

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN SIVI YALITKANLARA AİT ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

EYÜP TASLAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. CELAL KOCATEPE**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN SIVI YALITKANLARA AİT ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİN İNCELENMESİ**

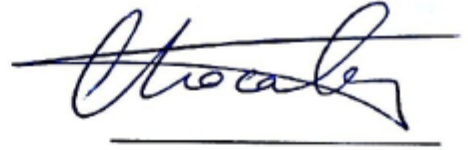
EYÜP TASLAK tarafından hazırlanan tez çalışması 16.06.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

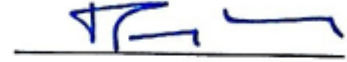
Prof. Dr. Celal Kocatepe
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Celal Kocatepe
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Hüseyin Çakır
Yıldız Teknik Üniversitesi



Prof. Dr. Özcan Kalenderli
İstanbul Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresinde bilgi ve tecrübeleriyle çalışmama ışık tutan değerli danışman hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmam boyunca bilgi ve yönlendirmeleri ile yol gösteren değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a müteşekkirim.

Tezimin laboratuvar çalışmalarında ve tez süresince yardımına başvurduğum değerli hocam Arş. Gör. C. Fadıl KUMRU'ya teşekkürü borç bilirim.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve dostlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2014

Eyüp TASLAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Orijinal Katkı.....	6
BÖLÜM 2	
SIVI YALITKAN ÇEŞİTLERİ.....	8
2.1 Mineral Yağlar	8
2.2 Silikonlu Sıvılar	10
2.3 Esterler	11
2.3.1 Sentetik Esterler.....	11
2.3.2 Doğal Esterler.....	12
2.4 Yüksek Molekül Ağırlıklı Hidrokarbonlu Sıvılar (HMWH)	14
2.5 Sıvı Yalıtkanların Karşılaştırılması.....	14
BÖLÜM 3	
SIVI YALITKANLARA AİT PARAMETRELERİN TANITILMASI	17
3.1 Sıvılarda Delinme	17
3.1.1 Asılı Parçacık Teorisi	18

3.1.2	Kabarcık Teorisi	20
3.1.3	Elektronik Delinme Teorisi	21
3.2	Yalıtım Yağında Nemin Etkisi	21
3.3	Yalıtkan Sıvılarda Elektriksel Parametreler	23
3.3.1	Bağıl Dielektrik Katsayısı	23
3.3.2	Dielektrik Kayıp Faktörü	24
3.3.3	Dielektrik Güç Kaybı	26
BÖLÜM 4		
YALITIM YAĞINA UYGULANAN TESTLER		27
4.1	Elektriksel Testler	28
4.1.1	Delinme Gerilimi	28
4.1.2	Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$)	28
4.1.3	Yalıtım Direnci	28
4.2	Fiziksel Testler	28
4.2.1	Viskozite (Akmazlık)	28
4.2.2	Parlama Noktası	29
4.2.3	Akma Noktası	29
4.2.4	Yoğunluk	29
4.2.5	Renk ve Görünüş	29
4.2.6	Parçacık Miktarı	30
4.2.7	İç Yüzey Gerilimi (IFT)	31
4.3	Kimyasal Testler	31
4.3.1	Asitlik	31
4.3.2	Su İçeriği	31
4.3.3	Gaz Analizi	31
4.4	Yalıtkan Yağların Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi	32
BÖLÜM 5		
DENEY DÜZENEKLERİ VE ÖLÇÜM STANDARTLARI		34
5.1	Yağ Numunesinin Hazırlanması	34
5.2	Delinme Gerilimi Testi	35
5.2.1	ASTM D1816 Standart Test Metodu	35
5.2.2	ASTM D877 Standart Test Metodu	36
5.2.3	IEC 60156 Standart Test Metodu	37
5.2.4	Delinme Gerilimi Ölçümü	38
5.3	Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$) ve Bağıl Dielektrik Katsayısı (ϵ_r) Testi	39
5.3.1	IEC 60247 Standart Test Metodu	40
5.3.2	Dielektrik Kayıp Faktörü ve Bağıl Dielektrik Katsayısının Ölçümü	42
BÖLÜM 6		
DENEY SONUÇLARI VE ANALİZLERİ		44
6.1	Delinme Gerilimi Testi	44
6.1.1	Sıcaklığa Bağlı Delinme Gerilimi Değerleri	44

6.1.2	Gerilim Artış Hızına Bağlı Delinme Gerilimi Değişimi	46
6.1.3	Elektrot Geometrisine Bağlı Delinme Geriliminin Değişimi.....	47
6.1.4	Delinme Geriliminin Neme Bağlı Değişimi.....	48
6.1.5	Nemlendirilmiş Mineral Yağın Delinme Geriliminin Sıcaklığa Bağlı Değişimi	50
6.2	Dielektrik Kayıp Faktörü Testi	51
6.2.1	Gerilim Artışına Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi.....	51
6.2.2	Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi.....	52
6.2.3	Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi	53
6.3	Dielektrik Güç Kaybı Testi	54
6.3.1	Gerilim Artışına Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi.....	54
6.3.2	Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi	55
6.3.3	Frekansa Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi	56
6.4	Bağıl Dielektrik Katsayısı Testi.....	57
6.4.1	Gerilime Bağlı Bağıl Dielektrik Katsayısı Değişimi	57
6.4.2	Sıcaklığa Bağlı Bağıl Dielektrik Katsayısı Değişimi	58
6.4.3	Frekansa Bağlı Bağıl Dielektrik Katsayısı Değişimi	59
6.5	Akım Değişimi Testi	60
6.5.1	Akımın Gerilime Bağlı Değişimi	60
6.5.2	Akımın Frekansa Bağlı Değişimi	61

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	74

SİMGE LİSTESİ

δ	Kayıp açısı
$\tan \delta$	Dielektrik kayıp faktörü
V_{ort}	Ortalama delinme gerilimi
ϵ_r	Bağıl dielektik katsayısı
r	Parçacık yarıçapı
E	Elektrik alan şiddeti
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
W_s	Mineral yağ içinde suyun çözünürlüğü
T	Mutlak sıcaklık
R_p	Paralel eşdeğer direnç
C_p	Paralel eşdeğer kapasite
C_x	Yağ dielektrikli kapasite
C_0	Vakum dielektrikli kapasite
C_N	Etalon kondansatör
Z	Empedans
ω	Açısal frekans
f	Frekans
SD	Standart sapma
CV	Değişim katsayısı

KISALTMA LİSTESİ

PDMS	Polydimethylsiloxane
DGA	Dissolved Gas Analysis
IFT	Interfacial Tension
HMWH	High Molecular Weight Hydrocarbon
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
ASTM	American Society for Testing and Materials
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineering

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Mineral yağın hidrokarbon moleküllerinin yapısı	9
Şekil 2. 2 Silikonlu sıvının molekül yapısı	11
Şekil 2. 3 Sentetik polyol esterin kimyasal yapısı	12
Şekil 2. 4 Doğal ester trigliseritin yapısı	13
Şekil 3. 1 Kutuplanmış liflerin ve diğer parçacıkların zincir oluşturmaları	19
Şekil 3. 2 Bakır parçacık miktarına bağlı delinme gerilimi	19
Şekil 3. 3 Bir gaz kabarcığının oluşumu	20
Şekil 3. 4 Transformatör sıvılarının sıcaklığa bağlı suya doygunluk seviyeleri.....	23
Şekil 3. 5 Paralel eşdeğer devre ve fazör diyagramı.....	24
Şekil 3. 6 Paralel eşdeğer devre ve Schering köprüsü	25
Şekil 4. 1 Hızlandırılmış yaşlandırma ile yağın renginin değişmesi	30
Şekil 5. 1 VDE elektrotları	36
Şekil 5. 2 ASTM D1816 deney düzeneği	36
Şekil 5. 3 Disk elektrotlar	37
Şekil 5. 4 Ortalama delinme gerilimine karşı değişim katsayısı	38
Şekil 5. 5 Yağ test cihazı	39
Şekil 5. 6 Mineral yağın tan delta, kapasite ve direnç ölçümleri için kullanılan cihazlar	40
Şekil 5. 7 Tan delta, kapasite ve direnç ölçümleri için test hücresi.....	42
Şekil 5. 8 Sıcaklığa bağlı tan delta, güç kaybı ve kapasite ölçümler için deney düzeneği	43
Şekil 6. 1 Delinme geriliminin sıcaklıkla ilişkisi.....	45
Şekil 6. 2 Delinme geriliminin gerilim artış hızına bağlı değişimi (disk elektrot)	46
Şekil 6. 3 Delinme geriliminin gerilim artış hızına bağlı değişimi (VDE elektrot)	46
Şekil 6. 4 Elektrot geometrisine bağlı delinme gerilimi	48
Şekil 6. 5 Delinme gerilimin su içeriğiyle ilişkisi	49
Şekil 6. 6 Delinme geriliminin sıcaklıkla ilişkisi (25ml su ekli)	50
Şekil 6. 7 25 ml su eklenmiş mineral yağ	51
Şekil 6. 8 Gerilim ve sıcaklığa bağlı tan δ değişimi	52
Şekil 6. 9 Sıcaklığa bağlı tan δ değişimi.....	53
Şekil 6. 10 Frekansa bağlı tan δ değişimi	54
Şekil 6. 11 Mineral yağın gerilime bağlı dielektrik güç kaybı değişimi	55
Şekil 6. 12 Mineral yağın sıcaklığa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi	56
Şekil 6. 13 Mineral yağın frekansa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi	57
Şekil 6. 14 Mineral yağın gerilime bağlı dielektrik katsayısı değişimi	58
Şekil 6. 15 Mineral yağın sıcaklığa bağlı dielektrik katsayısı değişimi.....	59

Şekil 6. 16 Mineral yağın frekansa bağlı dielektrik katsayısı değişimi.....	60
Şekil 6. 17 Mineral yağa uygulanan gerilime bağlı akım değişimi.....	61
Şekil 6. 18 Mineral yağa uygulanan frekans-akım değişimi.....	61

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1 Mineral yağın parafin miktarına göre sınıflandırılması	10
Çizelge 2. 2 Bazı bitkisel sıvıların yağ asidi bileşimi	13
Çizelge 2. 3 Yalıtım sıvılarının karşılaştırılması	15
Çizelge 2. 4 Güç donanımlarında kullanılan yalıtım sıvılarının uygulama alanları	16
Çizelge 4. 1 Yalıtım sıvılarına uygulanan testler	27
Çizelge 4. 2 Yalıtım yağının rengine göre durum analizi	30
Çizelge 4. 3 Test Metotları	33
Çizelge 5. 1 Mineral yağının özellikleri	34
Çizelge 5. 2 Test kabının teknik özellikleri	42
Çizelge 6. 1 Sıcaklığa bağlı delinme gerilimi	45
Çizelge 6. 2 Elektrot geometrisine ve gerilim artış hızına bağlı delinme gerilimi	47
Çizelge 6. 3 Delinme geriliminin su içeriğine bağlı değişimi	49
Çizelge 6. 4 Delinme geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi (25ml su ekli)	50

YÜKSEK GERİLİMDE KULLANILAN SIVI YALITKANLARA AİT ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİN İNCELENMESİ

Eyüp TASLAK

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

Dünyada elektrik enerjisine olan ihtiyacın artmasıyla birlikte transformatör, reaktör, kademe değiştirici, kesici, kondansatör, kablo, geçit izolatörü vb. güç donanımlarına olan ihtiyaç da artmaktadır. Dünya genelinde birkaç milyar litre yalıtım sıvısı bu güç donanımlarında soğutma sıvısı olarak, fazlar arasını yalıtım, kondansatörlerde dielektrik sıvı olarak ve kâğıt bileşimlerinin emprenye edilmesinde kullanılmaktadır. Bu donanımların istenen biçimde çalışmaları, arıza yapmamaları ve uzun ömürlü olmaları güç sisteminin sürekli, güvenilir ve ekonomik işletimi açısından büyük önem arz etmektedir. Elektrik tesislerinde, bu amaçla kullanılan farklı kimyasal, fiziksel ve dielektrik özelliklere sahip çeşitli yalıtım sıvılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kullanılan yalıtım sıvısının özellikleri yalıtım sıvısının fiyatı üzerinde de önemli etkiye sahip olmaktadır. Yalıtım ve soğutma için kullanılan pek çok sıvı yalıtkan bulunmakla birlikte elektrik cihazlarında en yaygın olarak kullanılan yalıtım sıvısının mineral yağlar olduğu bilinmektedir. Endüstriyel olarak kullanılan güç donanımlarında, 100 yıldan uzun bir süredir bu yağların tercih edilme sebepleri, ekonomik olmaları, bulunabilirliğini ve güvenilirliğini ispatlamış olması olarak sıralanabilir.

Bu tez çalışmasında mineral yağların dielektrik özelliklerini elektriksel açıdan etkileyen parametreler deneysel olarak araştırılmış ve elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur. Yüksek gerilimde kullanılan donanımın en uygun tasarımı için, yalıtım sıvılarının farklı gerilim seviyelerinde, farklı elektrot geometrilerinde, farklı sıcaklık ve farklı

frekanslardaki davranışlarının bilinmesi gereklidir. Bu nedenle, deneysel çalışmada ilk olarak sıcaklık, elektrot geometrisi, gerilim artış hızı ve nem miktarının mineral yağın delinme gerilimi üzerinde etkileri araştırılmıştır. Daha sonra sıcaklık, frekans ve gerilim değişimlerinin mineral yağa ait dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısı üzerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir.

Tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın birinci bölümünde literatürde yapılan çalışmalar, tezin amacı ve hedefi verilmiştir. Bölüm 2’de elektrik tesisleri güç donanımlarında kullanılan yalıtım sıvısı çeşitleri ve bu sıvıların dielektrik özelliklerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Bölüm 3’de sıvı yalıtkanlarda delinme teorisi, dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı, bağıl dielektrik katsayısı ve nemin etkisi kavramları anlatılmıştır. Bölüm 4’de yalıtım sıvılarına uygulanan elektriksel, fiziksel ve kimyasal testler ve bu testlerde kullanılan standart test metodları sunulmuştur. Bölüm 5’de gerçekleştirilen deneysel çalışmada elde edilen parametrelerin ölçülmesindeki yöntemler tanıtılmıştır. Son bölümde elde edilen deney sonuçları sunularak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yalıtım sıvıları, delinme gerilimi, dielektrik kayıp faktörü, dielektrik güç kaybı, bağıl dielektrik katsayısı

ANALYSES OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF LIQUIDS USED IN HIGH VOLTAGE TECHNOLOGY

Eyüp TASLAK

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

In the world, with the increase of the need for electrical energy, the need for power equipment such as transformer, load tap-changer, breaker, capacitor, cable and bushing is also increasing. Worldwide, several million liters of insulating liquids are used as coolant liquid, insulation between phases and impregnant of paper compositions. Having long life, not being failure and regular operation of these equipment have great importance in term of steady, reliable and economic operation of the power system. In electrical facility, various insulating oils, which have different chemicals, physical and dielectric properties used for this purpose are needed. Properties of insulating liquid used have also a significant effect on the price of the insulating liquid. Although there are many liquids for cooling and insulating, it is known that mineral oils are the most commonly used insulating oil in electrical equipment. In industrial power equipment, the reasons of preference of these oils for more than 100 years can be listened as being economical, availability and proven reliability.

In this thesis, the parameters which affect the electrical dielectric properties of mineral oils are experimentally investigated and the results obtained are presented.

For the optimal design of equipment used in high voltage, it is necessary to know how the oil parameters change in different voltage levels, electrode geometry, frequency and temperature. Therefore, in the first experimental study, the effects of electrode geometry, voltage rise rate and humidity factors on breakdown voltage has been

investigated. Then, the effects of temperature, frequency and voltage changes on dielectric dissipation factor, power loss and relative permittivity of mineral oil have been analysed.

This study consists of six chapters. In the first chapter of the study, studies in literature and aims and objectives of the thesis are given. In second chapter, insulating liquids used in power equipment of electrical systems and dielectric properties of these liquids are given as comparative. In third chapter, concepts such as breakdown theory, dielectric dissipation factor, power loss, relative permittivity and the effect of humidity are explained. In fourth chapter, the electrical, physical and chemical tests and the standard test methods used in these tests are presented. In fifth chapter, measurement methods of the parameters obtained in the experimental studies are introduced. The last chapter, the experimental results obtained from the tests are presented and discussed.

Keywords: Insulating liquids, breakdown voltage, dielectric dissipation factor, dielectric power loss, relative permittivity

1.1 Literatür Özeti

Yüksek gerilim cihazlarının yalıtımı çalışmaları enerji sürekliliği, güvenlik ve ekonomiklik bakımından araştırılması gereken önemli bir unsurdur. Yalıtım sıvıları transformatör (dağıtım, güç, akım, gerilim), kesici, kondansatör, reaktör, kablo, geçit izolatörü, vb. gibi yüksek gerilim donanımlarında ısıl soğutmayı ve elektriksel yalıtımı sağlamak için kullanılmaktadır [1-7]. Özellikle güç donanımlarında, iç devrede meydana gelen sıcaklık yükselmesinden dolayı kayıplarda artışlar meydana gelmektedir. Bu nedenle, üretilen ısıнын hızlı, güvenilir ve ekonomik bir şekilde dağıtılması gerekir. Transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların bazılarının kullanılan yalıtım yağının zayıf yalıtım performansından kaynaklandığı bilinmektedir. Gerçekleştirilen elektriksel ve kimyasal analizler, yalıtım yağının kullanılabilirliği hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır.

Günümüz dünyasında elektrik enerjisine olan talebin artmasının bir sonucu olarak güç donanımlarına olan ihtiyaç da artmaktadır [8]. Özellikle elektrik güç donanımlarının maliyetli ve önemli parçalarından biri olan transformatörde arıza sonucu meydana gelen elektrik kesintisi, sanayi kuruluşlarında üretiminin durmasına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır [9]. Ayrıca, yaygınlaşan metro ve tramway gibi elektrikli ulaşım araçlarında elektrik kesintisinden dolayı aksamalar oluşmaktadır. Bu nedenle, transformatörlerin güvenli çalışmalarını sağlamak enerji verimliliği ve iş gücü açısından önemlidir.

Yalıtım sıvısı seçimi yapılırken ısıl soğuma yeteneği, dayanıklılık, verimlilik, fiyat, çevre dostu olması gibi özellikler dikkate alınmaktadır. Transformatörde kullanılan yalıtım

yağları, elektriksel yalıtım sağlamanın yanında transformatör sargılarında ve nüvede meydana gelen ısıyı emerek bir soğutucu görevi de yapmaktadır. Bu amaçla transformatörlerde ısı soğuma ve yalıtım amacıyla çeşitli yalıtım sıvıları kullanılmaktadır. Bu yağlar kimyasal açıdan mineral yağlar, yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar, silikonlu yağlar ve bitkisel yağlar olarak sınıflandırılmaktadır [10].

Mineral yağlar, düşük maliyetli olması, iyi yalıtım performansı ve ısı soğuma yeteneğine sahip olması nedeniyle yaklaşık 100 yıldan beri en çok tercih edilen yalıtım sıvılarıdır. Bu nedenle, gerçekleştirilen tez çalışmasında elektrik tesisleri güç donanımlarında yaygın olarak kullanılan mineral yağların yalıtım özelliklerini etkileyen faktörler araştırılmıştır. Literatürde bu konu ile ilgili gerçekleştirilmiş pek çok çalışma mevcuttur.

Yalıtım sıvısının kullanılabilirliği hakkında bilgi sahibi olmak için delinme geriliminin ölçümü, klasik ve popüler bir test yöntemidir. İşletmede kullanılan yalıtım sıvılarının delinme gerilimini etkileyen pekçok faktör vardır.

Q. Liu ve arkadaşı tarafından pozitif ve negatif kutuplu darbe gerilimlerinin delinme gerilimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır [11]. Çubuk-düzlem elektrot sistemi kullanarak yapılan ölçümlerde hem pozitif hem de negatif kutupluda mineral yağın delinme gerilimi elektrot aralığına göre doğal ester (FR3) ve sentetik ester (Midel 7131) sıvılarından daha yüksek çıkmıştır. Negatif kutupluda ise tüm sıvıların delinme gerilimlerinin pozitif kutupluya göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

X. Wang ve Z. D. Wang tarafından mineral ve ester yağlarında bulunan parçacıkların boyutu ve sayısı belirlenerek yağın delinme olasılığına etkileri araştırılmıştır [12]. Parçacık sayısı ve boyutundaki artışın yağların delinme gerilimini olumsuz etkilediği görülmüştür.

Literatürde gerçekleştirilen bir çalışmada [13], darbe gerilimlerinin silikonlu ve ester yağlar üzerindeki etkisi sıcaklığa bağlı olarak araştırılmıştır. Küre-düzlem elektrot sistemi kullanarak 30°C ile 130°C arasında alınan ölçümlerde her iki yalıtım sıvısının delinme gerilimi değerlerinin, sıcaklığa bağlı olarak arttığı görülmüştür. Ester sıvısının delinme gerilimi tüm sıcaklık değerlerinde daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca, yarı küre uçlu çubuk-düzlem elektrot sistemi kullanarak, silikon ve ester yağlarına emdirilmiş kraft ve

nomex yalıtım kâğıtlarının yüzey delinme gerilimleri karşılaştırılmıştır. Tüm yağlarda nomex'in yüzey delinme geriliminin kraft kâğıdına göre yaklaşık %30 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ester yağına emdirilmiş her iki yalıtım kâğıdının yüzey delinme gerilimi, silikon yağına emdirilen kâğıtlara göre yaklaşık %15 daha yüksek olduğu görülmüştür.

Yalıtım sıvısının delinme gerilimini etkileyen başlıca faktörler kutupluluk, gerilim artış hızı, sıcaklık, frekans, elektrot topolojisi, elektrot aralığı, parçacık ve nem olarak sıralanabilir. Pekçok çalışmada yalıtım yağı çeşitlerinin delinme gerilimleri, bu faktörler göz önüne alınarak araştırılmıştır [14-18].

Yalıtım sıvılarının delinme gerilimlerinin belirlenmesi için önerilen çeşitli ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Bunlar ülkelere ve şartnamelere göre farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden test sonuçlarının doğru olarak belirlenip yorumlanabilmesi için istenen özellikte ölçüm yapılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, mineral yağların delinme gerilimleri ASTM D1816 ve ASTM D877 standart test yöntemlerine göre farklı elektrot geometrisi, değişken elektrot aralığı ve gerilim artış hızlarına bağlı olarak ölçülmüştür. Özellikle güç transformatörlerinde enerji tüketimindeki dalgalanmalardan dolayı yalıtım yağları sıcaklık değişimlerine maruz kalabilmektedir. ASTM D877 standardında mineral yağların sıcaklığa bağlı delinme gerilimi değerleri belirlenmiştir. Ayrıca nem faktörünün delinme gerilimi üzerindeki etkisi araştırmak için yağa belirli oranlarda su eklenerek ASTM D877 standardında göre ölçümler gerçekleştirilmiştir.

Dielektrik kayıp faktörü, işletmede kullanılan yalıtım yağları hakkında değerlendirme yapmaya yarayan parametrelerden biridir. Bu nedenle kayıp faktörü, yüksek gerilim tesisleri donanımlarında kullanılan yalıtım sıvılarının kullanılabilirliği veya kalitesi hakkında önemli bilgiler vermektedir. Yalıtım sıvısına olan güvenilirlik, deneyin standardına uygun olarak yapılması ve doğru yorumlanmasına bağlıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda, çeşitli yalıtım sıvılarının performansları yaşlandırma yapılarak veya işletmede kullanılan yağlardan numune alınarak yapılan dielektrik kayıp faktörü ölçümler ile yaşlandırma performansları karşılaştırılmaktadır.

M. Kohtoh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada üç ayrı firmaya ait altı farklı marka yalıtım sıvısı, farklı üretim yıllarına ait 500 kV, 275 kV ve 66 kV gerilim seviyesindeki doksan sekiz transformatörden toplanarak, elektriksel, fiziksel ve kimyasal karakteristikleri araştırılmıştır. İşletmede yaşlanmış olan bu yalıtım yağlarının delinme gerilimi, yalıtım direnci, dielektrik kayıp faktörü, kinematik viskozite, yoğunluk, parlama noktası, akma noktası, iç yüzey gerilimi, toplam asitlik değeri ve nemli yağın dielektrik özellikleri incelenmiştir. Tüm yalıtım yağlarının delinme gerilimi değerlerinin yaşlandırmaya bağlı değişimi arasında açık bir ilişki görülmemiştir. Yaşlanma süresine bağlı olarak yağ direncinde azalma ve dielektrik kayıp faktörü değerinde artış görülmüştür. Kinematik viskozite açısından transformatör gerilim sınıfları arasında açık bir ilişki gözlenmemiştir. 500 kV gerilim sınıfı transformatörler için artan yaşlanma ile kinematik viskozite indeksinin azaldığı görülmüştür. Yağ yoğunluğu artan yaşlanma süresi ile birlikte genelde artma eğilimi göstermiştir. Yüksek gerilim sınıflı transformatörlerden alınan yağ numunelerinin nispeten daha düşük parlama noktasına sahip olduğu görülmüştür. Her gerilim seviyesi arasında akma noktalarının yaşlanma karakteristikleri için açık bir ilişki kurulamamıştır. Transformatörlerden alınan numunelerin iç yüzey gerilimi artan yaşlanma ile olumsuz olarak azalma eğilimi göstermiştir. Toplam asitlik sayısı artan yaşlanma ile her 30 yılda yaklaşık 0,003 mgKOH/g artmıştır. Ölçülen asitlik sayısı değeri IEC 61125 standardındaki kabul edilebilir değerleri karşılamaktadır. Su içeriği ile yaşlanma süresi arasında açık bir ilişki kurulamamış ve su içeriğinin yaşlanma süresi ile çok az değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak, yağın direnci, iç yüzey gerilimi ve toplam asitlik değeri arasında bir ilişki vardır. Toplam asitlik değerinden daha fazla oranda değişen iç yüzey geriliminin yalıtım yağının bozulması hakkında bir parametre olarak kullanılabilir olacağını göstermektedir [19].

