

**POLİMERLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN  
SICAKLIK VE FREKANSLA DEĞİŞİMLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**GÜLAY İYİBAKANLAR**  
Doktora Tezi




Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı  
Eylül – 2003

**ESKİŞEHİR**


133165

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Gülay İyibakanlar'ın Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansla Değişimlerinin İncelenmesi başlıklı Sivil Havacılık Anabilim Dalındaki, Doktora tezi 07.11.2003 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Prof. Dr. Ali Oktay.....	
Üye	: Prof. Dr. Hidayet B. U. GÖRÜCÜ.....	
Üye	: Doç. Dr. Güneş YILMAZ.....	

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12.11.2003... tarih ve 37/1... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

  
Enstitü Müdürü  
Prof. Dr. Orhan ÖZER  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
M ü d ü r ü

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

**ÖZET****Doktora Tezi****POLİMERLERİN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİNİN  
SICAKLIK VE FREKANSLA DEĞİŞİMLERİNİN İNCELENMESİ****GÜLAY İYİBAKANLAR****Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Sivil Havacılık Anabilim Dalı****Danışman: Prof.Dr.Ali OKTAY  
2003, 129 sayfa**

Bu çalışmada, 50 Hz ile 1 MHz frekans ve  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $120^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında, polimerlerin dielektrik özellikleri incelenmiştir. Polimer malzeme olarak silikon, polietilen (PE), poli vinilklorür (PVC), etilen vinilasetat (EVA) ve polyester kullanılmıştır. Dielektrik ölçümler, HP 4192A Empedans / Kazanç Faz Analizörü ile yapılmıştır. Her madde önce saf halleri ile, daha sonra çeşitli katkı maddeleri katılarak ölçüm değerleri alınmıştır. Malzeme numuneleri plakalar halinde hazırlanmıştır. Testler sonunda her malzeme için D-Kayıp Faktörü,  $\epsilon_r$ -Bağlı Dielektrik sabiti ve  $\tan\delta$ -Kayıp Tanjantı grafikleri çizdirilmiştir. Ayrıca silikon için, kısa devre tekniği de kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler: Polimerler, Dielektrik sabiti, Kayıp tanjantı, Kayıp faktörü**

**ABSTRACT****PhD Thesis****ANALYSIS OF CHANGES IN DIELECTRIC PROPERTIES OF  
POLYMERS WITH FREQUENCY AND TEMPERATURE****GÜLAY İYİBAKANLAR****Anadolu University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Aviation Program****Supervisor: Prof.Ali OKTAY  
2003, 129 pages**

In this study, dielectric properties of polymers were studied for frequencies between 50-100 Hz and temperatures between  $-40$  and  $120^{\circ}\text{C}$ . Polymers used in the analyses were Silicon, Poly vinylchloride (PVC), PE polyethylene (PE), Ethylene vinylactate (EVA) and Polyester. Dielectric measurements were performed using a HP 4192A Impedance/ Gain-Phase Analyzer. First of all, pure form of each material was measured and then the same analysis were repeated with different additives. Specimens were prepared in a plate form. After testing, D-Dissipation Factor,  $\epsilon_r$  - dielectric constant and  $\tan\delta$ -loss tangent graphs were plotted for each material. In addition, short circuit method was also used for silicon.

**Keywords: Polymer, Dielectiric Constant, Loss Tangent, Dissipation Factor**



## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın gerçekleőmesinde yardımcı olan ve yol gösteren sayın hocam Prof. Dr. Ali OKTAY'a ve Doç. Dr. Güneş YILMAZ'a teşekkür ederim.

Ayrıca malzemelerin hazırlanmasında ve deneylerin yapılmasında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen Mudanya PİRELLİ Fabrikası çalıőanlarına da teşekkür ederim.

Ders aőamasında ve bu çalıőmanın hazırlanması sırasında yardımını ve desteğini gördüğüm sayın hocam Prof. Dr. nder ORHUN'a da teşekkür etmeyi borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. POLİMERLER.....</b>	<b>6</b>
2.1. Giriş.....	6
2.2. Bu Çalışmada Kullanılan Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi.....	8
2.2.1. Polietilen.....	9
2.2.1.1. Hypalon Klorosülfonlu Polietilen.....	11
2.2.2. Poli (vinil klorid)-PVC.....	13
2.2.3. Silikon.....	14
2.2.4. Etilen Vinil Asetat (EVA).....	15
2.2.5. Polyester.....	16
2.3. Önceki Çalışmaların Analizi.....	17
<b>3. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER VE DİELEKTRİKLERİN ELEKTROMAGNETİK ALAN ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI.....</b>	<b>26</b>
3.1. Dielektrik Sabiti, Dipol ve Dipol Moment Kavramları.....	27
3.1.1. Dielektrik Sabiti.....	27
3.1.2. Kompleks Dielektrik Sabiti (Permitivite).....	27
3.1.3. Dipol ve Dipol Moment.....	32

3.2. Elektriksel Kutuplanma ( Polarizasyon ) .....	33
3.2.1. Elektronik Kutuplanma .....	38
3.2.2. Atomik Kutuplanma.....	39
3.2.3. Dipol (Yönelme) Kutuplanması.....	40
3.2.4. Yüzey (Serbest) Yük Kutuplanması .....	40
3.3. Dielektriklerin Sınıflandırılması .....	41
3.4. Clausius – Mosotti – Lorentz - Lorenz Denklemi.....	43
3.5. Onseger Yerel Alanı.....	47
3.6. Dielektrik Relaksasyon (Durulma) ve Dielektrik Kayıplar .....	49
3.6.1. Debye Eşitliği.....	51
3.6.2. Cole – Cole Eşitliği .....	59
3.6.3. Cole-Davidson Eşitliği.....	62
3.6.4. Fröhlich’e Göre Relaksasyon Zamanı Dağılımı .....	63
3.7. Farklı Malzemelerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi .....	64
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>72</b>
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	72
4.2. TestEdilen Numunelerin Hazırlanması .....	73
4.3. Test Yöntemi.....	74
4.4. Kısa Devre Yöntemi Kullanarak Silikonun Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi.....	79
<b>5. SONUÇLAR VE YORUMLAR.....</b>	<b>83</b>
5.1. HP 4192A Impedance / Gain – Phase Analyzer Test Cihazı İle Yapılan Deney Sonuçları.....	83
5.1.1. Silikon .....	83
5.1.2. PVC .....	87
5.1.3. Polietilen .....	90
5.1.4. EVA .....	92
5.1.5. Polyester.....	97

<b>6. GENEL YORUMLAR, SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>119</b>
<b>7. KAYNAKLAR.....</b>	<b>125</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

2.1.	Polietilenin hidrokarbon yapısı	10
2.2.	Bazı polimerlerin sertliklerinin sıcaklığa göre değişimi	10
2.3.	Poli(vinil lorida)'in hidrokarbon yapısı	13
2.4.	Silikon polimerinin yapısı	14
2.5.	Polyesterin yapısı	16
2.6.	Polyesterin Dielektrik özellikleri	17
2.7.	Polietilen'in değişik örnekleri için kayıp tanjantı-frekans eğrileri	18
2.8.	Poli(vinil asetat)'ın dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa göre değişimi	18
2.9.	Farklı sıcaklıklarda $In_2Te_3$ için kapasitansın frekansla değişimi	22
2.10.	Farklı sıcaklıklarda $In_2Te_3$ için kayıp tanjantın frekansla değişimi	22
2.11.	Farklı sıcaklıklarda $In_2Te_3$ için dielektrik kaybın ( $\epsilon_2$ ) frekansla değişimi	23
2.12.	20 $\mu m$ PS örneği için sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları	24
2.13.	Düşük sıcaklıkta (213K), 20 $\mu m$ PS örneği için sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları	25
2.14.	Yüksek sıcaklıkta, sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları	25
3.1.	Paralel plakalı kondansatör	28
3.2.	İdeal bir kapasitörün akım-voltaj ilişkisi	28
3.3.	Kayıplı bir dielektrikteki akımların gösterimi	29
3.4.	Kompleks dielektrik sabitinin vektör diagramı	30
3.5.	Elektrik dipol momentin gösterimi	32
3.6.	(a) Elektrik alan olmadığı durumdaki bir atom (b) Elektrik alan altındaki bir atom	33
3.7.	Yüklü kondansatörün plakaları arasındaki dielektrik polarizasyonu	34
3.8.	l uzaklığında, S alanına sahip paralel plakalı kondansatör	37
3.9.	Elektronik kutuplanma	38
3.10.	Atomik kutuplanma	39

3.11. Dipol Kutuplanması	40
3.12. Yüzey yük kutuplanması	40
3.13. Polarize olmuş bir dielektrikte yarı-makroskobik kovuk modeli	43
3.14. İç alanın hesaplanması için şematik gösterimi	44
3.15. Onseger'in kovuk modeli	48
3.16 Polar bir dielektriğin, dielektrik relaksasyonu	50
3.17. Bir dielektriğe uygulanan alan sonucunda oluşan polarizasyon Vektörü	53
3.18. Debye yarı-dairesi	57
3.19. Elektrik dielektrik sabiti ve iletkenliğin normalleştirilmiş eğrileri	59
3.20. Denklem (3.96)'ya göre Cole-Cole eğrileri	60
3.21. Cole-Davidson eğrisi	63
3.22. (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4 nolu örneğin olmak üzere, farklı frekanslardaki $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ince filmlerinin sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti değişimleri	65
3.23. 4 numaralı örneğin dielektrik sabitinin, farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	65
3.24. 4 numaralı örneğin kayıp tanjantının, farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	65
3.24. $\text{GaAsO}_4$ 'ün dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıplarının, oda sıcaklığında frekansa göre değişimi	66
3.26. (a) $\epsilon$ ve $\tan\delta$ 'nın oda sıcaklığında frekans ile değişimi (b) $\epsilon$ ve $\tan\delta$ 'nın 10 kHz'de sıcaklık ile değişimi	67
3.27. (a) 1-100kHz frekans bölgesinde dielektrik sabitinin frekansla değişimi. <b>1-</b> 303K, <b>2-</b> 333K, <b>3-</b> 363K, <b>4-</b> 393K, <b>5-</b> 423K. (b) 1kHz-1MHz frekans bölgesinde kayıp tanjantının frekansla değişimi. <b>6-</b> 303K, <b>7-</b> 333K, <b>8-</b> 363K, <b>9-</b> 393K, <b>10-</b> 423K	69
3.28. 100 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Dielektrik sabitinin, (b) Kayıp tanjantının frekansla değişimi	69
3.29 Saf PMMA ve PVAc/PMMA karışımlarının dielektrik sabitlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri ( $1.10^4$ Hz)	70

3.30.	Saf PMMA ve PVAc/PMMA karışımlarının kayıp tanjantının sıcaklığa bağlı değişimleri ( $1.10^4$ Hz)	71
4.1.	HP 4192A Impedance / Gain – Phase Analyzer test cihazı	74
4.2.	Elektrotlu test cihazı	75
4.3.	Cole-Cole eğrisi	77
4.4.	Kenar kapasitansından kaynaklanan hatalar	78
4.5.	Temas eden elektrot metodu	78
4.6.	Kısa devre yöntemi ile ölçme deney düzeneği	80
4.7.	Boru içinde oluşan duran dalgalar	81
5.1.	Silikonun kayıp faktörü grafiği	100
5.2.	Silikonun $\epsilon_r$ grafiği	101
5.3.	Silikonun kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) grafiği	102
5.4.	PVC'nin kayıp faktörü grafiği	103
5.5.	PVC'nin $\epsilon_r$ grafiği	104
5.6.	Silikonun kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) grafiği	105
5.7.	PE'nin kayıp faktörü grafiği	106
5.8.	PE'nin $\epsilon_r$ grafiği	107
5.9.	PE'nin kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) grafiği	108
5.10.	EVA'nın kayıp faktörü grafiği	109
5.11.	EVA'nın $\epsilon_r$ grafiği	110
5.12.	EVA'nın kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) grafiği	111
5.13.	Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın kayıp faktörü grafiği	112
5.14.	Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın $\epsilon_r$ grafiklerinin Karşılaştırılması	113
5.15.	Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) grafiği	114
5.16.	Polyesterin, dielektrik sabitinin sıcaklık ve frekansla incelenmesi	115
5.17.	Polyesterin, kayıp tanjantının sıcaklık ve frekansla incelenmesi	116
5.18.	280.1U dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişimi	117
5.19.	MF 160.1U dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişimi	118
6.1.	Havacılıkta kullanılan bazı dielektrik malzemelerin, dielektrik sabitlerinin ( $\epsilon'$ ) sıcaklıkla değişimi	124

## ÇİZELGELER DİZİNİ

2.1.	Hypalon klorosülfonlu polietilen ve polivinil kloridin dielektrik özellikleri	12
2.2.	EVA'nın bazı tipik Özellikleri	15
2.3.	Polyesterin özellikleri	16
4.1.	Kullanılan numuneler	73
5.1.	% 100 Silikonun test sonuçları	83
5.2.	% 10 perkasil katkılı silikonun test sonuçları	84
5.3.	% 15 perkasil katkılı silikonun test sonuçları	84
5.4.	%100 silikon test plakasının özellikleri	85
5.5.	% 10 perkasil katkılı silikon test plakasının özellikleri	85
5.6.	%15 perkasil katkılı silikon test plakasının özellikleri	85
5.7.	%100 PVC'nin test sonuçları	88
5.8.	%15 kalsit katkılı PVC'nin test sonuçları	88
5.9.	%100 PVC test plakasının özellikleri	88
5.10.	%15 kalsit katkılı PVC test plakasının özellikleri	89
5.11.	%100 PE'nin test sonuçları	90
5.12.	%15 kalsit katkılı PE'nin test sonuçları	91
5.13.	%100 PE'nin test plakasının özellikleri	91
5.14.	%15 kalsit katkılı PE'nin test plakasının özellikleri	91
5.15.	%100 EVA'nın test sonuçları	93
5.16.	%15 Kaolin katkılı EVA'nın test sonuçları	93
5.17.	%100 EVA'nın test plakasının özellikleri	93
5.18.	%15 Kaolin katkılı EVA'nın test plakasının özellikleri	94
5.19.	%100 silikon, %100PVC, %PE ve %100 EVA'nın kayıp faktörleri	95
5.20.	%100 silikon, %100PVC, %PE ve %100EVA'nın dielektrik sabitleri	96
5.21.	%100 silikon, %100PVC, %PE ve %100EVA'nın kayıp tanjantı	96
5.22.	Polyesterin dielektrik sabitinin frekans ve sıcaklıkla değişimi	97
5.23.	Polyesterin kayıp tanjantının frekans ve sıcaklıkla değişimi	97



6.1. Havacılık endüstrisinde kullanılan bazı dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) parametreleri.

123



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>A</b>	: Alan	$m^2$
<b>C<sub>0</sub></b>	: Boşluğun kapasitansı	F
<b>d</b>	: Kondansatörün plakaları arasındaki uzaklık	m
<b>D</b>	: Elektriksel akı yoğunluğu	$C/m^2$
<b>E</b>	: Elektrik alan şiddeti	V/m
<b>F</b>	: İç alan. (Onseger yerel alanı)	-
<b>F</b>	: İki nokta yükü ( $e$ ve $e'$ ) arasındaki kuvvet	N
<b>f</b>	: Frekans	Hz
<b>f<sub>r</sub></b>	: Relaksasyon frekansı	Hz
<b>G</b>	: Kovuk alanı	-
<b>G</b>	: Kondüktans	mho
<b>I<sub>c</sub></b>	: Kapasite akımı	A
<b>I<sub>l</sub></b>	: Kayıp akımı	A
<b>J</b>	: Akım yoğunluğu	$A/m^2$
<b>M</b>	: Toplam moment	-
<b>n</b>	: Yansıma indeksi	-
<b>N</b>	: Birim hacimdeki dipol sayısı	-
<b>N<sub>A</sub></b>	: Avogadro sayısı ( $6,023 \cdot 10^{23}$ )	1/mol
<b>p</b>	: Dipol moment	C.m
<b>P</b>	: Polarizasyon vektörü	$FV/m^2$
<b>Q, q</b>	: Elektriksel yük	C
<b>R</b>	: Reaksiyon alanı	-
<b>t</b>	: Zaman	sn
<b>T<sub>c</sub></b>	: Curie sıcaklığı	°C
<b>T<sub>e</sub></b>	: Erime sıcaklığı	°C
<b>T<sub>g</sub></b>	: Camsı geçiş sıcaklığı	°C
<b>V</b>	: Hacim	$m^3$
<b>α</b>	: Polarizebilite	-
<b>δ</b>	: Kayıp açısı	derece
<b>tanδ</b>	: Kayıp tanjantı	-

$\epsilon$	: Permittivite, dielektrik sabiti (Elektriksel geçirgenlik)	F/m
$\epsilon_0$	: Boşluğun dielektrik sabiti( $8,85 \cdot 10^{-12}$ )	F/m
$\epsilon_r$	: Bağlı dielektrik sabiti	-
$\epsilon_s$	: Frekansın sonsuz olduğu durumdaki dielektrik sabiti	-
$\epsilon_\infty$	: Frekansın sıfır olduğu durumdaki (statik) dielektrik sabiti	-
$\epsilon'$	: Kompleks dielektrik sabitinin gerçel kısmı	-
$\epsilon''$	: Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı, kayıp faktörü	-
$\epsilon^*$	: Kompleks dielektrik sabiti	-
$\mu$	: Bir elektrik dipol momentinin büyüklüğü	C.m
$\Pi$	: Molar polarizebilite	$m^3$
$\rho$	: Hacim yük yoğunluğu	$C/m^3$
$\sigma$	: İletkenlik	S/m
$\tau$	: Relaksasyon zamanı	sn
$\tau_{eff}$	: Efektif relaksasyon süresi	sn
$\chi$	: Elektriksel duyguluk, süseptibilite	-
$\chi'$	: Kompleks süseptibilitenin reel kısmı	-
$\chi''$	: Kompleks süseptibilitenin sanal kısmı	-
$\chi^*$	: Kompleks süseptibilite	-
$\omega$	: Açısal frekans	rad/sn

## 1. GİRİŞ

Polimerler çevremizdeki canlı ve cansız doğada çok yaygın olarak bulunan maddelerdir. Bu maddelerin tarihi yerkürenin oluşumu, kullanımı ise insan toplumunun tarihi kadar eskidir. Çünkü, insanlar yüzyıllardır bu maddelerin bileşimi ve yapısı hakkında en basit bir bilgiye bile sahip olmadan onlardan çeşitli amaçlarla yararlanmışlardır.

Polimerlerin doğada bu kadar çok yaygın olarak bulunmalarına ve insanlar tarafından asırlardır her fırsatta kullanılmalarına karşın, polimerik özellikleri farkedilmemiştir. 20. yüzyılın başlarında bu maddeleri sentezlemek ve özelliklerini incelemek için gerekli yöntemlerin bulunması ile polimerler bağımsız ayrı bir madde grubu olarak kabul edilmişlerdir.

“Polimer” kelimesi, Yunanca’ da çok anlamına gelen “polus” ve parça anlamına gelen “meros” kelimelerinden türetilmiş “çok parça” anlamına gelen bir kelimedir. Polimer molekülleri bileşim ve yapı bakımından birbirlerinin aynı olan çok sayıda grupların kendi aralarında kovalent bağlarla bağlanması ile meydana gelirler. Polimerlere bazen “yüksek molekülü bileşik” ya da “makromoleküller” de denir. Polimerler büyük moleküllerden oluşan maddelerdir. Bir çok sentetik maddede, küçük yapı birimleri ard arda tekrarlanarak birbirine bağlanmış ve böylece dev zincirler, veya ağlar oluşmuştur. Böyle maddelere polimer denir. Polimerler, **monomer** olarak adlandırılan küçük moleküllerin bağlanmasıyla oluşan çok büyük moleküllerdir.

Günümüzde pek çok yapay polimer hazırlanmıştır ve bunlar, doğal polimerlerin sahip olmadığı bazı üstünlükleri de taşırlar. Örneğin, yapay kauçuk yüksek sıcaklıklara dayanacak ve düşük sıcaklıklarda da esnekliğini koruyacak şekilde hazırlandığı halde doğal kauçuk 250 °C`den yukarıda erir ve -30 °C`de sertleşerek kırılabilir olur. Naylon, polietilen, polistren, teflon, PVC ve silikonlar, kimya endüstrisinin önemli ürünleridir.

**Polietilen**, bir sentetik (yapay) polimerdir. Bu en basit katılma polimeridir. Bu polimer, -CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>- birimlerinden oluşmuş uzun bir zincirdir. Birçok polimer molekülünde, ana zincire bağlı yan dallar (yan zincirler) de bulunur. Plastikler, şekillendirilebilen polimerler olarak tanımlanır. Plastik endüstrisi, CHX = CH<sub>2</sub> genel formülüne sahip birçok monomerden, değişik

polimerler geliştirmiştir. **Polivinil klorür ( PVC )** ve polipropilen ( PP ), bu tip polimerlere örnektir. Bu gruba giren polimerler, görünümleri, rijitlikleri, saydamlıkları ve aşınma dayanımları bakımından farklılıklar gösterir.

Polimerler, monomerlerin birbirine katılması (katılma polimerleri) veya monomerlerin etkileşmesi sırasında aralarından küçük bir molekülün ayrılması (kondensasyon polimerleri) ile oluşurlar. Kondensasyon polimerleri, kondensasyon polimerizasyonu ile elde edilen polimerik maddelerdir. Katılma polimerleri, zincir reaksiyonları ile monomerlerin doğrudan polimer moleküllerine girmeleri ile oluşur. Etilen, polimerleşmeyi başlatıcı bir katalizör ile polimerleşir ve polietilen oluşur; **polietilen** bir katılma polimeridir. Vinil klorürden hazırlanan katılma polimeri de, **polivinil klorürdür (PVC)**. Polimerlerin önemli bir sınıfını oluşturan **silikon** polimerleri, silisyum içerirler. Silisyum,  $-Si-O-Si-O-Si-O-$  zincirleri verebilen bir elementtir.

Endüstride ve çağdaş insanın yaşamında önemli yer tutan polimerik maddeler çok değişik yapılar ve özellikler gösterirler. Bazı polimerlerin yararlılığı bu maddelerin *elektriksel* özelliklerine dayanır. Bu tür polimerler, elektriksel yalıtkan, dielektrik kapasitörü ya da mikrodalga aygıtlarının parçalarında kullanılırlar. Polimerik maddeler ısı yalıtkanı olarak da kullanılırlar. Bu durumda termal özellikler önem kazanır. Bazı polimerlerin üstün optik özellikleri vardır. Bu polimerlerden uçak camları, güvenlik camlarının iç katmanları yapılır.

Belirli elastomer özellikleri gösterebilmesi için polimerin camsı geçiş sıcaklığının düşük ve tümü ile amorf olması gerekir. Ayrıca, polimer zincirlerinin çeşitli evinimleri kolayca yapabilmesi ve moleküller arası çekim kuvvetlerinin küçük olması zorunludur.

Sentetik plastiklerin mekanik davranışları elastomerler ile fiberler arasında yer alır. Plastikler çok çeşitli özellikler gösteren büyük bir polimer grubunu kapsar. Sert (rigid) ve yumuşak (fexible) plastiklerin mekaniksel davranışları oldukça farklıdır. Yumuşak plastıklere örnek olarak **polietilen** alınabilir.

Elektrik endüstrisinde kullanımları, moleküler mobilite ve relaksasyon süreleri ile ilgili dielektrik çalışmalarından (ki bu çalışmalar genelde mekanik davranışlarla ilgilidir) dolayı, dielektrik metotlarla polimer davranışın incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Dielektrik malzemeler katı, sıvı ve gaz halinde doğada bulunurlar. Her birinin kendine özgü moleküler yapıları vardır. Tanım olarak, atomik yapısında serbest yük bulundurmeyen dielektrikler ideal dielektrik olarak adlandırılmaktadır. Dielektrik maddeler,  $-4 \text{ eV}$ ' dan daha büyük bir yasak enerji aralığına sahiptirler.

Dielektrik malzemeler elektriği iletmezler, ancak uygulanan elektrik alandan etkilenirler. Elektrik alan etkisinde, elektron ve atomlar yer değiştirir. Bunun sonucunda elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma oluşur. Oluşan elektriksel dipoller, dielektrik malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimi sağlar. Bunun için kondansatör yapımında kullanılırlar. Yalıtkan olarak kullanılmalarının nedeni, elektrik devresinde yük transferini engellemeleridir.

Materyale, dışardan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahipse “dielektrik” olarak sınıflandırılır. Dielektrik sabiti (Permittivite ya da elektriksel geçirgenlik) bir alanın etkisi altında dış elektrik bölgede ne kadar enerji saklandığını ve malzeme içerisinde ne kadar enerji kaybolduğunu gösterir. Materyalin dielektrik sabiti iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan bir miktardır.

Mikrodalga bölgesinde kullanılan malzemelerin kalitesinin ve özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ortamları belirleyen özellikler manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ), elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve iletkenlik ( $\sigma$ ) şeklinde sıralanabilir. Yüksek frekanslarda malzemelerin magnetik özellikleri serbest uzaydan çok az farklılık gösterirler. Diğer yandan elektriksel özelliklerin, çalışılan frekans aralığına göre çok geniş bir değişim alanı vardır.

Polimerler ile ilgili dielektrik çalışmalar 1958 yılında başlamıştır. Polimerlerin elektrik endüstrisinde kullanımları, moleküler hareketlilik ve relaksasyon süreleri ile ilgili dielektrik özelliklerin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Geçmişte yapılan dielektrik çalışmalar, polimer davranışının önemli bir safhası olan amorf polimerin, camdan kauçuğa geçişini aydınlatmıştır. Özgül hacim ve özgül ısı gibi birçok basit fiziksel özellik, ergimiş polimer soğudukça sıcaklığa bağlı olarak sürekli bir değişim gösterir. Bu genelde, akmanın durduğu sıcaklığın altına kadar sürer. Daha da soğutulursa (çoğunlukla  $5^\circ\text{C}$  ya da daha

düşük bir sıcaklığa), fiziksel özelliklerde daha yüksek sıcaklık aralıklarındaki değerlere nazaran hızlı değişimler (yoğunlukta artış, özgül ısıda düşüş vb.) oluşur. Bu da plastikten, çoğunlukla kauçuğa benzer durumdan sert, kırılğan camı bir hale geçişi işaret eder. Bu cam dönüşümü polimerin iç sürtünmesinde büyük bir artışa neden olur. Bu, zincirlerdeki düzensizliğin (disorder) kilitlenmesi ve katı içinde sertleşmenin bir sonucudur. Polar polimerler için, dielektrik absorpsiyon “dinamik” cam-dönüşüm bölgelerini tanımlamada kullanılır ve frekansa bağlı bölge limitleri seçilir.  $\epsilon''$ ’de göze çarpan bir düşüş oluşur, oysa dönüşüm sıcaklığının altında çok daha yavaş bir düşüş olması beklenir. Bu tür değişimler ( $d\epsilon'' / dT$ ) açısından ya da kısa sıcaklık aralıklarındaki aktivasyon enerjisi değerleri açısından bile çok çarpıcıdır. Bu dielektrik özellikler ile ilgili genlikler ve aktivasyon enerjileri üzerine yapılan detaylı çalışmalar, katı polimerlerdeki moleküler davranışın kavranmasını sağlamıştır.

Polarizasyon, elektrik izolasyon malzemelerinin bir özelliğidir ve onların yapısından kaynaklanır. Bir elektrik alanın etkisinde bulunan her polimer, belirli derecede polarize olmaktadır. Bir malzemede, polarizasyon olayının derecesini,  $\epsilon$  (Dielektrik sabiti) göstermektedir. Polarizasyon derecesi, malzemede oluşan ve dış elektrik alanın etkisi ile yönlenen dipollerin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlıdır.

Polimerlerin dielektrik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle, dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıpların, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Polimerlerin dielektrik sabiti genelde, 1.9-2.0’den büyüktür ve frekanstan ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu konuda yapılan araştırmalara ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre dielektrik sabiti, frekans yükseldikçe azalmakta, yüksek frekanslarda sabit kalmaktadır.

Bu çalışmada; polimer malzeme olarak seçilen Silikon, PVC, Polietilen, EVA ve Polyester’in, dielektrik özelliklerinin frekans ve sıcaklıkla değişimleri incelenmiştir. Seçilen polimerler, mükemmel elektriksel özelliklere sahiptir ve yalıtkan mukavemetleri yüksektir. Bu malzemeler genelde, kablo kılıf malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, seçilen polimerler %100 saf halleri ve çeşitli katkıları eklenerek kullanılmıştır. Katkı malzemeleri eklenmesinin amacı, bu malzemelerin dielektrik özelliklerini ne ölçüde değiştirdiğini incelemektir.

Haberleşme kablolarında en fazla kullanılan izolasyon malzemesi polietilen (PE)'dir. Bunun nedeni, dielektrik sabiti ve dielektrik kayıplar gibi önemli elektriksel parametreleri geniş bir frekans bandında ( $10^1 - 10^{10}$  Hz) sabit ve çok küçüktür ( $\epsilon_r = 2.3$ ;  $\tan\delta \sim 0.0004$ ). Ayrıca üretim ve bakım açısından da ekonomiktir. Ancak polietilen(PE), yanan ve yangını kolay ileten bir malzemedir. Bu nedenle, bina içi kablolarda kolayca yanmayan ve alevi iletmeyen poli(vinil klorid) kullanılmaktadır. PVC, küçük dipol momentli bir malzemedir.

Silikonun, ısı etkisi ile bozulmaya karşı direnci yüksektir. Hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda kullanılabilir. EVA(Etilen-vinilasetat) 'nın da mükemmel bir ısı direnci ve esnek bir yapısı vardır. Polimer tipi termoplastiktir. Polyester, iyi dielektrik özelliklere ve yüzeysel dayanıma sahiptir. Kimyasal etkiler karşı da dayanıklıdır. Endüstriyel frekanslarda, dielektrik kayıpları düşüktür.

Bu malzemelerin dielektrik özelliklerinin ölçümleri, HP 4192A Empedans/Kazanç – Faz Analizörü Test Cihazı ile yapılmıştır. Alınan sonuçlara göre kayıp faktörleri ve dielektrik sabitlerinin, frekansa bağlı değişimleri çizdirilmiştir. Polyester'in dielektrik özellikleri hem frekansa, hem de sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir. Ayrıca silikon için bir de kısa devre tekniği uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Yapılan bu çalışmada polimerler, dielektrik özellikler ve dielektriklerin elektromagnetik altındaki davranışları, bu konu ile ilgili yapılan önemli bilimsel çalışmalar ve sonuçları hakkında bilgi verilmiş; bu çalışmada kullanılan malzemelerin dielektrik özellikleri araştırılmış ve sonuçlar diğer çalışmalarla karşılaştırılarak anlatılmıştır..



## 2. POLİMERLER

### 2.1. Giriş

Bir çok sentetik maddede, küçük yapı birimleri ard arda tekrarlanarak birbirine bağlanmış ve böylece dev zincirler, veya ağlar oluşmuştur. Böyle maddelere polimer denir [1]. Polimerler, **monomer** olarak adlandırılan küçük moleküllerin bağlanmasıyla oluşan çok büyük moleküllerdir. Nişasta, sellüloz, kauçuk ve proteinler doğal polimerlerdir. Polietilen, bir sentetik (yapay) polimerdir .

Günümüzde pek çok yapay polimer hazırlanmıştır ve bunlar, doğal polimerlerin sahip olmadığı bazı üstünlükleri de taşırlar. Naylon, polietilen, polistren, teflon, PVC de silikonlar, kimya endüstrisinin önemli ürünleridir [2].

Polimerler, monomerlerin birbirine katılması (katılma polimerleri) veya monomerlerin etkileşmesi sırasında aralarından küçük bir molekülün ayrılması (kondensasyon polimerleri) ile oluşurlar. Kondensasyon polimerleri, kondensasyon polimerizasyonu ile elde edilen polimerik maddelerdir. Katılma polimerleri, zincir reaksiyonları ile monomerlerin doğrudan polimer moleküllerine girmeleri ile oluşur [3].

Polimerler elde edilmelerinde, özelliklerin incelenmesinde, işlenmesinde önemli olan çeşitli kriterlere göre sınıflandırılarak belli gruplara ayrılırlar. Polimerler, çok geniş bir molekül kütlesi aralığına sahiptir. Bu geniş aralık içinde, polimerleşme derecesi genellikle  $10^2$  ile  $10^5$  arasındadır.

**Polimerleşme derecesi :** Polimer molekülünde yer alan zincir başına düşen tekrarlanan birimlerin sayısına denir.

Molekül büyüklüğüne göre polimerler üç gruba ayrılır. ortamdaki monomerlerin kovalent bağlar ile birbirine bağlanmış birkaç tekrarlanan birim içeren küçük molekül kütleli,  $10^2$ 'ye kadar tekrarlanan birim içeren moleküllere oligamerler,  $10^2$ 'den büyük polimerleşme derecesine sahip olan moleküllere makromoleküller denir. Polimer zincirlerinin çapraz bağlarla birbirine bağlanarak

büyük bir kütle haline gelmesi durumunda molekül kütlesi sonsuz olarak alınır ve bunlar polimerik jel olarak adlandırılır.

Oluşumuna göre polimerler üç gruba ayrılır. Doğal polimerler (Selüloz, nişasta ve doğal kaçuk gibi), yarısentetik veya yapay polimerler (Doğal kaçuğun vulkanizasyonu ile elde edilen vulkanize kaçuk gibi) ve sentetik polimerler (Polietilen, polivinil klorür gibi).

Kaynağına göre polimerler iki gruba ayrılır. Organik monomerlerden oluşan polimerlere organik polimerler, inorganik monomerlerden elde edilen polimerlere inorganik polimerler denir. Yaygın olarak kullanılan organik polimerler **polietilen**, polipropilen, **polivinil klorür** ve polivinil florür 'dür. Yapay inorganik polimerler arasında polisülfür ve polisiloksanlar ilk akla gelenlerdir. İnorganik polimerler, organik polimerlere göre ısıya daha dayanıklıdır ve onlardan daha serttirler .

Polimerik bir maddenin özellikleri sadece kimyasal yapısına değil, fiziksel yapısına da bağlıdır. Polimerler katı, yumuşak (elostemer) ve eriyik halinde bulunabilirler. Bunun nedeni, polimerlerin uzun zincirler halinde farklı büyüklüklerde çok büyük molar kütleli moleküllere sahip olmalarıdır. Kristal oranı çok yüksek olan polimerlere kristalin, amorf oranı çok yüksek olan polimerlere de amorf polimerler denir [4].

Polimerlerin çoğu, bir kristal düzenindeki katı ile, vizkozitesi çok yüksek sıvı halinin amorf karışımlarından oluşur. Kristal yapıda zincirler düzlemsel zigzag bir düzende (polietilen) bulunabilecekleri gibi, bir heliks düzeni de (polipropilen) gösterebilirler.

Polimerlerin kristallenme eğilimleri pratik uygulamalar için büyük önem taşır. Çünkü kristallenme derecesi polimerin termal, mekanik ve öteki özelliklerini büyük ölçüde etkiler. **Polietilen** zincirinde yinelenen birimler küçük ve özdeş olduğundan, bu polimer kolayca kristallenir. polistren, poli(metil metakrilat), **poli(vinil klorür)** gibi polimerlerde kristallenme eğilimi çok düşüktür.

Doğrusal bir polimer, yeterince yüksek sıcaklıklarda amorf, kaçuksu bir eriyiktir. Yeterince düşük sıcaklıklarda ise aynı polimer sert bir katıdır. Bir polimer soğutulduğu zaman birbirinden ayrı iki mekanizma ile katılaşabilir.

Bunlardan biri kristallenme, öbürü ise camsılaştırma. Bazı polimerlerde kristallenme önemli bir olay olduğu halde, bazılarında ise camsılaştırma öne geçer. Bir polimerin ne tür pratik uygulamaya elverişli olduğu, başlıca  $T_e$  ( kristalin erime noktası) ve  $T_g$  ( camısı geçiş sıcaklığı) ile belirlenir [3].

Fiziksel olarak düz ve dallanmış zincir yapısına sahip olan polimerler, ısıtıldıklarında önce yumuşarlar sonra kıvamlı akışkan hale gelirler. Bu tip ısısal davranış gösteren polimerlere ısı ile yumuşayan anlamına gelen termoplastikler denir. Termoplastik davranış gösteren bir polimerin yumuşamaya başladığı sıcaklığa camısı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ), kıvamlı olarak akmaya başladığı sıcaklığa ise erime sıcaklığı ( $T_e$ ) denir. Termoplastik polimerlerin en önemli spesifik özelliği bir kere kalıplandıktan sonra tekrar eritilerek defalarca kalıplanabilmesidir [4].

## **2.2. Bu Çalışmada Kullanılan Polimerlerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi**

Polimerlerin elektrik endüstrisinde kullanımları, moleküler hareketlilik ve relaksasyon süreleri ile ilgili dielektrik özelliklerin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Polietilenin değişik formları gibi (politetrafloretillen, polistiren) polar olmayan polimerler, en geniş frekans aralığında düşük kayıp değerlerinden dolayı önemlidirler. Kayda değer miktarda katkıları, polimerizasyon esnasında başlatıcı (initiator) olarak katılabilir, fakat bunlar minimumda tutulduklarında kayıp faktörü  $1 \times 10^{-4}$  seviyesine, milimetre bölgesine düşürülebilir. Bu değer, bu tür malzemeler için bulunan değerle çok küçük farklar ( $\epsilon_0 - n^2_D$ ) gösterir. Fakat bireysel değerler, bileşen grupların değişen elektronik polarizebilitelerini yansıtır: polietilen için  $\epsilon_0 \sim 2.30$  ve polistiren için  $\epsilon_0 \sim 2.602$ 'dir. Permittivite ve daha önemlisi kayıp faktörleri polar olmayan sistemlerde istisnai teknolojik ilgiye sahiptir.

Geçmişte yapılan dielektrik çalışmalar, polimer davranışının önemli bir safhası olan amorf polimerin, camdan kauçuğa geçişini aydınlatmıştır. Özgül hacim ve özgül ısı gibi birçok basit fiziksel özellik, ergimiş polimer soğudukça sıcaklığa bağlı olarak sürekli bir değişim gösterir. Bu genelde, akmanın durduğu

sıcaklığın altına kadar sürer. Daha da soğutulursa (çoğunlukla 5°C ya da daha düşük bir sıcaklığa), fiziksel özelliklerde daha yüksek sıcaklık aralıklarındaki değerlere nazaran hızlı değişimler (yoğunlukta artış, özgül ısıda düşüş vb.) oluşur. Bu da plastikten, çoğunlukla kauçuğa benzer durumdan sert, kırılğan camı bir hale geçişi işaret eder. Bu cam dönüşümü polimerin iç sürtünmesinde büyük bir artışa neden olur. Bu, zincirlerdeki düzensizliğin (disorder) kilitlenmesi ve katı içinde sertleşmenin bir sonucudur. Polar polimerler için, dielektrik absorpsiyon “dinamik” cam-dönüşüm bölgelerini tanımlamada kullanılır ve frekansa bağlı bölge limitleri seçilir.  $\epsilon''$ ’de göze çarpan bir düşüş oluşur, oysa dönüşüm sıcaklığının altında çok daha yavaş bir düşüş olması beklenir. Bu tür değişimler ( $d\epsilon'' / dT$ ) açısından ya da kısa sıcaklık aralıklarındaki aktivasyon enerjisi değerleri açısından bile çok çarpıcıdır. Bu dielektrik özellikler ile ilgili genlikler ve aktivasyon enerjileri üzerine yapılan detaylı çalışmalar, katı polimerlerdeki moleküler davranışın kavranmasını sağlamıştır.

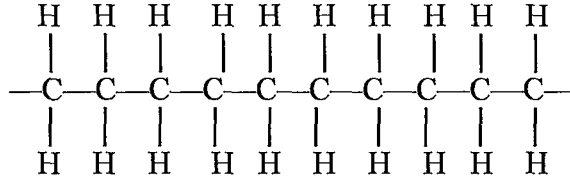
Polimerler üzerinde yapılan dielektrik araştırmalarına uygun davranış aralığı ve özellik sayısı önemlidir. Belli bir polimer malzeme,  $\epsilon'$  ve  $\epsilon''$  değerleri ile bir frekans, sıcaklık ve basınç aralığında dielektriksel bir şekilde karakterize edilecektir. Polimer zincirlerin paketlenmesi numunenin geçmişinde önemli bir değişim göstermesi, bir sınırlama getirir. Kristalleşme ve yönlendirme derecesi değişebilir ve mekanik gerilme, bir numunede düşük bir sıcaklıkta kilitlenebilir. Bu tür özellikler çoğunlukla dielektriksel olarak saptanabilir, fakat dengelenmiş numunelerin ölçülmesini garantiye almak genelde zor değildir [5].

