C_6H_6 . Seperti hidrokarbon alifatik dan alisiklik, benzena bersifat nonpolar (Fessenden dan Fessenden, 1986). Berikut adalah struktur kimia senyawa aromatik:



Gambar 2.4 Struktur kimia senyawa aromatik (Sumber: Yuliasuti, 2010)

2.3 Fungsi Minyak Transformator

2.3.1 Sebagai Pendingin

Arus pusar (*Eddy current*) yang dihasilkan oleh fluks magnetik yang berubah-ubah selama transformator digunakan akan menghasilkan panas. Hal ini akan menjadi penyebab kenaikan temperatur pada lilitan dan inti besi. Jika proses tersebut tidak

diikuti dengan proses pendinginan, maka akan berakibat terjadi pemanasan berlebih pada transformator. Adanya minyak sebagai cairan dalam transformator dapat membantu proses pendinginan lilitan dan inti, dimana minyak transformator dapat menyerap panas dari inti maupun lilitan dan selanjutnya meneruskan panas ke permukaan luar transformator (Haidir, 2011).

2.3.2 Sebagai Isolator

Sebagai isolator, minyak transformator harus mampu untuk mengisolasi tegangan tinggi di dalam transformator, seperti tegangan antar lilitan maupun tegangan antar lapis tiap lilitan. Hal ini disebabkan karena pada transformator terdapat daerah-daerah yang memiliki beda tegangan yang cukup tinggi. Jika antara bagian-bagian tersebut terjadi hubung singkat dapat menimbulkan arus yang tinggi sehingga dapat merusak transformator dan juga dapat merusak peralatan-peralatan lain yang terhubung dengan transformator (Solikhudin, 2010).

2.4 Karakterisasi Minyak Transformator

2.4.1 Standar Karakteristik Minyak Transformator

Minyak transformator yang baik harus jernih, tidak mengandung endapan. Adanya endapan atau kontaminasi seperti air, kotoran, debu atau partikel konduktif dalam minyak akan menjadi penyebab penurunan nilai tegangan tembus. Kontaminasi dalam minyak juga dapat berupa zat yang mudah terbakar, hal ini ditandai dengan rendahnya nilai titik nyala minyak. Minyak transformator yang baik harus memiliki kekentalan yang rendah. Tinggi rendahnya kekentalan minyak transformator dinyatakan dengan nilai viskositas kinematik. Viskositas kinematik erat kaitannya dengan kemampuan minyak transformator bersirkulasi saat proses pendinginan. Semakin tinggi viskositas kinematik, semakin berkurang daya pendinginan minyak. Viskositas kinematik minyak transformator juga berhubungan dengan suhu. Pada suhu tinggi minyak transformator lebih mudah bersirkulasi. Hal

ini disebabkan karena pada suhu tinggi, molekul-molekul minyak akan merenggang, sehingga viskositas kinematiknya semakin kecil (Malik, *et al.*, 1998)

Berdasarkan penjelasan di atas, tabel 2.1 menunjukkan nilai dari beberapa karakteristik minyak transformator meliputi karakteristik fisik, listrik dan kimia, dimana nilai-nilai tersebut merupakan nilai yang ditetapkan oleh PLN sebagai standar minyak transformator untuk digunakan. Standar karakteristik minyak transformator berdasarkan SPLN 49-1 (1982), adalah sebagai berikut:

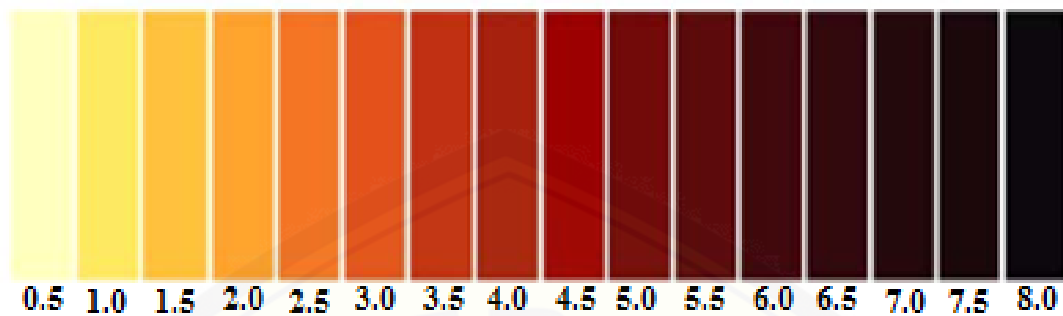
Tabel 2.1 Standar minyak transformator yang digunakan

Sifat minyak	Satuan	Standar
Viskositas 20°C	cSt	<25
Titik nyala	°C	>130
Kadar asam	Mg KOH/g	<0,40
Tegangan tembus	kV/cm	>120
Korosi belerang	-	tidak ada
Kotoran	%	<0,1

Sumber: SPLN 49-1 (1982).

2.4.2 Warna Minyak Transformator

Saat digunakan dalam transformator, minyak akan bersirkulasi dalam kondisi panas dan bereaksi dengan material di dalam transformator (inti besi, lilitan, dan vernish) secara langsung. Panasnya minyak transformator disebabkan oleh besarnya arus sebagai akibat besarnya beban. Bila beban semakin bertambah maka minyak semakin panas dan perubahan warna akan semakin cepat. Berdasarkan standar ASTM D1500, warna minyak transformator dibedakan menjadi 16 warna yaitu dari skala 0,5 s.d 8,0 seperti pada gambar 2.5. Semakin besar nilai skala minyak, maka semakin keruh (hitam) warna minyak, yang berarti kualitas minyak semakin rendah. Bertambahnya skala warna menunjukkan bahwa minyak telah terkontaminasi. Selain itu, minyak transformator dengan warna tertentu, juga dapat mengindikasikan kondisi transformator, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2.



Gambar 2.5 Skala warna minyak transformator standar ASTM D1500 (Sumber: Kytola Instrument OY, 2015)

Table 2.2 Kondisi transformator berdasarkan warna minyak transformator

Warna dan Kelompok	Angka Asam	IFT (dyn/cm)	Diagnosa
Bagus			pendingin dan isolasi baik
kuning pucat	0.03	45	
# 0.5	0.1	30	
Contoh A			terjadi endapan (<i>sludge</i>) yang membaur di minyak yang akan menyebabkan IFT menurun
kuning muda	0.05	27	
#1.0	0.1	29	
Umum			terjadi endapan asam tipis pada lilitan yang akan menjadi penyebab gangguan
kuning terang	0.11	24	
# 1.5-2.0	0.15	27	
Jelek			hampir semua transformator pada keadaan ini terdapat endapan pada lilitan dan inti
kuning sawo	0.1	18	
# 2.5	0.4	24	
Sangat jelek			endapan akan beroksidasi dan kemudian mengeras serta terjadi juga diisolasi kertas
kuning sawo	0.41	14	
# 3.0-5.0	0.55	18	
Sangat jelek coklat	0.55	9	Terdapat <i>sludge</i> yang menyumbat sirip-sirip pendingin yang menyebabkan kenaikan temperatur sampai 20°C
kehitaman	1.5	14	
# 5.5-6.5			
(Crude oil)			diperlukan suatu cara untuk menghilangkan
hitam	≥1	6	<i>sludge</i> dan transformator harus dibongkar dan
#7.0-8.0	dan lebih	9	diperiksa, tidak hanya mengganti minyak

Sumber: PLN P3B (2003).

Berdasarkan penjelasan mengenai perubahan karakteristik minyak transformator, perlu dilakukan pemeriksaan sesuai dengan waktu yang ditentukan. Tabel di bawah merupakan tabel ketentuan rentang waktu pemeriksaan minyak isolasi transformator sesuai dengan kapasitas beban transformator.

Tabel 2.3 Rentang waktu pemeriksaan minyak transformator

Daya	Tegangan			
	400 kV	220 kV	110 kV	<110 kV
>100 MVA	6 bulan	6 bulan	1 tahun	Tergantung dari keutamaan fungsi transformator
30 – 100 MVA	6 bulan	1 tahun	1 tahun	
<30 MVA	1 tahun	1 tahun	1 tahun	

Sumber: Dzulfikar (2013).

2.5 Viskositas

Pada dasarnya setiap fluida atau cairan mempunyai sejumlah gesekan internal tetentu yang disebut sebagai viskositas. Viskositas dinyatakan sebagai suatu tahanan aliran fluida terhadap gesekan antara molekul-molekul satu dengan lainnya. Viskositas merupakan suatu sifat cairan yang berhubungan erat dengan tahanan untuk mengalir karena adanya tekanan atau tegangan, dimana semakin tinggi viskositas maka semakin besar tahanannya. Suatu cairan yang mengalir dengan mudah mempunyai viskositas kecil. Sebaliknya, pada cairan yang sulit mengalir mempunyai viskositas yang besar. Besarnya viskositas dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti suhu, gaya tarik antar molekul dan ukuran serta jumlah molekul terlarut (Atkin, 2006). Dalam Wylie (1992), dinyatakan bahwa viskositas dapat dibedakan menjadi dua yaitu viskositas dinamik dan viskositas kinematik.

2.5.1 Viskositas dinamik (*absolute viscosity*)

Menurut Torryselly (2008), viskositas dinamik merupakan suatu sifat fluida yang menghubungkan antara tegangan geser dengan laju perubahannya. Viskositas dinamik dinotasikan dengan (η), yaitu sama dengan rasio tegangan geser terhadap kemiringan kecepatan, sehingga dalam satuan SI dinyatakan dengan $N.s/m^2 =$

$\text{kg/m s} = \text{Pa s}$. Satuan cgs yang setara, dyn.s/cm^2 adalah satuan viskositas yang umum digunakan yang disebut poise, dimana $1 \text{ poise} = 0,1 \text{ N.s/m}^2$ (Young dan Freedman, 2002).

Dalam Young dan Freedman (2002), jika terdapat suatu partikel melingkar dengan jari-jari r , yang diberi gaya F dan bergerak dengan kecepatan v melalui fluida dengan viskositas η , untuk aliran non turbulen didapatkan suatu hubungan sebagai berikut:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (2.1)$$

Persamaan di atas disebut sebagai persamaan hukum Stokes. Besaran viskositas η juga dapat dinyatakan melalui suatu cairan yang melewati tabung kapiler dengan menggunakan persamaan Poiseuille:

$$\eta = \frac{P\pi r^4 t}{8VL} \quad (2.2)$$

dimana, (t) adalah waktu yang dibutuhkan untuk volume cairan (V) mengalir melewati tabung kapiler dengan panjang (L) dan jari-jari (r) pada tekanan tertentu (P). Viskositas sebagian besar fluida atau cairan bergantung pada perubahan suhu, yaitu berkurang dengan bertambahnya suhu. Hal ini berbeda dengan gas, karena viskositas suatu gas bertambah dengan peningkatan suhu, karena semakin besarnya aktivitas molekul ketika suhu meningkat (Alberty dan Silbey, 1955).

2.5.2 Viskositas kinematik

Viskositas kinematik merupakan ukuran kekentalan atau tahanan dalam fluida untuk mengalir oleh rapat jenisnya sendiri. Jika ditinjau dari sifat fisisnya, viskositas kinematik juga dapat dikatakan sebagai kemampuan perambatan energi dalam suatu medium fluida tertentu. Sifat fisis yang ditunjukkan oleh viskositas kinematik fluida disebabkan oleh proses gerak partikel fluida akibat adanya suatu gaya yang membuat

partikel-partikel fluida tersebut bergerak. Partikel-partikel yang bergerak merambatkan suatu energi satu sama lain dengan kecepatan tertentu (Wyle, 1992). Menurut Martono (2013), viskositas kinematik dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.3)$$

dimana, ν adalah viskositas kinematik, dan η adalah viskositas dinamik atau viskositas absolut. Satuan SI viskositas kinematik dinyatakan dengan m^2/s , atau biasanya diukur dengan satuan St (Stokes), dimana $1 \text{ St} = 100 \text{ mm}^2/\text{s} = 1 \text{ cm}^2/\text{s}$.

