

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİNİN
DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN
25 °C - 140 °C SICAKLIK ARALIĞINDA
İNCELENMESİ

Hatice Zehra AKBAŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
Konya- 2002

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EPOKSİ REÇİNESİ Ve KOMPOZİTLERİNİN DİELEKTRİK
ÖZELLİKLERİNİN 25°C -140 °C SICAKLIK ARALIĞINDA
İNCELENMESİ

Hatice Zehra AKBAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

Konya- 2002

Bu tez 09 / 08 / 2002 tarihinde oybirliği ile kabul edilmiştir.

Doç.Dr. H. Şükür KILIÇ

Başkan

Yrd.Doç.Dr. Haziret DURMUŞ

Üye (Danışman)

Yrd.Doç.Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ

Üye

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİNİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN 25°C -140 °C SICAKLIK ARALIĞINDA İNCELENMESİ

Hatice Zehra AKBAŞ

**Selçuk Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü**

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ

2002, 51 sayfa

Jüri: Doç. Dr. H. Şükür KILIÇ

Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ

Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ

Her malzeme dielektrik özelliklerine bağlı olan özgün bir elektriksel karakteristik takımına sahiptir. Bu özelliklerin doğru olarak ölçülmesi, kritik tasarım bilgisi sağlaması açısından son derece önemlidir.

Bu çalışmada, ilk olarak malzemelerde dielektrik kutuplanma ve kayıp mekanizmaları ile bağlı olduğu faktörler ayrı ayrı ele alınmıştır. Daha sonra polimerler ve epoksi reçinesinin üzerinde durulmuştur.

Son olarak da, epoksi reçinesi ve dört farklı kompozitin dielektrik parametreleri paralel plakalı kondansatör metodu ile 5Hz - 13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak, 25 °C - 140 °C sıcaklık bölgesinde ölçülmüştür.

Ölçümlerden ilgili malzemelere ait dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları ile ac iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi araştırılıp benzer malzemelerin literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dielektrik ölçümler, Dielektrik geçirgenlik, Dielektrik kayıp, Kutuplanma, Epoksi

ABSTRACT**M. S. Thesis****A STUDY OF DIELECTRIC PROPERTIES OF EPOXY AND COMPOSITES
AT A TEMPRETURE RANGE OF 25°C -140 °C**

Hatice Zehra AKBAŞ

Selçuk University**Graduate School of Natural and Applied Sciences****Department of Physics****Supervisor: Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ****2002, 51 Pages****Jury: Assoc. Prof. Dr. H. Şükür KILIÇ****Assist. Prof. Dr. Haziret DURMUŞ****Assist. Prof. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ**

Each material has some special set of electrical characteristics depending on the dielectric properties of special material. Correct measurement of these properties is very important to obtain information on critical use of materials.

In this work, first of all, dielectric polarizability and loss mechanisms of materials and other related factors affecting these mechanisms were discussed. This was followed by a discussion of polymers and epoxy resin.

Finally, epoxy resin and dielectric parameters of four different composites have been measured using parallel plate capacitor method by means of HP 4192A LF Impedance Analyser, which has a frequency range between 5 Hz- 13 MHz, at a temperature range from 25 °C to 140 °C.

Change of real and imaginary parts of dielectric constants and ac conductivity of materials with temperature have been studied and then compared to data in literature for similar materials.

Key Words: Dielectric measurement, dielectric permittivity, dielectric loss, polarizability, epoxy

ÖNSÖZ

Bir polimer olan epoksi reçinesi ve kompozitlerinin dielektrik özellikleri, 5Hz-13MHz frekans aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak, 25 °C - 140 °C sıcaklık bölgesinde incelenmiştir.

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü öğretim üyesi Yrd. Dç. Dr. Haziret DURMUŞ yönetiminde tamamlanarak, S.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Hiç bir eser sadece ve sadece yazanın eseri değildir. Yazılan her kelimedede bizden önce bu konuda çalışmış araştırmacıların da oldukça anlamlı bir payı vardır. Burada bu araştırmacılar ile birlikte ilk öğretmenim anneme ve babama, çalışmalarlarıyla bana örnek olan Akdeniz Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümündeki bütün hocalarıma teşekkür ediyorum.

Tez konusunun seçimi ve tezin hazırlanması konusunda her zaman bana yol gösteren, hiçbir yardımı benden esirgemeyen, Danışman Hocam, **Yrd. Doç. Dr. Haziret DURMUŞ'a**; çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan, Değerli Hocam, **Yrd. Doç. Dr. Hayrettin KÜÇÜKÇELEBİ'ye**, sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım.

Karşılaştığım problemleri çözmemde bana yardımcı olan **Doç. Dr. H. Şükür KILIÇ, Doç. Dr. Ülfet ATAV, Yrd. Doç. Dr. Haluk ŞAFAK, Yrd. Doç. Dr. Ayhan ÖZMEN, Yrd. Doç. Dr. Nurettin EREN'e** ve Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünün tüm diğer elemanlarına da teşekkür ederim.

Ayrıca numunelerin temini konusunda yardımcı olan Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü öğretim üyelerinden **Prof. Dr. Refika KURBANLI'ya** da teşekkür ederim.

Hatice Zehra AKBAŞ

KONYA-2002

KULLANILAN SİMGELER

α	Kutuplanabilirlik
c	Vakumda ışık hızı
C	Kapasitans
δ	Kompleks dielektrik geçirgenlikle reel bileşeni arasındaki açı
\vec{E}	Elektrik alanı
ϵ_0	Uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ	Bağlı dielektrik sabot
ϵ'	Dielektrik sabitinin reel kısmı
ϵ''	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ϵ_∞	Dielektrik sabitinin $\omega \rightarrow \infty$ daki değeri
ϵ_0	Dielektrik sabitinin $\omega \rightarrow 0$ daki değeri
f	Frekans
Φ	Kompleks dielektrik geçirgenlikle sanal bileşeni arasındaki açı
G	Kondüktans
I	Elektrik akım şiddeti
κ	Dielektrik alınganlık
L	İndüktans
M	Molekül kütlesi
n	Kırılma indisi
N	Molekül sayısı
\vec{p}	Elektrik dipol momenti
\vec{P}	Kutuplanma vektörü
P	Güç
q	Elektrik yük miktarı
Q	Kalite faktörü
R	Elektriksel direnç
ρ	Elektriksel özdirenç
σ	Elektriksel iletkenlik
t	Zaman
T	Sıcaklık
τ	Durulma zamanı
ω	Açısal frekans
V	Elektriksel gerilim

ŞEKİLLER VE TABLOLAR LİSTESİ

Şekil 2.1	İki noktasal yük için Coulomb etkisi.....	3
Şekil 2.2	Düzlem kapasitör.....	4
Şekil 2.3	Kutuplu bir dielektrik içindeki yüklerin düzenlenimi.....	5
Şekil 2.4	Fiziksel olarak bir dipolün tanımı.....	5
Şekil 2.5	Bir dipol molekülünün yönelim kutuplanması diyagramı.....	9
Şekil 2.6	Malzemelerdeki kutuplanma mekanizmaları.....	11
Şekil 2.7	Dielektrikler için eşdeğer devreler.....	13
Şekil 2.8	Malzemelerin frekansa tepkisi.....	17
Şekil 2.9	Nonpolar dielektriklerde ϵ' 'nin T sıcaklığına göre iki geçiş sınırındaki değişimleri.....	18
Şekil 3.1	Kutuplanma mekanizmalarının frekansla değişimi.....	23
Şekil 3.2	Kayıplı bir dielektrik içindeki akımların basitleştirilmiş diyagramı..	25
Şekil 3.3	Kayıp tanjant.....	26
Şekil 3.4	Tan δ nin uygulanan gerilime bağlılığı (şematik)	31
Şekil 4.1	Epoksi reçinesinin kimyasal formülü.....	35
Şekil 5.1	Numunelerin kimyasal formülleri.....	37
Şekil 5.2	Epoksi reçinesi ve kompozitlerinin 100 kez büyütülmüş resimleri....	38
Şekil 5.3	Dielektrik ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği.....	39

Şekil 6.1 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için reel dielektrik sabitinin frekansa bağlılığı.....	42
Şekil 6.2 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için sanal dielektrik sabitinin frekansa bağlılığı.....	43
Şekil 6.3 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için ac iletkenliğinin frekansa bağlılığı.....	45

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ	v
KULLANILAN SİMGELER	vi
ŞEKİLLER VE TABLOLAR LİSTESİ	vii
1.GİRİŞ	1
2.DİELEKTRİKLERİN KUTUPLANMASI	3
2.1 Giriş	3
2.2 Polar ve Apolar Dielektrikler	7
2.3 Kutuplanmanın Fiziksel Anlamı	8
2.4 Dielektrik Mekanizmalar	10
2.4a Elektronik ve Atomik (veya İyonik) Kutuplanma.....	11
2.4b Yönelimli Kutuplanma.....	12
2.4c Arayüzeysel veya Uzay Yüğü Kutuplanması.....	13
2.4d Distorsiyonlu Kutuplanma.....	15
2.4e Cole-Cole Diyagramı.....	15
2.5 Dielektrik Özelliklerin Değişik Faktörlere Bağlılığı	16
2.5a ϵ' 'nin Frekansa Bağlılığı.....	16
2.5b ϵ' 'nin Sıcaklığa Bağlılığı.....	17
2.5c ϵ' 'nin Basınca Bağlılığı.....	19
2.5d ϵ' 'nin Neme Bağlılığı.....	19
2.5e ϵ' 'nin Yapıya Bağlılığı.....	19
2.5f ϵ' 'nin Gerilime Bağlılığı.....	19
2.6 Homojen Olmayan Dielektriklerde Elektrik Alanları	20
3. DİELEKTRİK KAYIPLAR	22
3.1 Dielektriklerde Kayıp Tanjant (Kayıp Açısı)	24
3.2 İyonik İletkenlik	26
3.3 Dielektrik Kayıpların Fiziksel Anlamı	27
3.4 $\tan \delta$'nın Değişik Faktörlere Bağlılığı	28

3.4a	tan δ 'nın Frekansa Bağlılığı.....	28
3.4b	tan δ 'nın Sıcaklığa Bağlılığı.....	29
3.4c	tan δ 'nın Neme Bağlılığı.....	30
3.4d	tan δ 'nın Gerilime Bağlılığı.....	30
4.	DİELEKTRİK MALZEME : POLİMERLER, EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİ.....	33
4.1	Polimerler ve Kompozitler.....	33
4.2	Epoksi Reçinesi.....	34
5.	EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİNİN DİELEKTRİK ÖLÇÜMLERİ.....	37
5.1	Numunelerin Hazırlanması.....	37
5.2	Dielektrik Ölçümler.....	39
6.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	41
	KAYNAKLAR.....	46
	ÖZGEÇMİŞ.....	50

1.GİRİŞ

Her malzemenin dielektrik özelliklerine bağlı olan özgül elektriksel karakteristikleri vardır. Maddelerin dielektrik özelliklerinin doğru olarak ölçülmesi malzeme tasarımında ve üretim sürecinin kalite kontrolünde önemli bilgiler sağlar. Örneğin bir kablo yalıtıcısının kaybı, bir ince film numunesinin oluşturulduğu alt taban malzemesinin empedansı veya bir dielektrik rezonatörün frekansı malzemenin dielektrik özellikleri ile ilişkilidir. Ayrıca dielektrik özelliklerin bilinmesi ile maddenin atomik yapısı hakkında bilgi elde edilebilir. Maddelerin ferrit düzeni, örgü düzeni gibi moleküler yapıları, yoğunlukları ve bunlara bağlı elektriksel özellikleri dielektrik özelliklerinden belirlenebilir. Yiyecek, lastik, plastik ve seramiklerin endüstriyel olarak mikro dalgalarla işlenmesi alanlarındaki yeni uygulamalarda dielektrik özelliklerin bilinmesinden yararlanılmaktadır[HP 1217-1, HP 380-1,].

Dielektrik geçirgenlik(ϵ), dielektrik alınganlık(κ_c), kırılma indisi(n), molekül kütlesi(M) gibi büyüklükler dielektriklerin makroskobik, molekülün kutuplanabilirliği(α), birim hacmindeki molekül sayısı (N) gibi büyüklükler ise mikroskobik büyüklüklerdir. Dielektriklerin çalışılmasındaki temel amaç, bu iki büyüklük grubu arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Bu alandaki ilk ve en önemli çalışmalar Alman fizikçi R.Clausius, İtalyan fizikçi O.Mosotti, Hollandalı fizikçi H.Lorentz ve Danimarkalı fizikçi L.Lorenz tarafından yapılmıştır[Tareev 1975].

Diğer taraftan küçük, basit moleküllerin birbirleri ile bağlanmasıyla meydana gelen büyük moleküllerden oluşan polimerlerin dielektrik özellikleri üzerine bir çok araştırma yapılmaktadır [Psarras 2002, Pissis 2002, Gallone 1998]. Farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin heterojen karışımları olan kompozit yapılar, uçak sanayi, mikroelektronik teknoloji gibi değişik endüstri alanlarında elektriksel yalıtıcı olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir[Tareev 1975, Smith 2001]. Bu yapılar diğer malzemelere kolaylıkla yapışır ve kimyasal etkilerle çevre koşullarına karşı yüksek

dirence sahip olduklarından mekanik özellikleri de oldukça iyi bir avantaj ortaya koymaktadır[Kurbanlı ve ark. 2001].

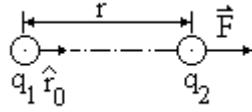
Bu çalışmada epoksi reçinesi ve farklı fonksiyonel gruplar eklenerek literatüre ilk kez giren 4 farklı kompozitin dielektrik özellikleri incelenmiştir. Numunelerin 25 °C - 140 °C sıcaklık aralığında reel dielektrik sabiti $\epsilon'(\omega)$, sanal dielektrik sabiti $\epsilon''(\omega)$ ve ac iletkenliği $\sigma_{ac}(\omega)$, nin frekansa göre değişimi elde edilmiştir. Sonuçlar, literatürdeki benzer malzemelerin dielektrik ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. DİELEKTRİKLERİN KUTUPLANMASI

2.1 Giriş

Bir malzeme dış bir elektrik alan içerisine konulduğunda enerji depolama yeteneğine sahip ise **dielektrik** malzeme olarak sınıflandırılır. Dielektriklerin en önemli özelliği, dış bir elektrik alan altında kutuplanma yeteneklerinin olmasıdır. Bu sınıftaki malzemeler, uygulanan dc gerilim altında, elektrik akımının geçmesine karşı çok büyük direnç gösterirler. Buna karşın uygulanan alternatif gerilim altında, alternatif yer değiştirme akımını geçirirler. Dolayısıyla temel elektriksel özellikleri bakımından iletken malzemelerden oldukça farklıdır.

Üzerine elektrik alanı uygulanan bir dielektriği, \vec{E} elektrik alanı ve \vec{P} kutuplanma vektörel nicelikleri tanımlar. \vec{E} elektrik alanı Coulomb yasası ile verilir.