### 2.2.1. Polietilen

Uzun zincirli doyurulmuş bir hidrokarbon olan polietilen esnektir ve mükemmel elektriksel özelliklere sahiptir. Dielektrik sabiti sadece 2.3 civarındadır, tüm frekanslarda güç faktörü % 0.03’tür, hem ac, hem de dc yalıtkan mukavemeti yüksektir ve yalıtkan direnci mükemmeldir [6].

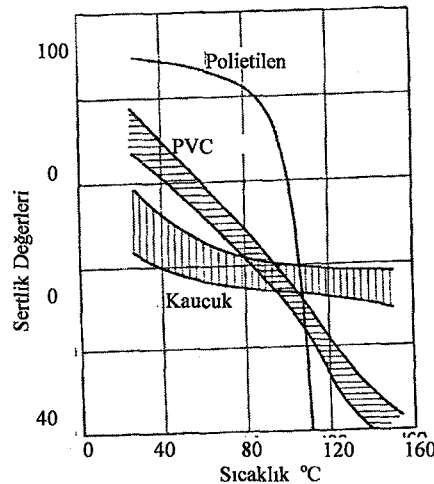
Polimerizasyon türü; katılma polimerizasyondur. Yüksek basınç polimeri olup, kristal yapılı ve balmumu görünüşündedir. Polimer molekülleri dallanmış olup,  $T_e=110-125$  °C,  $T_g= -120$  °C’dir.  $T_e=137$  °C,  $T_g= -115$  °C ’ye kadar

dayanıklıdır. Oda sıcaklığında hiçbir çözücüde çözünmez. Asit ve alkalilere dayanıklı olmakla beraber, ışık ve oksijen etkisi ile bu özelliklerini yitirmektedir [3].



Şekil 2.1. Polietilenin hidrokarbon yapısı [7].

Şekil 2.1’de verilen üniform hidrokarbon yapısı, bu plastiğin bazı özelliklerini göstermektedir [7]. Bu zincirin etrafındaki zayıf “Van Der Waals” kuvvetleri düşük bir kırılma sıcaklığına neden olur. Gerçekte  $-70^{\circ}\text{C}$  civarındadır ve düşük sıcaklıklarda parçalanmaz. Sertliği yüksektir ve suya karşı direnci mükemmeldir. Yüksek moleküler ağırlık ile böyle bir düzenli yapının bileşimi oldukça kristalin olmalıdır. Dole, polietilenin oda sıcaklığında % 40-60 kristalin olduğunu bildirmiştir. Kristalinlik derecesi yüksek sıcaklıklarda azalır ve  $105^{\circ}\text{C}$  civarında sıfır olur. Polietilen yanmaz. Uygulamalardaki sıcaklık tavanı  $90^{\circ}\text{C}$  civarındadır (Şekil 2.2). Bu noktadan sonra hızla yumuşar. Oda sıcaklığındaki bu kristalinlik, hidrokarbonlara zarar vermesi beklenen birçok solvent ve kimyasala karşı polietileni duyarsız (inert) hale getirir. Doymuş olması nedeni ile, kimyasal etkimelere karşı oldukça dirençlidir.



Şekil 2.2. Bazı polimerlerin sertliklerinin sıcaklığa göre değişimi [6].

Polietilenin gözlenen özelliklerinden bir kısmı gösterilen yapı ile tamamen tutarlı değildir. Dipol (çift kutup) moment olmadığı anda, elektriksel kayıp faktörü sıfır olmalıdır. Ticari numuneler, özellikle plastik şekil verildikten sonra düşük (fakat sıfır değil) bir kayba sahiptir. Polietilenin güneş ışığına maruz kalması önlenmelidir. Güneşe maruz kaldıktan 6 ay ile 1 yıl sonra korumasız polietilende güç faktörünü arttırmaya ve kırılma sıcaklığını  $-70^{\circ}\text{C}$ 'den, açık hava sıcaklığına yükseltmeye yetecek kadar dipol grupları oluşur. Polietilene bir miktar iyi dağıtılmış is (kurum, karbon karası) katılmasının, iyi bir ışık filtresi sağlayacağı ve uzun yıllar bu tür bir bozulmayı önleyeceği Bell Telephone Laboratories'in yaptığı çalışmalardan bilinmektedir. Buna rağmen hala birçok televizyon giriş kablosunun ışıktan yeterince korunmamış polietilenle izole edildiğini görmekteyiz.

Polietilen, radar kabloları gibi yüksek frekans uygulamalarında, haberleşme ve su altı kablolarının izolasyonunda geniş bir kullanıma sahiptir. Güç kablolarında kullanıldığında iki zayıf noktaya dikkat edilmelidir. Polietilen ozon geçirmez olmasına rağmen koronaya karşı hassastır. Bunun sebebi koronanın bir kısım polietileni ergime noktasının üzerine çıkarması ve sonuç olarak yalıtıcılığın bozulmasıdır. Ayrıca bir polietilen izolasyonlu kablo, kısa devre akımlarından kaynaklanan aşırı ısınmalara çok kısa süre dayanabilir.

Son zamanlarda, polietilen sülfür dioksit ve klor ile kimyasal reaksiyona sokularak modifiye edilmiştir. Böylece polietilen vulkanize (kükürtle sertleştirme işlemi) edilebilir. Vulkanize edilmiş malzeme oldukça iyi fiziksel özelliklere sahiptir. Bu alanda yapılan diğer çalışmalar iyi elektriksel ve fiziksel özelliklere sahip vulkanize bir polietilen üretebilir [6].

### **2.2.1.1. Hypalon Klorosülfonlu Polietilen**

Eğer polietilen yapısının düzenliliği, zincirde rasgele yer değiştirdiği klor atomları tarafından kırılıyorsa kristalinlik azalmalı ve malzeme daha esnek bir hale gelmelidir. Yeterli miktar klor eklendiğinde, klor atomlarının dipol çekimi malzemeyi sert ve katı (bükülmez) yapacaktır. Yaklaşık %30 klorda sertlik minimuma gider, yumuşak ve elastik bir malzeme elde edilir. Oakes ve Richards



16 °C'deki relaksasyon zamanının, klor katılmamış polietilen için  $10^{-8}$  sn civarında ve yaklaşık %50 klor içeren bir numune için de 1sn civarında olduğunu bulmuştur.

Klorlu polietilenler; vinil ve viniliden kloridler gibi termoplastiklerdir. Bununla birlikte eğer her 90-100 atom için bir  $-SO_2Cl$  grubu zincire katılırsa, MgO, PbO veya bazı vulkanizasyon (kükürtle sertleştirme) hızlandırıcıları gibi metal oksitle çapraz bağlar oluşturarak malzeme termoplastik olmayan bir duruma getirilebilir. Bu klorasülfonlu polietilen "du Pont" tarafından Hypalon tescilli markası altında pazara yeni sunulmuştur.

Hypalon işlenerek, diğer sentetik plastiklerin sahip olduğu özelliklerde ve bir yalıtkan olarak ilgilenilmesini sağlayacak birtakım özelliklere sahip plastikler üretilir. Bu özelliklerden bir tanesi yüksek voltaj izolasyonunda kullanılmasını sağlayan neredeyse komple ozon direncidir.

Hypalonun yalıtkanlık özellikleri, tıpkı diğer elastomerler gibi, bileşiği oluşturan etmenlere çok fazla bağlıdır. Tipik bir bileşik (Hypalon 100 parça, Staybelite 2.5, PbO 40, Captax 3) ve 30 parça trikrezil fosfat içeren bir polivinil bileşimine ait veriler çizelge 2.1'de verilmiştir.

Hypalon'un dc direnci  $10^{13}$  ohm cm'den büyüktür, yani tüm alçak frekans uygulamaları için yeterince yüksektir. Malzemenin sert stoklar vermesi için karbon karasına ihtiyacı yoktur.

Çizelge 2.1. Hypalon klorosülfonlu polietilen ve polivinil kloridin dielektrik özellikleri [6].

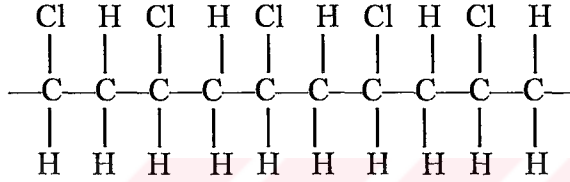
<b>Hypalon</b>	<b>100 Hz</b>	<b>1 k Hz</b>	<b>100k Hz</b>
Dielektrik sabiti $\epsilon'$	6,190	6,040	5,100
$\tan \delta$	0,014	0,020	0,098
<b>Polivinil klorid</b>	<b>100 Hz</b>	<b>1 k Hz</b>	<b>100k Hz</b>
Dielektrik sabiti $\epsilon'$	7,000	5,900	4,000
$\tan \delta$	0,082	0,120	0,130

Farklı oranlarda klor ve sülfür içeren diğer Hypalon klorosülfonlu polietilenler, bazı ilginç özellikler gösterir. Sadece %5 klor ve %1 sülfür içeren

deneysel diziler (kümeler) polietilenin elektriksel özelliklerine yaklaşmıştır. Kürlenerek, polietilenin ergidiği 105 °C'nin üzerinde kullanılabilirler [6].

### 2.2.2. Poli (vinil klorid)-PVC

Polivinil oldukça düşük bir esnekliğe sahiptir (Şekil 2.2). Hidrokarbon yapısı şekil 2.3'de verilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda yumuşatılarak doğrudan tel üzerine sıvanabilir. Bu fabrikasyon kolaylığı, polivinil klorid izolasyonu bina teli alanında üstün kılmaktadır.



Şekil 2.3. Poli(vinil klorid)'in hidrokarbon yapısı [8].

Polivinil kloridi oda sıcaklığında esnek hale getirmek için plastizelere ihtiyaç vardır. Bu maddelerin çoğu uçucu olduğundan, bu tür izolasyon özellikle uzun süreli ısınmalarda plastizeri kaybeder ve kırılgan bir hal alır. Ayrıca plastizeler komşu malzemeye nüfus ederek onların özelliklerini değiştirebilirler. Uçucu olmayan ve difüze olmayan polimerik ester geliştirilmiştir, fakat nihai ürüne kazandırdıkları fiziksel ve elektriksel özellikler düşüktür.

Ticari olarak üretilen plastize edilmiş polivinil klorid izolasyonlar, bazı organik solventlerin plastizeri çözme eğilimi olmasına rağmen, iyi bir alev ve yağ direncine sahiptir. 80°C'de bile oldukça serttir. Termoplastik olduğundan ani darbelere karşı hassastır. Parçalanma sıcaklığı bükme-kırılma noktalarından çok daha yüksek olduğundan bu tür izolasyonu soğuk havalarda dikkatli kullanmak gerekir.

Plastize edilmiş polivinil klorid izolasyon %6 ile %15 arasında değişen güç faktörlerine ve 4-8 arasında değişen dielektrik sabitlerine sahiptir. Yalıtkan mukavemeti mükemmeldir ve yalıtkan direnci tatminkardır. Nispeten yüksek güç faktörleri bu malzemelerin kullanımını düşük voltaj uygulamalarıyla



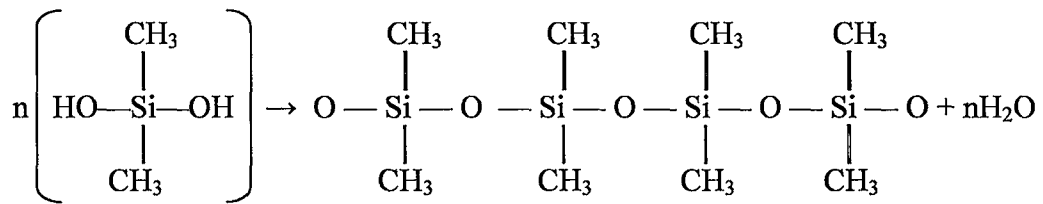
sınırlandırmıştır. Plastize edilmiş polivinil klorid; aleve, güneş ışığına, suya, yağa ve solventlere dayanması gereken tel ve kablo kılıflarında kullanılır.

Polivinil kloridin bazı yeni tipleri çok az yada hiç plastizer katılmadan üretilmiştir. Bu izolasyonlar ince duvarlarda orta derecede esnektir. Elektriksel özellikleri tatminkardır ve yüksek sıcaklıklara dayanımı plastize edilmiş tiplere nazaran daha yüksektir. Bu umut verici bir gelişmedir ve bu tür malzeme gelecekte daha çok kullanılacaktır [6].

### 2.2.3. Silikon

Oldukça yeni bir gelişme olan silikon kauçuk, yapı içinde silikon atomları bulunan bir malzemedir. Bu yüzden kısmen organik kısmen de inorganik olarak nitelendirilebilir. Organik kauçuklar gibi, fiziksel özellikleri oldukça zayıf olmasına rağmen elastik bir malzeme elde etmek için vulkanize edilebilir. Su alabilir (emebilir) ve elektriksel özellikleri sadece vasattır. Silikon kauçuk bileşikleri üzerinde çok çalışma yapılmış, sertliği artırılmıştır ve iyileştirme için çok imkan vardır. Silikon kauçuğun ısı etkisiyle bozulmaya karşı direnci vardır, aşırı derecede düşük bir kırılma noktasına sahiptir ve herhangi bir organik kauçuğun dayanabileceği sıcaklıkların üzerinde kullanılabilir. Pahalı olmasına rağmen hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda veya her ikisinde de kullanılmaktadır [6].

Polimerlerin önemli bir sınıfını oluşturan silikon polimerleri, silisyum içerir. Silisyum, silikatlarda olduğu gibi -Si-O-Si-O-Si-O- zincirleri verebilen bir elementtir. Silisyumun organik bileşikleri ise suyla hemen etkileşir.

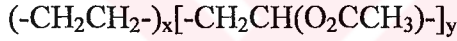


Şekil 2.4. Silikon polimerinin yapısı[2].

Yukarıdaki formülde bir silikon polimeri, uçucu olmayan vizkoz bir yağdır ve petrol ürünleri olan yağlardan daha dayanıklıdır. Çapraz bağlı silikon polimerleri de hazırlanabilir, bunlar geniş bir sıcaklık aralığında veya sıkıştırma ile esnekliklerini kaybetmezler ve silikon lastiği adı altında kullanılırlar [2].

#### 2.2.4. Etilen Vinil Asetat (EVA)

Polimer tipi, termoplastiktir. Mükemmel ısı direncine sahiptir ve esnek bir yapısı vardır. Gerilme direnci düşüktür. Bazı tipik özellikleri çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu polimer, aynı tip monomerlerden elde edilmemiş birden fazla monomer içermektedir. Bu nedenle adına ko-polimer de denilmektedir. Burada monomerler, etilen ve vinil asetat'dır. Polietilen, birçok etilen'in (monomer) bir araya gelmesiyle oluşurken, bu polimerde farklı monomerler kullanılmaktadır. EVA'nın formülü aşağıda verilmektedir.



Çizelge 2.2. EVA'nın bazı tipik Özellikleri [9].

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	0,95	Dağılım faktörü (1 kHz)	0,03
Yüzey sertliği	SA65	Dielektrik sabiti (1 kHz)	3,1
Gerilme direnci (Mpa)	10	Erime sıcaklığı (°C)	130-190
Maksimum işlem sıcaklığı (°C)	50	Kalıplamada çekme payı (%)	2
Su absorpsiyonu (%)	0,13	Kalıplanma sıcaklığı (°C)	20-40
Dielektrik direnci (MV/m)	25		

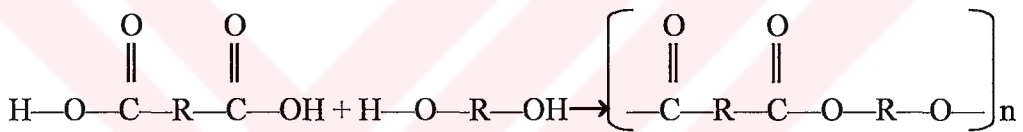
Uygulama alanları ise şunlardır: Kablo kılıfı, çeşitli koruma kapları, aşı kapları, körüklerde, ray koruyucuları yapımında [9].

#### 2.2.5. Polyester

Polyester, iyi dielektrik özelliklerine ve yüksek yüzeysel dayanımına sahip olup kimyasal etkilere karşı dayanıklı bir malzemedir. Polyester, doymuş ve

doymamış tür olarak iki sınıfa ayrılır. Doymamış polyester cam tabakalarında veya cam liflerinde takviye malzemesi olarak kullanılır. Bunun dışında, elektriksel ve mekanik dayanımı yeterli küçük elektriksel elemanlar yapmak için yaygın olarak kullanılır. Doymuş polyesterler, fiber ve film yapımında kullanılır. Polyester fiber, elektriksel amaçlı kağıt, halı ve giysi yapımında kullanılır. Film polyester ise motor, kondansatör ve transformatörlerdeki kablo ve yalıtılmış tellerde kullanılır. Polyester film, çoğunlukla kağıt yapımında kullanılır. Endüstriyel frekanslarda, polyesterin dielektrik kaybı çok düşüktür. Polyesterin dielektrik kayıpları sıcaklık arttıkça azalır. Yüksek yumuşama sıcaklığı nedeni ile, kağıt yalıtımın çalışma sınırının üstündeki sıcaklıklarda kullanılmasını mümkün kılar. Polyesterin hava koşullarına karşı direnci yüksektir [10].

Polyesterin yapısı aşağıda verilmektedir.



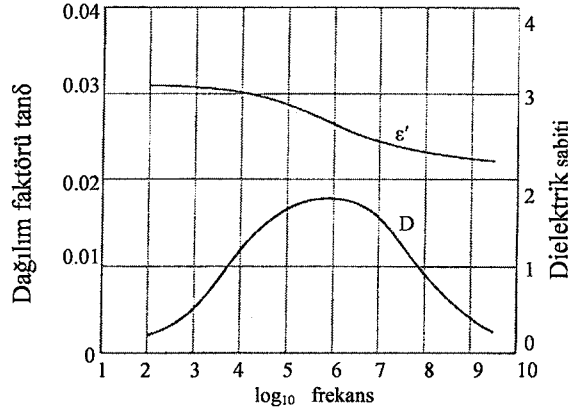
Şekil 2.5. Polyesterin yapısı [6].

Polyesterin fiziksel özellikleri aşağıdaki çizelgede verilmektedir.

Çizelge 2.3. Polyesterin özellikleri [6].

Gerilme direnci (psi)	25.000
Kırılma uzaması (%)	130
Yumuşama sıcaklığı (°C)	240-245
Dielektrik şiddeti (V/mil)	5000
Hacim direnci (ohm-cm)	$4 \times 10^{15}$

Polyesterin dielektrik özellikleri aşağıdaki grafikte (Şekil 2.6) verilmiştir. Dağılım faktörü, oda sıcaklığında megacycle bölgesinde oldukça yüksektir; fakat yüksek ve düşük sıcaklıklarda azalmaktadır [6].



Şekil 2.6. Polyesterin Dielektrik özellikleri [6].

### 2.3. Önceki Çalışmaların Analizi

Polimerler ile ilgili dielektrik çalışmalar 1958 yılında başlamıştır. Polimerlerin elektrik endüstrisinde kullanımları, moleküler hareketlilik ve relaksasyon süreleri ile ilgili dielektrik özelliklerin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

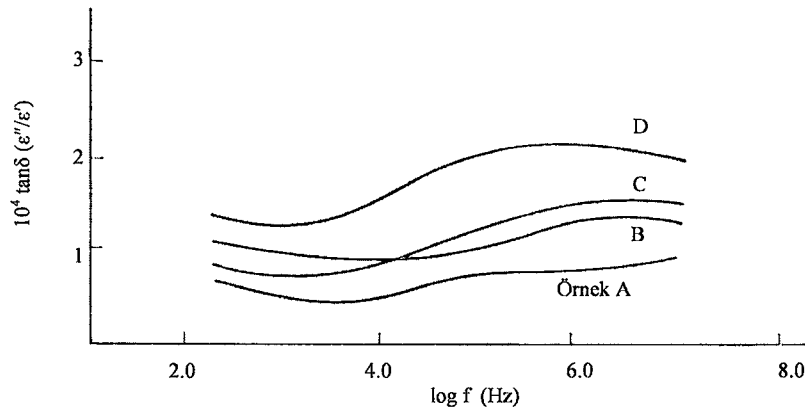
Dielektrik sabiti ve daha önemlisi kayıp faktörleri polar olmayan sistemlerde istisnai teknolojik ilgiye sahiptir. Şekil 2.7’de çeşitli polietilen numuneleri için REDDISH verileri görülmektedir. Dielektrik sabiti, yoğunluğun liner fonksiyonudur. Polietilen için şu bağıntı verilmiştir:

$$\epsilon_0 = (2.276 + 2.01(d - 0.9200)) \quad (4.1)$$

Bu Clausius-Mossotti bağıntısına denktir:

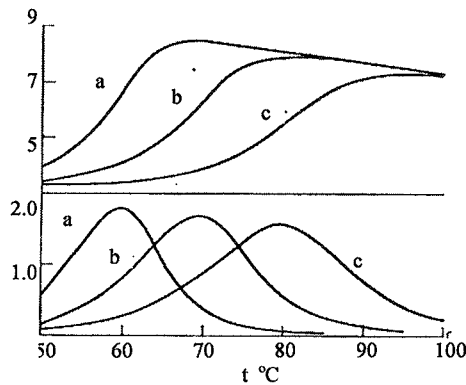
$$\frac{\epsilon_0 - 1}{\epsilon_0 + 2} = K.d. \quad (4.2)$$

Standart bağ polarizebilitelerinden  $K = 0.327$  değeri beklenebilir. Reddish bu değeri 0.3257 olarak vermiştir. Saf politetrafloretillen için,  $1 \times 10^{-5}$  kadar düşüşle, alçak frekans  $\epsilon''$  değerlerine ulaşılabilir. Sıcaklık  $18^\circ\text{-}24^\circ\text{C}$  aralığına arttırıldığında katıdaki birinci derece geçişte, bu polimerin  $\epsilon_0$  değerinde binde 6 parçalık bir düşüş bulunmuştur.



Şekil 2.7. Polietilen'in değişik örnekleri için kayıptanjantı-frekans eğrileri [11].

Fuoss'un sonuçları polivinilklorid ve polivinilasetat gibi sistemlerde dipol polarizasyonunun çoğunluğunun tek bir dağılım bölgesinde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu bölge katı halde ve genelde  $10^4$  Hz'in altındadır. Bazı tipik sıcaklık ve frekans bağımlılıkları Şekil 2.8'de verilmiştir. Relaksasyon sürelerinin kayda değer bir bölümününün oluşması uzun zaman alır. Tipik olarak  $\epsilon'' - \log$  (frekans) eğrileri simetriktir (yardımcı iletkenlik ya da kayıp prosesleri engellemezse) ve Cole-Cole veya Fuoss-Kirkwood fonksiyonları ile temsil edilir.  $\epsilon''$  (maksimum) frekansından türetilen efektif relaksasyon süresi ( $\tau_{\text{eff}}$ ); ortalama polimerizasyon derecesine ( $p$ ), sıcaklığa, ve varsa plastisizerin (ticari polimerlerin içinde bulunan ve esnekliğini arttıran bir uçucu olmayan solvent türü bileşiktir) miktarı ve yapısına bağlıdır. Bazı daha basit sistemlerde  $\tau_{\text{eff}}$ ,  $p$ 'ye lineer bir bağımlılık gösterir fakat böyle bir bağımlılık genelde sadece düşük moleküler ağırlıklarda ( $p < 10^2$ ) bulunur.



Şekil 2.8. Poli(vinil asetat)'ın permitivite ve dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa göre değişimi[11].

Frekans ve sıcaklık açısından, Reddish bir çok önemli polimerler için, atmosfer basıncı altında gerçekten tamamlanmış yollar elde etmiştir. Bunlar üç boyutlu yüzeyler şeklinde sunulmuştur: dielektrik sabiti için  $\epsilon'$ ,  $\log f(\text{Hz})$  ve  $t^\circ\text{C}$  ekseninin üzerinde dikey olarak gösterilmiştir ve absorpsiyonlar için  $\epsilon''$  dikey ordinat olarak gösterilmiştir. Bu yüzeylerin daha basit bir versiyonu, bu yüzeylerin;  $\epsilon'$  veya  $\epsilon''$  değerlerindeki uygun basamaklarda çizgileri olan kontur haritalarına projekte edilmeleriyle elde edilir. 20 mg'lık bir malzeme numunesi kullanarak  $120^\circ - 420^\circ\text{K}$  sıcaklık ve  $10^{-4} - 10^{+4.5}$  Hz frekans aralığındaki bu çeşit tüm yüzeylerin uygun bir şekilde haritalarının çıkarılabilmesi, dielektrik çalışmaların elde ettiği önemli bir başarıdır.

Oldukça fazla sayıda polar polimer, Fuoss tarafından bulunun bir genel paterni izlerler: çoğunlukla  $40 \text{ kcal mol}^{-1}$ 'i aşan bir aktivasyon enerjisine sahip bir yüksek sıcaklık absorpsiyonu(emilimi); daha yüksek frekanslarda ve polimer camısı durumdayken sadece düşük sıcaklıklarda açıkça görülebilen bir absorpsiyonla birlikte oluşur. Bu ikincisi malzemedeki kristalleşme derecesine oldukça bağlıdır ve bir plastisizer bulunması durumunda kaybolur. İlk proses genelde  $\alpha$  ile, bir kompozit olan ikincisi ise  $\beta$  (ya da  $\gamma$ ) ile temsil edilir. Aralarındaki fark şudur:  $\alpha$ -prosesi polimer-zincir kafesinin birlikte hareketinden doğar,  $\beta$ -prosesi ise karakteristik olarak yan-zincir relaksasyonlarının bir sonucudur. Bununla birlikte yan-zincirleri olmayan polimerler de  $\beta$ -tipi olarak adlandırılan absorpsiyon gösterirler fakat mekanizmaları yan gruplu olanlarınkinden farklı olmalıdır.

Polimerlerdeki gözlemlerin yukarıda bahsedilen özeti bu malzemelerin neredeyse tamamen amorf halleri için geçerlidir. Kristallik derecesinin birçok özellik için önemli olmasına rağmen, dielektrik çalışmalarda herhangi bir belirgin yol bulunamamıştır. Würlin, birisi kolayca kristalleşen diğer ise kolayca kristalleşmeyen iki homolog poliesteri karşılaştırmıştır. Gözlenen sonuçlar şunlardır: ilkinin ergiyiğinin soğumasında, gözlenen nokta dolaylarında permitivitede keskin bir düşüş ve sonrasında katı içinde sadece küçük bir dielektrik absorpsiyon kaydedilmiştir. Zayıf bir şekilde kristalleşen polimer ise yaklaşık  $70^\circ\text{C}$ 'lik bir sıcaklık aralığında bir  $\epsilon'$  düşüşü vermiştir ve bu bölgede

kristalin malzemeye nazaran daha yüksek  $\epsilon''$  değerleri göstermiştir. Ana zincirin geniş segmentlerini (10 ya da daha fazla birim) içerdiğinde  $\alpha$ -prosesi; amorf bölge içinde kristalin bölgeye nazaran daha kolay gerçekleşmektedir: fakat bu tür absorpsiyonlar yüksek dereceli kristalin polimerlerde (Nylon, vb.) hala oluşabilir. Bu grtş destekleyen çok kanıt vardır. Yabancı moleküllerin (plastisizer, su) katılması  $\alpha$ -prosesi için aktivasyon enerjisini neredeyse değişmez bir şeklide düşürür. Bu, zincir paketinin bozulduğu ve bir amorf hale doğru ötelendiği alanlardaki segmentel hareketin daha da kolaylaştığını göstermektedir. Amorf fazın dikkate değer bir miktarının etkisi bu tür bölgelerin boyutuna da bağlı olduğundan, durum genellikle karmaşıktır. Biyolojik polimerlerin davranışlarında özel problemler vardır; fakat aynı zamanda görülmemiş bir öneme sahiptir [11].

Polimerlerin dielektrik özelliklerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu alışmalar, farklı frekanslar ve sıcaklıklar altında, farklı dielektrik ölüm yöntemleri ile yapılmıştır. Bu alışmalar ve sonuçları şu şekildedir:

Gözenekli silikon tabakalarının dielektrik fonksiyonu, temelde silikon iskeletin nano yapısına bağlıdır. Bu alanda yapılan çalışmada, p-karışımlı malzemeden yapılmış gözenekli tabakaların dielektrik fonksiyonlarının spektroskopik ve elipsometrik ölümleriyle belirlenen temel etkileri incelenmiştir. Sonlu boyut etkileri ve nano yapının yüksek dahili yüzey alanı; sonsuz kristaller için tanımlanana benzer bir şekilde  $k$ -momentum korunumu relaksasyonuna ve dolayısıyla bantlar arası kritik noktalardan ortaya çıkan optik yapının genişlemesine yol açar. Yapının süzülmesi azaltıldığında küçük miktarda bir eşik enerjisi ötelenmesi görülür. Bununla birlikte bu öteleme, enerjisi sınırlandırma (confinement) tarafından mavi-ötelenmiş bir sahte-doğrudan boşluk (pseudo-direct gap)'un sonucunda görülen kırmızı foto-ışıldamayı (parlaklık) açıklamak için çok küçüktür [12].

İletken polimer birçok deneysel ve teorik çalışmalara konu olmuştur. Bunun temel nedeni bir takım katkılarla (doping) iletkenliğinin çok büyük değişimler göstermesi ve birçok uygulamaya yol açmasıdır.



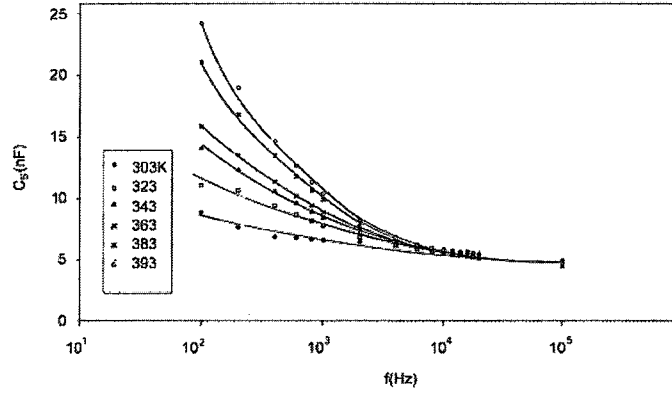
Karıştırma tekniği permitivite ölçümleri için doğru ve pratik bir yaklaşım olduğunu kanıtlamıştır. Bu nedenle karmaşık permitivite ölçümlerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Karıştırma tekniğinde bir takım varsayımlara gerek vardır. Bunlar; numunedeki alanların üniform olduğu ve numunenin dışındaki elektrik alan dağılımının esasen bozulmadığıdır. Bu varsayım genelde iletken polimerler için gerçekçi değildir. İletken polimerlerin mikrodalga özelliklerinin karakterize edilmesinde kavite karıştırma tekniğinin kullanılabilmesi için yeni yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Eğer extrapolasyon formülü doğru bir şekilde oluşturulduysa, malzemelerin karışımı ve katkılanması (doping) iyi bir yaklaşımdır. Ayrıca; eğer ölçüm sadece karıştırılmış malzemeler için mevcutsa, malzemelerin özelliklerinin önceden belirlenmesinde karışım formülünün birçok uygulaması vardır.

Bununla ilgili yapılan bir çalışmada; kavite karıştırma tekniğinin uygulanmasını sağlayacak şekilde, test edilen malzemenin iletkenliği düşürülerek bir karışım fikri önerilmiştir. Karışımın ölçüm sonuçlarından, ayrı bir malzemenin karmaşık permitivitesinin belirlenmesi için iki basit fakat daha pratik karışım formülü önerilmiş ve her ikisi de ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Buna ilaveten; önerilen karışım formüllerinin, katkının (doping) bir fonksiyonu olarak polimerlerin iletkenliğindeki değişimin tahmin edilmesinde kullanılabileceği kanıtlanmıştır [13].

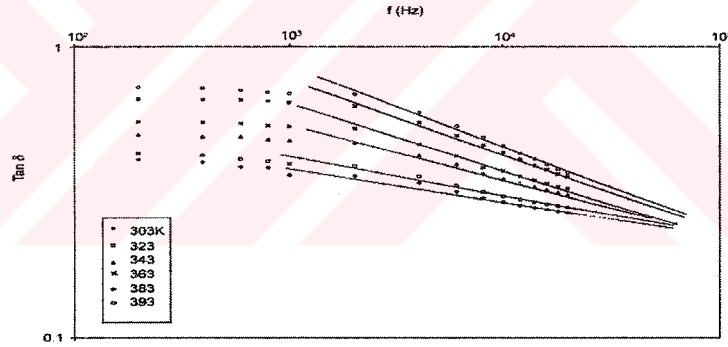
Ohmik alüminyum elektrotlar kullanılarak temiz cam altlıklar üzerine termal buharlaştırma tekniği ile hazırlanan stokiometrik  $In_2Te_3$  ince filmlerinin dielektrik özellikleri  $10^2 - 10^5$  Hz frekans ve 300-400K sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Karmaşık düzlem üzerinde çizilen impedans spektrasının frekans bağımlılığı, yarım daireler göstermektedir. Paralel yüzey resistans-kapasitans kombinasyonuna seri bağlı bir eşdeğer "bulk" resistans devresiyle de sistem gösterilebilir. Moleküler relaksasyon süresini  $\tau$  belirlemek için Cole-Cole tipleri kullanılmıştır.  $\tau$ 'nin sıcaklık bağımlılığı termal olarak uyarılmış proses ile açıklanmaktadır. AC iletkenliğinin  $\sigma_{AC}(\omega)$ ,  $\omega^n$  şeklinde değiştiği görülmüştür ( $0.65 \leq n \leq 0.83$ ) ve sıcaklık arttığında azalır. 300-400K sıcaklık aralığında baskın bir hopping prosesi gösterir. AC iletkenliğinin sıcaklık bağımlılığından,  $10^2 - 10^5$  Hz frekans ve 300-400K sıcaklık aralığında, aktivasyon enerjisi 0.05 – 0.008 eV



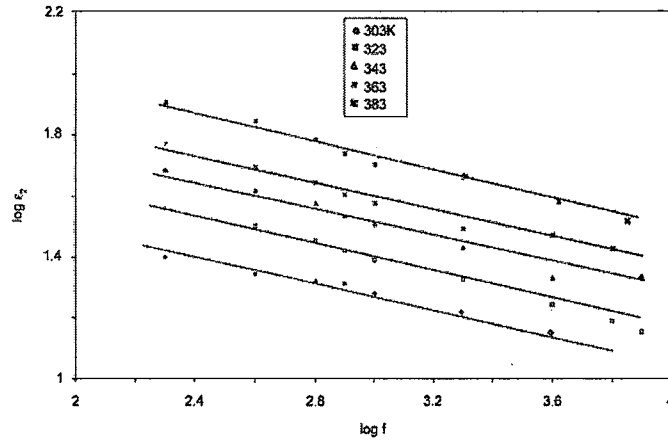
arasında değişen serbest taşıyıcı iletimi (free carrier conduction) gözlenmiştir. Kapasitans ve kayıp tanjantının frekans arttığında azaldığı ve sıcaklık arttığında da arttığı bulunmuştur. Bu özellikler, ohmik temasları farz eden mevcut eşdeğer devre modeli ile iyi bir nitel uyum (mutabakat) sağlamaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda grafiklerle verilmiştir. [14].



Şekil 2.9. Farklı sıcaklıklarda  $\text{In}_2\text{Te}_3$  için kapasitansın frekansla değişimi [14].



Şekil 2.10. Farklı sıcaklıklarda  $\text{In}_2\text{Te}_3$  için kayıp tanjantının frekansla değişimi [14].



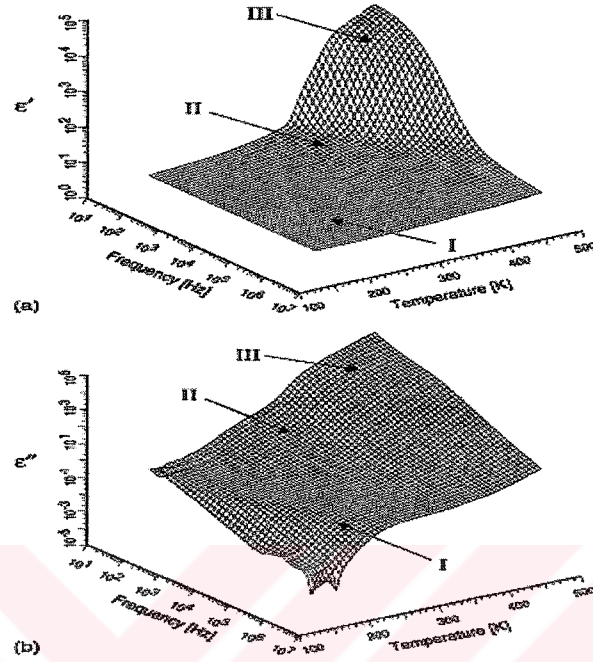
Şekil 2.11. Farklı sıcaklıklarda  $\text{In}_2\text{Te}_3$  için dielektrik kaybın ( $\epsilon_2$ ) frekansla değişimi [14].

Başka bir çalışmada da Fourier analizi kullanarak polimerlerin dielektrik özellikleri ölçülmüştür. 102-770 K sıcaklık ve  $10-10^5$  Hz frekans aralığında katı ve sıvı polimerlerin karmaşık dielektrik sabitlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için Fourier analizi metotlarını kullanan bir dielektrik spektrometre geliştirilmiştir. Numuneye bir elektrik alanı uygulandığında, numunenin tepkisi bir elektrik yer değiştirmesidir ve bu bir akım saptama devresi tarafından toplanır. Uygulanan elektrik alanı ve toplanan akım arasındaki genlik ve faz ilişkisi bir Fourier transformasyon devresi (bunun çıktısı kompleks dielektrik sabitidir) kullanılarak analiz edilmiştir [15].

Polimerlerin dielektrik davranışının incelendiği bu çalışmada, düşük yoğunluklu polietilen (LDPE-LowDensity PE) ve polimit'in çeşitli elektriki özellikleri üzerine sıvı helyum sıcaklığında  $\gamma$  ve reaktör radyasyonunun etkileri araştırılmıştır.  $\Gamma$  için  $10^6$  Gy ve reaktör için  $5 \times 10^6$  Gy'lik radyasyon dozlarının ardından 5 K'da düşük yoğunluklu polietilendeki şarj ve deşarj akımları ölçülmüştür. Şarj taşınmasındaki egemen mekanizmanın polarizasyonun bir formu olduğu görülmüştür ve reaktör ışınlanması daha büyük polarizasyon sinyali üretmiştir. Bununla birlikte daha sonradan ölçülen dielektrik kırılma direnci  $\gamma$  ve reaktör tarafından ışınlanmış numuneler arasında herhangi bir fark göstermemektedir. Polarizasyon proseslerinin ve bundan dolayı dielektrik kaybının incelenmesi "Frequency Domain Dielectric Spectroscopy ve Thermally Stimulated Discharge Currents" kullanılarak genişletilmiştir [16].

20 Hz – 1MHz aralığında ve 173 – 493 K sıcaklık aralığında, gözenekli silikonun (Porous Silicon-PS) dielektrik özellikleri genişband dielektrik spektrometre (Novocontrol, BDS-4284) kullanılarak ölçülmüş, spektroskopi sonuçları incelenmiş ve düşük, orta ve yüksek sıcaklıklarda olmak üzere üç relaksasyon işlemi gözlenmiştir. Düşük sıcaklık dağılımı sırasıyla, 20 – 30  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki örnekler için 0.28-0.4 ve 0.2-0.3 eV'luk iki aktivasyon (hareketlendirme) enerjisi ile cole-cole tipini izler. Orta sıcaklıklarda, zaman alanındaki dielektrik tepki fonksiyonu eşik yanındaki yük taşıyıcılarının süzülmesi ile birlikte eksponansiyel bir davranış gösterir. 400 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda, her iki örnek içinde  $0.047 \pm 0.01$  eV'luk ve yaklaşık olarak aynı aktivasyon enerjili dc iletkenliğin güçlü bir katkısı bulunmuştur. Aşağıda verilen

3 boyutlu (3D) grafikte, 20  $\mu\text{m}$  PS örneği için sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel( $\epsilon'$ ) ve sanal( $\epsilon''$ ) kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2.12. 20  $\mu\text{m}$  PS örneği için sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları [17].