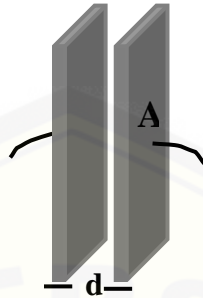
2.6 Kapasitor

Kapasitor merupakan alat untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk medan listrik (Beiser, 1962). Secara umum, kapasitor terdiri dari dua buah penghantar (biasanya pelat atau lembaran) yang terisolasi, dimana jika kedua penghantar dihubungkan dengan sumber tegangan, dapat membawa muatan-muatan yang sama besarnya dan berlawanan tanda. Dalam Giancoli (2001), muatan Q pada masing-masing plat sebanding dengan beda potensial V , sehingga didapatkan:

$$Q = CV \quad (2.4)$$

dimana, C pada hubungan ini disebut kapasitansi dari kapasitor. Nilai kapasitansi bergantung pada ukuran, bentuk, dan jarak pisah antara dua plat kapasitor. Bentuk-bentuk geometris dari suatu kapasitor antara lain kapasitor plat sejajar, kapasitor silinder, dan kapasitor bola. Dalam satuan SI nilai kapasitor dinyatakan dalam Farad (F) (Hayt dan Buck, 2006).

Kapasitor plat sejajar merupakan kapasitor yang paling umum digunakan dan paling sederhana. Gambar berikut adalah gambar sebuah kapasitor plat sejajar:



Gambar 2.6 Kapasitor dua pelat sejajar dengan dielektrik udara (Sumber: Giancoli, 2001)

Gambar 2.6 menunjukkan suatu kapasitor dua pelat sejajar, yang mempunyai luas pelat A dan mempunyai jarak antar pelat d yang dipisahkan udara. Ketika setiap plat kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan, maka muatan positif $+Q$ akan muncul pada salah satu plat dan muatan negatif $-Q$ pada plat lainnya. Apabila nilai d jauh lebih kecil dibandingkan dengan dimensi plat, maka medan listrik E diantara kedua plat tersebut akan seragam. Hal ini berarti bahwa garis-garis gaya akan sejajar dan berjarak sama terhadap satu dengan lainnya (Halliday dan Resnick, 1997). Medan listrik E di antara plat dinyatakan dengan:

$$E = \frac{Q/A}{\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Sedangkan beda potensial antara dua pelat yang memiliki jarak d adalah:

$$V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A} \quad (2.6)$$

sehingga dari persamaan 2.4 menjadi:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (2.7)$$

dimana, C merupakan kapasitansi ketika dua plat sejajar tidak terdapat bahan dielektrik. Berdasarkan persamaan (2.7) tersebut dapat disimpulkan bahwa kapasitansi tidak hanya bergantung pada bentuk geometris plat, tetapi juga pada luas plat A dan jarak antar plat d (Halliday dan Resnick, 1997). Ketika diantara dua plat terdapat suatu bahan dielektrik, maka persamaan kapasitansi akan berubah yaitu mengandung faktor κ yang disebut sebagai konstanta dielektrik.

2.7 Konstanta Dielektrik (κ)

Bahan dielektrik merupakan isolator yang baik, karena medan listrik tidak menghasilkan pergerakan muatan dalam bahan dielektrik. Secara kelistrikan bahan dielektrik dapat memperlihatkan struktur dipole listrik, yaitu adanya pemisahan antara muatan negatif dan muatan positif pada tingkatan molekuler atau atomik (Callister, 1994). Karakteristik umum yang dimiliki oleh semua bahan dielektrik baik yang berbentuk padat, larutan, maupun gas adalah kemampuannya menyimpan energi. Ukuran kemampuan bahan dalam menyimpan energi listrik disebut sebagai konstanta dielektrik (Turabi *et al.*, 2010). Penyimpanan energi terjadi melalui pergeseran posisi relatif dari muatan-muatan terikat di dalam molekul bahan karena pengaruh medan listrik eksternal. Mekanisme pergeseran muatan-muatan tersebut berbeda-beda untuk berbagai bahan dielektrik (Hayt dan Buck, 2006).

Dalam Halliday dan Resnick (1997), konstanta dielektrik (κ) merupakan perbandingan antara kapasitansi dengan bahan dielektrik dengan kapasitansi tanpa bahan dielektrik. Menurut Pain (2005), konstanta dielektrik (κ) yang juga disebut sebagai permitivitas relatif (ϵ_r) memiliki persamaan sebagai berikut:

$$\kappa = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (2.8)$$

dimana ϵ merupakan permitivitas absolut, ϵ_0 permitivitas ruang vakum, dan ϵ_r permitivitas relatif.

Adanya suatu bahan dielektrik di antara dua plat sejajar dapat menyebabkan perubahan kapasitansi, hal ini disebabkan karena bahan dielektrik sangat baik dalam penyimpanan muatan, semakin banyak muatan yang tersimpan, nilai konstanta dielektrik juga semakin tinggi, sehingga kapasitansi akan meningkat sebesar faktor κ yang nilainya berbeda untuk bahan tertentu. Dalam Beiser (1962), hubungan antara kapasitansi dan konstanta dielektrik dinyatakan sebagai berikut:

$$C = \kappa \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.9)$$

dimana,

C : Kapasitansi terdapat bahan dielektrik (F)

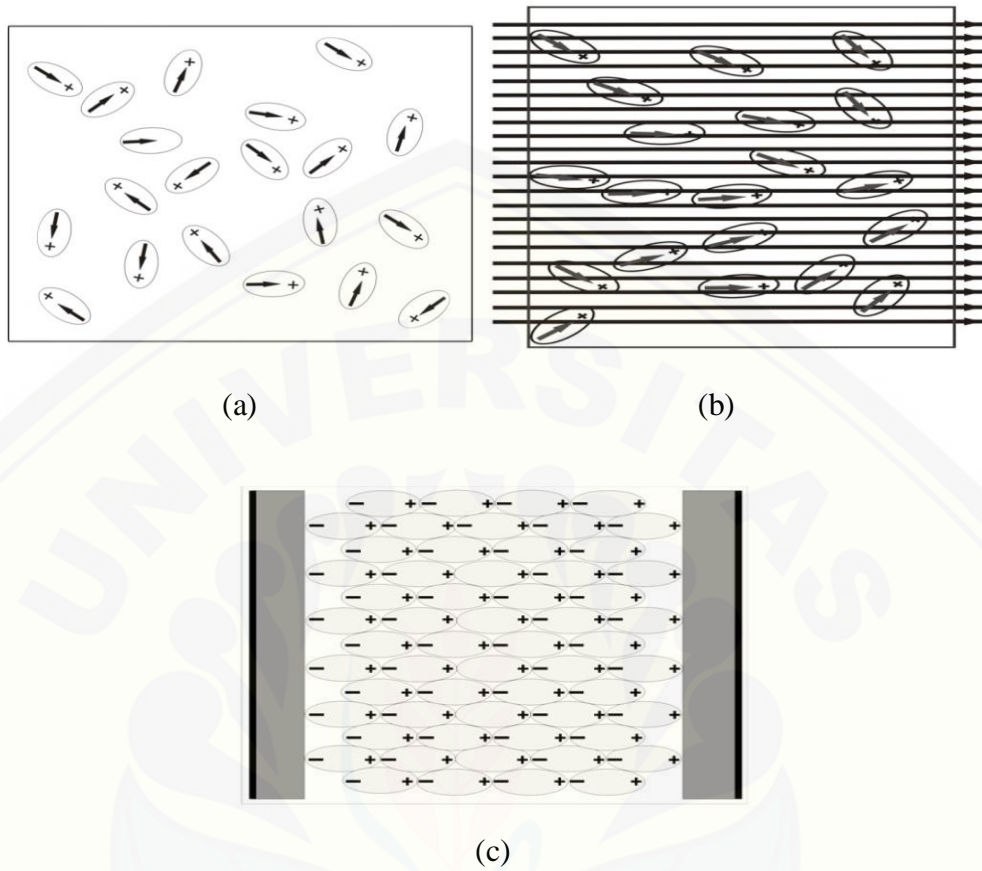
κ : Konstanta dielektrik

ε_0 : Konstanta elektrostatis pada Hukum Coulomb $8,85 \times 10^{-2} F / m$

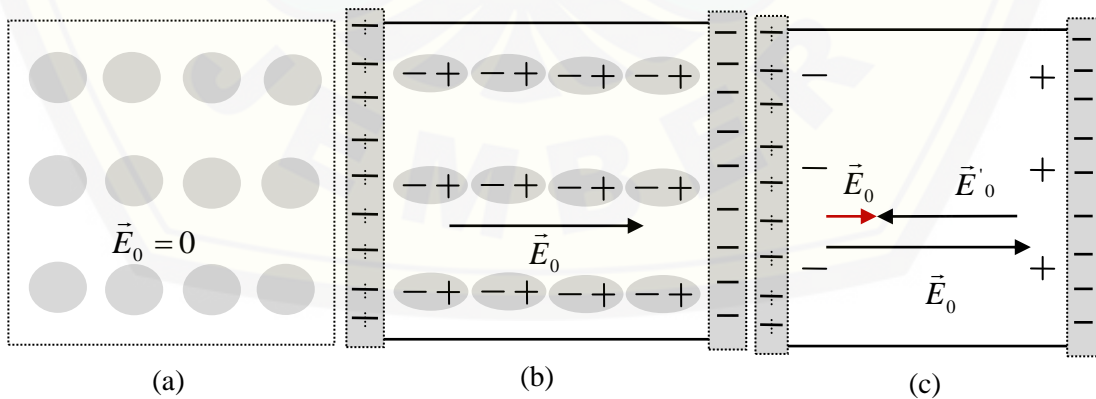
A : Luas plat (m^2)

d : Jarak antar plat (m)

Perubahan nilai kapasitansi disebabkan adanya perubahan potensial listrik pada kedua plat kapasitor ketika terdapat bahan dielektrik, dimana nilai kapasitansi meningkat dan nilai potensial listrik semakin menurun (Tobing, 1996), sesuai dengan persamaan (2.4). Penurunan nilai potensial listrik terjadi akibat adanya medan listrik luar yang diberikan pada bahan dielektrik sehingga menyebabkan terjadinya polarisasi bahan dielektrik. Polarisasi muatan-muatan dalam atom dielektrik untuk molekul polar ditunjukkan pada gambar 2.7. sedangkan untuk molekul nonpolar ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.7 Muatan dielektrik polar (a) tanpa medan listrik, (b) dipengaruhi medan listrik luar, dan (c) terpolarisasi akibat medan listrik luar (Sumber: Tipler, 1991)



Gambar 2.8 Muatan dielektrik nonpolar (a) tanpa medan listrik luar, (b) diberi medan listrik, dan (c) induksi muatan permukaan menghasilkan medan listrik dalam (Sumber: Tipler, 1991)

Suatu molekul polar memiliki momen dipol permanen yang tersebar secara acak. Dalam pengaruh medan listrik luar di antara kedua plat kapasitor, momen dipol menerima suatu gaya torka yang menyebabkan momen dipol tersebut menyearahkan diri dengan arah medan listrik luar. Jika molekul-molekul dielektrik bersifat nonpolar, maka tidak memiliki momen dipol permanen, yaitu pusat muatan positif berimpit dengan pusat muatan negatif. Akibat adanya medan listrik luar kedua inti akan terpisah membentuk dipol listrik, inti yang bermuatan positif searah dengan arah medan listrik, sedangkan inti negatif menuju arah berlawanan. Kemampuan momen dipol untuk menyearahkan diri dengan arah medan listrik luar, bergantung pada kuat medan dan suhu. Pada suhu tinggi, gerak *thermal* molekul-molekul yang bersifat acak, cenderung menghambat proses penyearahan (Tipler, 1991).

Ketika suatu dielektrik diletakkan antara dua plat kapasitor, medan listrik dari kapasitor mempolarisasikan molekul-molekul dielektrik. Menurut Smallman dan Bishob (2000), polarisasi merupakan pergerakan ion dan molekul-molekul polar di dalam bahan dielektrik yang diakibatkan oleh adanya medan listrik yang menyebabkan dua sisi yang berlawanan pada material dielektrik memiliki muatan yang berlawanan. Ketika plat bermuatan yg menghasilkan medan listrik ke arah kanan, muatan positif perlahan-lahan menuju pelat negatif, dan muatan negatif ke pelat positif. Hasilnya adalah terdapat suatu muatan permukaan yang terikat pada permukaan dielektrik yang akan menghasilkan medan listrik internal yang arahnya berlawanan dengan arah medan listrik luar (Tipler, 1991).