Şekil 2.1 İki noktasal yük için Coulomb etkisi

Homojen bir dielektrik ortam içinde aralarındaki uzaklık r olan q_1 ve q_2 gibi iki noktasal yük arasındaki kuvvet Coulomb yasası ile

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \hat{r}_0 \quad (2.1)$$

verilir.

Burada \hat{r}_0 , nokta yükleri birleştiren doğru boyunca yönelmiş birim vektör ve ϵ dielektriği karakterize eden boyutsuz bir parametre olup, bağıl geçirgenlik veya kısaca geçirgenlik şeklinde tanımlanır. ϵ_0 ise, boş uzaydaki belli bir kapalı yüzeyin içindeki toplam elektrik yükünün bu yüzeyden geçen elektrik alan vektörünün akısına olan oranı şeklinde tanımlanan boşluğun geçirgenliğidir. Büyüklüğü,

$$\epsilon_0 = \frac{10^7 \text{ m/H}}{4\pi c^2} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

dir. Burada c , ışığın boşluktaki yayılma hızıdır.

$(\epsilon_0 \epsilon)$ çarpımına bir dielektriğin mutlak dielektrik sabiti (veya özkapasitesi) adı verilir. Diğer taraftan Coulomb yasasından, q büyüklüğündeki bir nokta yükten r uzaklığındaki bir noktada elektrik alan ifadesi,

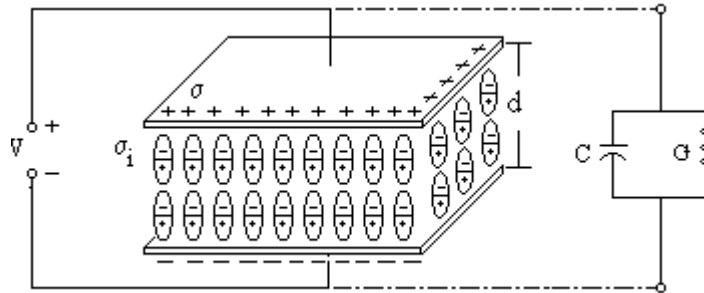
$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2} \hat{R}_0 \quad (\text{V/m}) \quad (2.2)$$

biçiminde verilmektedir.

Bir düzlem kapasitör gözönüne alındığında dielektriğin elektrotları arasındaki uzay tüm noktalarında elektrik alan şiddeti sabittir ve

$$E = \frac{V}{d} \quad (\text{V/m}) \quad (2.3)$$

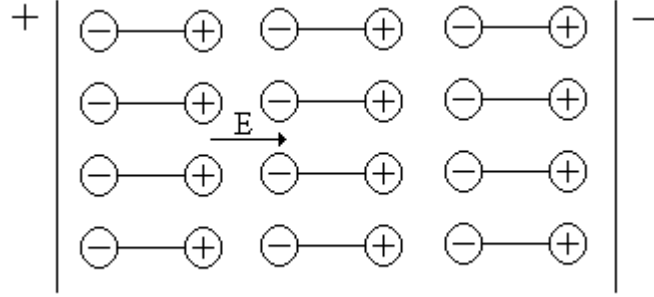
ile verilir. Burada, d iki elektrot arasındaki uzaklık ve V kapasitörün elektrotları arasına uygulanan potansiyel farkıdır. Bu bağıntı, dielektriğin homojen olması, yani ϵ geçirgenliğinin bütün noktalarda aynı olması koşulu ile doğrudur.



Şekil 2.2 Düzlem kapasitör

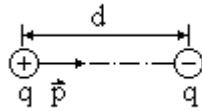
Dielektriğin \vec{P} kutuplanması, dış elektrik alan içindeki bir dielektriğin kutuplanmasını sayısal olarak tasvir eder. Dış elektrik alanının etkisi ile dielektrik içindeki moleküllerin yükleri, Şekil 2.3 de görüldüğü gibi uzay içerisinde belli bir düzene gelir. Bu durumda dielektrik, sıfırdan farklı ve dielektriğin hacmi içerisinde

bulunan kutuplanmış bütün moleküllerin momentlerinin ($\sum \vec{p}$) geometrik toplamına eşit olan bir elektrik momentine sahip olur. \vec{P} kutuplanması ise, dielektriğin belli bir hacmindeki elektrik momentinin bu hacme olan oranının, hacim sıfıra giderken limitine eşit olur.



Şekil 2.3 Kutuplu bir dielektrik içindeki yüklerin düzenlenimi

Elektriksel olarak bir dipol moment, $\vec{p} = q\vec{d}$ şeklinde tanımlanır. Burada; d , dipolün pozitif ve negatif uçları arasındaki uzaklık ve \vec{p} dipol momentin büyüklüğüdür.



Şekil 2.4 Fiziksel olarak bir dipolün (elektriksel kutup çiftlerinin) tanımı

Dielektrik malzeme içindeki toplam kutuplanma ise,

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}}{V} \quad (\text{C/m}^2) \quad (2.5)$$

ile verilir.

Dielektriğin belli bir noktasındaki kutuplanmanın büyüklüğü, elektrik alanı şiddeti ile doğru orantılıdır. Bu büyüklükler arasındaki orantı faktörü, dielektriğin

boyutsuz bir parametresi olan dielektrik alınganlık(κ_e) ile dielektrik sabitinin(ϵ_0) çarpımına eşittir.

$$\vec{P} = \kappa_e \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.6)$$

İzotropik dielektriklerde, \vec{P} ve \vec{E} vektörlerinin doğrultuları, her noktada çakışır ve aralarındaki orantı faktörü Denk(2.6) 'dan görüldüğü gibi skaler bir niceliktir. Ferroelektrikleri de içine alan nonlinear dielektrikler durumunda ise \vec{P} ve \vec{E} vektörleri arasında bir orantı yoktur. Anizotropik dielektrikler için, \vec{P} ile \vec{E} arasındaki ilişki tensöreldir[Tareev 1975].

Kapasitörün herbir plakasındaki toplam serbest q yükü (veya kısacası bir kapasitörün yükü) kapasitörün plakaları arasındaki gerilimle doğru orantılıdır.

$$q = CV \quad (2.7)$$

Burada V, kapasitöre uygulanan gerilimdir. Orantı faktörü C ise bir kapasitörün kapasitansıdır. Kapasitans, elektrotların geometrik boyutlarına, biçimine ve dielektrik maddeye bağlıdır.

Elektrotları arasındaki uzaysal boşluk bulunan keyfi biçimli ve boyutlu herhangi bir kapasitörün kapasitansı C_0 olsun. Kapasitör elektrotlarının boyutlarını, biçimini ve bu elektrotların karşılıklı düzenini hiç değiştirmeden aralarındaki uzaya ϵ geçirgenlikliğine sahip bir madde konulursa, kapasitörün kapasitansı artar ve

$$C = \epsilon C_0 \quad (2.8)$$

değerine ulaşır.

Geometrik boyutları belirli bir kapasitörün kapasitansı, dielektriğin ϵ değeri ile doğru orantılıdır. d kalınlıklı ve her iki tarafındaki plakaların alanı S olan bir düzlem kapasitörün kapasitansı, SI birim sisteminde,

$$C = \epsilon \frac{\epsilon_0 S}{d} = \epsilon \frac{8.85 \times 10^{-12} \text{ s}}{d} \text{ (F)} \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir. Burada d metre, S ise m^2 birimleriyle ifade edilir. Cgs sisteminde ise

$$C = \epsilon \frac{S}{4\pi d} \text{ (cm)} \quad (2.9a)$$

şeklindedir. Burada d cm, S ise cm^2 birimleriyle ifade edilir.

Bu bağıntılar, kapasitörün plakaları arasında hava veya başka bir ortamın bulunduğu elektrotların, kenarlarındaki kapasitans etkilerinin ihmal edilebildiği durumlarda doğrudur. Yani, kapasitör plakalarının boyutları, aralarındaki uzaklığa başka bir deyişle dielektriğin kalınlığına göre çok büyükse doğrudur [Tareev 1975, Debye 1929, Carrier and Soga 1999].

2.2 Polar ve Apolar Dielektrikler

Herhangi bir maddenin molekülü, pozitif veya negatif bir elektrik yüküne sahip olan kısımlardan (atomlar, atom grupları, iyonlar) oluşur ve maddenin içindeki yüklerin cebirsel toplamı sifıra eşittir. Yeterince büyük bir madde, dışarıdan bir etki ile elektriklenmemiş ise, elektrik yükü sergilemez.

Bir molekül içindeki yüklerin uzaysal düzeni, değişik maddeler için farklı olabilir ve molekülde mutlak büyüklük bakımından eşit olan pozitif yük ile negatif yük yer değiştirebilir. Bu yüklerin yük merkezleri uzay içerisinde üst üste çakışabilir veya çakışmayabilir. Bu nedenle elektriksel dipol moment iki farklı durumda ele alınabilir. Birincisi, yük merkezlerinin üst üste çakışık olduğu durumda molekül, polar değildir. Polar olmayan (**apolar molekül**) moleküllerin kendiliğinden bir dipol momentini yoktur fakat dış bir elektrik alan altında çakışık yük merkezleri bir miktar kayar. Bunun sonucunda bir dipol moment oluşur. İkincisi ise yük merkezlerinin çakışık olmadığı durumdur (**polar molekül**). Dış bir elektrik alanın bulunmaması durumunda bile polar bir molekül, sıfırdan farklı olan bir elektrik dipol momentine sahiptir. Farklı moleküllerden, yani; hem polar hem de polar olmayan moleküllerden oluşan bileşik madde ise polar madde olarak alınmalıdır.

Simetrik düzenli moleküllerin apolar olduğu açıktır. Çünkü bu durumda, bir molekülün hem pozitif hem de negatif yüklerinin kütle merkezleri, molekülün simetri merkezi ile ve dolayısıyla birbirinin kütle merkeziyle çakışıktır. Tersine, asimetrik moleküller ise daima polardır[Rao and Shridhar 2001, Schwarz 1962].

2.3 Kutuplanmanın Fiziksel Anlamı

Dielektrik geçirgenlik(ϵ), dielektrik alınganlık(κ_e), kırılma indisi(n), molekül kütlesi(M) gibi büyüklükler dielektriklerin makroskopik, molekülün kutuplanabilirliği(α), birim hacmindeki molekül sayısı (N) gibi büyüklükler ise mikroskopik büyüklüklerdir. Dielektrik çalışmalarda amaç, bu iki büyüklük grubu arasındaki ilişkiyi belirlemektir.

Kutuplanma, bir dış elektrik alanın etkisi altında bir dielektrik içerisindeki elektriksel olarak yüklü parçacıkların yerdeğiştirme yaparak uzay içerisinde yeniden düzenlenimidir. Dielektriğin içerisinde bulunan atom, iyon ve moleküllerin her biri ayrı ayrı veya birlikte elektrik momentinin oluşmasına neden olabilirler.

Lineer dielektriklerde, kutuplanma süresince parçacığın kazandığı p elektrik momentini (indüklenmiş moment) ile bu parçacık üzerine etki eden elektrik alanının (E) şiddeti arasında doğru bir orantı vardır.

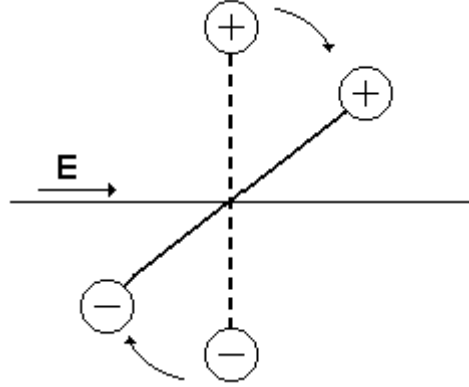
$$P = \alpha E \quad (2.10)$$

Bu ifadedeki α orantı katsayısı, belli bir parçacığın kutuplanabilirliği olarak bilinir. Burada; α , SI sisteminde Fm^3 , cgs sisteminde ise cm^3 birimleriyle verilmektedir.

Polar dielektriklerde, dipol veya yönelim kutuplanma mekanizması baskındır. Bu tür kutuplanma, ilk olarak Debye tarafından incelenmiştir ve mekanizma sabit bir dipol momentine sahip olan moleküllerin elektrik alanı doğrultusundaki yönelimine ile tanımlanabilir. Bu basitleştirilmiş model şekil 2.5'de gösterilmiştir.

Diğer taraftan yönelim kutuplanması tam olarak anlaşılacak istenirse, polar moleküllerin elektrik alanı altında doğrudan bir yönelmesi gibi değil, aralıksız ısısal

hareket halinde olan polar moleküllerin bulunduğu konumunda elektrik alanının belli bir düzensizlik başlatması gibi anlaşılmalıdır.



Şekil 2.5 Bir dipol molekülünün yönelim kutuplanmasının diyagramı. Kesikli çizgi, molekülün kutuplanmadan önceki, sürekli çizgi ise kutuplanmadan sonraki konumunu gösterir.

Bu yüzden dipol kutuplanması, moleküllerin doğal ısısal hareketine bağlıdır ve sıcaklık, dipol kutuplanması olayında önemli bir etki oluşturmaktadır. Dipol kutuplanması yalnızca gazlarda, sıvılarda ve amorf viskozlu maddelerde saf bir yapıda ortaya çıkabilir. Erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta bulunan kristal cisimlerde, dipollerin “donmuş” olduğu söylenir. Yani bu dipoller, yönelemeyecek ve içlerinde dipol kutuplanması oluşamayacak şekilde yerlerine sıkıca bağlıdır. Bütün bu nedenlere rağmen, dipol kutuplanması bazen, molekülleri gevşek istifli, örneğin sulu buz, bazı kristal cisimlerinde de kendini açıkça gösterebilir. Bazı durumlarda örneğin selüloz ve türevlerinde, molekülün bir bütün olarak değil, farklı parçalarının dönmesinin neden olduğu dipol kutuplanması oluşabilir.

Dielektrik enerji aldıktan (veya verdikten) sonra, dipol kutuplanmanın oluşması süreci, deformasyonlu kutuplanmanın oluşması sürecine göre çok daha uzun bir zaman gerektirir. Örneğin moleküllerin boyutları büyük ve maddenin mutlak (dinamik) viskozitesi (iç sürtünme katsayısı) yüksek ise kutuplanma süreci için daha fazla zaman gerekeceği açıktır. Bu yüzden yönelimli kutuplanma, yavaştır ve durulma tipindeki kutuplanmalara dahildir [Tsangaris and Psarras 1999, Zaharescu 2001, Smyth 1955].

Durulma kutuplanmasının diğer türleri de, maddenin zayıf bağlı iyonlarının diğer durumlara (iyonik durulma veya ısıl durulma kutuplanması veya yapısal kutuplanma, yani maddenin gevşek yapısı ile ilgili kutuplanma) transferini içeren süreçlerden oluşur. Bu tür süreçler, hem inorganik (cam, camsı fazdaki bazı seramik malzemeleri) hem de organik (bazı organik polimerler) türden amorf maddelerde söz konusudur[Tareev 1975, Russel and Scales 2001, Varotsos 1973].

Bir dielektrik içindeki polar moleküllerin $\sum \bar{p}$ indüklenmiş momentinin, dc gerilim kapandıktan sonraki t zamanında,

$$\sum p = p \exp \frac{-t}{\tau} \quad (2.11)$$

üstel yasına uygun olarak azaldığı varsayılabilir.