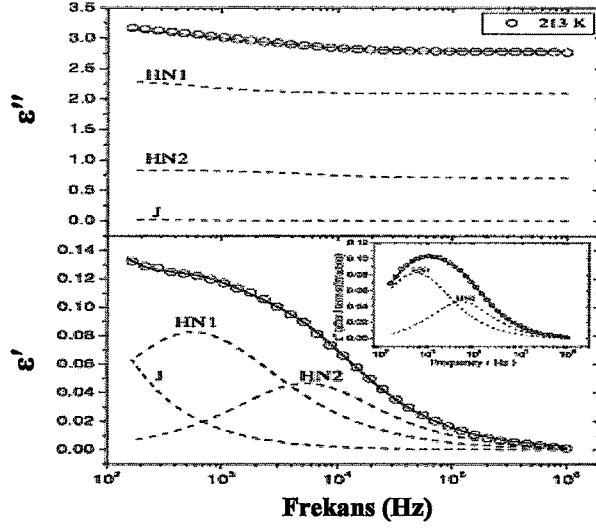
Şekildeki birbirinden farklı ve I, II ve III olarak işaretlenmiş üç proses şu şekilde tanımlanabilir:

**Düşük sıcaklık prosesi I:** Bu proses düşük sıcaklıklarda (170-270K) geçerlidir. Dielektrik fonksiyonun gerçek ve sanal kısımları bu prosesi göstermesine rağmen, sıcaklığın artmasıyla birlikte daha yüksek frekanslara ötelenen lokal maksimumun kolaylıkla saptanabildiği yüksek frekans ve düşük sıcaklıklarda, çoğunlukla  $\epsilon''$  ne bakılarak değerlendirilir.

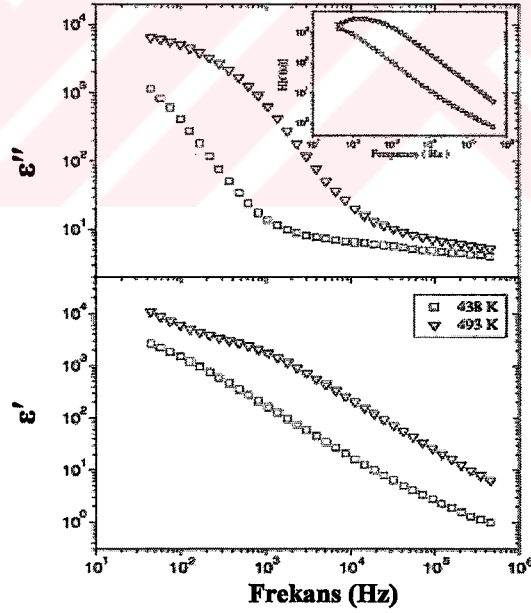
**Orta sıcaklık prosesi II:** Bu proses orta sıcaklık aralıkları (300-400K) ve düşük ile orta frekans aralıklarında ( $10^5$  Hz'e kadar) görülür.

**Yüksek sıcaklık prosesi III:** bu proses yüksek sıcaklıklarda (>400K) çok önemlidir. Dielektrik fonksiyonun hem gerçek hem de sanal kısımları için, frekansın düşmesiyle birlikte genliği çok hızlı bir şekilde yükselir. Benzer prosesler 320  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki numunelerde de görülmüştür.

Aşağıda bu çalışma ile ilgili sonuçlar grafikler ile verilmiştir [17].



Şekil 2.13. Düşük sıcaklıkta (213K), 20  $\mu\text{m}$  PS örneği için sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları [17].



Şekil 2.14. Yüksek sıcaklıkta, sıcaklık ve frekansa karşı ölçülen kompleks dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları [17].

### 3. DİELEKTRİK ÖZELLİKLER VE DİELEKTRİKLERİN ELEKTROMAGNETİK ALAN ALTINDAKİ DAVRANIŞLARI

Maddeler iletkenlikleri açısından iletken, yarıiletken ve dielektrikler olmak üzere üç grupta toplanabilir. İletken maddeler, bir elektrik alan altında elektrik akımını geçirirler. Bu maddelerin iletkenlikleri  $10^5$  S/m den büyüktür ( Altın, gümüş gibi). Dielektrik maddelerin iletkenlikleri  $10^8$  S/m den küçüktür. Yarıiletken maddelerin iletkenlikleri ise iletken ve dielektrikler arasındadır[18,19].

Çeşitli hallerde(katı, sıvı, gaz) bulunan maddeler, elektrik alan altında farklı davranışlar gösterirler. İletken maddelerin içinde serbestçe dolaşabilen sınırsız sayıda elektron vardır. Fiziksel olarak, metal atomlarından herbirinin bir veya iki elektronu belli bir atoma bağlı olmayıp, ortamda serbestçe dolaşabilir. Buna karşılık dielektriklerde tüm yükler belirli atom ve moleküllere bağlıdır, hareketleri molekül içinde sınırlıdır. Bu mikroskobik yer değiştirmeler dielektrik maddelerin karakteristik davranışlarını belirler [20].

Dielektrikler, atomlar ve moleküllerdeki baskın yükleri atomik ve moleküler kuvvetler tarafından tutulan hareket halindeki pozitif ve negatif yükler olan malzemelerdir ve serbest hareket edemezler. Bunun için ideal dielektrikler, yalıtkanlarda olduğu gibi serbest yük içermezler ve makroskobik olarak nötrdür [21]. Dielektrikler, elektriği iletmezler, ancak uygulanan elektrik alandan etkilenirler. Elektrik alan etkisinde, elektron ve atomlar yer değiştirir. Bunun sonucunda elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma oluşur. Oluşan elektriksel dipoller, dielektrik malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikimi sağlar. Bunun için kondansitör yapımında kullanılırlar. Yalıtkan olarak kullanılmalarının nedeni, elektrik devresinde yük transferini engellemeleridir [22].

Mikrodalga bölgesinde kullanılan malzemelerin kalitesinin ve özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Ortamları belirleyen elektromagnetik özellikler manyetik geçirgenlik ( $\mu$ ), elektriksel geçirgenlik ( $\epsilon$ ) ve iletkenlik ( $\sigma$ ) şeklinde sıralanabilir. Yüksek frekanslarda malzemelerin magnetik özellikleri serbest uzaydan çok az farklılık gösterirler. Diğer yandan elektriksel özelliklerin, çalışılan frekans aralığına göre çok geniş bir değişim alanı vardır.

Elektriksel olarak  $\sigma$ (iletkenlik),  $\omega$  (açısal frekans) ve  $\epsilon$ (dielektrik sabiti)'nin bağıl değerleri malzemelerin doğasını belirler. Bunlar frekans, sıcaklık, nem, basınç, konum ve malzemenin moleküler yapısı ile değişebilir. İletkenlerde  $\sigma$  baskın olduğu halde dielektrik malzemelerde  $\omega$  ve  $\epsilon$ 'nin baskınlığı öne çıkmaktadır. Yarı-iletkenlerde ise bu iki parametre aynı oranda baskındır [23].

### 3.1. Dielektrik Sabiti, Dipol ve Dipol Moment Kavramları

#### 3.1.1. Dielektrik Sabiti

Materyale, dışardan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahipse “dielektrik” olarak sınıflandırılır. Dielektrik sabiti (Permittivity-Elektriksel geçirgenlik) bir alanın etkisi altında dış elektrik bölgede ne kadar enerji saklandığını ve malzeme içerisinde ne kadar enerji kaybolduğunu gösterir. Materyalin dielektrik sabiti iki elektrik yük arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan bir miktardır [23].

Homojen sınırsız bir dielektrikte, aralarında  $r$  uzaklığı olan iki nokta yükü ( $e$  ve  $e'$ ) arasındaki kuvvet şu şekilde verilmektedir:

$$F = (e \cdot e') / (\epsilon \cdot r^2) \quad (3.1)$$

Burada  $\epsilon$  dielektrik sabitidir. Yani iki yük arasındaki ortamın karakteristik sabitidir. MKS sisteminde boş uzayın dielektrik sabiti  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m dir [5].

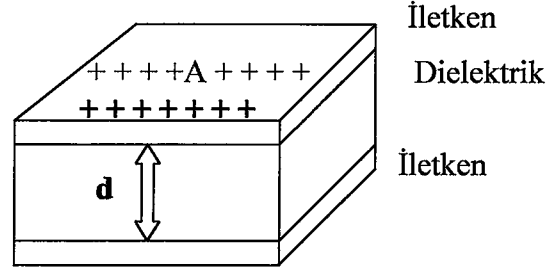
#### 3.1.2. Kompleks Dielektrik Sabiti (Permittivity)

A alanına sahip, birbirinden  $d$  uzaklıkta bulunan paralel plakalı bir kondansitör (Şekil 3.1), bir sinüzoidal voltaj kaynağına bağlandığında depo edilen yük

$$Q = C_0 \cdot V \quad (3.2)$$

olacaktır [5,6,24].

Bu fomülde  $C_0$  kapasitansı (plakaların arası boşluk),  $V$  ise plakalardaki voltajı göstermektedir.



Şekil 3.1. Paralel plakalı kondansatör [22].

Kapasitörün bağlı olduğu sinüzoidal voltaj kaynağı

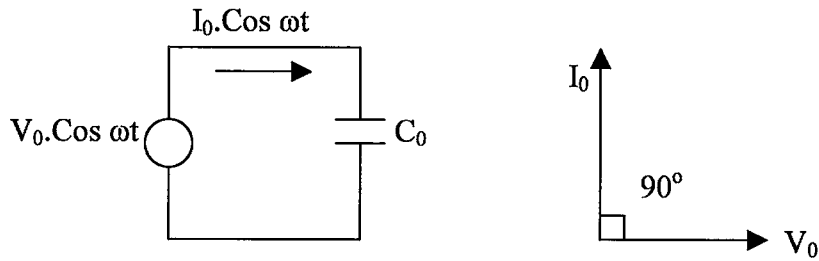
$$V = V_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (3.3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.4)$$

ile gösterilir. Burada  $\omega$  açısal frekansı,  $f$  frekansı göstermektedir. Bu durumda kapasitörün akımı,

$$I_c = dQ/dt = j\omega C_0 \cdot V \quad (3.5)$$

olacaktır [6,25,26]. İdeal bir kapasitördeki akım-voltaj ilişkisi şekil 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3.2. İdeal bir kapasitörün akım-voltaj ilişkisi.[6,25]

Alternatif bir gerilim altında, yüklenen kondansitörün üzerinden geçen akım ile voltaj arasındaki ilişki incelenirse, dielektriğin güç kaybı olmadığı durumda (ideal durumda), kondansitörden geçen  $I$  akımı ile  $V$  voltajı arasındaki açının  $90^\circ$  olduğu görülür (Şekil 3.2) [24].

Dielektrik sabiti, dielektrikle doldurulmuş bir kapasitörün  $C$  kapasitansının,  $C_0$ 'a (plakalar arası boş iken değeri) oranı olarak tanımlanır. Kapasitörün kapasitansı, dielektrik bir madde ile doldurulduğunda artacaktır.

$$C = C_0 \cdot (\epsilon / \epsilon_0) = C_0 \cdot \epsilon' \quad (3.6)$$

Burada  $\epsilon$  dielektrik maddenin,  $\epsilon_0$  boşluğun dielektrik sabitidir..  $\epsilon'$  ise malzemenin bağlı dielektrik sabitidir [6,24,26].

Kayıplı bir dielektrikte  $I_c$ 'ye ek olarak bir de kayıp akımı ( $I_1$ -Loss current) oluşacaktır. Kayıp akımı,

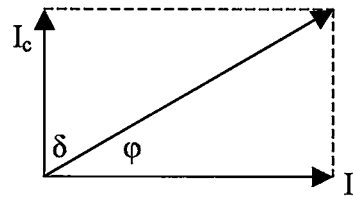
$$I_1 = G \cdot V \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanır. Burada  $G$  dielektrik malzemenin kondüktansıdır. ( $R=1/G$ ) Bu durumda kondansitördeki toplam akım,

$$I = I_c + I_1 = (j\omega C + G) \cdot V \quad (3.8)$$

olacaktır [6,25,26].

Kayıplardan dolayı, akım ile voltaj arasında  $\phi$  ile ifade edilen ve frekansa ile sıcaklığa bağlı olan bir faz farkı açısı oluşur (Şekil 3.3). Faz açısı, bir dielektrikteki kayıplar yönünden kondansatörü tanımlar. Faz açısı  $90^\circ$ 'ye yakınsa dielektriğin çok kaliteli olduğu söylenebilir [27].



Şekil 3.3. Kayıplı bir dielektrikteki akımların gösterimi [27].



Faz açısını  $90^0$ 'ye tamamlayan açiya kayıp açısı ya da kayıp tanjantı denir ve  $\delta$  ile gösterilir [6,25,27,28].

$$\delta = 90^0 - \varphi \quad (3.9)$$

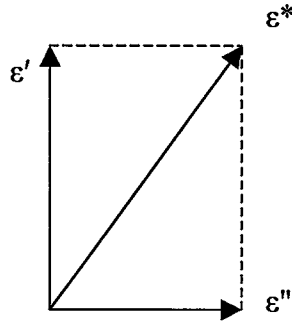
$$\tan \delta = I_l / I_c = 1 / (\omega RC) \quad (3.10)$$

Kompleks dielektrik sabiti,

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.11)$$

şeklinde gösterilir. Burada  $\varepsilon'$ (dielektrik sabiti) kompleks dielektrik sabitinin gerçel kısmı,  $\varepsilon''$ (kayıp faktörü) ise sanal kısmıdır [6,24,25].

Burada kompleks dielektrik sabitinin gerçel kısmı (dielektrik sabiti), gelen enerjinin dielektrikle etkileşimini(dielektrikte depolanan enerjiyi) karakterize eder. Bu değer, pekçok katı ve sıvı için birden büyüktür. Sanal kısmı (Kayıp faktörü) ise malzeme içinde ısıya dönüşerek harcanan enerjiyi gösterir. Bu değer her zaman sıfıra eşit veya sıfırdan büyük olabilir. Kompleks dielektrik sabitinin vektör diagramı şekil 3.4.' te verilmiştir.



Şekil 3.4. Kompleks dielektrik sabitinin vektör diagramı [6].

Kayıp tanjantı ifadesini bu diagramdan da elde edebiliriz. Vektör toplamı, gerçel eksenle  $\delta$  gibi bir açı yapar. Bu açının tanjantı, dielektrikte ısı olarak açığa çıkan enerji miktarının büyüklüğünü değerlendirmekte kullanılır.

Kayıp tanjantı kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmının, gerçel kısmına oranıdır. [23]

$$\tan\delta = \epsilon'' / \epsilon' \quad (3.12)$$

Açısal frekans ile kayıp faktörünün çarpımı dielektriğin iletkenliğini vermektedir [6,25].

$$\sigma = \omega \cdot \epsilon'' \quad (3.13)$$

Birbirinden d mesafesi ile ayrılmış, A alanına sahip paralel plakalı bir kondansatör ele alındığında, boş iken kapasitans,

$$C_0 = (A / d) \cdot \epsilon_0 \quad (3.14)$$

olacaktır.

Plakalardan geçen toplam akım,

$$I = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'') \cdot (C_0 / \epsilon_0) \cdot V \quad (3.15)$$

idi. Uygulanan elektrik alan şiddeti,

$$E = V / d \quad (3.16)$$

olacaktır. Alan şiddeti uygulandığında plakalardan geçen akım yoğunluğu J ile gösterilirse,

$$J = (j\omega\epsilon' + \omega\epsilon'') \cdot E \quad (3.17)$$

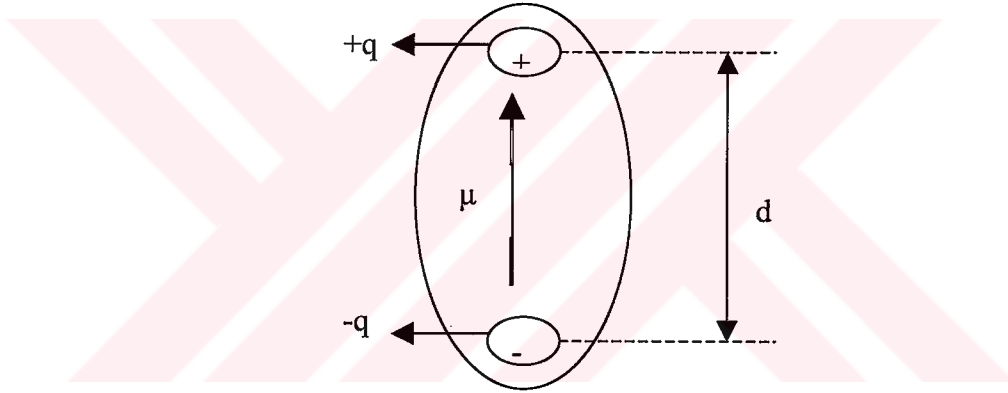
olacaktır [6,18]

### 3.1.3. Dipol ve Dipol Moment

Dipol, birbirinden  $d$  mesafesi ile ayrılmış iki zıt yüklü özdeş  $q$  yükünün oluşturduğu bir sistemdir [5,6,24]. Dipol moment vektörünün yönü, negatif yükten pozitif yüke doğrudur [11]. Dipol moment vektörü şekil 3.5'te gösterilmiştir. Bir elektrik dipol momentin büyüklüğü şu şekilde ifade edilmiştir:

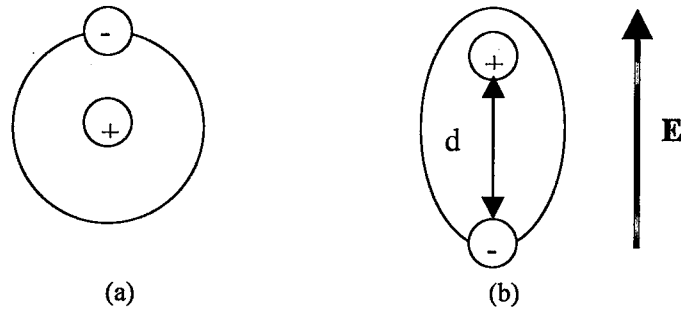
$$\mu = q \cdot d \quad (3.18)$$

Burada  $q$  elektrik yükünü,  $d$ 'de iki yük arasındaki uzaklığı göstermektedir [6,11,24].



Şekil 3.5. Elektrik dipol momentin gösterimi [24].

İdeal dielektrikler, yalıtkanlarda olduğu gibi serbest yük içermezler ve atom molekülleri şekil 3.6.a' da gösterildiği gibi makroskobik olara nötrdür. Bununla birlikte bir dış alan uygulandığında negatif ve pozitif yükler iletkenlerde olduğu gibi malzemenin yüzeyine doğru hareket etmezler. Yüklerin merkezi birbirine bağlı pozisyonlar içinde az bir kayma göstermektedir. Bu kayma elektrik dipol momentini oluşturmaktadır. Bir malzemeye elektrik alan uygulandığında, malzemenin oluşan dipolleri bu alan ile etkileşmektedir. Dielektrik malzemelerde ( Katı, sıvı veya gaz ) bu etkileşim malzemeye elektrik enerjisi depolama özelliği sağlar [21]



Şekil 3.6. (a) Elektrik alan olmadığı durumdaki bir atom  
(b) Elektrik alan altındaki bir atom [21].

Moleküldeki negatif ve pozitif yüklerin toplam miktarının eşit olmasına rağmen bir polar molekül, elektrik dipol momentine sahiptir. Dipol momentlerin genliği, molekülün simetrisine ve büyüklüğüne bağlıdır. Moleküller simetriğe sahip değilse, polar moleküldür. Polar olmayan moleküllerde dipoller bulunmaz [29]. Maddelerin moleküllerinin dipol momentleri, dielektrik sabitlerini etkiler ve dielektrik sabiti moleküllerin dipol momentini ölçmekte kullanılır [11].

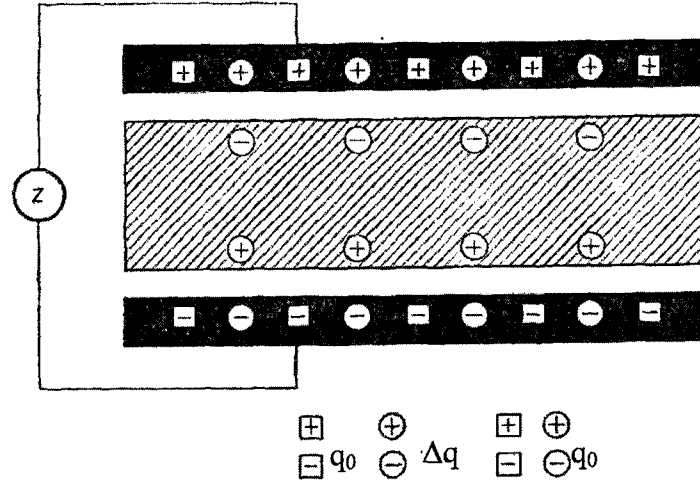
### 3.2. Elektriksel Kutuplanma ( Polarizasyon )

Dielektriklerin en önemli özelliği, bir dış elektrik alanın etkisi altında kalarak kutuplanabilmeleridir. Yani dielektriklere bir elektrik alan uygulandığında, atomik yapılarında bulunan yüklü parçacıkların hareketi alanın etkisiyle değişikliğe uğrar. Bu değişiklikten dolayı dielektrikte “ Elektriksel Kutuplanma (Polarizasyon) ” meydana gelir (Faraday, 1837). [6,27,30]

Dielektrik bir madde elektrik bir alan içine konulduğunda bu madde, nötr atomlar veya apolar moleküllerden oluşuyorsa, elektrik alanın etkisiyle her bir atom veya molekül alan yönünde küçük bir dipol momentini kazanır. Madde polar moleküllerden oluşuyorsa, her bir kalıcı dipol momentini üzerine etkileyen tork onu alan yönünde dönmeye zorlayacaktır. Her iki durumda da elektrik alan yönünde çok sayıda küçük dipoller oluşur. Yani dielektrik içinde polarizasyon oluşur [20].

Dielektrikte bulunan atomların polarize olmasıyla yüklü yüzeyler bir elektrik alan yoğunluğuna sahip olmaktadır. Elektrik alan yoğunluğu, atomlardaki yük dağılımını eşit olmayacak şekilde pozitif çekirdeğe bir kuvvet

uygular. Negatif yüklü elektronlara da bu kuvvete eşit fakat zıt yönde bir kuvvet uygular [23].



Şekil 3.7. Yüklü kondansitörün plakaları arasındaki dielektrik polarizasyonu [24].

Elektriksel kutuplanma şu şekilde de açıklanabilir: Bir bataryaya plakaları arasında dielektrik bulunan bir hava kondansitörü bağlandığında, her iki plakada potansiyel farkları eşit oluncaya kadar dolacaktır. Dielektrik, batarya voltajına ters yönde potansiyel farkını artırıp, nötralize ederek kondansitörün yüklenme kapasitesini arttıracaktır. Kondansitöre uygulanan akımın artırılması, yüklenme kapasitesini  $\epsilon' \cdot C_0$  kadar artırır. Bu, plakalar arasında bulunan ve alan etkisi altında olan dielektrikteki dipollerin artmasına da neden olur. Dipoller pozitif ve negatif uçlar arasında uzun zincirler oluşturur. Pozitif yük, negatif plaka üzerinde bir miktar yükü nötralize eder. Aynı şekilde negatif yükte pozitif plaka üzerindeki bir miktar yükü sönmümler (Şekil 3.7) [19].

Plakalara elektrik alan uygulanmasıyla, atomik yapıda bulunan serbest yükler alanın etkisiyle yer değiştirerek elektriksel dipoller oluştururlar. Bunlar alan doğrultusunda yönlenecek plakalar üzerinde serbest yüklerin toplanmasına neden olurlar. Bu yüklere, yüzey yükleri denilmektedir. Bu yük dağılımı, maddede oluşan yüklerin bağlı yer değişimine bağlıdır. Toplam alan, uygulanan alan ( $\vec{E}$ ) ve polarizasyon yüklerinin oluşturduğu alanın ( $\vec{E}'$ ) vektörel toplamıdır [23].

Bir kondansitörün plakaları arası boş iken yükü  $q_0$  ise, dielektrik madde ile doldurulduğu zamanki yükü  $q$  olacaktır. Bu artış  $\Delta q = q - q_0$  kadar olacaktır. Bu ifade,

$$\Delta q = \chi' \cdot q_0 \quad (3.19)$$

şeklinde de yazılabilir. Buradaki  $\chi'$  **elektriksel duygunculuktur (süseptibilite)** ve

$$\chi' = \Delta C / C_0 = (C - C_0) / C_0 \quad (3.20)$$

ile ifade edilir.  $\Delta C = \Delta q / V$  ifadesi denklem 3.20'de yerini konursa, denklem 3.19 elde edilmiş olacaktır. Plakalardaki toplam yük  $q = q_0 + \Delta q$  olacaktır. Buradan

$$q = q_0 + \chi' \cdot q_0 \quad (3.21)$$

yazılabilir. Toplam yük yoğunluğu ise,

$$\sigma = \sigma_0 + \chi' \cdot \sigma_0 \quad (3.22)$$

olacaktır. Burada  $\sigma_0$  kondansatörün plakalarındaki lokalize olmuş yüklerin yoğunluğu,  $\chi' \cdot \sigma_0$  ise dielektriğin yüzeyindeki indüklenmiş yük yoğunluğudur.

$\sigma = (\chi' + 1) \cdot \sigma_0$  ifadesi dielektrik yer değiştirme vektörü  $\vec{D}$  (displacement vector) olarak tanımlanır.  $\vec{D}$  elektrik akı yoğunluğu olarak da bilinmektedir. Denklem (3.22) aşağıdaki şekilde de yazılabilir:

$$\sigma = (\chi' + 1) \cdot \sigma_0 = \vec{D} \cdot \vec{n} \quad (3.23)$$

Burada  $\vec{n}$  kondansitör yüzeyine dik birim vektördür ve dielektrikten dışarı doğru yönelmiştir [24]. Aynı zamanda ,

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (3.24)$$

şeklinde de ifade edilebilir [6,31,32]. Bu durumda

$$\sigma_0 = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \cdot \vec{n} \quad (3.25)$$

yazılabilir. Polarize olmuş dielektriğin yüzeyindeki  $\chi'$   $\sigma_0$  yük yoğunluğu dielektrik polarizasyon vektörü  $\vec{P}$ ' yi verir. Böylece yüzey yük yoğunluğu,

$$\chi' \cdot \sigma_0 = \vec{P} \cdot \vec{n} \quad (3.26)$$

olacaktır. Denklem (3.23), (3.25) ve (3.26)', denklem (3.22)' de yerine konursa,

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca denklem (3.25), denklem (3.26)'da yerine konursa,

$$\vec{P} = \chi' \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (3.28)$$

polarizasyon vektörü elde edilmiş olur. Bu ifade de denklem (3.27)'de yerine konursa,

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} + \chi' \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = (1 + \chi') \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (3.29)$$

olacaktır.  $\chi' = \Delta C / C_0 = (C - C_0) / C_0$  olduğu denklem (3.20)'de verilmişti.  $\epsilon' = C/C_0$  olduğundan  $\epsilon' = \chi' + 1$  yazılabilir. Bu durumda denklem (3.29),

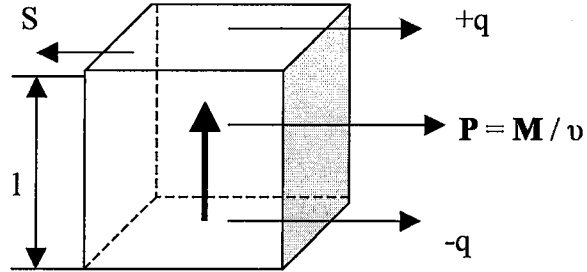
$$\vec{D} = \epsilon' \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad (3.30)$$

şeklinde de yazılabilmektedir [6,11,25].

Polarizasyon vektörü, dielektriğin birim hacim içindeki elektrik dipollerinin toplam momentini olarak da tanımlanabilir. Bu ifade,

$$\vec{P} = \vec{M} / v \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir [33]. Burada  $\vec{M}$ , toplam moment,  $v$  ise hacimdir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8.  $l$  uzaklığında,  $S$  alanına sahip paralel plakalı kondansitör [24].

Polarizasyon şu şekilde de tanımlanabilir :

$$\mathbf{P} = N \cdot \langle m \rangle_E \cdot \hat{e} \quad (3.31)$$

Bu ifadede  $N$ , birim hacideki dipol sayısı;  $\hat{e}$ ,  $\mathbf{E}$  alanı yönündeki birim vektör;  $\langle m \rangle_E$  ise dış alan yönündeki  $m$  momentinin izdüşümünün ortalama değeridir.  $\langle m \rangle_E$ ,  $\mathbf{F}$  lokal alanı ile orantılıdır. Bu orantı,

$$\langle m \rangle_E \cdot \hat{e} = \alpha \cdot \mathbf{F} \quad (3.32)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden yola çıkarak (3.28) eşitliğindeki polarizasyon ifadesi,

$$\vec{P} = \chi' \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E} = N \cdot \alpha \cdot \mathbf{F} \quad (3.33)$$

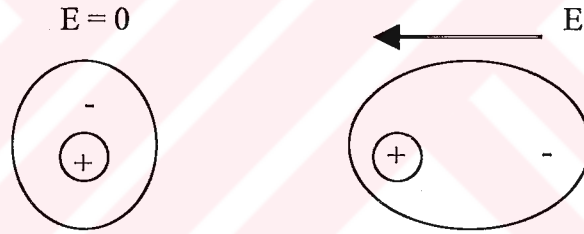
şeklinde olacaktır. Bu ifadedeki  $\alpha$  orantı katsayısı **polarizebilite** (kutuplanabilirlik) olarak bilinmektedir [24].



### 3.2.1. Elektronik Kutuplanma

Bir dielektrik moleküllerden oluşur. Bu, pozitif yüklü çekirdeklerin negatif yüklü elektronlarla çevrilmiş olduğu bir elektrik sistemi gibi düşünülebilir. Bu yükler üzerine bir elektrik alan uygulandığında yer değiştirme (displacement) meydana gelecektir. Uygulanan elektrik alanla birlikte pozitif yük etrafındaki elektronlar harekete geçecektir (Şekil 3.9). Böylece bir dipol moment artışı olacaktır. Buna dielektriğin elektronik kutuplanması (Elektronik polarizasyon da denir.) adı verilmektedir [6,24].

Elektronik kutuplanma, kısaca atom çekirdeklerine göre elektronların yer değiştirmesi şeklinde de tanımlanabilir. Atomlar, geçici olarak oluşturulan bir dipol gibi davranır ve bu durum bütün dielektriklerde gözlenir. Bu tür bir kutuplanma, bir dış alanın mevcut olması durumunda  $10^{-14}$  s. gibi çok kısa bir zaman aralığında meydana gelir [26,28].

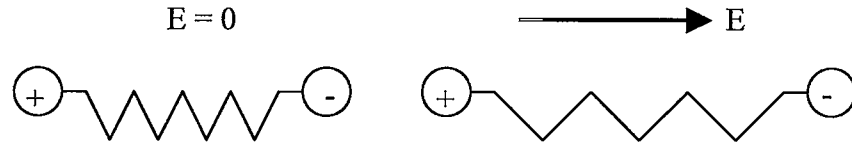


Şekil 3.9. Elektronik kutuplanma [6].

### 3.2.2. Atomik Kutuplanma

Farklı atomlardan oluşan moleküller göz önüne alındığında (örneğin HCl), bu atomların farklı işaretli yüzlere sahip olduğu görülecektir. Dışardan bir elektrik alan uygulandığında (+) yükler elektrik alan yönünde, (-) yükler zıt yönde harekete geçecektir. Böylece denge pozisyonları değişecek ve dipol momenti artacaktır. Bu atomlar arasındaki bağ bir yaya benzetilebilir. Bu yayın esneme ve sıkışma durumlarında dipol moment değişecektir. Buna atomik kutuplanma adı verilmektedir (Şekil 3.10) [24].

Atomik kutuplanma  $10^{-12}$  ile  $10^{-13}$  sn. gibi çok kısa bir zaman aralığında meydana gelmektedir. Meydana gelme süresi elektronik kutuplanmadan kısadır [34]. Ortaya çıkan kutuplanma, dielektrik sabitini etkilemektedir [35].



Şekil 3.10. Atomik kutuplanma [6,25].

### 3.2.3. Dipol (Yönelme) Kutuplanması

Farklı atomlardan oluşan moleküllerdeki pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışık olmayabilir. Bu durumda bir dış alan uygulanmasa bile, molekül sürekli bir dipol momentine ( $\mu$ ) sahip olacaktır [10]. Bazı malzemeler, doğal olarak dipol içerir. Bu malzemeler, polar malzemelerdir [20]. İstatiksel olarak rastgele dağılmış moleküllerin bulunduğu izotropik bir ortamda, bu momentler birbirini yok eder. Bu durumda bir dış elektrik alan uygulaması yoktur. Bir elektrik alan uygulandığında, bir kuvvet momenti ( $\vec{T}$ ) oluşacaktır. Bu kuvvet momenti,

$$\vec{T} = \vec{\mu} \times \vec{E} \quad (3.34)$$

şeklinde yazılabilir. Bu dipol kutuplanmasının sonucudur (Şekil 3.11) [24]. Bir alan uygulandığında, dipoller uygulanan alanla birlikte dönerler. Alan uzaklaştırıldığında ise dipoller aynı hizada kalarak, sürekli kutuplanmaya neden olurlar [36]. Dipol kutuplanması, elektrik alan etkisi ile moleküllerin ısı hareketlerinin düzenlenmesinden ortaya çıkar [35]. Sürekli kutuplanmalar, su ve organik polimerler gibi asimetric moleküllerde oluşur [37]. Kritikal maddelerde dipoller, erime sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta yönelmezler ve dipol kutuplanması bu tür malzemelerde oluşmaz [18,34]. Moleküllerin gevşek olarak

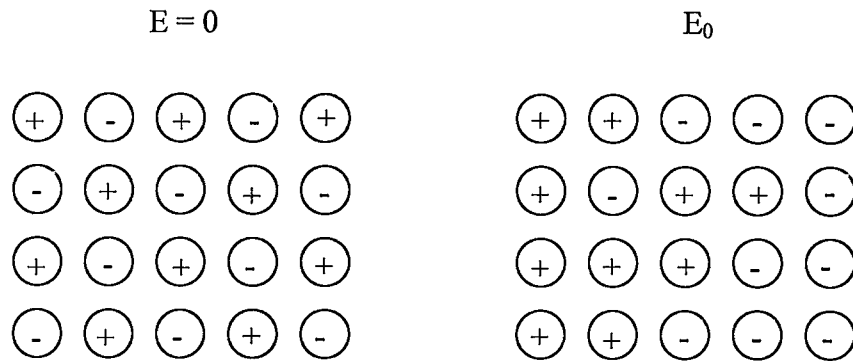
bağlı bulunduğu kristallerde, dipol kutuplanması oluşabilir. Örneğin seramik malzemeler bir simetri merkezinden yoksundur, ancak dipol gibi davranabilirler [18,22].



Şekil 3.11. Dipol Kutuplanması [6,25]

### 3.2.4. Yüzey (Serbest) Yük Kutuplanması

Dielektriğin moleküllerine ve atomlarına bağlı olan yük veya yük taşıyıcıları, bazen dielektriğin içinde kendi kendilerine yer değiştirebilirler; fakat nötralize olmazlar. Elektrik alanda bu serbest yükler hareket ettiği zaman kapasitans artar. Bu kutuplanmaya, yüzey yük kutuplanması denir (Şekil3.12) [24].



Şekil 3.12. Yüzey yük kutuplanması [24].

Hareketli yüklerden kaynaklanan bir kutuplanmadır. Malzeme elektrik alana sokulduğunda yük yüzeyde hareket edebilir. Dielektriklerin çoğunda bu tip kutuplanma önem taşımamaktadır [24,37].

Yukarıda verilmiş olan dört kutuplanma, şu şekilde ifade edilir:

Elektronik kutuplanma  $\alpha_e$ ,

Atomik kutuplanma  $\alpha_a$ ,

Dipol kutuplanması  $\alpha_o$ ,

Yüzey yük kutuplanması  $\alpha_s$ .

Sonuç olarak bir dielektriğin toplam kutuplanması (polarizebilitesi):

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_o + \alpha_s \quad (3.35)$$

şeklinde verilmektedir [24].

### 3.3. Dielektriklerin Sınıflandırılması

Dielektrikler, polar (dipol) ve apolar (polar olmayan, nötr) olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, dielektriklerin elektriksel, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından son derece önemlidir [27,38].

Bir dış elektrik alan uygulanmadığı zaman, dielektriğin oluşturduğu net bir elektriksel moment yoksa, bu tür dielektriklere apolar dielektrikler adı verilir. Dış alan olmadığı durumda, bu maddelerin moleküllerinin her birinde pozitif ve negatif yüklerin kütle merkezleri çakışıktır. Dolayısıyla bu tür moleküllere de apolar molekül ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  gibi) denmektedir [36,38]. Bu tür malzemelerde, herhangi bir elektrik alan uygulanmadığında, aşağıda ifadeleri verilen toplam dipol moment ve elektrik polarizasyon vektörü sıfıra eşit olur [21]. Birim hacim başına elektrik dipollerinin  $N_e$  olduğu bir  $\Delta v$  hacmi için toplam dipol moment,

$$P_t = \sum_{i=1}^{N_e \Delta v} dp_i \quad (3.36)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Elektrik polarizasyon vektörü  $\mathbf{P}$  ise,

$$\vec{P} = \lim_{\Delta\nu \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta\nu} P_i \right] = \lim_{\Delta\nu \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{\Delta\nu} \sum_{i=1}^{N_c \Delta\nu} dp_i \right] \quad (3.37)$$

şeklinde tanımlanır.

Bazı dielektriklerin molekülleri daima dipol bulundurur. Bu maddelerin moleküllerinin her birinde negatif yüklerin merkezi ile pozitif yüklerin kütle merkezleri çakışık olmayabilir. Bu durumda bir dış alan olmadığı halde dipol moment sıfırdan farklıdır. Dipol momente sahip moleküle polar molekül, böyle moleküllerden oluşmuş dielektriğe de polar dielektrik (  $N_2O$  ve  $H_2O$  gibi) adı verilir [21,33].  $N_2O$  ve  $H_2O$  molekülleri incelendiğinde , her ikisinde de azot ve hidrojen atomlarının, oksijen atomunun aynı tarafında yer aldığı görülür [27].

Bir dielektrik, elektrik alan içine yerleştirildiği zaman, bir yük hareketi olmamakla birlikte, elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine göre çok küçük bir yer değiştirme yaparlar. Böylece atomlar çok küçük dipoller haline geçerler. Bu durumda dielektrik polarize olur. Dipolar hale geçen molekül, dipol momentini elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığı zaman atomlar tekrar normal hallerine dönerler ve dipoller kaybolur [27].

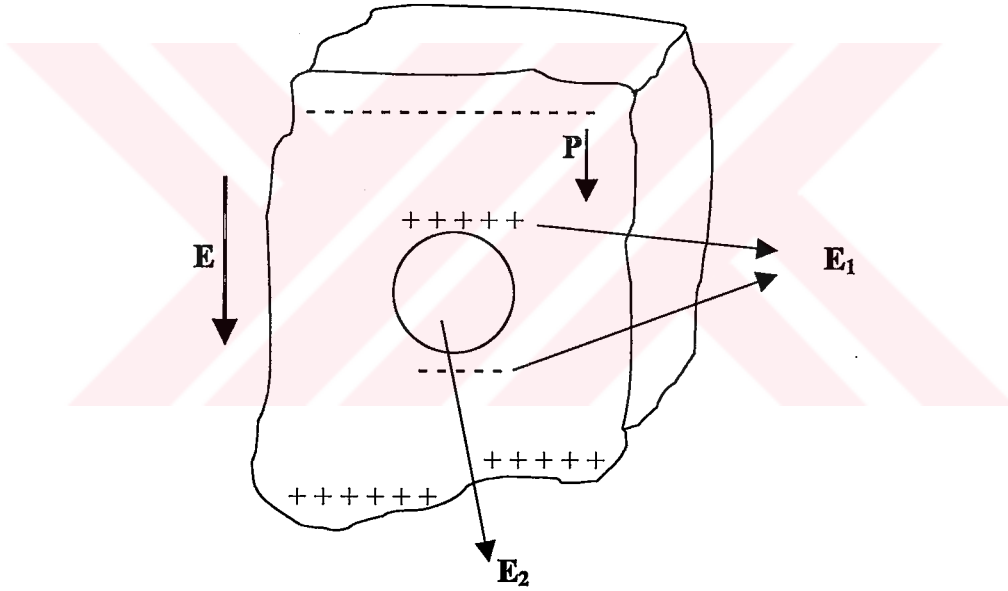
Apolar bir molekül kutuplandığı zaman, yer değiştiren yüklere geri çağırıcı kuvvet etki eder. Dış elektrik alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet, geri çağırıcı kuvvetlere eşit oluncaya kadar yükler birbirinden ayrılırlar. Geri çağırıcı kuvvetler molekülden moleküle değişir. Bu nedenle verilen bir alan için yüklerin yer değiştirmesi, yani kutuplanması farklı olur. Moleküllere uygulanan elektrik alan arttıkça, yönelme derecesi artar.