Dalam Tipler (1991), jika medan listrik awal antara keping-keping suatu kapasitor tanpa dielektrik dinyatakan dengan E_0 , maka medan listrik dalam dielektrik adalah:

$$E = \frac{E_0}{\kappa} \quad (2.10)$$

Jika sebuah plat sejajar tanpa bahan dielektrik dianggap mempunyai nilai potensial listrik sebesar $V_0 = Q/C_0$, maka ketika bahan dielektrik dimasukkan di antara kedua plat, potensial listrik antar plat menjadi:

$$V = Ed = \frac{E_0 d}{\kappa} = \frac{V_0}{\kappa} \quad (2.11)$$

karena muatan Q pada kapasitor tidak berubah, maka nilai kapasitansinya adalah:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{V_0/\kappa} = \kappa \frac{Q}{V_0} \quad (2.12)$$

sehingga

$$C = \kappa C_0 \quad (2.13)$$

dimana, C adalah kapasitansi plat sejajar saat terdapat dielektrik, dan C_0 adalah kapasitansi plat kosong.

Secara eksperimen telah didapatkan hasil bahwa bahan yang digunakan untuk dielektrik juga mempengaruhi kapasitansi. Kapasitor yang menggunakan dielektrik mika, parafin, minyak transformator, kertas dan berbagai bahan isolasi lainnya, mempunyai kapasitansi yang lebih tinggi daripada kapasitansi udara. Bahan-bahan ini mempunyai nilai konstanta dielektrik yang lebih besar dari satu (Hayt dan Buck, 2006), sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.4.

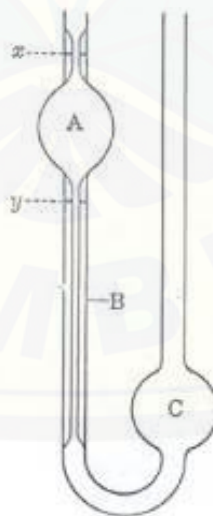
Tabel 2.4 Konstanta dielektrik dan kuat dielektrik beberapa material

Bahan	Konstanta Dielektrik	Kekuatan dielektrik (kV/mm)
Air	1,00059	3
Bakelite	4,9	24
Glass	5,6	14
Mica	5,4	10-100
Neoprene	6,9	12
Paraffin	2,1-2,5	10
Plexiglas	3,4	40
Polystyrene	2,55	24
Porcelain	7	5,7
Transformer oil	2,24	12

Sumber: Tipler (2004)

2.8 Metode Ostwald

Secara umum, viskositas suatu cairan dapat ditentukan salah satunya dengan menggunakan metode Ostwald. Metode Ostwald didasarkan pada hukum Poiseuille dengan menggunakan alat viskometer Ostwald. Prinsip dari metode ini adalah pengukuran waktu alir yang diperlukan suatu cairan untuk mengalir dalam tabung kapiler (Moechtar, 1990). Berikut merupakan gambaran dari viskometer Ostwald:



Gambar 2.9 Viskometer Ostwald (sumber: Glastone dan Samuel, 1959)

Viskometer Ostwald terdiri dari bola dengan nilai batas atas x dan y terkait dengan tabung kapiler B dan bola tempat cuplikan C. Penetapannya dilakukan dengan mengukur waktu yang diperlukan untuk mengalirnya cairan dalam pipa kapiler dari x ke y . Waktu aliran untuk volume cairan dari titik x ke y dalam kapiler vertikal di bawah pengaruh gravitasi bumi, menghasilkan suatu persamaan dengan prinsip Poiseuille, yang dinyatakan dengan:

$$\eta = \frac{\pi PR^4 t}{8VL} \quad (2.14)$$

dimana,

- η : viskositas absolut cairan ($Nm^{-2}.s$)
- P : tekanan pada cairan (Pa)
- R : jari-jari tabung (m)
- T : waktu alir cairan melewati pipa kapiler (s)
- V : volum cairan (l)
- L : Panjang pipa (m)

Besaran (P) merupakan perbedaan tekanan antara dua akhir tabung U dan diasumsikan sebanding dengan rapat jenis cairan. Pengukuran viskositas (η) secara tepat dengan menggunakan persamaan (2.14) cukup sulit, karena ketidakpastian dalam menyatakan jari-jari tabung kapilaritas, dimana jari-jarinya adalah R^4 . Pada kenyataannya, viskositas cairan lebih sesuai bila dinyatakan dengan perbandingan dengan referensi cairan yang telah diketahui secara akurat sebagai viskositas, seperti air (Chang, 1981).

Persamaan yang menyatakan perbandingan viskositas sampel dan cairan referensi adalah:

$$\frac{\eta_{sampel}}{\eta_{referensi}} = \frac{\pi R^4 (Pt)_{sampel}}{8VL} \times \frac{8VL}{\pi R^4 (Pt)_{referensi}} \quad (2.15)$$

Karena V , L , dan R sama jika viskometer yang digunakan sama dan tekanan P yang berlaku pada cairan sebanding dengan rapat jenisnya, yaitu $P = konstanta \times \rho$. Sehingga Viskositas sampel bisa didapatkan dari rapat jenis cairan dan waktu aliran jika $\eta_{referensi}$ telah diketahui (Chang, 1981), sebagaimana persamaan berikut:

$$\frac{\eta_{sampel}}{\eta_{referensi}} = \frac{(\rho t)_{sampel}}{(\rho t)_{referensi}} \quad (2.16)$$

Rapat jenis atau densitas (ρ) merupakan ukuran untuk konsentrasi suatu zat. Sifat ini ditentukan dengan cara menghitung *ratio* massa zat yang terkandung dalam suatu bagian tertentu terhadap volume bagian tersebut. Rapat jenis bahan bergantung pada faktor lingkungan seperti suhu dan tekanan. Hubungannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.17)$$

dimana, ρ adalah rapat jenis (kg/m^3), m adalah massa bahan (kg) dan V adalah volume fluida (m^3) (Olson, 1993). Berikut merupakan tabel nilai baku konvensional rapat jenis atau densitas air berbagai suhu:

Tabel 2.5 Rapat jenis atau densitas (ρ) air berbagai suhu

Suhu ($^{\circ}C$)	Densitas (kg/m^3)
20	998,23
25	997.07
30	995,62
35	994.02
40	992,24

Sumber: Kell (1975)

Sebagai bahan yang akan digunakan untuk bahan pembanding yang telah memiliki nilai rapat jenis (ρ) tertentu, air juga memiliki nilai viskositas absolut (η) pada berbagai suhu, sebagaimana ditunjukkan dalam tabel 2.6 sebagai berikut:

Tabel 2.6 Nilai viskositas (η) air pada berbagai suhu

Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Viskositas ($\times 10^{-3} \text{ kg/ms}$)
0	1,781
5	1,518
10	1,307
15	1,139
20	1,002
25	0,890
30	0,798
35	0,720
40	0,653

Sumber: Bird (1987)

2.9 Rangkaian AC

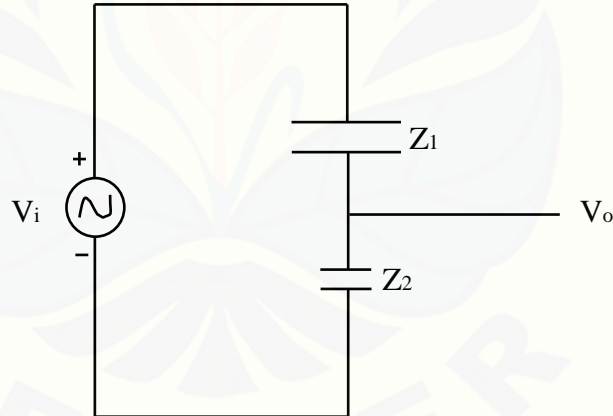
Jika sebuah kapasitor dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, maka arus bolak-balik akan mengalir secara kontinu. Hal ini terjadi karena ketika tegangan ac baru dihidupkan, muatan mulai mengalir sehingga pada salah satu pelat terkumpul muatan negatif dan pelat yang lain mengumpulkan muatan positif, tetapi ketika tegangan berbalik, muatan mengalir dengan arah yang berlawanan. Tegangan yang diberikan sama dengan tegangan kapasitor. Jadi, muatan pada plat mengikuti tegangan, jika tegangan nol, muatan juga nol, jika tegangan maksimum, maka muatan juga maksimum. Berdasarkan penjelasan tersebut, dalam Giancoli (2001), persamaan yang merupakan hubungan antara tegangan dan arus dalam kapasitor, adalah sebagai berikut:

$$V = IX_c \quad (2.18)$$

dimana, X_C adalah reaktansi kapasitif (atau impedansi) kapasitor. Reaktansi kapasitif merupakan perlawanan yang diberikan oleh kapasitor atau oleh setiap rangkaian kapasitif terhadap aliran arus, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.19)$$

Arus yang mengalir pada rangkaian kapasitif berbanding lurus dengan kapasitansi dan perubahan tegangan. X_C tergantung pada kapasitansi C dan frekuensi f . Semakin besar kapasitansi, semakin banyak muatan yang bisa disimpan, sehingga semakin kecil perlambatan yang terjadi terhadap arus bolak-balik. Oleh karena itu, X_C berbanding terbalik terhadap C dan f . Berbeda untuk kondisi ketika $f = 0$ dan X_C menjadi tak terhingga.



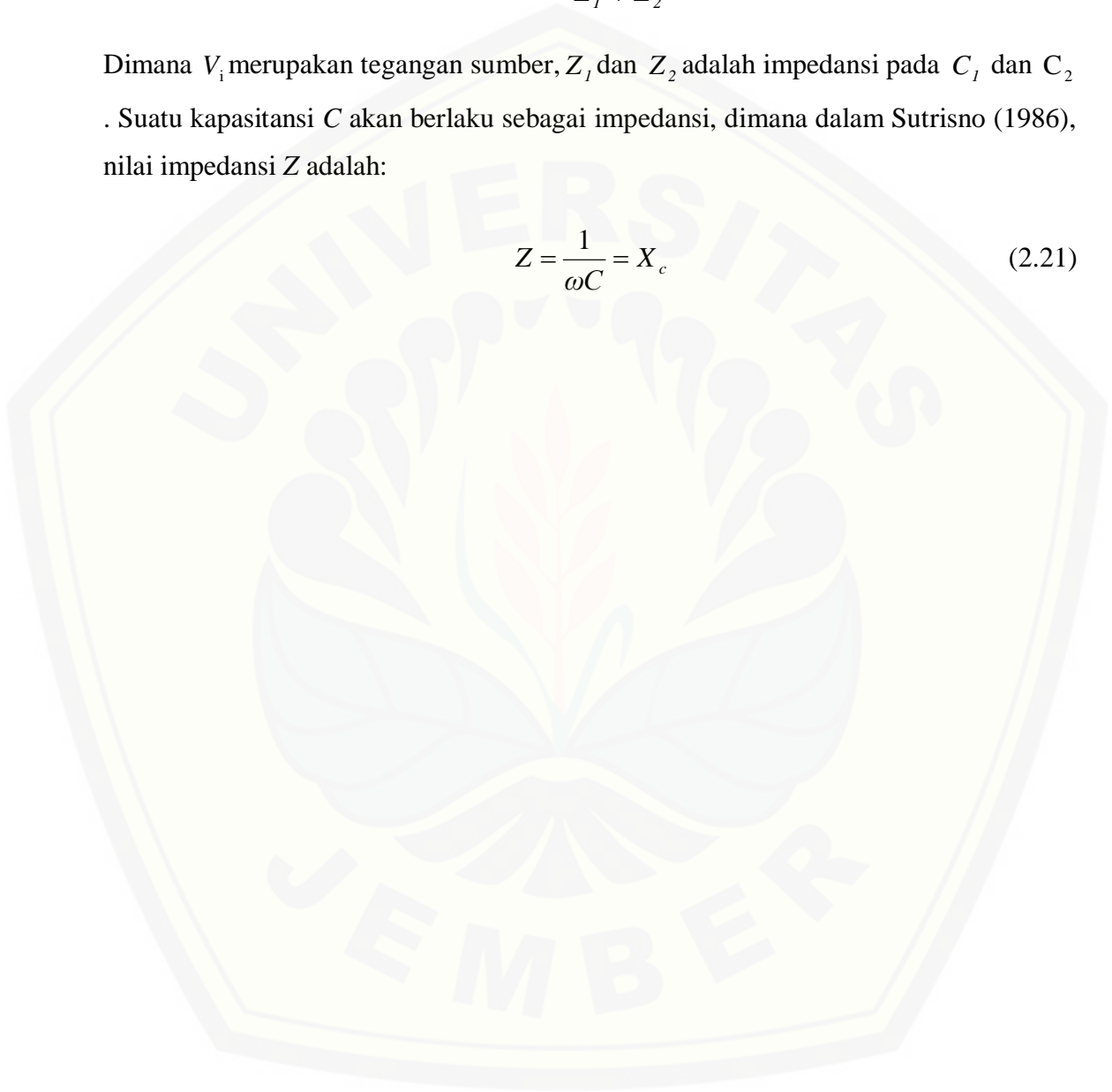
Gambar 2.10 Kapasitor seri dengan sumber tegangan ac (Sumber: Soltani *et al.*, 2010)