M.Kohtoh ve arkadaşlarınca gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise mineral yağa bakır katalizör eklenerek paslanmaz çelik bir kapta 120°C'de 10, 30 ve 50 gün hızlandırılmış yaşlandırma uygulanmış ve yağın su içeriği, asitlik değeri, delinme gerilimi, direnci ve iç yüzey gerilimi ölçülmüştür. Yaşlandırma süresine bağlı su içeriği 10 günlük yaşlandırma sonunda 2 ppm'den IEC standardında belirtilen maksimum sınır değeri olan 30-40 ppm değerini aşmıştır. Yaşlandırmanın 30 ve 50'inci günleri arasında su içeriği biraz azalarak 40-50 ppm seviyelerinde kalmış ve bir doyum eğrisi göstermiştir. Suyun üretilmesi

için hidrojen ve oksijen gerekli olduğu için oksijeni, yalıtım yağı ile yaşlandırma kabı arasındaki havadan ve hidrojeni de yağ numunesinden alarak sağladığı düşünülmüştür. Yağ seviyesi üzerindeki boşluktaki hava tükenir tükenmez su içeriği doygunluğa ulaşmıştır. Toplam asitlik değeri 0,004 mgKOH/g'dan 50 günlük hızlandırılmış yaşlandırma sonunda yaklaşık 4,8 artarak 0,019 mgKOH/g değerine arttığı görülmüştür. Delinme gerilimi 10 günlük yaşlandırma sonunda 84 kV/2,5mm seviyesinden 30 kV seviyesine düşmüş ve daha sonra 50 günlük yaşlandırma sonuna kadar bu seviyelerde kalmıştır. Yağ direnci ve iç yüzey gerilimi 10 günlük yaşlandırma sonunda azaldığı ve daha sonraki yaşlandırma sürelerinde bir doyum eğrisine sahip olup çok az değişimler görülmüştür. Sonuç olarak yağdaki nem içeriğinin delinme gerilimini, yağ direncini ve iç yüzey gerilimini önemli derecede azalttığı gözlemlenmiştir [20].

Başka bir çalışmada üç doğal ester, bir sentetik ester ve bir çeşit mineral yağ içine belirli oranlarda demir, bakır, çinko, alüminyum ve yalıtım kâğıdı konularak 130° derecede yaşlandırmaya maruz bırakılmıştır. Numunelere havanın varlığında ve havasız kapalı bir sistem için 164 ve 1440 saat hızlandırılmış yaşlandırma uygulanarak nem çözünürlüğü, viskozite, asitlik sayısı, dielektrik kayıp faktörü ve delinme gerilimi parametreleri karşılaştırılmıştır. Bitkisel sıvıların neme doygunluk seviyelerinin daha iyi olduğu ve delinme gerilimlerinin mineral yağa göre biraz daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Havanın varlığı altında bitkisel yağların yaşlandırılması oksidasyona neden olmaktadır ve viskozite değerleri artmaktadır. Bu nedenle bitkisel sıvıları transformatörlerde kullanırken oksijenden arındırmak gerekmektedir. Sonuç itibarıyla yürütülen deneylerden elde edilen veriler bitkisel yağların güç transformatörlerinde kullanılabilir olduğunu göstermektedir [21].

Mineral yağların ve diğer yalıtım sıvılarının yaşlandırmaya bağlı performans ve değişimleri [22-25] yayınlarında karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Literatür araştırmaları sonucunda mineral yağların dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısının gerilim, sıcaklık ve frekans ile değişimi hakkında yeterli araştırma bulunmadığı görülmüştür. Bu tez çalışmasında, gerçekleştirilen deneysel uygulamalar ile mineral yağın dielektrik kayıp faktörü ve bağıl dielektrik katsayısı gerilim, sıcaklık ve frekans değişimlerine bağlı olarak IEC 60247 standardına uygun

olarak ölçülmüştür. Yalıtım yağında meydana gelen dielektrik güç kayıpları üzerinde gerilimin, sıcaklığın ve frekans değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Yapılan ölçümler ve analizlerle gerilim, sıcaklık ve frekans parametrelerinin yalıtım yağının dielektrik özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Yüksek gerilim tesislerinin sürekliliği, güvenliği ve ekonomik işletimi açısından yalıtım seviyesi büyük öneme sahiptir. Bu sebeple, yüksek gerilim tesislerinin işletiminde yalıtım kalitesi üzerinde durulması gereken en önemli parametrelerden biridir. Yalıtım sıvılarının zamanla veya çalışma koşulları nedeniyle özelliğini kaybetmesi, kullanıldıkları cihazlarda arızaların oluşmasına ve güç sisteminin güvenilirliğinin ve güvenliğinin bozulmasına yol açtığı bilinmektedir.

Bu tez çalışması ile transformatörler, reaktör, geçit izolatörü, kademe değiştirici ve kesicilerde kullanılan mineral yağların delinme dayanımı, dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısını etkileyen parametrelerin araştırılması amaçlanmıştır. Mineral yağının delinme gerilimi karakteristiğini belirleyen elektrot şekli, elektrot aralığı, gerilim artış hızı, nem ve sıcaklık faktörlerinin etkilerinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla, ASTM D877 ve ASTM D1816 standartlarına göre ölçümler yapılarak elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Sıcaklığa, frekansa ve uygulanan gerilim seviyesine bağlı olarak yalıtım yağlarının dielektrik kayıp faktörü, meydana gelen dielektrik güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısı değişmektedir. IEC 60247 standardı göz önüne alınarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile bu etkilerin ortaya konulması hedeflenmiştir.

1.3 Orijinal Katkı

Bu tez çalışmasında, yüksek gerilim tesislerinde kullanılan yalıtım sıvılarından biri olan mineral yağın çeşitli faktörlere bağlı olarak delinme gerilimi, dielektrik kayıp faktörü, dielektrik güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısı değerleri analiz edilmiştir.

30°C ile 110°C arasındaki ölçüm değerlerinde sıcaklık arttıkça mineral yağın delinme geriliminin arttığı belirlenmiştir. Yağa uygulanan 0,5 kV/s, 2 kV/s ve 3kV/s alternatif

gerilim artış hızlarında, gerilim artış hızı arttıkça delinme geriliminin de arttığı gözlemlenmiştir. VDE elektrot geometrisinin 1 mm, 2 mm ve 2,5 mm elektrot aralıkları için ölçülen delinme geriliminin disk elektrodunkinden daha büyük olduğu görülmüştür.

Yağın dielektrik kayıp faktörünün, 1 kV-12 kV arası artan alternatif gerilim seviyesi ve 30°C-60°C arası sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı, 50 Hz-400 Hz arası frekans artışına bağlı olarak ise genelde azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

Yalıtım sıvısında meydana gelen dielektrik güç kaybının, 1 kV-12 kV arası artan alternatif gerilim seviyesi, 30°C-60°C arası sıcaklık artışı ve 50 Hz-400 Hz arası frekans artışına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir.

Mineral yağın bağıl dielektrik katsayısının, 1 kV-12 kV arası alternatif gerilim ve 50 Hz-400 Hz arası frekans değişimlerinden etkilenmediği, 30°C-70°C arası artan sıcaklık ile çok az azaldığı tespit edilmiştir.

BÖLÜM 2

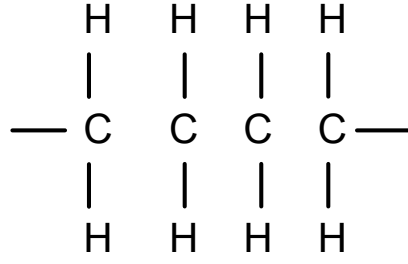
SIVI YALITKAN ÇEŞİTLERİ

Yüksek gerilim tesislerinde süreklilik, yalıtım seviyesi, güvenlik ve ekonomiklik büyük öneme sahiptir. Bu sebeple, yüksek gerilim tesislerinin işletiminde yalıtım kalitesi, üzerinde durulması gereken en önemli parametrelerden biridir. Bilindiği üzere, yüksek gerilimlere karşı yalıtımın sağlanması için katı, sıvı ve gaz yalıtım malzemeleri kullanılır [26]. Sıvı yalıtkanlar transformatör, kesici, güç kondansatörü, güç kablosu ve geçit izolatörü gibi yüksek gerilim cihazlarında kullanılmaktadır. Kullanım amaçları, yalıtım, ısı transferi ve ark söndürücü olarak sıralanabilir.

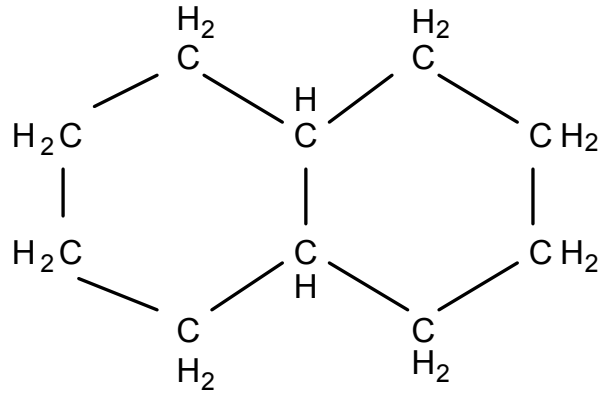
Yalıtım sıvıları kimyasal yapılarına göre sınıflandırılmaktadırlar. Yalıtım sıvıları genel olarak mineral yağlar, yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlar, silikonlu sıvılar ve ester bazlı sıvılar olmak üzere gruplandırılabilir [10].

2.1 Mineral Yağlar

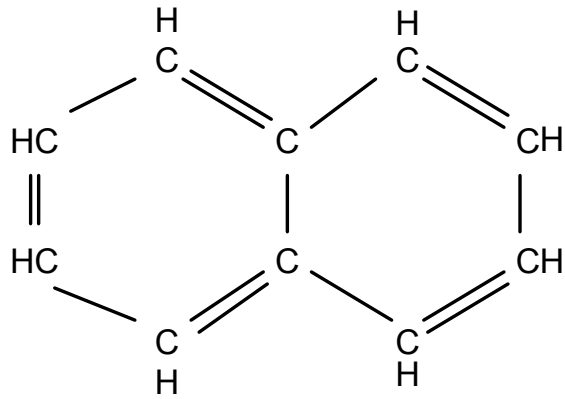
Mineral yağlar ham petrolün işlenmesi ile elde edilirler. Başlıca hidrojen ve karbon moleküllerinin farklı oranlarda bağlanması ile parafinik, naftanik ve aromatik yapı olarak isimlendirilirler. Mineral yağlar düşük viskozite, iyi oksidasyon kararlılığı, ulaşılabilirlik ve düşük maliyetli oluşundan dolayı 100 yıldan daha fazladır güç sistemi donanımlarında ısı transferini sağlamak ve yalıtım amacıyla tercih edilmektedir [27]. Mineral yağın moleküler zincir yapısı Şekil 2.1’de gösterilmektedir [28]. Şekil 2.1’de verilen parafinik, naftanik ve aromatik yapıdaki yağların içeriklerindeki parafin oranına göre sınıflandırılması da Çizelge 2.1’de verilmiştir [29].



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. 1 Mineral yağın hidrokarbon moleküllerinin yapısı
 (a) Parafinik zincir yapısı (b) Naftanik zincir yapısı (c) Aromatik zincir yapısı

Çizelge 2. 1 Mineral yağın parafin miktarına göre sınıflandırılması

Parafin bağlı karbon atomu (C_p %)	Yağ tipi
42-50	Naftanik
50-56	Aromatik
56-65	Parafinik

Parafin bazlı yağlar, soğuk çevre şartlarında kullanılacak ise yağdaki mum oranının azaltılması gereklidir. Bu tip yağlarda, mum miktarı fazla olduğu için düşük sıcaklıklarda transformatörde yalıtım yağının kolayca akması zorlaşacaktır. Naftanik yapıdaki yağların akma noktaları parafinlere göre daha düşüktür. Bu nedenle, transformatörlerde daha iyi bir ısıl soğutma sağlamaktadır. Aromatik yapıdaki moleküllerin fiziksel ve kimyasal özellikleri parafinik ve naftanik moleküllerinden farklıdır [30]. Bu moleküller mono ve poliaromatik molekül olarak ikiye ayrılırlar. Poliaromatik moleküle sahip yağlar monoaromatiklerden daha iyi gaz soğurma kapasitesine sahiptir. Yağda bulunan poliaromatik bileşik ile yağın parlama noktası artmaktadır [31].

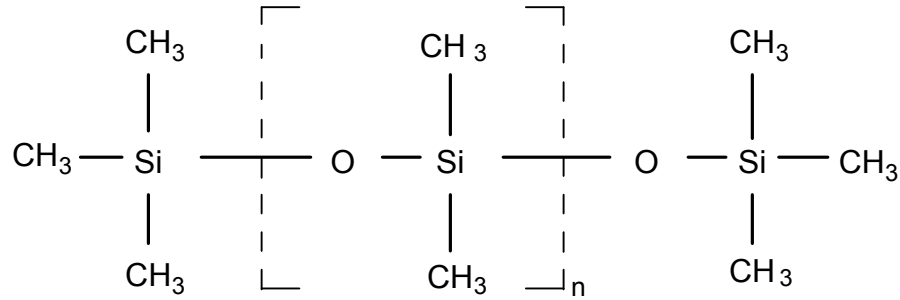
Mineral yağlar kullanım alanı geniş olmasına rağmen parlama ve yanma noktalarının düşük olması ve doğada ayrışma problemlerinden dolayı çevre ve insan sağlığı açısından gerekli hassasiyeti karşılayamamaktadır. Bu nedenle günümüzde organik ve çevre dostu alternatif sıvıların araştırmaları devam etmektedir.

2.2 Silikonlu Sıvılar

Silikonlu sıvıların molekülleri silikon, oksijen, karbon ve hidrojen atomlarından oluşur [32]. Bu sıvılar 150°C 'deki uzun süreli ısı kararlılıkları ve yaklaşık 340°C 'deki alevlenme noktalarıyla yangın tehlikesi ve patlama riski olan yerlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl ve kimyasal kararlılığın yanında yüksek sıcaklıklarda da iyi oksidasyon direncine sahiptirler [28].

Bu sıvılar kimyasal açıdan polidimetilsiloksan olarak bilinen sentetik sıvılardır. Doğaya döküldüğünde ayrışmaya dirençli ve mineral yağlara göre pahalı olmaları nedeniyle kullanım alanları dardır [33]. Şekil 2.2'de polidimetilsiloksanın (PDMS) kimyasal yapısı

gösterilmektedir. Burada, n zincir sayısı olup 10 ile 1000 arasında değişmektedir. Transformatörde kullanılan silikon yağlar için n değeri genellikle 50 civarındadır [32].



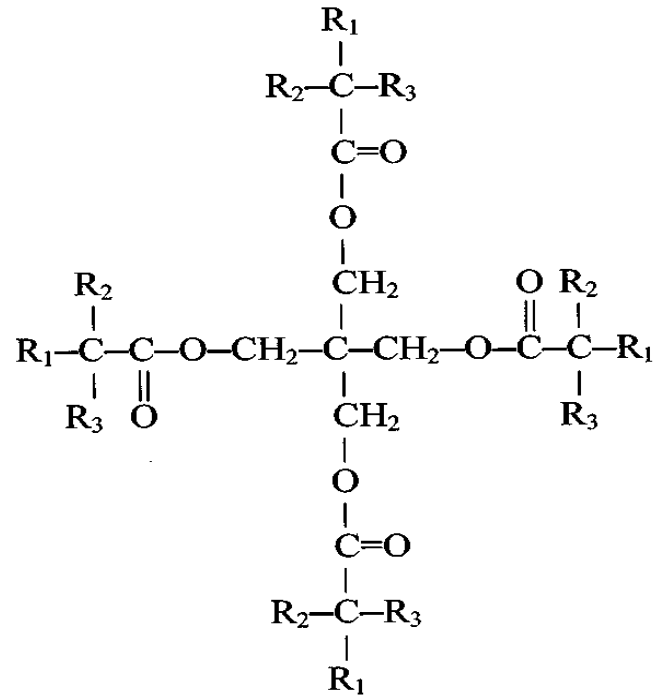
Şekil 2. 2 Silikonlu sıvının molekül yapısı

2.3 Esterler

Ester sıvıları, organik asit ve alkolden sentezlenmiş bileşiklerdir [34]. Genelde doğal ester ve sentetik ester olmak üzere ikiye ayrılırlar. Mineral yağlara alternatif olarak transformatörlerde bir ısı transfer sıvısı olarak doğal esterler 1990'ların başlarında araştırılmaya başlanmış ve 1999'dan sonra endüstride kullanılmaya başlanmıştır. Sentetik esterler ise 1984 yılından itibaren yalıtım ve soğutma sıvısı olarak elektrik tesislerinde kullanılmaktadır [35], [36].

2.3.1 Sentetik Esterler

En yaygını polyol (pentaerythritol) olan bu yalıtım sıvıları iyi dielektrik özelliklere sahiptirler. Bu tip yalıtım sıvıları, mineral yağ ve yüksek moleküler ağırlıklı hidrokarbonlu (HMWH) yağlardan daha çevre dostudur. Yani doğada ayrışabilir oluşları önemli derecede iyidir [34]. Sentetik esterler mükemmel bir ısı kararlılığı ve alevlenme noktasına sahiptir. Mineral yağlara göre çok daha az zehirli duman yaymaktadırlar. Transformatör yalıtımı için kullanılan en yaygın sentetik sıvılar Midel 7131 ve BecFluid 9902 ürünleridir. Diester, ftalat, trimelitat, piromelitat, dimer asit ester, polyol ve polioletat olmak üzere başlıca yedi çeşit sentetik ester vardır. Sentetik polyol esterinin kimyasal yapısı Şekil 2.3'de gösterilmektedir [37].



Şekil 2. 3 Sentetik polyol esterin kimyasal yapısı

2.3.2 Doğal Esterler

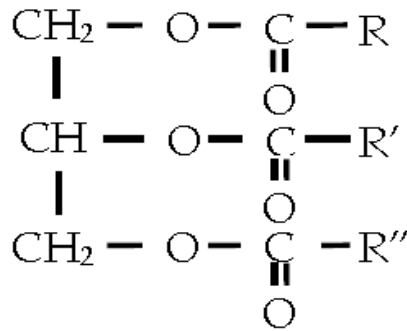
Doğal ester tek, çift ve üçlü doymamış yağ asitleri ve doymuş yağ asitlerinden meydana gelirler. Doymuş yağ asitleri yüksek viskozite değerine sahip olmaları haricinde iyi kimyasal kararlılığa sahiptirler. Üçlü doymamış yağ asitleri düşük viskoziteye sahip olmasına karşın oksitlenmeye karşı dirençsizdir [38].

Yüksek oleik yağlar, 18 karbon atomu içeriğiyle (C-18) yüksek oranda tekli doymamış yağ asidine sahiptir. Bu nedenle, daha yüksek oranda oksidasyon kararlılığı ve daha düşük akma noktası için yüksek oranda tekli doymamış yağ asidi yoğunluğuna sahip bir yalıtım sıvısı kullanmak en iyi tercihtir [39]. Çizelge 2.2’de farklı bitkisel yağların bileşimleri gösterilmektedir [40]. Yağ asitleri bileşiklerinin farklı doyma seviyelerine sahip olması nedeniyle, yalıtım sıvısı seçiminde bu özellikler dikkate alınması gerekmektedir.

Çizelge 2. 2 Bazı bitkisel sıvıların yağ asidi bileşimi

Bitkisel Sıvı	Doymuş Yağ Asidi (%)	Doymamış Yağ Asidi (%)		
		Mono-	Di-	Tri-
Kanola yağı*	7.9	55.9	22.1	11.1
Mısır yağı	12.7	24.2	58	0.7
Pamuk yağı	25.8	17.8	51.8	0.2
Yerfıstığı yağı	13.6	17.8	51.8	0.2
Zeytin yağı	13.2	73.3	51.8	0.2
Aspir yağı	8.5	12.1	74.1	0.4
Aspir yağı, yüksek oleik	6.1	75.3	14.2	-
Soya yağı	14.2	22.5	51	6.8
Ayçiçeği yağı	10.5	19.6	65.7	-
Ayçiçek yağı, yüksek oleik	9.2	80.8	8.4	0.2
* Yakın geçmişte % 75'in üzerinde tekli doymamış içeriğiyle kanola yağı geliştirildi.				

Doğal esterler, alkol gliserol gibi yemeklik tohum yağından üretilir ve trigliseritler olarak bilinirler. Şekil 2.4'de doğal ester yağının kimyasal yapısı gösterilmektedir. Burada R, R' ve R'' aynı veya farklı biçimlerde oluşan yağ asidi zincirlerini gösterir [34]. Yani yağda bulunan 8 ile 22 arasında karbon atomu zincirini (C₈-C₂₂) temsil etmektedir.



Şekil 2. 4 Doğal ester trigliseritin yapısı

2.4 Yüksek Molekül Ağırlıklı Hidrokarbonlu Sıvılar (HMWH)

Bu sıvıların kimyasal yapıları petrol-bazlı mineral yağlara benzemektedir. Ancak, moleküler ağırlıkları daha yüksektir. Bu nedenle, yanma noktaları mineral yağlara göre daha yüksektir [41].

Yanma sıcaklığı 300°C'nin üstünde olan bu sıvılar National Electric Code tarafından "daha az yanıcı" olarak sınıflandırılmaktadır. Ayrıca, bu sıvılar yüksek sıcaklıklı hidrokarbon sıvıları olarak da bilinmektedir. Doğal ve sentetik yapıda olabilirler. Moleküler ağırlıkları yüksek olduğu için viskoziteleri de diğer yalıtım yağlarından yüksektir. Yüksek viskozite değerlerinden dolayı ısı soğutmalı transformatörlerde daha geniş soğutma kanalları tasarlanarak sıvının viskozitesinden kaynaklanan düşük akışkanlığı telafi edilebilir [33], [42].

2.5 Sıvı Yalıtkanların Karşılaştırılması

Yüksek gerilim tesislerinde güç donanımlarında yalıtım ve ısı transfer sıvısı olarak çeşitli yalıtım sıvıları kullanılmaktadır. Her birinin elektriksel, fiziksel ve kimyasal parametrelere göre avantaj ve dezavantajları vardır. Çevreye zararsız olma, ısı ve kimyasal kararlılık, parlama noktası, delinme gerilimi, maliyet ve kullanım amacı tercih yapılırken göz önüne alınan özelliklerden bazılarıdır. Yalıtım sıvılarının oksidasyona karşı kararlılıkları, silikonlu sıvılar > sentetik esterler > mineral yağlar > doğal esterler şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca yalıtım sıvılarının nem emme kapasiteleri, sentetik esterler > doğal esterler > silikolu sıvılar > mineral yağlar olarak sıralanmaktadır. Ester yağları farklı sıcaklıklarda mineral yağlardan çok daha fazla nem emebilirler. Bazı yalıtım sıvılarının karakteristiklerinin karşılaştırılması Çizelge 2.3'de ve bu yalıtım sıvılarının uygulama alanları Çizelge 2.4'de verilmiştir [10], [27], [42].

Çizelge 2. 3 Yalıtım sıvılarının karşılaştırılması

Kriter	Mineral Yağ	HMWH	Silikonlu Sıvılar	Doğal Ester	Sentetik Ester
Yenilenebilir Oluşu	<%30	%20	%0	%97-99	%80
Yoğunluk (kg/dm ³), (20°C) ASTM D1298	0,83-0,89	0,86-0,90	0,96-1,1	0,87-0,92	0,9-1
Parlama Noktası (°C) ASTM D92	110-175	275-285	300-310	310-343	250-310
Yanma Noktası (°C) ASTM D92	110-185	300-312	330-350	300-369	300-322
Akma Noktası (°C) ASTM D97	-30 ile -63	-20 ile -24	-50 ile -60	-10 ile -33	-40 ile -60
Kinematik Viskozite (cSt),(40°C) ASTM D445	3-16	110-130	35-40	16-50	14-29
Delinme Gerilimi (kV),(20°C) ASTM 1816	45-85	40-52	35-60	49-97	43-70
Dielektrik Kayıp faktörü (%),(25°C) ASTM D924	0,005-0,05	0,010-0,05	0,010	0,001-0,003	0,0006-0,001
Bağıl Dielektrik Katsayısı (20°C) IEC 60247	2,1-2,5	2,2	2,6-2,9	2,9-3,3	3-3,5

Çizelge 2. 4 Güç donanımlarında kullanılan yalıtım sıvılarının uygulama alanları

Yalıtım sıvısı	Güç Trafosu ve Reaktör	Dağıtım Trafosu	Cer Trafosu	Ölçü Trafosu	Geçit İzolatörü	Kademe Değiştirici	Yağlı Kesici	Kondansatör	Kablo
Mineral Yağ	X	X	X	X	X	X	X		
Silikonlu Sıvılar		X	X			X			
HMWH		X				X			
Doğal Esterler		X						X	
Sentetik Esterler		X	X			X			
Sıvıların Karıştırılması		X						X	X

SIVI YALITKANLARA AİT PARAMETRELERİN TANITILMASI

Bu bölümde sıvı yalıtkanlara ait delinme gerilimi, nem etkisi, dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) ve bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) gibi parametreler tanıtılmıştır.