Maddenin  $\mu$  momentinin deneysel olarak belirlenmesiyle, o maddenin moleküler yapısı hakkında bir fikir edinilebilir. Örneğin simetri eksenine sahip moleküllerin polar olmadığı söylenebilir. Çünkü, bu durumda molekülün pozitif ve negatif yüklerinin yük merkezleri ile, molekülün simetri ekseni çakışmaktadır. Polar olmayan maddenin molekülünde  $r = 0$  olduğu için  $p = 0$ 'dır. Diğer taraftan simetrik olmayan moleküllerde daima polardır [23,39].

### 3.4. Clausius – Mosotti – Lorentz - Lorenz Denklemi

Sadece seyreltilmiş gazlar durumunda,  $\mathbf{F}$  yerel alanının dışardan uygulanan  $\mathbf{E}$  alanına eşit olduğunu kabul edelim.  $\mathbf{E}$  alanında dielektriğin yer aldığını ve bir küresel yarı-makroskobik kovuk içinde moleküllerin bulunduğunu düşünelim. Kovuğun dışındaki dielektrik homojen olsun. Kovuğun içindeki alan;  $\mathbf{E}$  alanı, kovuğun yüzeyinde indüklenen yüklerden oluşan  $\mathbf{E}_1$  alanı ve kovuk içindeki moleküllerin neden olduğu  $\mathbf{E}_2$  alanlarının toplamına eşit olacaktır (Şekil 3.13).

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} + \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 \quad (3.38)$$

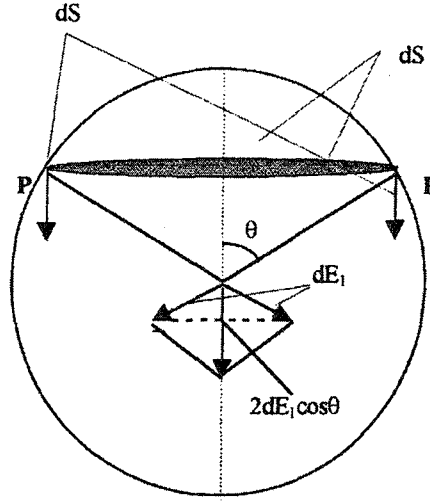


Şekil 3.13. Polarize olmuş bir dielektrikte yarı-makroskobik kovuk modeli [24].

Kovuğun yüzeyindeki yüklerin oluşturduğu  $\mathbf{E}_1$  alanı, şekil 3.14'de verilen şemadan hesaplanır. Şekilde verilen  $\theta$  açısı, polarizasyon yönüne paralel eksen ile  $dS$  arasındaki polar açıdır [24].

Şekil 3.14'de görülen  $\mathbf{P}$  polarizasyon vektörünün normal bileşenini şu şekilde yazabiliriz [25]:

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{n} dS = P \cos\theta dS \quad (3.39)$$



Şekil 3.14. İç alanın hesaplanması için şematik gösterim [24].

Coulomb yasasına göre,  $a$  yarıçaplı ve  $dS$  alanlı herbir eleman için elektrik alan şiddeti:

$$dE_1 = (P \cdot \cos\theta) dS / (\epsilon_0 \cdot 4\pi a^2) \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilir [24,25]. Bu ifade de yer alan  $dS$  halkasının alanı ise

$$dS = 2\pi a \sin\theta a d\theta \quad (3.41)$$

ifadesine eşittir. Halka üzerindeki yükler ise,

$$Q = (2\pi a \sin\theta a d\theta) \cdot P \cos\theta \quad (3.42)$$

olacaktır. Kutuplanma vektörüne ve halkanın  $dS$  elemanlarından oluşan  $dE_1$  alanının bileşenleri birbirini yok edecek şekilde, kovuğun eksenlerine göre simetrik dağılırlar (Şekil 3.14). Sonuç olarak alan,

$$\mathbf{E}_1 = \int_0^\pi \frac{P \cos^2 \theta}{\epsilon_0 4\pi a^2} \cdot 2\pi a^2 \sin\theta d\theta = \frac{P}{3\epsilon_0} \quad (3.43)$$

şeklinde elde edilir [24,25]. Bu ifade, kovuğun içindeki dipollerin sonucunda oluşan elektrik alanıdır. Bu alan dielektriğin yapısına bağlıdır. Kristal kafes

düzenli ise, ya da gaz veya sıvı moleküllerin dağılımı rasgele ise  $\mathbf{E}_2 = 0$  kabul edilir [24]. Bu yaklaşımı ilk yapan, Mosotti'dir (1850) [25]. Denklem (3.28)'de verilen  $\mathbf{P}$  eşitliği ve denklem (3.43)'deki  $\mathbf{E}_1$  alan ifadesi, (3.38)'de verilen eşitlikte yerine konulursa,

$$\mathbf{F} = \mathbf{E} + (\mathbf{P} / 3\epsilon_0) = (\chi' + 3)\mathbf{E} / 3 \quad (3.44)$$

ifadesi elde edilir [24]. Bu eşitlikteki  $\chi'$ , elektriksel duygunluktur (Elektrik süsebtibilite). Birim kütlede N sayıda molekül varsa, bu durumda kutuplanma

$$\mathbf{P} = N.\alpha.\mathbf{F} = \chi' . \epsilon_0 . \mathbf{E} \quad (3.45)$$

ile ifade edilir. Buradaki  $\alpha$ , polarizebilite'dir. Denklem (3.44) ve denklem (3.45) birbirine eşitlenirse, elektriksel duygunluk:

$$\chi' = \frac{N\alpha}{3\epsilon_0} \cdot \frac{\chi' + 3}{3} \quad (3.46)$$

olacaktır. Bu ifadedeki  $N.\alpha$ , birim hacimdeki polarizibilitedir [24,25]. Bir moldeki moleküllerin sayısı Avogadro sayısı olarak bilinir ve

$$N_A = \frac{N.M}{\rho} = 6.023 \times 10^{23} \text{ 1/mol} \quad (3.47)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N, bir  $\text{m}^3$ 'deki molekül sayısı; M, molekül ağırlığı(kg);  $\rho$  ise hacimsel yük yoğunluğudur ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) [25].

Denklem (3.47)'de verilen eşitlik, denklem(3.46)'da yerine konursa bir moldeki polarizebilite (Molar Polarizebilite) hesaplanabilir:

$$\Pi = \frac{\chi'}{\chi' + 3} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} \quad [\text{m}^3] \quad (3.48)$$



Bu denklem, Clausius-Mosotti denklemi olarak bilinmektedir [24]. Bu denklem şu şekilde de yazılabilir:

$$\Pi = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon' + 2} \cdot \frac{M}{\rho} \quad [\text{m}^3]. \quad (3.49)$$

Bu durumda, (3.49)'da verilen eşitlikte bağıl dielektrik sabiti  $\epsilon'$  yerine,  $n^2$  (yansımaya indeksi) konulursa, Lorentz-Lorenz denklemi elde edilmiş olur [5,25]. Bu denklem,

$$\Pi = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{\rho} \quad (3.50)$$

şeklinde ifade edilir ve  $\Pi$ , molar yansımaya adını alır. İki eşitlikte tam olarak yeterli değildir. Çünkü ikisinde de  $\alpha$  reel bir niceliktir. Reel permitivite ve reel yansımaya indeksi, kompleks şekilde yazılırsa, Clausius-Mosotti-Lorentz-Lorenz denklemlerinin en genel hali elde edilmiş olur. Bu denklem,

$$\Pi = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} = \frac{\epsilon^* - 1}{\epsilon^* + 2} \cdot \frac{M}{\rho} = \frac{n^{*2} - 1}{n^{*2} + 2} \cdot \frac{M}{\rho} \quad (3.51)$$

şeklinde ifade edilir [25].

Lorentz yerel alan modeli, küresel simetrik dipolar olmayan (non-dipolar) dielektriklerde geçerlidir. Bu durumda da, moleküllerin kapalı ortamda olmalarından dolayı  $\mathbf{E}_2$  sıfırdır. Ancak bu durum, sıvılar ve gazlar için geçerli olmayacaktır; çünkü sıvılar ve gazlar dipol molekülleri içerdiğinden,  $\mathbf{E}_2$  ihmal edilemez [24].

Lorentz yerel alan modeli için dipolar (yönelme) polarizebilite,

$$\alpha = \frac{\mu^2}{3kT} \quad (3.52)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu eşitlik,  $N\alpha / 3\epsilon_0$  eşitliğinde yerine konulursa:

$$\frac{N\alpha}{3\epsilon_0} = \frac{N\mu^2}{9\epsilon_0 kT} \quad (3.53)$$

elde edilir. Lorentz yerel alan modeli, ferroelektrikler (küresel simetrik non-dipolar dielektrik) için geçerlidir. Buna karşılık, bu model; dipolar dielektriğin belirli bir sıcaklıkta, sonsuz bir süseptibiliteye olması gerektiğini ileri sürdüğünden deneysel veriler ile uyumlu değildir. Bu durum Mosotti-Bozunumu (Mosotti's catastrophe) adını alır [24].

$$\frac{N\mu^2}{9\epsilon_0 kT} = 1 \quad (3.54)$$

koşulunun sağlandığı sıcaklığa Curie sıcaklığı denir ve  $T_c$  ile gösterilir.

$$T_c = \frac{N\mu^2}{9\epsilon_0 k} \quad (3.55)$$

$T_c$  sıcaklığında herbir dipolar dielektrik, ferroelektrik haline gelmelidir. Bu Lorentz yerel alan modelinin bir sonucudur [24].

### 3.5. Onseger Yerel Alanı

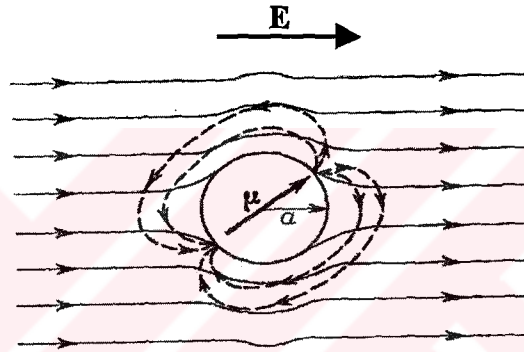
Onseger yerel alanı, Mosotti bozunumunun sonucunda dipolar malzemelerde geçersiz olan Lorentz yerel alanı yerine önerilmiştir.

Dielektrik malzemelerin çoğunda ferroelektrik durum gözlenmemektedir. Bu nedenle, dipolar dielektriklerdeki yerel alan hesaplamalarında Lorentz modeli kullanılamaz. Çünkü bu modelde, kapalı bölge etkileşimleri ihmal edilir ( $\mathbf{E}_2 = 0$ ). Bu durumda, dipolar dielektrik malzemeler için Lorentz yerel alanı modelinde değişiklik yapmak gerekmektedir.

1936'da Onseger, dipolar dielektrikler için yeni bir yerel alan modeli önermiştir. Bu model, Lorentz yerel alanı modelinden farklıdır ve sonsuz büyüklükte süseptibiliteye yol açmamaktadır. Onseger, molekül boyutunda a yarıçaplı küresel bir kovuk ele almıştır (Şekil 3.15). Bu kovuğun merkezinde bir nokta dipol vardır ve sürekli-homojen bir dielektrik malzeme içine yerleştirilmiştir. Daha sonra dışardan uygulanan  $\mathbf{E}$  alanı ile kovukta oluşan  $\mathbf{G}$  alanını hesaplamıştır. Kovuğun üzerindeki dipollerle indüklenen yüklerin neden olduğu ve kovuğun merkezindeki dipole etkiyen  $\mathbf{R}$  reaksiyon alanını bulmuştur. İç alan  $\mathbf{F}$ 'in reaksiyon alanı  $\mathbf{R}$  ve kovuk alanı  $\mathbf{G}$ 'den oluştuğunu kabul etmiştir.

$$\mathbf{F} = \mathbf{G} + \mathbf{R}$$

(3.56)



Şekil 3.15. Onseger'in kovuk modeli [24].

$\mathbf{G}$  ve  $\mathbf{R}$  alanlarını hesaplamak için; a yarıçaplı küresel kovuğun  $\chi_2'$  süseptibilitesine sahip homojen bir dielektrik malzeme ile doldurulmuş ve bu kürenin de,  $\chi_1'$  süseptibilitesine sahip bir sürekli, homojen ve sonlu bir dielektrik malzeme içine yerleştirilmiş olsun. Kovuk merkezinde de,  $\mu$  momentine sahip bir nokta dipol olsun.

$\mathbf{E}$  alanı ve V potansiyeli arasındaki ilişki

$$\mathbf{E} = -\text{grad}V$$

(3.56)

şeklinde olacaktır. Dielektrik içinde serbest yükler olmadığından

$$\text{div}\mathbf{E} = 0$$

(3.57)

olacaktır.

Potansiyel V, Laplace denklemlerine göre,

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3.57)$$

olacaktır. E dış alanının z eksenine paralel olduğu kabul edilir. Kovoğun küresel simetrisinden dolayı, alan değişimi  $\theta$  açısından bağımsızdır. Bu denklemin genel çözümünden,

$$V = - \left( \frac{A}{r^2} + Br \right) \cdot \cos\theta \quad (3.58)$$

eşitliği elde edilir. Burada r, kovoğun yarıçapı;  $\theta$ , z eksenini ile r arasındaki açıdır.

A ve B ifade edilen değerler ise,

$$A = \frac{N_A}{3\epsilon_0} (\alpha_e + \alpha_a) \quad \text{ve} \quad B = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \cdot \frac{\mu^2}{3k} \quad (3.59)$$

şeklindedir [24].

### 3.6. Dielektrik Relaksasyon (Durulma) ve Dielektrik Kayıplar

Her polarizasyon etkisi, rezonans frekansı veya relaksasyon frekansı karakteristiğine sahiptir. Rezonans etkisi, genelde elektronik veya atomik polarizasyonda görülmektedir. Dielektrik relaksasyon, moleküllerin iç yapılarına ve dielektriğin moleküllerinin yapısına veya moleküler düzenine bağlı olarak yönelme polarizasyonu ile ilişkilidir [5]. Dielektriklerde relaksasyon, plakaları arasına elektrik alan uygulanan kondansitördeki dielektriğin davranışından kaynaklanmaktadır [24].

Relaksasyon zamanı, dielektrikte bulunan moleküllerin hareketinin ölçüsüdür. Relaksasyon zamanı; polarizasyonun, orjinal değerinin  $1/e$ 'si olarak bulunabilir. Kauzmann'nın hesaplamalarına göre polarizasyon P(t), zamanın bir

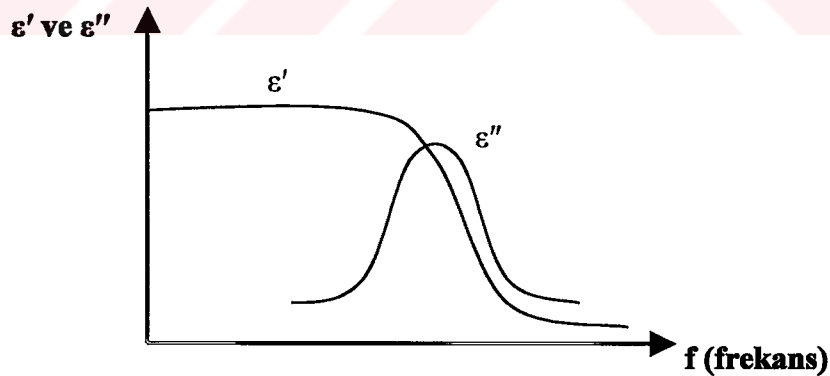
fonsiyonu olarak şu şekilde ifade edilir (Dipol yönelmelerinden dolayı bir  $\text{cm}^3$ 'de oluşan elektrik moment):

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-k_0 T} \quad (3.60)$$

Burada  $P_0$ ,  $t = 0$  anındaki yönelme polarizasyonu;  $k_0$  ise dipollerin hareketleri için oran sabiti ya da atlama oranıdır.  $k_0 T = 1$  olduğu durumda  $P(t)$ ,  $P_0/e$  değerine gelmelidir.  $t$ 'nin bu değeri, relaksasyon değeridir ve relaksasyon zaman sabiti,  $\tau = 1/k_0$  olarak da bulunabilir [5,40].

Sıvı ve katı dielektrikler, bir elektrik alan uygulandığında küçük bir alanda sınırlı hareket edebilen moleküllere sahiptirler. Moleküllerin bu hareketi iç sürtünmeye yol açar. Öyle ki moleküller, yavaş yavaş döner ve eksponansiyel olarak relaksasyon zaman sabiti ( $\tau$ ) sonunda yönelme polarizasyonunun son durumuna yaklaşır. Alan kaldırıldığında ise, sıra ters döner ve aynı zaman sabiti ile rastgele dağılım eski durumuna gelir [5,23].

Dielektrik kaybın maksimum olduğu frekansa, relaksasyon frekansı denir[41]. Relaksasyon frekansı, relaksasyon zamanının tersi ile orantılıdır ( $f_{\text{relax}} = 1/2\pi\tau$ ) [23].



Şekil 3.16. Polar bir dielektriğin, dielektrik relaksasyonu [6,37].

Relaksasyon zamanı, elektrik alanın bir periyot içinde değişim yapması sonucunda, o periyot içinde dipolün yönelme yapması için geçen süre olarak da tanımlanabilir. Relaksasyon frekansı, malzemenin rezonans frekansına karşılık gelir. Elektrik alanın frekansı, relaksasyon frekansından küçük olduğu zaman kutuplanma kolaylıkla oluşur ve elektrik alanı izler. Bu durumda dielektrik

kayıplar, ihmal edilecek kadar azdır. Frekans artarak relaksasyon bölgesine ulaşıncaya, kutuplanma alanına uymakta zorlanır ve faz farkı artar. Bu durumda kayıplarda maksimum olur. Frekans artmaya devam ederse, kutuplanma oluşmaz ve dielektrik sabiti hızla azalır. Kutuplanma oluşmadığı anda ise, dielektrik kayıp olmayacaktır [5,18].

Her kutuplanma mekanizmasının relaksasyon mekanizması farklı olduğundan, değişik kutuplanmaların etkilerini deneysel olarak ayırmak mümkündür. Dielektrik kayıplar, kutuplanma türlerine bağlıdır. Yüzey yük kutuplanmasından kaynaklanan dielektrik kayıplar  $10^4$  Hz civarında, dipol (yönelme) kutuplanmasından kaynaklanan kayıplar  $10^8$  Hz civarında, atomik kutuplanmadan kaynaklanan kayıplar  $10^{12}$  Hz civarında ve elektronik kutuplanmadan kaynaklanan kayıplar ise  $10^{16}$  Hz civarında görülür. Yüzey yük kutuplanmasının görüldüğü frekans çok küçük olduğu için önemsizdir. Dipol kutuplanması ise polar moleküllerde görülür. Kutuplanmalardaki dielektrik kayıplar frekansa bağlı olarak incelenirse, relaksasyon frekansında kayıpların maksimum olduğu görülmektedir. Relaksasyon frekansının sağında ve solunda enerji kaybı azalmaktadır. Bu da relaksasyon süresinin, uygulanan elektrik alanın periyodundan büyük ya da küçük olmasından kaynaklanır [6,18].

Dielektrik kayıplar, sıcaklık yükselmesi ile artar. Alternatif bir voltaj uygulandığında, önemli miktarda ısınma olur. Açığa çıkan ısı, frekans ile artar. Bunun nedeni, uygulanan elektrik alanının değişen yönüne göre yönelecek olan dipollerin ve moleküllerin birbirine sürtünmeleridir. Bu sürtünme nedeni ile ısı açığa çıkar. Komşu moleküllerde olan sürtünmeler nedeni ile molekülün, elektrik alanının değişimini izlemesi gecikmeli olur. Atomik ve elektronik görüldüğü malzemelerde sıcaklığın dielektrik sabitine etkisi, düşük sıcaklıklarda küçüktür. Yüksek sıcaklıklarda ise iyon hareketinin fazla olmasından dolayı yüksektir. Atomik kutuplanmanın görüldüğü malzemelerde sıcaklık ve frekansın etkisi çok önemlidir. Dielektrik sabiti, belli bir sıcaklıkta keskin olarak artar ve düşük frekanslarda artan sıcaklıkla daha hızlı artar [18,28].

### 3.6.1. Debye Eşitliği

Dielektrik sabitinin frekansa olan bağıllığı, dielektrik maddelerde önemli bir özelliktir. Bu bağıllığı ortaya koyan eşitliklerden biri Debye tarafından bulunmuştur [42]. Dielektrik sabiti, frekans, dipol moment, moleküler büyüklük ve dielektriğin vizkozitesi arasındaki ilişkiler de Debye tarafından açıklanmıştır [5].

Bir iç elektrik alan içinde, sürekli bir dipol moment ile bir molekül yönelmeye uğrar. Alternatif alan içinde, yönelme frekansa bağlı olacaktır. Faz kayması, alan içindeki dipol yönelmesi ile oluşan polarizasyonun yönü ile uygulanan alanın yönü arasında meydana gelebilir. Bu durumda elektrik süseptibilite ve permitivite kompleks olacaktır. Kompleks süseptibilite ya da permitivite ile gazlar ya da seyreltik çözeltiler için frekans arasındaki ilişki Debye tarafından bulunmuştur ve bu eşitlik Debye eşitliği olarak bilinmektedir. Bu eşitlikte serbest moleküllerin birbiri ile etkileşimde bulunmadıkları kabul edilir.

Kutuplanma (polarizasyon), yönelme ve indüklenme olmak üzere iki bölümden oluşur. Dielektriğe  $\mathbf{E}$  alanı uygulandığında, polarizasyon vektörü hemen,

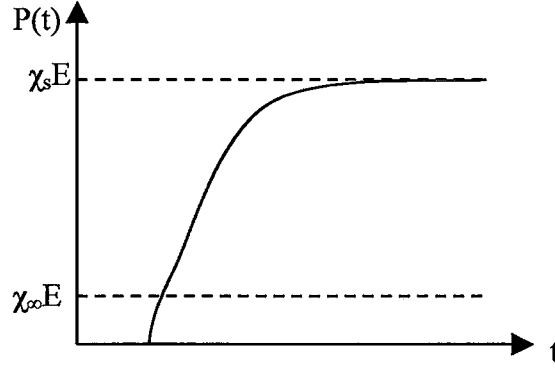
$$\mathbf{P} = \chi_{\infty} \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (3.61)$$

değerine ulaşır. Daha sonra, eksponansiyel olarak maksimum değerine yükselir[24].

$$\mathbf{P}_{\max} = \chi_s \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (3.62)$$

Bu ifadelerde;  $\chi_{\infty}$  frekansın sonsuza gitmesi halindeki süseptibilite,  $\chi_s$  ise statik alandaki (frekansın sıfır olduğu durumdaki) süseptibilitedir [42].

$\mathbf{P}$  ve  $\mathbf{P}_{\max}$  arasındaki fark, alan içindeki dipol moleküllerinin dönmelerinden kaynaklanan, yönelme polarizasyonuna bağlıdır. Polarizasyon vektörünün zamana bağlı grafiği şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Bir dielektriğe uygulanan alan sonucunda oluşan polarizasyon vektörü [24].

Dielektrik bir iç alana yerleştirildiğinde, eksponansiyel olarak bir denge durumuna yönelecektir. Bu durumda kutuplanabilirlik,

$$\alpha(t) = \alpha(0) \cdot e^{-t/\tau} \quad (3.63)$$

olacaktır. Burada  $\tau$ , relaksasyon zamanıdır. Relaksasyon zamanı, ortamın vizkozitesine ve sıcaklığına bağlıdır; ancak zamandan bağımsızdır.

$\mathbf{E}(u)$  elektrik alanı,  $u$  ve  $u+du$  zaman aralığında dielektriğe uygulanırsa, bu aralıktaki polarizasyon,

$$\mathbf{P}(t-u) = (\chi_\infty \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}) + \{\alpha(t-u) \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}(u) du\}, \quad u < t < u+du \quad (3.64)$$

olacaktır.  $u+du$  zamanından sonra alan azalacaktır; ancak polarizasyon vektörü, alanla aynı zamanda (eş zamanlı olarak) azalmayacaktır.  $t > u+du$  için, denklem (3.64),

$$\mathbf{P}(t-u) = \alpha(t-u) \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}(u) du \quad (3.65)$$

olacaktır. Eğer  $t \rightarrow \infty$  ise,  $\alpha(t-u) \rightarrow \infty$  olacaktır. Dielektriğe alternatif periyodik bir alan uygulanırsa,

$$\mathbf{E}(u) = \mathbf{E}_0 e^{j\omega u} \quad (3.66)$$



polarizasyon,

$$\mathbf{P}(t) = \chi_{\infty} \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}(t) + \epsilon_0 \int_{-\infty}^t \mathbf{E}(t) \alpha(t-u) du \quad (3.67)$$

olacaktır. Eğer t süresi yeteri kadar uzunsa, polarizasyon sifira yaklaşacaktır.

Polarizasyon vektörü şu şekilde de yazılabilir:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0 e^{(i\omega t + \psi)} \quad (3.68)$$

Burada  $\psi$ , yer değiştirme açısıdır. Polarizasyon vektörü ile  $\mathbf{E}$  elektrik alan şiddeti vektörü arasındaki ilişki şu şekildedir:

$$\mathbf{P}(t) = \chi^* \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}(t) \quad (3.69)$$

Burada  $\chi^*$ , kompleks elektrik süseptibilitedir ve

$$\chi^* = \chi' - j \chi'' \quad (3.70)$$

şeklinde ifade edilir.  $\chi'$  reel,  $\chi''$  sanal kısımdır. Yukarıda verilen denklemlere göre elektrik süseptibilite,

$$\chi^* = \chi_{\infty} + \int_{-\infty}^t e^{-j\omega(t-u)} \alpha(t-u) du \quad (3.71)$$

yazılabilir. Bu denklemde  $x = t-u$  yazılırsa,

$$\chi^* = \chi_{\infty} + \int_{-\infty}^t e^{-j\omega x} \alpha(x) dx \quad (3.72)$$

olacaktır.

Denklem (3.63)'de verilen  $\alpha(0)$  sabiti, statik alan ( $\omega=0$ ) uygulamasında olduğu gibi hesaplanabilir. Bu durumda  $\mathbf{P}$  polarizasyon vektörü ile  $\mathbf{E}$  alan şiddeti arasında faz kayması ( $\psi=0$ ) olmayacaktır.  $\chi^* = \chi_s$  durumunda, denklem (3.72)'den,

$$\alpha(0) = \frac{\chi_s - \chi_\infty}{\tau} \quad (3.73)$$

ve

$$\chi^* = \chi_\infty + \frac{\chi_s - \chi_\infty}{\tau} \int_0^\infty e^{-j\omega x} e^{-x/\tau} dx \quad (3.74)$$

yazılabilir. Yukarıdaki integral bölümünün çözümü,

$$\int_0^\infty e^{-j\omega x} e^{-x/\tau} dx = \frac{\tau}{1 + j\omega\tau} \quad (3.75)$$

şeklinde olacaktır. Bu durumda denklem (3.74) şu şekilde yazılabilir:

$$\chi^* = \chi_\infty + \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (3.76)$$

Bu denklem dağılım eşitliği adını alır. Bu eşitliğin reel ve sanal bölümleri şu şekilde yazılır:

$$\chi' = \chi_\infty + \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.77)$$

$$\chi'' = \frac{\chi_s - \chi_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau \quad (3.78)$$

Kayıp açısı  $\psi$  ise,

$$\tan \psi = \frac{\chi''}{\chi'} = \frac{(\chi_s - \chi_\infty)\omega\tau}{\chi_s + \chi_\infty\omega^2\tau^2} \quad (3.79)$$

olacaktır.  $\chi'' = \varepsilon''$ ,  $\chi' = \varepsilon' - 1$  ve  $\tan\delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$  olduğuna göre yukarıdaki eşitlikleri şu şekilde yazabiliriz:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (3.80)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \omega\tau \quad (3.81)$$

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty\omega^2\tau^2} \quad (3.82)$$

Bu eşitliklere, Debye Eşitliği denir [24].

Yukarıda verilen denklemlerde,  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  değerlerinin aynı eşitlik içinde ifade edilebilmesi için,  $\omega\tau$  'yu yok etmek gerekmektedir. Bunun için, her iki eşitlikte yer alan  $\omega\tau$ 'yu çekmek ve birbirine eşitlemek gerekir. Bu durumda elde edilecek eşitlik şu şekilde olacaktır:

$$\left[ \varepsilon' - \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty}{2} \right]^2 + (\varepsilon'')^2 = \left[ \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \right]^2 \quad (3.83)$$

Bu denklem, merkezi  $[(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2, 0]$  olan ve yarıçapı  $r = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)/2$  olan bir yarı-daire denklemidir. Bu denkleme Debye yarı-dairesi (Debye semi-circle) adı verilir [37,42]. Bu yarı-daire, şekil 3.18'de verilmiştir. Bu yarı-dairenin herhangi bir noktasını  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_\infty$  'a birleştiren  $\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{v}$ 'nin farkı sabit olup,

$$|\mathbf{u} - \mathbf{v}| = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \quad (3.84)$$

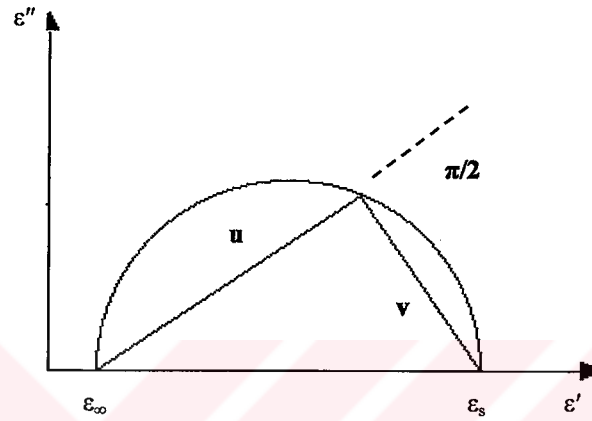
olur.

Şekil 3.18'den görüldüğü gibi,

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varepsilon}^* - \varepsilon_\infty \quad (3.85)$$

$$\mathbf{v} = \boldsymbol{\varepsilon}^* - \varepsilon_s \quad (3.86)$$

olacaktır.



Şekil 3.18. Debye yarı-dairesi [42].

$\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{v}$  vektörleri arasındaki açı, şekilden de görüldüğü gibi  $\pi/2$  olduğundan, bu iki vektörün skaler çarpımı sıfır olacaktır.  $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_\infty$  arasında değişirken,  $\varepsilon''$  nün maksimum değeri  $(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2$  olmaktadır [42].

Debye eşitliğini, deneysel karakteristiklerin değerlendirilmesi için özel değerlere sahip değişik bir formda yazabiliriz. Yukarıda verilen denklem (3.80), (3.81) ve (3.82)'yi şu şekilde yazabiliriz [6]:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau_e^2} \quad (3.87)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau_e^2} \omega \tau_e \quad (3.88)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau_e}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau_e^2} \quad (3.89)$$

Buradaki yeni notasyon  $\tau_e$ 'dir. Bu da relaksasyon zamanıdır ve

$$\tau_e = \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_\infty + 2} \tau \quad (3.90)$$

şeklinde ifade edilir [6,24]. Buna göre yeni bir değer tanımlanabilir:

$$z = \ln \omega \tau_e \quad (3.91)$$

Bu durumda denklem (3.87), (3.88) ve (3.89) şu şekilde olacaktır [6]:

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{1 + e^{2z}} = \frac{e^{-z}}{e^z + e^{-z}} \quad (3.92)$$

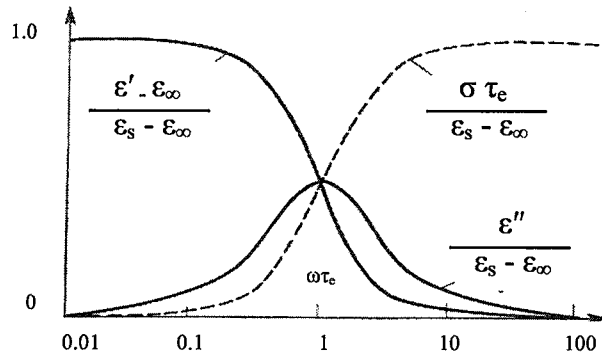
$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{e^z + e^{-z}} \quad (3.93)$$

$$\frac{\tan \delta}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{\varepsilon_\infty e^z + \varepsilon_s e^{-z}} \quad (3.94)$$

Denklem (3.13)'e göre iletkenlik  $\sigma = \omega \varepsilon''$  idi. Bu durumda normalleştirilmiş form (normalized form),

$$\frac{\sigma \tau_e}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{e^z}{e^z + e^{-z}} \quad (3.95)$$

olacaktır. Denklem (3.93), (3.94) ve (3.95)'den hesaplanan eğri, şekil 3.19'da gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi iletkenlik eğrisi,  $\varepsilon'$ 'nin aynada yansıması gibidir. Şekilde yayılım (dispersion) aralığının dışındadır ve yönelme polarizasyonu, dielektriğin iletkenliğini sabit bir değere götürür [6,24].



Şekil 3.19. Elektrik dielektrik sabiti ve iletkenliğin normalleştirilmiş eğrileri [6,24].

Dağılım aralığının dışında ( $\omega \gg \omega_{\max}$ ), dipoller elektrik alan değişimlerinden etkilenmezler. Bundan dolayı alan içinde hareket eden serbest yükler gibi görülebilirler ve Ohm kanununa göre iletkenliğe katkıda bulunurlar [24].

### 3.6.2. Cole – Cole Eşitliği

Bazı maddeler, mesela uzun zincirli polimer molekülleri geniş dağılım eğrilerine sahiptir ve bunların maksimum soğurmaları (absorption) Debye modelinde gösterildiği gibi aşağıdadır. Bu durum Cole-Cole eğrileri ile açıklanabilmektedir. Cole-Cole eğrileri, denklem (3.76)'dan hesaplanan bir yarı-daireyi içermektedir (Şekil 3.20). K.S. Cole ve R.H. Cole tarafından önerilen bu eşitlik,

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-h}} \quad (3.96)$$

şeklindedir.  $h = 0$  için, bu eşitlik Debye eşitliğidir.  $h = 1$  için, gerçek değer (orijin ile merkez arasındaki uzaklık),  $(\varepsilon_s + \varepsilon_{\infty})/2$  olacaktır. Cole-Cole parametresi adı verilen,  $h$  parametresinin değerleri  $0 \leq h < 1$  arasındadır. Serbest moleküllerin derecesi artarsa,  $h$ 'da artacaktır. Sıcaklık artarsa,  $h$  azalacaktır [24,34,37]. Denklem (3.96) şu şekilde de yazılabilir:

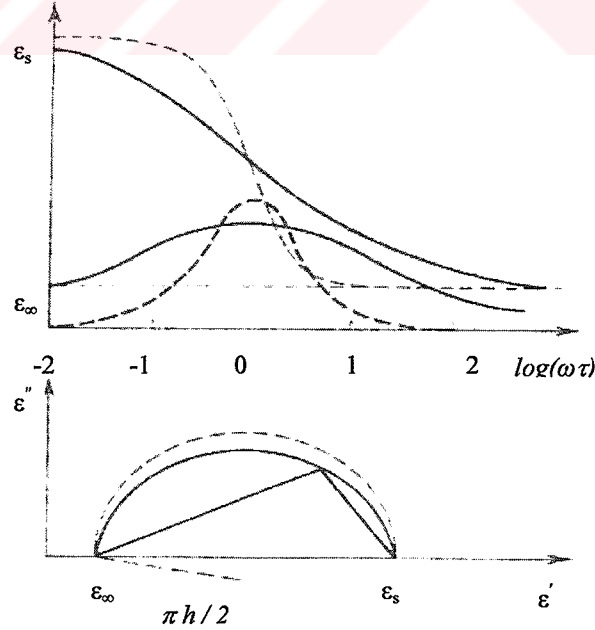
$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[ 1 + \left( \frac{1}{j} \omega \tau \right)^{1-h} \right]}{\left[ 1 + (j \omega \tau)^{1-h} \right] \left[ 1 + \left( \frac{1}{j} \omega \tau \right)^{1-h} \right]} \quad (3.97)$$

Bu denklem, reel ve sanal kısımları bölünerek ve  $j^n = e^{j(n\pi/2)}$  eşitliği kullanılarak yeniden yazılırsa,

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[ 1 + (\omega \tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega \tau)^{2(1-h)} + 2(\omega \tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (3.98)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \left[ 1 + (\omega \tau)^{1-h} \cos \frac{h\pi}{2} \right]}{1 + (\omega \tau)^{2(1-h)} + 2(\omega \tau)^{1-h} \sin \frac{h\pi}{2}} \quad (3.99)$$

ifadeleri elde edilir.



Şekil 3.20. Denklem (3.96)'ya göre Cole-Cole eğrileri [24].

Eğer,  $(\omega\tau)^{1-h} = e^z$  ve  $z = (1-h)\ln\omega\tau$  olmak üzere yukarıdaki denklem tekrar yazılmak istenirse,

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s + \varepsilon_\infty) \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\sinh z}{\cosh z + \sin \frac{h\pi}{2}} \right) \quad (3.100)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s + \varepsilon_\infty) \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{\cos \frac{h\pi}{2}}{\cosh z + \sin \frac{h\pi}{2}} \right) \quad (3.101)$$

olacaktır. Bu denklemlerden  $\cosh z$  ve  $\sinh z$ 'yi hesaplayabiliriz:

$$\sinh z = \frac{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty - 2\varepsilon'}{2\varepsilon''} \cos \frac{h\pi}{2} \quad (3.102)$$

$$\cosh z = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2\varepsilon''} \cos \frac{h\pi}{2} - \sin \frac{h\pi}{2}$$

$\cosh^2 z - \sinh^2 z = 1$  eşitliği kullanılarak yukarıdaki denklem düzenlenirse, bir daire denklemini elde edilir [24,37]:

$$\left[ \varepsilon' - \frac{(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)}{2} \right]^2 + \left[ \varepsilon'' + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{2} \tan \frac{h\pi}{2} \right]^2 = \left[ \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{2} \sec \frac{h\pi}{2} \right]^2 \quad (3.103)$$

Çeşitli frekanslarda ölçülen  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  değerlerinin grafiği çizilirse, şekil 3.20'de verilen daire yayı elde edilir. Bu daire yayının  $\varepsilon'$  eksenini kestiği nokta, daire yayının merkezi ile birleştirilirse,  $\varepsilon'$  eksenini ile bir açı oluşur. Bu açının değeri  $h\pi / 2$ 'dir. Bu açı biliniirse Cole-Cole parametresi hesaplanabilir. Şekil 3.20'de görülen daire yayının herhangi bir noktasını,  $\varepsilon_s$  ve  $\varepsilon_\infty$ 'a birleştiren  $|\mathbf{u}|$  ve  $|\mathbf{v}|$ 'nin farkları sabit olup,



$$|\mathbf{u} - \mathbf{v}| = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \quad (3.104)$$

olmaktadır ve  $\varepsilon'$  eksenindeki bileşenleri

$$|\mathbf{u}| = \varepsilon' - \varepsilon_\infty \quad \text{ve} \quad |\mathbf{v}| = \varepsilon_s - \varepsilon' \quad (3.105)$$

ile ifade edilir. Cole-Cole eğrisinde,  $\mathbf{u}$  ve  $\mathbf{v}$  vektörleri arasındaki açı değeri daima  $(1-h)\pi/2$ 'dir. Eğer  $h=0$  olursa, Debye eşitliğine ulaşılır.  $\varepsilon''$  'nün maksimum değerini aldığı  $f_\varepsilon$  frekansı,

$$f_\varepsilon = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (3.106)$$

olacaktır. Bu durumda  $\varepsilon''$  'nün maksimum olma koşulu  $2\pi f_\varepsilon \tau = 1$  ' dir [42].

### 3.6.3. Cole-Davidson Eşitliği

$(\varepsilon_s + \varepsilon_\infty)/2$  noktasından geçen eksene göre simetrik olan Cole-Cole eğrileri, bütün dielektrikler için geçerli değildir [24]. Bazı malzemelerin dielektrik özellikleri incelenip,  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  değişim grafiği çizildiğinde, bu grafiğin merkezden geçen eksene simetrik olmadığı görülür (Şekil 3.21). Asimetri daha çok yüksek frekanslarda göze çarpmaktadır [37]. Cole ve Davidson bu durumlar için, bazı deneysel formüller önermişlerdir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^\alpha} \quad (3.107)$$

Eşitlikteki  $\alpha$ , 0 ile 1 arasında değerler almaktadır ( $0 < \alpha \leq 1$ ).  $\alpha = 1$  olduğunda denklem, Debye eşitliğidir.  $\alpha$  azaldıkça, eğrideki asimetriklik artacaktır[24]. Yukarıda verilen eşitliğin, reel ve sanal kısımları şu şekilde yazılabilir:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^\alpha} \cdot \frac{(1 - j\omega\tau)^\alpha}{(1 - j\omega\tau)^\alpha} = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)(1 - j\omega\tau)^\alpha}{(1 + \omega^2\tau^2)} \quad (3.108)$$

$\omega\tau = \tan\varphi$  yazılırsa,

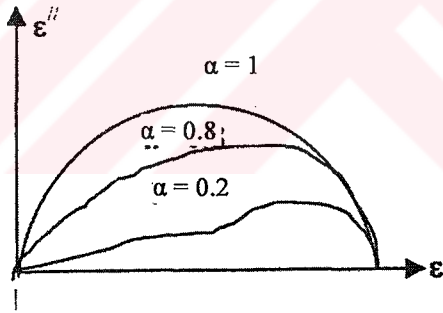
$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)e^{-j\varphi\alpha}}{(1 + \tan^2\varphi)^{1/2}} \quad (3.109)$$

Bu durumda reel ve sanal kısımlar:

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \cos^\alpha\varphi \cdot \cos\alpha\varphi \quad (3.110)$$

$$\varepsilon'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \cos^\alpha\varphi \cdot \sin\alpha\varphi \quad (3.111)$$

olacaktır [24].