Pada gambar 2.10 merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari dua buah kapasitor yang disusun secara seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan AC. Menurut Soltani *et al.* (2010), jika dalam suatu rangkaian ac yang terdiri dari dua kapasitor yang dirangkai seri seperti pada gambar 2.10, maka besar tegangan yang terukur setelah melewati kapasitor adalah sebagai berikut:

$$V_o = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_i \quad (2.20)$$

Dimana V_i merupakan tegangan sumber, Z_1 dan Z_2 adalah impedansi pada C_1 dan C_2 . Suatu kapasitansi C akan berlaku sebagai impedansi, dimana dalam Sutrisno (1986), nilai impedansi Z adalah:

$$Z = \frac{1}{\omega C} = X_c \quad (2.21)$$



BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat penelitian

Penelitian dilakukan melalui dua tahap, yaitu pengukuran untuk menentukan nilai viskositas kinematik (ν) minyak transformator yang bertempat di Laboratorium Kimia Fisik Fakultas MIPA Universitas Jember, dan pengukuran untuk menentukan nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator bertempat di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi Fakultas MIPA Universitas Jember.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Februari 2016 sampai April 2016, dengan observasi awal yang dilakukan pada bulan Agustus 2015.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

A. Viskositas Kinematik

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian untuk penentuan nilai viskositas kinematik (ν) sebagai berikut:

- a. Gelas ukur
- b. Kaca arloji
- c. Neraca OHAUS Pioneer™
- d. Termometer
- e. Wadah alumunium
- f. Piknometer *Supe Marienfeld*
- g. Viskometer Oswald *SCHOTT 509 03*

- h. *Hot plate* HP-3000
- i. Stopwatch
- j. *Ball pipet*
- k. Statif

B. Konstanta Dielektrik

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian untuk penentuan nilai konstanta dielektrik (κ) adalah:

- a. PCB dengan lapisan tembaga berdimensi ($6,7 \times 4,5$) cm
- b. Wadah kaca berbentuk balok berdimensi ($6,7 \times 4,5 \times 0,8$) cm
- c. Kapasitor
- d. *Project board*
- e. Function generator *GW-Instek GPG-8216A*
- f. Osiloskop CRT-*Cathode Ray Tube*
- g. Kapasitansimeter CM8601⁺
- h. Termometer
- i. *Heater* (pemanas)
- j. Kabel penghubung

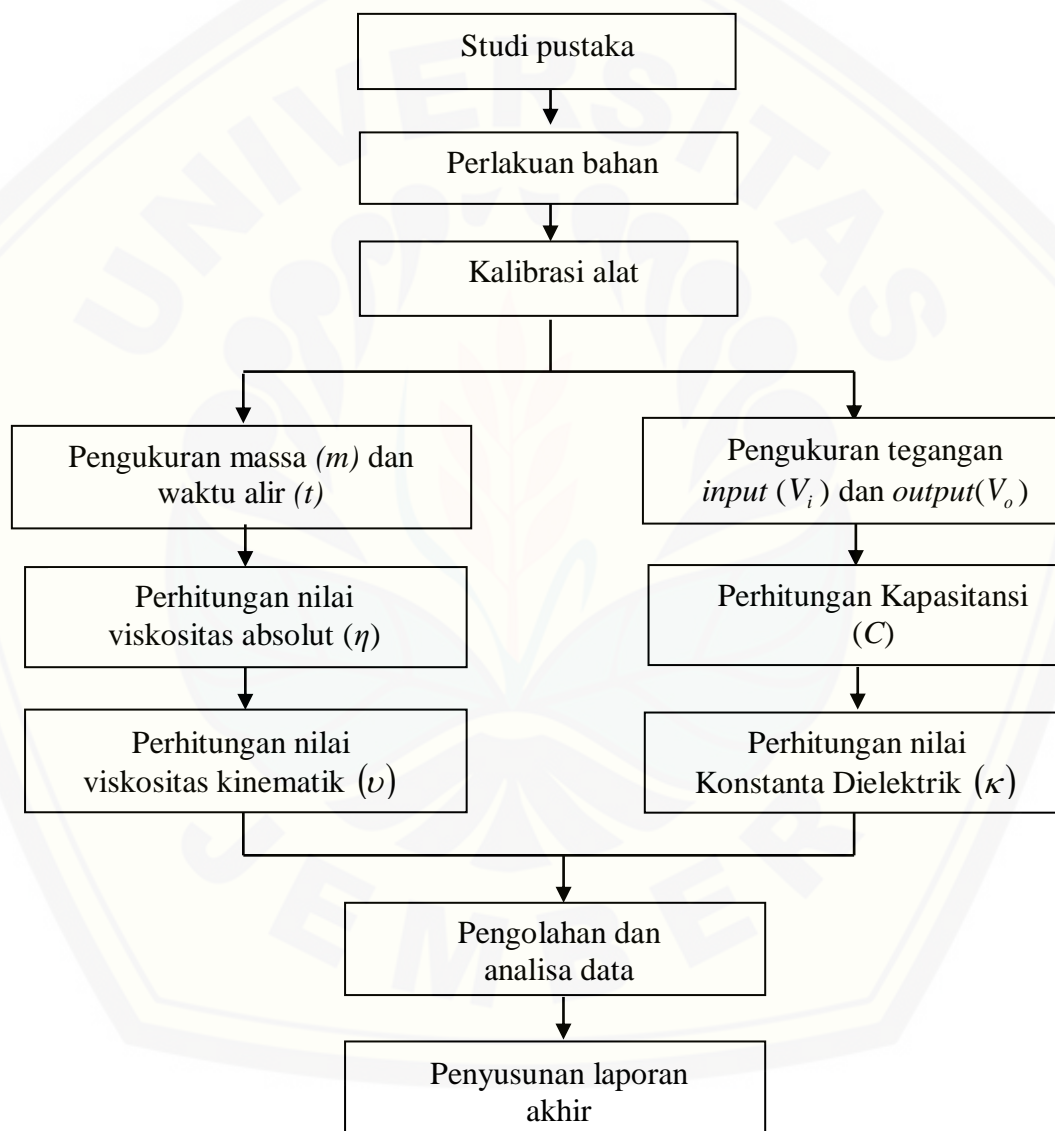
3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah minyak transformator yang berasal dari PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Jember dengan tiga variasi warna yang dibedakan berdasarkan tingkatan warna dalam standar ASTM D1500 yaitu minyak transformator warna A, B, dan C.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Diagram Alir Penelitian

Proses dalam penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan. Tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian ditunjukkan pada gambar diagram sebagai berikut:

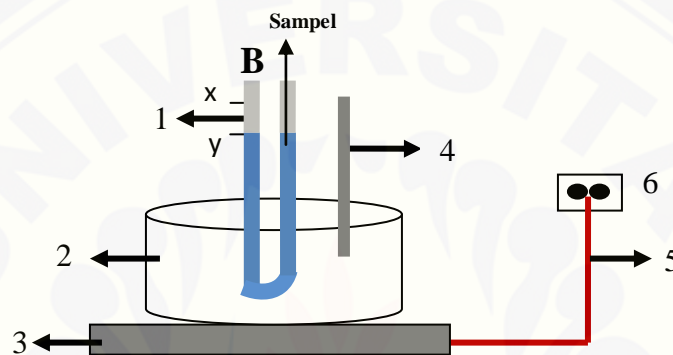


Gambar 3.1 Diagram alir kegiatan penelitian

3.3.2 Susunan Alat Penelitian

A. Penentuan Nilai Viskositas Kinematik

Berikut merupakan skema peralatan penelitian pengukuran waktu alir sampel penelitian untuk menentukan nilai viskositas absolut (η) yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai viskositas kinematik (ν)



Gambar 3.2 Skema susunan peralatan pengukuran waktu alir bahan

Keterangan:

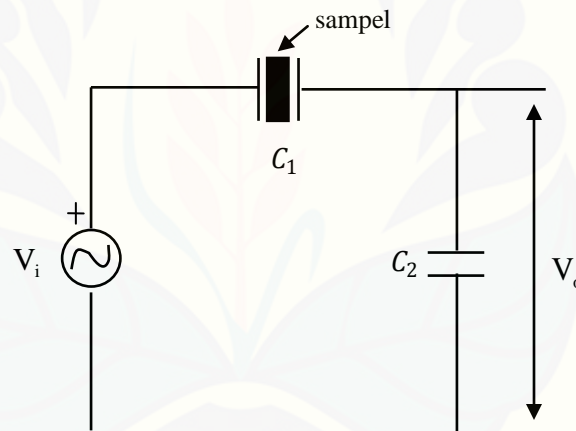
- 1 : Viskometer Ostwald berfungsi sebagai alat ukur waktu alir sampel
- 2 : Wadah berisi air berfungsi untuk merendam viskometer berisi sampel
- 3 : *Hot plate* berfungsi sebagai pemanas air dan sampel dalam viskometer
- 4 : Termometer berfungsi mengukur suhu sampel
- 5 : Kabel penghubung
- 6 : Sumber tegangan PLN

Gambar 3.2 merupakan skema peralatan penelitian pengukuran waktu alir bahan untuk penentuan nilai viskositas absolut (η) yang selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan viskositas kinematik (ν) bahan penelitian. Peralatan tersebut terdiri dari viskometer Ostwald berisi sampel yang akan diukur waktu alirnya. x dan y merupakan dua garis batas atas dan bawah sebagai lintasan yang akan dilalui sampel untuk kemudian diukur waktu alir bahan saat melewati batas atas x , dan berhenti pada

batas bawah y . Sebelum memulai pengukuran, harus dipastikan permukaan sampel pada tabung A dan B berada pada garis lurus yang sama. Setelah permukaan kedua sampel lurus, sampel dihisap dengan pipet hingga mencapai ± 1 cm di atas garis x , kemudian dilepas dan waktu alir dari x ke y diukur.

B. Penentuan Nilai Konstanta Dielektrik

Gambar 3.3 di bawah ini merupakan gambar rangkaian penelitian pengukuran kapaitansi yang terdiri dari dua kapasitor dirangkai secara seri dengan sumber tegangan ac. Kapasitor satu C_1 adalah kapasitor plat sejajar berisi sampel sebagai dielektriknya, sedangkan C_2 merupakan komponen kapasitor.