3.1 Sıvılarda Delinme

Elektrik tesislerinde kullanılan katı, sıvı ve gaz yalıtkan malzemelerin delinme gerilimi değerleri işletmenin güvenirliliği, sürekliliği ve uzun ömürlü olması açısından büyük öneme sahiptir. Bu maddelerin delinme dayanımının belirlenmesi ve konu ile ilgili teorilerin geliştirilmesi amacıyla pek çok çalışma yapılmıştır.

Gaz ve katı yalıtkan maddeler ile ilgili yapılan çalışmalarda elde edilen bilgilere oranla sıvı yalıtkanlar için gerçekleştirilen çalışmalarda yeterli ilerleme sağlanamamıştır. Bunun nedeni ise yağların moleküler yapılarının gazlar ve katı maddelere oranla daha karmaşık ve düzensiz olmasıdır. Elektro-optik tekniklerin geliştirilmesi yağların delinmesinin açıklanmasında önemli ilerlemeleri sağlamıştır. Aşırı zorlanmalara maruz kalan elektrotta elektrik alan içerisinde, yağın buharlaşması nedeniyle kabarcıkların oluştuğu ve daha sonraki deşarjlarda yağın yapısında bazı dallanmaların olduğu görülmüştür. Genişleyen bu dallanmaların diğer elektroda ulaşması sonucunda delinme olayı gerçekleşir [28].

Yağda bulunabilen katı parçacıklar, gaz kabarcıkları ve nem içeriğinin delinmenin başlamasında önemli etkileri vardır. Sıvı yalıtkanlarda delinmenin açıklanması için geliştirilen yaygın teoriler;

- a) Asılı Parçacık Teorisi
- b) Kabarcık Teorisi
- c) Elektronik Delinme Teorisi

olarak sıralanabilir [43].

3.1.1 Asılı Parçacık Teorisi

Yalıtım sıvısının filtre edilmesi sırasında veya işletmedeyken kâğıt yalıtkanlardan kopan elyafli parçacıklar sebebiyle yalıtkan yağlara parçacıklar karışabilmektedir. Yalıtım yağı ve test kısımları iyi temizlense dahi, mikro düzeyde istenmeyen kirletici parçacıklar sistemden uzaklaştırılmaz. Özellikle, parçacıklar nemli oldukları zaman, dielektrik sabiti büyük bir dipol oluşturarak elektrik alan yönünde hareket eder ve iletken bir köprü oluştururlar. Parçacıkların dielektrik sabitleri ε_2 , yağın dielektrik sabiti ε_1 'ye göre daha büyüktür. Parçacığın yarıçapı r , uygulanan elektrik alan E ise parçacığı elektrik alanın maksimum olduğu yönde hareket ettiren kuvvet;

$$F = \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \cdot \text{grad}(E^2) \quad (3.1)$$

ifadesi ile bulunur. Eğer $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$ giderse;

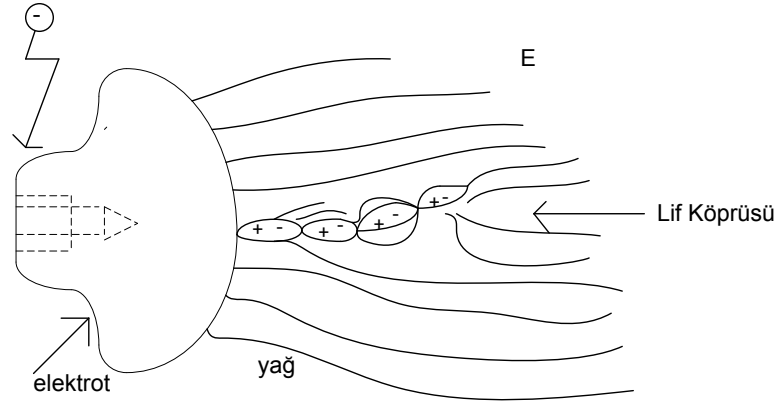
$$F = \frac{1}{2} \cdot r^3 \cdot \text{grad}(E^2) \quad (3.2)$$

olacaktır. Eğer partükül bir lif olursa yüzeyindeki nem nedeniyle kutuplanarak elektrik alan yönünde hareket eder. Yarıçapı r olan bir lifin iki ucundaki yük denklem (3.3) ile hesaplanabilir.

$$\pm q = \pi \cdot r^2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \cdot \varepsilon_0 \cdot \text{grad}(E) \quad (3.3)$$

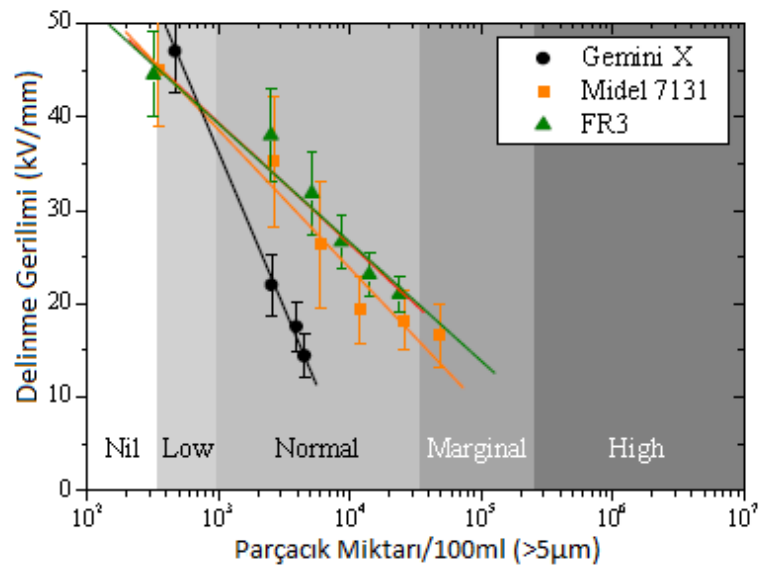
$$F = r^3 \cdot \varepsilon_0 \cdot \text{grad}E \quad (3.4)$$

olur. Katı parçacıkların veya liflerin elektroda ulaşması sonucunda Şekil 3.1'de gösterildiği gibi dışa doğru bir zincir oluşur ve bölgesel elektrik alan artmaya başlar. Bu durumda, ısınan zincir halkası iletken köprü görevi görecek ve yağda delinme gerçekleşecektir [28], [44].



Şekil 3. 1 Kutuplanmış liflerin ve diğer parçacıkların zincir oluşturması

Yalıtım sıvıları iyi filtre edilseler bile işletmede kullanılırken bazı küçük iletken parçacıklar sıvıya karışabilir. Bu parçacıkların boyutunun ve sayısının yağın delinme gerilimi üzerine önemli etkileri vardır. X.Wang ve arkadaşlarınca gerçekleştirilen çalışmada, istenmeyen parçacıkların mineral, ester ve sentetik ester yağların AC delinme gerilimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ölçümler ASTM D 1816 standardı dikkate alınarak yapılmıştır. Elde edilen verilerin analizi sonucunda, parçacık içeriğinin artışı ile mineral yağdaki delinme gerilimindeki azalmanın doğal ester ve sentetik ester yağlarından daha çok olduğu görülmüştür. Esterlerin delinme dayanımının, parçacık içeriğine nispeten daha duyarsız olduğundan mineral yağlara göre daha fazla parçacık içeriğine müsaade edebilmektedir. Yalıtım sıvılarının parçacık miktarına bağlı olarak delinme gerilimi değişimi Şekil 3.2’de gösterilmektedir [45].

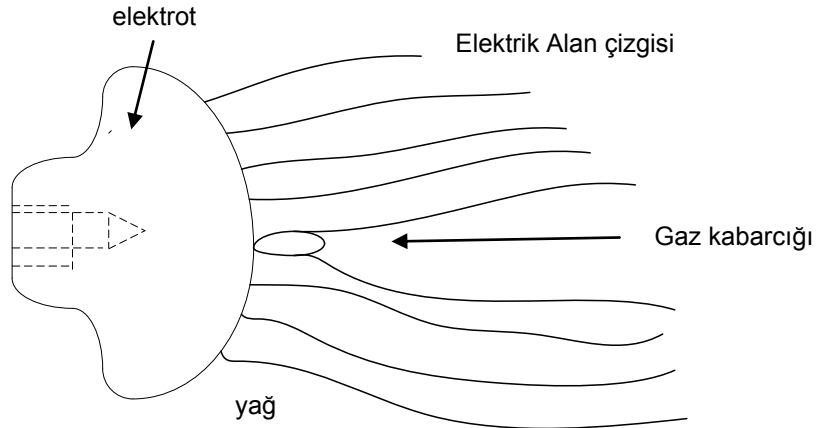


Şekil 3. 2 Bakır parçacık miktarına bağlı delinme gerilimi

3.1.2 Kabarcık Teorisi

Yalıtım sıvılarında gaz habbeciklerinin oluşmasının çeşitli nedenleri vardır. Bu gaz habbeciklerinin sebebi, yağın maruz kaldığı ısı ve elektrik büyüklüğünden dolayı açığa çıkan hidrokarbon gazlar, atmosferden emilen hava, ani sıcaklık değişimlerinden dolayı buharlaşmış su ve yağ molekülü olabilir. Yalıtım yağlarında çözünmüş olarak bulunabilen gazlar doyma seviyesine ulaştığı zaman yağda gaz habbecikleri oluşur. Gazın varlığı yağın delinme gerilimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Yalıtım yağının delinme gerilimi gazın hem miktarına hem de tipine bağlıdır [46].

Elektrik alana maruz kalan gaz tabakası iyonize olur ve bu iyonlar elektrik alanın maksimum olduğu yerde yani elektrotlar arasında küre şeklinde gaz habbecikleri meydana getirir. Korona boşalması, daha yüksek elektrik alan ve daha düşük elektrik dayanımından dolayı gaz kabarcıklarında başlar [47]. Bu kabarcıklar iletken bir kanal oluşturarak delinmenin daha düşük gerilim seviyelerinden başlamasına neden olur.



Şekil 3. 3 Bir gaz kabarcığının oluşumu

Hava veya gaz kabarcıkları düzgün elektrik alanda (E) yalıtım yağlarındaki deşarjların sebeplerinden biridir. Küresel bir hava kabarcığı için elektrik alan, denklem (3.5) ile hesaplanabilir [48].

$$E_b = \frac{3\varepsilon_r \cdot E}{2\varepsilon_r + 1} \quad (3.5)$$

Burada, E yalıtım yağında kabarcık olmadığı durumdaki elektrik alan ve ε_r ise yağın bağlı dielektrik katsayısıdır.

3.1.3 Elektronik Delinme Teorisi

Elektrotlar arasında oluşan elektrik alandan dolayı yalıtım sıvısında bulunan elektronlar ortalama bir enerjiye sahip olurlar ve enerjileri bir gauss dağılımı göstermektedir. Bu elektronlar sıvı moleküllerinin atomları ile çarpışarak enerjilerini paylaşırlar. Çarpışmanın etkisi o bölgede yerel ısınmalara neden olur. Eğer çarpışmalar süresince yeterli enerji yayılırsa, elektronlar çarpışma iyonizasyonuna sebep olabilirler. Bunun sonucunda sıvı içerisindeki enjeksiyon bölgesinde yani düşük yoğunluklu bölgede streamer saçaklar (ışık huzmesi) ortaya çıkar. Streamer, katotdan ortaya çıkıyorsa “negatif streamer”, anottan ortaya çıkıyorsa “pozitif streamer” olarak adlandırılır. Gerilim yeterli bir büyüklüğe yükseldiğinde saçaklar daha büyük bir yoğunlukta çoğalırlar ve en sonunda diğer elektrot ucuna ulaşarak delinmeye neden olur [49], [50].

3.2 Yalıtım Yağında Nemin Etkisi

Yağdaki delinme önemli ölçüde nem ve kirletici parçaçıkların miktarına bağlıdır. Aynı şekilde bu faktörler yağdaki dielektrik kayıpları ve yağın öz direncini de etkiler.

Yalıtım yağında suyun bulunma halleri;

- Çözünmüş durumda
- Küçük damlacıklar olarak (emülsiyon)
- Kabin dibinde büyük damlalar halinde

olabilir.

Mineral yağda bulunan suyun (nemin), sıcaklığa bağlı olarak maksimum çözünürlüğü

$$\log W_s = [7.09 - \frac{1567}{T}] \quad (3.6)$$

ile hesaplanabilir. Bu denklemde, W_s yağ içindeki suyun çözünürlüğü (ppm) ve T mutlak sıcaklıktır ($^{\circ}K$). Küçük miktarda bir su damlacığı yağın dielektrik dayanımını azaltmada belirgin bir etkiye sahiptir. Çözünmüş suyun etkisi çok azdır. Nem içeriği, emülsiyon durumuna yani küçük su damlacığı haline geçtiğinde, su tanecikleri yağda bulunan bir çözelti durumundadır. Bu çözelti delinme dayanımını önemli derecede azaltır [28].

Ömür kısaltma parametresi olan nemin, yalıtım sistemi üzerinde oluşturduğu etkilerin bazıları;

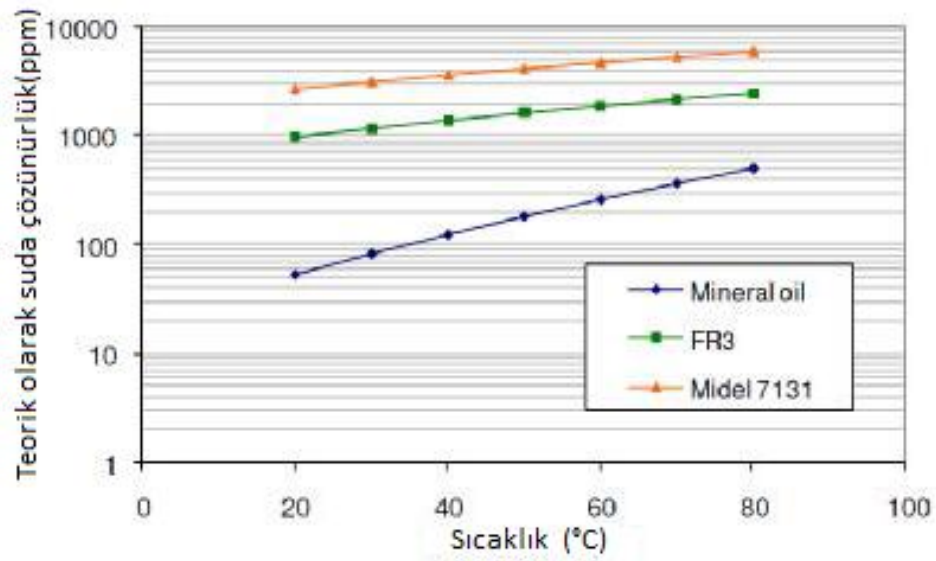
- Yalıtım sisteminin delinme dayanımını azalır [51], [52],
- Elektriksel iletkenlik ve dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$) artar [53],
- Katalizör gibi davranarak yalıtım maddelerinin yaşlanması hızlandırır,
- Yerel ısınmalara neden olabilir,
- Yağın nem doygunluğu aşırsa yüksek gerilim bölgesinde kısmi boşalmalar meydana gelebilir [54],

olarak sıralanabilir.

Su, kutuplu bir moleküldür. Su molekülünde (H_2O), oksijen atomu kısmen negatif, hidrojen atomu ise kısmen pozitif yüklüdür. Eğer atomlar arası elektronegatiflik farkı yani kutuplaşma yok ise bu tür moleküllere kutupsuz moleküller denir. Aynı tür atomlardan oluşan moleküller kutupsuz özellik gösterirler. Bazen birden fazla atomdan oluşan moleküllerde, atomlar arasında elektronlar eşit ve dengeli dizildiklerinde oluşan moleküle de kutupsuz denir. Bu sebeplerden dolayı, karbon ve hidrojen atomundan oluşan moleküller (hidrokarbonlar) genelde kutupsuz moleküldür [55].

Kutuplu yapıli bileşiklerde moleküllerin birbirini çekme kuvveti oldukça iyidir. Pozitif yüklü kısım negatif yüklü kısmı çeker. Bu durumda, moleküller arasında bir ağ yapısı oluşur. Kutupsuz yapıdaki bir molekül kutuplu yapıdaki moleküli çözemez. Kutuplu çözücüler kutuplu çözünenleri ve kutupsuz çözücüler de kutupsuz çözünenleri çözerler [56].

Yalıtım yağında suyun bulunma durumu sıvı moleküllerinin kutupluluğuna bağlıdır. Su moleküllerinin kutuplu moleküllerle bağlanmaları daha kolaydır. Bu durumda, kutuplu yapıli sıvılar daha çok çözünmüş su içeriği tutabilirler. Ester yağları, kutuplu yapılarından dolayı mineral yağlardan daha fazla nem emebilir. D. Martin ve arkadaşlarınca yapılan çalışmada mineral ve ester yağların sıcaklığa bağlı neme doygunluk seviyeleri araştırılmıştır. Şekil 3.4'de gösterildiği gibi ester yağlarının nemi emme kapasitelerinin daha iyi olduğu görülmüştür [46].



Şekil 3. 4 Transformatör sıvılarının sıcaklığa bağlı suya doygunluk seviyeleri

3.3 Yalıtkan Sıvılarda Elektriksel Parametreler

3.3.1 Bağlı Dielektrik Katsayısı

Bir yalıtım sıvısının dielektrik katsayısının daha büyük olması, onun daha az elektrik alan zorlanmalarına maruz kalacağını ifade etmektedir. Bu durum ise yalıtım kalitesi için avantajdır.

Bir yalıtım yağının bağlı dielektrik katsayısı,

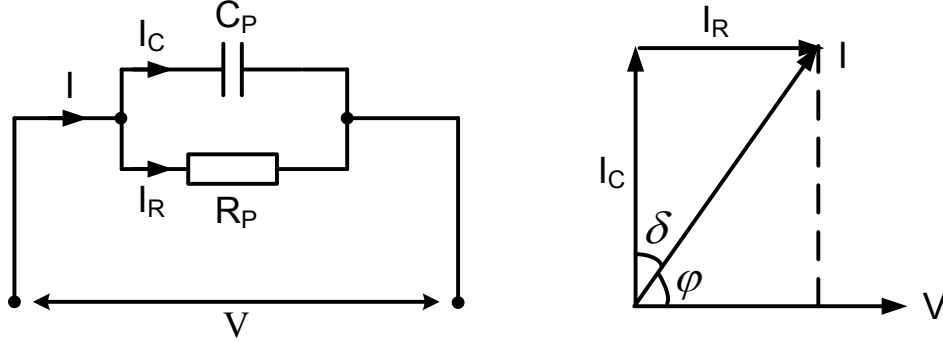
$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanır. Bu eşitlikte, C_x yağ dielektrikli kapasiteyi ve C_0 ise vakum dielektrikli kapasiteyi ifade etmektedir.

Yalıtım yağını oluşturan moleküllerin geometrik kimyasal yapısı ne kadar dengesiz olursa sıvının da kutupluluk derecesi o kadar büyük olur. Sıvının kutupluluk derecesi, sıvının moleküllerini birleştiren tüm bağ momentlerinin vektörel toplamı olan dipol momentiyile belirlenir. Dipollerin oluşumunda, elektrik alan altında molekülleri kutuplanmaya daha yatkın olan sıvının dielektrik katsayısı daha büyük olur. Daha yüksek ϵ_r değerine sahip malzeme daha düzgün bir elektrik alan dağılımı gösterecektir [57].

3.3.2 Dielektrik Kayıp Faktörü

Bir dielektrik malzemedeki kayıplar elektrik eşdeğer devre modeli kullanılarak bulunabilir. Yalıtım yağlarında dielektrik kayıp faktörünün hesaplanması için genellikle Şekil 3.5’de verilen paralel devre kullanılır.



Şekil 3. 5 Paralel eşdeğer devre ve fazör diyagramı

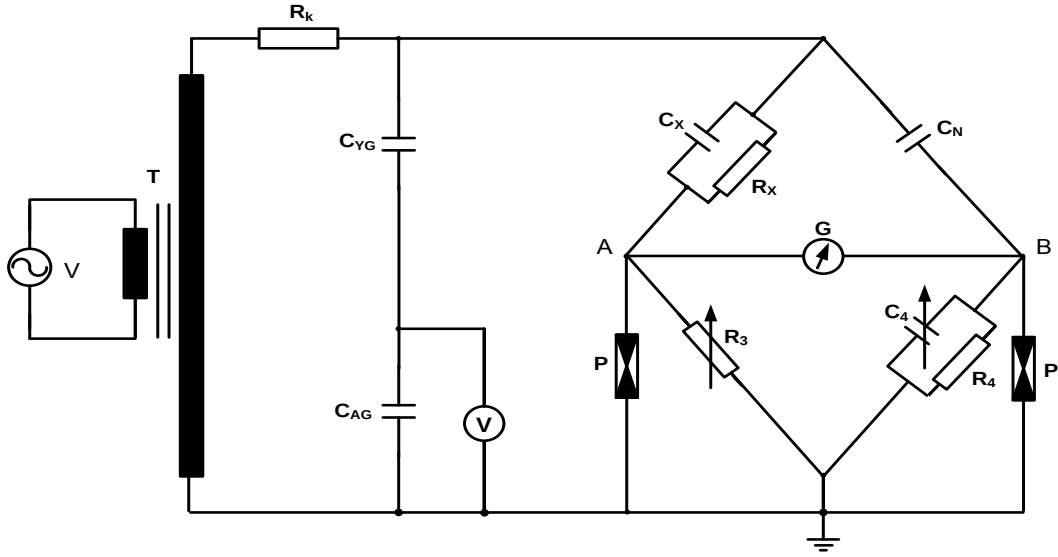
Dielektrik malzemeye, V gerilimi uygulandığı zaman R direncinden geçen akım $I_R=V/R$ ve C kapasitesinden geçen akım $I_C=j.\omega.C.V$ olur. Fazör diyagramından görüleceği üzere $\tan\delta=I_R/I_C$ değerine eşit olacaktır. Daha sonra I_R ve I_C değerleri yerine yazılırsa dielektrik kayıp faktörü için denklem;

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \quad (3.8)$$

elde edilir. Dielektrik kayıp faktörü frekans artışı ile genelde azalmaktadır. IEC 60247 standardına göre bir frekanstaki $\tan \delta$ değeri biliniyorsa başka frekanstaki değeri;

$$\tan \delta_{f_1} = \left(\tan \delta_{f_2} \right) \cdot \frac{f_2}{f_1} \quad (3.9)$$

eşitliği kullanılarak bulunabilir [58]. Dielektrik malzemelerin, elektriksel özelliklerini (R , C , $\tan\delta$, ϵ_r) belirleyebilmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunların en bilinen ve yaygın olarak kullanılanlarından biri ise Schering köprüsü kullanarak yalıtkan malzemenin R , C ve $\tan\delta$ değerinin belirlenmesidir. Malzemenin paralel eşdeğeri modellendiği durumda Schering köprüsü eşdeğer devresi Şekil 3.6’da verilmiştir [59].



Şekil 3. 6 Paralel eşdeğer devre ve Schering köprüsü

Şekil 3.6’da verilen durumda kullanılan elemanlara ait bilgiler aşağıda verilmektedir.

- C_X ve R_X : Ölçmek istediğimiz malzemenin kapasite ve direnç değerleri
- C_N : Standart kayıpsız kondansatör
- R_4 : Sabit direnç
- R_3 ve C_4 : Köprünün dengesini ayarlamak için ayarlanabilir kapasite ve direnç
- R_K : Koruma direnci
- C_{YG} ve C_{AG} : Kapasitif gerilim bölücü devre (dönüştürme oranı $C_{YG} + C_{AG} / C_{YG}$ şeklinde hesaplanır.)
- G: Galvanometre
- P: Parafudr

R_3 ve C_4 elemanları ayarlanarak Schering köprüsü denge haline getirilir. A ve B noktalarının potansiyelleri birbirine eşit olduğunda galvanometreden akım geçişi sıfır olacaktır. Denge durumunda, denge şartı olarak isimlendirilen,

$$Z_X \times Z_4 = Z_N \times Z_3 \quad (3.10)$$

eşitliği sağlanır. Bu denklemin çözümü ile malzemeye ait C_X ve R_X değerleri hesaplanarak dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$) bulunabilir.