Dipol kutuplanmasının ve diğer durulma süreçlerini içeren kutuplanma türlerinin, deformasyonlu kutuplanmalardan farkı, bir dielektrik içerisinde ısıya dönüşen kayıp elektrik enerjisinin dielektrik kayıplara neden olmasıdır.

2.4 Dielektrik Mekanizmalar

Kutuplanmanın her birinin kendine özgü fiziksel mekanizmalarla açıklanabilen çeşitli tipleri vardır. Bir malzeme aşağıda açıklanan bir veya birden fazla dielektrik mekanizmalara diğer bir ifade ile kutuplanma olaylarına sahip olabilir. Dielektrik malzeme, uygulanan elektrik alan ile yerdeğiştirebilen elektrik yük taşıyıcıları düzenine sahiptir. Uygulanan alanın etkisi altında, pozitif ve negatif yükler zıt doğrultularda hareket edecek şekilde dengelemek suretiyle, yükler kutuplu hale gelir.

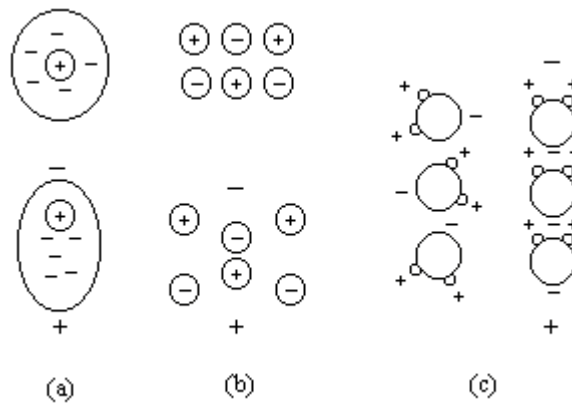
Her bir dielektrik mekanizma, karakteristik bir rezonans ve durulma frekansına sahiptir. Frekans artarken, depolamaya katkısı olan daha yavaş mekanizmalar ortadan kalkarken, daha hızlı mekanizmalar katılır. Her kritik frekansta kayıp faktörüne(ϵ'') karşılık gelen bir pik oluşur. Rezonans etkisi genellikle elektronik veya atomik kutuplanma ile ilgili iken, durulma etkisi yönelimli kutuplanma ile ilgilidir[Bartolomeo et al 2001].

a) *Elektronik ve Atomik (veya İyonik) Kutuplanma*

Elektronik kutuplanma, elektriksel olarak nötr bir maddeye dış bir elektrik alan uygulandığı zaman oluşur ve elektronların atom çekirdeğine göre olan yer değiştirmesi veya pozitif yüklü atom çekirdeği etrafında hareket eden negatif yüklü elektronların yörüngesinin değişmesidir. Böylece Şekil 2.6 (a) da görüldüğü gibi dielektrik maddenin içerisinde bir kutuplanma oluşur. Bu etki küçük ve geçicidir.

Elektronik kutuplanma, bütün atom veya iyonlarda oluşur ve dielektrik içinde diğer kutuplanma tiplerinin bulunup bulunmamasına bağlı olmaksızın bütün dielektriklerde gözlenebilir. Elektronik kutuplanmanın spesifik bir özelliği, dış bir elektrik alan uygulandığında, çok küçük bir zaman aralığı (10^{-15} s mertebesinde) süresinde yani morötesi ışınların titreşim periyotları mertebesinde oluşmasıdır[HP 1217-1].

Atomik (veya iyonik) kutuplanma ise, elektrik alanına yerleştirilen iyonik olarak bağlı bir malzemenin iyonları arasındaki bağlarının deforme olması ile oluşur. Elektrik alan altında bulunan ve birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonlar zıt yönlerde hareket edeceklerinden aradaki bağlar gerilir. Bu nedenle Şekil 2.6 (b) de görüldüğü gibi yük malzeme içerisinde yeniden düzenlenmiş bir dağılıma sahip olur. Alanın yönüne bağlı olarak katyon ve anyonlar birlikte yaklaşır veya uzaklaşır. Geçici olarak kutuplanma sağlayan bir kutup çifti oluşturur ve bu etki malzeme boyutunu değiştirebilir.



Şekil 2.6 Malzemedeki kutuplanma mekanizmaları (a) Elektronik kutuplanma (b) Yönelimli kutuplanma (c) Moleküler kutuplanma

b) *Yönelimli Kutuplanma*

Bir molekül, atomların elektronlarından birinin veya daha fazlasının ortak kullanımı ile oluşur. Elektronlardaki bu düzen sürekli bir dipol momenti oluşmasına neden olur. Bu moment yük dengesinin yeniden düzenlenmesini sağlar. Bu momentler elektrik alan yoksa rastgele yönelmişlerdir. Bu nedenle, bir kutuplanma oluşturmazlar. Bir alan uygulandığında, Şekil 2.6 (c) de görüldüğü gibi kutup çiftleri uygulanan alana uygun olarak yönelim gösterir. Alan kaldırıldığında kutup çiftleri paralel durumlarını koruyarak kalıcı kutuplanmaya neden olabilir. Dipollerin yönelmesi genellikle mikrodalga bölgesine düşen bir durulma frekansına neden olur[HP 1217-1].

Kalıcı kutuplanmalar, su ve organik polimerler gibi asimetrik moleküllerde meydana gelen bir mekanizmadır. Belirli seramik malzemeler bir simetri merkezinden yoksundur ve dipol gibi davranabilir.

Dipoller, elektrik alanın etkisi ile döner veya yönelim alır. Dipollerin dönmesi sürtünme ile azalır, dönme uygulanan alandan geride kalır. Bu duruma, durulma adı verilir. Bu davranış, yalnızca resistif ve kapasitif elemanlardan oluşan eşdeğer bir devre ile temsil edilebilir. Basit bir devre, şekil 2.7a'da gösterilen iki eşit kapasitörlü seri-paralel bir sistemdir. Bu durumda dielektrik sabiti,

$$\varepsilon' = \frac{C}{C_0} + \frac{C/C_0}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.12)$$

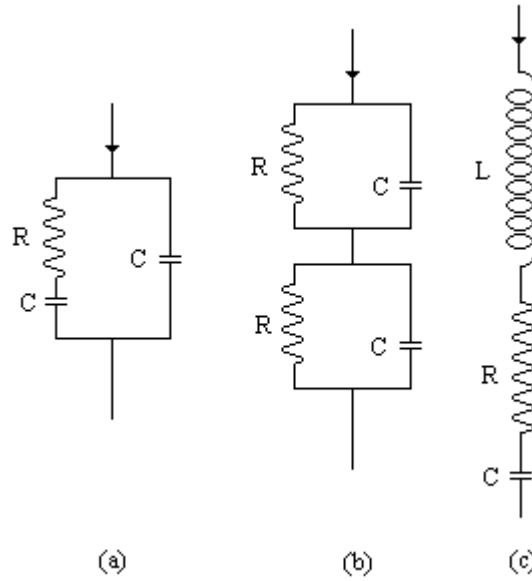
ve dielektrik kayıp

$$\varepsilon'' = \frac{C}{C_0} \left[\frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] \quad (2.13)$$

ifadeleriyle verilir[Helmy et al 1989, Anderson 1964, Lakatos and Abkowitz 1971]. Burada $\tau=RC$ şeklinde tanımlanan durulma zamanı, R, direnç ve C ise kapasitanstır. Denk (2.12) ve (2.13) ifadelerinden,

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon''} = \frac{1}{\omega\tau} \quad (2.14)$$

terimi elde edilir. Burada $\varepsilon_{\infty} = \frac{C}{C_0}$, ε' nün $\omega = \infty$ 'daki değeri olup, denk (2.12)'de $\omega = \infty$ alınarak bulunabilir.



Şekil 2.7 Dielektrikler için eşdeğer devreler

c) Arayüzeyssel veya Uzaysal Yük Kutuplanması

Elektronik, atomik veya yönelimli kutuplanma, yerel olarak atoma veya moleküle bağlı olan yükler tarafından oluşturulur. Düşük frekanslı bir elektrik alanı uygulandığında, malzeme içerisinde belli bir uzaklığa yer değiştirebilecek yük taşıyıcıları da bulunabilir. Arayüzey veya uzay yükü kutuplanması, bu yer değiştiren yüklerin hareketi engellendiği zaman oluşur. Yükler, elektrotlarda serbest deşarj olamadığında veya yerdeğiştiremediğinde hareket engellenir ve malzemenin arayüzeyleri içerisinde tuzaklanabilir. Bu yüklerin birikmesine neden olan elektriksel alan bozulması, bir malzemenin toplam kapasitansını artırır. Kapasitansını artması ise ε' 'nde bir artmaya karşılık gelir[Pandita et al 2001].

Tuzaklanan yüklerin oluşturduğu yük tabakaları, ince ve malzeme boyutlarından çok daha küçük ise yükler yakın parçacıklar üzerindeki yükten bağımsız olarak tepki gösterir. Düşük frekanslarda yüklerin, ϵ' 'nün artmasına neden olan iletken bölgelerin sınırlarında toplanması için yeterli zamanı vardır. Daha yüksek frekanslarda ise, yükler birikme yapabilmek için yeterli zamana sahip olamazlar. Frekans artarken, ϵ' azalır ve yük yerdeğiştirmesi iletken bölgenin boyutlarına göre küçük olduğundan kutuplanma oluşmaz. Frekans artarken ϵ' azalır ve kayıplar $1/f$ eğimi gösterir.

Düşük frekanslarda, yüklerin dielektrik içerisinde yerdeğiştirerek, dielektrikteki süresizlik bölgelerinde yani arayüzeylerde toplanmasından ileri gelen böyle bir sistemin temsili için yaygın bir model, Maxwell-Wagner iki tabakalı kapasitördür. Sistemin eşdeğer devresi, şekil 2.7b'de gösterildiği gibi iki kayıplı kapasitörden oluşur[Kremer 2002]. Bu durumda ϵ' ve ϵ'' sırasıyla,

$$\epsilon' = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.15)$$

$$\epsilon' = \frac{1}{\omega C_0 (R_1 + R_2)} + \omega \tau \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (2.16)$$

ifadeleriyle verilir[Helmy et al 1989, Eloundou 2002]. R_1 ve R_2 şekil 2.7b'de gösterilen dirençlerdir.

Düşük frekans bölgesinde geçirgenlikte önemli değişmelere neden olan birçok başka dielektrik mekanizma oluşabilir. Örneğin yük tabakası, parçacık boyutlarıyla aynı kalınlık mertebesinde veya daha büyükse, çarpışmalı süspansiyon oluşur. Bu durumda Maxwell-Wagner etkisi artık önemsiz hale gelir. Çünkü tepki artık komşu parçacıkların yük dağılımından etkilenir.

d) Distorsiyonlu Kutuplanma

Uygulanan elektrik alan iyonların veya elektronların yerdeğiştirmesine neden olabilir. Yerdeğiştiren bu yükler, alan ortadan kalktıktan sonra, denge konumları etrafındaki serbest titreşimlerine dönmek üzere durulur. Bu titreşimlerin genliği, sönümlü kuvvetler nedeniyle küçülür. Bu kutuplanma mekanizması, numunenin kayıp faktöründe keskin bir artma meydana getiren rezonans etkilerine yol açar. Bu etki geçirgenliğin reel kısmında da hızlı bir değişime neden olur. Bu durum için uygun bir eşdeğer devre, şekil 2.7c'de verilen indüktans, direnç ve kapasitansın seri bir kombinasyonudur. Bu durumda, büyük durulma zamanları için aşağıdaki denklem geçerlidir.

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_{\infty}}{\varepsilon''} = \omega\tau + \tan \varphi \quad (2.17)$$

ifadeleri geçerlidir. Burada φ , sürücü alan ile geride kalan kutuplanma arsında meydana gelen faz açısıdır. Uygun koordinatlar kullanıldığında, bu denklem bir doğru denklemdir[Helmy et al 1989 , Dutta et al 2002].

e) Cole-Cole Diyagramı

Kompleks geçirgenlik, ε'' sanal kısmının düşey ekseninde, ε' reel kısmının ise yatay ekseninde, bağımsız parametre olarak frekansa göre çizildiğinde bir Cole-Cole diyagramı oluşur.

Debye ilişkisini gösteren tek bir durulma frekansına sahip bir malzeme için, merkezi yatay $\varepsilon''=0$ eksenini üzerinde olan ve kayıp faktörü pikinin ise $1/\tau$ 'da oluştuğu bir yarı-daire meydana gelir. Çoklu durulma frekanslarına sahip bir malzeme için ise, merkezi $\varepsilon'' =0$ ekseninin altında kalan bir yarı-daire (simetrik dağılım) veya bir yay oluşur[HP 1217-1, Ruffet et al 1991, Tsangaris et al 1998].

2.5 Dielektrik Özelliklerin Değişik Faktörlere Bağlılığı

Dielektriklerin bütün diğer elektriksel parametrelerinde olduğu gibi ϵ geçirgenliği de dielektriğe uygulanan gerilimin frekansı, sıcaklık, basınç, nem vs gibi değişebilir dış faktörlere bağlıdır. Birçok durumda bu bağılıkların çok büyük pratik önemi vardır.

a) ϵ 'nun Frekansa Bağlılığı

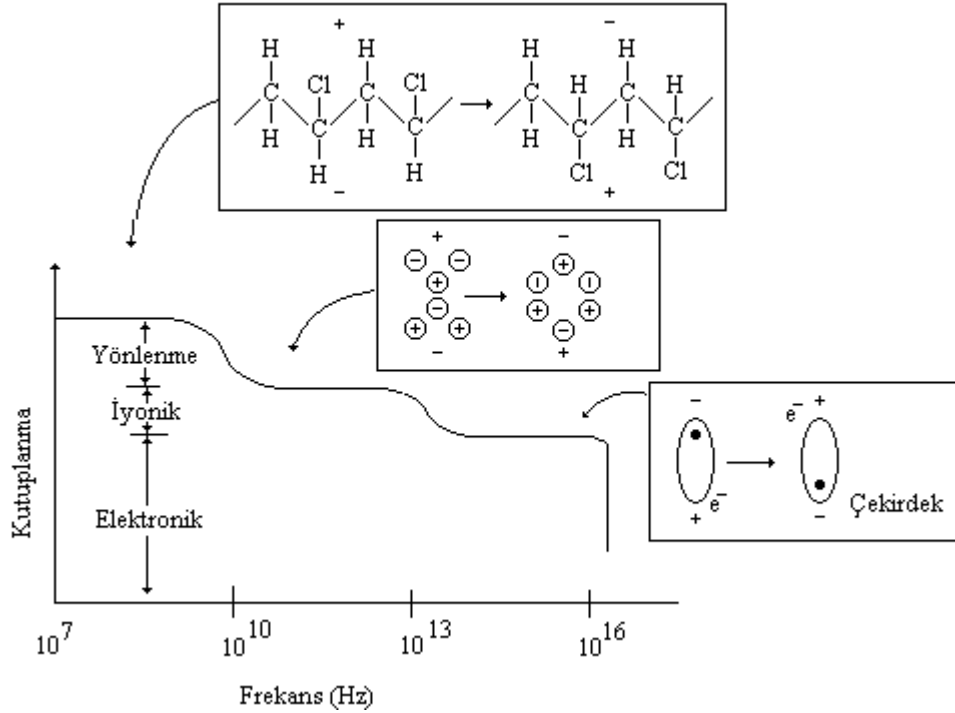
Dielektrik malzemeler genellikle alternatif akım devresinde kullanılır. Kutup çiftleri bu nedenle yönlerini genellikle yüksek bir frekansta değiştirerek elektronik aletlerin uygun bir şekilde çalışmasını sağlarlar.