Gambar 3.3 Rangkaian penelitian untuk penentuan nilai kapasitansi

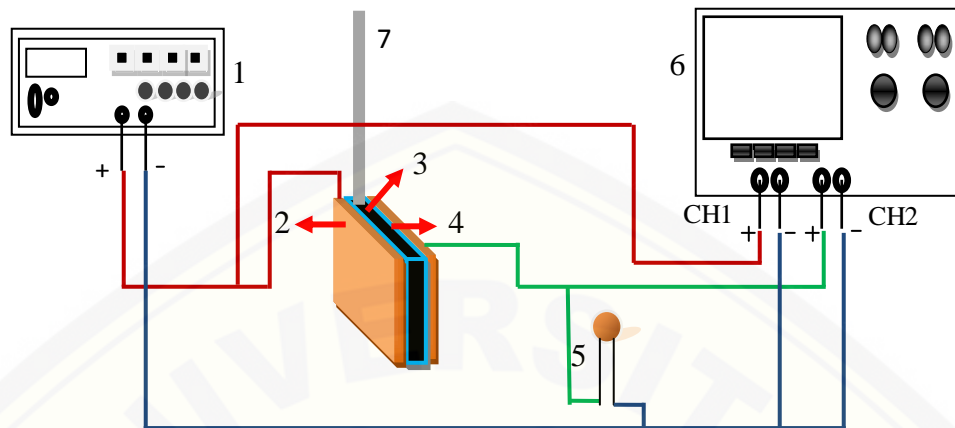
Keterangan:

V_i : Tegangan masukan

C_1 : Plat tembaga dengan sampel bahan penelitian

C_2 : Kapasitor

V_o : Tegangan keluaran



Gambar 3.4 Skema susunan peralatan penelitian untuk penentuan nilai kapasitansi

Gambar 3.4 merupakan realisasi susunan peralatan penelitian berdasarkan desain rangkaian pada gambar 3.3. Rangkaian tersebut digunakan sebagai rangkaian pengukuran tegangan *input* (V_i) dan *output* (V_o) untuk mendapatkan nilai kapasitansi (C) bahan. Keterangan dari bagian-bagian pada gambar susunan peralatan penelitian untuk penentuan nilai konstanta dielektrik (κ) adalah sebagai berikut:

- 1 : *Function generator* sebagai pengatur frekuensi sumber tegangan AC
- 2 : Plat tembaga dengan isolator berfungsi sebagai alat penyusun kapasitor plat sejajar (C_1)
- 3 : Sampel bahan penelitian sebagai bahan yang diukur nilai kapasitansinya
- 4 : Isolator
- 5 : Kapasitor (C_2) sebagai komponen pembagi tegangan *input*
- 6 : Osiloskop berfungsi sebagai *output* sinyal tegangan
- 7 : Termometer berfungsi untuk mengukur suhu sampel

Rangkaian pada gambar 3.4 terdiri dari kapasitor dua plat tembaga sejajar (C_1) dengan dielektrik berupa sampel, yang diseri dengan sebuah komponen kapasitor (C_2). Penentuan nilai komponen kapasitor yang digunakan bergantung pada nilai kapasitansi dua plat sejajar yang diperoleh dari pengukuran menggunakan

kapasitansimeter, dimana nilainya adalah mendekati nilai ukur kapasitansi dua plat sejajar pada saat kosong maupun terisi sampel, sehingga nilai C_2 mendekati C_1 .

3.3.3 Perlakuan Bahan

Penelitian ini menggunakan sampel bahan berupa minyak transformator yang digunakan oleh PT. PLN (Persero) Distribusi Jawa Timur Area Jember. Sampel yang digunakan terdiri dari tiga sampel minyak transformator dengan warna yang berbeda yaitu warna A, B dan C. Pada penelitian ini, dilakukan dua penentuan parameter yaitu viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ). Keseluruhan sampel minyak transformator warna A, B dan C dikondisikan sesuai dengan suhu yang telah ditentukan. Suhu yang digunakan dalam penelitian yaitu mulai dari suhu 20°C hingga 40°C dengan rentang perubahan 5°C . Suhu minimum yang dipilih yaitu menyesuaikan dengan suhu minimum referensi, dengan tujuan untuk memudahkan dalam mengidentifikasi antara sampel minyak transformator warna A, B dan C. Selanjutnya, perubahan suhu pengukuran sampel dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik viskositas kinematik (ν) maupun konstanta dielektrik (κ) minyak transformator pada setiap tahapan kenaikan suhu 5°C .

Perlakuan bahan yang pertama untuk penentuan nilai viskositas kinematik (ν). Pengamatan suhu sampel seluruhnya dilakukan menggunakan termometer. Sampel dimasukkan ke dalam viskometer kemudian viskometer diletakkan dalam wadah berisi air. Mula-mula air didinginkan hingga mencapai suhu 20°C , selanjutnya suhu dinaikkan secara bertahap dengan kenaikan 5°C dengan pengaturan tombol pada *hot plate* (pemanas). Sampel kemudian dipanaskan bersama-sama hingga suhu air sesuai dengan suhu yang diinginkan. Sebelum pengambilan data, sampel dalam viskometer dibiarkan dalam air yang telah mencapai suhu pengukuran selama 15-20 menit, hal ini dilakukan agar sampel bahan benar-benar berada pada suhu yang diinginkan. Dengan menggunakan *hot plate*, suhu sampel lebih mudah dikondisikan tetap konstan.

Pada penentuan nilai konstanta dielektrik, sampel bahan diberi perlakuan frekuensi tegangan pada setiap perubahan suhu. Pengukuran sampel bahan dilakukan dalam wadah plat sejajar berjarak 0,8 cm dan berdimensi (6,7 x 4,5) cm. Untuk perlakuan suhu, pemanasan sampel bahan dilakukan dengan menggunakan *heater* (pemanas). Suhu sampel bahan dapat langsung diukur menggunakan termometer. Pengukuran pada suhu 20°C dan 25°C mula-mula sampel bahan didinginkan mencapai suhu 18°C dan 23°C, kemudian sampel dituangkan dalam plat sejajar yang telah disiapkan sebelumnya. Pengukuran dilakukan secepat mungkin saat suhu sampel yang terukur masih berada sekitar 2°C di bawah suhu pengukuran yang telah ditentukan. Selanjutnya, untuk pengukuran pada suhu di atas 25°C, sampel yang telah dipanaskan dituangkan dalam plat sejajar yang telah disiapkan sebelumnya dan pengukuran dilakukan dengan secepat mungkin pada saat suhu masih berada sekitar 2°C di atas suhu pengukuran yang telah ditentukan. Dalam hal ini, sebelumnya telah dilakukan percobaan untuk mengukur perubahan waktu terhadap penurunan suhu. Percobaan dilakukan terhadap sampel bahan yang akan diuji, yaitu sampel bahan dipanaskan hingga mencapai suhu 42°C dan diturunkan sampai suhu 30°C, kemudian waktu yang dibutuhkan tiap penurunan 1°C dicatat. Kemudian, sampel didinginkan hingga mencapai 18°C dan setiap kenaikan 1°C sampai suhu 25°C dicatat. Berdasarkan hasil percobaan tersebut dapat diketahui waktu yang dibutuhkan tiap pengukuran sebelum suhu sampel bahan terus menurun. Perlakuan sampel selanjutnya yaitu dengan memberikan pengaruh frekuensi sumber tegangan untuk setiap perubahan suhu. Sampel di antara dua plat sejajar diberi tegangan AC dengan frekuensi yang telah ditentukan. Pengukuran untuk setiap perubahan frekuensi pada setiap perubahan suhu dilakukan secepat mungkin dengan pengulangan pengukuran tiga kali. Frekuensi yang digunakan yaitu mulai dari 50 kHz-950 kHz, dimana interval untuk masing-masing perubahan adalah 100 kHz. Frekuensi yang digunakan dalam penelitian berdasarkan pada frekuensi yang digunakan oleh Darvos, *et al* (2005) pada penelitiannya yang menggunakan frekuensi $\leq 1\text{MHz}$ untuk pengukuran konstanta dielektrik minyak transformator.

3.3.4 Kalibrasi Alat

Peralatan yang akan digunakan dalam penelitian terlebih dahulu harus dikalibrasi untuk mendapatkan kelayakan fungsi alat dengan membandingkan dua nilai data yang didapatkan dari hasil pengukuran dengan nilai referensi. Dari kalibrasi tersebut akan didapatkan selisih antara nilai hasil pengukuran dengan nilai referensi. Selisih antara kedua nilai tersebut akan dijadikan sebagai koreksi nilai pengukuran. Selanjutnya, nilai koreksi yang didapatkan diterapkan untuk hasil nilai pengukuran setiap sampel bahan penelitian.

Kalibrasi awal dilakukan untuk peralatan penelitian viskositas absolut (η), yang selanjutnya digunakan untuk penentuan viskositas kinematik (ν). Bahan kalibrator yang digunakan yaitu aquades. Nilai viskositas kinematik (ν) aquades pada suhu 30°C menurut referensi yaitu 0,8 cSt (Venard dan Street, 1975). Nilai tersebut diperoleh dengan perhitungan persamaan 2.3. Massa aquades terlebih dahulu diukur menggunakan alat piknometer, dimana massa tersebut dihitung berdasarkan selisih antara massa piknometer saat berisi aquades dengan massa piknometer kosong, sehingga menghasilkan nilai rapat jenis (ρ).

Kalibrasi selanjutnya dilakukan pada peralatan penentuan nilai konstanta dielektrik (κ). Kalibrasi juga dilakukan dengan menggunakan aquades. Kalibrasi terlebih dahulu dilakukan dengan menentukan nilai kapasitansi udara (saat plat sejajar kosong) dan kemudian nilai kapasitansi plat sejajar berisi aquades. Nilai konstanta dielektrik tersebut didapatkan dengan membandingkan kapasitansi dua plat sejajar kosong dengan kapasitansi dua plat sejajar diisi aquades. Hasil pengukuran yang didapatkan dibandingkan dengan nilai konstanta dielektrik aquades pada suhu ruang berdasarkan referensi yaitu 78.

3.4 Tahap Pengambilan Data

3.4.1 Penentuan Viskositas Kinematik (ν)

Penentuan nilai viskositas kinematik (ν) untuk semua sampel bahan dilakukan dengan terlebih dahulu menghitung nilai viskositas absolut (η) sampel bahan. Viskositas absolut (η) diperoleh dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan 2.16 dari hasil pengukuran waktu alir sampel bahan menggunakan viskometer Ostwald dan rapat jenis (ρ) sampel. Rapat jenis sampel (ρ) dihitung dengan persamaan 2.17, dimana massa sampel bahan diukur dengan menggunakan piknometer yang besarnya dihitung berdasarkan selisih antara massa piknometer berisi sampel dengan massa piknometer kosong. Waktu alir dan massa yang diukur untuk setiap sampel bahan merupakan waktu alir dan massa untuk setiap kenaikan suhu, yaitu suhu 20°C sampai 40°C dengan interval 5°C. Dari data pengukuran maupun perhitungan yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung nilai viskositas kinematik (ν) dengan perbandingan nilai viskositas absolut (η) sampel terhadap rapat jenis (ρ) sampel seperti pada persamaan 2.3. Dalam penelitian ini, dilakukan pengambilan data dengan pengulangan lima kali untuk setiap perubahan suhu.

3.4.2 Penentuan Konstanta Dielektrik (κ)

Penentuan nilai konstanta dielektrik (κ) untuk setiap sampel bahan penelitian dilakukan dengan menggunakan rangkaian peralatan seperti pada gambar 3.3. Pengukuran dimulai dengan mengukur tegangan *input* (V_i) dan tegangan *output* (V_o) menggunakan osiloskop. Sebelum pengukuran sampel bahan, terlebih dahulu pengukuran dilakukan untuk plat sejajar kosong, kemudian dilanjutkan sampel bahan penelitian. Tegangan *input* (V_i) dan tegangan *output* (V_o) yang diukur untuk setiap sampel penelitian merupakan tegangan *input* (V_i) dan tegangan *output* (V_o) untuk setiap perubahan frekuensi dari frekuensi 50 kHz sampai 950 kHz dengan interval 100 kHz pada setiap perubahan suhu sampel dari 20°C sampai 40°C dengan interval

5°C. Nilai konstanta dielektrik diperoleh dengan melakukan perhitungan kapasitansi (C) yaitu dari hasil pengukuran tegangan *input* (V_i) dan tegangan *output* (V_o) plat sejajar kosong maupun berisi sampel bahan penelitian dengan menggunakan persamaan hasil penurunan dari persamaan 2.20:

$$C_{1_{udara}} / C_{1_{sampel}} = \frac{C_2}{\left(\frac{V_i}{V_o} - 1\right)} \quad (3.1)$$

dimana, C_1 merupakan kapasitansi plat sejajar kosing maupun dengan sampel bahan, dan C_2 adalah nilai komponen kapasitor yang digunakan dalam rangkaian. Hasil dari nilai kapasitansi (C) digunakan untuk perhitungan nilai konstanta dielektrik dari sampel bahan dengan menggunakan persamaan 2.13.

3.5 Analisis Data

Setelah diperoleh nilai hasil dari perhitungan berdasarkan data pengukuran, selanjutnya akan dilakukan analisis data pada nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ).