3.3.3 Dielektrik Güç Kaybı

Dielektrik malzemeler gerilime maruz kaldığında ısı şeklinde ortaya çıkan bir aktif güç kaybı meydana gelir. Dielektrik güç kaybı,

$$P = \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \tan \delta \quad (3.11)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada, dielektrik güç kaybının $\tan \delta$ ile doğru orantılı olduğu görülmektedir. İdeal bir dielektrikte akım ile gerilim arasında 90° faz farkı vardır. Ancak gerçekte böyle değildir. Gerçek bir dielektrik malzemedeki bu açı 90° 'nin altındadır. Sapmayı ifade etmek için kullanılan δ açısı kayıp açısı olarak isimlendirilmektedir. Dielektrik kayıp faktörü yalıtım yağına uygulanan gerilim ile geçen akım arasındaki kayıp açısının tanjantına denir [59], [60]. Dielektrik kayıp faktörü, yalıtım yağının serviste kirlenme ve yaşlanmasının sonucu olarak yağın kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Düşük dielektrik kayıp faktörüne sahip yağlar düşük dielektrik kayıplar gösterecektir.

BÖLÜM 4

YALITIM YAĞINA UYGULANAN TESTLER

Elektrik tesislerinde yalıtım amacıyla kullanılan yalıtım sıvılarının özelliklerinin belirlenmesi için çeşitli testler yapılmaktadır. Bu testler ile sıvının kullanım amacı için uygun olup olmadığına karar verilir. Yalıtım yağının seçiminde yalıtım, ısı soğutma, oksidasyon kararlılığı, dayanıklılık, çevre dostu olma ve fiyat gibi özellikler dikkate alınmaktadır. Yağın kalitesinin ve dielektrik parametrelerinin belirlenmesi amacıyla yağdan örnekler alınarak ölçümler yapılır. Yapılan ölçümler IEC, ISO ve ASTM gibi dünyaca kabul edilen standartlar dikkate alınarak gerçekleştirilir. Yalıtım yağına uygulanan testler elektriksel, fiziksel ve kimyasal testler olarak sınıflandırılmaktadır. Bu testler Çizelge 4.1’de gösterilmektedir [18], [30].

Çizelge 4. 1 Yalıtım sıvılarına uygulanan testler

Elektriksel testler	Fiziksel testler	Kimyasal
Delinme gerilimi	Viskozite	Asitlik
Dielektrik kayıp faktörü	Parlama noktası	Su miktarı
Yalıtım direnci	Akma noktası	Gaz analizi
	Yoğunluk	Oksidasyon kararlılığı
	Renk ve görünüş	Katık miktarı
	Parçacık miktarı	Toplam kükürt miktarı
	İç yüzey gerilimi	Tortu ve çamur

4.1 Elektriksel Testler

4.1.1 Delinme Gerilimi

Bir test kabında iki elektrot arasında bulunan yalıtım yağına standartlara uygun bir artış hızı ile gerilim uygulanır. Malzemenin yalıtım özelliğini kaybederek delinmesine sebep olan gerilim seviyesi delinme gerilimi olarak adlandırılabilir. Yağın delinme gerilimini belirleyen başlıca faktörler; kullanılan elektrot şekli ve aralığı, elektrot malzemesi ve yüzey şekli, yağdaki nem ve yabancı maddeler (toz, elyafı parçacık), gaz kabarcıkları, hava kabarcıkları, basınç, sıcaklık ve uygulanan gerilimin şekli ve süresi olarak sıralanabilir. Bu test, işletmede kullanılacak yeni yağ numuneleri için yapılmaktadır. Ayrıca, işletmedeki transformatör veya diğer güç donanımlarında kullanılan yalıtım yağlarından numune alınarak yağın delinme gerilimi belirlenebilir. Elde edilen veriler analiz edilerek arıza meydana gelmeden önce gerekli önlemlerin alınması sağlanabilir.

4.1.2 Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$)

Bir yalıtım yağına gerilim uygulandığında, ideal durumda akım ile gerilim arasında 90° faz farkı vardır. Uygulamada ise bu değerden sapma meydana gelmektedir. Faz açısının 90° 'den sapma açısına δ kayıp açısı ve bu açının tanjantına ise dielektrik kayıp faktörü denir. Bu değer yalıtım yağının direnci ile yakından ilişkilidir. Direnci azalan yağın $\tan \delta$ değeri artar. Bu değer yüksek olması istenmeyen bir durumdur.

4.1.3 Yalıtım Direnci

Yalıtım sıvısının maruz kaldığı gerilimlere karşı gösterdiği mukavemettir. Nem, sıcaklık, yağın yaşlanması ile ortaya çıkan oksidasyon ürünleri vb. etkenler yağın direncini zayıflatmaktadır.

4.2 Fiziksel Testler

4.2.1 Viskozite (Akmazlık)

Yalıtım sıvısının akışkanlığa karşı göstermiş olduğu dirence denir. Yalıtım yağlarının ısı transfer yeteneği viskozite değeri ile ilgilidir. Viskozite değeri düşük bir yalıtım yağı transformatör içinde daha iyi dolaşım hızına sahip olacağı için daha iyi bir soğutma

sağlayacaktır. Yalıtım sıvılarında viskozite indeksi sıcaklık artışı ile ters orantılıdır. Bu nedenle soğuk çevre şartlarında düşük viskozite indeksine sahip yağların tercih edilmesi gerekir. Parafinik yağlar naftenik yağlara göre daha yüksek bir viskozite değerine sahiptir [61]. Yüksek gerilim tesislerinde kullanılan donanımlarda verimli soğutma sağlanabilmesi için yalıtım yağının kinematik viskozite değerinin düşük olması istenir.

4.2.2 Parlama Noktası

Yalıtım sıvısının ısınmasıyla açığa çıkan yağ buharının üzerinden bir test alevi geçirildiğinde tutuştuğu en düşük sıcaklık değerine denir. Yüksek sıcaklıkta çalışacak transformatörler için güvenlik açısından yağın parlama noktasının yüksek olması istenir. Ancak, genellikle yağın parlama noktası ile viskozite değeri doğru orantılıdır. Bu nedenle elektrik donanımının çalışacağı ortam şartları ve kullanım amacına göre yalıtım yağı seçimi önemlidir.

4.2.3 Akma Noktası

Yalıtım sıvısının akışkanlık özelliğini kaybettiği en düşük sıcaklık değerine denir. Düşük ortam sıcaklıklarında çalışan elektrik cihazlarında kullanılan yalıtım sıvısının düşük akma noktasına sahip olması istenir.

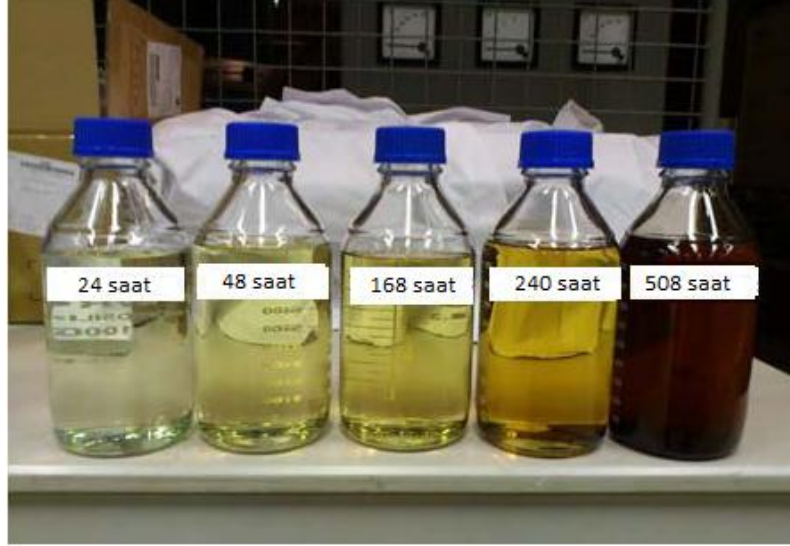
4.2.4 Yoğunluk

Yalıtım yağının kalitesini belirlemek için çok önemli bir parametre değildir. Ancak soğuk çevre şartlarında elektrik donanımlarında kullanılacak yalıtım yağının mümkün olduğu kadar düşük yoğunluklu seçilmesi önemlidir. Yalıtım sıvısının yoğunluğu aromatik ve naftanik içeriğiyle artmaktadır [61].

4.2.5 Renk ve Görünüş

Yağın renk ve görünüşü ile ilgili testler, yalıtım sıvısının durumu hakkında ön bilgi verebilecek niteliktedir. Yeni yağlar için görünüşün berrak ve homojen olması istenir. İlgili standartlarda, yağ durumunu belirleyen renk skalası 0,5 ile 8 değerleri arasında değişmektedir. Yeni bir mineral yağ için kabul edilebilir en büyük renk değerinin

ASTMD 1533 nolu standarda göre 0,5 ve IEC 60422 nolu standarda göre ise 2 olması istenmektedir [62,63]. Farklı sürelerde 130°C’de hızlandırılmış yaşlandırmaya maruz bırakılan yağ numuneleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir [64]. Yaşlandırma süresi arttıkça yağın rengi de koyulaşmaya başlamaktadır. Yağın renk durumuna göre yapılabilecek değerlendirme örnekleri Çizelge 4.2’de verilmektedir [30].



Şekil 4. 1 Hızlandırılmış yaşlandırma ile yağın renginin değişmesi

Çizelge 4. 2 Yalıtım yağının rengine göre durum analizi

Yağın Durumu	Nedeni
Bulanık görüntü	Çamurlaşma, oksidasyon ürünleri ve (veya) suyun varlığı
Siyahlaşma	Arklar sonucunda yağın karbonize olması
Koyu sarı renk	Aşırı ısınma
Tortu oluşumu	Çamurlaşma ve yüksek derecede kirlenme
Katı parçacıklar	Kâğıt yalıtımın bozulması ve elektrik donanımındaki aşınmalar

4.2.6 Parçacık Miktarı

Yalıtım yağı içerisindeki, parçacık sayısının ve büyüklüğünün olumsuz etkisinin görüldüğü başlıca elektriksel parametreler delinme gerilimi ve $\tan \delta$ değeridir. Yalıtım yağında parçacık miktarının sınır değeri aşıldığında yağ filtre edilerek temizlenmelidir.

4.2.7 İç Yüzey Gerilimi (IFT)

Yalıtım yağının kirliliğini ve bozulma durumunu belirlemek için yapılan bir testtir. Yeni yalıtım yağları için iç yüzey gerilimi 0.040 N/m'den büyük olmalıdır. Polar kir olan su, asit, sabun, karbon oksit gibi oksidasyon ürünleri iç yüzey gerilimi değerini düşürür. Bu değerdeki azalma yağın kirlendiğinin ve yaşlandığının belirtisidir. İyi bir yağ 40 ile 50 dynes/cm arasında bir iç yüzey gerilimine sahip olmalıdır [32], [65].

4.3 Kimyasal Testler

4.3.1 Asitlik

Yağda oksidasyona neden olan maddelerin toplam miktarının ölçülmesi ile yağın asitlik değeri belirlenmektedir. İşletmedeki yağlar yaşlandıkça asitlik durumları da artış gösterir [48]. Asidik maddeler, transformatörlerde kullanılan kâğıt yalıtkan malzemelerin bozulmasını hızlandırmakta ve metal kısımlarda korozyona sebep olmaktadır. Yağdaki asitlik değerinin artması, yağın $\tan\delta$ değerini de artırmaktadır. Bir transformatörde kullanılan yalıtım yağının asitliğinin 0.25 mg KOH/g değerini aşmaması istenmektedir. Bu değer aşıldığında yağdaki bozulma hızlı bir şekilde artar [66]. Gerçekleştirilen testler ile belirlenen asitlik miktarı, yalıtım sıvısının kimyasal kirliliği hakkında fikir vermektedir.

4.3.2 Su İçeriği

Yağdaki su miktarının artışı dielektrik direnci zayıflatarak yağın delinme gerilimini düşürmektedir. Transformatör sargılarının yalıtımında kullanılan kraft kâğıdı gibi yalıtım malzemelerinin ve yalıtım sıvılarının yaşlanmasını hızlandırmaktadır. Aynı zamanda, yalıtım yağındaki su içeriğinin artması, dielektrik kayıp faktörünün ($\tan\delta$) artmasına neden olan etmenlerden biridir. Bu nedenlerden dolayı, su içeriğinin belirlenmesi yalıtım yağının kalitesini etkileyen önemli faktörlerden biridir.

4.3.3 Gaz Analizi

İşletmede kullanılan elektrik donanımlarında elektriksel ve termik arızalar nedeniyle oluşan arklar ve sıcaklık artışları yalıtım yağının ve diğer katı yalıtım malzemelerinin

yapısını bozar. Bu esnada meydana gelen gazların türü ve yoğunluğu bilinirse oluşan arıza hakkında daha doğru yorumlar yapılabilir [30]. Elektrik donanımlarında yalıtım yağının durumu hakkında bilgi veren en hassas ve güvenli yöntem, çözülmüş gaz analizi yöntemidir (DGA). Bu yöntem sayesinde yağ yalıtımlı yüksek gerilim donanımlarında meydana gelebilen kısmi boşalma (korona), aşırı ısınma ve ark gibi arızalar ayırt edilebilir [65].

4.4 Yalıtkan Yağların Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi

Günümüzde çeşitli marka ve kalitede çok sayıda yalıtım yağı kullanılmaktadır. Kullanılacak yalıtım yağının kalitesi dolaylı olarak enerji kalitesini de etkilemekte, elektrik donanımının verimini, ömrünü ve güvenilirliğini ortaya koymaktadır [26]. Örneğin, transformatörlerde oluşan arızaların önemli bir bölümünün, kullanılan yağın düşük kaliteli olmasından kaynaklandığı görülmüştür. Yalıtım yağının seçiminde, yalıtım, ısıl soğutma, dayanıklılık, fiyat ve çevreye zararsız olma gibi özellikler dikkate alınmaktadır [30]. Bir yağın kalitesini ve özelliklerini belirlemek için delinme gerilimi, dielektrik kayıp faktörü ($\tan \delta$), parlama noktası, nem vb. gibi kalite parametrelerinin bilinmesi gereklidir. Yalıtım yağlarının kalite parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan bazı test metotları Çizelge 4.3’de verilmiştir [67], [68].

Çizelge 4. 3 Test Metotları

TESTLER	BİRİM	ASTM-D	IEC	ISO	TS
Delinme gerilimi	kV	877, 1816	60156	-	3989
Tan delta (tan δ) ve bağıl dielektrik sabiti	-	924	60247, 61620	-	-
Viskozite	mm ² /s	88, 445, 2161	61868	3104	1451
Parlama noktası	°C	92	-	2719, 2592	2719
Akma noktası	°C	97	-	3016	1233
Renk	-	1500	-	2049	1713
Yoğunluk	g/ml	1298	-	3675, 12185	1013
Parçacık miktarı	-	-	60970		-
İç yüzey gerilimi	dyn/cm	971	-	6295	-
Su miktarı	ppm	1533	60814	12937	6147
Asitlik	mg KOH/g	664 ve 974	62021-1	-	-
Gaz yoğunluğu	-	2300	60628	-	-
Oksidasyon kararlılığı	-	1934, 2112, 2440	62036, 61125	-	211

DENEY DÜZENEKLERİ VE ÖLÇÜM STANDARTLARI

Bu bölümde mineral yağlar üzerinde gerçekleştirilen delinme gerilimi, dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$), dielektrik güç kaybı (P_K) ve bağıl dielektrik katsayısı (ϵ_r) parametrelerinin ölçülmesindeki yöntemler anlatılmıştır.

5.1 Yağ Numunesinin Hazırlanması

Gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan yalıtım yağı, APAR 60 UX marka hidrojenle işlem görmüş hafif naftanik mineral yağdır. Yağdaki nem içeriği yağın dielektrik özelliklerini etkilemektedir. Bu nedenle, yalıtım yağı daha önceden en az bir ay oda şartlarında muhafaza edilmiştir. Karl fischer titrasyon metodu ile yağdaki nem miktarı % 0,0148 olarak belirlenmiştir. Üretici firma tarafından incelenen yağ için verilmiş olan bazı elektriksel ve fiziksel özellikler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5. 1 Mineral yağının özellikleri

Özellikler	Hidrojenle İşlem Görmüş Hafif Naftanik Yağ
Yoğunluk (15°C) g/ml	0.89
Viskozite (40°C) mm ² /s	10
Parlama Noktası (°C)	> 145
Akma Noktası (°C)	< -45
Dielektrik Kayıp Faktörü (90°C)	<0.005
Delinme Gerilimi (kV) (2.5mm aralık)	>30

5.2 Delinme Gerilimi Testi

Günümüzde yalıtım yağlarına fiziksel, kimyasal ve elektriksel testler uygulanarak kirlenme ve yaşlanma seviyeleri ölçülebilmektedir. Böylelikle, transformatör ve diğer elektriksel donanımlarda bir arıza meydana gelmeden önce gerekli önlemler alınabilmektedir [30]. Bu amaçla ASTM D1816, ASTM D877 ile IEC 60156 standart test metotları yalıtım yağlarında, delinme gerilimi değerlerinin belirlenmesi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart test metotlarında elektrot tipi, elektrot aralığı, gerilim artış hızı, her ölçüm arasındaki bekleme süresi farklılık göstermektedir ve bu durum yağın delinme gerilimi değerini etkilemektedir.

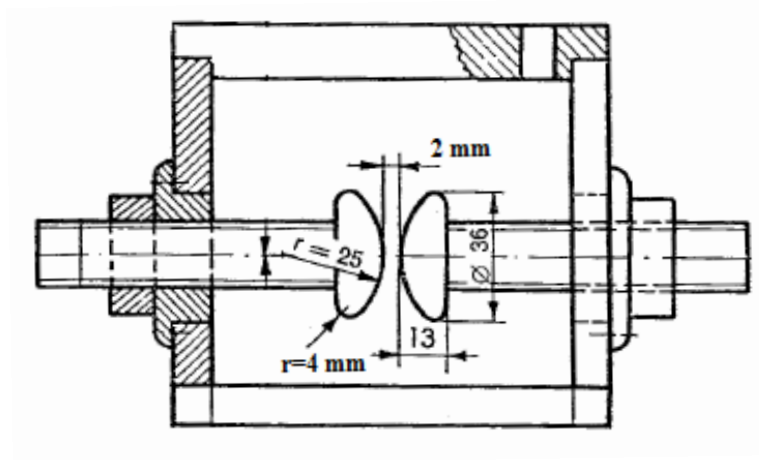
5.2.1 ASTM D1816 Standart Test Metodu

Bu standarda göre, gerilim artış hızı 500 V/s ve kullanılacak elektrot tipi ise VDE elektrot olmalıdır. Müsaade edilen elektrot açıklığı 1 mm veya 2 mm olup kullanılan elektrot açıklığı ölçüsüne göre delinme gerilimi test sonuçlarının doğruluk kriterleri vardır. Testler, 20°C ile 30°C arasında oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Homojenliği sağlamak amacıyla, yağ kabı yavaş şekilde çalkalanır. Daha sonra 1 dakika içinde test hücrelerini temizlemek için az miktarda bir yağ numunesi test hücrelerine dökülür. Temizleme işleminden sonra az miktardaki numune dökülür ve 30 saniye içinde test hücresi yavaşça ve hava kabarcığı oluşmayacak şekilde doldurulur. İlk delinme geriliminin uygulanması için 3-5 dakika arası (yüksek alevlenme noktasına sahip numuneler için en az 30 dk.) beklenir. Delinme meydana gelene kadar 0,5kV/s artış hızıyla gerilim uygulanır. Takip eden her delinme arasında 1 dk. ile 1,5 dk. arası beklenir. Numunenin deney kabına konmasından testlerin bitimine kadar, standartta belirtilen şekilde, karıştırıcı ile yağ numunesi sürekli olarak karıştırılır.

Ölçümler sonucu belirlenen en yüksek delinme gerilimi ile en düşük delinme gerilimi arasındaki fark, 2 mm elektrot açıklığına göre test edilen beş delinme geriliminin ortalamasının %92'sinden daha küçük olmalıdır. Eğer 1 mm elektrot aralığına göre analizler gerçekleştirilmişse en yüksek delinme gerilimi ile en düşük delinme gerilimi arasındaki fark beş delinme geriliminin ortalamasının % 120'sinden küçük olmalıdır. Aksi durumda analizler tekrarlanır [69]. Bu standartta kullanılan elektrot geometrisi Şekil 5.1'de ve deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 1 VDE elektrotları



Şekil 5. 2 ASTM D1816 deney düzeneği

5.2.2 ASTM D877 Standart Test Metodu

Test gerilimi 45 ile 65 Hz arasında bir frekansa ayarlanabilir. Gerilim artış hızı 3 kV/s olarak ayarlanmalıdır. Kullanılan elektrot 25,4 mm çapında ve en az 3,18 mm kalınlığında olmalıdır. Elektrot, disk tipi olup elektrot açıklığı $2.54 \pm \%1$ mm olarak ayarlanmalıdır. Test hücresi doldurulmadan önce yağın homojenliğini sağlamak için numune kabı birkaç kez çalkalanır. Ardından, az miktar yağ ile test hücresi temizlenir. Test hücresi doldurulurken hava baloncuklarının oluşmamasına dikkat edilmelidir. Test hücresinden havayı arındırmak için gerilim uygulanmadan önce 2-3 dk. arası beklenir. Test süresi boyunca, laboratuvar ortam sıcaklığı 20°C ile 30°C arasında olmalıdır. Doldurulmuş bir test hücresinde, her delinme arasında minimum 1dk. beklenerek beş delinme gerçekleştirilir. En yüksek delinme gerilimi ile en düşük delinme gerilimi arasındaki fark, beş delinme geriliminin ortalamasının %92'sinden küçük olmalıdır. Aksi

durumda analizler tekrarlanır [70]. Bu standartta kullanılan elektrot geometrisi Şekil 5.3’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 3 Disk elektrotlar

5.2.3 IEC 60156 Standart Test Metodu

Test hücresinin hacmi 350 ml ve 600 ml arasında seçilebilir. Kullanılacak elektrot topolojisi küresel olup, elektrotlar arası açıklık $2,5 \pm 0,05$ mm’dir. Standartta belirtilen ölçülerde bir karıştırıcı düzeneği kullanılabilir. Testlere başlamadan önce numune kabı, homojenliği sağlamak için birkaç kez hava baloncukları oluşturmada yavaşça çalkalanır. Test hücresine az miktar yağ dökülerek test hücresi temizlenir ve daha sonra bu yağ numunesi tahliye edilir. Test hücresi, yaklaşık %3’ü boş kalacak şekilde yağ numunesi ile doldurulur. Deneyin yapılacağı laboratuvarın ortam sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ olmalıdır. İlk gerilim, yağ doldurma işleminden yaklaşık 5 dakika sonra uygulanır. Gerilim artış hızı 2 kV/s’dir. Her delinme arasında en az 2 dakika bekleme süresiyle toplam 6 delinme gerçekleştirilir. Bu 6 delinme geriliminin ortalaması yağın delinme gerilimi olarak kabul edilir. Gerçekleştirilen deneyin güvenilirliği için, deney sonucunda elde edilen ortalama değere karşılık gelen değişim katsayısı Şekil 5.4’de gösterilen kesikli çizgiler arasında kalan bölgede olmalıdır [71]. Değişim katsayısı, standart sapmanın ortalama değere bölünmesi ile hesaplanmaktadır.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \quad (5.2)$$

Denklem (5.1) ve (5.2)’deki semboller,

SD : Standart sapma

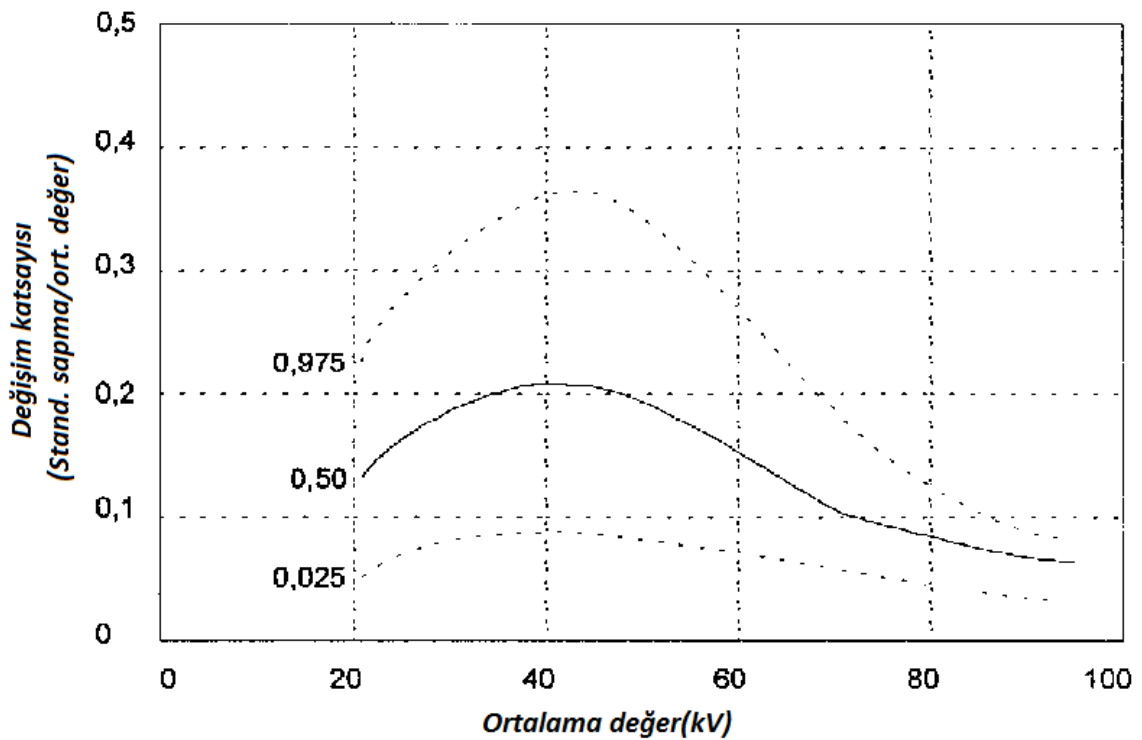
CV : Değişim (varyasyon) katsayısı

N : Ölçüm sayısı

x_i : İlgili ölçümün delinme gerilimi

$\bar{x}$: Ortama delinme gerilimi

olarak kullanılmaktadır.