Elektronik veya iyonik kutuplanmanın oluşması için gerekli olan zaman, gerilim işaret değişiminin zamanına göre çok küçüktür. Bu nedenle deformasyonlu kutuplanma mekanizması dışında, dielektriklerin kutuplanması, gerilim yarı-periyoduna göre çok küçük bir zaman periyodunda tam olarak gerçekleşir.

Şekil 2.8'da görüldüğü gibi, elektronik kutuplanma MHz (10^6 Hz) bölgesine kadar kolaylıkla gerçekleşebilir. Çünkü atomların yeniden dizilmesine gerek yoktur. İyonik kutuplanma ise 10^{13} Hz 'bölgesine kadar kolaylıkla gerçekleşir. Sadece iyonlar arasındaki bağlarda basit bir değişim gereklidir. Bu yüzden de bu tür dielektriklerde ϵ 'nun frekansa bağılılığı sözkonusu değildir. Apolar dielektriklerin geçirgenliği, çok geniş bir frekans bölgesi aralığında frekanstan bağımsızdır [HP 380-1, Venudhar and Mohan 2002, Kuo et al 2001].

Buna karşılık moleküler temelde kutuplanan malzemeler, frekansa karşı oldukça duyarlıdır. Alternatif gerilimin frekansı artarken, polar bir dielektriğin, bütün atomları veya atom grupları yeniden dizileceğinden, ϵ değeri başlangıçta sabit kalmaz. Buna bağlı olarak, değişen alana dielektrik malzemenin tepkisi azalır ve tam kutuplanma olmayabilir. ϵ değeri, çok yüksek frekanslarda apolar dielektriklerin tipik değerine ulaşacak şekilde düşmeye başlar.

Genel olarak, frekanstaki artış, ϵ 'da bir düşmeye neden olabilir veya ϵ frekanstan bağımsız olabilir. Fakat ϵ 'da bir artış oluşturmaz[Ivanova et al 2000].

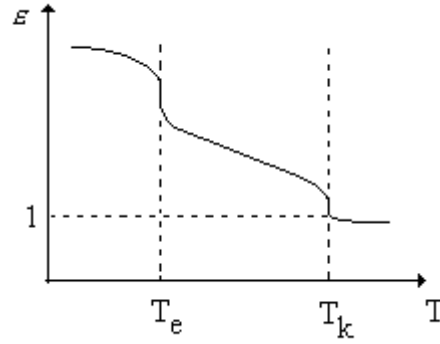


Şekil 2.8 Malzemelerin frekansa tepkisi

b) ϵ 'nun Sıcaklığa Bağlılığı

Apolar dielektriklerde sıcaklık, elektronik kutuplanma sürecini etkilemez. Yani; moleküllerin elektronik kutuplanabilirliği sıcaklığa bağlı değildir. Bununla birlikte, maddenin ısısal genleşmesi nedeniyle, moleküllerin sayısının dielektriğin etkin uzunluğuna oranı, sıcaklık artarken azalır. Bu durumda ϵ da azalmalıdır. Maddenin katı halden sıvı hale geçişinde (veya tersine soğutmada) ϵ değerlerinde keskin değişimler olabilir. Çünkü bu geçişte, hacim içerisinde oldukça büyük bir yük değişimi olur. Daha fazla ısıtma sıvıyı buharlaştırırsa, ikinci bir atlama daha oluşur ve ϵ , maddenin gaz halindeki tipik değerine yaklaşır, yani bire çok yakın değerlere ulaşır. Sıcaklığın çok geniş sınırlarda değiştiği durumda, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ϵ 'daki değişim, maddenin kimyasal dönüşümlere uğramadığı varsayılarak,

Şekil 2.9’da şematik olarak gösterilmiştir[Nixdorf and Busse 2001, Hamburger 1930].



Şekil 2.9 Apolar dielektriklerde ϵ' 'nin T sıcaklığına göre iki geçiş sınırındaki değişimleri. Burada; T_e : Erime noktasındaki sıcaklık, T_k : kaynama noktasındaki sıcaklıktır.

Geçirgenliğin sıcaklığa bağlılığı, katı iyonik (lineer) dielektriklerde farklı olabilir. Birçok durumda iyonik bir kutuplanma mekanizması, sıcaklık arttığında ϵ' 'nu artırır. Bununla birlikte, bazı durumlarda sıcaklık artışı ϵ' değerini azaltabilir. Bu durum özellikle iyonik yerdeğiştirmenin ve dolayısıyla da elektronik kutuplanmanın olduğu numunelerde söz konusudur.

Genel olarak, düşük-sıcaklık bölgesinde, polar dielektriklerdeki moleküller kendiliğinden bir yönetime sahip alamazlar. Yüksek sıcaklıklarda kalıcı kutup çiftleri daha yüksek bir hareketliliğe yani daha kolay kutuplanmaya sahiptirler. Bu nedenle daha yüksek bir dielektrik sabiti ortaya koyarlar. Sıcaklık artarken, moleküllerin ısısal titreşimleri de artar ve yönelimlerinin düzenlilik derecesi azalır. Bu ise, önce bir maksimumdan geçen ve daha sonra da azalan bir $\epsilon(T)$ eğrisine neden olur. Farklı bir erime noktasına sahip olan kimyasal madde tek bir polar madde durumunda ise, erime boyunca ϵ' da sıçrama tipinde bir değişim gözlenebilir.

Buna karşın yüksek sıcaklıklar, dielektriğin kırılmasına ve kristal yapının değişmesine neden olabilir. Bu ise kutuplanmayı oldukça azaltır.

c) ϵ ‘*nun Basınca Bağlılığı*

Clousius-Mosotti yasasının sağlandığı dielektriklerde, geçirgenliğin büyüklüğü basınçla yavaş bir şekilde artmaktadır. Çünkü bu durumda maddenin yoğunluğu artar, yani birim hacimdeki moleküllerin sayısı artar[Tareev 1975].

d) ϵ ‘*nun Neme Bağlılığı*

ϵ değeri suyun ϵ değerinden daha küçük olan ve yapısına su alabilen (higroskopik) dielektriklerde, geçirgenlik nem miktarı ile önemli ölçüde artmaktadır. Nemlenme, bir dielektriğin önemli parametrelerini arzulanan değerlerden uzaklaştırır. Örneğin öz direnci azaltır, dielektrik kayıp açısını arttırır, elektrik şiddetini azaltır.

e) ϵ ‘*nun Yapıya Bağlılığı*

Etkili dielektriklerin hepsi depo edilen enerjinin boşalmasını veya sızmasını önlemek için yüksek bir öz dirence sahiptir. Öz direnç maddenin dc direnç ölçüsüdür. Yüksek öz direnç izolator maddelerinin önemli bir özelliği iken, düşük öz direnç iletken maddeler için önemli bir özelliktir.

Dielektrik malzemeler genel olarak üç grupta toplanır. Bunlar kutuplu moleküllerden oluşan sıvılar, polimerler ve belirli seramiklerdir. Hepsi bir elektrik alanında kolaylıkla hareket edebilen ve yüksek dielektrik sabitlerine neden olan kalıcı dipollere sahiptirler.

Malzeme yapısı aynı zamanda frekansa bağlı olarak ortaya çıkan etkileri de belirler. Gazlar ve sıvılar yüksek frekanslarda katılardan daha fazla kutuplanır. Aynı şekilde amorf polimerler ve seramikler de yüksek frekanslarda amorf olmayanlardan daha fazla kutuplanırlar. Zincirli yapıda asimetrik geometriye sahip polimerler ise sadece küçük frekanslarda kutuplanırlar[Benaboud et al 1998].

f) ϵ ‘*nun Gerilime Bağlılığı*

Uygulanan alanın voltajını artırma, kalıcı dipolleri zorlayarak aynı yönelime sahip olmalarını kolaylaştırır. Dipollerin hepsi hizaya gelince kutuplanmada bir

doyum meydana gelir. Bundan sonra, gerilimdeki daha fazla artış kutuplanma üzerinde çok az bir etkiye sahiptir. ϵ geçirgenliğinin, dielektriğe uygulanan gerilime kuvvetli bir biçimde bağlı olması ferroelektriklerde görülen durumdur. Lineer dielektriklerde ϵ değerinin gerilimden bağımsız olduğu varsayılır. Çok yüksek voltaj dielektriğin kırılmasına neden olabilir[Tareev 1975].

2.6 Homojen Olmayan Dielektriklerde Elektrik Alanları

Hacimlerinin farklı kısımlarında eşit olmayan geçirgenliğe sahip olan dielektriklerin ϵ etkin geçirgenliğinin hesaplanması önemlidir.

İncelenen dielektriğin alternatif bir alan içinde bulunduğunu ve dielektriğin bütün kısımlarındaki iletkenlik ve dielektrik kayıplarının ihmal edilebileceği (yani öz direncin ($\rho = \infty$) sonsuz veya öziletkenliğinin ($\sigma = 0$) sıfır ve $\tan\delta=0$) bir durumda dielektrik maddenin içerisindeki elektrik alan şiddet dağılımını etkileyen tek parametre ϵ geçirgenliği olur.

Makroskopik olarak homojen olan bir dielektrik durumunda, bir dielektriğin herhangi bir noktasındaki elektrik alan şiddeti genellikle dielektrik malzemenin ϵ değerinden bağımsızdır. Bu yüzden, bir düzlem kapasitör durumunda (şekil 1-3) elektrotlar arasındaki dielektriğin bütün noktalarındaki alan şiddeti Denk(2.3) ile hesaplanır.

Katılan katkılar alanı bozar. Alan ne kadar bozulursa, ϵ_1 ile ϵ_2 arasındaki fark o kadar büyük olur ve \vec{E}_0 doğrultusundaki katkılar da o kadar büyük olur. Katkılarının dışındaki alan, şiddeti değişse de düzgün kalır.

Bir dielektrik içerisine düşük geçirgenliğe sahip bir dielektrik maddenin katılması, katkı içerisindeki alan şiddetini artırır. Çünkü yüksek geçirgenliğe sahip olan ve elektriksel olarak yalıtkan olan bir madde, seri bağlı olduğu daha küçük geçirgenlikli maddeye gerilimin çoğunu aktarma eğilimindedir. İçerisinde hava veya $\epsilon \approx 1$ olan başka bir gazın bulunması yalıtkanın verimliliğini azaltır. Çünkü bu tür katkılar, kolayca “kısmi boşalmalar” oluşturabilir.

Alan homojen değilse, tabakalar arasındaki alan şiddeti yalıtıkana bağımlı olabilir. Örneğin; hava veya gaz yalıtıklı ortak eksenli bir kablonun iletkeni katı bir dielektrik tabakası ile kaplanırsa hava içerisinde maksimum olan alan büyüklüğü azalır ve bunun sonucunda da yalıtıklanın güvenilirliği artar.

Dielektrik malzeme, ac gerilimi altında çalıştığında, ϵ nün büyük olması, önemli dielektrik kayıplara neden olur. Gaz katkıları içeren büyük ϵ değerine sahip dielektrikler, katkıları içerisinde kısmi deşarjlar oluşturabilir. Bu nedenlerden dolayı, elektriksel yalıtıcı malzemelerde büyük ϵ değeri, birçok durumda istenmez[Askeland 1988, Al-Ramadin et al 1999].

3. DİELEKTRİK KAYIPLAR

Herhangi bir madde üzerine bir elektrik alan etki ettiğinde, elektrik enerjisinin bir kısmı ısı enerjisine dönüşerek kaybolur. Bu olay çoğunlukla, “güç kaybı” olarak bilinir ve madde içerisinde belli bir zaman aralığı süresince kaybedilen ortalama bir elektrik gücü anlamına gelir. Bir maddede veya bir üründe oluşan güç kaybı numuneye veya ürüne uygulanan elektrik geriliminin karesi ile doğru orantılıdır.

Bir metal iletken önce, doğru gerilime eşit bir alternatif gerilime bağlanırsa, iletken içindeki watt cinsinden P güç kaybı (deri etkisi veya yakınlık gibi ikincil olaylar ihmal edilirse), Joule-Lenz yasasına uygun olarak her iki durumda da aynı olur ve

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3.1)$$

ifadesiyle verilir.

Alternatif elektrik alanındaki bir dielektrik malzemede de bir miktar enerji ısı enerjisi olarak kaybolur. İletkenlerden farklı olarak, dielektriklerin birçoğu bu karakteristik özelliği gösterir. Belli bir gerilim altında bulunan dielektrikler içerisindeki güç azalması gerilimin frekansının bir fonksiyonudur. Bununla birlikte alternatif bir gerilimdeki güç kaybı, doğru gerilimdekinden çok daha büyüktür[Tareev 1975].

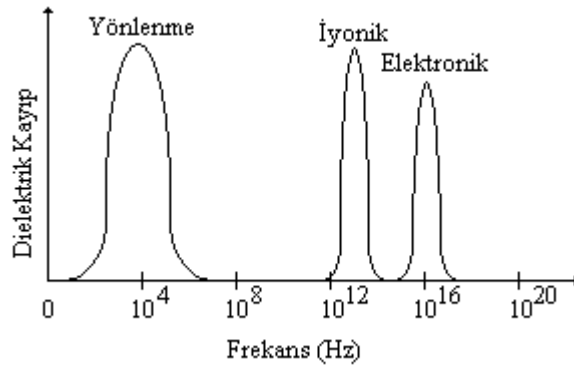
Uygulanan gerilimin etkisi ile oluşan dielektrik içerisindeki güç kayıplarının miktarı, “dielektrik kayıplar” olarak bilinir. Bu terim, hem doğru hem de alternatif gerilim altındaki bir elektriksel yalıtıcıdaki güç kaybını belirleyen genel bir terimdir. Yaygın olarak kullanıldığı gibi bu çalışmada da alternatif gerilim altındaki kayıplar “dielektrik kayıplar” olarak kullanılacaktır.

Doğru gerilimdeki dielektrik kayıplar, Denk.(3.1) bağıntısından kolayca bulunabilir. Oysa, alternatif gerilim altındaki kayıplar daha karmaşık ifadelerden belirlenir. Dielektrik kayıp frekanstaki ve gerilimdeki artışla hızlı bir şekilde artar. Aynı zamanda bu güç kaybı, dielektrik malzemeye de bağlıdır.