Şekil 3.21. Cole-Davidson eğrisi [37].

### 3.6.4. Fröhlich'e Göre Relaksasyon Zamanı Dağılımı

Bu teoriye göre, dielektriklerde bir dipol, en az potansiyel enerjisi kadar bir enerji ile potansiyel engelden atlar.  $W$ , engelin minimum;  $W + e_0$  ise maksimum yüksekliği gösterir. Bu sınırlar,  $\tau_1$  ve  $\tau_2$  ile gösterilir:

$$\tau_1 = A \exp(W/kT) \quad \tau_2 = A \exp[(W + e_0) / kT] \quad (3.112)$$

W ve W+dW arasındaki engel yüksekliği için dipollerin sayısı,  $dW/e_0$  olacaktır.

Fröhlich eşitlikleri:

$$\varepsilon' = 1 - \frac{kT}{2e_0} \ln \left( \frac{1 + \omega^2 \tau_2^2}{1 + \omega^2 \tau_1^2} \right) \quad (3.113)$$

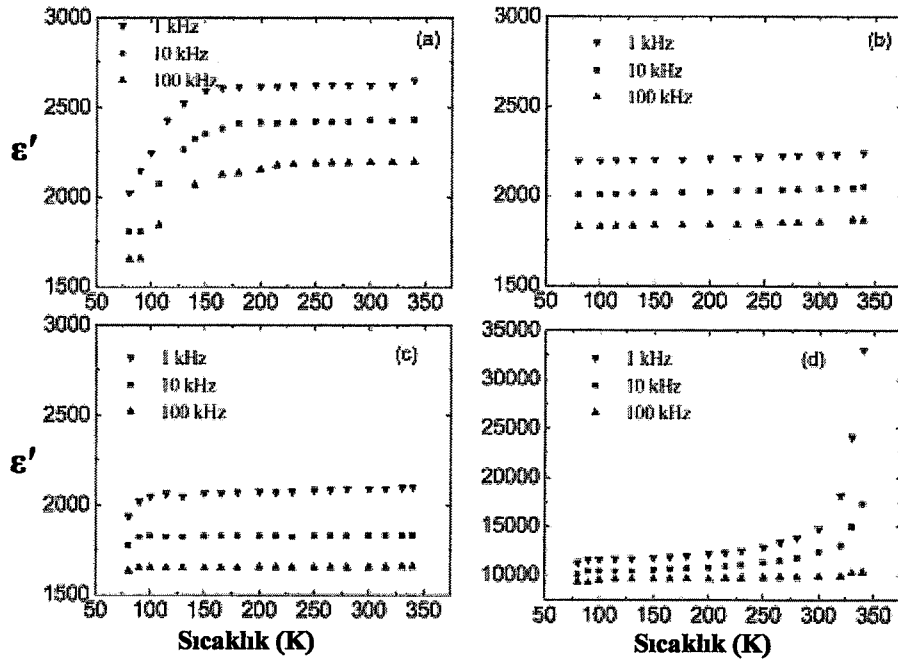
$$\varepsilon'' = \frac{kT}{e_0} \left[ \tan^{-1}(\omega \tau_2) - \tan^{-1}(\omega \tau_1) \right]$$

olarak ifade edilmektedir [37].

### 3.7. Farklı Malzemelerin Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi

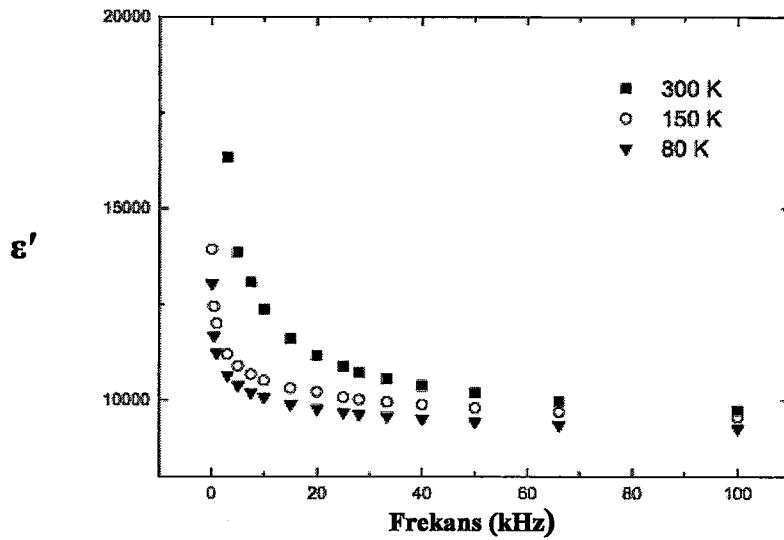
Malzemelerindielektrik özelliklerinin incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar, farklı frekanslar ve sıcaklıklar altında, farklı dielektrik ölçüm yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalar ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

PLD (Pulse-Laser Deposition) yöntemi ile hazırlanan  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ince filmlerinin dielektrik özellikleri, 0.1- 100 kHz frekans ve 77-350K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Bu malzemedan farklı kalınlıklarda dört örnek hazırlanmıştır. Alınan sonuçlara göre dağılım; yüksek frekanslarda yüklerin polarizasyonundan, alçak frekanslarda yüzeysel etkilerden etkilenmektedir. Kullanılan malzemenin dielektrik sabitinin ( $\varepsilon'$ ), farklı frekanslarda sıcaklığa bağlı değişim grafiği şekil 3.22'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi  $\varepsilon'$ , 100-300 K sıcaklık aralığında fazla bir değişiklik göstermemiştir. 4 numaralı numune, 300 K'de ve 1 kHz'de hızlı bir artış göstermiştir [43].

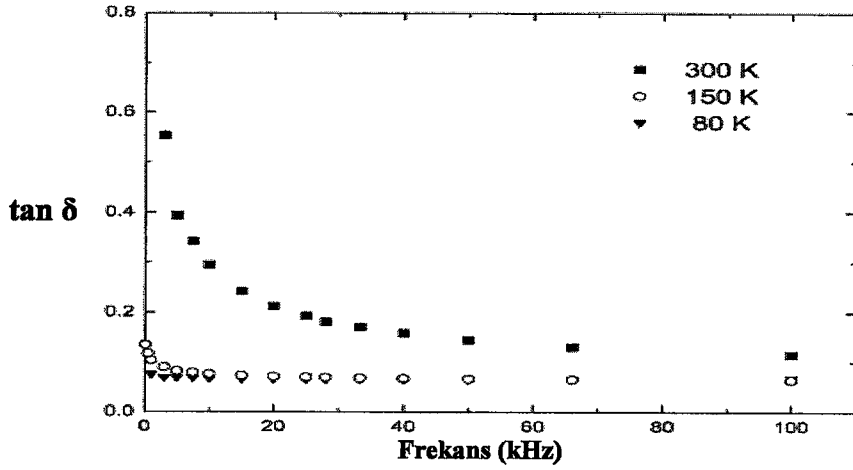


Şekil 3.22. (a) 1; (b) 2; (c) 3; (d) 4 nolu örneğin olmak üzere, farklı frekanslardaki  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  ince filmlerinin sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti değişimleri [43].

4 numaralı örneğin dielektrik sabitinin , farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi şekil 3.23'de; kayıp tanjantının frekansa göre değişimi şekil 3.24'de verilmiştir. Grafiklerden de görüldüğü gibi, düşük frekans bölgesinde  $\epsilon'$  , frekans arttıkça azalmaktadır.  $\tan\delta$ , frekans arttıkça azalmaktadır.  $\epsilon'$  nün, frekans arttıkça azalması ve artan sıcaklıkla artması yüzeysel polarizasyona bağlıdır. Bunun nedeni, elektrik alan altında yükler hareket ettiği zaman, dielektrik yüzeyinde yükler birikmektedir. Bunun sonucunda yüzeysel polarizasyon oluşmaktadır [6,43].

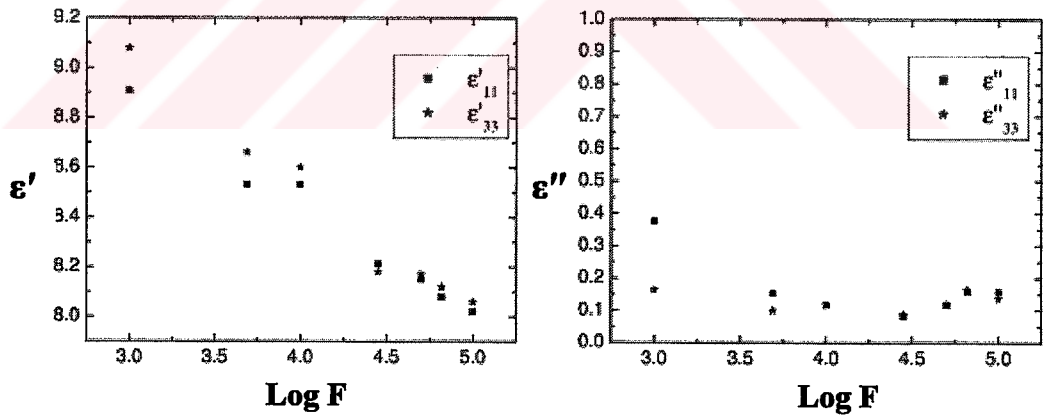


Şekil 3.23. 4 numaralı örneğin dielektrik sabitinin, farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi [43].



Şekil 3.24. 4 numaralı örneğin kayıp tanjantının, farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi [43].

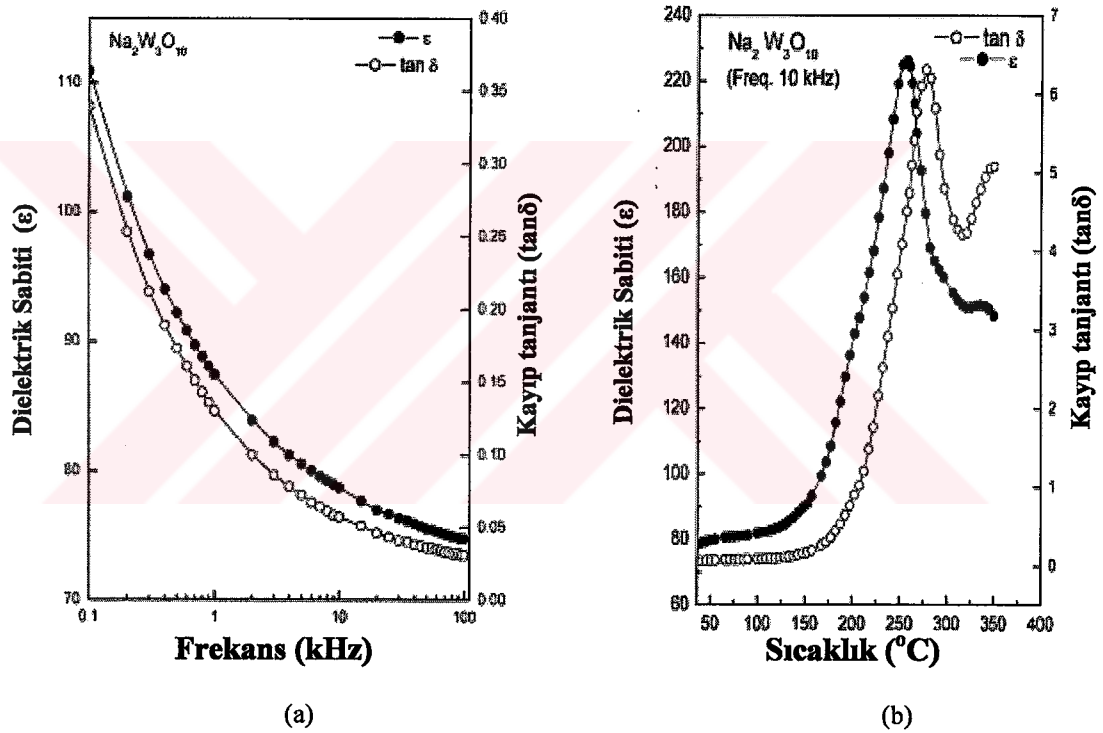
Galyum Arsenat ( $\text{GaAsO}_4$ )'ın dielektrik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda da aynı sonuçlar elde edilmiştir.  $\text{GaAsO}_4$ , quartz tipi piezoelektrik özelliği (Elektrik ve mekanik enerji değişimi) olan yeni bir malzemedir. Dielektrik sabiti artan frekansla azalırken, dielektrik kayıplarda değişiklik olmamıştır [44].



Şekil 3.25.  $\text{GaAsO}_4$  'ün dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıplarının, oda sıcaklığında frekansa göre değişimi [44].

$\text{Na}_2\text{W}_3\text{O}_{10}$  seramiğinin dielektrik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalarda, ölçümler HioKi 3532 LCR Hitester kullanılarak yapılmıştır. Bileşimin dielektrik sabiti ve kayıp tanjantı; oda sıcaklığında frekansın fonksiyonu, sabit bir frekansta (10kHz) sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar şekil 3.26'da

verilmiştir. Şekil 3.26. (a)'da, oda sıcaklığındaki dielektrik sabitinin ve kayıp tanjantının frekansla değişimi görülmektedir. İki parametrede, yükselen frekansla azalmaktadır. Bu, dielektriğin normal bir davranışdır ve polarizasyonların varlığından kaynaklanmaktadır. Yüksek frekanslarda bütün polarizasyon tipleri (Elektronik, dipolar, yüzeysel ve yönelme) mevcuttur [45]. Frekans ile ilgili benzer dielektrik davranışlar diğer ferroelektrik seramikler içinde bulunmuştur [45,46]. Şekil 3.26. (b)'de sabit frekansta, dielektrik sabitinin ve kayıp tanjantının sıcaklıkla değişimi görülmektedir.  $T=258^{\circ}\text{C}$ 'de dielektrik sabiti maksimum değerine ulaşmıştır ( $\epsilon_{\text{max}}=230$ ).  $\tan\delta$ 'da da bu sıcaklığa kadar bir artış gözlenmiştir [45].



Şekil 3.26. (a)  $\epsilon$  ve  $\tan\delta$ 'nın oda sıcaklığında frekans ile değişimi. (b)  $\epsilon$  ve  $\tan\delta$ 'nın 10 kHz'de sıcaklık ile değişimi [45].

RF (Radyo Frekansı) frekansında  $\text{SrBi}_2(\text{Nb}_{0.25}\text{Ta}_{0.75})_2\text{O}_9$  seramiğinin dielektrik özellikleri ve relaksasyonu üzerine bir çalışma yapılmıştır. 3-300 MHz frekans aralığında yapılan çalışmalarda seramiğin 300 MHz'de bağlı dielektrik sabiti  $\sim 117$  ve dielektrik kayıpları ise  $\sim 0.018$  olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre kullanılan seramiğin, mikrodalga uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür. Dielektrik ölçümler için, HP 4291B empedans analizörü

kullanılmıştır. Bu çalışma sonuçlarına göre, dielektrik sabiti 130°C'ye kadar yavaşça artmış, yüksek sıcaklıklarda ise hızlı bir artış göstermiştir [47].

Dengeli dielektrik özelliklere ve sıcaklığa sahip olan titanyum oksit (TiO<sub>2</sub>), yeni mikroelektrik cihazların ve mikrodalga iletişim sistemlerinin üretimindeki etkilerinden dolayı son zamanlarda dikkat çekmektedir. TiO<sub>2</sub>'nin dielektrik özellikleri, 20 Hz-1 MHz frekans aralığında incelenmiştir. Ölçümler; HP-16451B dielektrik test cihazı ve HP-4284A LCR metre ile yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, TiO<sub>2</sub>'nin yüksek bağıl dielektrik sabitine ( $\epsilon_r=12.3$ , 1 MHz'de) ve düşük dielektrik kayıplara ( $\tan\delta=2.3 \times 10^{-3}$ , 1 MHz'de) sahip olduğu görülmüştür [48].

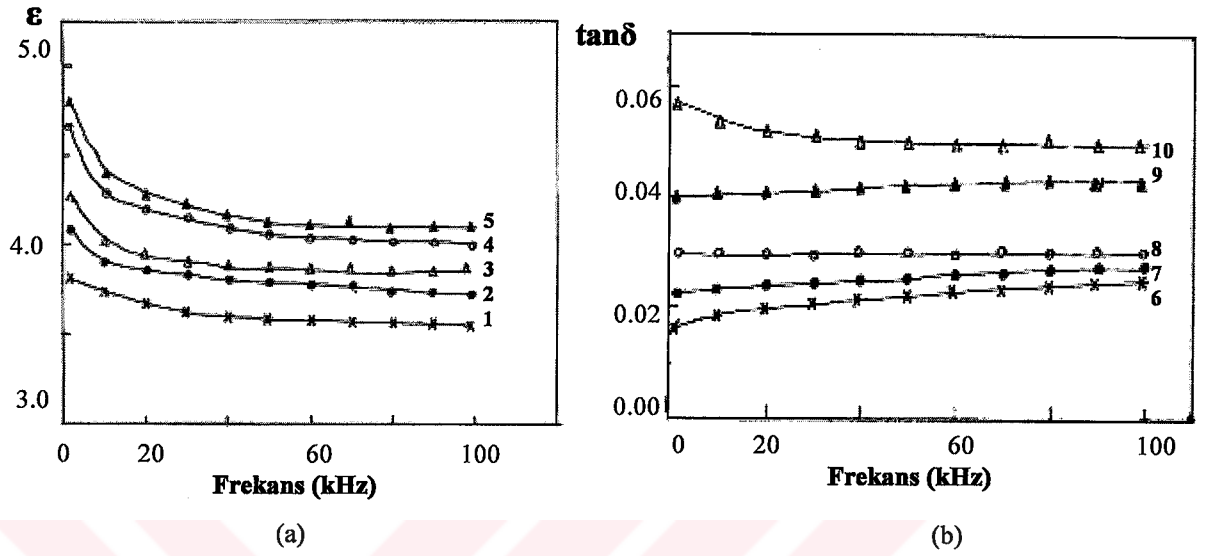
Plazma polarizeli pirol'den oluşan ince film kapasitörlerinin dielektrik özellikleri, 1 kHz-1MHz frekans ve 303-403K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Ölçümler HP 4192A Empedans Analizörü ile yapılmıştır. Frekans bölgesi ikiye bölünerek ölçüm sonuçları alınmıştır: Düşük frekans bölgesi (1-100kHz) ve yüksek frekans bölgesi (100kHz-1MHz).

Düşük frekans bölgesindeki dielektrik sabitinin ve kayıp tanjantının frekansa göre değişimi şekil 3.27 (a) ve (b)'de verilmiştir. Grafiktende görüleceği üzere dielektrik sabiti ve kayıp tanjantında, bütün frekanslarda sıcaklığın artmasıyla birlikte artış gözlenmiştir. Bu frekans bölgesinde kayıp tanjantı değişimlerinde relaksasyon etkisi gözlenmemiştir.

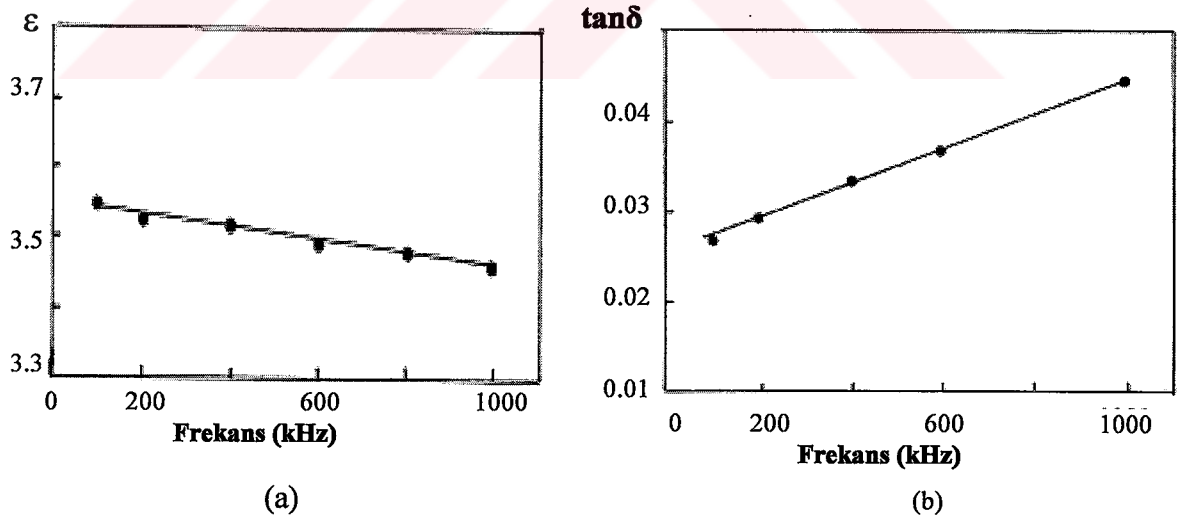
Yüksek frekans bölgesindeki dielektrik sabitinin ve kayıp tanjantının frekansa göre değişimi şekil 3.28(a) ve (b)'de verilmiştir. Dielektrik sabiti bu bölgede fazla bir değişiklik göstermemiştir. Kayıp tanjantı frekans ile artmış; fakat bu frekans bölgesinde kayıp tanjantı değişimlerinde relaksasyon etkisi gözlenmemiştir [49].

Yüksek sıcaklıklarda frekansdaki artışla birlikte dielektrik sabitinde azalma gözlenmiştir. Bu datalar burada bir yüzeysel polarizasyon olduğunu göstermektedir. Dielektrik malzemelerde, elektrik alan uygulandığında malzeme yüzeyinde hareket eden yükler olacaktır. Bunlar yüzey yükleridir. Yüzey yükleri elektrik alan uygulandığında, dielektrik yüzeyinde birikirler. Bu yüzeysel polarizasyondur[49]. Bu olay, düşük frekanslarda kapasitansı arttırmaktadır [50] . Sıcaklık ile dielektrik sabitinin artma nedeni, uygulanan

alanla birlikte moleküllerin dönmesinden dolayı düşük frekans bölgesindeki plazma polarizeli pirolün yapısındaki radikallerin de dönmesiyle birlikte polarizasyonun artmasıdır [49].



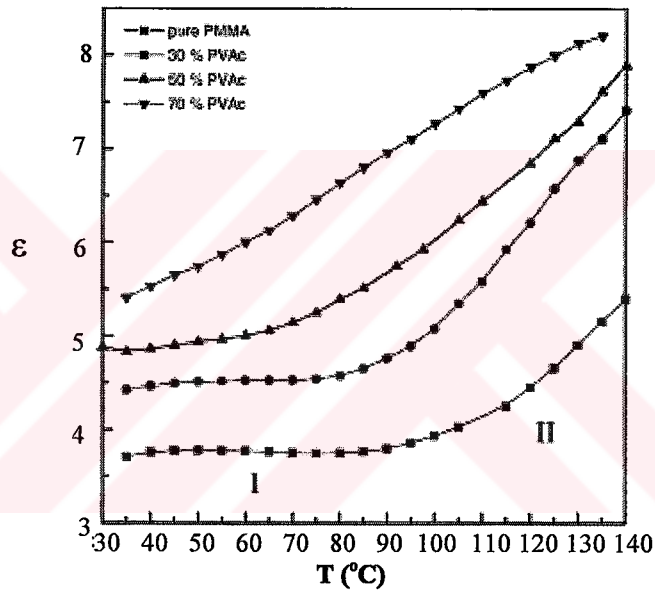
Şekil 3.27. (a) 1-100kHz frekans bölgesinde dielektrik sabitinin frekansla değişimi. 1- 303K, 2- 333K, 3- 363K, 4- 393K, 5- 423K. (b) 1kHz-1MHz frekans bölgesinde kayıp tanjantının frekansla değişimi. 6- 303K, 7- 333K, 8- 363K, 9- 393K, 10- 423K [49].



Şekil 3.28. 100 kHz-1MHz frekans aralığında (a) Dielektrik sabitinin, (b) Kayıp tanjantının frekansla değişimi [49].

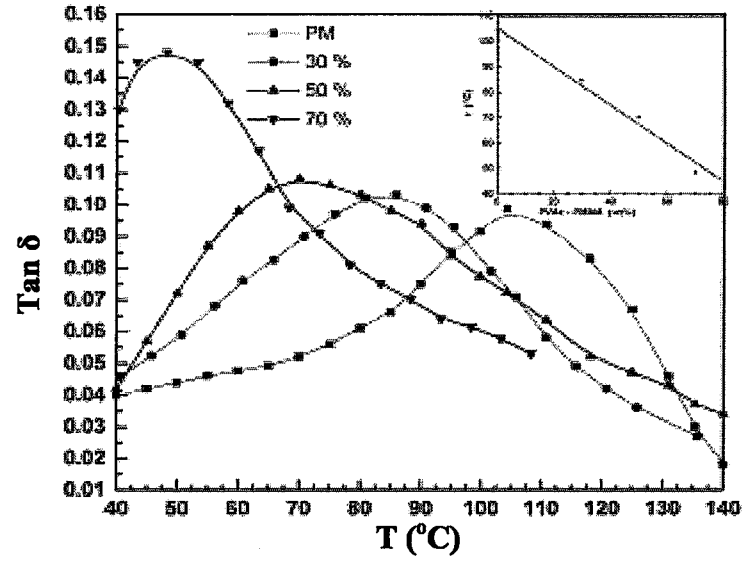


Saf PMMA (poly-metilmethakrilat) ve PVAc(poly-vinilasetat)/PMMA karışımlarının  $1.10^4$  Hz sabit frekansındaki dielektrik sabitinin sıcaklığa bağlı değişimi şekil 3.29’da verilmiştir. Grafik iki bölgede incelenmiştir. I.bölge  $T_g$ ’nin (Camsı geçiş sıcaklığı) altında, II. Bölge  $T_g$ ’nin üstündedir. Saf PMMA ve %30 PVAc’nin dielektrik sabiti I.bölgede sıcaklıkla değişmemiş, sabit kalmıştır [52]. II.bölgede sıcaklıkla birlikte bir artış gözlenmiştir.Bu davranış, zincir segmentlerinin hareketlerindeki artıştan dolayıdır [51]. %50 PVAc karışımının dielektrik sabitindeki artış, II.bölgede hızlı olmuştur. %70 PVAc iki bölgede de aynı oranda artmıştır [52].



Şekil 3.29. Saf PMMA ve PVAc/PMMA karışımlarının dielektrik sabitlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri ( $1.10^4$  Hz) [52].

Saf PMMA ve PVAc/PMMA karışımlarının  $1.10^4$  Hz sabit frekansındaki kayıp tanjantının sıcaklığa bağlı değişimi şekil 3.30’da verilmiştir. Grafiklerde görülen pikler, polimer zincirlerindeki segmentlerin yerel hareketlerinin neden olduğu relaksasyon frekanslarından kaynaklanmaktadır.  $\tan\delta$ ’daki piklerin giderek düşmesi, karışımlardaki PVAc içeriğinin artmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlara göre  $\tan\delta$ ’daki pikler yüksek sıcaklıklara doğru kaymıştır. Bu durumda dielektrik sabiti de artan frekansla azalmaktadır [52].



Şekil 3.30. Saf PMMA ve PVAc/PMMA karışımlarının kayıp tanjantının sıcaklığa bağlı değişimleri ( $1 \cdot 10^4$  Hz) [52].

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda, bazı polimerlerin dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansla değişimleri incelenmiştir.

### 4.1. Kullanılan Malzemeler

Deneyslerde polimer malzeme olarak PVC (poli vinilklorür), PE (Polietilen), silikon, EVA (Etilen vinilasetat) ve polyester kullanılmıştır. Bu malzemeler plastomer ve elastomerler olarak da bilinmektedir.

**Polietilen (PE):** Uzun zincirli doyurulmuş bir hidrokarbon olan polietilen esnektir ve mükemmel elektriksel özelliklere sahiptir. Dielektrik sabiti sadece 2.3 civarındadır, tüm frekanslarda güç faktörü % 0.03'tür, hem ac, hem de dc yalıtkan mukavemeti yüksektir ve yalıtkan direnci mükemmeldir [6].

**Poli vinilklorür (PVC):** Plastize edilmiş polivinil klorid izolasyon %6 ile %15 arasında değişen güç faktörlerine ve 4-8 arasında değişen dielektrik sabitlerine sahiptir. Yalıtkan mukavemeti mükemmeldir ve yalıtkan direnci tatminkardır. İzolasyonun kırılma noktası -50°C kadar düşüktür ve 80°C bile oldukça serttir. Termoplastik olduğundan ani darbelere karşı hassastır [6].

**Silikon:** Polimerlerin önemli bir sınıfını oluşturan silikon polimerleri, silisyum içerir. Silisyum, silikatlarda olduğu gibi -Si-O-Si-O-Si-O- zincirleri verebilen bir elementtir [2]. Elektriksel özellikleri sadece vasattır. Hem yüksek hem de düşük sıcaklıklarda kullanılmaktadır [6].

**Etilen vinilasetat (EVA):** Polimer tipi, termoplastiktir. Mükemmel ısı direncine sahiptir ve esnek bir yapısı vardır. Dielektrik sabiti 1 KHz'de 3.1'dir. Erime sıcaklığı 130-190 °C arasındadır [9].

**Polyester:** Polyester, iyi dielektrik özelliklerine ve yüksek yüzeysel dayanımına sahip olup kimyasal etkilere karşı dayanıklı bir malzemedir. Endüstriyel frekanslarda, polyesterin dielektrik kaybı çok düşüktür. Polyesterin dielektrik kayıpları sıcaklık arttıkça azalır [10].

#### 4.2. Test Edilen Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan numuneler, ilk önce %100'lük saf halleri ile, daha sonra çeşitli katkı maddeleri katılarak ölçüm işlemleri yapılmıştır. Kullanılan numuneler ve katkı yüzdeleri çizelge 4.1'de verilmiştir. Numuneler disk şeklinde plakalardan oluşmaktadır. Bu **plakaların çapı 9.2cm**(test cihazının elektrotlarının çapı 9.2 cm olduğu için), kalınlığı ise 1mm'den küçüktür. Herbir plakanın alanı:

$$A(\text{numunenin alanı}) = (9.2)^2 \cdot \pi / 4 \quad (4.1)$$

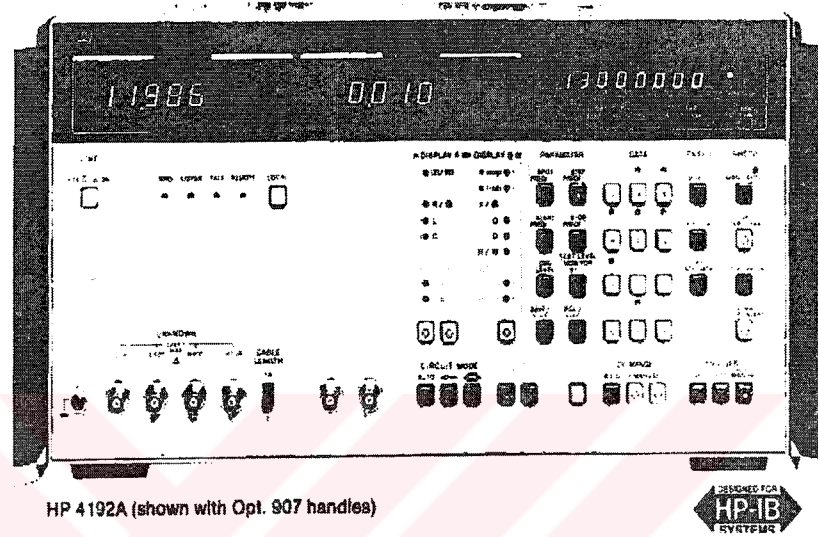
ifadesi ile hesaplanmıştır. Numune kalınlıkları, 0.001mm duyarlıkta kalınlık ölçen bir düzenle ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Kullanılan numuneler.

<b>PVC (poli vinilklorür)</b>	% 100	PVC
	% 15	Kalsit
<b>PE (Polietilen)</b>	% 100	PE
	% 15	Kalsit
<b>Silikon</b>	%100	Silikon
	%10	Perkasil
	%15	Perkasil
<b>EVA (Etilen vinilasetat)</b>	%100	EVA
	%15	Kaolin
<b>Polyester</b>	%100	Polyester

### 4.3. Test Yöntemi

Bu çalışmada dielektrik sabitlerinin ölçümünde, HP 4192A Empedans / Kazanç– Faz Analizörü test cihazı kullanılmıştır. Ortam şartlarının deney düzeneğine etkisi yoktur.



Şekil 4.1. HP 4192A Empedans / Kazanç– Faz Analizörü test cihazı

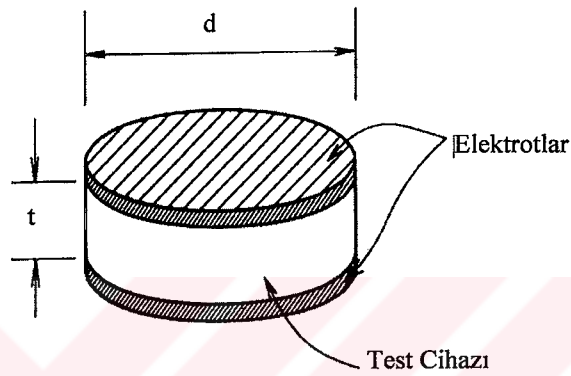
Dielektrik sabiti, katı malzemelerin ( Örneğin yalıtkanlar ve polimerler gibi) en önemli özelliklerinden biridir. Çünkü dielektrik sabiti ölçümleri, kimyasal analiz tekniklerinden daha kolaydır. HP 4192A Impedance / Gain – Phase Analyzer kullanılması, katı malzemelerin dielektrik sabitlerinin ölçülmesi için bir metottür.

Bu metotta, katı malzemelerin dielektrik sabitlerinin ölçümü, C (kapasitans) ve D (Kayıp faktörü) değerlerine dayanarak bulunmaktadır. Disk içine yerleştirilen katı malzemenin dielektrik sabiti, aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır (Şekil 4.2).

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r = (t/A) \cdot C \quad [\text{F/m}] \quad (4.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{t.C}{A.\epsilon_0} = \frac{t.C}{\pi.(d/2)^2.\epsilon_0} \quad (4.3)$$

- $\epsilon$  : Dielektrik sabiti  
 $\epsilon_0$  : Boşluğun dielektrik sabiti ( $8.854 \times 10^{-12}$ )  
 $\epsilon_r$  : Test cihazının bağlı dielektrik sabiti  
 $t$  : Numunenin kalınlığı [m]  
 $A$  : Numunenin alanı [ $m^2$ ]  
 $C$  : Numunenin kapasitansı [F]  
 $d$  : Numunenin çapı [m]



Şekil 4.2. Elektrotlu test cihazı.

Genellikle bağlı dielektrik sabiti  $\epsilon_r$ , ana parametredir ve “dielektrik sabiti” olarak bilinmektedir. Elektrik alan şiddeti, katı materyal boyunca değiştiği zaman polarizasyon değişimi elektrik alan değişiminde daha yavaştır. Bu da etki sonrası dielektrik olarak bilinmektedir ve zamanın bir fonksiyonu olarak şu şekilde ifade edilmektedir.

$$\phi(t) = (1/\tau) \cdot e^{-t/\tau} \quad (4.4)$$

Burada  $\tau$  dielektrik relaxasyon zamanı,  $t$  ise zamandır. Bu durumda dielektrik sabiti kompleks formda yazılacak olursa,

$$\epsilon^* = \epsilon' - \epsilon'' \quad (4.5)$$

$$\epsilon' = \epsilon_r \cdot \cos \delta = \frac{t \cdot C}{A \cdot \epsilon_0} \cdot \cos(\tan^{-1} D) \quad (4.6)$$

$$\varepsilon'' = \varepsilon_r \cdot \sin \delta = \frac{t.C}{A.\varepsilon_0} \cdot \sin(\tan^{-1} D) \quad (4.7)$$

$$\tan \delta = D = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (4.8)$$

- $\varepsilon^*$  : Kompleks dielektrik sabiti  
 $\varepsilon'$  : Kompleks dielektrik sabitinin reel kısmı  
 $\varepsilon''$  : Kompleks dielektrik sabitinin sanal kısmı  
 $\tan \delta$  : Dağılım (Kayıp) faktörü  
 $D$  : Test edilen numunenin dağılım faktörü

$\tau$ 'yu kullanarak da  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  hesaplanabilir.

$$\varepsilon' = \varepsilon_{r\infty} + (\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}) \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (\text{Debye Eşitliği}) \quad (4.9)$$

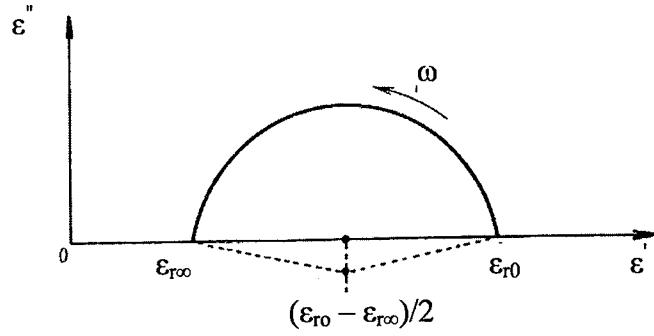
$$\varepsilon'' = (\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}) \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (\text{Debye Eşitliği}) \quad (4.10)$$

- $\varepsilon_{r0}$  : Frekansın sıfır olduğu durumdaki dielektrik sabiti  
 $\varepsilon_{r\infty}$  : Frekansın sonsuz olduğu durumdaki dielektrik sabiti

Bu denklemler göstermektedir ki,  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$  frekansın bir fonksiyonudur. Frekansa bağlı bu etki "Dielektrik dağılımı" adını alır. Aşağıda verilen denklemler, Debye eşitliğinden türetilir. Bu türetilen denklemlerin grafiği de Cole-Cole eğrisi olarak adlandırılır (Şekil 4.3).

$$\left( \varepsilon' - \frac{\varepsilon_{r0} + \varepsilon_{r\infty}}{2} \right)^2 + \varepsilon''^2 = \left( \frac{\varepsilon_{r0} - \varepsilon_{r\infty}}{2} \right)^2 \quad (4.11)$$

$\varepsilon_{r0}$  ve  $\varepsilon_r$ ,  $\varepsilon'$  ve  $\varepsilon''$ 'nin ölçülen değerlerini kullanarak Cole-Cole eğrisinden hesaplanır.



Şekil 4.3. Cole-Cole eğrisi.

HP 4192A, çeşitli nedenlerden kaynaklanan hataları (Test fikstürünün dağılma edmitansı ve kalıntı impedansı gibi), kompanzasyon fonksiyonunu kullanarak yok etmektedir. HP 4192A, C (Kapasitans) ve D (Kayıp faktörü) değerlerini hassas bir şekilde ölçebilmek için ASP (Auto Sequence Program) programını kullanır. Bu HP 4192A'nın iç programlama fonksiyonudur. Bu program sayesinde dielektrik sabiti hesaplanabilir. Dışardan bir bilgisayar kullanılarak Cole-Cole eğrileri ve frekans karakteristikleri çizdirilir.

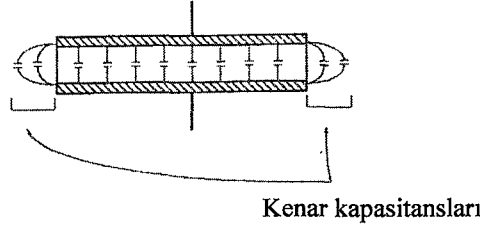
Bu yöntemle benzer bir yöntemde, HP 16451B Test Fikstürü cihazı kullanarak yapılan ölçüm yöntemidir. Bu yöntemde de HP LCR metre/Empedans kullanılarak C ve D değerleri ölçülür.