3.5.1 Analisis Data Viskositas Kinematik (ν)

Nilai viskositas kinematik (ν) diperoleh melalui pengukuran langsung maupun tidak langsung, Data yang diperoleh dari penentuan nilai viskositas kinematik (ν) berupa viskositas absolut (η) dan rapat jenis (ρ) dari sampel bahan penelitian. Nilai viskositas kinematik (ν) diperoleh berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (2.3). Selanjutnya dilakukan perhitungan standar deviasi sebagai berikut:

$$\Delta \nu = \sqrt{\left(\frac{\partial \nu}{\partial t_s}\right)^2 (\Delta t_s)^2 + \left(\frac{\partial \nu}{\partial t_a}\right)^2 (\Delta t_a)^2} \quad (3.2)$$

dimana, nilai dari Δt_a diperoleh dengan perhitungan:

$$\Delta t_a = \sqrt{\frac{\sum_i^N (t_{a_i} - \bar{t}_a)^2}{N(N-1)}} \quad (3.3)$$

dan nilai Δt_s diperoleh dengan perhitungan:

$$\Delta t_s = \sqrt{\frac{\sum_i^N (t_{s_i} - \bar{t}_s)^2}{N(N-1)}} \quad (3.4)$$

Adapun keterangan dari persamaan (3.3) maupun (3.4) sebagai berikut:

t_{a_i} : waktu alir aquades ke-i

t_{s_i} : waktu alir sampel ke-i

\bar{t}_a : rata-rata waktu alir aquades

\bar{t}_s : rata-rata waktu alir sampel

Δt_a : standart deviasi waktu alir aquades pengukuran langsung

Δt_s : standart deviasi waktu alir sampel pengukuran langsung

$\Delta \nu$: standart deviasi viskositas kinematik

3.5.2 Analisis Data Konstanta Dielektrik (κ)

Data perhitungan konstanta dielektrik dianalisis menggunakan analisis regresi dengan *software* SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) versi 22. Dalam Supardi (2011), analisis regresi digunakan untuk mengetahui hubungan antara variabel terikat (*dependent variable*) dengan satu atau lebih variabel bebas (*independent variable*). Dalam penelitian ini, digunakan analisis regresi linier hubungan antara konstanta dielektrik (κ) dengan frekuensi pada setiap perubahan suhu. Adapun variabel penelitiannya adalah konstanta dielektrik (κ) sebagai variabel terikat (*dependent variable*), frekuensi sebagai variabel bebas (*independent variable*). Dari analisis tersebut akan menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2), selanjutnya

dilakukan uji signifikansi terhadap hubungan antara variabel terikat konstanta dielektrik (κ) dengan variabel bebas frekuensi. Hipotesis nol (H_0) yang ditentukan adalah bahwa nilai dari variabel bebas tidak mempengaruhi nilai variabel terikat secara signifikan. Sedangkan hipotesis alternatif (H_1) menentukan adanya pengaruh yang signifikan dari variabel bebas terhadap nilai variabel terikat. Apabila nilai dari uji signifikansi menunjukkan $P (sig) < 0,05$ maka (H_0) ditolak. Hal ini berarti hipotesis alternatif (H_1) diterima yaitu adanya signifikansi pengaruh variabel bebas terhadap nilai variabel terikat. Jika uji signifikansi menunjukkan nilai $P (sig) > 0,05$, maka (H_0) diterima dan (H_1) ditolak.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan mengenai investigasi viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) minyak transformator diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Viskositas kinematik (ν) dari tiga sampel minyak transformator warna A, B dan C terpengaruh oleh suhu, yaitu menurun dengan naiknya suhu. Nilai viskositas kinematik (ν) minyak transformator warna A dan B pada suhu 20°C memenuhi standar nilai SPLN yaitu $(14,062 \pm 0,032) \text{ cSt}$ dan $(16,301 \pm 0,031) \text{ cSt}$. Kemudian, minyak transformator warna C telah melebihi nilai standar yaitu $(31,441 \pm 0,063) \text{ cSt}$.
2. Kenaikan frekuensi tegangan sumber pada rentang frekuensi 50 kHz-150 kHz menyebabkan kenaikan nilai konstanta dielektrik (κ) hanya pada rentang frekuensi 50 kHz-150 kHz, sedangkan pada rentang frekuensi 150 kHz-950 kHz, kenaikan frekuensi tidak memberikan perubahan terhadap nilai konstanta dielektrik (κ). Minyak transformator dengan warna A, dan B memiliki nilai konstanta dielektrik (κ) pada kisaran nilai minyak transformator pakai. Kemudian, minyak transformator warna C memiliki nilai konstanta dielektrik (κ) melebihi kisaran nilai konstanta dielektrik (κ) pakai.
3. Besarnya nilai viskositas kinematik (ν) menyebabkan besarnya nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator warna A, B dan C. Perubahan nilai viskositas kinematik (ν) antara minyak transformator satu dengan lainnya dengan tingkatan skala warna yang berbeda lebih besar dibandingkan dengan perubahan nilai konstanta dielektrik (κ) minyak transformator satu dengan yang lainnya.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penyempurnaan penelitian lebih lanjut perlu dilakukan penelitian berdasarkan parameter kimia, dengan tujuan untuk mengetahui kandungan kimia dari masing-masing sampel minyak transformator. Penelitian juga perlu dilakukan untuk minyak transformator dengan warna yang lebih beragam, sehingga didapatkan informasi mengenai karakteristik minyak transformator yang lebih beragam.



DAFTAR PUSTAKA

Buku

- Alberty R. A. dan Silbey, R. J. 1955. *Physical Chemistry: First edition*. John Wiley & Sons, Inc: New York.
- Atkin, P. 2006. *Physical Chemistry eight edition*. Oxford : oxford university press.
- Beiser, A. 1962. *The Mainstream of Physics*. United State of America: Addison-Wesley Publishing Company.
- Bird, T. 1987. *Kimia Fisik Untuk Universitas*. Cetakan Pertama. Jakarta: Gramedia Pustaka.
- Chang, R. 1981. *Physical Chemistry with Applications to Biological Systems*. Macmillan Publishing Co., Inc: New York.
- Effendy. 2006. *Teori VSEPR, Kepolaran dan Gaya Antar Molekul Edisi 2*. Malang. Jurusan Kimia FMIPA UM.
- Giancoli, D. C. 2001. *Fisika Edisi Kelima Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Halliday, D. dan Resnick, R. 1997. *Fisika Edisi Ketiga Jilid 2*. Terjemahan Oleh Pantur Silaban dan Erwin Sucipto. 1997. Jakarta: Erlangga.
- Hayt, W. H. dan Buck, J. A. 2006. *Elektromagnetika Edisi Ketujuh*. Jakarta: Erlangga.
- Heathcote, M. J. 2007. *The J & P Transformer Book*. Elsevier Ltd.
- Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., dan Qureshi, M.I. 1998. *Electrical Insulation in Power Systems*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Pain, H. J. 2005. *The Physicc of Vibration and Wave Sixth Edition*. England: John Wiley & Sons.
- PLN P3B. 2003. *Panduan Pemeliharaan Trafo Tenaga*. Jakarta: PT PLN.

- Rijono, Y. 1997. *Dasar Teknik Tenaga Listrik Edisi Revisi*. Yogyakarta: ANDI.
- Riswiyanto. 2009. *Kimia Organik*. Jakarta: Erlangga.
- Serway, R. A. dan Jewett, J. W. 2010. *Fisika untuk Sains dan Teknik Edisi Enam*. Jakarta: Selemba Teknika.
- SPLN 49-1. 1982. *Pedoman Penerapan Spesifikasi dan Pemeliharaan Minyak Isolasi*. PULN.
- Sutrisno. 1986. *Fisika Dasar*. Bandung: ITB.
- Tipler, P. A. 1991. *Fisika Untuk Sains Dan Teknik Edisi Ketiga Jilid 2*. Alih Bahasa Oleh Bambang Soegijono. 2001. Jakarta: Erlangga.
- Tobing, D.L. 1996. *Fisika Dasar 1*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Venard, K.L. dan Strect, R.L.1975. *Elementary Fluid Mechanics Fifth Eddition*. New York: Wiley.
- Winders, J. J. 2002, *Power Transformers Principles and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Wylie. E. B. 1992. *Mekanika Fluida*. Erlangga. Jakarta.
- Young, H. D. dan Freedman, R. A. 2001. *Fisika Universitas Edisi Kesepuluh Jilid 2*. Jakarta : Erlangga.
- Young, H. D. 1992. *University Physics Eight Edition*. USA: Addison-Wesley Publishing Company.
- Zuhal. 1995. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka.

Jurnal

- Bandri, S. 2015. "Karakteristik Listrik dan Kimia Minyak Transformator dengan Berbagai Tingkat Warna Pada Kondisi Tropis". *Jurnal*, 5 (1): 56-60.
- Bartley, W. H. 2003. "Analysis of Transformer Failures". *Jurnal*. Stockholm: International Association of Engineering Insurers.

- Darvos, T. C., Paraskevas, C. D., Skafidas, P. D., dan Vassiliou, P. 2005. "A Complex Permittivity Based Sensor for the Electrical Characterization of High-Voltage Transformer Oils". Diterbitkan. *Jurnal*, 5: 302-316.
- Herviany, S., Yuningtyastuti., dan Syakur, A. 2015. "Analisis Perbandingan Karakteristik Dielektrik pada Minyak Bekas Transformator 20 kV Sebelum dan Setelah Purifikasi dengan Adsorben". Diterbitkan. *Jurnal*. 4 (3).
- Kell, G. S. 1975. "Density, Thermal Expansivity, and Compressibility of Liquid Water from 0 to 150 °C". Diterbitkan. *Jurnal*. 20 (1).
- Rajab, A. 2007. "Evaluasi Sifat Listrik Minyak Kelapa Sawit RBDPO Olein sebagai Kandidat Minyak Isolasi Transformator Ramah Lingkungan". *Jurnal*. 1 (28).
- Soltani, M., Alimardani, R., dan Omid, M. 2010. "Prediction Of Banana Quality During Ripening Stage Using Capacitance Sensing System". *Jurnal*. Iran: Universitas Tehran.
- Tanteh, D.N., Al-Liddawi, S.Y., dan Sekasiko, D. 2014. "Properties of Transformer Oil than Affect Efficiency". Swedia: Institut Teknologi Blekinge.
- Turabi, Regier, Sumnu, Sahin, dan Rother. 2010. "Dielectric and Thermal Properties of Rice Cake Formulations Containing Different Gum Types". *Int J Food Properties. Jurnal*, 13: 1199-1206.

Tesis

- Haidir, M. 2011. "The Effect of Thermal on Electrical Properties of Refined, Bleached and Deodorized Palm Oil as Electrical Insulating Material". Tesis. Universitas Teknologi Malaysia.
- Yuliasuti, E. 2010. "Analysis of Dielectric Properties Comparison Between Mineral Oil and Synthetic Ester Oil". Tesis. Universitas Teknologi Delft.
- Solikhudin, M. 2010. "Studi Gangguan Interbus Transformator (IBT-1) 500/150 kV di GITET 500 kV Kembangan-Jakarta Barat". Tesis. Depok: Universitas Indonesia.

Skripsi

- Arifianto, A. D. 2011. "Analisis Kegagalan Transformator Di PT Asahimas Chemical Banten Berdasarkan Hasil Uji DGA Dengan Metode *Roger's Ratio*". Tidak Diterbitkan. Skripsi. Malang: Universitas Brawijaya.

- Martono, A. 2013. “Analisis Karakteristik Dielektrik Minyak Hidrolik Sebagai Alternatif Isolasi Cair untuk Transformator Daya”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Sinuhaji, Y. P. 2012. “Analisis Keadaan Minyak Isolasi Transformator Daya 150 kV Menggunakan Metode Dissolved Gas Analysis(DGA) Dan Fuzzy Logic pada Gardu Induk Wilayah Sidoarjo”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Jember: Universitas Jember.
- Torryselly, P. O. 2008. “Analisa Efek *Secendory Flow* Pada Pipa Bulat dan Kontak”. Skripsi. Depok: UI.
- Wibowo, W. K. 2008. “Analisis Karakteristik *Breakdown Voltage* Pada Dielektrik Minyak *Shell Diala B* Pada Suhu 30°C-130°C”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Semarang. Universitas Diponegoro.
- Zen, B. 2011. “Analisis Kondisi Hasil Pengukuran IBT 1 500/150 kV dalam Keadaan Padam Pada GITET Gandul”. Tidak Diterbitkan. Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.