Alternatif elektrik alanındaki bir dielektrik malzeme kutuplandığında bir miktar enerji ısı olarak kaybolur. Her tersine devir sırasında oluşan bu kısmi enerji kaybı dielektrik kayıp olarak ortaya çıkar. Enerji kayıpları öncelikle iki faktörden kaynaklanır:

- (1) Akım sızması
- (2) Dipol yönelim sürtünmesi.

Elektriksel direncin büyük olduğu durumlarda akım sızmasından kaynaklanan kayıplar daha küçüktür. Dipol yönelim sürtünmesi, özellikle organik moleküllerde de görüldüğü gibi dipollerin tamamen alan yönünde yönelemediği frekanslarda meydana gelir. Düşük frekanslarda kayıplar azdır çünkü, kutup çiftleri kımıldayamaz.



Şekil 3.1 Kutuplanma mekanizmalarının frekansla değişimi

Yüksek bir dielektrik kaybına ve kalıcı dipole sahip malzemeler ile sadece elektronik veya düşük bir elektrik kaybına sahip iyonik katılar için kutuplanma frekans aralığı özel olarak seçilebilir. Bu nedenle kalıcı dipole sahip malzemelerin kutuplanması sırasında malzeme ısınır ancak diğer malzemeler soğuk kalır[Askeland 1998].

3.1 Dielektriklerde Kayıp Tanjant (Kayıp Açısı)

Plakaları arasında dielektrik bulunan kondansatörün uçlarına bir ac sinüzoidal gerilim uygulanırsa, değişen akım nedeniyle, dielektrik sabite bağlı olarak bir yüklemeye bir de kayıp akımı oluşacaktır. Maddedeki enerji kaybı, kondüktansın ($G=1/R$) etkisi ile oluşur ve

$$I = I_a - I_r = V(j\omega C + G) = V(j\omega C_0 \epsilon' + G) \quad (3.2)$$

$$G = \omega C_0 \epsilon'' \quad (3.3)$$

$$I = V(j\omega C_0 \epsilon' + \omega C_0 \epsilon'') = V(j\omega C_0)(\epsilon' - j\epsilon'') \quad (3.4)$$

şeklinde verilir.

Alternatif bir gerilimle enerji yüklenen bir kapasitör içindeki akımları ve gerilimleri gösteren faz diyagramı şekil 3.2'de gösterilmiştir. Kapasitör içindeki dielektrikte hiç güç kaybı olmasaydı, kapasitörden geçen I akımının fazı, V geriliminin fazından 90° önde olurdu ve akım reaktif olurdu. Gerçek durumda ise, ϕ faz açısı 90° den biraz daha küçüktür. Kapasitörden geçen toplam I akımı, iki bileşene ayrılabilir:

(1) I_a aktif akım bileşeni,

(2) I_r reaktif akım bileşeni.

Kapasitör plakaları ile kablolar içindeki güç kayıpları ihmal edilirse faz açısı, bir kapasitörü dielektrik kayıplar açısından tanımlar. Yüksek kaliteli bir dielektriğe sahip bir kapasitörde faz açısı 90° 'ye çok yakın olduğundan, δ açısı tamamlayıcı bir parametre olur.

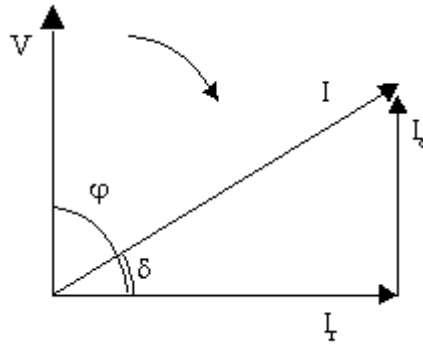
$$\delta = 90^\circ - \phi$$

δ açısına "dielektrik kayıp açısı" adı verilir. Bu açının tanjantı, aktif ve reaktif akımlar arasındaki orana veya P aktif güç kaybının reaktif P_r güç kaybına olan oranına eşittir.

$$\tan \delta = \frac{I_a}{I_r} = \frac{P}{P_r} \quad (3.5)$$

dielektrik kayıp açısı, hem dielektrik malzeme hem de yalıtıcı kısım için önemli bir parametredir. Diğer tüm koşullar eşit olsa da, dielektrik kayıp bu açının büyümesiyle büyür. Bu parametre genellikle, kayıp tanjant adı verilen $\tan \delta$ ile tanımlanır. Yalıtıcı bir kısmın kalite faktörü kayıp tanjantının tersi ile belirlenir.

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \cot \delta = \tan \varphi \quad (3.6)$$

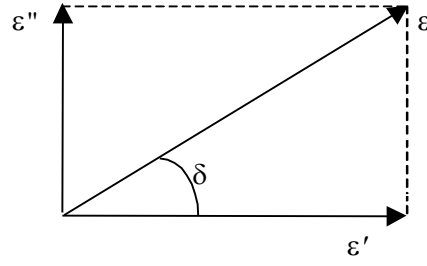


Şekil 3.2 Kayıplı bir dielektrik içindeki akımların basitleştirilmiş diyagramı

Kompleks bağlı dielektrik sabiti ϵ ,

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, dielektrik geçirgenliğin reel kısmı (ϵ') maddenin dış elektrik alandan depoladığı enerjinin bir ölçüsüdür. Birçok katı ve sıvı için dielektrik geçirgenlik 1'den büyüktür. Dielektrik geçirgenliğin sanal kısmı (ϵ'') ise kayıp faktörü olarak tanımlanır. Dış elektrik alandaki bir maddede oluşan dağılma miktarının ya da kayıp miktarının bir ölçüsüdür. Her zaman 0'dan büyüktür. Fakat (ϵ') den oldukça küçüktür.



Şekil 3.3 Kayıp tanjant

Kompleks dielektrik geçirgenlik basit bir vektör diyagramı ile gösterilebilir ve vektör formunda toplanabilir. ϵ' ve ϵ arasındaki açı δ dır.

Elektriksel yalıtıcı durumunda, özellikle de yüksek gerilim ve frekans koşulları altında çalışan dielektrik durumunda, dielektrik kayıplar, istenmeyen bir olaydır. Yani yüksek kaliteli bir elektriksel yalıtıcı malzeme veya yapı, küçük bir dielektrik kayıp açısına sahip olmalıdır. Elektrik kayıplarının etkisi mühendislikte, maddeleri kurutmak için ısıtıldığında ve yüksek frekanslı elektrik alanın uygulandığında, dielektriğin veya yarıiletkenin süreçlerinin ve polimerleşme durumunun kontrolünde kullanılır[HP 1986].

3.2 İyonik İletkenlik

Düşük frekanslarda, iletkenlik, çok sayıda farklı iletim mekanizmalarından oluşabilir. Düşük frekans aralığında, özellikle nemli malzemelerde, baskın olan mekanizma iyonik iletkenliktir. Çözücü (genellikle su) bulunması halinde serbest iyonlar oluşur. Bu iyonlar, elektrolitik iletme neden olur. Bundan dolayı düşük frekanslarda ϵ'' nde baskın olan iyonik iletkenliktir. İyonik iletkenlik, bir malzeme içerisinde yalnızca kayıpları oluşturur. İyonik iletkenliğin etkisi, düşük frekans bölgesinde frekansla ters orantılıdır.

Malzemelerde ölçülen kayıp, hem dielektrik kaybın bir fonksiyonu (ϵ_d''), hem iyonik iletkenliğin (σ) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$\epsilon'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3.8)$$

Kompleks iletkenlik σ ,

$$\sigma = i\varepsilon_0 \omega \varepsilon = i\varepsilon_0 \omega (\varepsilon' - i\varepsilon'') = \varepsilon_0 \omega \varepsilon'' + i\varepsilon_0 \omega \varepsilon' \quad (3.9)$$

bağıntısı ile verilir. σ 'nın reel kısmı ac iltkenliğini (σ_{ac}) verir ve kompleks dielektrik parametrelerinden hesaplanabilir.

$$\sigma_{ac} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (3.10)$$

biçiminde belirlenebilir. Düşük frekanslarda uygulanan elektrik alan, yük taşıyıcılarını büyük mesafelere sürüklenmeye zorlar. Frekans arttığında, yük taşıyıcılarının ortalama yer değiştirmesi azalır[Psarras et al 2002].

3.3 Dielektrik Kayıpların Fiziksel Anlamı

Kayıp akımı değişik nedenlerle oluşabilir. Polar dielektriklerde dipol moleküllerin yönelimi ile oluşur. Bu akım, deformasyonlu kutuplanmada çok kısa bir zamanda gerçekleşirken, yönelimli kutuplanmada oldukça uzun bir zamanda gerçekleşir.

Dış bir elektrik alanın etkisi altında bulunan dipol molekülleri döner. Bu dış alan maddenin iç sürtünme (viskozite) kuvvetlerini yener. Uygulanan elektrik enerjisinin bir kısmı bu sürtünme kuvvetlerini yenmeye harcanır ve bir kısmı da ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Ayrıca, dielektrikteki dipol momentlerin belli kısımlarının dönmesi veya bazı moleküllerin bir konumdan başka bir konuma transferi gibi durumlar da olabilir. Dolayısıyla farklı durulma zamanlı mekanizmalar oluşabilir. Bu mekanizmalar, dielektrik kayıpların oluşması ile ilişkilidir.

Pratik olarak, herhangi bir dielektrik içinde homojen olmama durumu kaçınılmazdır. Değişik maddelerin karışımlarından oluşmayan dielektriklerde bile her zaman bir miktar safsızlık, örneğin hava ile dolu gözenekler, su katkıları vs. bulunabilir. Malzemenin özellikleri, malzemenin veya ürünün imalat sürecindeki sıcaklık koşullarındaki farklılıktan dolayı, dielektrik hacminin farklı kısımlarında bir

miktar değişebilir. Bu duruma özellikle plastikler, seramikler, cam, cilalı filmler vs. gibi malzemelerde rastlanır.

Dipol moleküllerinin dönmesi, kayıp akımı oluşturan fiziksel nedenlerden biridir. Ancak kayıp akımları, apolar dielektriklerde de gözlenebilir. Bu akımlar, bir dielektriğin elektriksel özelliklerindeki homojensizliğe, dış bir elektrik alanının etkisi altında dielektrik içerisinde arayüzey yüklerinin oluşmasına ve dielektriğin hacmi içerisindeki yüklerin zamanla yeniden dağılımı süreçlerini başlatan diğer nedenler tarafından oluşturulabilir.

Oksijenle oksitlenen hava, parlama etkisi, elektrotlarla olan kontaklar vs. gibi etkenler nedeniyle, maddenin dış tabakalarındaki özellikleri ile iç tabakalardaki özellikler birbirinden farklı olabilir[Tareev 1975, Camerucci et al 2001].

3.4 $\tan\delta$ 'nın Değişik Faktörlere Bağlılığı

Dielektriklerin diğer parametrelerinin olduğu gibi, $\tan\delta$ değerleri de tam olarak sabit değildir. Frekans, sıcaklık, nem, dielektriğe uygulanan gerilim gibi değişik faktörlere bağlıdır.

a) $\tan\delta$ 'nın Frekansa Bağlılığı

Polietilen, politetrafloraetilen ve benzer apolar dielektrikler için $\tan\delta$ değerleri kullanılan aletlerle doğru biçimde ölçülebilecek en küçük değerlerin altında olabilecek kadar çok küçük olduğundan, bu maddelerle ilgili istenen sonuçların tam olarak elde edilmesi oldukça zordur. Ayrıca bu maddelerin $\tan\delta$ 'sının, frekansı da içeren değişik faktörlere olan bağlılığının belirlenmesi daha zordur. Bundan başka, apolar dielektrikler için de arayüzeyssel kutuplanma ve bunun sonucunda da ilave dielektrik kayıplar olabilir. Sonuç olarak, pratikte üretilen apolar polimerler için $\tan\delta$ değeri, maddenin içerisindeki polar safsızlıkların (kararlı hale getiriciler, polimerleşmeyi oluşturan katalizörlerin artıkları vs) bulunmasına da duyarlıdır. Bu safsızlıklar, malzemenin $\tan\delta$ 'sını artırır ve $\tan\delta$ 'nın frekansa olan bağlılığını değiştirir.

Birçok durumda, dielektriklerin $\tan\delta$ ve $(\epsilon\tan\delta)$ sının frekansa bağıllığı problemi çok sayıda koşul nedeni ile karmaşıklaşır. Bu yüzden malzeme, belli bir τ durulma zamanına sahip durulma kutuplanmalı bir parçacıklar grubu yerine, değişik durulma zamanı değerlerine sahip çok sayıdaki durulma zamanını içerebilir. Bu durumda bir durulma zamanları takımı ile ilgilenilmelidir.

Farklı dielektriklerin karışımından oluşan kompozit bir dielektrik durumunda bu desen çok daha karmaşık hale gelir. Birçok durumda, dielektriğe uygulanan gerilimin değişik frekanslarında, çok sayıda kayıp maksimumlarının bulunduğu oldukça karmaşık bir $\tan\delta$ -frekans bağıllığı deseni gözlenebilir.

Elektriksel yalıtıcı bir malzemenin $\tan\delta$ veya $\epsilon\tan\delta$ niceliğinin frekansa bağıllığı göz önüne alındığında, frekans değiştiği bölgede farklı yapıda bir frekansa bağıllık deseni gözlenebilir. Daha yüksek bir frekansta artma veya azalma ya da bir maksimumdan hatta birkaç maksimumdan geçmesi gibi farklı yapılar bulunabilir[Tareev 1975, Tsangaris et al 1998, Ivanova et al 2000].

b) $\tan\delta$ 'nin Sıcaklığa Bağıllığı

Genel olarak sıcaklık arttığında $\tan\delta$ 'da artar. $\tan\delta$ 'daki bu büyüme, hem artık akımın iletiminde hem de soğurma akımında bir artma oluşturur.

Dipol mekanizmaların neden olduğu dielektrik kayıplar, maksimum değerine belirli bir T_k sıcaklığında ulaşır. Sıcaklıktaki artış ve bunun sonucunda da viskozitedeki düşme, dönen dipollerin sürtünmesinden ileri gelen kayıpların miktarında iki farklı etki yapar:

(1) Dipol bir birim açı ile döndüğünde, dipol yönelimini artırır.

(2) Viskozlu ortamın direncini (maddenin iç sürtünmesini) yenmek için gerekli olan enerjide bir azalma oluşturur.

Birinci faktör, P 'yi ve dolayısıyla da $\tan\delta$ 'yı artırır. İkinci faktör ise, bu iki niceliği azaltır. Dipol kutuplanmalarının miktarı viskozitenin bir fonksiyonu olarak ifade edilir ve elde edilen bağıntının türevi alınır, T_k analitik olarak bulunabilir.

Nötral polar malzemeler veya bunların karışımları, dipol kayıplarla birlikte elektriksel iletimden ileri gelen kayıpları da içerir ve bu kayıplar sıcaklıktaki artışla büyür.