HP 16451B'nin temel özellikleri ve faydaları şunlardır:

- a) HP 16451B doğrudan 4-Terminal Çiftli ölçüm aletlerine bağlanabilir. Son zamanlarda empedans ölçüm cihazlarında benimsenen 4-Terminal Çiftli ölçüm metodu, geniş bir ölçüm aralığında doğru ölçümler sunar. Bununla birlikte katı malzemeler için 4-Terminal Çiftli, ölçüm aletlerine doğrudan bağlanabilen hiçbir test fikstürü yoktu. HP 16451B, doğru ölçümler için bu aletlere doğrudan bağlanabilir.
- b) Ölçüm hataları düzeltilebilir. Test fikstürünün dağılma (stray) admitansı ve kalıntı (residual) empedansı, dielektrik sabiti ölçümlerindeki hata kaynaklarıdır. HP 16451B bu ilave hata faktörlerini AÇIK/KISA (OPEN/SHORT) hata düzeltme fonksiyonu ile önleyebilir. Kenar kapasitansı bir başka hata kaynağıdır (Şekil



4.4). HP 16451B ayrıca korumalı bir elektrot (3-Teminal metodu) kullanarak kenar kapasitans hatasını da önleyebilir.



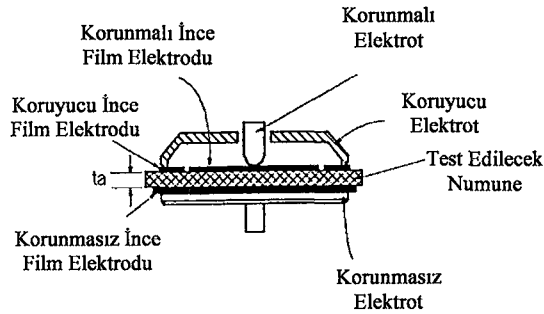
Şekil 4.4. Kenar kapasitansından kaynaklanan hatalar.

c) Kendi aralarında değiştirilebilen elektrotlara sahiptir. HP 16451B’de dört değişik elektrot bulunmaktadır, böylece test edilen malzeme için en iyi elektrot seçilebilir.

HP 16451B Test Fikstürü ile yapılan benzer bir ölçüm yöntemi şöyledir:

Temas Eden Elektrot Metodu (İnce Film Elektrot):

Bu metot C-D ölçüm sonuçlarını kullanarak dielektrik katsayısını türetir (Elektrotlar test edilen malzemenin yüzeyine uygulanan ince bir filme temas eder). Bu metot da dielektrik katsayısını türetmek için sadece bir ölçüme gerek duyar. İnce film elektrotları ölçümden önce uygulanmalıdır fakat bu metot yüzeyleri düzgün olmayan yada düşük bir sıkıştırılabilirliğe sahip olmayan malzemeler için kullanılabilir. Test edilen malzeme ile elektrotlar arasındaki hava boşluğundan kaynaklanan ölçüm hatası en aza indirilebilir. Elektrot-C ya da Elektrot-D kullanılmalıdır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Temas eden elektrot metodu.

Aşağıda verilen formüller dielektrik sabitini ve dağılım faktörünü türetmek için kullanılır.

$$\varepsilon_r = \frac{t_a \cdot C_p}{A \cdot \varepsilon_0} = \frac{t_a \cdot C_p}{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \varepsilon_0} \quad (4.12)$$

$$D_t = D \quad (4.13)$$

$C_p$  : Test numunesinin eşdeğer paralel kapasitansı [F]

$D$  : Test numunesinin dağılım faktörü (ölçülen değer)

$t_a$  : Test numunesinin ortalama kalınlığı [m]

$A$  : Korunmalı elektrodun alanı [m<sup>2</sup>]

$D$  : Korunmalı elektrodun çapı [m]

$\varepsilon_0$  : Boşluğun dielektrik sabiti ( $8.85 \times 10^{-12}$ ) [F/m]

$\varepsilon_r$  : Test numunesinin dielektrik sabiti

$D_t$  : Test numunesinin dağılım faktörü

#### 4.4. Kısa Devre Yöntemi Kullanarak Silikonun Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi

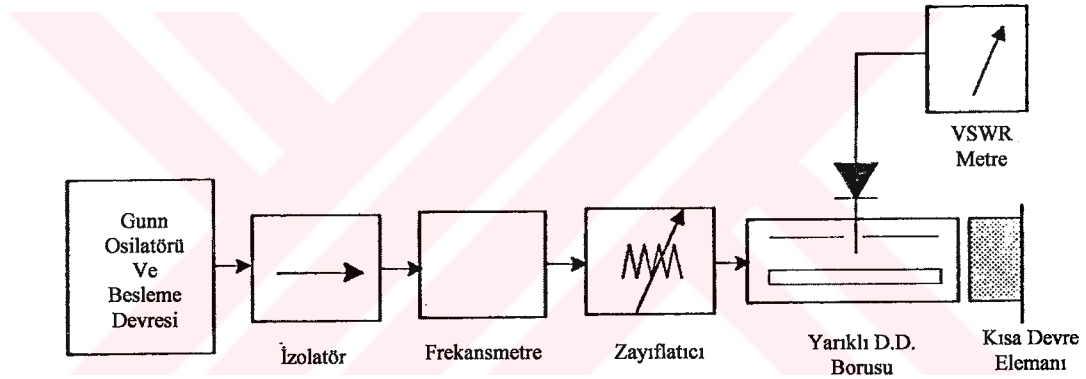
Bu çalışmaya, ilk önce bu yöntem incelenerek başlandı. Polimer malzeme olarak da üç çeşit silikon örneği kullanıldı. Ancak ölçme yöntemi çok hassas olmadığından ve diğer polimer malzemelerin (PVC, PE, EVA ve Polyester) dielektrik sabiti ölçümleri için bu yöntemi kullanmak zor olacağından diğer test yöntemi kullanılmıştır. Bu nedenle, bu yöntem sadece silikon için kullanılmıştır.

Tranmisyon hat veya dalga kılavuzu metotları içinde yer alan kısa devre yönteminde (veya Von Hippel metodu), malzeme dalga kılavuzunun sonunda yer alır. Böylece dalga kılavuzunun sonu kısa devre edilmiş olur. Bu nedenle ölçülecek büyüklükler yansıma katsayısını bulmaya yöneliktir.

Şekil 4.6'da kullanılan ölçme düzeneği görülmektedir. Ölçmeler, WR 90 tranmisyon borusu kullanılarak 8-12 GHz frekans aralığında yapılmıştır. Şekilde görülen Gunn osilatörü, bu frekans aralığında 1 KHz'de darbe modülasyonuna

tabi tutulmuş mikrodalga işareti üretir. İşaret, zayıflatıcı üzerinden isolatör yardımı ile “yarıklı duran dalga (DD)” borusuna iletilir. Bu borunu sonu kısa devredir ve boru içine kısa devre düzleminin önüne de arada boşluk kalmayacak şekilde “d” kalınlıklı malzeme yerleştirilmiştir.

Ölçmelerin ilki, tranmisyon borusu içinde malzeme varken, ikincisi de tranmisyon borusu boş olması durumunda yapılmaktadır. Hesaplamalar, d kalınlıklı malzeme yarıklı D.D borusunun sonuna yerleştirildiğinde oluşan duran dalga karakteristiğine ve bu durumda oluşan ilk minimumun, boru içinde malzeme olmadığı durumdaki minimuma göre kaymasına bağlıdır. Duran dalga oranı, hassas gerilim duran dalga oranı (VSWR) metre ile ölçülmekte ve minimumlar arası faz farkıda yarıklı D.D borusu üzerinden 0.01 mm hassasiyetle okunmaktadır.

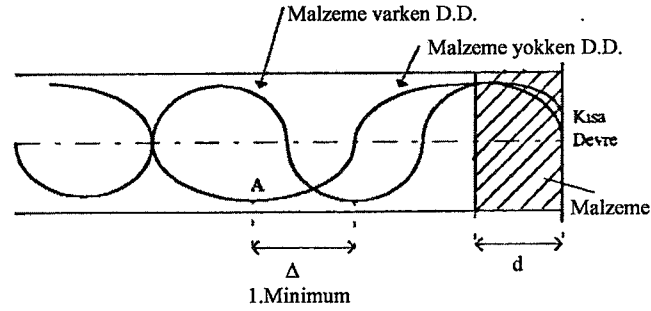


Şekil 4.6. Kısa devre yöntemi ile ölçme deney düzeneği.

Mikrodalga generatörü olarak, 1 KHz kare dalga modülasyonlu Gunn osilatörü kullanılmıştır. Ölçme düzeneğindeki diğer elemanlar X bandı standart mikrodalga devre elemanlarıdır.

Şekil 4.7’de sonu kısa devre transmisyon borusu (WR 90) gösterilmiştir. Boruda malzeme yok iken kısa devreden itibaren ilk minimumun yeri (A noktası) tespit edilir. Dalga kılavuzuna yerleştirilen malzemenin boyu  $d \leq \lambda_g/4$  olmalıdır. Şekil 4.7’de boru içine kısa devre düzleminin önüne d kalınlığında malzeme konulduğunda oluşan duran dalgalar gösterilmiştir. Daha sonra boru içine malzeme varken ilk minimum değeri ölçülür. Bu ik minimum ( malzeme varken

ve yok iken) arasındaki fark bize yüke doğru olan  $\Delta$  kayma miktarını verecektir. Transmisyon borusunda malzeme varken, ilk maksimum ve ilk minimum noktalarındaki akım değerleri ölçülerek, duran dalga oranı hesaplanabilir.



Şekil 4.7. Boru içinde oluşan duran dalgalar.

Duran dalga oranı aşağıda verilen eşitlikle hesaplanır:

$$DDO = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}} \quad (4.14)$$

Ölçülen bu değerlerle dielektrik sabiti ve kayıp faktörü şu şekilde bulunabilir:

$$\epsilon'_r = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0 \cdot x}{2\pi \cdot d}\right)^2 \quad (4.15)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{\pi S} \cdot \frac{\epsilon'_r - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}{\epsilon'_r} \cdot \frac{4\pi}{\frac{\sin 4\pi U}{2x} - 1} \quad (4.16)$$

Burada  $U = (\Delta + d) / \lambda_g$ ,  $\lambda_g$  boru dalga boyu,  $\lambda_0$  boşluğun dalga boyu,  $\lambda_c$  dalga kılavuzunun kesim dalga boyu, S dielektrik özellikleri belirlenecek malzeme yarıklı duran dalga borusunun sonuna yerleştirildiği durumdaki dalga boyu ve  $\Delta$  minimumun kayma miktarıdır.

(4.16) eşitliğindeki x, aşağıda verilen ifadeden hesaplanabilir:

$$\frac{\tan x}{x} = \frac{1}{2\pi \frac{d}{\lambda_g}} \cdot \tan 2\pi U \quad (4.17)$$

Bu denklemin çözüümü,  $\tan(x)/x$  tablosundan veya Newton metodu ile yapılabilir.



## 5. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Silikon, PVC (Poli vinilklorür), PE (Poli etilen), EVA (Etilen vinilasetat) ve polyester'in dielektrik özelliklerinin ( $\epsilon_r$ , D-kayıp faktörü ve  $\tan\delta$ -kayıp tanjantı) frekans ve sıcaklık ile değişimlerini incelemek amacıyla yapılan test sonuçları aşağıda verilmiştir.

### 5.1. HP 4192A Empedans / Kazanç – Faz Analizörü Test Cihazı İle Yapılan Deney Sonuçları

#### 5.1.1. Silikon

Silikon, ilk önce %100 saf haliyle, daha sonra içine %10 ve %15 oranlarında perkasil katılarak incelenmiştir. Bu testin sonuçları aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir:

Çizelge 5.1. % 100 Silikonun test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	$C_x$ (pF)	$C_0$	$\epsilon_r$	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,020000	188,550	62,3674	3,023	0,0066154800
500 Hz	0,001050	179,770	62,3674	2,882	0,0003642755
1 KHz	0,001040	179,740	62,3674	2,882	0,0003608664
5 KHz	0,000550	179,400	62,3674	2,877	0,0001912045
10 KHz	0,000080	179,350	62,3674	2,876	0,0000278193
50 KHz	Rezonans	179,250	62,3674	2,874	
100 KHz	Rezonans	178,750	62,3674	2,866	
500 KHz	Rezonans	178,710	62,3674	2,865	
1 MHz	Rezonans	176,780	62,3674	2,834	

Çizelge 5.2. % 10 perkasil katkılı silikonun test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	C <sub>x</sub> (pF)	C <sub>0</sub>	ε <sub>r</sub>	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,004	180	58,5257	3,076	0,0013005705
500 Hz	0,00348	176,1	58,5257	3,009	0,0011565550
1 KHz	0,003375	175,885	58,5257	3,005	0,0011230301
5 KHz	0,003012	175,331	58,5257	2,996	0,0010054088
10 KHz	0,002845	175,084	58,5257	2,992	0,0009510037
50 KHz	0,002054	174,568	58,5257	2,983	0,0006886241
100 KHz	0,000835	174,36	58,5257	2,979	0,0002802761
500 KHz	0,00025	174,18	58,5257	2,976	0,0000840017
1 MHz	0,0064	171,32	58,5257	2,927	0,0021863431

Çizelge 5.3. % 15 perkasil katkılı silikonun test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	C <sub>x</sub> (pF)	C <sub>0</sub>	ε <sub>r</sub>	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,0072	194,186	54,7528	3,547	0,0020301166
500 Hz	0,00556	190,54	54,7528	3,48	0,0015976992
1 KHz	0,00524	190,13	54,7528	3,473	0,0015089924
5 KHz	0,00467	189,17	54,7528	3,455	0,0013516711
10 KHz	0,00441	188,773	54,7528	3,448	0,0012791018
50 KHz	0,00346	187,93	54,7528	3,432	0,0010066033
100 KHz	0,00227	187,53	54,7528	3,425	0,0006613081
500 KHz	0,00199	187,003	54,7528	3,415	0,0005814831
1 MHz	0,0064	187,67	54,7528	3,428	0,0018672029

Yukarıdaki çizelgelerde görülen C<sub>0</sub> kapasitesi, cihazın referans aldığı kapasitedir. Boşluğun kapasitansı olarak kabul edilir ve dielektrik sabiti (ε<sub>r</sub>) 1'dir. Cihaz bu değeri referans kabul ediyor ve malzemenin bağıl dielektrik sabitini ölçerken, C<sub>x</sub> değerini bu referans kapasiteye göre ölçüyor. C<sub>0</sub> kapasitans değeri şu şekilde bulunmaktadır:

$$C_0 = 0.088542 \cdot \frac{A}{t} \quad (5.1)$$

D kayıp faktörü de cihaz ölçüm sonuçlarından elde ediliyor. Ölçümlerle ilgili hesaplamalar dördüncü bölümde verilmiştir. Kullanılan malzeme plakaları ile ilgili özellikler aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 5.4. %100 silikon test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	2,14E+12	2,30E+12	2,80E+12	2,50E+12	3,50E+12

Ölçülen Direnç	2,69E+12 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00944 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Öz direnç ( $\rho_v$ )	1,90E+15 ohm.cm

Çizelge 5.5. % 10 perkasil katkıli silikon test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	2,40E+12	2,30E+12	2,45E+12	2,70E+12	3,30E+12

Ölçülen Direnç	2,58E+12 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,01006 mm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Öz direnç ( $\rho_v$ )	1,70E+15 ohm.cm

Çizelge 5.6. %15 perkasil katkıli silikon test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	2,02E+12	2,12E+12	3,20E+12	3,20E+12	3,17E+12



Ölçülen Direnç	2,87E+12 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,01075 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Öz direnç ( $\rho_v$ )	1,78E+15 ohm.cm

Direnci ölçebilmek için, 50 V'dan 1000V'a kadar voltaj veriliyor ve hepsinden bir değer alınıyor. Sonuç olarak bunların ortalaması alınarak, bu değer direnç değeri olarak kabul ediliyor. Bu da yaklaşık 250V'daki direnç değeridir. Plakalar 9.2 cm çapında disk şeklinde olduğundan, A alanı eşitlik (4.1)'den hesaplanmaktadır. Öz direnç  $\rho_v$  ise aşağıda verilen eşitlikten hesaplanmıştır:

$$\rho_v = R \cdot \frac{A}{L} \quad (5.2)$$

Buradaki L ,plakanın kalınlığıdır. Dielektrik sabiti ise,

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (5.3)$$

ifadesinden hesaplanır. Bu sonuçlara göre silikonun D kayıp faktörü grafiği şekil 5.1'de,  $\epsilon_r$  grafiği şekil 5.2'de ve kayıp tanjantı grafiği şekil 5.3'de verilmiştir.

**D Kayıp Faktörü Grafiği:** Saf silikon 500 Hz'in altında hızlı bir düşüş göstermiştir. Bu düşme eğilimi, katkılı silikondan oldukça hızlıdır. 500 Hz–10 KHz arasında ise dielektrik kayıplar değişmemiştir. Ancak 500Hz'de, % 10 perkasil katkısı, dielektrik kayıpları 0.00105'den ~0.004'e, % 15 perkasil katkısı ise dielektrik kayıpları ~0.00556'ya yükseltmiştir.. Saf silikon malzemenin dielektrik sabiti, katkılılardan daha düşük olduğundan, dielektrik kayıpları da düşüktür.

**$\epsilon_r$  Grafiği:** 500Hz'in altında dielektrik sabiti bir düşüş göstermektedir. Yaklaşık olarak 3.023'den 2.882'ye düşmüştür. 500 Hz–500 KHz arasında ise dielektrik sabiti değişmemiş, sabit kalmıştır. 500KHz'in üstünde ise dielektrik sabitinde tekrar bir düşme görülmüştür. % 10 perkasil katılmasıyla, dielektrik sabitinde bir yükselme olmuştur. 50 Hz'de 3.023'den 3.076'ya çıkmıştır. 500Hz ile 500 KHz arasında sabit kalmış, saf silikona göre yaklaşık %4.4 kadar bir artış gözlenmiştir. 500KHz'in üstünde ise dielektrik sabiti düşmeye başlamıştır. % 15 perkasil katkısı, dielektrik sabitini saf silikona göre yaklaşık %20.74 arttırmıştır. %10 perkasil katkılı silikon göre ise ~%15 artış olmuştur. 500KHz'in üstünde ise dielektrik sabitinde bir yükselme gözlenmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur. Çünkü dielektrik sabiti, frekans arttıkça azalmaktadır.

**Kayıp Tanjantı Grafiği:** 500KHz'de saf silikonun kayıp tanjantı grafiğinde peak gözlenmiştir. Çünkü bu frekansda  $\epsilon_r$  değerinde bir düşüş söz konusudur. %10 perkasil katkısıyla, kayıplar 500Hz'de ~0.00036'dan 0.00155'e, %15 perkasil katkısı ise kayıpları 0.00159'a çıkarmıştır. 500KHz'den sonra  $\epsilon_r$  tekrar düşmeye başladığından, hem %10 perkasil katkılı silikon hem de %15 perkasil katkılı silikon kayıp tanjantında tekrar bir pik oluşmuştur. 500Hz-500KHz arasında her üç malzemedede de kayıplar sabit kalmış, değişmemiştir. Tan  $\delta$ 'nın en yüksek olduğu yer, dielektrik sabitinin en hızlı düştüğü yerdir.

### 5.1.2. PVC

Aşağıdaki çizelgelerde ise, saf PVC ve %15 kalsit katkılı PVC'nin test sonuçları ile test plakalarının özellikleri verilmiştir

Çizelge 5.7. %100 PVC'nin test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	C <sub>x</sub> (pF)	C <sub>0</sub>	ε <sub>R</sub>	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,078000	200,000	62,0388	3,224	0,0241951145
500 Hz	0,075660	176,975	62,0388	2,853	0,0265226852
1 KHz	0,077490	171,310	62,0388	2,761	0,0280624782
5 KHz	0,080350	158,050	62,0388	2,548	0,0315394747
10 KHz	0,078910	152,420	62,0388	2,457	0,0321183452
50 KHz	0,069310	140,765	62,0388	2,269	0,0305466992
100 KHz	0,060500	136,450	62,0388	2,199	0,0275071065
500 KHz	0,016300	128,550	62,0388	2,072	0,0078664466
1 MHz	Rezonans	126,710	62,0388	2,042	

Çizelge 5.8. %15 kalsit katkılı PVC'nin test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	C <sub>x</sub> (pF)	C <sub>0</sub>	ε <sub>R</sub>	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,062000	239,150	55,4622	4,312	0,0143786617
500 Hz	0,067200	216,150	55,4622	3,897	0,0172429351
1 KHz	0,069500	209,720	55,4622	3,781	0,0183798565
5 KHz	0,073200	194,645	55,4622	3,510	0,0208576315
10 KHz	0,073100	188,260	55,4622	3,394	0,0215355756
50 KHz	0,067200	174,625	55,4622	3,149	0,0213432236
100 KHz	0,061500	169,500	55,4622	3,056	0,0201234562
500 KHz	0,037800	160,150	55,4622	2,888	0,0130906743
1 MHz	0,019400	157,820	55,4622	2,846	0,0068176837

Çizelge 5.9. %100 PVC test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	4,00E+10	3,80E+10	3,50E+10	3,40E+10	3,30E+10

Ölçülen Direnç	35,71E+9 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00949 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Öz direnç (ρ <sub>v</sub> )	2,50E+13 ohm.cm

Çizelge 5.10. %15 kalsit katkılı PVC test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	2,95E+10	2,85E+10	2,80E+10	2,73E+10	2,69E+10

Ölçülen Direnç	28,03E+9 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,01061 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Özdirenç ( $\rho_v$ )	1,76+ 13 ohm.cm

Bu sonuçlara göre PVC'nin D kayıp faktörü grafiği şekil 5.4'de,  $\epsilon_r$  grafiği şekil 5.5'de ve kayıp tanjantı grafiği şekil 5.6'da verilmiştir.

**D Kayıp Faktörü Grafiği:** Saf PVC'de 50Hz- 500Hz arasında dielektrik kayıplarda bir düşüş varken, 500Hz-5KHz arasında bir yükselme gözlenmektedir. 5KHz'den sonra tekrar düşmeye başlamıştır. 100KHz'den itibaren ise hızlı bir düşüş gözlenmiştir. Azalma oranı 10KHz-500KHz arasında yaklaşık % 79.84'dur. 100KHz'de sonra bu hızlı düşüş devam etmiştir. %15 kalsit katkısı, kayıpları ~%11 kadar azaltmıştır.%15 kalsit katkılı PVC'de dielektrik kayıplar10KHz'e kadar artmış, bu frekansdan sonra düşmeye başlamıştır. Katkılı durumda da 100KHz'den sonra dielektrik kayıplarda hızlı bir düşüş başlamıştır, ama saf PVC'ye oranla bu düşüş daha yavaştır. Bu durumdaki azalma oranı %49'dur.

**$\epsilon_r$  Grafiği:** Saf PVC'nin dielektrik sabiti 50Hz'de 3.224 iken, %15 kalsit katkısı ile 4.312'ye çıkmıştır. Bu durumda ~%33'lük bir artış olmuştur. Frekans arttıkça her iki durumda da, dielektrik sabitinde sürekli bir düşme gözlenmektedir. Düşme eğilimi saf PVC'de olduğu gibi, %15 kalsit katkılı PVC'de de aynı orandadır. 1MHz'de saf PVC'nin dielektrik sabiti 3.224'den 2.042'ye, %15 kalsit katkılı PVC'de 4.312'den 2.846'ya düşmüştür. 1 MHz'de

%15 kalsit katkılı PVC'nin dielektrik sabiti, saf PVC'ye göre ~%39 artmıştır. Her iki durumda da dielektrik sabitinin düşme oranı % 7 ile %11 arasındadır.

**Kayıp Tanjantı Grafiği:** Grafikten de görüleceği gibi, %15 kalsit katkısı dielektrik kayıpları azaltmıştır. Azalma oranı yaklaşık olarak % 40'dır. Saf PVC'de kayıp tanjantı yaklaşık olarak 10KHz'e kadar artmış, daha sonra düşmeye başlamıştır. %15 kalsit katkılı PVC'de de aynı durum gözlenmektedir. Saf PVC'de 10KHz'de azalma oranı ~%71 iken, %15 kalsit katkılı PVC'de %3.4'dür.

### 5.1.3. Polietilen

Aşağıdaki çizelgelerde ise, saf PE ve %15 kalsit katkılı PE'nin test sonuçları ile test plakalarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.11. %100 PE'nin test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	C <sub>x</sub> (pF)	C <sub>0</sub>	ε <sub>r</sub>	Kayıp tanjantı
50 Hz	Rezonans	189,000	63,8041	2,962	
500 Hz	0,015110	182,590	63,8041	2,862	0,0052800248
1 KHz	0,015570	181,393	63,8041	2,843	0,0054766701
5 KHz	0,016950	178,420	63,8041	2,796	0,0060614239
10 KHz	0,017095	176,979	63,8041	2,774	0,0061630524
50 KHz	0,013650	174,110	63,8041	2,729	0,0050021582
100 KHz	0,010290	172,900	63,8041	2,710	0,0037972472
500 KHz	Rezonans	170,800	63,8041	2,677	
1 MHz	Rezonans	Rezonans	63,8041		

Çizelge 5.12. %15 kalsit katkılı PE'nin test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	$C_x$ (pF)	$C_0$	$\epsilon_r$	Kayıp tanjantı
50 Hz	Rezonans	190,000	58,9772	3,222	0,0043444030
500 Hz	0,012790	173,630	58,9772	2,944	0,0043925931
1 KHz	0,012860	172,665	58,9772	2,928	0,0045705486
5 KHz	0,013195	170,265	58,9772	2,887	0,0042691895
10 KHz	0,012245	169,160	58,9772	2,868	0,0012879286
50 KHz	0,003640	166,684	58,9772	2,826	
100 KHz	Rezonans	165,698	58,9772	2,810	
500 KHz	Rezonans	164,320	58,9772	2,786	
1 MHz	Rezonans	Rezonans	58,9772		

Çizelge 5.13. %100 PE'nin test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	9,80E+12	1,80E+13	1,30E+13	6,30E+12	8,34E+12

Ölçülen Direnç	11,63E+12 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00923 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Özdirenç ( $\rho_v$ )	8,38E+ 15 ohm.cm

Çizelge 5.14. %15 kalsit katkılı PE'nin test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	1,32E+13	1,35E+13	5,15E+12	6,04E+12	5,08E+12

Ölçülen Direnç	7,61E+12 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00998 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Özdirenç ( $\rho_v$ )	5,07+ 15 ohm.cm

Bu sonuçlara göre PE D- kayıp faktörü grafiği şekil 5.7’de,  $\epsilon_r$  grafiği şekil 5.8’de ve kayıp tanjantı grafiği şekil 5.9’da verilmiştir.

**D Kayıp Faktörü Grafiği:** Her iki durum içinde dielektrik kayıplar 10KHz’e kadar bir artış göstermiş, bu frekansdan sonra azalmaya başlamıştır. Dielektrik kayıplardaki artış oranı %15 kalsit katkılıya göre daha fazladır. %15 kalsit etkisi dielektrik kayıpları yaklaşık %15.35 azaltmıştır. Dielektrik kayıplardaki azalma oranı, saf polietilende daha yavaşken, %15 kalsit katkılıda daha hızlıdır. Bu oran saf polietilende %39 iken, %15 kalsit katkılıda %70dir.

**$\epsilon_r$  Grafiği:** Her iki durumda da dielektrik sabiti, 500Hz’in altında hızla düşme eğilimi göstermektedir. Azalma oranı %15 kalsit katkılı PE’de daha büyüktür. Saf PE %3.3’lük bir azalma gösterirken, %15 kalsit katkılı PE %8.6’lık bir azalma göstermiştir. Frekans arttıkça, her iki durumda da dielektrik sabiti düşmeye devam etmiştir. Düşme oranı iki durum içinde yaklaşık olarak aynıdır. %15 kalsit katkısı, saf PE’nin dielektrik sabitini arttırmıştır. 500KHz’de saf PE’nin dielektrik sabiti 2.862 iken, %15 kalsit katkılı PE’nin dielektrik sabiti 2.944’e çıkmıştır. Yaklaşık olarak % 2.86 artmıştır.

**Kayıp Tanjantı Grafiği:** Grafikten de görüleceği gibi, %15 kalsit katkısı dielektrik kayıpları azaltmıştır. Azalma oranı yaklaşık olarak % 17’dir. Saf PE’de kayıp tanjantı yaklaşık olarak 10KHz’e kadar artmış, daha sonra düşmeye başlamıştır. %15 kalsit katkılı PE’de de aynı durum gözlenmektedir. Saf PE’de 10KHz’de azalma oranı % 38 iken, %15 kalsit katkılı PE’de % 69’dur.

#### 5.1.4. EVA

Aşağıdaki çizelgelerde ise, saf EVA ve %15 kalsit katkılı EVA’nın test sonuçları ile test plakalarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.15. %100 EVA'nın test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	$C_x$ (pF)	$C_0$	$\epsilon_r$	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,017000	430,000	65,2180	6,593	0,0025783871
500 Hz	0,026500	406,600	65,2180	6,234	0,0042505600
1 KHz	0,030500	402,250	65,2180	6,168	0,0049450586
5 KHz	0,049250	387,450	65,2180	5,941	0,0082900705
10 KHz	0,060500	377,950	65,2180	5,795	0,0104397158
50 KHz	0,078200	349,145	65,2180	5,354	0,0146072539
100 KHz	0,078300	335,800	65,2180	5,149	0,0152071813
500 KHz	0,048500	308,195	65,2180	4,726	0,0102632239
1 MHz	0,010600	300,050	65,2180	4,601	0,0023039863

Çizelge 5.16. %15 Kaolin katkılı EVA'nın test sonuçları.

Frekans	D Kayıp Faktörü	$C_x$ (pF)	$C_0$	$\epsilon_r$	Kayıp tanjantı
50 Hz	0,023000	325,000	60,9152	5,335	0,0043109187
500 Hz	0,029800	306,490	60,9152	5,031	0,0059227761
1 KHz	0,033200	302,540	60,9152	4,967	0,0066846802
5 KHz	0,052800	292,280	60,9152	4,798	0,0110042432
10 KHz	0,064400	284,850	60,9152	4,676	0,0137719361
50 KHz	0,080900	262,450	60,9152	4,308	0,0187770473
100 KHz	0,080300	252,430	60,9152	4,144	0,0193775977
500 KHz	0,050200	231,400	60,9152	3,799	0,0132149559
1 MHz	0,012200	225,290	60,9152	3,698	0,0032987034

Çizelge 5.17. %100 EVA'nın test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>Rizolasyon</b>	1,08E+10	1,08E+10	1,08E+10	1,08E+12	1,08E+10

Ölçülen Direnç	10,79E+9 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00903 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Özdirenç ( $\rho_v$ )	7,95E+12 ohm.cm



Çizelge 5.18. %15 Kaolin katkılı EVA'nın test plakasının özellikleri.

	50 V	100 V	250 V	500 V	1000 V
<b>R<sub>izolasyon</sub></b>	1,14E+10	1,14E+10	1,13E+10	1,13E+12	1,13E+10

Ölçülen Direnç	11,37E+9 ohm
Çap	9,2 cm
Ortalama kalınlık t (thickness)	0,00966 cm
Hesap Alan A	66,48 cm <sup>2</sup>
R Özdirenç ( $\rho_v$ )	7,82E+12 ohm.cm

Bu sonuçlara göre EVA D- kayıp faktörü grafiği şekil 5.10'da,  $\epsilon_r$  grafiği şekil 5.11'de ve kayıp tanjantı grafiği şekil 5.12'de verilmiştir.

**D Kayıp Faktörü Grafiği:** Saf EVA ve %15 kaolin katkılı EVA'nın kayıp faktörü grafikleri aynı değişimleri göstermektedir. Dielektrik kayıplar 50KHz'e kadar artmış, 50KHz-100KHz arasında değişmemiş, 100KHz'den sonra hızlı bir düşüş göstermiştir. %15 kaolin katkısı dielektrik kayıpları % 35.29 arttırmıştır. Saf EVA'nın dielektrik sabiti, katkılılardan daha büyük, dielektrik kayıpları da düşüktür. Düşme oranı her iki durumda da yaklaşık olarak aynıdır. Bu oran saf EVA'da % 86 iken, %15 kaolin katkılıda %84.80'dir.

**$\epsilon_r$  Grafiği:** Saf EVA ve %15 kaolin katkılı EVA'nın dielektrik sabiti, frekans arttıkça azalmıştır. Azalma, her iki durumda da yaklaşık olarak aynı orandadır. Saf EVA'nın azalma oranı (50Hz-500KHz arasında) %28.31 iken, %15 kaolin katkılı EVA'nın azalma oranı %28.79'dur. Ancak 500KHz'den sonra %15 kaolin katkılı EVA'nın dielektrik sabiti hızla yükselmiştir. Bu istenmeyen bir durumdur. 50Hz'de saf EVA'nın dielektrik sabiti 6.593 iken, %15 kaolin katkılı EVA'nın dielektrik sabiti 5.335'dir. %15 kaolin katkısı EVA'nın dielektrik sabitini yaklaşık olarak % 19.08 azaltmıştır.

**Kayıp Tanjantı Grafiği:** Saf EVA ve %15 kaolin katkıli EVA'nın kayıp tanjantı grafikleri aynı değişimleri göstermektedir. Kayıp tanjantı her iki durum içinde 100KHz'e kadar artmış, 50KHz-100KHz arasında fazla bir değişiklik göstermemiştir. 100KHz'den sonra hızlı bir düşüş göstermiştir. %15 kaolin katkısı kayıp tanjantını % 67.19 arttırmıştır. Düşme oranı her iki durumda da yaklaşık olarak aynıdır. Bu oran saf EVA'da % 84.84 iken, %15 kaolin katkıli %82.98'dir.  $\tan \delta$ 'nın en yüksek olduğu yer, dielektrik sabitinin en hızlı düştüğü yerdir.

#### **Silikon, PVC, PE ve EVA'nın dielektrik özelliklerinin karşılaştırılması:**

Aşağıdaki çizelgede ise, %100 silikon, %100PVC, %PE ve %100EVA'nın kayıp faktörleri, dielektrik sabitleri ve kayıp tanjantı değerleri karşılaştırmak amacı ile verilmiştir. D- kayıp faktörleri grafiği şekil 5.13'de,  $\epsilon_r$  grafiği şekil 5.14'de ve kayıp tanjantı grafiği şekil 5.15de verilmiştir.

Çizelge 5.19. %100 silikon, %100PVC, %PE ve %100 EVA'nın kayıp faktörleri .

<b>Frekans</b>	<b>%100silikon</b>	<b>%100 PVC</b>	<b>%100 PE</b>	<b>%100 EVA</b>
50 Hz	0,020000	0,078000		0,017000
500 Hz	0,001050	0,075660	0,015110	0,026500
1 KHz	0,001040	0,077490	0,015570	0,030500
5 KHz	0,000550	0,080350	0,016950	0,049250
10 KHz	0,000080	0,078910	0,017095	0,060500
50 KHz		0,069310	0,013650	0,078200
100 KHz		0,060500	0,010290	0,078300
500 KHz		0,016300		0,048500
1 MHz				0,010600

Çizelge 5.20. %100 silikon, %100PVC, %PE ve %100EVA dielektrik sabitleri.

<b>Frekans</b>	<b>%100silikon</b>	<b>%100 PVC</b>	<b>%100 PE</b>	<b>%100 EVA</b>
50 Hz	3,023	3,224	2,962	6,593
500 Hz	2,882	2,853	2,862	6,234
1 KHz	2,882	2,761	2,843	6,168
5 KHz	2,877	2,548	2,796	5,941
10 KHz	2,876	2,457	2,774	5,795
50 KHz	2,874	2,269	2,729	5,354
100 KHz	2,866	2,199	2,710	5,149
500 KHz	2,865	2,072	2,677	4,726
1 MHz	2,834	2,042		4,601

Çizelge 5.21. %100 silikon, %100PVC, %PE ve %100EVA'nın kayıp tanjanı.

<b>Frekans</b>	<b>%100silikon</b>	<b>%100PVC</b>	<b>%PE</b>	<b>%100EVA</b>
50 Hz	0,006615	0,024195		0,002578
500 Hz	0,000364	0,026523	0,005280	0,004251
1 KHz	0,000361	0,028062	0,005477	0,004945
5 KHz	0,000191	0,031539	0,006061	0,008290
10 KHz	0,000028	0,032118	0,006163	0,010440
50 KHz		0,030547	0,005002	0,014607
100 KHz		0,027507	0,003797	0,015207
500 KHz		0,007866		0,010263
1 MHz				0,002304

Genel olarak bakıldığında, dielektrik sabiti en yüksek malzeme EVA'dır. Frekans arttıkça, dielektrik sabiti düşmektedir. Silikon ve PE'nin dielektrik sabitleri yaklaşık olarak aynıdır ve 500Hz'den sabit kalmışlardır. PVC'nin dielektrik sabiti de EVA gibi, frekans arttıkça azalmaktadır.

Dielektrik kayıplar açısından bakıldığında ise, dielektrik sabiti en düşük olan PVC'nin dielektrik kayıpları, diğerlerine göre yüksektir. Dielektrik sabiti en yüksek olan EVA'nın dielektrik kayıpları PVC'ye göre düşüktür, fakat frekans arttıkça yaklaşık olarak aynı değişimleri göstermiştir. Bu iki malzemenin  $\tan \delta$ 'nın en yüksek olduğu yer, dielektrik sabitinin en hızlı düştüğü yerdir.

### 5.1.5. Polyester

Polyester için alınan sonuçlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir. Polyesterin dielektrik özellikleri, 50 Hz-1MHz frekans aralığında ve  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $120^{\circ}\text{C}$  sıcaklıklarda incelenmiştir.

Çizelge 5.22. Polyesterin dielektrik sabitinin frekans ve sıcaklıkla değişimi.

Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	50 Hz ( $\epsilon_r$ )	1 kHz ( $\epsilon_r$ )	10 kHz ( $\epsilon_r$ )	100 kHz ( $\epsilon_r$ )	1 MHz ( $\epsilon_r$ )
-40	3,24	3,18	3,14	3,07	3,06
-20	3,27	3,25	3,22	3,15	3,12
0	3,35	3,3	3,27	3,23	3,16
20	3,32	3,29	3,25	3,21	3,18
40	3,29	3,27	3,23	3,22	3,19
60	3,25	3,24	3,24	3,2	3,2
80	3,23	3,25	3,23	3,24	3,22
100	3,24	3,28	3,26	3,26	3,25
120	3,38	3,33	3,33	3,33	3,32
140	3,54	3,47	3,44	3,46	3,43

Çizelge 5.23. Polyesterin kayıp tanjantının frekans ve sıcaklıkla değişimi.

Sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	50 Hz ( $\tan\delta$ )	1KHz ( $\tan\delta$ )	10KHz ( $\tan\delta$ )	100KHz ( $\tan\delta$ )	1 MHz ( $\tan\delta$ )
-40	90	140	150	130	158
-20	70	120	158	149	167
0	40	82	148	167	189
20	21	50	110	170	218
40	10	30	80	157	230
60	10	20	50	110	238
80	12	20	40	78	231
100	30	45	48	62	232
120	120	110	100	90	240
140	125	120	140	150	255

Bu sonuçlara göre  $\epsilon_r$  ve  $\tan\delta$ 'nın frekans ve sıcaklıkla değişimleri şekil 5.16'da ve şekil 5.17'de verilmiştir.

Bu çalışmada,  $-40^{\circ}\text{C}$  ile  $120^{\circ}\text{C}$  arası değişen sıcaklıkta ve 50Hz ile 1MHz frekans bandında dielektrik kayıpların ve dielektrik sabitinin değişimleri incelenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda, frekansın, polyesterin bağlı dielektrik sabiti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Dielektrik kayıpların sıcaklıkla değişimi, 50Hz – 100KHz bandında  $\sim 80^{\circ}\text{C}$  –  $90^{\circ}\text{C}$  arasında düşüş göstermekte, 500KHz – 1MHz bandında ise yaklaşık lineer olarak yükseldiği görülmüştür. Dielektrik sabiti, frekans arttıkça azalmaktadır. Bu düşüş hızı, düşük sıcaklıklarda çok belirgin olmakla beraber,  $\sim 80^{\circ}\text{C}$ 'de azalmaktadır [53,54].

## **5.2. Kısa Devre Yöntemi Kullanılarak Silikonun Dielektrik Sabitinin Ölçme Sonuçları.**

Bu deneylerde 280.1U ve MF160.1U dielektrik özelliklerinin frekansla değişimi incelenmiştir. Malzeme kalınlığı olarak  $d = 18\text{mm}$  alınmıştır.

280.1U silikon numunesinin dielektrik sabitinin ve kayıp faktörünün frekansla değişimi şekil 5.18'de, MF160.1U silikon numunesinin dielektrik sabitinin ve kayıp faktörünün frekansla değişimi şekil 5.19'da verilmiştir.