Şekil 5. 4 Ortalama delinme gerilimine karşı değişim katsayısı

5.2.4 Delinme Gerilimi Ölçümü

Ölçümler HİPOTRONİCS OC90D test hücresi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla yalıtım yağlarının delinme gerilimi ölçümü 0,5 kV/s, 2 kV/s, 3 kV/s gerilim artış oranlarında yapılabilir. Ayrıca, bu gerilim artış oranlarında ile DİSK ve VDE şeklinde elektrot geometrilerinin kullanımına olanak sağlamaktadır. Deneylerde kullanılan elektrotlar parlak pirinç malzemeden yapılmıştır. Yağ test hücresi 1 litre numune ile doldurularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ölçümler için kullanılan deney düzeneği Şekil 5.5’de verilmektedir.



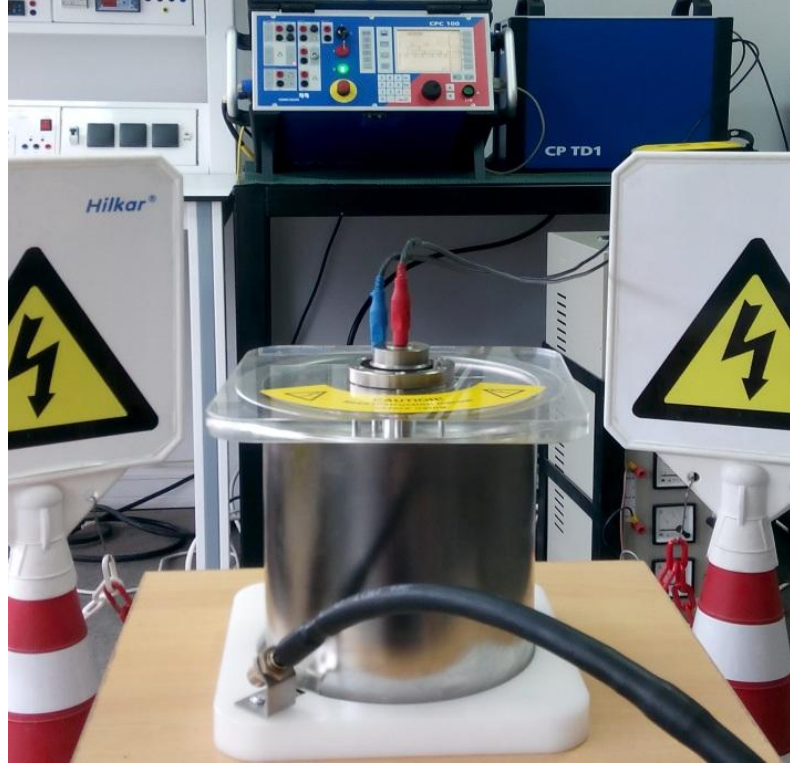
Şekil 5. 5 Yağ test cihazı

ASTM D877 standardına göre yapılan ölçümlerde kullanılan elektrot 25,4 mm çapında ve 6,4 mm kalınlığındadır. Elektrot topolojisi disk tipi olup, elektrot açıklığı 2,5 mm ve gerilim artış hızı 3 kV/s olarak ayarlanmıştır. ASTM D1816 standardına göre gerçekleştirilen ölçümlerde kullanılan elektrot VDE tipi olup elektrot açıklığı 2 mm ve gerilim artış hızı 0,5 kV/s olarak ayarlanmıştır.

5.3 Dielektrik Kayıp Faktörü ($\tan \delta$) ve Bağıl Dielektrik Katsayısı (ϵ_r) Testi

Yalıtım yağlarında meydana gelen güç kayıpları, transformatörde oluşan bakır kayıplarının yanında çok küçüktür. Fakat yalıtım sıvısının dielektrik kayıp faktörünün bilinmesi yağın işletmede kullanılabilirliği hakkında önemli bilgiler vermektedir. Yalıtım yağının dielektrik özellikleri sıcaklık, frekans, nem, parçacık vb. maddelerden etkilenmektedir. Yalıtım yağlarının $\tan \delta$ ve bağıl dielektrik katsayısının ölçülmesi için yaygın olarak IEC 60247 standardı kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen ölçümler bu standarda uygun olarak yapılmıştır.

Yalıtım yağının dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı ve dielektrik katsayısı ölçümleri Omicron-CPC100 cihazı yardımıyla elde edilmiştir. Bu cihaz, 0-12 kV gerilim ve 0-400 Hz frekans değerleri arasında ayarlanabilir çıkış verebilmektedir. Şekil 5.6'de ölçümde kullanılan CPC100 cihazı ile yağ test hücresi görülmektedir. Yüksek gerilim kablosu test hücresinin dış gövdesine, kırmızı ölçüm elektrotu ise test hücresinin içindeki elektrotla bağlanmıştır. Test hücresinin yüzeyinden meydana gelecek yüzeysel boşalmaların ölçüm elektrotuna ulaşmasını önlemek için mavi topraklama probu kullanılmaktadır.



Şekil 5. 6 Mineral yağın tan delta, kapasite ve direnç ölçümleri için kullanılan cihazlar

5.3.1 IEC 60247 Standart Test Metodu

Yapılan deneyin doğruluğu için test kabının iyi temizlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla test hücresinin aparatlarının iyi temizlenebilmesi için çözücü solventlerin kullanılması tavsiye edilir. Hidrokarbonlu yağlar için n-heptan, sikloheksan ve toluen, doğal ester sıvıları için etanol, silikonlu sıvılar için toluen solventlerinin kullanılması uygundur. Test hücresinin temizlenmesi için ultrasonik ve basitleştirilmiş temizleme olmak üzere genelde iki yöntem vardır. Ultrasonik yöntemde test hücresinin tüm parçaları sökülür ve uygun solventler kullanılarak ultrasonik temizleme banyosunda yaklaşık 10 dakika yıkanır. Test hücresinin parçaları banyodan çıkarılarak toz olmayan bir ortamda solventlerin buharlaşması sağlanır. Daha sonra bu parçalar en fazla iki saatlik bir süreyle 105 °C-110°C bir fırında kurutulur.

Basitleştirilmiş temizleme yönteminde ise, test hücresinin tüm aparatları sökülür ve uygun solventler ile tüm parçalar yıkanır. İlk olarak aseton ile daha sonra birkaç kez sıcak su ile durulanır.

Bazı malzemeler yapı itibariyle bozulabileceğinden kurutma işlemi 2 saatten fazla olmamak kaydıyla 105°C-110°C bir fırında yapılır. Nemin tamamen kaldırılması için kurutma süresi bir saat ile iki saat arasında ayarlanabilir.

Test hücresi, yağ ile doldurulmadan önce birkaç kez aynı yağ numunesinin küçük bir miktarı ile çalkalanarak temizlenir ve daha sonra bu numune kaptan tahliye edilir. Test hücresi hava kabarcıkları oluşturmada yeni yağ ile doldurulur. Test sıcaklığına ulaşmak için gerekli süre ısıtma yöntemine bağlıdır ve 10 dakika ile 60 dakika arasında değişebilir. Ölçümlere, istenen test sıcaklığının $\pm 1^\circ\text{C}$ içindeyken 10 dakika içinde başlanmalıdır.

Dielektrik kayıp faktörü sıcaklık değerlerine karşı çok hassastır ve genellikle sıcaklık artışıyla exponansiyel olarak artar. Bu nedenle yapılan ölçümlerin güvenilir sıcaklık koşulları altında gerçekleştirilmesi önemlidir. Test kabının ısıtılmadığı durum için, $\tan \delta$ ölçümleri yağ test kabına doldurulduktan sonra 10 dakika içinde başlayabilir. Eğer test kabı ısıtılacaksa, sıvılar oksidasyona karşı hassas olduğundan ısıtma süreci bir saati geçmemelidir. Yalıtım sıvısının ölçülmek istenen sıcaklık değerinin $\pm 1^\circ\text{C}$ içinde ölçümler tamamlanır.

Ölçülen iki $\tan \delta$ değeri arasındaki fark, en yüksek $\tan \delta$ değerinin %25'nin 0,0001 değeri ile toplamından daha fazla birbirinden farklı olmamalıdır. Aksi durumda analizler tekrarlanır. İki geçerli ölçümün ortalaması yalıtım sıvısının dielektrik kayıp faktörü olarak kabul edilir.

$$\tan \delta_{\max} - \tan \delta_{\min} \leq (\tan \delta_{\max} * \%25) + 0.001 \quad (5.3)$$

Sıvının bağıl dielektrik katsayısı test kabının yalıtım yağı ile dolu durumdaki kapasite değerlerinin boş durumdaki kapasite değerine oranı ile hesaplanmaktadır. Bağıl dielektrik katsayısı deneylerinde test hücresinin temizlenme ve doldurulma deney şartları, dielektrik kayıp faktörü ölçümündekiler ile aynıdır. İki ardışık ölçümün kapasite değeri, en yüksek değerin %5'den daha az farklılık göstermelidir. Aksi durumda analizler tekrarlanır. İki geçerli ölçümün ortalaması yalıtım sıvısının bağıl dielektrik katsayısı olarak kabul edilir [66].

5.3.2 Dielektrik Kayıp Faktörü ve Bağıl Dielektrik Katsayısının Ölçümü

Ölçümler IEC 60247 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Testler için kullanılan deney kabı Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5. 7 Tan delta, kapasite ve direnç ölçümleri için test hücresi

Test hücresi doğru ve güvenilir ölçüm elde etmek için paslanmaz çelik elektrotlardan oluşmaktadır. Test hücresinin teknik özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

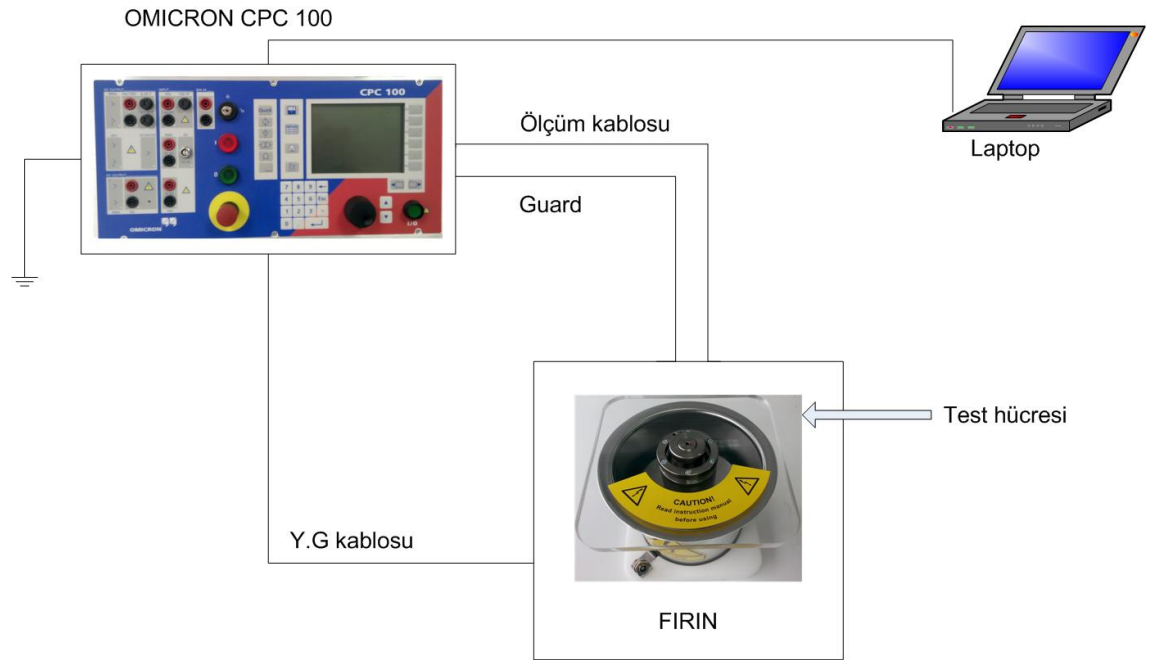
Çizelge 5. 2 Test kabının teknik özellikleri

Test aralığı	11 mm
Boş kapasite (C_0)	62,295 pF
Yağ hacmi	≈1,6 Lt.
Test kabının boyutu (çap x yükseklik)	172 mm x 180,8 mm
İç elektrot boyutu (çap x yükseklik)	140,2 mm x 100,1 mm

Yalıtım yağında gerçekleştirilen ölçümler Omicron CPC100 test cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz ayarlanabilir gerilim ve frekanslarda yalıtım yağının tan

delta, güç kaybı, kapasite ve direnç gibi elektriksel parametrelerini ölçmeye imkân vermektedir.

Mineral yağın sıcaklığa bağlı olarak mineral yağın tan delta, dielektrik güç kaybı, bağlı dielektrik katsayısı ve kapasite değerleri ölçülürken kullanılan deney sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.8’de verilmiştir.



Şekil 5. 8 Sıcaklığa bağlı tan delta, güç kaybı ve kapasite ölçümler için deney düzeneği

DENEY SONUÇLARI VE ANALİZLERİ

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada, ele alınan mineral yağa ait elektriksel parametrelerin farklı koşullardaki değişimleri incelenmiştir. Mineral yağa ait delinme gerilimi (U_d), dielektrik kayıp faktörü ($\tan\delta$), bağlı dielektrik katsayısı (ϵ_r) ve dielektrik kayıp güç (P_K) değerleri, ilgili standartlar göz önüne alınarak Bölüm 5'te verilen deney düzenekleri yardımıyla belirlenmiştir.

Delinme gerilimi değerleri elektrot tipine, elektrot açıklığına, gerilim artış hızına, sıcaklığa ve neme bağlı olarak değişimleri tespit edilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Mineral yağın elektriksel kalitesi hakkında fikir sahibi olmamızı sağlayan $\tan \delta$, ϵ_r ve P_K büyüklükleri ile ilgili ölçümlerde ise gerilim, frekans ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

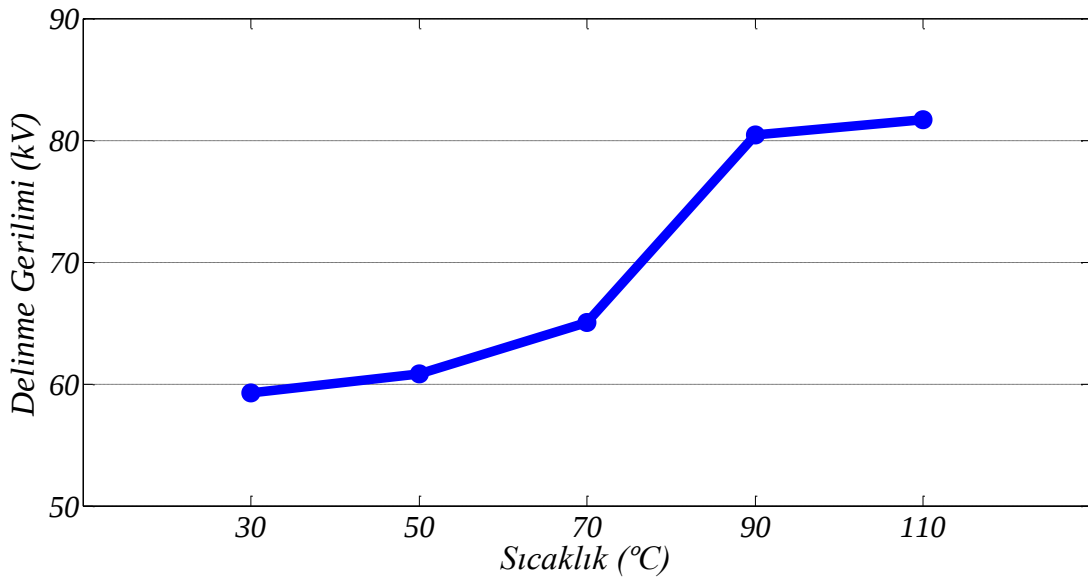
6.1 Delinme Gerilimi Testi

6.1.1 Sıcaklığa Bağlı Delinme Gerilimi Değerleri

Mineral yağın delinme gerilimi 30°C, 50°C, 70°C, 90°C ve 110°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) sıcaklık değerlerinde ASTM D877 standardına göre disk elektrot, 2,5 mm elektrot açıklığı ve 3kV/s gerilim artış hızı uygulanarak ölçülmüştür. Yağın ısıtılması test kabı içine konulan bir rezistans yardımıyla sağlanmıştır. Ölçüm alınmadan önce ilgili her bir sıcaklık değerinde 30 dakika beklenerek yağ ısı dengeye getirilmiştir. Mineral yağın ölçülen V_{ort} , V_{min} ve V_{max} değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Sıcaklığa bağlı delinme gerilimi

Sıcaklık (°C)	Dielektrik Delinme Gerilimi (kV)		
	V _{min.}	V _{ort.}	V _{max.}
30	53	59.2	71.2
50	49.8	60.8	75.5
70	58.5	65.0	69
90	61.4	80.4	89.5
110	78.4	81.6	85.4

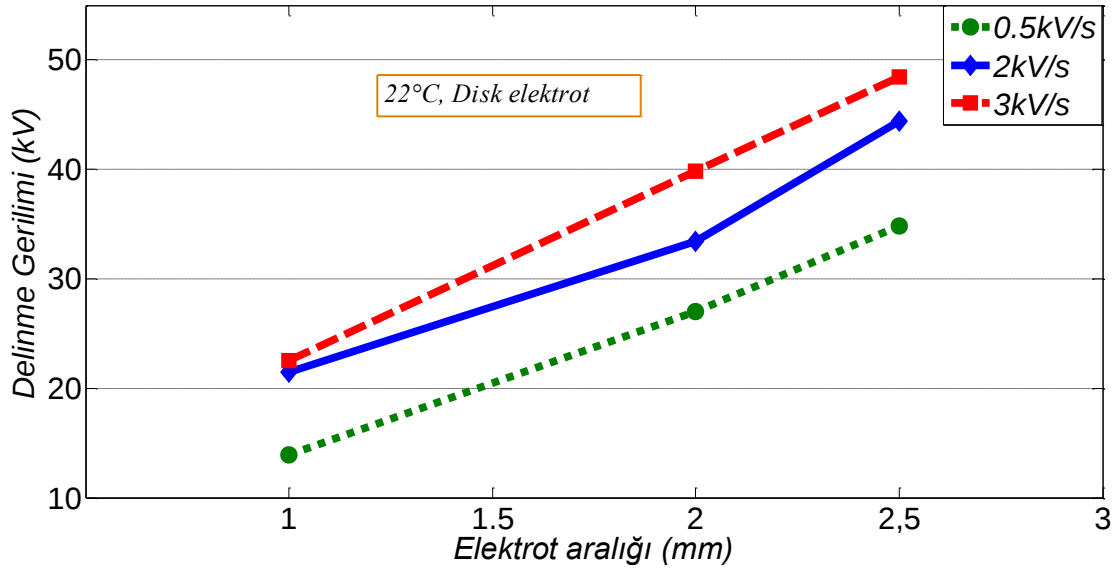


Şekil 6. 1 Delinme geriliminin sıcaklıkla ilişkisi

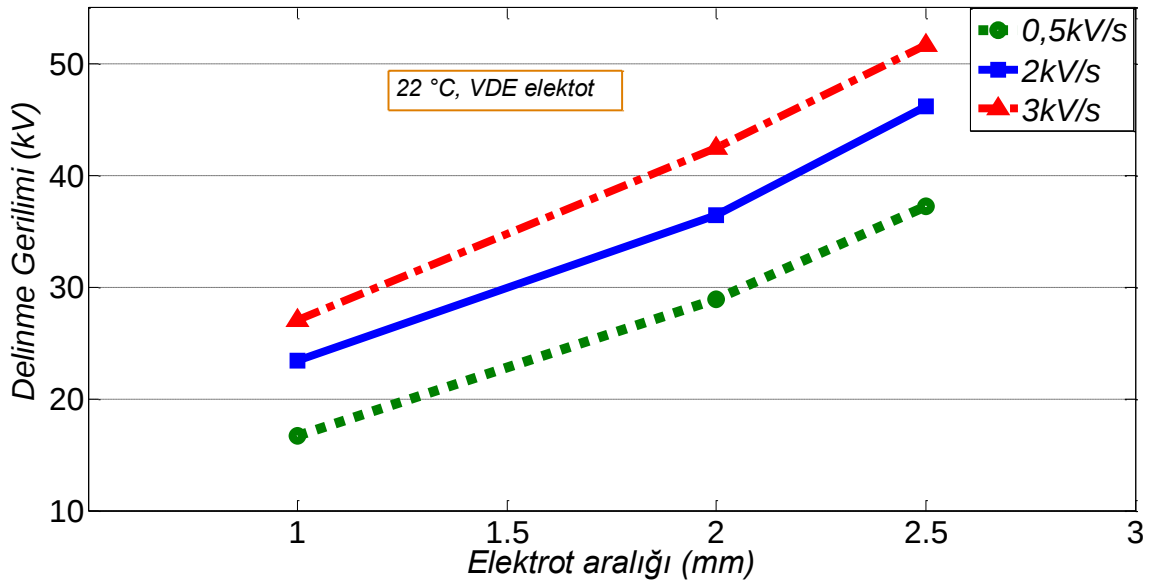
Mineral yağın sıcaklığa bağlı delinme geriliminin değişimi Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Şekilden görüleceği üzere mineral yağın delinme gerilimi 30°C’ de yaklaşık 60kV’dur ve 70°C’ye kadar hafif bir şekilde artmaktadır. Ancak, 70°C ile 90°C arasındaki delinme gerilimindeki artışın daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 110°C’deki delinme gerilimi 30°C ile kıyaslandığında yaklaşık %30 artmaktadır. Sıcaklığa bağlı delinme gerilimindeki artışın, sıcaklık artışı ile beraber yağ içindeki nem içeriğinin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, sıcaklık artarken yağ içindeki gazların basıncı artar ve bu durum delinmenin başlamasını geciktiren bir faktördür [72].

6.1.2 Gerilim Artış Hızına Bağlı Delinme Gerilimi Değişimi

Mineral yağın delinme gerilimi ASTM D877 standardına göre disk elektrot ve ASTM D1816 standardına göre VDE elektrot kullanarak 0.5 kV/s, 2 kV/s, 3 kV/s gerilim artış oranlarında ve 1 mm, 2 mm ve 2.5 mm elektrot aralıkları için belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar disk elektrot geometrisi için Şekil 6.2’de ve VDE elektrot geometrisi için Şekil 6.3’de gösterilmektedir.