Sistemin viskozitesini azaltan plastikleştiricinin ilave edilmesi, dipol maksimumunun düşük sıcaklıklar bölgesine kaymasına neden olur. Tersine, polar organik dielektriklerin polimerleşme derecesini ve dolayısıyla viskozitesini artıran ısısal veya kimyasal işlemlerden geçirilmesi durumunda ise, $\tan\delta$ 'nın maksimumu, daha büyük sıcaklıklara doğru kayma eğilimi gösterir. Genel olarak, çok düşük sıcaklıklarda, dielektriklerin $\tan\delta$ değerleri oldukça küçüktür.

c) $\tan\delta$ 'nın Neme Bağlılığı

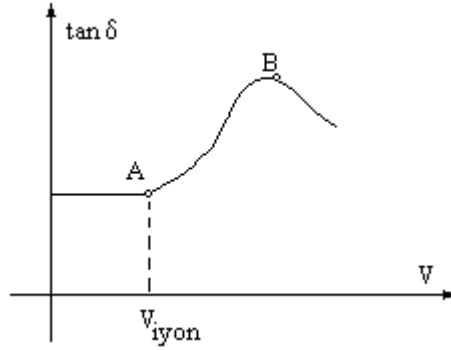
Higroskopik (su alan) dielektriklerde, örneğin killerde nem artarken $\tan\delta$ 'nın değeri önemli ölçüde artar. Bu yüzden, yüksek nem, bu tür dielektriklerde elektriksel yalıtımın özelliklerini bozar.

d) $\tan\delta$ 'nın Gerilime Bağlılığı

Bir yalıtkanın kalitesi (özellikle yüksek gerilim kabloları, düzenekleri ve makinaları vs.) belirlenirken, $\tan\delta$ 'nın mutlak değerinden çok, $\tan\delta$ 'nın uygulanan gerilime göre değişimi daha önemlidir. $\tan\delta$ 'nın değeri belirli gerilim değerlerinde hemen hemen sabit kalırken, gerilim belirli bir V_{iyon} sınırına kadar arttığında keskin bir biçimde artar(Şekil 3.4).

Dielektrik içerisindeki hava veya diğer gaz katkıları kısmi deşarjlar oluşturup iyonlaşmaya neden olur. Bu tür katkılar örneğin iyi bir vakum kurutması yapılmayan az yoğunluklu ve lifli yapıda olan veya yeterince sıkıştırılmamış malzemelerde kolayca oluşur. Bu deşarjların bulunduğu bölgelerde maksimumlar oluşur. Bunun

nedeni hava katkılarının yüksek iletim kazanması ve bu katkıların uçları arasındaki gerilim düşmesini azaltmasıdır.



Şekil 3.4 $\tan \delta$ nin uygulanan gerilime bağlılığı (şematik)

Havanın iyonlaşması iki önemli nedene bağlıdır:

- Enerji önemli ölçüde soğurulur. Bu dielektrik kayıpların ve dolayısıyla da $\tan \delta$ 'nın şiddetli bir biçimde artmasına neden olur.
- Hava içerisindeki oksijenin (O_2) bir kısmının ozon (O_3) haline geçerek azot oksitlerin oluşmasını sağlayan kimyasal süreçlerin oluşmasıdır. Bu maddeler, özellikle de küçük nem miktarlarının bulunması durumunda, organik yalıtıcı malzemelerin çoğunluğunda kuvvetli oksitleyiciler gibi davranarak, malzemeleri zamanla bozar. İnorganik malzemeler, ozona karşı genellikle daha karardır.

Yalıtıcının çalışma gerilimi iyonlaşma geriliminin (V_{iyon}) altında olmalıdır. İyonlaşma gerilimi büyük olan bir yalıtıcı daha kaliteli bir yalıtıcı özelliği gösterir.

Gözenekli durumda $\tan \delta$ eğrisi bir iyonlaşma eğrisidir. Bunun nedeni, artan gerilim altındaki dielektriğin gözenekleri içerisinde kısmi deşarjların oluşmasıdır. Son yıllarda, katı bir yalıtıcıdaki gaz katkıları içindeki kısmi deşarjların incelenmesine çok daha fazla önem verilmektedir. Çünkü, bu deşarjların oluşması yalıtımda çalışma güvenilirliğini azaltır.

Alan şiddetleri, kısmi deşarjların başlangıcında gözlenen şiddetlerden daha küçüktür. Bu nedenle, gözenekli bir yalıtıcının $\tan \delta$ değeri, aynı maddeden yapılmış gözeneksiz, katı bir yalıtıcınkinden daha küçük olur[Tareev 1975, Helmy et al 1989].

4. DİELEKTRİK MALZEME : POLİMERLER, EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİ

İnsanlığın yaşam standardını yükseltmek için kullanılan malzemenin doğada çok fazla türü bulunmakta ve yapılan araştırmalar ile sürekli yeni malzemeler elde edilmektedir. Özellikle elektronik ve uzay sanayiinde elde edilen yeni ürünlerin türü oldukça ve gelişimi olağanüstü derecede hızlı olmaktadır.

Malzeme bilimcileri, malzemeleri genellikle üç sınıfa ayırırlar.

(1) Metal malzemeler

(2) Polimer malzemeler

(3) Seramik malzemeler

Metal ve seramik malzemeler bu çalışmanın amacı dışında olduğundan üzerinde durulmayacaktır.

4.1 *Polimerler ve kompozitler*

Polimer kelimesi Yunanca olup “çok parça” anlamına gelir. Maddelerin molekülleri bir veya daha fazla otomdan meydana gelir. Polimer molekülleri, bileşim ve yapı bakımından birbirlerinin aynı olan çok sayıda atom kendi aralarında kovalent bağlarla bağlanması ile meydana gelir. Polimerlerin molekül kütleleri çok büyük olduğundan bazen “yüksek molekülü bileşikler” ya da “makromoleküller” olarak da isimlendirilir. Polimerlerin molekül kütleleri onbinlerle, yüzbinlerle ve hatta bazı durumlarda milyonlarla ifade edilebilir.

Polimerler çevremizdeki canlı ve cansız doğada çok yaygın olarak bulunan maddelerdir. Bu maddelerin tarihi yerkürenin oluşumu, kullanımı ise insanlık tarihi kadar eskidir. İnsanlar yüzyıllardır bu maddelerin bileşimlerini ve yapısını bilmeden çeşitli amaçlar için kullanmışlardır. Yıllarca yün, pamuk, deri ve ağaçlar insanların temel gereksinimlerini karşılayan doğal araçlar olmuşlar ve halen de olmaktadır. Polimerler, her şeyden önce insanların temel gereksinimlerini karşılarlar. İnsan,

hayvan ve bitki organizmalarının yaşamında da önemli roller oynamaktadır. Bitkilerde bulunan nişasta ve selüloz gibi polisakkaritler, lignin, protein, pektin vs maddeler birer doğal polimerdir. Örneğin, nükleik asitler organizmada protein sentezi ve irsiyet ile ilgili prosesleri düzenler. Nükleik asitlerin birer polimeri olan proteinlerin insan ve hayvan organizmalarında çok önemli biyolojik görevleri vardır. Yaşamın devam edebilmesi proteinlerin varlığına bağlıdır.

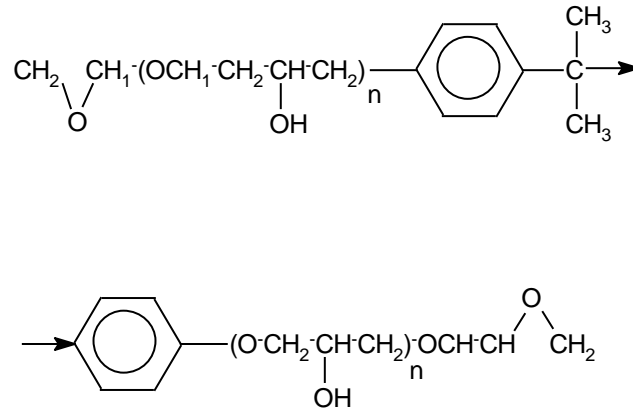
Yer kabuğunun büyük bir kısmı polimer yapısına sahip bulunan silisyum-4-oksit ve alüminyum oksitten oluşmaktadır. Kuvars ve dağ kristali olarak bilinen ametist, silisyum-4-oksitten meydana gelmiş doğal inorganik polimerlerdir. Elmas ve grafit saf karbondan oluşan inorganik polimerlere birer örnektir.

Polimerlerin doğada çok yaygın olarak bulunmalarına ve insanlar tarafından asırlardır her fırsatta kullanılmalarına rağmen, yüzyıllardır polimerik özellikleri farkına varılamamıştır. XX. yüzyılın başlarında bu maddeleri sentezlemek ve özelliklerini incelemek için yöntemler geliştirilmiş ve polimerler bağımsız ayrı bir madde grubu olarak kabul edilmiştir. Polimerler, küçük molekül kütleli maddelerden oldukça farklı özelliklere sahip olmaları nedeniyle ayrı grup olarak tanımlanmaktadırlar. Bu farklı özelliklerden en önemlisi polimerlerin çok büyük molekül kütlelerine sahip olmalarıdır. Polimerlerin fiziksel özellikleri, çözelti özellikleri, makromolekülerinin dönme yeteneği vs gibi farklı özellikleri büyük molekül kütlelerinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Büyük molekül kütleli uzun zincirlerden oluşan polimerlerin en seyreltik çözeltileri bile küçük molekül kütleli bileşiklerin çözeltilerine göre çok büyük viskoziteye sahiptir. Çözücülerde zor çözünmeleri ve küçük molekül kütleli bileşikler için temel saflaştırma yöntemleri olarak kullanılan damıtma ve kristalleştirme yöntemlerinin polimerlerin saflaştırılmasında kullanılamaması da polimerlerin büyük molekül kütlelerine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır[Basan 2001, Yazıcıgil 1998].

4.2 Epoksi reçinesi

Son yıllarda kimyasal sanayinin gelişmesi ile diğer asit, alkol, polimer, yağ gibi birçok kimyasal madde ile birlikte epoksi bileşikleri de yaygın olarak üretilmektedir. Bu bileşikler kullanılarak fabrikalarda ve sanayide gerekli olan çok çeşitli maddeler sentezlenebilmektedir. Açık kimyasal formülü Şekil 4.1'de

gösterilen epoksi reçinesi ve bileşiklerinin kullanım alanları hızla artmaktadır. Şu anda sanayide kullanılan birçok epoksi reçinesi ve türevleri vardır. Epoksi reçineleri yapıştırma özellikleri çok iyi olan sentetik reçinelerdir. Bu yapılar diğer malzemelere kolaylıkla yapışır. Bu nedenle demirleri, ağaçları, camları, plastikleri ...vs. birbirine yapıştırmak için geniş bir alanda kullanılırlar. Yapı sanayinde granit, mermer, çelik, taş, seramik ve diğer yapı malzemelerini yapıştırmada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte sıvı epoksi reçinelerinin düşük viskozitesi ve çabuk katılaşması nedeniyle, katkı, dolgu, onarım ve montaj amaçlı olarak da kullanılmaktadır.



Şekil 4.1 Epoksi reçinesinin kimyasal formülü

Kimyasal etkilerle çevre koşullarına karşı yüksek dirence sahip olduklarından mekanik özellikleri oldukça iyidir. Suya, aside ve alkaliye oldukça iyi direnç gösterirler. Epoksi reçinesi, nem değişimini önlediği için paslanmaya veya su kaybına neden olmaz. Suya dayanıklı olması nedeniyle su altındaki ve sulu ortamlardaki onarımlarda kullanılabilir. Elastik olması nedeniyle sismik hareketlerden etkilenmezler, zamanla özelliklerini kaybetmezler.

Epoksi reçinesi aynı zamanda iyi bir çözücü olduğundan temizlik sanayinde de kullanılır. Parfümeri sanayinde, ilaç sanayinde, savunma sanayinde ve gıda sanayinde katalizör olarak kullanılan birçok bileşiği vardır. Arabaların radyatöründe soğutucu olarak kullanılan antifiriz bir epoksi bileşiğidir[Kurbanlı ve ark 2001].

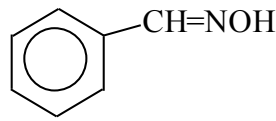
Son yıllarda epoksi bazlı kompozitler üzerinde yaygın bir şekilde çalışılmaktadır. Epoksi reçinesinin ısıya dayanıklılığı düşük olduğundan, çeşitli modifikatörlerle sertleştirilebilmektedir. Sertleştirilmiş epoksi reçineleri ısıya, kimyasal maddelere ve suya karşı dayanıklıdır. Bu plastik tabakalar yüksek mekanik, kimyasal ve dielektrik özelliklerine sahiptirler.

Bu malzemeler heterojen yapıda ele alınmakta olup içerisine katılan modifikatöre göre değişen ilginç özelliklere sahiptirler. Bu sistemlerin davranışlarını, sistemin bileşenlerinin geçirgenliklerine ve iletkenliklerine bağlı olarak inceleyen birçok araştırma yapılmıştır. [Psarras et al 2002, Nixdorf and Busse 2001].

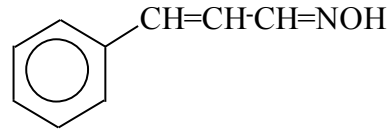
5. EPOKSİ REÇİNESİ ve KOMPOZİTLERİNİN DİELEKTRİK ÖLÇÜMLERİ

5.1 Numunelerin hazırlanması

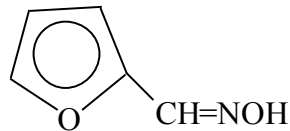
Bu çalışmada, Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya bölümünden temin edilen epoksi reçinesi ve 4 farklı kompozit numune incelenmiştir. Epoksi reçinesinden elde edilen 4 farklı kompozitin açık formülleri Şekil 5.1 de gösterilmiştir[15. Ulusal Kimya Kongresi 2001]. Numunelerin 100 kez büyütülmüş mikroskop fotoğrafları ise Şekil 5.2 de verilmiştir. Şekillerde katkısız epoksi reçinesi numunesi N₀, benzaldoksimli kompozit N₁, cinnamoiloksimli kompozit N₂, furfuraldoksimli kompozit N₃ ve 1,4-diamino-bütan-dioksimli kompozit ise N₄ ile etiketlenmiştir.