280.1U silikon numunesinin dielektrik sabiti 1.1 ile 1.5 arasında, kayıp tanjantı ise 0.1 ile 0.02 arasında değişmektedir. Kayıp tanjantın bu değeri kayıplı veya kayıpsız dielektrikler için belirlenmiş değerler arasındadır [8-10]. MF160.1U silikon numunesinin dielektrik sabiti 1 ile 1.1 arasında, kayıp tanjantı ise 0.08 ile 0.02 arasında değişmektedir.

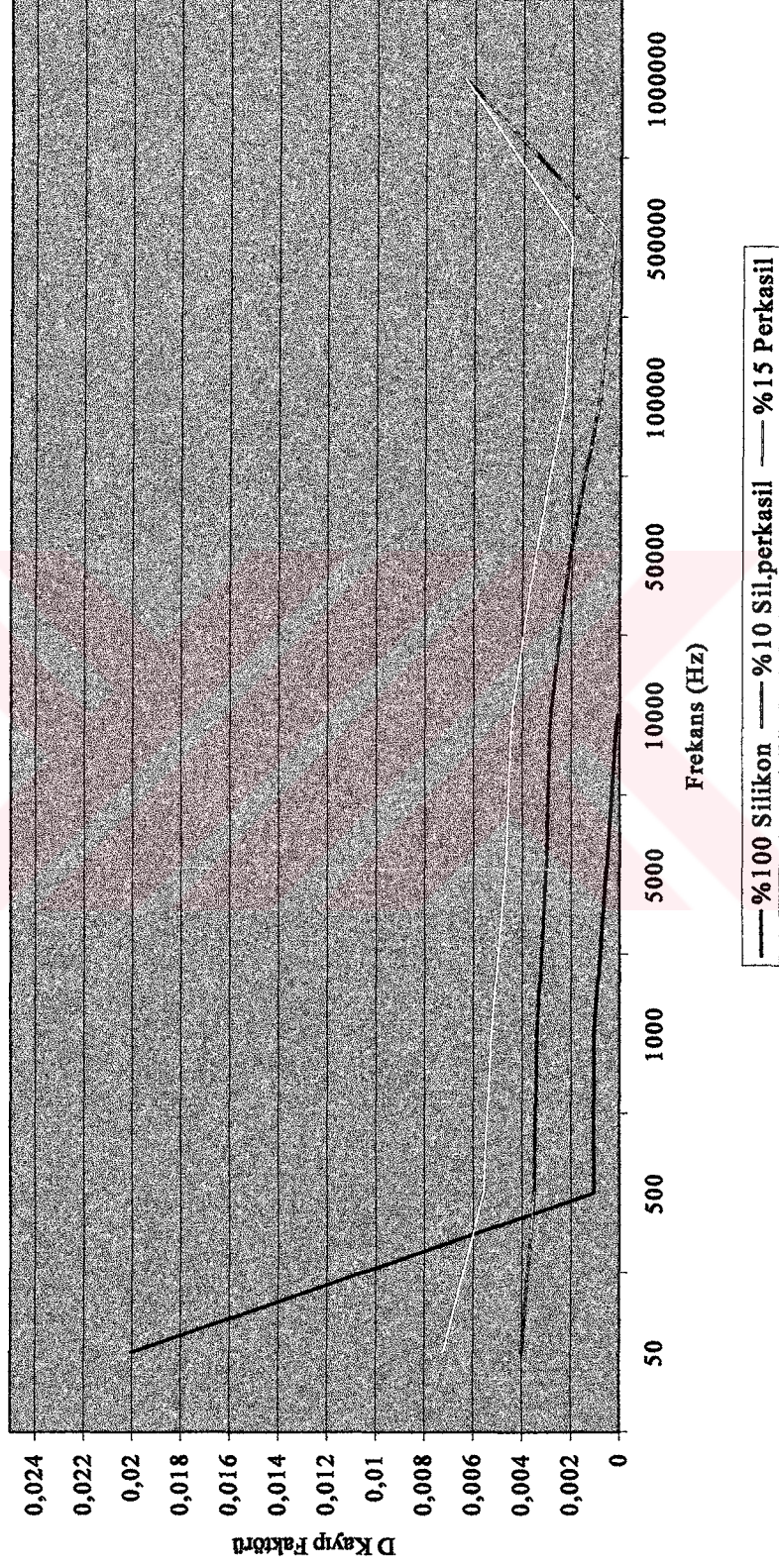
Bu iki silikonun hesaplanan dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişim eğrilerine bakıldığında hepsinin yaklaşık olarak birbirine benzediği görülmektedir. Aralarındaki küçük farklılıklar, silikonun içindeki katkı maddelerinden kaynaklanmaktadır. Silikon malzemeler, dielektrik sabitlerinin bire yakın olması ve kayıp faktörlerinin küçük olmasından dolayı mikrodalga ışınmasında etkilenmediği görülmektedir. Silikonun içindeki katkı

maddeleri dielektrik özellikler üzerinde mikrodalga frekanslarında önemli rol oynamaktadır.



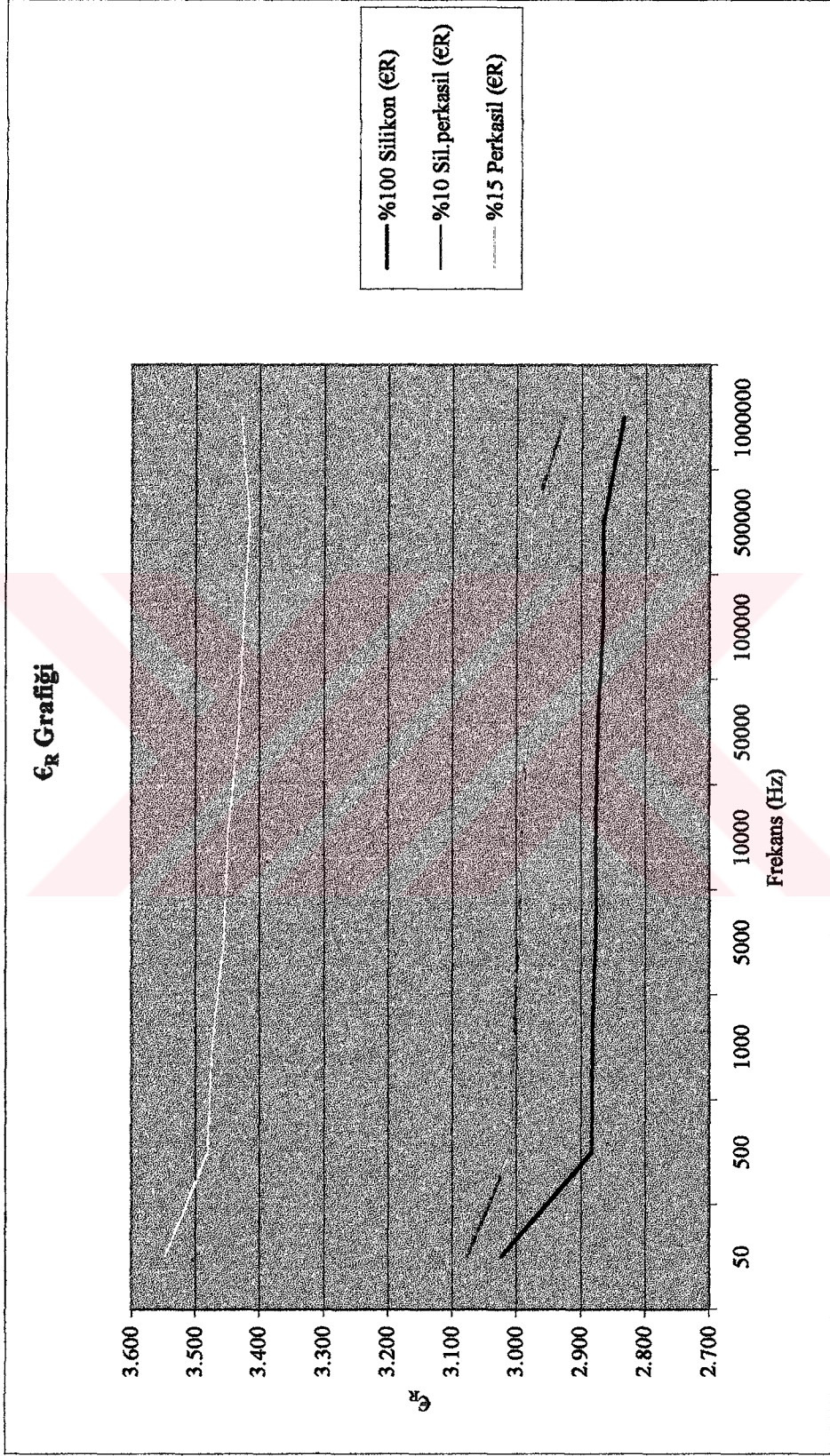


## D Kayıp Faktörü



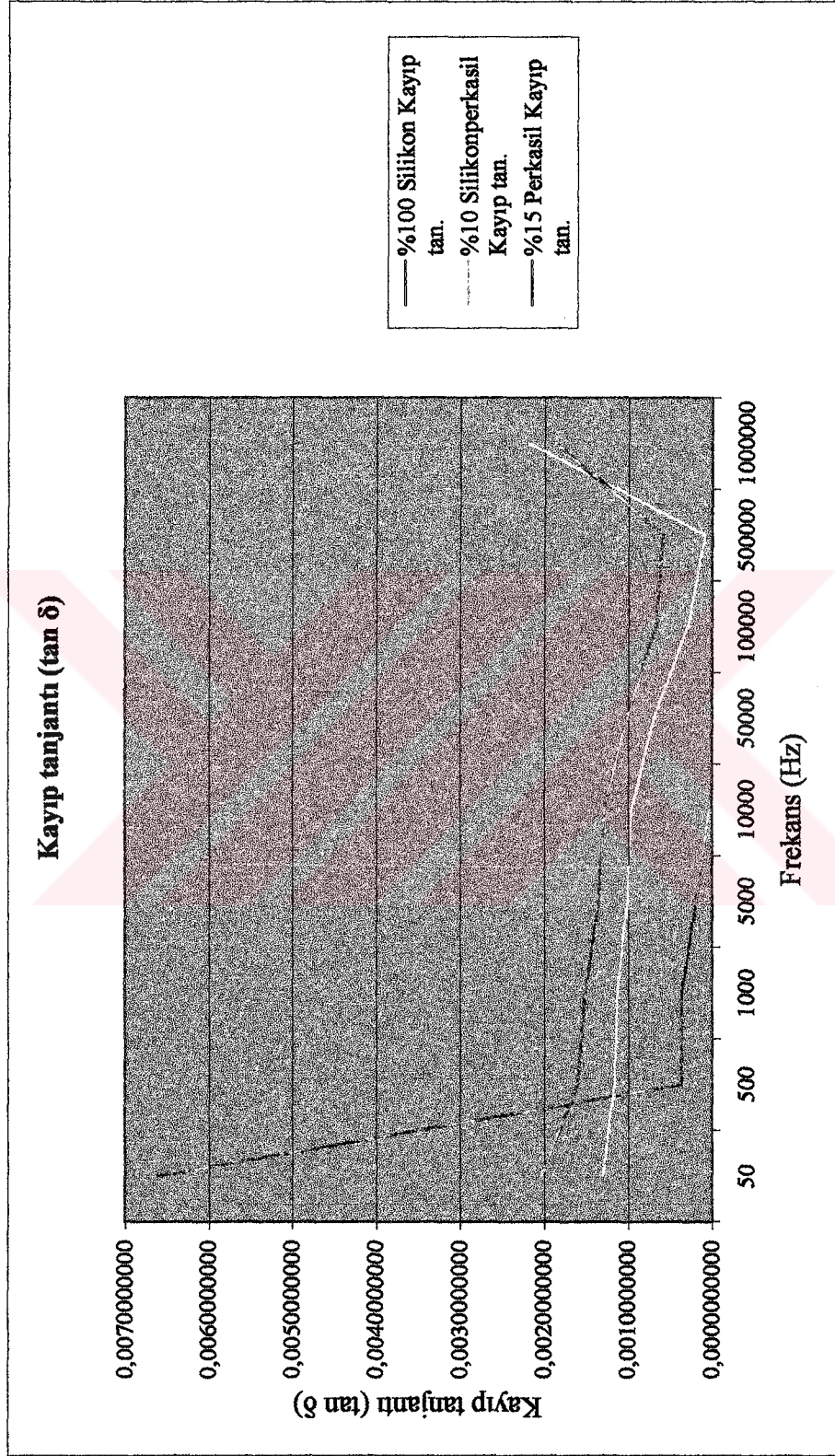
Şekil 5.1. Silikonun kayıp faktörü grafiği.



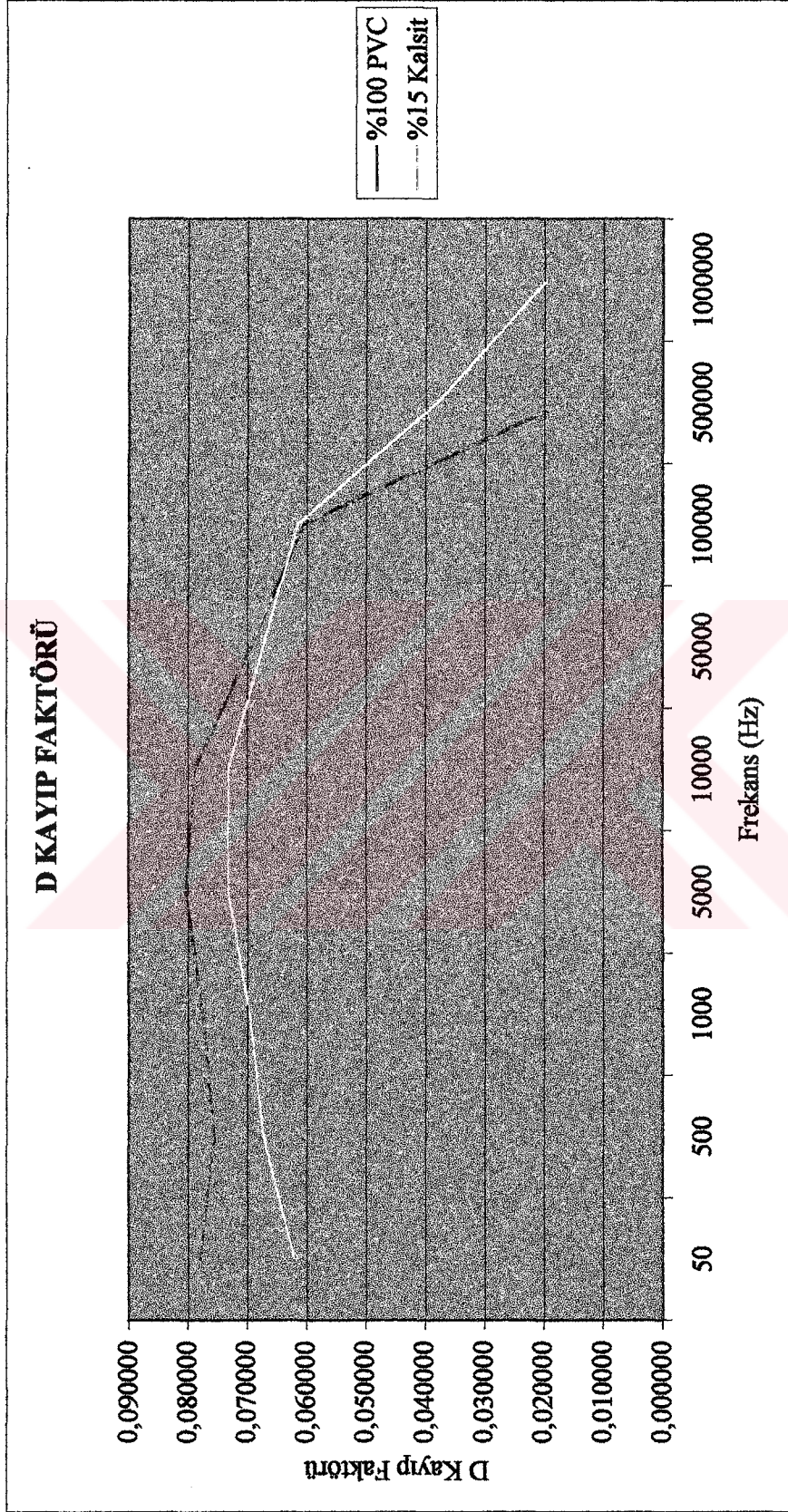


Şekil 5.2. Silikonun  $\epsilon_r$  grafiği.



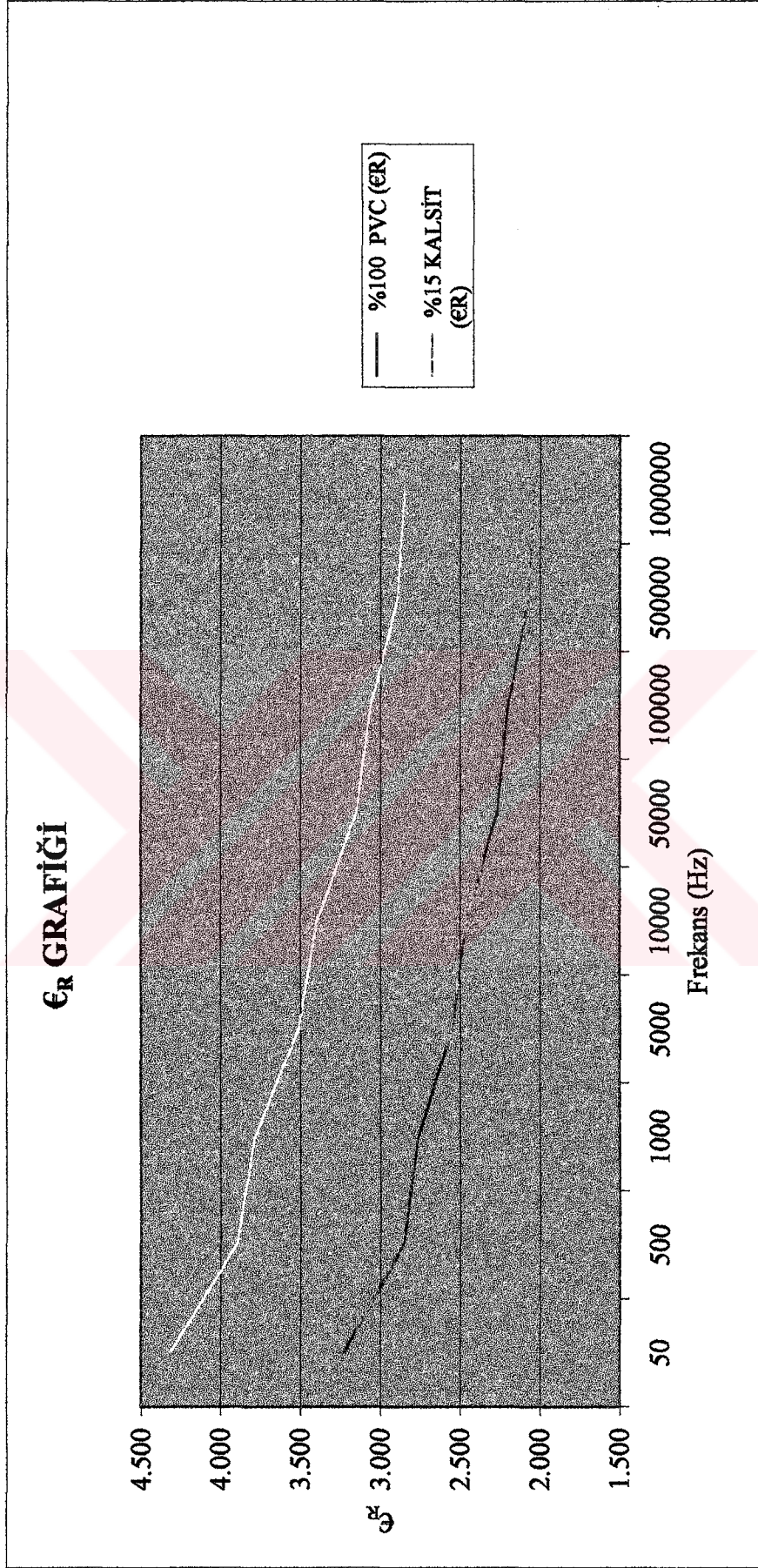


Şekil 5.3. Silikonun kayıp tanjantı ( $\tan \delta$ ) grafiği.

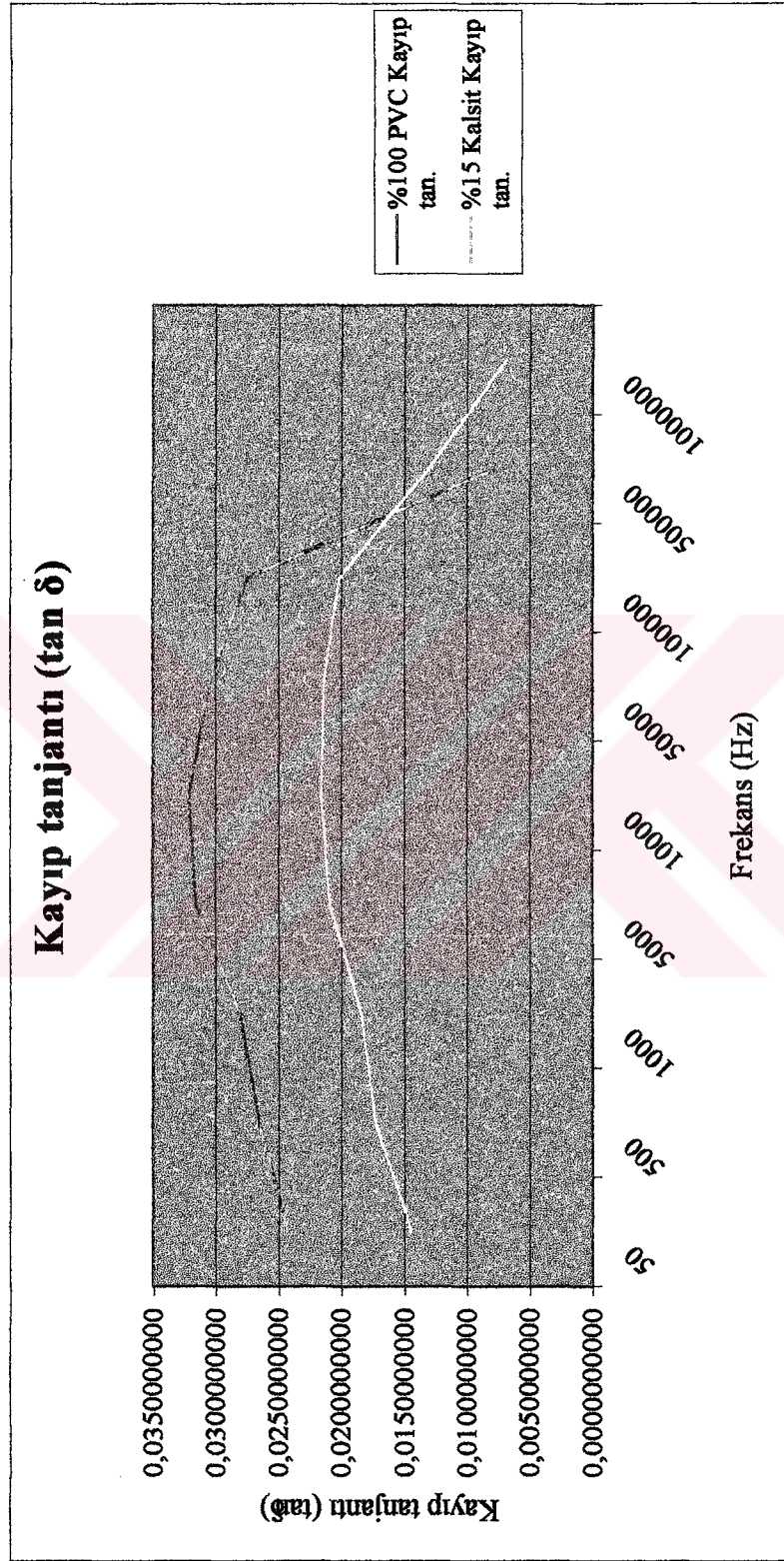


Şekil 5.4. PVC'nin kayıp faktörü grafiği.



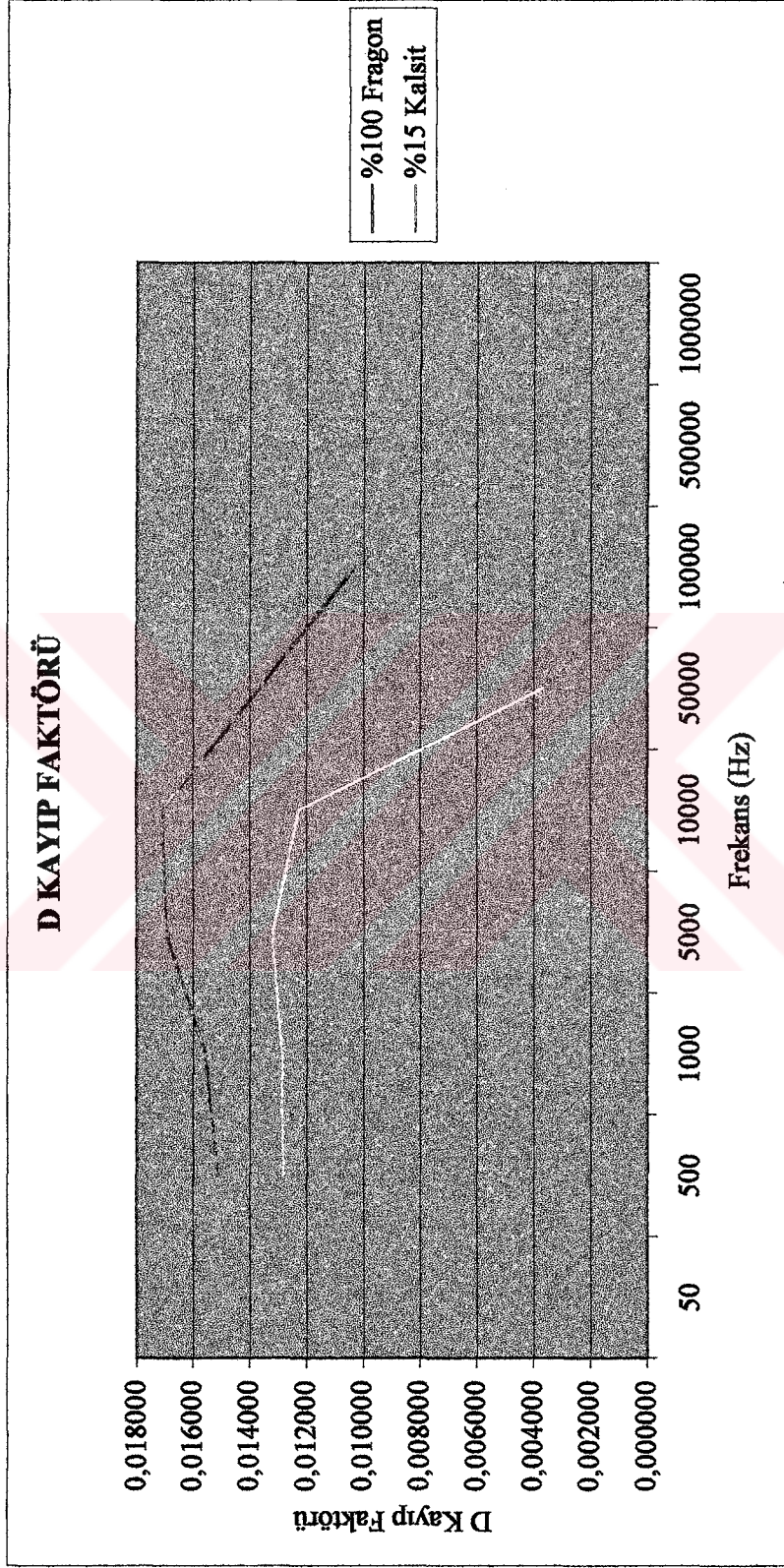


Şekil 5.5. PVC'nin  $\epsilon_R$  grafiği.

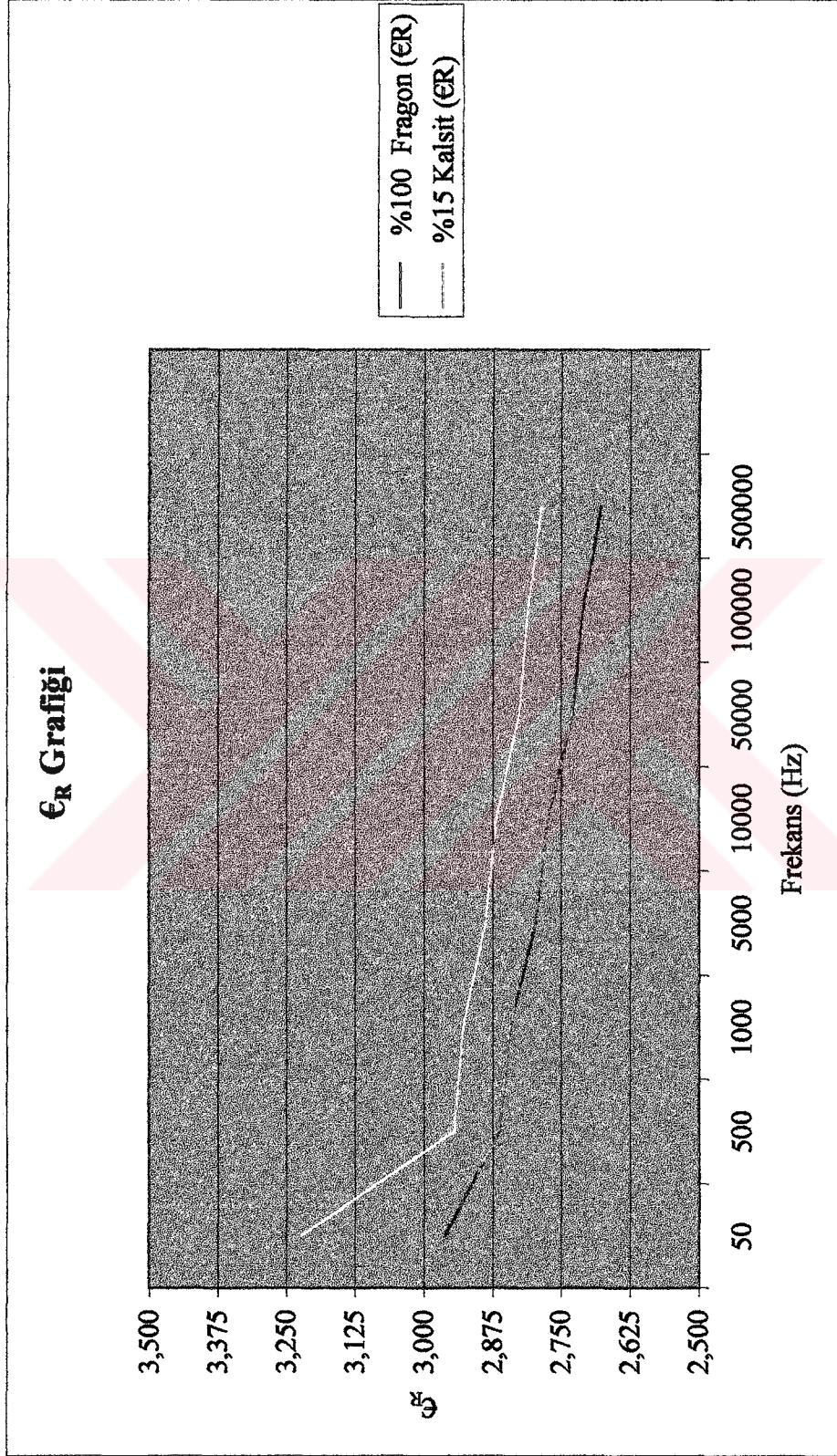


Şekil 5.6. PVC'nin kayıp tanjantı ( $\tan \delta$ ) grafiği.

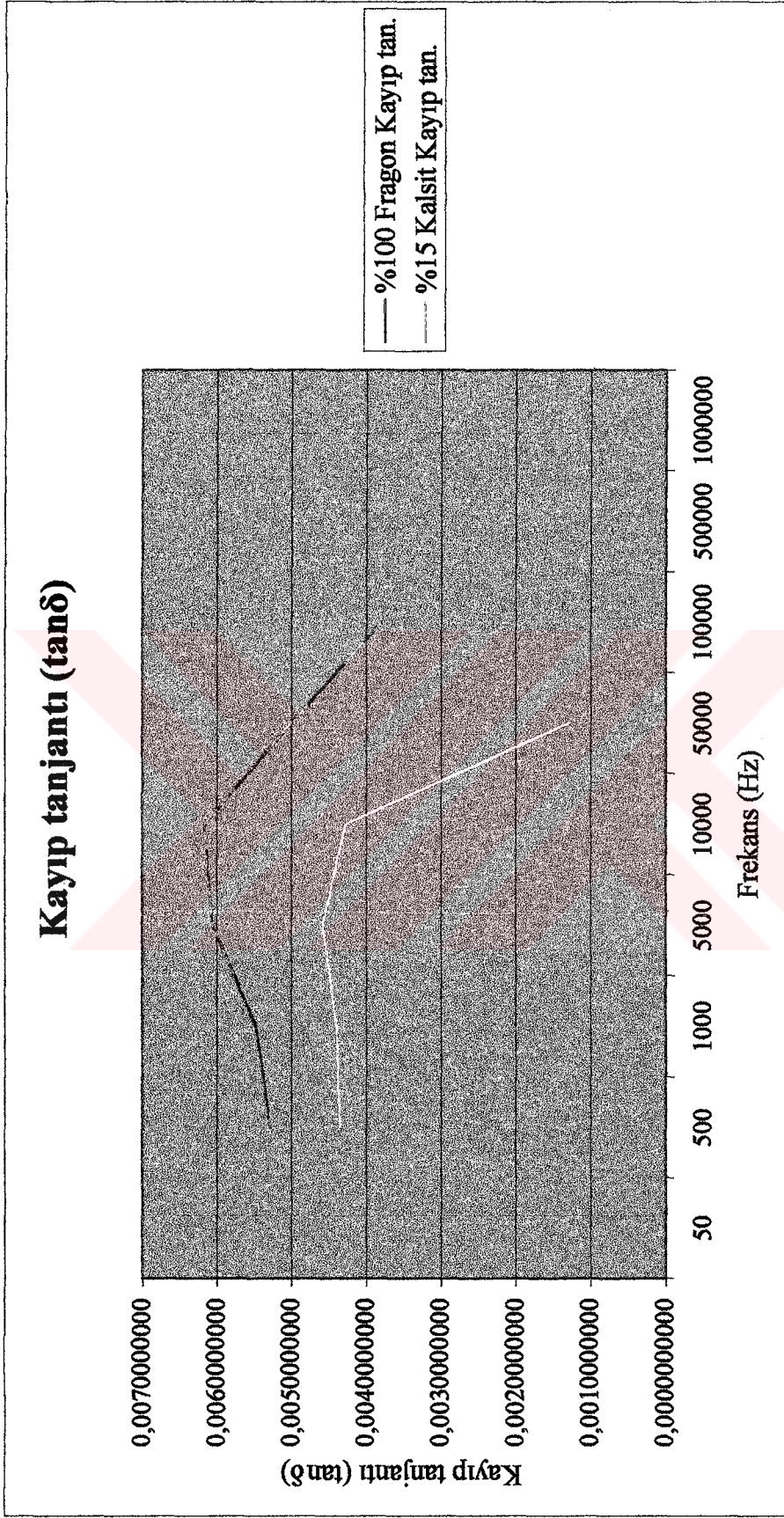




Şekil 5.7. PE'nin kayıp faktörü grafiği.

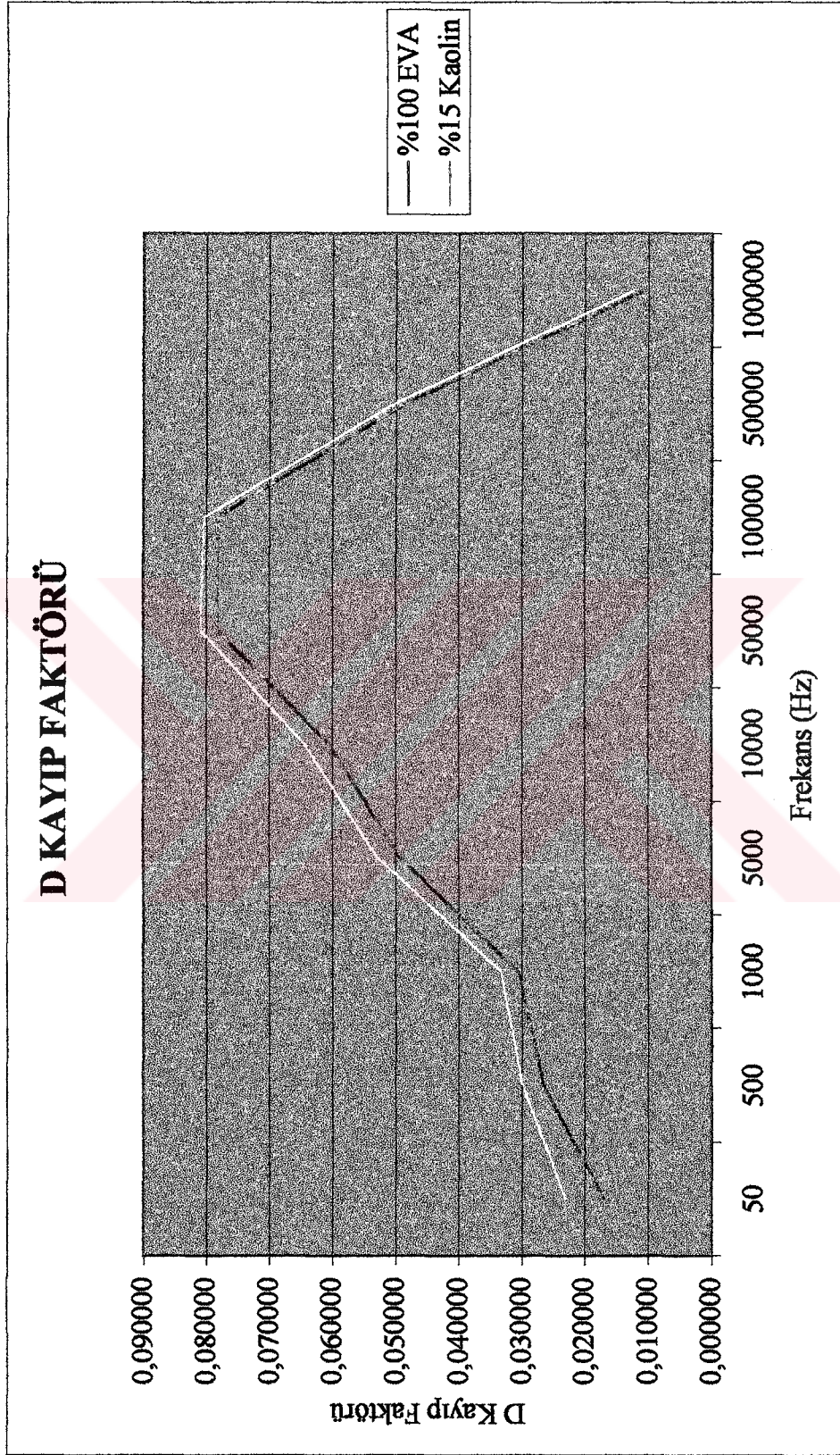
Şekil 5.8. PE'nin  $\epsilon_r$  grafiği





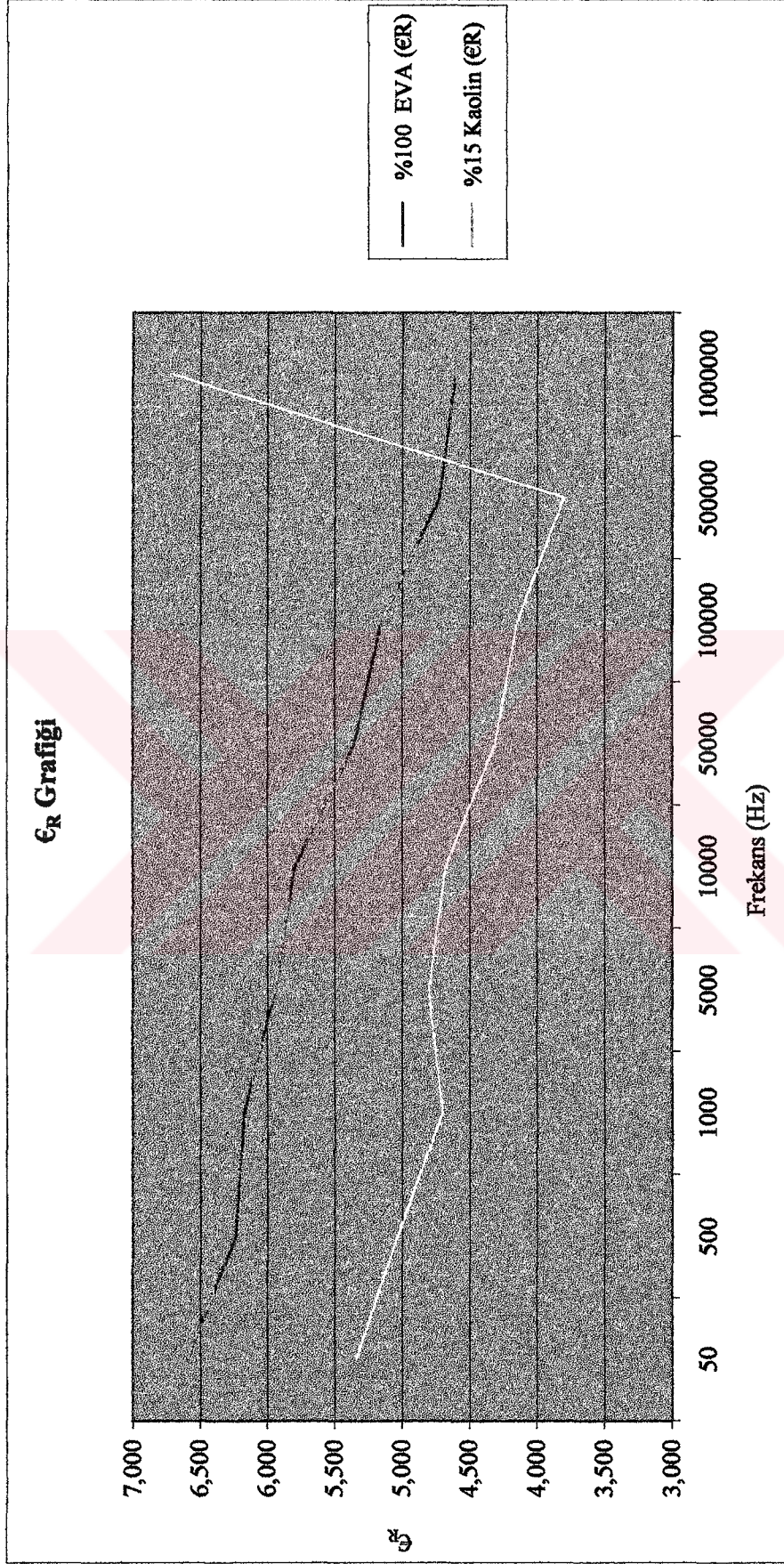
Şekil 5.9. PE'nin kayıp tanjantı (tanδ) grafiği.