Şekil 6. 2 Delinme geriliminin gerilim artış hızına bağlı değişimi (disk elektrot)



Şekil 6. 3 Delinme geriliminin gerilim artış hızına bağlı değişimi (VDE elektrot)

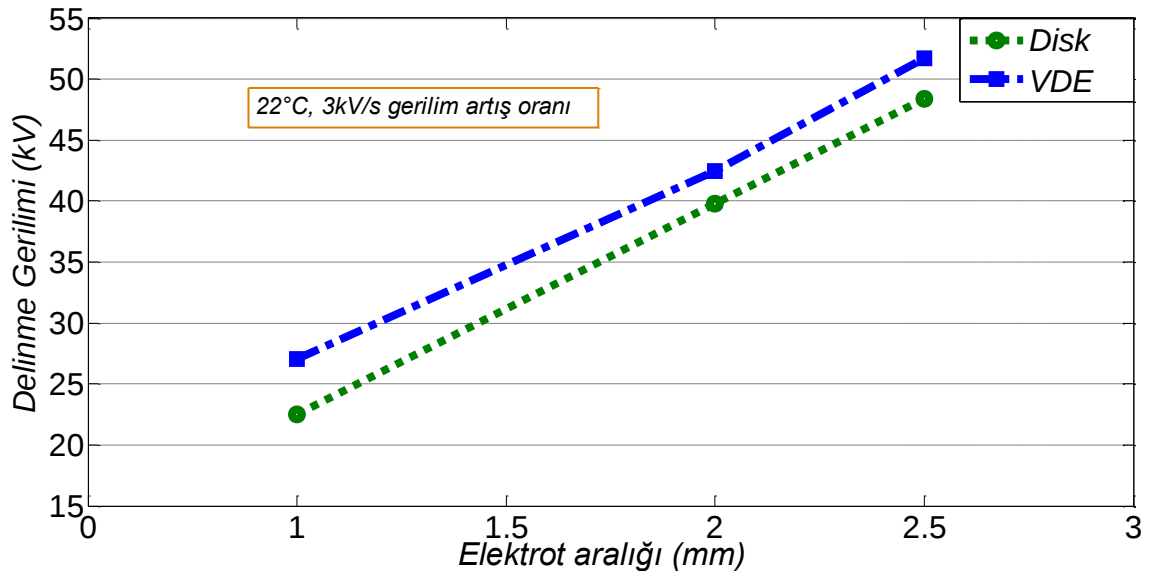
Her iki şekilden de görüleceği üzere gerilim artış hızı arttıkça delinme gerilimi değeri artmaktadır. Yalıtım yağına uygulanan gerilimin süresi arttıkça yağın delinme geriliminin azaldığı bilinmektedir. Fakat gerilim artış hızı arttıkça yalıtım yağının maruz kaldığı gerilimin süresi azalmaktadır. Bu nedenle de yalıtım yağının delinme gerilimi artmaktadır. Elektrot açıklığı açısından bakıldığında, beklenen şekilde açıklık arttıkça delinme gerilimi değeri yükselmektedir.

6.1.3 Elektrot Geometrisine Bağlı Delinme Geriliminin Değişimi

Elektrot geometrilerinin delinme gerilimi üzerinde önemli etkileri vardır. Bu amaçla, iki farklı elektrot topolojisine 0,5 kV/s, 2 kV/s ve 3 kV/s gerilim artış hızı ile 1 mm, 2 mm ve 2,5 mm elektrot aralıklarında testler uygulanmıştır. Mineral yağın, gerilim artış hızına ve elektrot tipine bağlı delinme gerilimlerinin ortalama değerleri Çizelge 6.2’de sunulmuştur.

Çizelge 6. 2 Elektrot geometrisine ve gerilim artış hızına bağlı delinme gerilimi

	Elektrot açıklığı (mm)	Gerilim artış hızı (kV/s)					
		0,5		2		3	
		VDE	Disk	VDE	Disk	VDE	Disk
Delinme Gerilimi (kV)	1	16,7	13,88	23,44	21,46	27,04	22,5
	2	28,9	27,04	36,44	33,44	42,46	39,82
	2,5	37,24	34,86	46,22	44,42	51,72	48,42



Şekil 6. 4 Elektrot geometrisine bağlı delinme gerilimi

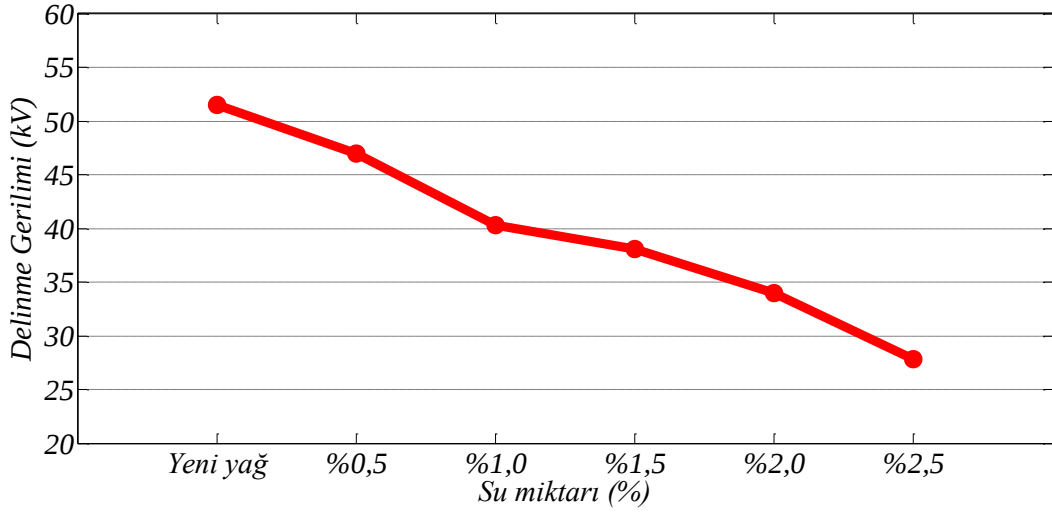
Şekil 6.4'den görüleceği üzere VDE elektrot geometrisinin delinme gerilimi tüm elektrot aralıkları için Disk elektrot geometrisinden daha yüksek çıkmıştır. 1 mm elektrot aralığında meydana gelen delinme gerilimi için VDE elektrot topolojisinin delinme gerilimi Disk elektrottan yaklaşık %20,1 daha büyük çıkmıştır. Ayrıca, 2 mm ve 2,5 mm elektrot aralıkları için VDE elektrot topolojisinin delinme gerilimi sırasıyla yaklaşık % 6,6 ve %6,8 daha büyük olduğu görülmüştür.

6.1.4 Delinme Geriliminin Neme Bağlı Değişimi

Mineral yağın delinme gerilimi üzerinde su içeriğinin etkisini araştırmak için 1000 ml yalıtım yağının içine 72,8 μ S/cm iletkenliğine sahip su, 5 ml, 10 ml, 15 ml, 20 ml ve 25 ml miktarlarında eklenerek delinme gerilimleri belirlenmiştir ASTM D877 standardına göre yapılan ölçümler ile mineral yağın su içeriğine bağlı V_{min} , V_{ort} ve V_{max} delinme gerilimi değerleri elde edilerek Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 6. 3 Delinme geriliminin su içeriğine bağlı değişimi

Su (ml)	Dielektrik Delinme Gerilimi (kV)		
	V_{min}	V_{ort}	V_{max}
Yeni yağ	44,6	51,5	56,7
5	41,0	46,9	51,5
10	35,2	40,2	47,0
15	32,0	38,1	42,0
20	30,2	33,9	39,2
25	25,0	27,8	32,5



Şekil 6. 5 Delinme gerilimin su içeriğiyle ilişkisi

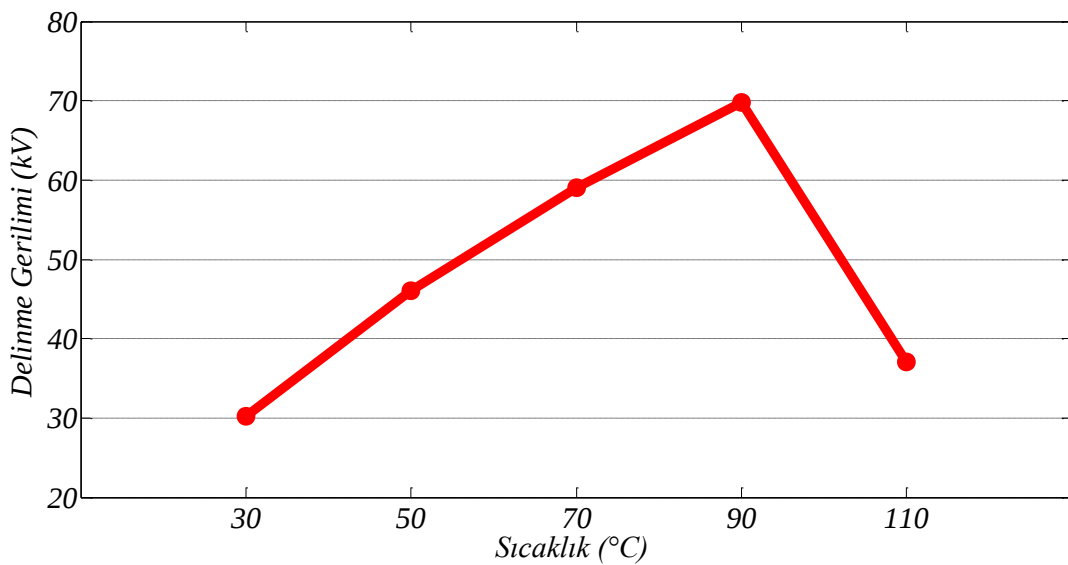
Mineral yağın bir nem emme kapasitesi vardır ve eğer bu kapasite aşılsa suyun öz kütlesi mineral yağdan büyük olduğu için su damlacıkları yağın altına doğru hareket edecektir. Yalıtım yağında serbest halde veya çözülmüş halde bulunan su, her iki durumda da yalıtkan yağın direncini azaltmaktadır. Yalıtkan yağın maruz kaldığı elektriksel alan şiddeti (E) yalıtım malzemesinin delinme dayanımına (E_d) eşit veya daha büyük olursa ($E \geq E_d$) elektrik alanının yoğun olduğu bölgede delinme başlar. Şekil 6.5'den görüldüğü gibi yalıtım yağ içerisinde bulunan su miktarı artışı delinme gerilimini önemli derecede düşürmüştür. Yalıtım yağına eklenen %2,5 su için yağın delinme gerilimi yaklaşık %46 azalmıştır.

6.1.5 Nemlendirilmiş Mineral Yağın Delinme Geriliminin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

1000 ml mineral yağın içine iletkenliği $72,8\mu\text{S}/\text{cm}$ olan 25 ml su eklenerek farklı sıcaklık değerindeki değişimlerin bu durum için etkileri incelenmiştir. Mineral yağın hem sıcaklık hem de su (nem) içeriğine bağlı elektriksel karakteristiğini belirlemek için, yalıtım yağına %2,5 oranında su karıştırılarak, 30 °C, 50 °C, 70 °C, 90 °C, 110 °C ($\pm 1^\circ\text{C}$) sıcaklık değerlerinde delinme gerilimleri belirlenmiştir. İşletmede bir transformatör yalıtım yağında olası görülebilen bir durum için (yağın kirlenmesi) yalıtım yağının $V_{\min}$, V_{ort} , $V_{\max}$ delinme gerilimleri Çizelge 6.4’de görülmektedir.

Çizelge 6. 4 Delinme geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi (25ml su ekli)

Sıcaklık (°C)	Dielektrik Delinme gerilimi (kV)		
	$V_{\min}$	V_{ort}	$V_{\max}$
30	25,0	30,1	35,6
50	42,8	46,0	51,1
70	64,0	59,0	55,3
90	61,5	69,8	75,1
110	15,5	37,0	50,5



Şekil 6. 6 Delinme geriliminin sıcaklıkla ilişkisi (25ml su ekli)

Şekil 6.6'da görüleceği üzere içinde su damlacığı bulunan yalıtım yağının sıcaklık artışıyla delinme geriliminde artışlar gözlemlenmiştir. 110°C haricinde ölçülen diğer sıcaklık değerlerinde yalıtım yağının delinme geriliminde artışlar gözlemlenmiştir. 110°C 'de yalıtım yağının delinme geriliminin düşmesinin sebebi, yağ içinde bulunan suyun buharlaşma sıcaklığı geçildiği için suyun neden olduğu Şekil 6.7'da gösterilen hava kabarcıklarıdır. Yalıtım yağı bir elektriksel kuvvete maruz kaldığında bu kabarcıklar elektrik alanın yoğun olduğu yere yani elektrotlar arasına gelerek delinmenin başlamasını kolaylaştırmaktadır. Şekil 6.6'da gösterilen nemlendirilmiş mineral yağın sıcaklığa bağlı delinme gerilimi değerleri Şekil 6.1'de gösterilen delinme gerilimlerinden daha küçüktür.

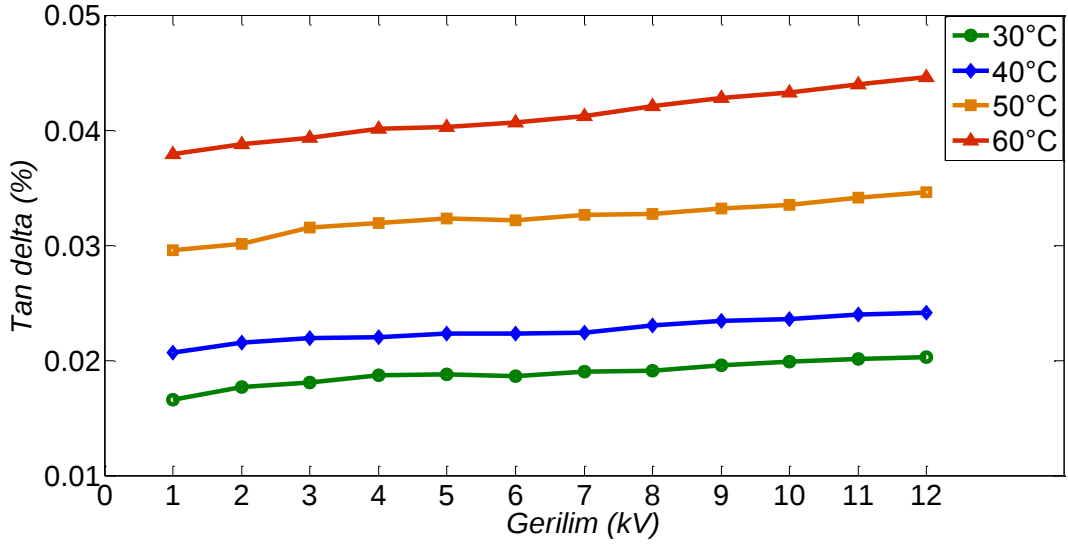


Şekil 6. 7 25 ml su eklenmiş mineral yağ

6.2 Dielektrik Kayıp Faktörü Testi

6.2.1 Gerilim Artışına Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi

Mineral yağın dielektrik kayıp faktörünün gerilime bağlı değişimini araştırmak amacıyla, yağa 50 Hz frekansta 1kV-12kV aralığında gerilim uygulanmıştır. Ayrıca, sıcaklık etkisinin de incelenmesi amacıyla bu ölçümler 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C ($\pm 1^\circ\text{C}$) sıcaklık değerlerinde tekrarlanarak yeni $\tan \delta$ değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir.

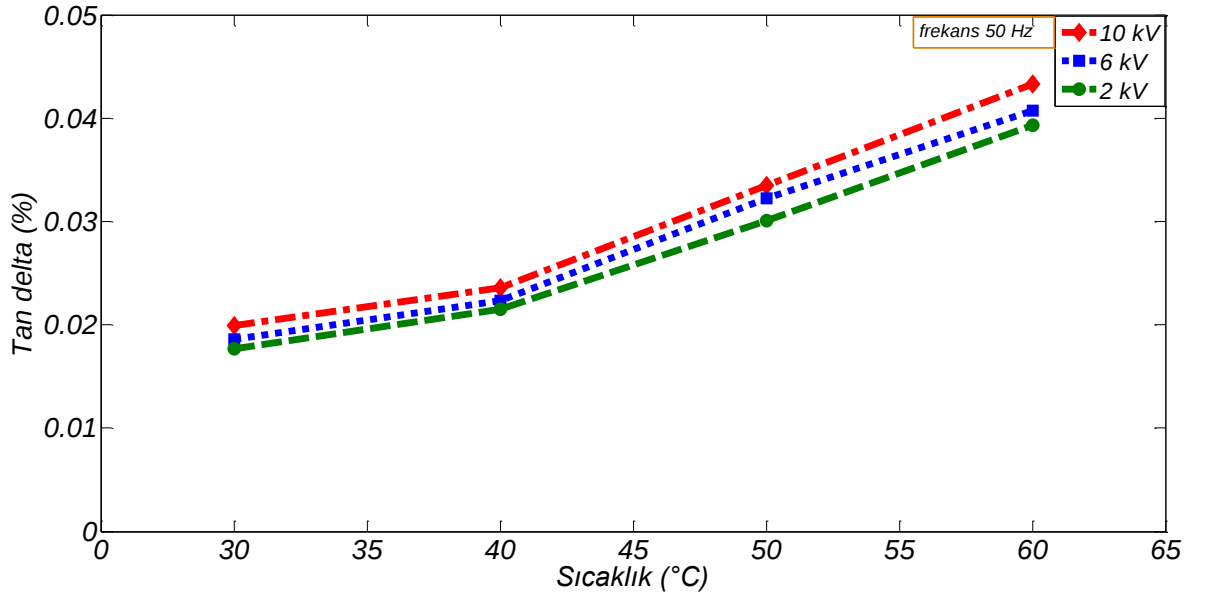


Şekil 6. 8 Gerilim ve sıcaklığa bağlı tan δ değişimi

Şekil 6.8'den görüldüğü gibi gerilim artışına bağlı olarak tan δ değeri non-lineer bir şekilde artmaktadır. Sıcaklık değerindeki artışa bağlı olarak tüm gerilim seviyeleri için tan δ değerinin yükseldiği belirlenmiştir. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C'de yapılan ölçümlerde 12 kV'daki dielektrik kayıp faktörü değerleri 1 kV ile kıyaslandığında sırasıyla %22,2, %16,4, %16,8 ve %17,6'lık artışlar meydana geldiği görülmüştür. 60°C'deki tan δ değeri 30°C'deki ile karşılaştırıldığında, 1 kV'da % 128,3'lik, 6 kV'da % 118,8'lik artış, 12 kV'da ise % 119,7'lik artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

6.2.2 Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi

Yalıtım yağının direncinin mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. Yüksek gerilim tesislerinde kullanılan yalıtım yağının görevi elektriksel donanımlarda ısı soğuma ve yalıtım olduğu için sıcaklık etkilerine maruz kalmaktadır. Sıcaklık değişimlerinden etkilenebilen yağ direnci ile tan δ arasında bir ilişki vardır. Yağın direncindeki azalma dielektrik kayıp faktörünün artışına neden olmaktadır. Artan sıcaklık, yağın direncini zayıflamakta ve tan δ değerinin artışına yol açmaktadır. Mineral yağın sıcaklığa bağlı dielektrik kayıp faktörü Şekil 6.9'de gösterilmektedir.

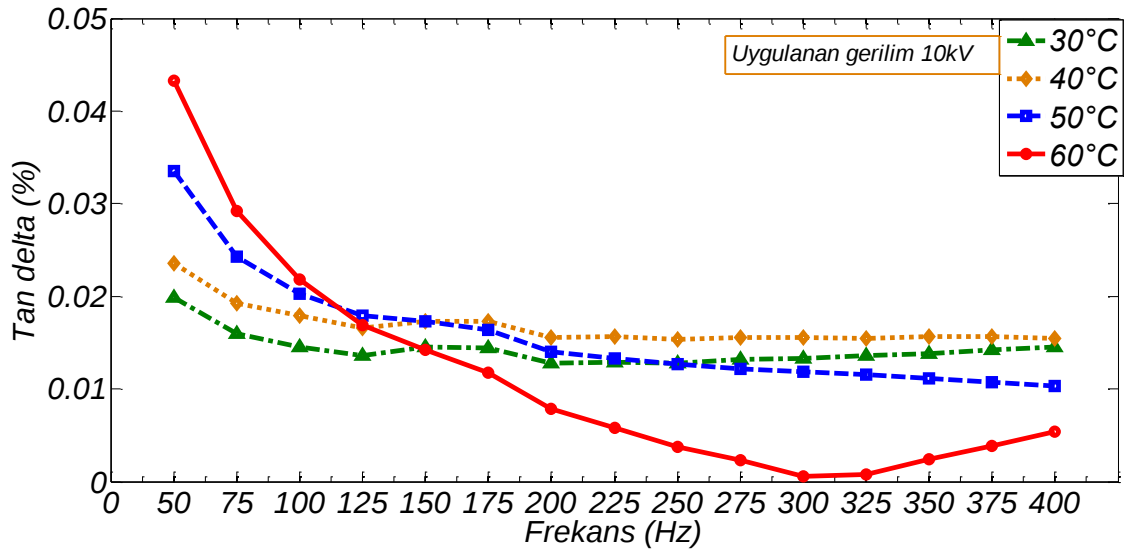


Şekil 6. 9 Sıcaklığa bağlı tan δ değişimi

Şekilden görüleceği üzere mineral yağın dielektrik kayıp faktörü 30°C’de yaklaşık % 0,0177’dir ve 40°C’ye kadar hafif bir şekilde artmaktadır. Ancak 40°C ile 60°C arasında dielektrik kayıp faktöründeki artışın daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ölçülen 60°C’deki dielektrik kayıp faktörü 30°C ile kıyaslandığında 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim değerleri için sırasıyla %119,2’lik, %118,8’lik ve 117,5’lik artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.

6.2.3 Frekansa Bağlı Dielektrik Kayıp Faktörü Değişimi

Frekans değişimlerinin dielektrik kayıp faktörü üzerinde önemli etkileri olmaktadır. IEC 60247 ve ASTM D 927 standartlarında belirtildiği gibi frekansa bağlı olarak yalıtım sıvısının dielektrik kayıp faktörü genelde azalmaktadır. Gerçekleştirilen ölçümlerle mineral yağın 50 Hz-400 Hz frekans aralığı için farklı sıcaklıklardaki tan δ değerleri belirlenmiştir. Şekil 6.10’da mineral yağın frekansa bağlı dielektrik kayıp faktörünün değişimi sunulmuştur.



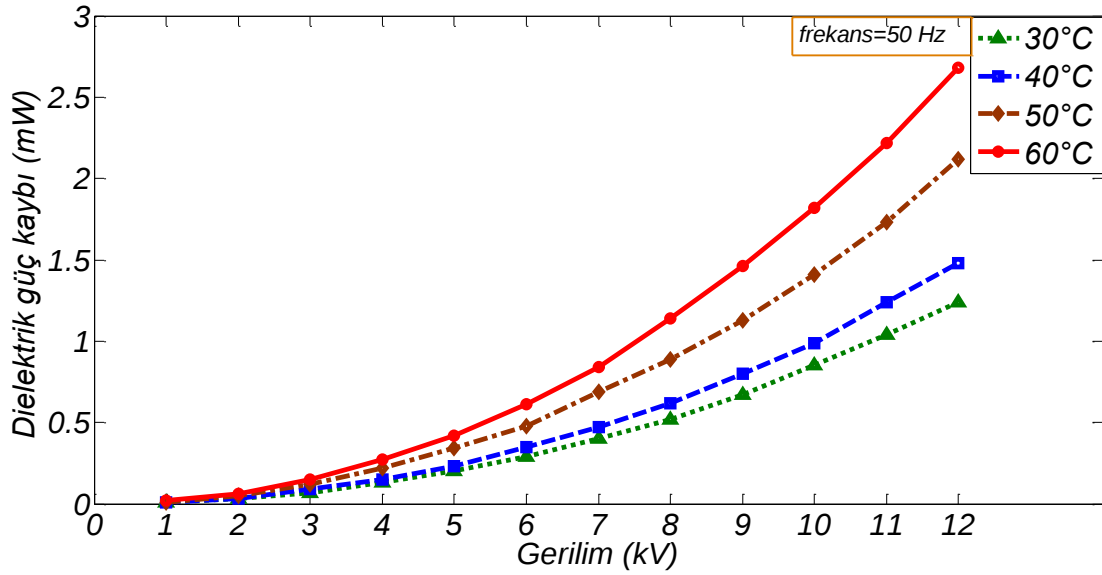
Şekil 6. 10 Frekansa bağlı tan δ değişimi

Şekil 6.10'dan da görüldüğü gibi, frekans yükseldikçe tan δ değerinde genel olarak bir azalma görülmektedir. Ara frekans değerlerinde meydana gelen dalgalanmaların sebebi yağın polarize olamaması ve kimyasal yapısının frekans değişimlerine çok hassas olmasından kaynaklanmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir [73], [74]. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C'de yapılan ölçümlerde 400Hz'deki dielektrik kayıp faktörü 50Hz ile kıyaslandığında sırasıyla yaklaşık olarak %27, %34, %69 ve %87 olarak azaldığı görülmüştür.

6.3 Dielektrik Güç Kaybı Testi

6.3.1 Gerilim Artışına Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi

Yüksek gerilim güç donanımlarında kullanılmakta olan yalıtım sıvılarında, maruz kaldıkları gerilime bağlı olarak güç kayıpları meydana gelmektedir. Mineral yağda gerilim değişimlerine bağlı olarak meydana gelen aktif güç kayıpları $P_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta$ ifadesi ile hesaplanmaktadır. Gerilim seviyesinin güç kaybına olan etkisini belirlemek için gerçekleştirilen ölçümler 1kV-12kV arasında 1 kV'luk artışlar ile yapılmıştır. Ayrıca, ısınmaya bağlı güç kaybı değerinin tespit edilmesi için, bu ölçümler 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklık değerlerinde tekrarlanmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 6.11'de verilmiştir.