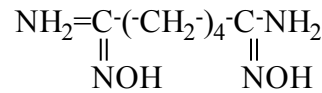
BENZALDOKSİM (1)



TARÇINALDOKSİM (2)



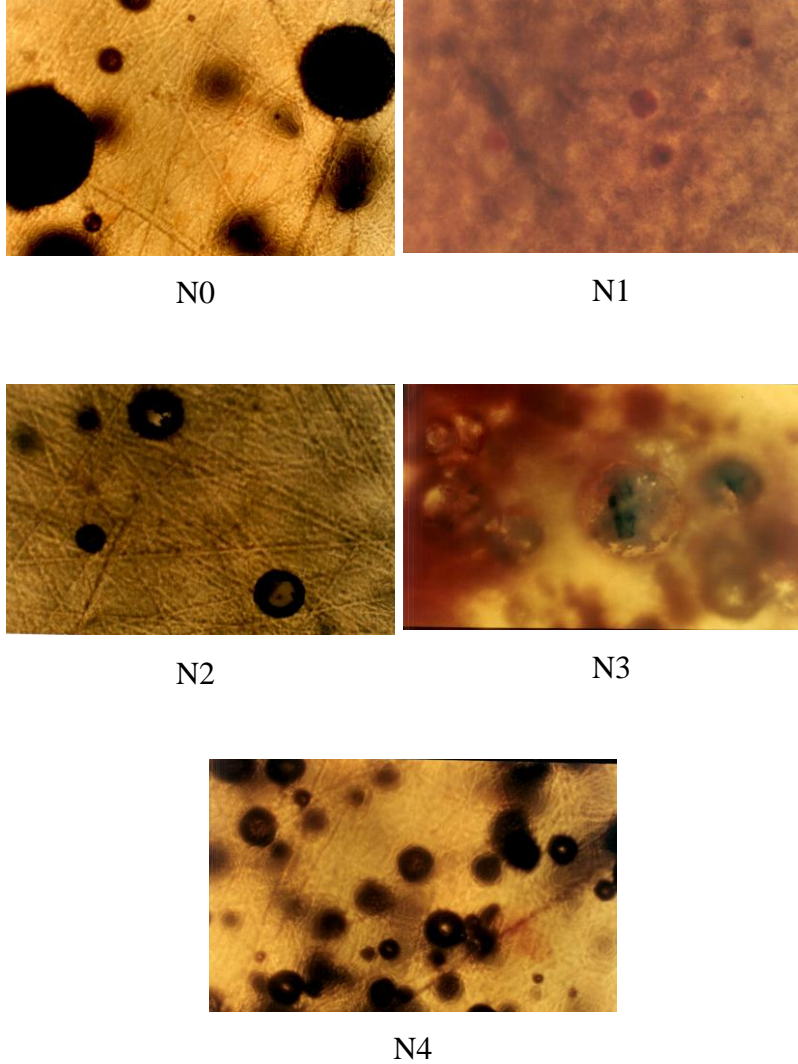
FURFURALDOKSİM (3)



1,4- DİAMİNO-BÜTANDİOKSİM (4)

Şekil 5.1 Numunelerin kimyasal formülleri

Numuneler 3-4 cm kalınlığında ve 14.5 mm çapında silindir şeklinde olduğundan önce kalın bir zımpara ile yaklaşık 0.5 cm kalınlığına kadar inceltilmiştir. Daha sonra su zımparası ile 1 mm kalınlık elde edilene kadar tekrar inceltilmiş ve yüzeyindeki pürüzler sünger zımpara ile düzeltilmek suretiyle oldukça pürüzsüz ve kaliteli bir yüzey elde edilmeye çalışılmıştır.

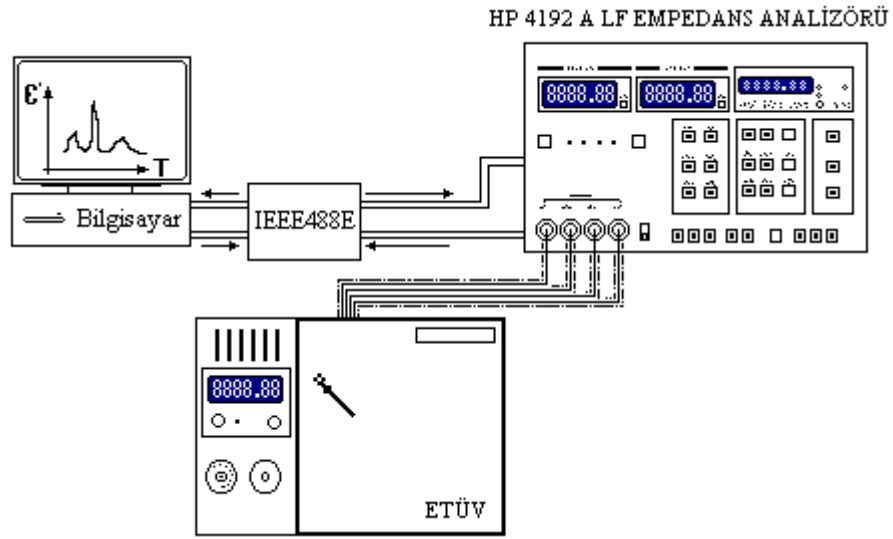


Şekil 5.2 Epoksi reçinesi ve kompozitlerinin 100 kez büyütülmüş resimleri

14.5 mm çaplı ve 1 mm kalınlıklı diskler haline getirilen kompozit numunelerin her iki yüzü, elektrot kutuplanmasının etkisini minimuma indirmek amacıyla, gümüş boya(silver paint) ile boyanarak elektrotlar oluşturulmuş ve gümüş boya kuruyuncaya kadar yaklaşık yarım saat etüvde bekletilmiştir. Numunelere elektrik alan uygulayabilmek ve numunede oluşacak tepkiyi alabilmek için numune yüzeylerinden alınan bağlantılar yine gümüş pasta ile sağlanmıştır.

5.2 Dielektrik Ölçümler

Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozitin dielektrik ölçümleri Şekil 5.3 de blok şemada gösterilen deney sistemi ile alınmıştır. Dielektrik ölçümler paralel plakalı sığa yöntemi ile 5Hz-13MHz frekansı aralığına sahip HP 4192A LF Empedans Analizörü kullanılarak, 25 °C–140 °C arasında değişen 7 farklı sıcaklıkta 10 kHz adımlarla 1300 data alınarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.3 Dielektrik ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği

Sıcaklık değerleri Elektro-Mag firmasının ürettiği etüv ile kontrol edilmiştir. Numunelerin ısıl olarak dengeye gelmelerini sağlamak için, etüvün ısıtılması süresince, numuneler etüvün içerisinde bırakılmıştır. Numunelerin değiştirilmesi sırasında etüv ısı kaybettiğinden, etüv ölçüm yapılan sıcaklığa ulaştıktan sonra, ölçümü yapılan numune 15 dakika daha bu sıcaklıkta bekletilmiştir. Etüvün bütün sıcaklıklar için hassasiyeti ± 2 derecedir. Numunelerle Empedans Analizörü arasındaki bağlantı 4 adet BNC kablosu ile sağlanmıştır.

Empedansmetrenin 4 temel ölçüm aralığı bulunduğundan ve her aralık için sıfırlama işlemi farklı olduğundan taramalı (sürekli) ölçümler için bir background

ölçümü yapılmış ve daha sonra da sığa ölçümlerinden hesaplanan dielektrik parametreler için bu etki göz önüne alınmıştır.

Taramalı ölçümüm her adımında, frekans, sığa ve kayıp tanjant değerleri IEEE-488 veri yolu kullanılarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu deneysel verilerden numunelere ait dielektrik sabitler Sigma Plot 2000 programı kullanılarak yapılmıştır.

6. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

İncelenen numuneler için 12 kHz'in altındaki frekanslarda dielektrik kayıp değerleri analizörün ölçebileceği en küçük değer in altında olduğundan ölçüm yapılamamıştır. Analizörün en yüksek çalışma frekansı 13 MHz olduğundan ölçümler, 12 kHz-13 MHz frekans aralığında alınmıştır.

Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozitin reel dielektrik sabiti

$$\varepsilon'(\omega) = \frac{C_{\text{Net}}}{C_{0\text{Hasaplanan}}} = \frac{C_{\text{Numune}} - C_{\text{Background}}}{C_{0\text{Hasaplanan}}} \quad (6.1)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada $C_{0\text{Hasaplanan}} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ ile verilen teorik boş sığa olup hesaplamalarda 1.5 pF olarak kullanılmıştır.

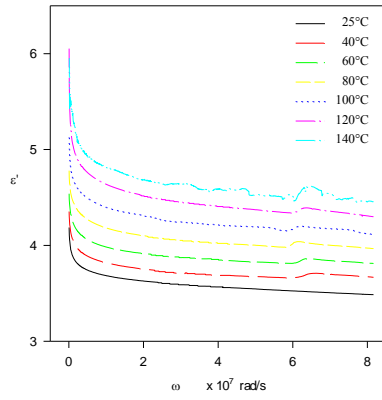
Kesim 2.4 'de belirtildiği gibi dielektrik malzemelerde durulma sürecini belirleyen bir çok mekanizma vardır. Süreçte hangi mekanizmaların baskın rol oynadığı malzemenin katkılı olup olmadığı ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 5.2 'den epoksi reçinesi ve kompozitlerin oluşumu sırasında içerisinde çeşitli sayıda ve çapta hava kaparcıkları oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla numunelerimiz heterojen bir yapıda olduğu söylenebilir, durulma mekanizmaları bu anlamda incelenmelidir.

Tüm numuneler için 25 °C – 140 °C sıcaklık aralığında reel dielektrik sabiti $\varepsilon'(\omega)$ nın frekansa göre değişimi Şekil 6.1 'de gösterilmiştir. Reel dielektrik sabiti, incelenen beş numune için düşük frekans bölgesinde büyük değerler alırken, artan frekansla her numune için yaklaşık 3.5 - 5 değerleri arasında değişen sabit bir değere düşmüştür. Diğer taraftan epoksi reçinesi, numune 2 ve numune 3 için Reel dielektrik sabitinin, yaklaşık 10 MHz civarında hafif bir pik yaptığı görülmektedir. Bu davranışın artan sıcaklıkla daha belirgin hale geldiği görülebilir.

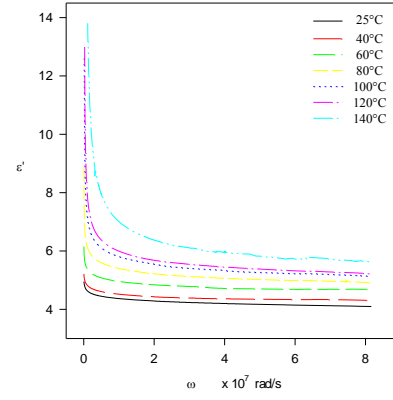
Dielektrik sabitinin sanal kısmı $\varepsilon''(\omega)$,

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon'(\omega) \tan(\delta(\omega)) \quad (6.2)$$

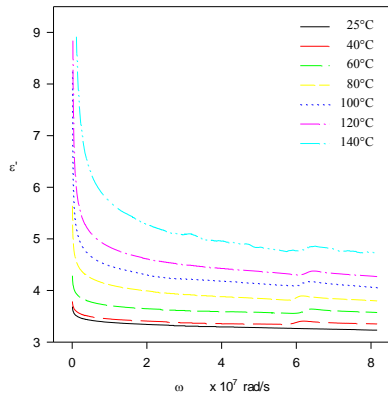
şeklinde hesaplanmıştır. Burada $\tan(\delta(\omega))$ kayıp açısıdır.



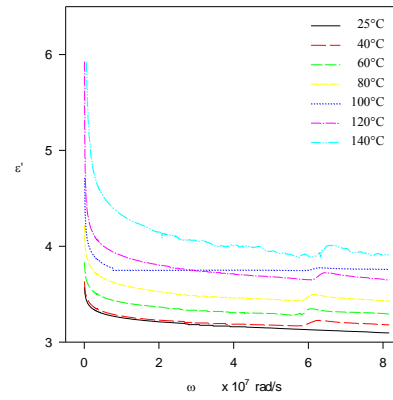
(a)



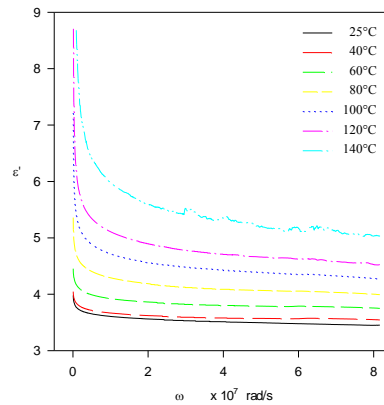
(b)



(c)

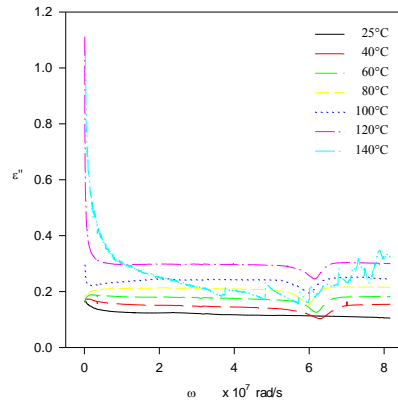


(d)

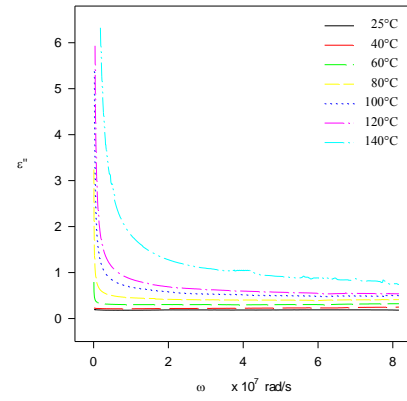


(e)

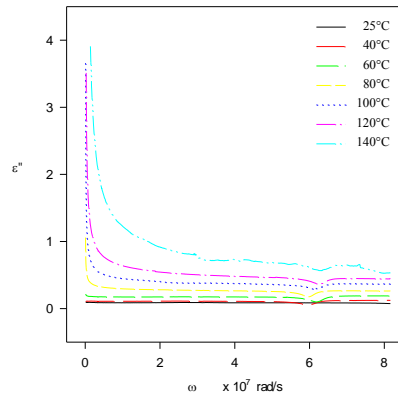
Şekil 6.1 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için reel dielektrik sabitinin frekansa bağlılığı. a) N0 b) N1 c) N2 d) N3 e) N4



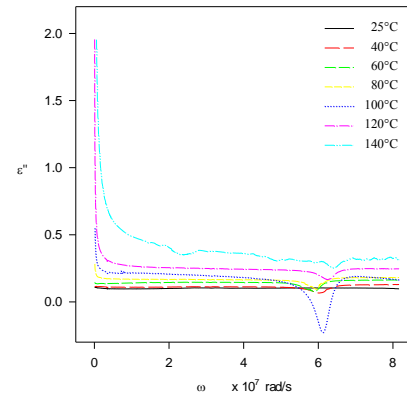
(a)



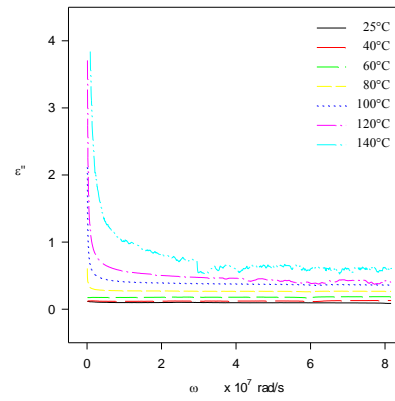
(b)



(c)



(d)



(e)

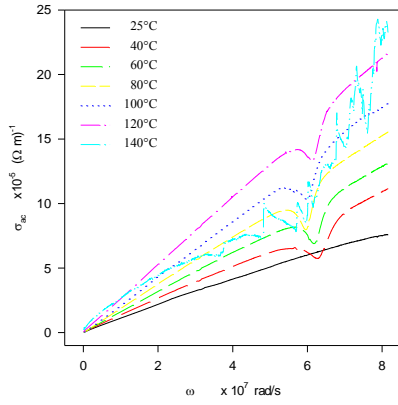
Şekil 6.2 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için sanal dielektrik sabitinin frekansa bağlılığı. a) N0 b) N1 c) N2 d) N3 e) N4

Şekil 6.2 'de ise numuneler için sanal dielektrik sabitinin frekansa göre değişimleri verilmiştir. Dielektrik kayıpların bir ölçüsü olan sanal dielektrik sabiti de reel dielektrik sabiti gibi tüm numuneler için düşük frekans bölgesinde büyük değerler alırken artan frekans ile 0.2 –1.0 aralığında değişen sabit değerlere düşmektedir. Epoksi reçinesi, numune 2 ve numune 3; 10 MHz in hemen üstünde bir kayıp minimumu göstermektedirler. Numune 3 için bu minimum, diğer ikisine göre daha belirgindir. Diğer taraftan bu minimumların bu üç numune için artan sıcaklıkla yüksek frekanslara kaydığı görülmektedir.