Internet

- Kytola Instrument OY. 2015. Application Note-Oil Color. [serial online]. http://www.aea-technique.pl/common/files_download.php?fid=570. [13 November 2015].
- Dzulfikar, A. 2013. [Maintenance transformator dan panel cubicle](http://www.pt-ajs.com/2013/07/test-laboratorium-oli-trafo-dga-dan-7.html). [serial online]. <http://www.pt-ajs.com/2013/07/test-laboratorium-oli-trafo-dga-dan-7.html>. [21 Mei 2016].



LAMPIRAN

Lampiran A. Nilai Viskositas Kinematik (ν) untuk Bahan Kalibrasi dan Sampel Bahan Penelitian

A.1 Perhitungan Nilai Viskositas Kinematik (ν) Aquades

Tabel A.1 Nilai kalibrasi viskositas kinematik (ν) aquades

$t_{aquades}$ (s)	$\bar{t}_{aquades}$ (s)	$\bar{\rho}_{aquades}$ (g / cm ³)	$\rho_{referensi}$ (g / cm ³)	$\eta_{aquades}$ (kg / ms)	$\nu_{aquades}$ (mm ² / s)	$\nu_{referensi}$ (mm ² / s)	Koreksi	$\Delta \nu$	K%
5,34									
5,32									
5,33	5,35	0,987	0,996	0,791 x 10 ⁻³	0,801	0,800	0,002	0,001	99,999
5,42									
5,35									

A.2 Perhitungan Nilai Viskositas Kinematik (ν) untuk Sampel Minyak Transformator Warna A

Tabel A.2 Nilai viskositas kinematik sampel minyak transformator warna A

Suhu °C	ρ_{sampel} (g / cm ³)	$\bar{\rho}_{sampel}$ (g / cm ³)	$\rho_{referensi}$ (g / cm ³)	$\eta_{referensi}$ (kg / ms)	$t_{referensi}$ (s)	t_{sampel} (s)	η_{sampel} (kg / ms)	ν_{sampel} (mm ² / s)	$\Delta \nu$	K%
20	0,831 0,832	0,832	0,998	1,002 x 10 ⁻³	5,51 5,54	76,59 77,03	1,169 x 10 ⁻²	14,062	0,032	99,773

	0,831				5,56	77,01				
	0,832				5,55	76,59				
	0,831				5,51	77,00				
	0,829				5,41	76,58				
	0,829				5,48	76,48				
25	0,829	0,829	0,997	$0,890 \times 10^{-3}$	5,39	76,50	$1,044 \times 10^{-2}$	12,602	0,066	99,475
	0,829				5,36	76,53				
	0,828				5,49	76,52				
	0,826				5,34	66,45				
	0,827				5,32	67,00				
30	0,825	0,826	0,996	$0,798 \times 10^{-3}$	5,33	65,12	$1,033 \times 10^{-2}$	12,517	0,084	99,330
	0,827				5,42	66,24				
	0,826				5,35	65,12				
	0,824				4,16	65,00				
	0,825				4,22	64,57				
35	0,824	0,824	0,994	$0,720 \times 10^{-3}$	4,17	65,04	$0,930 \times 10^{-2}$	11,282	0,067	99,404
	0,824				4,15	65,10				
	0,825				4,12	64,58				
	0,822				4,01	64,27				
	0,822				4,06	64,30				
40	0,822	0,822	0,992	$0,653 \times 10^{-3}$	4,04	63,58	$0,858 \times 10^{-2}$	10,449	0,058	99,444
	0,823				4,05	63,59				
	0,822				4,01	64,23				

A.3 Perhitungan Nilai Viskositas Kinematik (ν) untuk Sampel Minyak Transformator Warna B

Tabel A.3 Nilai viskositas kinematik (ν) sampel minyak transformator warna B

Suhu °C	ρ_{sampel} (g/cm ³)	$\bar{\rho}_{sampel}$ (g/cm ³)	$\rho_{referensi}$ (g/cm ³)	$\eta_{referensi}$ (kg/ms)	$t_{aquades}$ (s)	t_{sampel} (s)	η_{sampel} (kg/ms)	ν_{sampel} (mm ² /s)	$\Delta\nu$	K %
20	0,886	0,886	0,998	$1,002 \times 10^{-3}$	5,51	89,17	$1,443 \times 10^{-2}$	16,301	0,031	99,813
	0,885				5,54	89,12				
	0,886				5,56	89,20				
	0,885				5,55	89,01				
	0,886				5,51	89,10				
25	0,884	0,884	0,997	$0,890 \times 10^{-3}$	5,41	88,52	$1,289 \times 10^{-2}$	14,586	0,032	99,784
	0,884				5,48	88,56				
	0,884				5,39	88,49				
	0,884				5,36	88,53				
	0,884				5,49	88,50				
30	0,877	0,878	0,996	$0,798 \times 10^{-3}$	5,34	88,28	$1,161 \times 10^{-2}$	13,238	0,061	99,541
	0,877				5,32	88,29				
	0,879				5,33	88,31				
	0,878				5,42	87,56				
	0,877				5,35	88,21				
35	0,872	0,871	0,994	$0,720 \times 10^{-3}$	4,16	75,50	$1,148 \times 10^{-2}$	13,177	0,098	99,985
	0,871				4,22	75,15				

	0,871	0,871			4,17	75,21				
	0,871				4,15	76,11				
	0,871				4,12	76,59				
	0,868				4,01	69,42				
	0,865				4,06	70,01				
40	0,867	0,866	0,992	$0,653 \times 10^{-3}$	4,04	69,34	$1,087 \times 10^{-2}$	12,550	0,064	99,492
	0,867				4,05	69,54				
	0,866				4,01	70,33				

A.4 Perhitungan Nilai Viskositas Kinematik (ν) untuk Sampel Minyak Transformator Warna C

Tabel A.4 Nilai viskositas kinematik (ν) sampel minyak transformator warna C

Suhu °C	ρ_{sampel} (g/cm ³)	$\bar{\rho}_{sampel}$ (g/cm ³)	$\rho_{referensi}$ (g/cm ³)	$\eta_{referensi}$ (kg/ms)	$t_{aquades}$ (s)	t_{sampel} (s)	η_{sampel} (kg/ms)	ν_{sampel} (mm ² /s)	$\Delta \nu$	K %
	1,507				5,51	172,11				
	1,507				5,54	172,01				
20	1,507	1,507	0,998	$1,002 \times 10^{-3}$	5,56	171,45	$4,738 \times 10^{-2}$	31,441	0,063	99,801
	1,506				5,55	172,21				
	1,507				5,51	172,06				
	1,507				5,41	186,16				
25	1,507	1,507	0,997	$0,890 \times 10^{-3}$	5,48	186,20	$4,621 \times 10^{-2}$	30,668	0,161	99,476
	1,507				5,39	186,18				
	1,507				5,36	186,21				

	1,506				5,49	186,33				
	1,506				5,34	198,56				
	1,506				5,32	198,49				
30	1,506	1,505	0,996	$0,798 \times 10^{-3}$	5,33	198,21	$4,488 \times 10^{-2}$	29,812	0,127	99,573
	1,505				5,42	198,34				
	1,504				5,35	199,24				
	1,504				4,16	167,23				
	1,504				4,22	168,01				
35	1,504	1,504	0,994	$0,720 \times 10^{-3}$	4,17	168,56	$4,388 \times 10^{-2}$	29,173	0,169	99,421
	1,504				4,15	167,34				
	1,504				4,12	167,41				
	1,502				4,01	179,50				
	1,503				4,06	179,34				
40	1,503	1,503	0,992	$0,653 \times 10^{-3}$	4,04	178,47	$4,383 \times 10^{-2}$	29,168	0,131	99,551
	1,503				4,05	178,11				
	1,503				4,01	178,55				

Lampiran B. Kalibrasi Alat Penentuan Nilai Konstanta Dielektrik (κ)

Tabel B. Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Aquades

Frekuensi ($\times 10^3$ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C ukur udara (pF)	κ	Koreksi	$\bar{\kappa}$
50	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	29,87	0,38	77,58	0,42	$77,58 \pm 1,55$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	29,87	0,38	77,58	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	29,87	0,38	77,58	0,42	
150	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	$71,58 \pm 1,43$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	

		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	
250	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	$71,58 \pm 1,43$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	27,64	0,38	71,78	0,42	
350	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	$66,28 \pm 1,33$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	
450	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	$66,28 \pm 1,33$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	25,52	0,38	66,28	0,42	
550	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	$61,05 \pm 1,22$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	
650	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	$61,05 \pm 1,22$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	23,51	0,38	61,05	0,42	
750	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	$56,08 \pm 1,12$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	
850	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	$56,08 \pm 1,12$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	
950	55,8	56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	$56,08 \pm 1,12$
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	
		56	$23 \pm 0,46$	$6,4 \pm 0,13$	21,59	0,38	56,08	0,42	

Lampiran C. Perhitungan Konstanta Dielektrik (κ) untuk Sampel Bahan Penelitian

C.1 Perhitungan Nilai Konstanta Dielektrik (κ) untuk Sampel Minyak Transformator Warna A

Tabel C.1.1 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Suhu 20°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C hitung (pF)	C udara (pF)	Koreksi	κ	$\bar{\kappa}$
50	13,4	13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	2,23 ± 0,04
		13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	
		13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	
150	13,4	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
250	13,4	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
350	13,4	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
450	13,4	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
550	13,4	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	

		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
650	13,4	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
750	13,4	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
850	13,4	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
950	13,4	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	

Tabel C.1.2 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Pada Suhu 25°C

Frekuensi ($\times 10^3$ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C hitung (pF)	C udara (pF)	Koreksi	κ	$\bar{\kappa}$
50	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,49	0,27	0,42	2,23	$2,23 \pm 0,04$
		13	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,49	0,27	0,42	2,23	
		13	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,49	0,27	0,42	2,23	
150	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
250	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	

350	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
450	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
550	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
650	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
750	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
850	13,4	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
950	13,1	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	

Tabel C.1.3 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Pada Suhu 30°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C hitung (pF)	C udara (pF)	Koreksi	κ	$\bar{\kappa}$
50	13	13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	2,23 ± 0,04
		13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	
		13	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,49	0,27	0,42	2,23	
150	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
250	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
350	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
450	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
550	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
650	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	
750	13	13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	2,28 ± 0,05
		13	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,75	0,40	0,42	2,28	

		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
850	13	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
950	13	13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	
		13	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,75	0,40	0,42	2,28	

Tabel C.1.4 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Pada Suhu 35°C

Frekuensi ($\times 10^3$ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C hitung (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	12,4	12	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,45	0,25	0,42	2,21	$2,21 \pm 0,04$
		12	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,45	0,25	0,42	2,21	
		12	$22 \pm 0,44$	$0,8 \pm 0,02$	0,45	0,25	0,42	2,21	
150	12,4	12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	$2,22 \pm 0,04$
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
250	12,4	12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	$2,22 \pm 0,04$
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
350	12,4	12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	$2,22 \pm 0,04$
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	
450	12,4	12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	$2,22 \pm 0,04$
		12	$22 \pm 0,44$	$1,2 \pm 0,02$	0,69	0,38	0,42	2,22	

550	12,4	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
650	12,4	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
750	12,4	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
850	12,4	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
950	12,4	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	

Tabel C.1.5 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Pada Suhu 40°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C hitung (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	12,2	12	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,45	0,25	0,42	2,21	2,21 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,45	0,25	0,42	2,21	
		12	22 ± 0,44	0,8 ± 0,02	0,45	0,25	0,42	2,21	
150	12,2	12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	2,22 ± 0,04
		12	22 ± 0,44	1,2 ± 0,02	0,69	0,38	0,42	2,22	

C.2 Perhitungan Nilai Konstanta Dielektrik Minyak Transformator Warna B

Tabel C.2.1 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna B Pada Suhu 20°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	14,1	14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,33	0,42	2,34	2,34 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,33	0,42	2,34	
		14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,33	0,42	2,34	
150	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
250	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
350	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
450	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
550	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	

650	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
750	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
850	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
950	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	

Tabel C.2.2 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna B Pada Suhu 25°C

Frekuensi ($\times 10^3$ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,33	0,42	2,34	$2,34 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,33	0,42	2,34	
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,33	0,42	2,34	
150	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
250	14,1	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	
350		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,38	0,42	2,43	$2,43 \pm 0,05$

	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
450	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
550	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
650	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
750	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
850	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	
950	14,1	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	2,43 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,38	0,42	2,43	