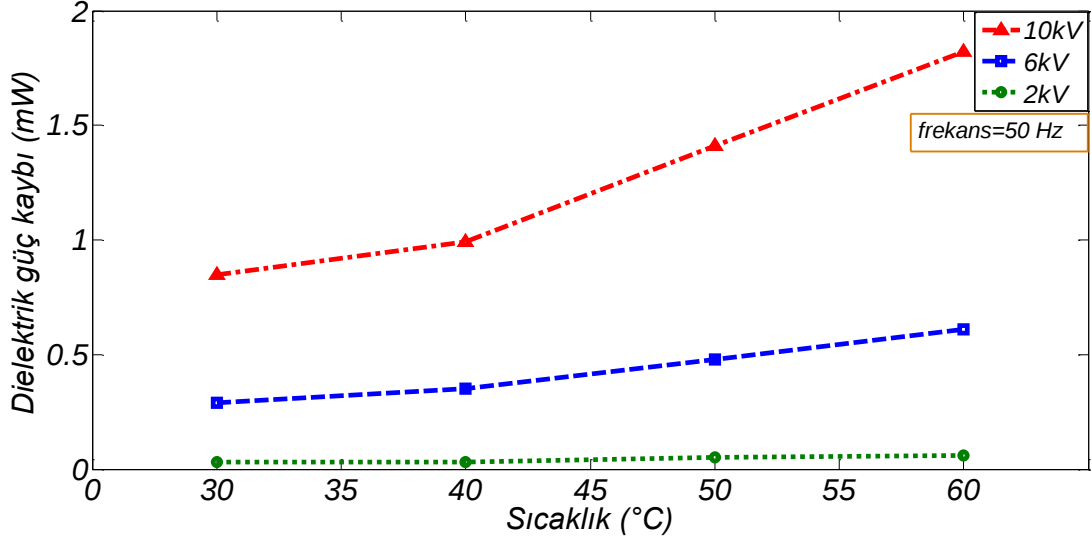


Şekil 6. 11 Mineral yağın gerilime bağlı dielektrik güç kaybı değişimi

Şekilden görüleceği üzere, güç kaybı gerilim artışına bağlı olarak exponansiyel olarak artmaktadır. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C’de yapılan ölçümlerde 1 kV’daki güç kaybı yaklaşık 0.01mW olarak belirlenmiştir. 12 kV’daki dielektrik güç kayıpları 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklıklarında sırasıyla 1.24 mW, 1.48 mW, 2.12 mW ve 2.68 mW olarak ölçülmüştür. Bu güç kayıpları transformatörde meydana gelen I^2R kayıplarının yanında çok küçüktür. Ancak, yalıtım yağı üzerinde meydana gelen bu kayıplar yalıtım sıvısının işletmede kullanılabilirliği hakkında bize önemli bilgiler vermektedir.

6.3.2 Sıcaklığa Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi

Yalıtım sıvıları sıcaklığa maruz kaldığında tan delta değerindeki her artış yalıtım sıvısı üzerinde aktif güç kayıplarına neden olmaktadır. Kayıp güç, elektriksel eşdeğer devre modellerinde bir ohmik direnç ile temsil edilmektedir. Bu modellerde seri veya paralel eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. Sıcaklığa artışına bağlı olarak mineral yağın R_s direnç değeri de artmaktadır. Bu nedenle $I^2.R$ aktif güç kayıplarında yükselmeler meydana gelmektedir. 50 Hz’lik şebeke frekansı için mineral yağda sıcaklığa bağlı olarak oluşan dielektrik güç kayıpları 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim seviyeleri için ölçülerek Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi mineral yağda oluşan dielektrik kayıp güç gerilim ve sıcaklık artışıyla yükselmektedir.

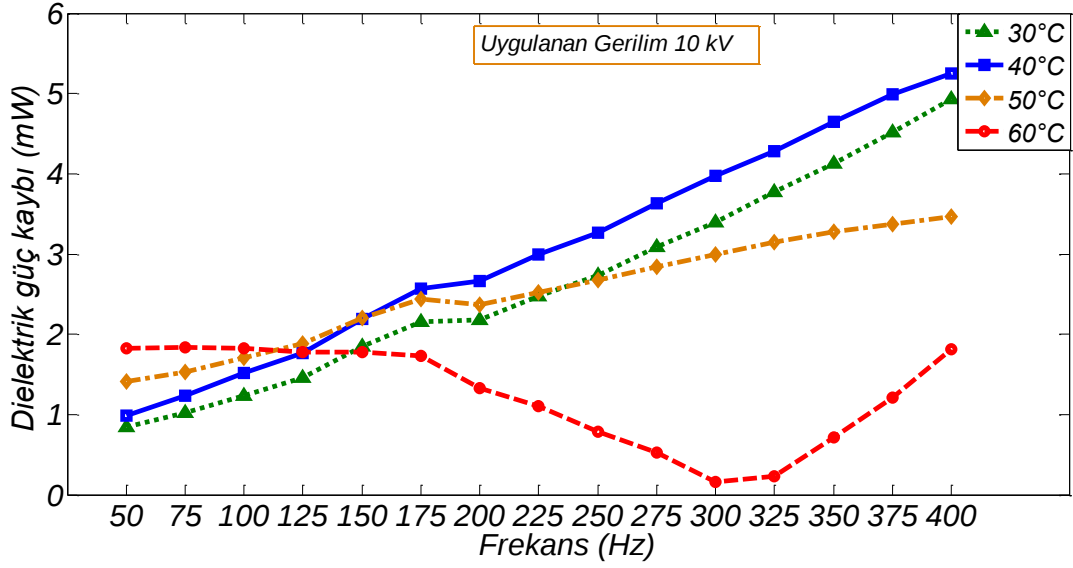


Şekil 6. 12 Mineral yağın sıcaklığa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi

Mineral yağa uygulanan 10kV gerilime göre meydana gelen güç kaybı 30°C’ de 0.85 mW olarak ölçülmüş ve 40°C’ye kadar hafif bir şekilde artmıştır. Ancak 40°C ile 60°C arasındaki güç kaybındaki artışın daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. 10 kV’luk gerilim seviyesi için, 60°C’deki mineral yağda meydana gelen güç kaybı 30°C ile kıyaslandığında yaklaşık %109,4 artmaktadır. Uygulanan 2 kV ve 6 kV gerilim değerleri için 60°C’deki güç kaybı 30°C’deki ile kıyaslandığında sırasıyla yaklaşık olarak %100 ve %110,3 arttığı belirlenmiştir.

6.3.3 Frekansa Bağlı Dielektrik Güç Kaybı Değişimi

Dielektrik malzeme gerilime maruz kaldığında, meydana gelen aktif güç kaybı frekans, malzemenin kapasitesi, uygulanan gerilim ve $\tan \delta$ değerlerine bağlıdır. Frekans değişiminin güç kaybı üzerindeki etkisini belirlemek için gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 6.13’de farklı sıcaklık değerleri dikkate alınarak verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere 50 Hz’lik şebeke frekansı için sıcaklık artışı ile dielektrik güç kayıpları artmaktadır. Ancak frekans artışı ile kayıplar sıcaklıkla non-liner bir artış sergilemektedir. Bunun nedeni, dielektrik kayıp gücü etkileyen $\tan \delta$ değerinin frekans artışı ile genelde azalma eğilimi göstermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6. 13 Mineral yağın frekansa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi

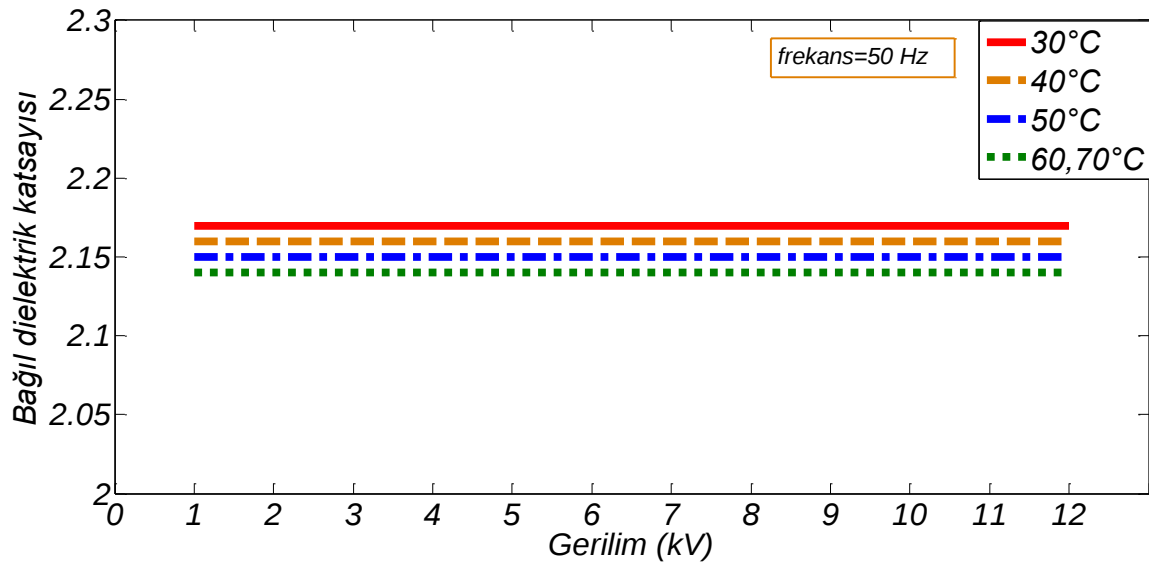
Ara frekans değerlerinde meydana gelen dalgalanmaların sebebi yağın polarize olamaması ve kimyasal yapısının frekans değişimlerine çok hassas olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, yalıtım sıvılarında dielektrik güç kaybı $P_k = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \tan \delta$ eşitliği ile hesaplanmaktadır. Burada U geriliminin sabit olduğu ve yağın C kapasite değerinin frekans ile değişmediği göz önüne alınırsa meydana gelen dielektrik güç kaybını frekans ve dielektrik kayıp faktörünün etkilediği görülmektedir. Dielektrik kayıp faktörü frekans artışı ile genelde azalma eğilimi gösterdiğinden dolayı dielektrik güç kaybında frekansa bağlı olarak dalgalanmalar meydana gelebilmektedir. 60°C'deki kayıp gücün daha az artması, Şekil 6.10'da 60°C için gösterilen tan delta değerinin dikkate değer azalmasından kaynaklanmaktadır. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C'de yapılan ölçümlerde 400 Hz'deki dielektrik kayıp gücü 50 Hz'deki ile kıyaslandığında sırasıyla yaklaşık olarak %480, %430, %146 ve %1,6 arttığı belirlenmiştir.

6.4 Bağlı Dielektrik Katsayısı Testi

6.4.1 Gerilime Bağlı Bağlı Dielektrik Katsayısı Değişimi

Yalıtım sıvılarının bağlı dielektrik katsayısı, yağ dolu test hücresinin kapasite değerinin vakum dielektrikli kapasite değerine oranı ile hesaplanmaktadır. 50 Hz şebeke frekansında 1 kV-12 kV gerilim aralığı için farklı sıcaklıklardaki ϵ_r değerleri ölçümlerle

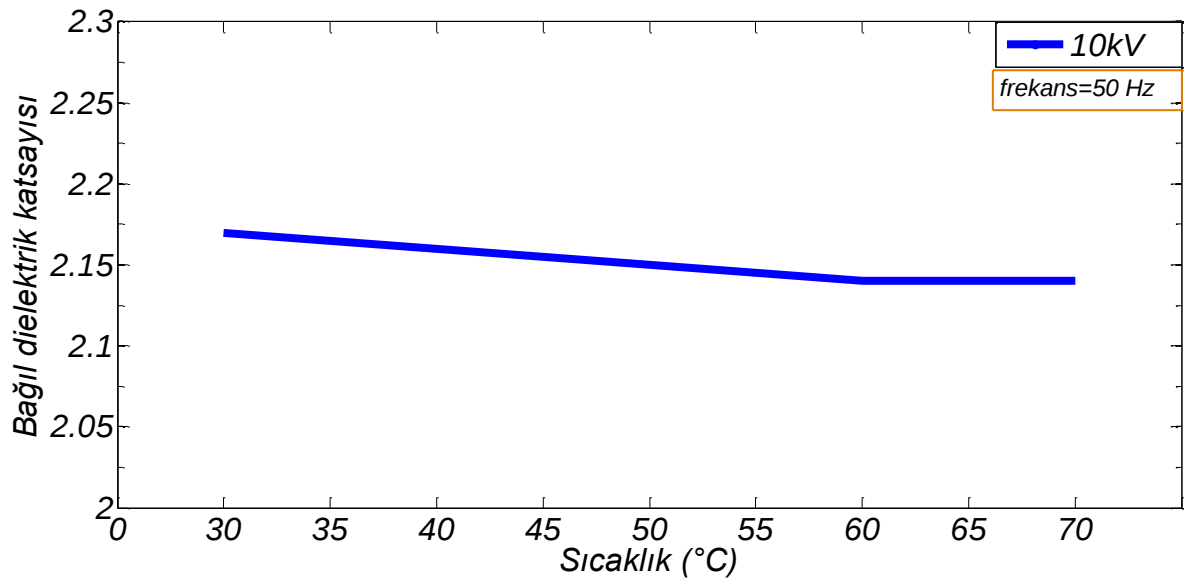
belirlenmiştir. Şekil 6.14’den görüleceği üzere ölçülen sıcaklık değerlerinin hepsinde gerilim artışı yağın bağıl dielektrik katsayısını etkilememiştir.



Şekil 6. 14 Mineral yağın gerilime bağlı dielektrik katsayısı değişimi

6.4.2 Sıcaklığa Bağlı Bağıl Dielektrik Katsayısı Değişimi

Mineral yağın sıcaklığa göre bağıl dielektrik katsayısını incelemek için yağa 30°C, 40°C, 50°, 60°C ve 70°C’de 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim uygulayarak kapasitesi ölçülmüştür. Daha sonra ölçülen bu değerler boş kabın kapasitesine bölünerek bağıl dielektrik katsayısı değerleri tespit edilmiştir. Ölçülen gerilim seviyelerinde yağın kapasite değerinin, gerilime bağlı olarak değişmediği görülmüştür. Bu nedenle, Şekil 6.15’de sadece 10 kV gerilim değeri için yağın sıcaklığa bağlı, bağıl dielektrik katsayısı verilmektedir.

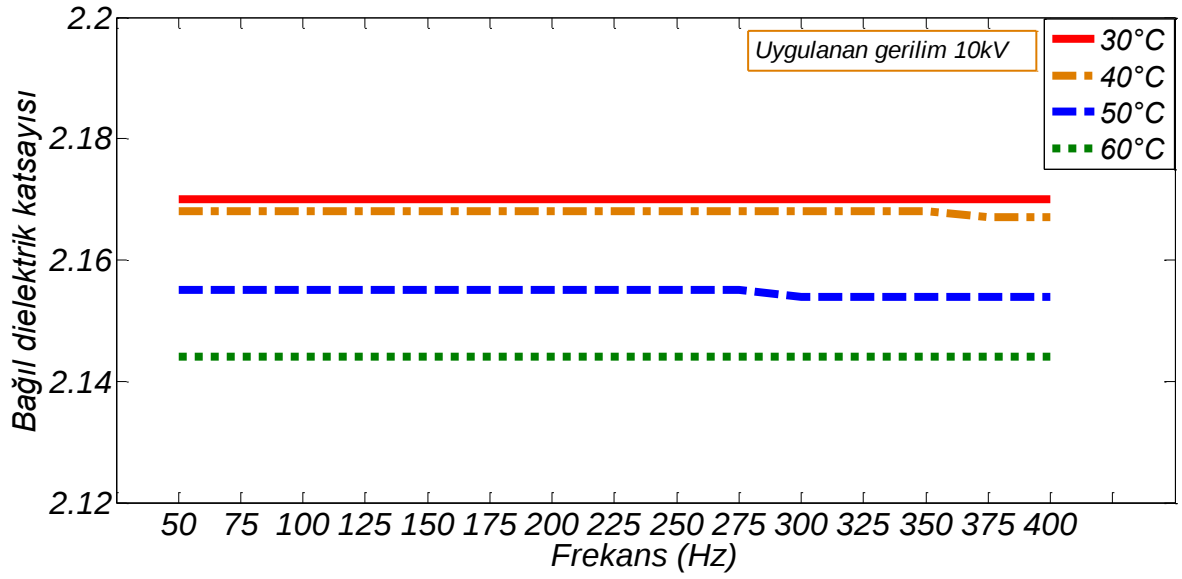


Şekil 6. 15 Mineral yağın sıcaklığa bağlı bağıl dielektrik katsayısı değişimi

Mineral yağın bağıl dielektrik katsayısı sıcaklık artışı ile 30°C'de 2,17 iken 70°C'de 2,14 değerine gerileyerek hafif bir şekilde azalmıştır. Mineral yağının 70°C'deki bağıl dielektrik katsayısı 30°C ile kıyaslandığında %1,4 azalmaktadır. Elektrik alan dağılımının düzgün olması için yalıtım yağlarındaki ϵ_r değerinin olabildiğince yüksek olması istenmektedir.

6.4.3 Frekansa Bağlı Bağıl Dielektrik Katsayısı Değişimi

Deneysel çalışmada mineral yağın kapasite değerinin 50 Hz-400 Hz frekans aralığı için, frekans artışından çok az etkilendiği ve dolayısıyla yalıtım yağının bağıl dielektrik katsayısı değerinin de frekansa bağlı olarak hemen hemen sabit olduğu görülmüştür. Frekans değişimlerinin 30°, 40°C, 50°C, 60°C sıcaklık değerlerinin hepsinde mineral yağın bağıl dielektrik katsayısını etkilemediği tespit edilmiştir. Mineral yağın frekansa bağlı bağıl dielektrik katsayısı değişimleri Şekil 6.16'da gösterilmektedir.

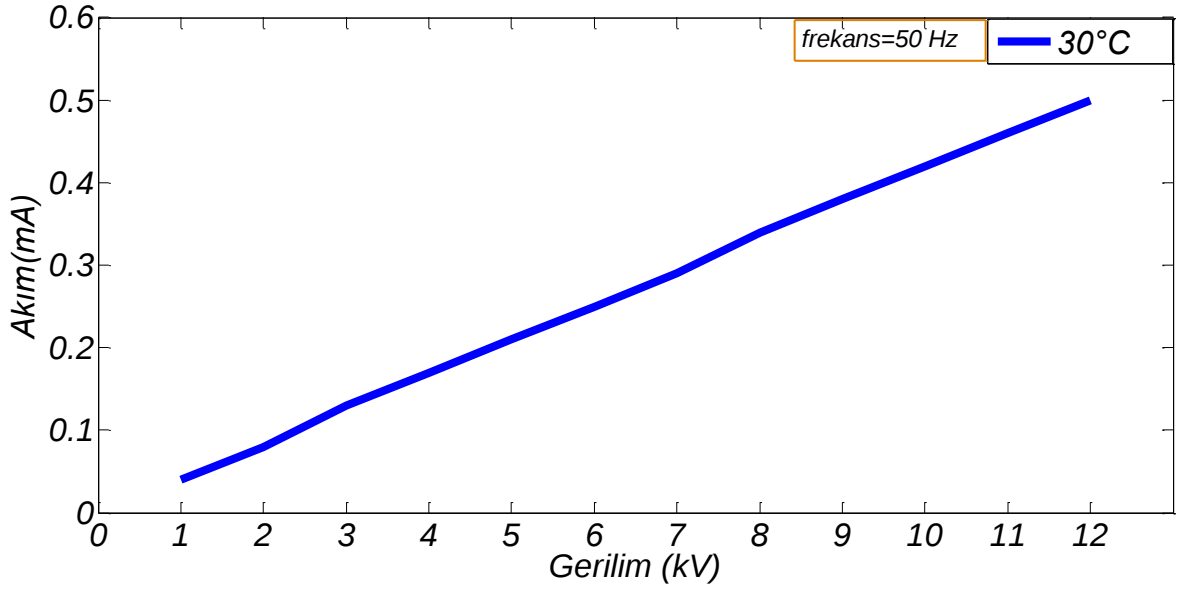


Şekil 6. 16 Mineral yağın frekansa bağlı dielektrik katsayısı değişimi

6.5 Akım Değişimi Testi

6.5.1 Akımın Gerilime Bağlı Değişimi

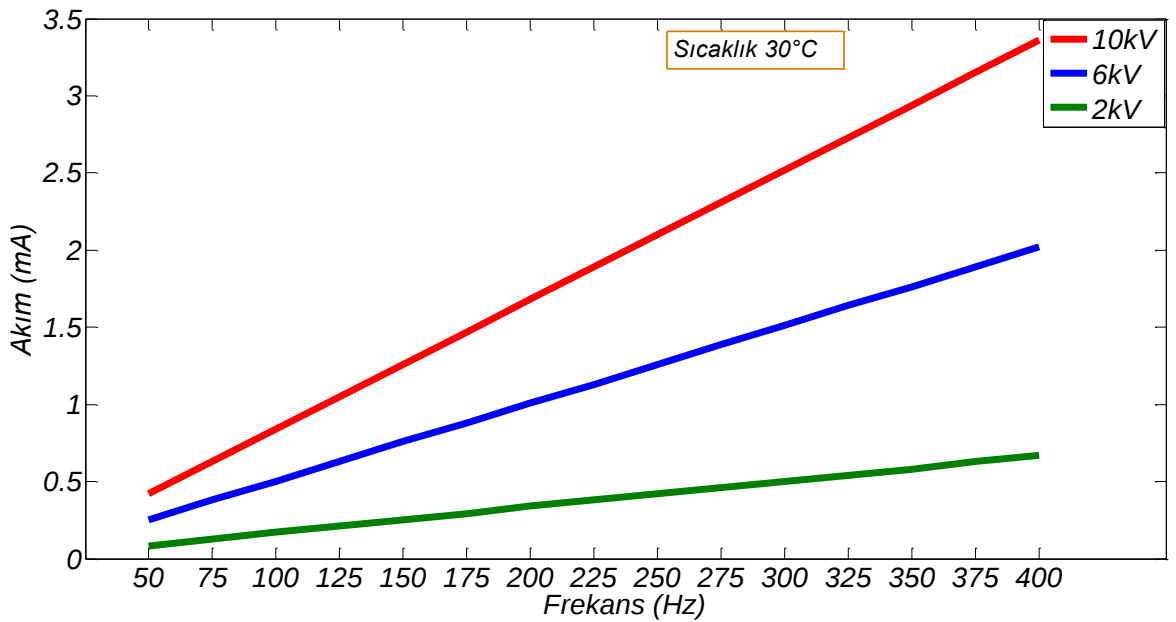
Mineral yağ üzerinde gerçekleştirilen analizlerde yağta 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklık değerlerinde 1 kV-12 kV aralığında gerilim uygulanmıştır. Ölçülen gerilim seviyelerinde yağın çektiği akım değerinin, sıcaklığa bağlı olarak değişmediği görülmüştür. Ölçümü yapılan tüm sıcaklıklarda, eşdeğer empedansın hemen hemen aynı olmasından dolayı çekilen akım değerinde değişiklik gözlenmemiştir. Bu nedenle, Şekil 6.17’de mineral yağın sadece 30°C için 50 Hz frekansta gerilime bağlı, akım değişimi verilmektedir. 1 kV, 6 kV ve 12 kV gerilim değerlerinde yapılan ölçümlerde 50 Hz’de çekilen akım sırasıyla 0,04 mA, 0,26 mA ve 0,51 mA’dır.



Şekil 6. 17 Mineral yağa uygulanan gerilime bağlı akım değişimi

6.5.2 Akımın Frekansa Bağlı Değişimi

Mineral yağın 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C sıcaklık değerlerinde elektriksel parametrelerini araştırmak için yürütülen deneylerde yağa 50 Hz-400 Hz aralığında 25 Hz'lik artışlarla frekans arttırılmıştır. Ölçülen tüm frekans seviyelerinde yağın çektiği akım değerinin, sıcaklığa bağlı olarak değişmediği görülmüştür. Bu nedenle, Şekil 6.18'de mineral yağın sadece 30°C için, frekansa bağlı akım değişimi verilmektedir.



Şekil 6. 18 Mineral yağa uygulanan frekans-akım değişimi

2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim değerlerinde yapılan ölçümlerde 50Hz'de uygulanan akım sırasıyla 0,09 mA, 0,26 mA ve 0,43 mA'dir. Frekans artışıyla beraber akım da artarak 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim değerleri için 200 Hz frekansta sırasıyla 0,34 mA, 1,02 mA ve 1,70 mA'dir. 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim değerleri için 400 Hz frekans değerinde çekilen akım sırasıyla 0,68 mA, 2,05 mA ve 3,41 mA'dir. 400 Hz'deki çekilen akım 50 Hz'deki ile kıyaslandığında 2 kV, 6 kV ve 10 kV gerilim değerleri için sırasıyla yaklaşık olarak %655, %688, %693 olarak arttığı belirlenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik tesislerinde kullanılan donanımlarda yalıtım ve ısıl soğuma amacıyla mineral yağ, ağırlaştırılmış hidrokarbonlu sıvı, silikonlu sıvı, doğal ester, sentetik ester ve kimyasal olarak belirli oranlarda karıştırılan yalıtım sıvıları kullanılmaktadır. Yalıtım sıvısının seçiminde çevre dostu oluşu, oksidasyon kararlılığı, viskozite indeksi, parlama noktası, akma noktası, delinme gerilimi ve tan delta gibi kalite parametreleri göz önüne alınmaktadır.

Bitkisel yağlar, iyi dielektrik parametrelere sahip olmaları ve çevre dostu oluşlarına rağmen fiyat olarak endüstriyel kullanıcıları tatmin edememektedir. Bu nedenle, özellikle tonlarca yalıtım yağının kullanıldığı güç transformatörlerinde mineral yağların fiyat olarak istenilen seviyelerde olması ve iyi dielektrik parametrelere sahip olması hala tercih edilmesinin nedenlerindendir.