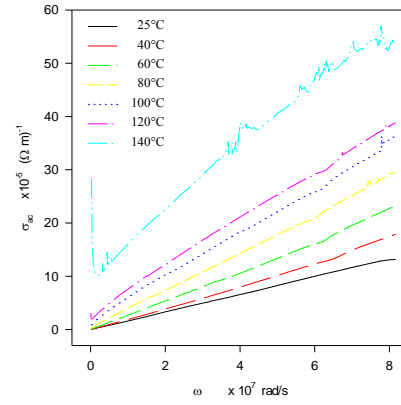
Epoksi reçinesi ve dört kompozit numune için ac iletkenlik $\sigma_{ac}(\omega)$, Denk.(3.10)'dan hesaplanmıştır. Elde edilen eğriler Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Tüm numuneler için ac iletkenliğin frekansa lineer olarak bağlı olduğu söylenebilir. Diğer taraftan Şekil 6.3'den ac iletkenlik eğrilerinin eğimlerinin artan sıcaklık ile arttığı da görülebilir. Yine daha önce bahsedilen üç numune, için 10 MHz civarında minimumlar belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, yani camsı geçişin üzerindeki sıcaklıklarda, ac iletkenlikteki belirgin ısıl salınımlar görülmektedir.

Tartışma

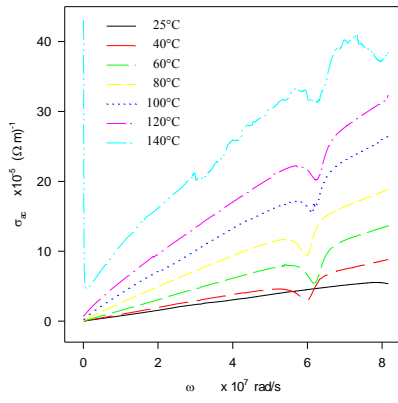
Frekans artarken numunelerdeki bütün atomlar ya da atom grupları yeniden dizileceğinden düşük frekanslarda ϵ' değeri sabit kalmayacaktır. Frekans arttıkça kutuplu moleküllerin sayısı arttığından, yüksek frekanslarda, numunenin frekansa göre tepkisi azalacaktır. Bu nedenle frekansın artması dielektrik sabitinde bir azalmaya neden olacaktır. Yeterince molekül yönelim aldıktan sonra da numunenin frekansa tepkisi oldukça azalacak ve normal değerlere ulaşılacaktır. Bu elde ettiğimiz sonuçlar literatürle oldukça iyi uyum göstermektedir. Şekil 6.1'den de görüldüğü gibi frekans arttıkça dielektrik sabitinin reel kısmı azalmakta ve hemen hemen sabit bir değer almaktadır.



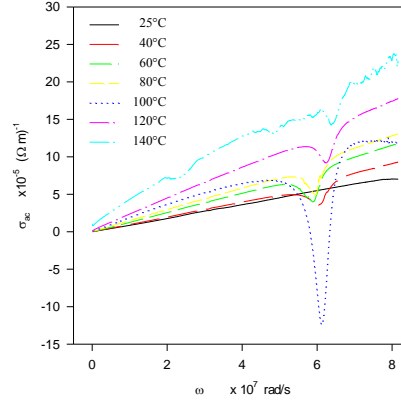
(a)



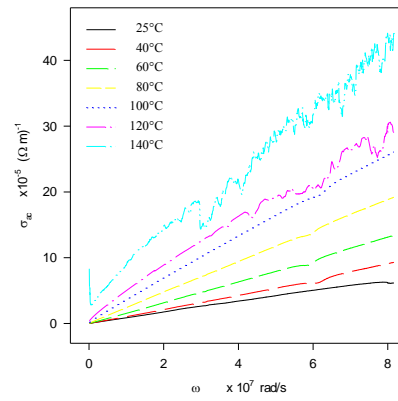
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 6.3 Epoksi reçinesi ve dört farklı kompozit için σ_{ac} iletkenliğinin frekansa bağlılığı. a) N0 b) N1 c) N2 d) N3 e) N4

Düşük sıcaklıklarda moleküller kendiliklerinden yönelim alamazlar. Sıcaklık arttıkça dielektriklerdeki moleküllerin hareketliliği artar ve daha kolay kutuplanırlar. Bu da daha büyük bir dielektrik sabiti oluşmasına neden olur. Şekil 6.1 de sıcaklığın artması ile ϵ' değerlerinin de arttığı açıkça görülmektedir.

Yukarıdaki açıklamalara göre düşük frekans ve yüksek sıcaklıklarda reel dielektrik sabitinin oldukça büyük değerler alması, frekans ve sıcaklığın artması ile ϵ' değerlerinde paralel bir artmanın olması şaşırtıcı değildir.

İyonik iletkenlik malzeme içerisinde serbest iyonların neden olduğu elektronik iletim etkisi ile oluşur. İncelenen numuneler polimer türü malzemeler olduğu için içerisinde iyonik iletme beden olan serbest iyonlar bulunabilmektedir. Kompozitlerin ac iletkenliği sıcaklık ve frekansa açık bir şekilde bağımlı olup sıcaklık ve frekansın artmasıyla artar.

İncelenen epoksi reçinesinin kompozitleri literatüre ilk kez girmiş olan orijinal numunelerdir. Bu kompozitlerin dielektrik özellikleri hakkında herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar literatür değerleri ile karşılaştırılamamıştır. Bununla birlikte literatürde, epoksi reçinesi tabanlı malzemelerin elektriksel özellikleri ile ilgili bir çok çalışma yapılmaktadır. Epoksi reçinesine metal parçacıkları katılarak 5 Hz-13 MHz frekans bölgesinde ve 50°C-140 °C sıcaklık aralığında yapılan bir çalışmada, %10 metal parçacıkları içeren numunelerin ϵ' reel dielektrik sabitleri 2-16 arasında verilmektedir[Psarras 2002]. Bu da ölçüm sonuçlarımızın literatürle uyum içerisinde olduğunu göstermektedir.

Birçok kutuplanma mekanizması düşük frekanslar bölgesinde kendisini gösterdiğinden, bu konudaki çalışmalar genellikle düşük frekans bölgesinde yapılmaktadır. Çalışmanın bundan sonraki aşamalarında 12 kHz'in altındaki frekans bölgesinde de ölçümlerin yapılması gerekmektedir. Bu ölçümler ise köprü devresi yardımı ile yapılabilir.

KAYNAKLAR

15. Ulusal Kimya Kongresi Bildiri Bülteni, 4-17 Eylül 2001, Epoksit Reçinesinin Çeşitli Oksim Türevleri ile Modifikasyonu ve Elde Edilen Kompozitlerin Özelliklerinin İncelenmesi, Boğaziçi Üniversitesi
- Al-Ramadin, Y., Ahmad, M., Zihlif, A., Alnajjar, A., Abdul Javad, A., Musto, P., Ragosta, G. and Martuscelli, E. (1999), "Impedance spectroscopy of highly cross-linked epoxy resin/bisphenol A-based polycarbonate", *Polymer*, vol:40, p:3877-3879
- Anderson, J.C. (1964), "Dielectrics" , Chapman and Hall Ltd.,London
- Askeland, R.R. (1988), "Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri", Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- Bartolomeo, P., Chailan, J.F. and Vernet, J.L. (2001), "On the use WLF equation to study resin curing by dielectric spectroscopy", *Polymer*, vol:42, p:4385-4392
- Basan, S. (2001), "Polimer Kimyası", Cumhuriyet Üniversitesi Yayınları, Sivas
- Benaboud, K., Achour, M. E., Carmona, F. and Salome L. (1998), "Electrical properties of carbon black-epoxy resin heterogeneous materials near the percolation threshold", *Ann. Chim. Sci. Mat.*, vol:23, p:315-318
- Camerucci, M.A., Urretavizcaya, G., Castro, M. S. and Cavalieri, A.L. (2001), "Electrical properties and thermal expansion of cordierite and cordierite-mullite materials", *Journal of the European Ceramic Society*, vol:21, p:2917-2923
- Carrier, M. and Soga, K., 1999, "A four terminal measurement system for measuring the dielectric properties of clay at low frequencies", *Engineering Geology*, vol:53, p:115-123
- Debye, P. (1929), "Polar Molecules, Dover Publications", Inc, Reinhold Publishing Corporation, Germany

- Dutta, P., Biswas, S. and Kumar De, S. (2002), "Dielectric relaxation in polyaniline-polyvinyl alcohol composites", *Materials Research Bulletin*, vol: 37, p:193-200
- Eloundou, J.P. (2002), "Dipolar relaxations in an epoxy-amine system", *European Polymer Journal*, vol:38, p:431-438
- Gallone, G., Levita, J., Mijovic, S., Andjelic, S. and Rolla P.A. (1998), "Anomalous trends in conductivity during epoxy-amine reactions", *Polymer*, vol:39, p:2095-2102
- Hamburger, F. (1930), "Polar molecules, their contribution to energy loss in dielectrics", *Physical Review*, vol:35, p:1119- 1124:
- Helmy, A.K., Santamaria, R.M. and Garcia, N.J. (1989), "Dielectric behaviour of montmorillonite discs", *Colloids and Surfaces*, vol:34, p:13-21
- Helmy, A.K., Santamaria, R.M. and Garcia, N.J. (1989), "Dielectric behaviour of dry montmorillonite discs", *Colloids and Surfaces*, vol:34, p:345-352
- Helmy, A.K., Santamaria, R.M. and Garcia, N.J. (1989), "Dielectric behaviour of montmorillonite quinoline complexes", *Colloids and Surfaces*, vol:34, p:13-21
- Hewlett Packard, "Dielectric Constant Measurement of Solid Materials", Application Note 380-1
- Hewlett Packard, "Basics of Measuring the Dielektrik Properties of Materials", Application Note 1217-1
- Hewlett Packard (1986), "HP Model 4192A LF Empedans Analizörü Kullanım Klavuzu", Tokyo
- Ivanova, K.I., Pethriect, R.A. and Affrossman, S. (2000), "Investigation of hydrothermal ageing of a filled rubber toughened epoxy resin using dynamic mechanical thermal analysis and dielectric spectroscopy", *Polymer*, vol:41, p: 6787-6796

- Kremer, F. (2002), "Dielectric spectroscopy- yesterday, today and tomorrow", *Journal of Non-Crystalline solids*, vol:305, p:1-9
- Kuo, D.H., Chang, C., Su, T., Wang W. and Lin, B. (2001), "Dielectric behaviours of multi-doped BaTiO₃/epoxy composites", *Journal of the European Ceramic Society*, vol: 21, p:1171-1177
- Kurbanlı, S., Şen, N. ve Ertul, Ş. (2001), "Epoksit Bileşikleri ve Teknolojisi", S.Ü. Vakfi Yayınları, Konya
- Lakatos, A.I. and Abkowitz, M. (1971), "Electrical properties of amorphous Se, As₂Se₃ and As₂S₃", *Physical Review B*, vol:9, no:4
- Nixdorf, K. and Busse, G. (2001), "The dielectric properties of glass-fibre-reinforced epoxy resin during polymerisation", *Composites Science and Technology*, vol:61, p:889-894
- Pandita, S., Tickoo, R., Bamzai, K.K and Kotru, P.N. (2001), "Dielectric characteristics of gel grown mixed rare earth (didymium) heptamolibdate crystals", *Materials Science & Engineering B*, vol:87, p:122-129
- Pissis, P., Georgoussis, G., Bershtein, V. A., Neagu, E. and Fainleib, A. M. (2002), "Dielectric studies in homogeneous and heterogeneous polyurethane/polycyanurate interpenetrating polymer networks", *Journal of Non-Cristalline Solids*, vol:305, p:150-158
- Psarras, G. C., Manolakaki, E. and Tsangaris, G. M. (2002), "Electrical relaxations in polymeric particulate composites of epoksi resin and metal particles", *Composites: Part A*, vol:33, p:375-384
- Rao, R. V. and Shridhar, M.H. (2001), "Interfacial polarization in poly(4-vinyl pyridine)/NiPc/I₂ composite", *Materials Letters*, vol:3446
- Ruffet, C., Gueguen, Y. and Darot, M. (1991), "Complex conductivity measurements and fractal nature of perosity", *Geophysics*, vol:56, p:758-768

- Russell, A.S. and Scales, P.J. (2001), "Insights into sample preparation for dielectric response measurements", *Colloids and Surfaces A*, vol:194, p: 271-286
- Schwarz, G. (1962), "A theory the low-frequency dielectric dispersion of colloidal particles in electrolyte solution", *Physical review*, vol:66, p:2636-2642
- Smith, W.F. (2001), "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Literatür Yayınları, İstanbul.
- Smyth, C.P. (1955), "Dielectric Behavior and Structure", Mcgraw-Hill Book Company, Inc., New York
- Tareev, B. (1975), "Physics of Dielectric Materials", Mir Publishers, Moscow
- Tsangaris, G. M. and Psarras, G. C. (1999), "The dielectric response of a polymeric three- component composite", *Journal of Materials Science*, : vol:34, p:2151-2157
- Tsangaris, G. M., Psarras, G. C. and Kouloumbi, N. (1998), "Electric modulus and interfacial polarization in composite polymeric systems", *Journal of Materials Science*", vol:33, p:2027-2037
- Varotsos, P. (1973), "Conductivity and dielectric constants of LiD", *Physical Review B*, vol:9, no:4
- Venudhar, Y.C. and Mohan, K.S. (2002), "Dielectric behaviour of lithium-cobalt mixed ferrites ", *Materials Letters*, vol:54, p:135-139
- Yazıcıgil, Z. (1998), Yağ Sanayii Yan Ürünlerinin İncelenmesi ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Konya
- Zaharescu, T. (2001), "Oxygen uptake: A procedure for evaluating oxidative stability and performances of polymers", *Mat. Res. Innovat*, vol:5, p:35-39

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Antalya’da doğdum. İlkokul, ortaokul, lise ve üniversiteyi Antalya’da okudum. Akdeniz Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 1999 yılında birincilikle mezun oldum.

2000 yılında Selçuk Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde yüksek lisansa başladım.

2000-2002 eğitim-öğretim yılları arasında değişik okullarda ücretli İngilizce öğretmenliği yaptım.

Halen Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde öğrenimime devam etmekteyim.

Hatice Zehra AKBAŞ