Tabel C.2.3 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna B Pada Suhu 30°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	κ	$\bar{\kappa}$
50		14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,34	0,42	2,31	2,31 ± 0,05

	13,7	14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,34	0,42	2,31	
		14	23 ± 0,46	1 ± 0,02	0,64	0,34	0,42	2,31	
150	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
250	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
350	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
450	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
550	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
650	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
750	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
850	13,7	14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	2,33 ± 0,05
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,77	0,40	0,42	2,33	

950	13,7	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	

Tabel C.2.4 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna B Pada Suhu 35°C

Frekuensi ($\times 10^3$ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	κ	$\bar{\kappa}$
50	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,34	0,42	2,31	$2,31 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,34	0,42	2,31	
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,34	0,42	2,31	
150	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
250	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
350	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
450	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
550	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
650		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$

	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
750	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
850	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	
950	13,6	14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	$2,33 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,77	0,40	0,42	2,33	

Tabel C.2.5 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna B Pada Suhu 40°C

Frekuensi (x10 ³ kHz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
		13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,33	0,42	2,22	
50	13,2	13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,33	0,42	2,22	$2,20 \pm 0,04$
		13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,33	0,42	2,22	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	
150	13,2	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	
250	13,2	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,046$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	
350		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,72	0,39	0,42	2,28	$2,28 \pm 0,046$

	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,72	0,39	0,42	2,28	
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,72	0,39	0,42	2,28	
450	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,72	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	
550	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	
650	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	
750	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	
850	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	
950	13,2	13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	2,28 ± 0,046
		13	23 ± 0,46	1,2 ± 0,02	0,716	0,39	0,42	2,28	

C.3 Perhitungan Nilai Konstanta Dielektrik untuk Sampel Minyak Transformator Warna C

Tabel C.3.1 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna C Pada Suhu 20°C

Frekuensi (x10 ³ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	\bar{K}
------------------------------------	------------------------	-------------------	--------------	--------------	----------------	-----------------	---------	-----	-----------

50	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	$2,89 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	
		15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	
150	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
250	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
350	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
450	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
550	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
650	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
750	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
850	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	

		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
950	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,36	0,42	2,95	

Tabel C.3.2 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna C Pada Suhu 25°C

Frekuensi ($\times 10^3$ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	
		15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	$2,89 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,68	0,28	0,42	2,89	
150	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
250	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
350	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
450	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
550	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	

		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
650	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
750	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
850	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
950	15,2	15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	$2,95 \pm 0,06$
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,39	0,42	2,95	
		15	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,97	0,36	0,42	2,95	

Tabel C.3.3 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna C Pada Suhu 30°C

Frekuensi ($\times 10^3$ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	14,4	14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,67	0,26	0,42	2,83	$2,83 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,67	0,26	0,42	2,83	
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,67	0,26	0,42	2,83	
150	14,4	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
250	14,4	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	

		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
350	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
450	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
550	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
650	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
750	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
850	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
950	14,433	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	$2,90 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,95	0,32	0,42	2,90	

Tabel C.3.4 Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna C Pada Suhu 35°C

Frekuensi ($\times 10^3$ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,28	0,42	2,72	$2,72 \pm 0,05$
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,28	0,42	2,72	
		14	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,64	0,28	0,42	2,72	
150	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
250	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
350	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
450	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
550	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
650	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	

		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
750	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
850	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
950	14,2	14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	$2,78 \pm 0,06$
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	
		14	$23 \pm 0,46$	$1,4 \pm 0,03$	0,91	0,38	0,42	2,78	

Tabel C.3.5 Nilai Konstanta Dielektrik Minyak (κ) Transformator Warna C Pada Suhu 40°C

Frekuensi ($\times 10^3$ Hz)	Kapasitor ukur (pF)	Kapasitor (pF)	V_i (volt)	V_o (volt)	C ukur (pF)	C udara (pF)	Koreksi	K	$\bar{\kappa}$
50	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,26	0,42	2,66	$2,66 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,26	0,42	2,66	
		13	$23 \pm 0,46$	$1 \pm 0,02$	0,59	0,26	0,42	2,66	
150	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
250	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
350	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	

450	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
550	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
650	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
750	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
850	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
950	13,5	13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	$2,67 \pm 0,05$
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	
		13	$23 \pm 0,46$	$1,2 \pm 0,02$	0,97	0,32	0,42	2,67	

Lampiran D. Uji Signifikansi Pengaruh Frekuensi Terhadap Nilai Konstanta Dielektrik (κ)

D.1 Hasil Uji Koefisien Determinasi dan Uji Signifikansi Pengaruh Frekuensi terhadap Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A Pada Setiap Perubahan Suhu

A. Pada suhu 20°C, 25°C, dan 30°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.01430

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.001	1	.001	3.000	.122 ^b
	Residual	.002	8	.000		
	Total	.002	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.261	.009		249.062	.000		
	Frekuensi	2.727E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

B. Pada Suhu 35°C dan 40°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.00286

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	3.000	.122 ^b
	Residual	.000	8	.000		
	Total	.000	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.216	.002		1220.477	.000		
	Frekuensi	5.455E-9	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

D.2 Hasil Uji Koefisien Determinasi dan Signifikansi Pengaruh Frekuensi terhadap Nilai Konstanta Dielektrik (κ) Minyak

Transformator Warna B Pada Setiap Perubahan Suhu

A. Pada Suhu 20°C dan 25°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.02574

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.002	1	.002	3.000	.122 ^b
	Residual	.005	8	.001		
	Total	.007	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.396	.016		146.633	.000		
	Frekuensi	4.909E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

B. Pada Suhu 30°C dan 35°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.00572

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	3.000	.122 ^b
	Residual	.000	8	.000		
	Total	.000	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.323	.004	639.500	.000		
	Frekuensi	1.091E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

C. Pada Suhu 40°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.02288

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.002	1	.002	3.000	.122 ^b
	Residual	.004	8	.001		
	Total	.006	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.250	.015		154.894	.000		
	Frekuensi	4.364E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

D.3 Hasl Uji Koefisien Determinasi dan Signifikansi Pengaruh Frekuensi dan Suhu terhadap Nilai Konstanta Dielektrik

(κ) Minyak Transformator Warna C Pada Setiap Perubahan Suhu

A. Pada Suhu 20°C dan 25°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.01716

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.001	1	.001	3.000	.122 ^b
	Residual	.002	8	.000		
	Total	.003	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.928	.011		268.703	.000		
	Frekuensi	3.273E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

B. Pada Suhu 30°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.02002

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.001	1	.001	3.000	.122 ^b
	Residual	.003	8	.000		
	Total	.004	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.874	.013		226.090	.000		
	Frekuensi	3.818E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

c. Pada Suhu 35°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.01716

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.001	1	.001	3.000	.122 ^b
	Residual	.002	8	.000		
	Total	.003	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.758	.011		253.100	.000		
	Frekuensi	3.273E-8	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

D. Pada Suhu 40°C

Model Summary^b

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.522 ^a	.273	.182	.00286

a. Predictors: (Constant), Frekuensi

b. Dependent Variable: Kns.dielektrik

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	.000	1	.000	3.000	.122 ^b
	Residual	.000	8	.000		
	Total	.000	9			

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

b. Predictors: (Constant), Frekuensi

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	2.666	.002		1468.287	.000		
	Frekuensi	5.455E-9	.000	.522	1.732	.122	1.000	1.000

a. Dependent Variable: Kns.dielektrik

Lampiran E Nilai Viskositas Kinematik (ν) dan Konstanta Dielektrik (κ) Minyak Transformator Warna A, B, dan C

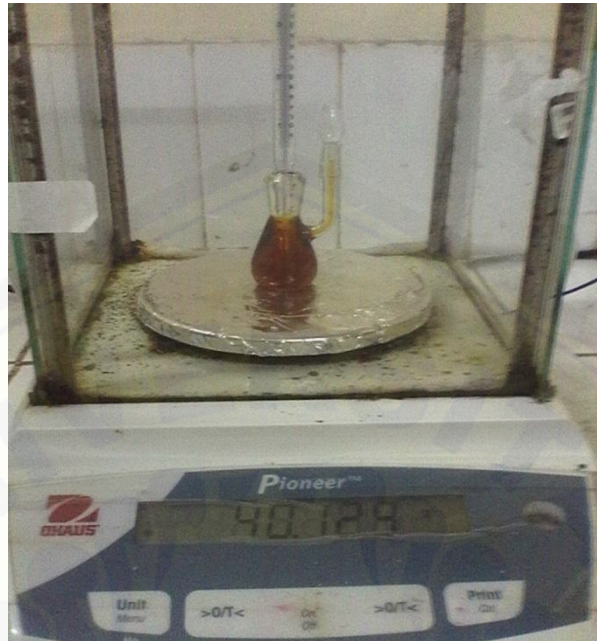
Tabel E.1 Nilai viskositas kinematik (ν) dan konstanta dielektrik (κ) minyak transformator warna A, B, dan

Minyak Transformator	Suhu °C	Viskositas Kinematik (ν)	Konstanta Dielektrik	
			50 kHz	950 kHz
Warna A	20	14,062	2,23	2,28
	25	12,602	2,23	2,28
	30	12,517	2,23	2,28
	35	11,282	2,21	2,22
	40	10,449	2,21	2,22
Warna B	20	16,301	2,34	2,43
	25	14,586	2,34	2,43
	30	13,238	2,31	2,34
	35	13,177	2,31	2,34
	40	12,550	2,20	2,28
Warna C	20	31,441	2,89	2,95
	25	30,668	2,89	2,95
	30	29,812	2,83	2,95
	35	29,173	2,72	2,78
	40	29,168	2,66	2,67

Lampiran F Dokumentasi Penelitian



Gambar F.1 Sampel penelitian minyak transformator warna A, B dan C



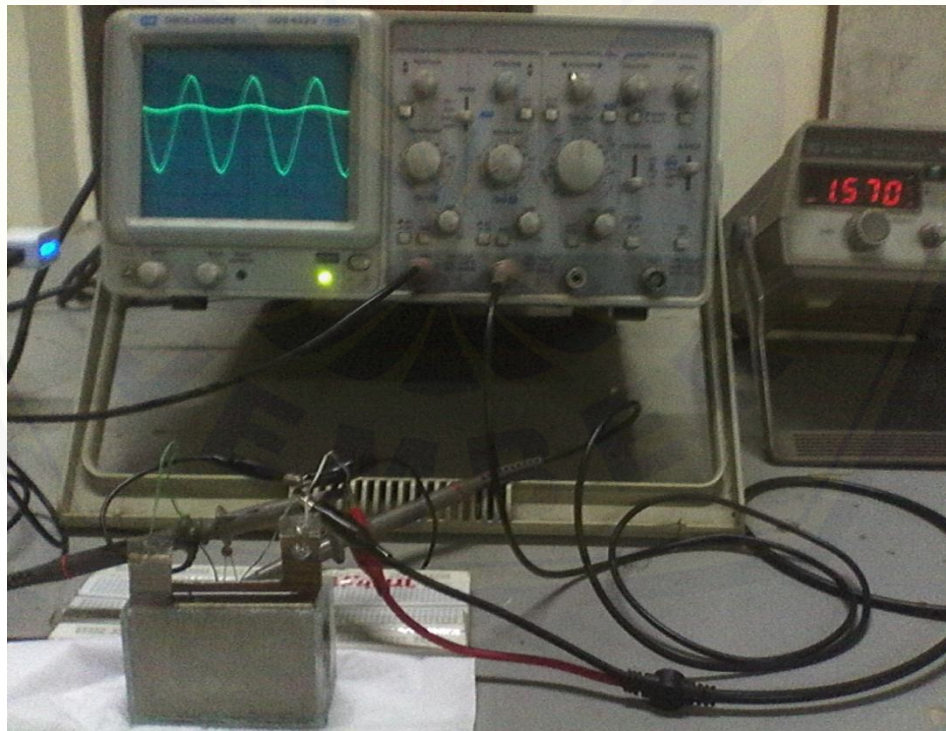
Gambar F.2 Pengukuran massa sampel dengan piknomete



Gambar F.3 Pengukuran waktu alir sampel dengan viskometer Ostwald



Gambar F.4 Pengukuran kapasitansi dengan kapasitansimeter untuk menentukan kapasitor rangkaian



Gambar F.5 Rangkaian penelitian untuk penentuan konstanta dielektrik