Gerçekleştirilen analizlerin doğruluğu ve güvenilirliği için ölçümlerin standartlara göre yapılması ve bu test standartlarının doğru yorumlanması önemlidir. Gerçekleştirilen ölçümlerde delinme gerilimleri ASTM D1816 ve ASTM D877 standartlarına göre, tan delta, güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısı ölçümleri ise IEC 60247 standardına uygun şekilde yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında, güç donanımlarında yaygın olarak kullanılan mineral yağın dielektrik özelliklerini etkileyen parametreler araştırılarak etkileri ortaya konmuştur.

Deneyisel çalışmada mineral yağın delinme gerilimi üzerinde sıcaklık, gerilim artış oranı, elektrot geometrisi ve nem etkileri araştırılmıştır. Farklı sıcaklık değerleri göz önüne

alınarak sıcaklığın etkisi ve yalıtım sıvısında bulunabilecek istenmeyen nem durumunu simüle etmek için de farklı miktarda su eklenerek delinme gerilimi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Mineral yağın delinme gerilimi için elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Delinme geriliminin sıcaklığa bağlı değişimi: ASTM D877 standardına göre yapılan ölçümde mineral yağın delinme geriliminin sıcaklıkla orantılı olarak hafif bir şekilde arttığı ve 110°C'de delinme gerilimin 30°C ile kıyaslandığında yaklaşık %30'luk bir artış görülmüştür.

Gerilim artış hızına bağlı delinme gerilimi: Farklı elektrot aralıkları için gerilim artış hızının delinme gerilimi üzerindeki etkileri ASTM D186 ve ASTM D877 standartlarına göre incelenmiştir. Gerilim artış hızı arttıkça mineral yağın delinme gerilimi değerinin arttığı görülmüştür. VDE elektrot geometrisinin delinme gerilimi 0,5kV/s, 2kV/s ve 3kV/s gerilim artış hızlarında Disk elektrottan daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca elektrot açıklığı arttıkça beklendiği gibi delinme gerilimi artmıştır.

Elektrot geometrisine bağlı delinme gerilimi: Elektrot geometrisinin yağın delinme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmak için VDE ve DİSK elektrot tipleri kullanılmıştır. VDE elektrot geometrisinin ölçülen tüm elektrot aralıklarında ve gerilim artış hızlarında delinme gerilimi daha yüksek çıkmıştır. 3kV/s gerilim artış hızında VDE elektrot geometrisi 1 mm, 2mm ve 2,5mm elektrot aralığı için sırasıyla %20,1, %6,6 ve 6,8 daha büyük çıkmıştır.

Delinme geriliminin neme bağlı değişimi: Yalıtım yağlarının direncini olumsuz etkileyen nem durumu yağ içerisine belirli oranlarda su katılarak simule edilmiştir. Yağ içerisine ilave edilen su miktarı arttıkça delinme geriliminin olumsuz etkilenecek yalıtım özelliğinin zayıfladığı görülmüştür. Yağda bulunan toplam su miktarı arttıkça yalıtım sisteminin de direnci zayıflamıştır. Bu nedenle yağdaki su miktarındaki her artış delinme dayanımını düşüren etkenlerden biri olmaktadır. Yalıtım yağına eklenen %2,5 su için yağın delinme gerilimi yaklaşık %46 azalmıştır.

Nemlendirilmiş mineral yağın sıcaklığa bağlı delinme gerilimi: İşletmede olası bir durum için mineral yağ içerisine 25ml su eklenerek yağ nemlendirilmiştir. Sıcaklık arttıkça suyun yağdaki çözünürlüğü de artmaktadır. Ancak bu çözünürlüğün suyun buharlaşma

sıcaklığına kadar olacağı düşünülmektedir Sıcaklığa bağlı delinme gerilimi suyun buharlaşma sıcaklığına kadar artmıştır. Delinme gerilimindeki bu artış değerleri, yeni yağ için ölçülen sıcaklığa bağlı değerlere göre daha düşüktür. Suyun buharlaşma sıcaklığı aşıldığında meydana gelen su buharı elektrotlar arasına gelerek yalıtım yağının delinme geriliminin düşmesine neden olmuştur.

Mineral yağın dielektrik kayıp faktörü, güç kaybı ve bağıl dielektrik katsayısı üzerinde farklı gerilim seviyelerinin, sıcaklığın ve frekansın etkileri IEC 60247 standardına göre analiz edilmiştir.

Mineral yağın dielektrik kayıp faktörü için elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Gerilime bağlı $\tan \delta$ değişimi: Şebeke frekansı 50Hz’de yürütülen ölçümde mineral yağın $\tan \delta$ değeri gerilim artışı ile non-lineer şekilde artmıştır. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C’de yapılan ölçümlerde 12kV’daki $\tan \delta$ değerleri 1kV’daki ile kıyaslandığında sırasıyla %22,2, %16,4, %16,8 ve %17,6’lık artışlar meydana geldiği görülmüştür.

Sıcaklığa bağlı $\tan \delta$ değişimi: Yağ sıcaklığının artışına bağlı olarak yağ direncinin zayıflayarak $\tan \delta$ değerinin arttığı görülmüştür. 60°C’deki dielektrik kayıp faktörü 30°C ile kıyaslandığında 2kV, 6kV ve 10kV gerilim değerleri için sırasıyla %119,2’lik, %118,8’lik ve 117,5’lik artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir.

Frekansa bağlı $\tan \delta$ değişimi: Frekans artışı ile 50Hz’de ölçülen ilk $\tan \delta$ değeri 400Hz’de ölçülen son değere göre tüm sıcaklık değerlerinde azalmaktadır. 30°C, 40°C, 50°C ve 60°C’de yapılan ölçümlerde 400Hz’deki dielektrik kayıp faktörü, 50Hz ile kıyaslandığında sırasıyla %27,1, %34,3, %69,2 ve %87,5 olarak azaldığı görülmüştür.

Mineral yağda meydana gelen dielektrik güç kaybı ölçümleri için elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Gerilime bağlı dielektrik güç kaybı değişimi: Şebeke frekansı 50Hz’de gerilim değişimlerine bağlı olarak yalıtım yağında ısı şeklinde ortaya çıkan aktif güç kayıpları araştırılmıştır. Güç kayıpları gerilim artışına bağlı olarak üstel artmaktadır. Meydana gelen kayıplar çok küçük olmasına rağmen bu değerler yağın kullanılabilirliği hakkında önem arz etmektedir.

Sıcaklığa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi: Dielektrik güç kayıplarının sıcaklık artışına bağlı arttığı görülmüştür. Uygulanan 10kV gerilim için 30°C'deki kayıp 0,85mW iken 60°C'daki dielektrik kayıp %109,4 artarak 1,78mW olmuştur.

Frekansa bağlı dielektrik güç kaybı değişimi: Frekans değişimlerinin farklı sıcaklık değerlerinde güç kaybı üzerinde etkileri araştırılmıştır. Frekans artışı ile dielektrik kayıplar non-liner bir artış göstermiştir. Ara frekans değerlerindeki kayıplardaki dalgalanmalar $\tan \delta$ değerinin genelde frekans artışı ile azalma eğilimi göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Mineral yağın bağlı dielektrik katsayısı için elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Gerilime bağlı ϵ_r değişimi: 1kV-12kV gerilim aralığı için yürütülen deneyde, mineral yağın bağlı dielektrik katsayısının gerilim değişimlerinden etkilenmediği görülmüştür.

Sıcaklığa bağlı ϵ_r değişimi: Sıcaklık artışı ile bağlı dielektrik katsayısının hafif şekilde azaldığı belirlenmiştir. 30°C'deki ϵ_r değeri 2,17 iken, 70°C'de yaklaşık %1,4 azalarak 2,14 olmuştur.

Frekansa bağlı ϵ_r değişimi: Bağlı dielektrik katsayısının frekans değişimlerinden çok az etkilendiği ve hemen hemen sabit olduğu görülmüştür.

Mineral yağın çektiği akım değişimi için elde edilen deney sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Gerilime bağlı akım değişimi: Gerilim artışıyla beraber akım değeri de artmıştır. 1kV'da çekilen akım 0,04 mA iken, 12kV'da 0,51mA olarak ölçülmüştür.

Frekansa bağlı akım değişimi: Frekans artışı ile çekilen akım değeri de artmıştır. 10kV için 50Hz'de çekilen akım 0,43mA iken, 400Hz'de yaklaşık %693 artışla 3,41mA olmuştur.

Gelecekteki çalışmalarda, yalıtım sıvıları belirli oranlarda karıştırılarak mineral yağdan daha iyi değerlerde kalite parametrelerine sahip bir yalıtım sıvısının elde edilmesi beklenmektedir. Ayrıca bu yeni yalıtım yağının transformatör içindeki durumunu simule etmek için yağa bakır, demir çekirdek ve yalıtım kâğıdı eklenerek belli bir sıcaklık değerinde hızlandırılmış yaşlandırma yapılabilir. Daha sonra yağın oksidasyon kararlılığı

ve asitlik gibi kimyasal ölçümleri yapılarak yalıtım yağının kullanılabilirliği hakkında daha fazla bilgi elde edilebilecektir. Böylece gerçek çalışma koşullarına yakın meydana gelecek etkinin belirlenmesi ve bu etkilerin olumsuzluklarının önlenmesi çalışmaları mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Heathcote, M., (2007). J & P Transformer Book, Thirteenth Edition, Newnes, Oxford.
- [2] Lingal, H. J., Skeats, W. F., and Braley, H. D., (1941). "Dielectric Strength of Oil for High-Voltage Testing of Oil Circuit Breakers", *Electrical Engineering*, 60(9): 903-906.
- [3] Oshi, T., Tsukao, S., Ishii, T., Itahashi, S., and Kamba, M., (2003). "Properties of Aged Oil Impregnated Paper Power Capacitor", In *Properties and Applications of Dielectric Materials, Proceedings of the 7th International Conference on*, 1:246-249.
- [4] IEEE Std C37.109™, (2007). IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors, IEEE, New York.
- [5] Zarim, Z. A. A., and Anthony, T.M., (2012). "The Development of Condition Based Maintenance for 33kV Oil-Filled Cable", *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 23-27 September 2012, Bali, Indonesia, 225-228.
- [6] Goff, M. B., and Eltom, A. H., (2013). "Oil Filled Bushing Secrets Revealed", In *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2013 IEEE, 1-9.
- [7] IEEE Std 62, (1995). IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, IEEE, New York.
- [8] Kocatepe, C., Arikan, O., Taslak, E., and Kumru, C. F., (2013). "Breakdown Voltage Analysis of Insulating Oils Under Different Conditions", In *Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS)*, 2013 3rd International Conference on, Istanbul, pp. 1-4.
- [9] Bartley, W. H., (2003). "Analysis of Transformers Failures", In *International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference*, Stockholm, 2003, 1-5
- [10] Fernández, I., Ortiz, A., Delgado, F., Renedo, C., and Pérez, S., (2013). "Comparative Evaluation of Alternative Fluids for Power Transformers", *Electric Power Systems Research*, 98: 58-69.
- [11] Liu, Q., and Wang, Z. D., (2011). "Streamer Characteristic and Breakdown in Synthetic and Natural Ester Transformer Liquids with Pressboard Interface

- under Lightning Impulse Voltage”, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 18(6): 1908-1917.
- [12] Wang, X., and Wang, Z. D., (2008). “Particle Effect on Breakdown Voltage of Mineral and Ester Based Transformer Oils”, In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, CEIDP 2008. Annual Report Conference on, 598-602.
 - [13] Yasuda, K., Arazoe, S., Igarashi, T., Yanabu, S., Ueta, G., and Okabe, S., (2010). “Comparison of the Insulation Characteristics of Environmentally-Friendly Oils”, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 17(3): 791-798.
 - [14] Pokryvailo, A., and Carp, C., (2012). “Comparison of the Dielectric Strength of Transformer Oil under DC and Repetitive Multimillisecond Pulses”, *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 28(3): 40-49.
 - [15] Nosseir, A., El-Debeiky, S., and Hashad, I. F., (1980). “Effect of Temperature on the Breakdown Probability of Liquid Dielectrics”, *Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, EI-15(6): 502-505.
 - [16] Ngoc, M. N., Lesaint, O., Bonifaci, N., Denat, A., and Hassanzadeh, M., (2010). “A Comparison of Breakdown Properties of Natural and Synthetic Esters at High Voltage”, In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2010 Annual Report Conference on, 17-20 Oct. 2010, IEEE, 1-4.
 - [17] Martin, D., and Wang, Z. D., (2006). “A comparative Study of the Impact of Moisture on the Dielectric Capability of Esters for Large Power Transformers”, In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2006 IEEE Conference on, 15-18 Oct. 2006, 409-412.
 - [18] Ueta, G., Tsuboi, T., Okabe, S., and Amimoto, T., (2012). “Study on Degradation Causing Components of Various Characteristics of Transformer Insulating Oil”, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 19(6): 2216-2224.
 - [19] Kohtoh, M., Kaneko, S., Okabe, S., and Amimoto, T., (2009). “Aging Effect on Electrical Characteristics of Insulating Oil in Field Transformer”, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 16(6): 1698-1706.
 - [20] Kohtoh, M., Ueta, G., Okabe, S., and Amimoto, T., (2010). “Transformer Insulating Oil Characteristic Changes Observed Using Accelerated Degradation in Consideration of Field Transformer Conditions”, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on, 17(3): 808-818.
 - [21] Tenbohlen, S., and Koch, M., (2010). “Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers”, *Power Delivery*, IEEE Transactions on, 25(2): 825-830.
 - [22] Shim, M. S., (2010). “Comparative Evaluation of Aging of Insulating Material in Natural Ester and Mineral oil”, In *High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2010 International Conference on, IEEE, 393-396.
 - [23] Jeong, J. I., An, J. S., and Huh, C. S. (2012). “Accelerated Aging Effects of Mineral and Vegetable Transformer Oils on Medium Voltage Power

- Transformers", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 19(1): 156-161.
- [24] Abdi, S., Boubakeur, A., and Haddad, A., (2008). "Influence of Thermal Ageing on Transformer Oil Properties", In Dielectric Liquids, ICDL 2008. IEEE International Conference on, 30 June-3 July 2008, 1-4.
 - [25] Coulibaly, M. L., Perrier, C., Marugan, M., and Beroual, A., (2013). "Aging Behavior of Cellulosic Materials in Presence of Mineral Oil and Ester Liquids under Various Conditions", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 20(6):1971-1976.
 - [26] Kocatepe, C., Arıkan, O., Taslak, E., Kumru, C. F., (2013). "Yüksek Gerilim Tesislerinde Kullanılan Yalıtkan Yağların Delinme Dayanımı Analizi", 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu(EVK), 23-24 Mayıs 2013, 156-160.
 - [27] Fofana, I., (2013). "50 Years in the Development of Liquids", Electrical Insulation Magazine, IEEE, 29(5): 13-25.
 - [28] Al-Arainy, A. A., Qureshi, M.I., and Malik, N. H., (2005). Fundamentals of High Voltage Engineering, Academic Publishing and Press, Riyadh.
 - [29] Eberhardt, R., Muhr, H. M., Lick, W., Wieser, B., Schwarz, R., and Pukel, G., (2010). "Partial Discharge Behaviour of an Alternative Insulating Liquid Compared to Mineral Oil", In Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International, 23-27 May 2010, 426-429.
 - [30] Sezer, M., (2008). Yalıtım Yağı ve Trafo Bakımı, 1. Basım, Çağdaş Basımevi, Balıkesir.
 - [31] Upadhyay, C., (2011). A Study of Life Time Management of Power Transformers at E. ON's Öresundsverket, Malmö, Master Thesis, Lund University and Faculty of Engineering, Lund.
 - [32] Abdel-Salam, M., Anis, Hussein., El-Morshedy, A., and Radwan, R., (2000). High-Voltage Engineering: Theory and Practice, Second Edition, Revised and Expanded, Mercel Dekker, USA
 - [33] Staylianos, K., (2009). Centrel Ostrobothnia University of Applied Sciences, Distribution Transformers and Maintenance, <http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/hlk/2009/KalogerakisStylianos/attached-document/2009kalogerakis.pdf>, 8 Mayıs 2014.
 - [34] McShane, C. P., (2001). "Relative Properties of The New Combustion-Resist Vegetable-Oil-Based Dielectric Coolants for Distribution and Power Transformers", Industry Applications, IEEE Transactions on, 37(4): 1132-1139.
 - [35] McShane, C. P., Corkran, J., Rapp, K., and Luksich, J., (2006). "Natural Ester Dielectric Fluid Development", In Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, 21-24 May 2006, Dallas, 18-22.
 - [36] Working Group A2-35., (2010). Experiences in Service with New Insulating Liquids, http://static.mimaterials.com/midel/documents/sales/New_Experiences_in_Service_with_New_Insulating_Liquids.pdf, 10 Mayıs 2014.

- [37] McShane, C. P., (2002). "Vegetable-oil-based dielectric coolants", *Industry Applications Magazine*, IEEE, 8(3): 34-41.
- [38] Eberhardt, R., Muhr, H. M., Lick, W., Baumann, F., and Pukel, G., (2008). "Comparison of alternative insulating fluids", In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, CEIDP 2008. Annual Report Conference on, 591-593.
- [39] Claiborne, C. C., Walsh, E. J., and Oommen, T. V., (1999). "An Agriculturally Based Biodegradable Dielectric Fluid", In *Transmission and Distribution Conference*, 1999 IEEE, 2: 876-881.
- [40] Oommen, T. V., (2002). "Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers", *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 18(1): 6-11.
- [41] McCormick, G. P., and Howells, E., (1997). "Arcing Resistance of High Fire Point Dielectric Liquids", *Power Delivery*, IEEE Transactions on, 12(3): 1184-1192.
- [42] Wheeler M., (2012). *Insulating Fluids: An Overview of Alternative Dielectric Fluids Used in Transformers*,
<http://huntleyandassociates.com/PDFs/Michael%20wheeler%20-%20DT%202-6-2013.pdf?iframe=true&width=100%&height=102%>, 8 Mayıs 2014.
- [43] Butcher, M. D., (2005). *Mechanisms of Charge Conduction and Breakdown in Liquid Dielectrics*, Doctoral dissertation, in *Electrical Engineering of Texas Tech University*, Texas.
- [44] Naidu, M. S., and Kamaraju, V., (1996). *High voltage engineering*, Second Edition, McGraw-Hill Education, New York.
- [45] Wang, X., Wang, Z. D., and Noakes, J., (2011). "Motion of Conductive Particles and the Effect on AC breakdown Strengths of Esters", In *Dielectric Liquids (ICDL)*, 2011 IEEE International Conference on, 1-4.
- [46] Wang, X., (2011). *Partial Discharge Behaviours and Breakdown Mechanisms of Ester Transformer Liquids under ac Stress*, PhD Dissertation, the University of Manchester, in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester.
- [47] Yulastuti, E., (2010). *Analysis of Dielectric Properties Comparison Between Mineral Oil and Synthetic Ester Oil*, Master Dissertation, Delft University of Technology, in *Electrical Engineering*, Delft.
- [48] Góngora-Nieto, M. M., Pedrow, P. D., Swanson, B. G., and Barbosa-Cánovas, G. V., (2003). "Impact of Air Bubbles in a Dielectric Liquid when Subjected to High Field Strengths", *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 4(1): 57-67.
- [49] Yılmaz, Hülya., (1996), *Sıvı Yalıtkanlarda Dielektrik Dayanma Sınırının Değişik Faktörlere Bağlı Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [50] Wadhwa, C. L., (2007). *High Voltage Engineering*, Second Edition, New Age International, New Delhi.

- [51] Farooq, K., (1996). "The Effect of Particulate and Water Contamination on the Dielectric Strength of Insulating Oils", In Electrical Insulation, Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on, 16-19 Jun 1996, 2: 728-732.
- [52] Report (Ref. E/T37) of the British Electrical and Allied Industries Research Association., (1929). "The Effect of Added Impurities on the Breakdown Voltage of Insulating Oils (summary of experimental work.)", Electrical Engineers, Journal of the Institution of, 67(390): 750-755.
- [53] Betie, A., Meghnefi, F., Fofana, I., and Yéo, Z., (2012). "On the Impacts of Ageing and Moisture on Dielectric Response of Oil Impregnated Paper Insulation Systems", In Proceedings of the IEEE Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 14-17 Oct. 2012, 219-222.
- [54] Chao, Z., Du, B., Gao, Y., Liu, Y., and Hu, W., (2013). "Effect of Suspending Bubbles on Tracking Failure of Oil-Impregnated Pressboard", In Solid Dielectrics (ICSD), 2013 IEEE International Conference on, 30 June 2013, 1036-1039.
- [55] Tübitak, Tübitak Bilim ve Teknik Dergisi, http://biltek.tubitak.gov.tr/merak_ettikleriniz/index.php?kategori_id=6&soru_id=4084, 9 Mayıs 2014.
- [56] Adnan Menderes Üniversitesi Kişisel Sayfaları, Çözünme ve Çözünürlük, <http://web.adu.edu.tr/user/mdemir/K213/05-cokmevecozunurluk.pdf>, 9 Mayıs 2014.
- [57] Rajab, A., Sulaeman, A., and Sudirham, S., (2011). "A Comparison of Dielectric Properties of Palm Oil with Mineral and Synthetic Types Insulating Liquid under Temperature Variation", ITB Journal of Engineering Science, 43(3): 191-208.
- [58] IEC 60247, (2004). Insulating Liquids-Measurement of Relative Permittivity, Dielectric Dissipation Factor ($\tan \delta$) and d.c. Resistivity, IEC, Third Edition, Switzerland.
- [59] Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., ve Arıkan, O.,(2011). Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [60] Singh, J., Sood, Y. R., and Verma, P. (2012). "The Influence of Service Aging on Transformer Insulating Oil Parameters", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 19(2): 421-426
- [61] NYNAS, Base Oil Handbook, http://www.engnetglobal.com/documents/pdfcatalog/NYN001_200412073535_Base%20oil%20handbookENG.pdf, 8 Mayıs 2014.
- [62] ASTM D1500-12, (2012). Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products, ASTM, West Conshohocken.
- [63] IEC 60422, (2005-10). Mineral Insulating Oils In Electrical Equipment-Supervision and Maintenance Guidance, IEC, Switzerland.

- [64] Djairam, D., Yu, M., Chmura, L., Mehairjan, R. P. Y., Zhuang, Q., Morshuis, P. H. F., and Boender, D., (2012). "Influence of Environmental and Operational Conditions on Breakdown Voltage of Oil in Switchgear", In Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2012 International Conference on, Bali, 297-300.
- [65] I.A.R. GRAY Transformer Chemistry Services, A Guide to Transformer Oil Analysis, http://www.satcs.co.za/Transformer_Oil_Analysis.pdf, 8 Mayis 2014.
- [66] Hirschler, M. M., (Ed.) (2000). Electrical Insulating Materials: International Issues, STP1376, Astm International, Baltimore.
- [67] IEC 60296, (2003-11). Fluids for Electrotechnical Applications-Unused Mineral Insulating Oils for Transformers and Switchgear, IEC, Third edition, Switzerland.
- [68] IEEE Std C57.106™-2006, (2007). IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, IEEE, New york.
- [69] ASTM D1816, (2012). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using VDE Electrodes, ASTM International, West Conshohocken.
- [70] ASTM D877, (2007). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disc Electrodes, ASTM International, West Conshohocken.
- [71] IEC 156, (1995). Insulating Liquids- Determination of Breakdown Voltage at Power Frequency-Test Method, IEC, Second Edition, Switzerland.
- [72] Suzuki, T., Hiramoto, H., and Umeda, M., (1983). "Dependence of Breakdown Voltage of Silicone Liquid on Temperature", Electrical Insulation, IEEE Transactions on, EI-18(4): 462-464.
- [73] Akmal, A. S., Borsi, H., Gockenbach, E., Wasserberg, V., and Mohseni, H., (2006). "Dielectric Behavior of Insulating Liquids at Very Low Frequency", Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 13(3): 532-538.
- [74] Badicu, L. V., Notingher, P. V., Dumitran, L. M., Tanasescu, G., and Popa, D., (2009). "Measuring of the dielectric properties of mineral oil", In Proceedings of 5th International Conference Metrology and Measurement Systems, Printed by Noua, Bucharest, 284-289.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Eyüp TASLAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.07.1988, Sürmene
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : etaslak@yildiz.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Elektrik Öğretmenliği	Fırat Üniversitesi	2009
Lise	Elektrik	Terme E.M.L.	2005

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010	Hakkari Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Kocatepe, C., Arıkan, O., Taslak, E., Kumru, C. F., "Yüksek Gerilim Tesislerinde Kullanılan Yalıtkan Yağların Delinme Dayanımı Analizi", 5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK), Kocaeli, s.156-160, 23-24 Mayıs 2013.
2. Kocatepe, C., Arıkan, O., Taslak, E., Kumru, C. F., "Breakdown Voltage Analysis of Insulating Oils under Different Conditions", In Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on. IEEE, İstanbul, pp. 1-4, 2-4 Oct. 2013.