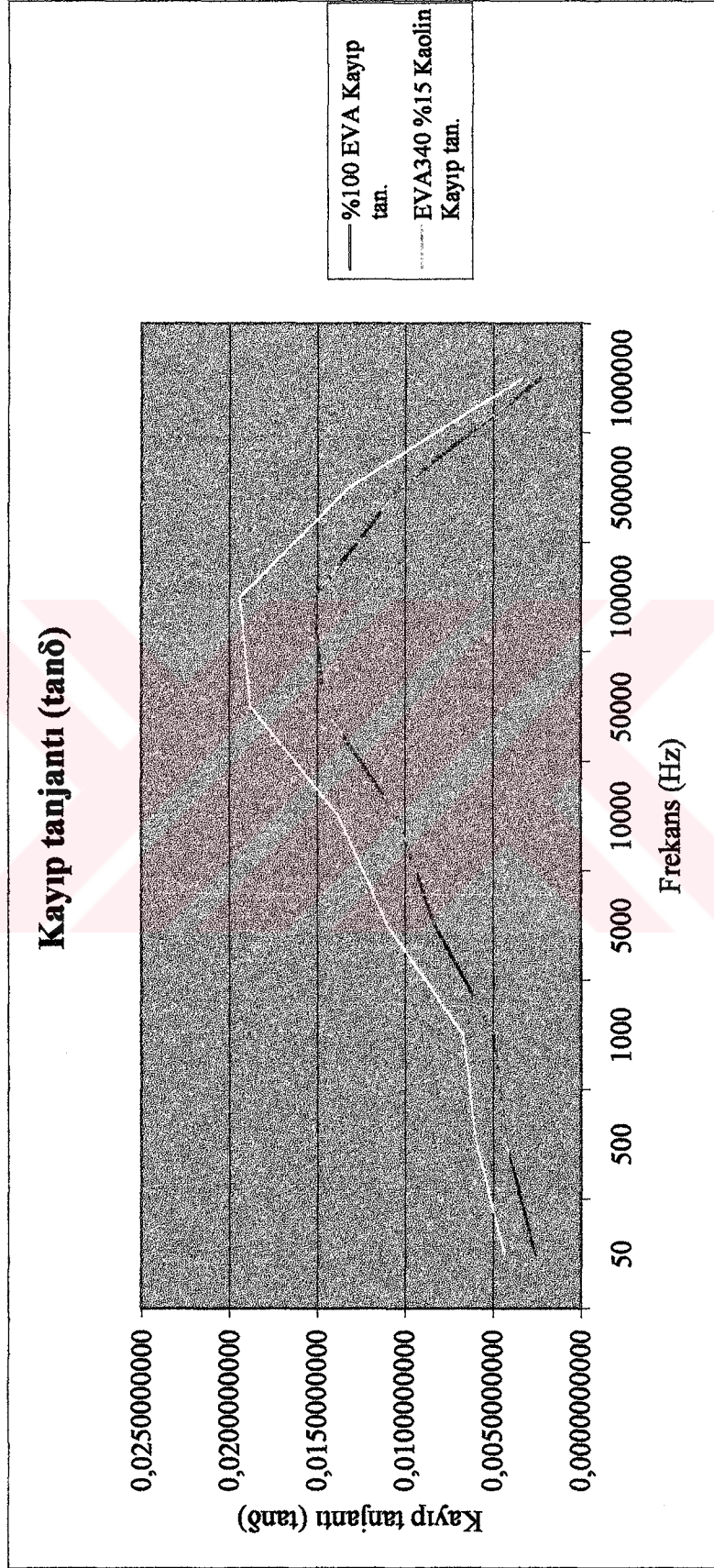




Şekil 5.10. EVA'nın kayıp faktörü grafiği.

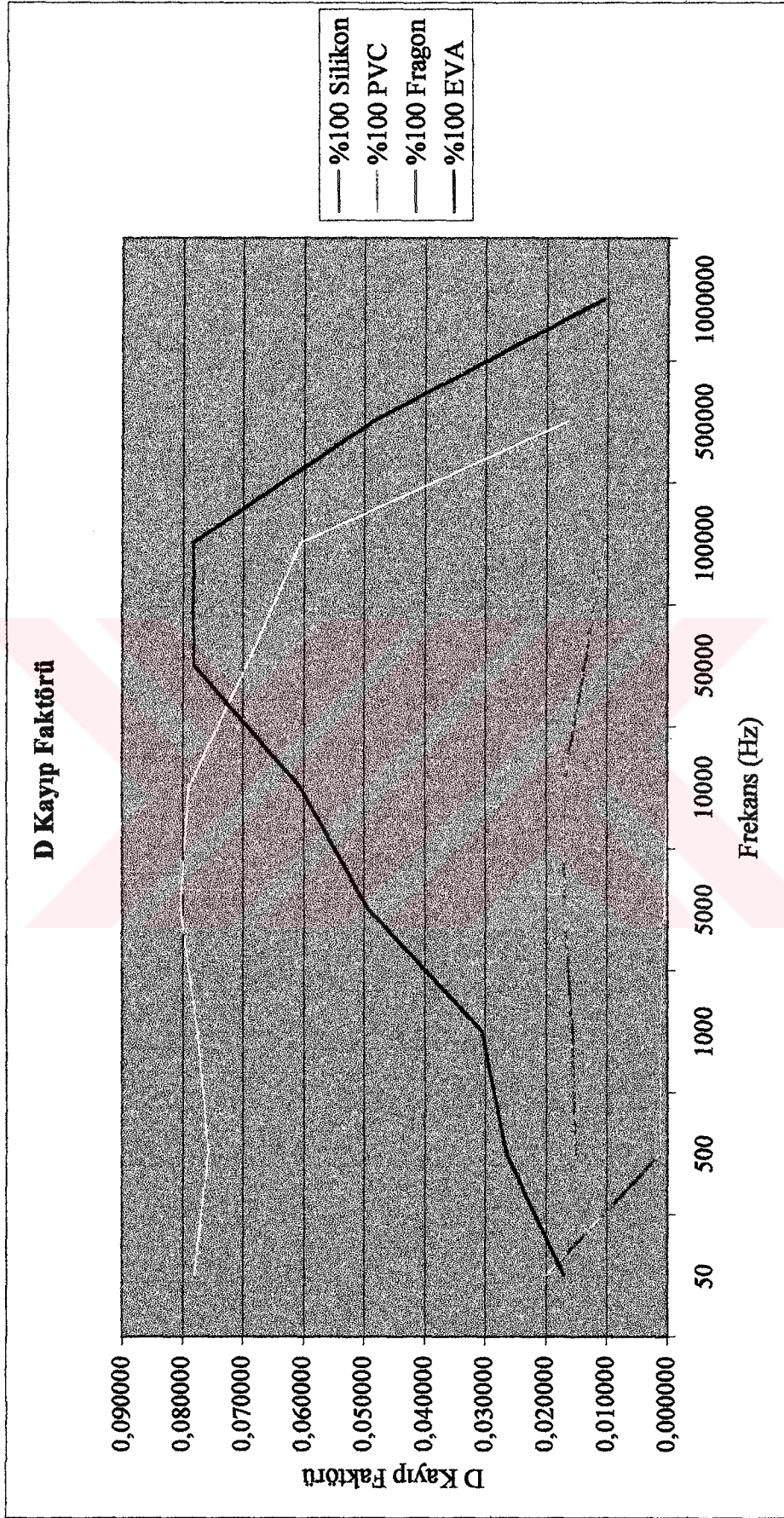


Şekil 5.11. EVA'nın  $\epsilon_r$  grafiği



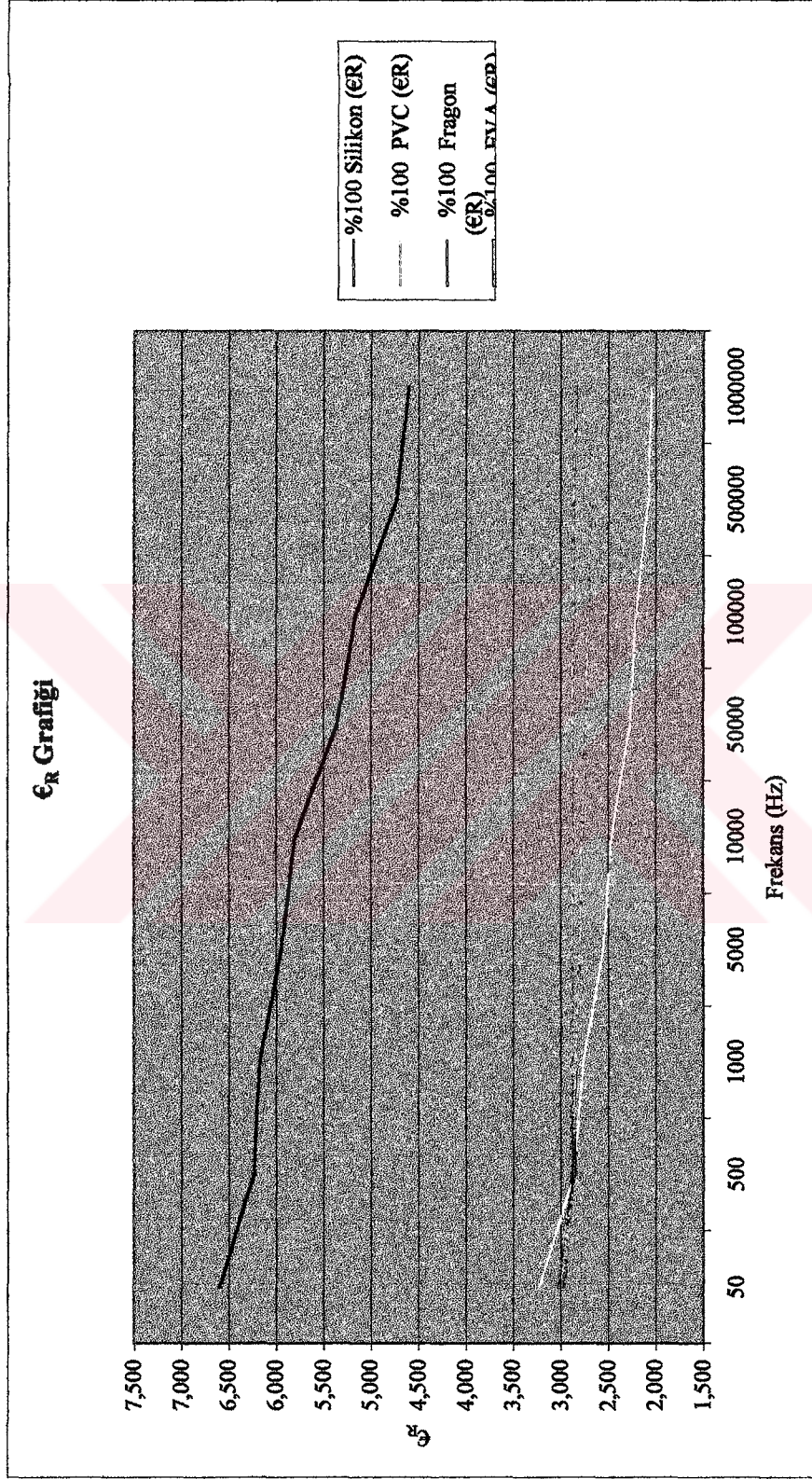
Şekil 5.12. EVA'nın kayıp tanjantı (tanδ) grafiği.



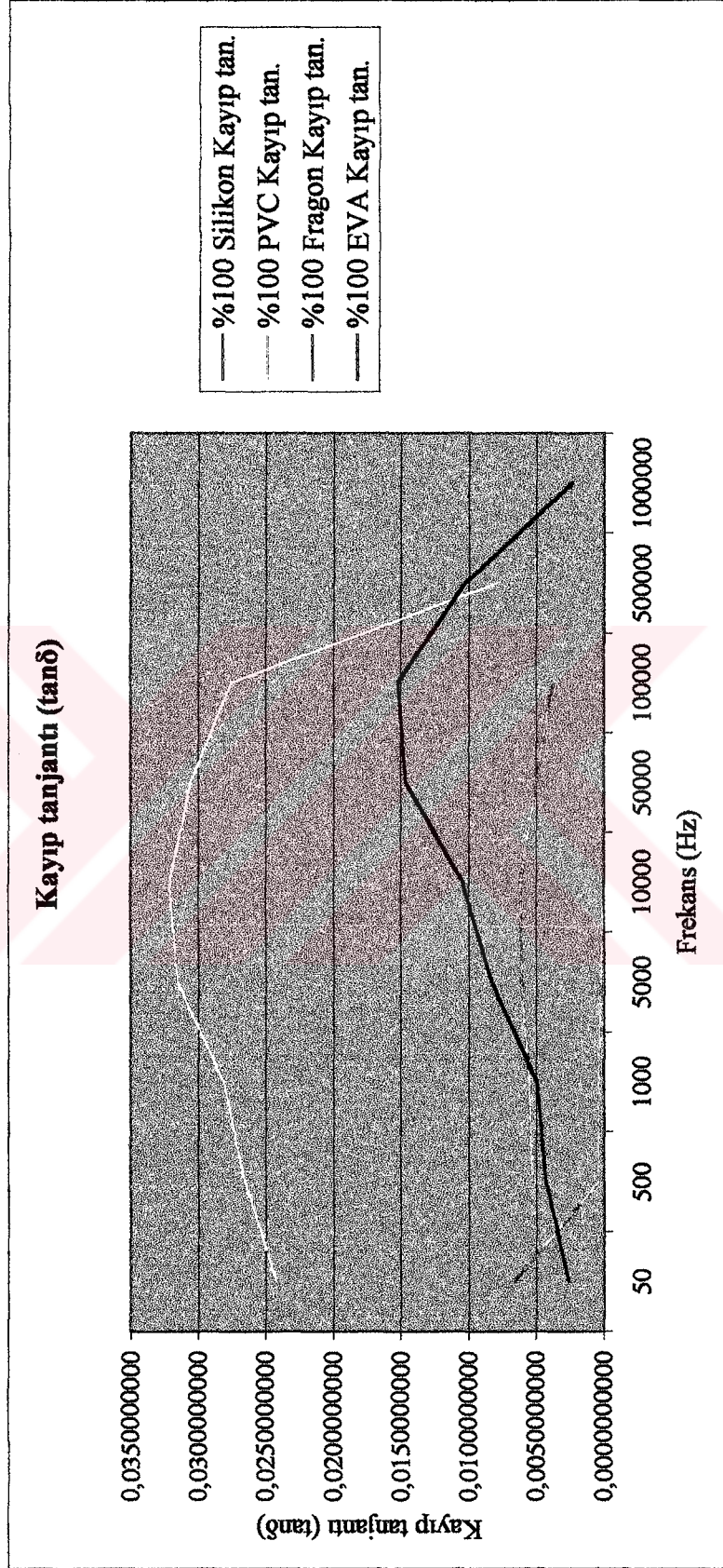


Şekil 5.13. Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın kayıp faktörü grafiği.



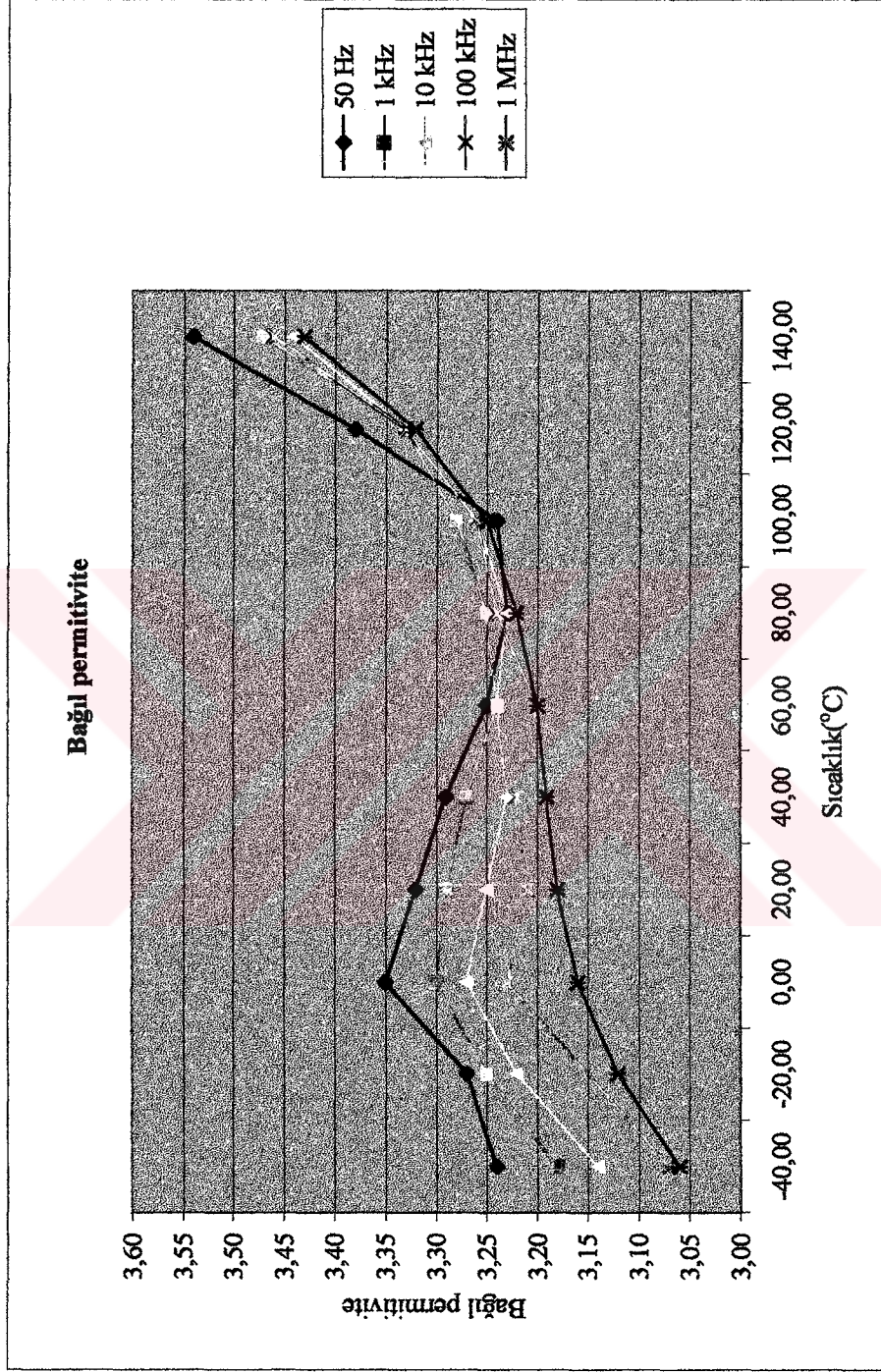


Şekil 5.14. Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın  $\epsilon_r$  grafiklerinin karşılaştırılması.

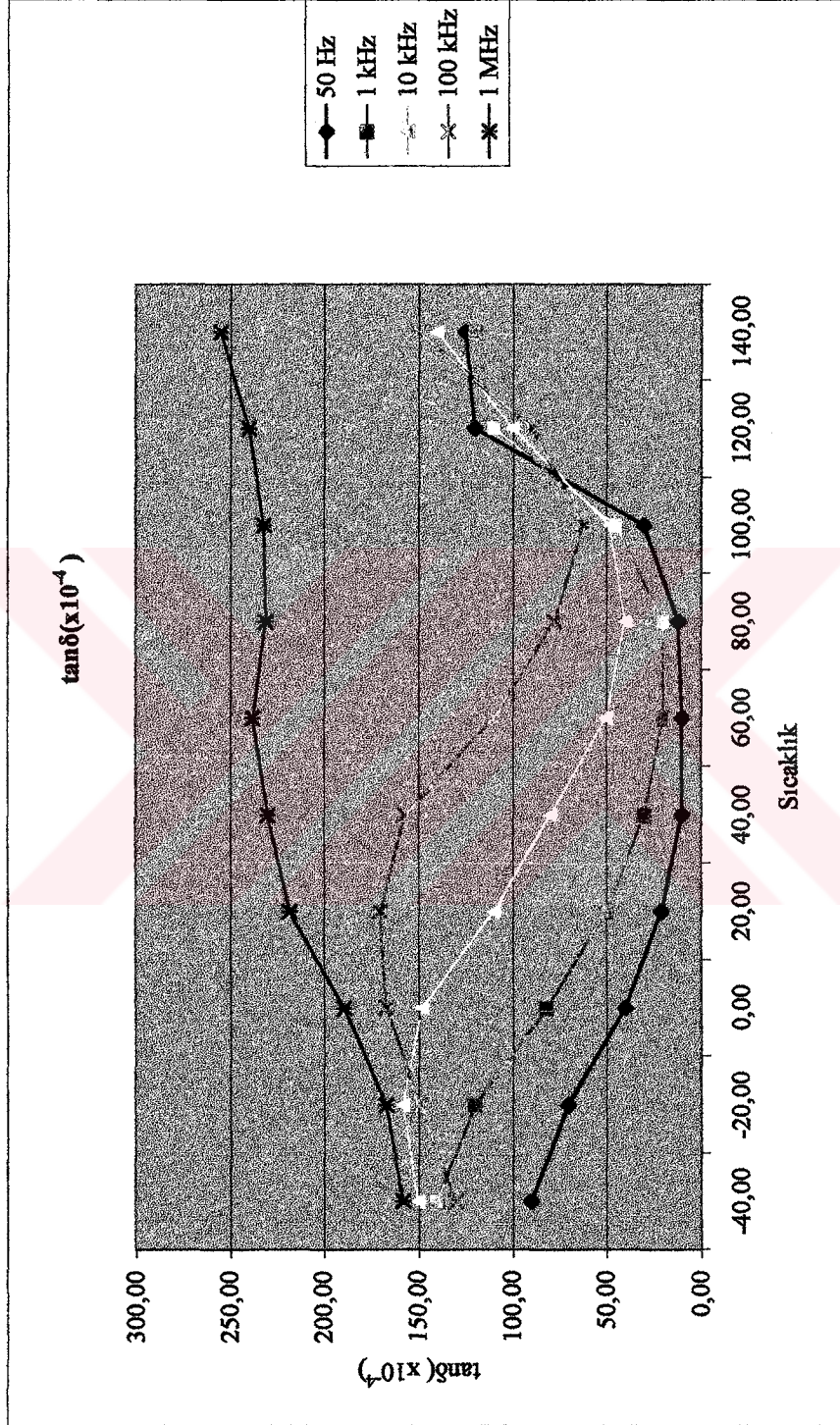


Şekil 5.15. Silikonun, PE'nin, PVC'nin ve EVA'nın kayıp tanjantı (tan $\delta$ ) grafiği.



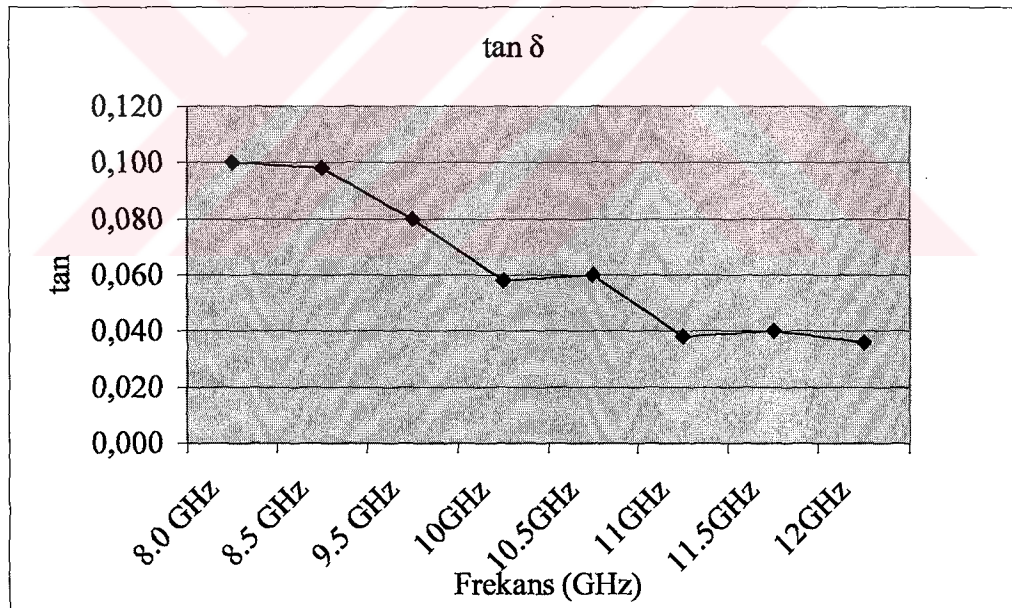
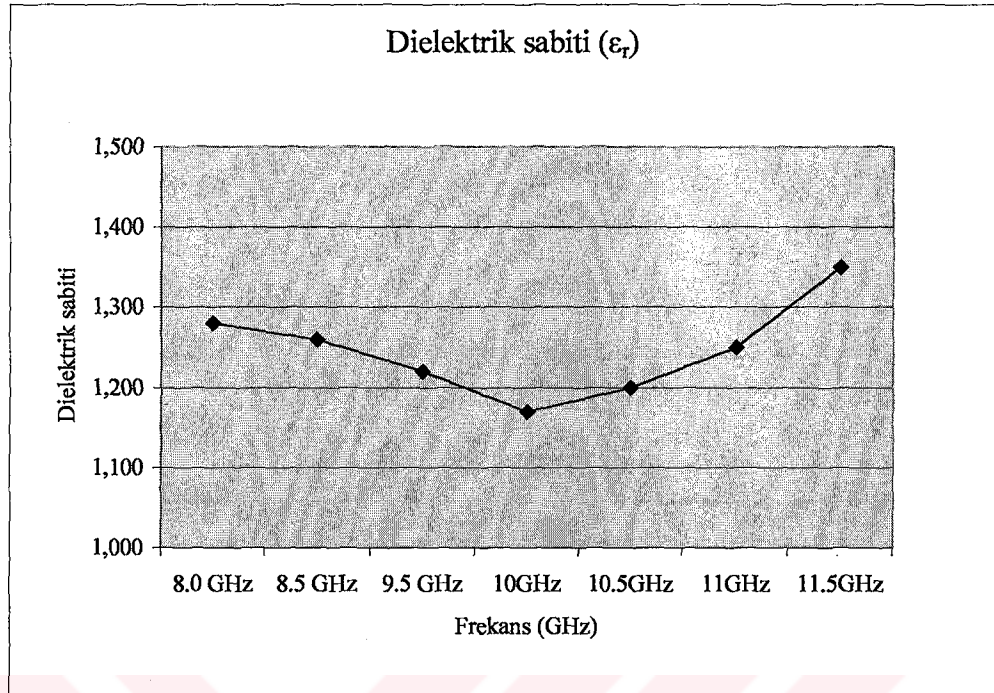


Şekil 5.16. Polyesterin, dielektrik sabitinin sıcaklık ve frekansla incelenmesi.



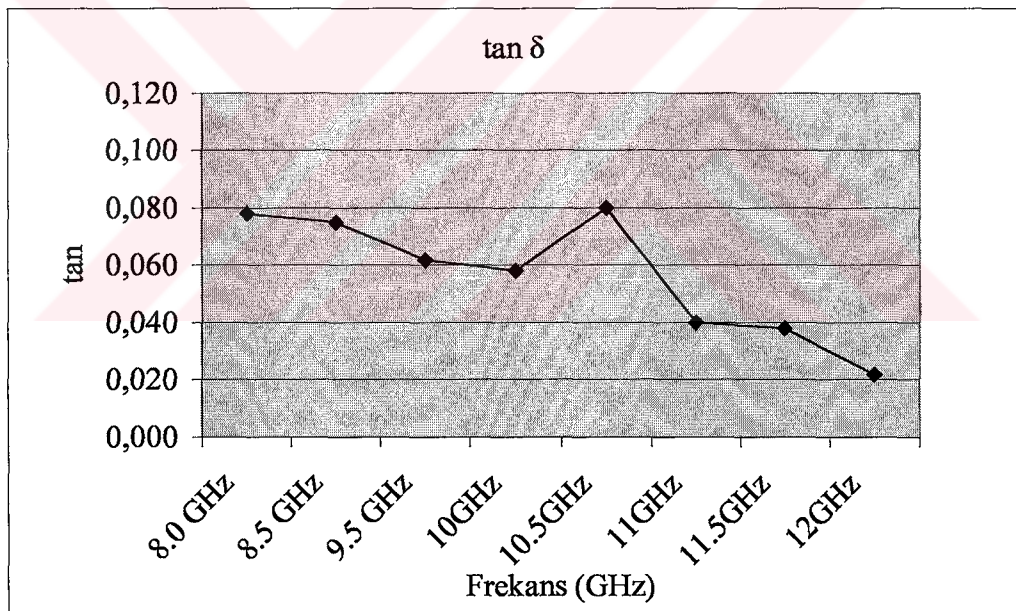
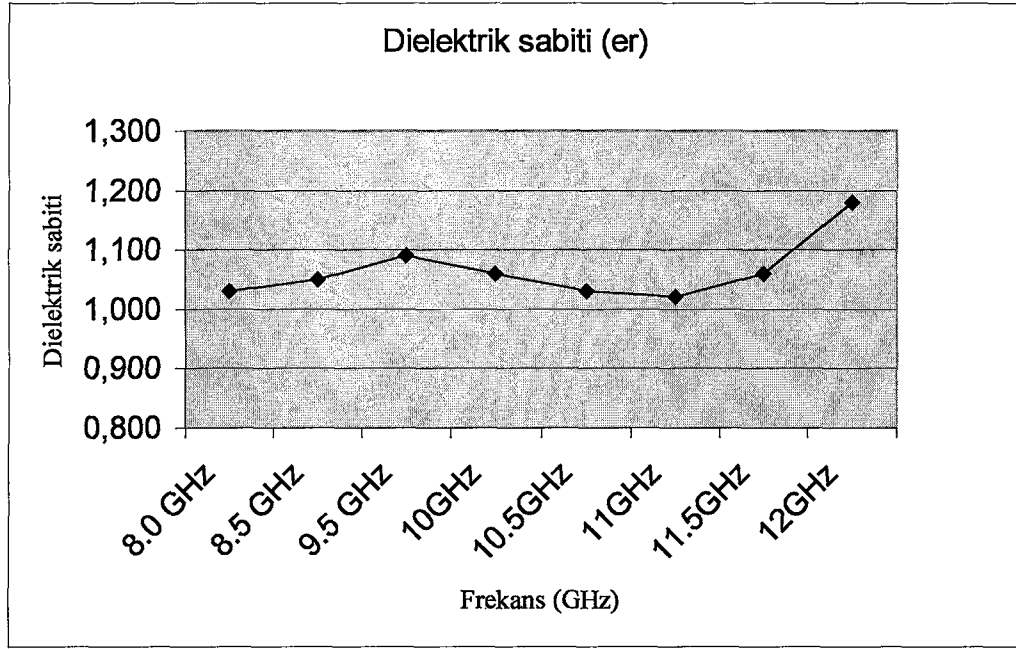
Şekil 5.17. Polyesterin, kayıp tanjantının sıcaklık ve frekansla incelenmesi.





Şekil 5.18. 280.1U dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişimi.





Şekil 5.19. MF 160.1U dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün frekansla değişimi.

## 6. GENEL YORUMLAR, SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

Endüstriyel malzemelerin (tekstil, kağıt, lastik, seramik gibi) radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) gibi yeni tekniklerle işlenmesi (Polimerize etme, vulkanize etme, nemini azaltma, dezenfekte etme, kurutma gibi) için dielektrik özelliklerinin (Dielektrik sabiti- $\epsilon$  ve kayıp tanjantı-tan $\delta$ ) ve bunların çevre şartları ile (Sıcaklık, nem, basınç) değişiminin bilinmesi gereklidir.

Elektrik endüstrisinde kullanımları, moleküler mobilite ve relaksasyon süreleri ile ilgili dielektrik çalışmalarından (ki bu çalışmalar genelde mekanik davranışlarla ilgilidir) dolayı, dielektrik metotlarla polimer davranışın incelenmesi ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Polarizasyon, elektrik izolasyon malzemelerinin bir özelliğidir ve onların yapısından kaynaklanır. Bir elektrik alanın etkisinde bulunan her polimer, belirli derecede polarize olmaktadır. Bir malzemede, polarizasyon olayının derecesini,  $\epsilon$  (Dielektrik sabiti) göstermektedir. Polarizasyon derecesi, malzemede oluşan ve dış elektrik alanın etkisi ile yönlendirilen dipollerin yoğunluğuna ve büyüklüğüne bağlıdır [55].

Elektrik alan etkisi ile dipollerin sınırlı mesafede konum değiştirmesi ve yönlendirilmesine dielektrik polarizasyonu denilmektedir. Elektron ve atomik polarizasyonu hızlı bir polarizasyondur.  $10^{10}$  Hz'den düşük frekans bandında yapılan bütün ölçümlerde vardır. Elektron polarizasyonu yalıtkan malzemelerin tümünde görülmektedir ve oluşması için  $10^{-13}$ - $10^{-15}$  sn yeterlidir. Dipol polarizasyonunun tamamen oluşması için dipol momentlerin büyüklüğüne göre  $10^{-4}$  - $10^{-7}$ sn yeterlidir. İyonik polarizasyonunun tamamen oluşması için  $10^{-12}$  - $10^{-14}$ sn yeterlidir.

Dipol polarizasyonunun etkin olduğu frekans bandında dipollerin, dış elektrik alanın frekansı ile yön değiştirmesinden dolayı ortaya elektriksel enerji kaybı ortaya çıkar. Dielektrik kayıpları diye tanımlanan bu enerji kaybı malzemenin ısınmasına neden olur.

Dielektrik kayıplar, polarizasyon türlerine bağlıdır. Yüzey yük polarizasyonundan kaynaklanan dielektrik kayıplar  $10^4$  Hz civarında, dipol

polarizasyonundan kaynaklanan dielektrik kayıplar  $10^8$  Hz civarında, atomik polarizasyonundan kaynaklanan dielektrik kayıplar  $10^{12}$  Hz civarında ve elektronik polarizasyonundan kaynaklanan dielektrik kayıplar  $10^{16}$  Hz civarında meydana gelir.

Polimerlerin dielektrik özellikleri ile ilgili yapılan çalışmalarda genellikle, dielektrik sabitinin ve dielektrik kayıpların, frekansa ve sıcaklığa bağlı değişimleri incelenmiştir. Polimerlerin dielektrik sabiti genelde, 1.9-2.0'dan büyüktür ve frekanstan ve sıcaklıktan etkilenmektedir. Bu konuda yapılan araştırmalara ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre dielektrik sabiti, frekans yükseldikçe azalmakta, yüksek frekanslarda sabit kalmaktadır. Sabit değere ulaştığı bölgelerde sadece elektron ve iyon polarizasyonunun etkisi kalmıştır [55].

Her polarizasyon etkisi, rezonans frekansı veya relaksasyon frekansı karakteristiğine sahiptir. Rezonans etkisi, genelde elektronik veya atomik polarizasyonda görülmektedir. Dielektrik relaksasyon, moleküllerin iç yapılarına ve dielektriğin moleküllerinin yapısına veya moleküler düzenine bağlı olarak yönelme polarizasyonu ile ilişkilidir .

Relaksasyon frekansı, dielektrik kaybın maksimum olduğu frekanstır. Relaksasyon frekansı, relaksasyon zamanının ( $\tau$ ) tersi ile orantılıdır ( $f_{relax} = 1/2\pi\tau$ ). Relaksasyon zamanı,  $\omega_0 \cdot \tau = 1$  eşitliğinden bulunabilir.  $\omega_0$  , kayıp tanjantının ( $\tan\delta$ ) max değerine karşılık gelen frekans değeridir .

. Relaksasyon frekansı, malzemenin rezonans frekansına karşılık gelir. Elektrik alanın frekansı, relaksasyon frekansından küçük olduğu zaman kutuplanma kolaylıkla oluşur ve elektrik alanı izler. Bu durumda dielektrik kayıplar, ihmal edilecek kadar azdır. Frekans artarak relaksasyon bölgesine ulaşıncaya, kutuplanma alana uymakta zorlanır ve faz farkı artar. Bu durumda kayıplarda maksimum olur. Frekans artmaya devam ederse, kutuplanma oluşmaz ve dielektrik sabiti hızla azalır. Kutuplanma oluşmadığı anda ise, dielektrik kayıp olmayacaktır.

Kutuplanmalardaki dielektrik kayıplar frekansa bağlı olarak incelenirse, relaksasyon frekansında kayıpların maksimum olduğu görülmektedir. Relaksasyon frekansının sağında ve solunda enerji kaybı azalmaktadır. Bu da

relaksasyon süresinin, uygulanan elektrik alanın periyodundan büyük ya da küçük olmasından kaynaklanır.

Polimer sistemler, genelde yalıtkan malzemelerdir ve elektrik alan altında polarize olmaktadır. Dielektrik relaksasyonun meydana gelmesi polimerler için önemlidir. Camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) yakınlarında polimerin segmental hareketliliği artar ve moleküler zincirlerin büyük bölümünde yönelme kolaylaşır. Düşük sıcaklıklarda küçük polar grupların yönelmesinden dolayı relaksasyon meydana gelir [56].

Bu çalışmada kullanılan malzemelerin (Silikon, PE, PVC, EVA ve Polyester) dielektrik sabitlerinin artan frekansla azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni yukarıda da açıklandığı gibi, polarizasyon etkisidir. Frekans arttıkça dipollerin de etkisi artacağından polarizasyon meydana gelmiş ve dielektrik sabitinde düşme görülmüştür. Dielektrik sabitindeki bu düşüş o noktada bir yüzeysel polarizasyon olduğunu göstermektedir. Dielektrik malzemelerde, elektrik alan uygulandığında malzeme yüzeyinde hareket eden yükler olacaktır. Bunlar yüzey yükleridir. Yüzey yükleri elektrik alan uygulandığında, dielektrik yüzeyinde birikirler. Bu yüzeysel polarizasyondur.

Dielektrik sabitinin düştüğü noktalarda ise dielektrik kayıplar ( $\tan \delta$ ) maksimum değere ulaşmıştır. Bu noktalarda pikler oluşmaktadır. Oluşan bu pikler, polimerik zincirlerindeki segmentlerin yerel hareketlerinin neden olduğu relaksasyon frekansından kaynaklanmaktadır .

Silikon, PVC ve PE'ye uygulanan katkı maddeleri, bu malzemelerin dielektrik sabitlerini yükseltmiştir. Bu durumda dielektrik kayıplarda belli oranlarda azalma görülmüştür. Ancak EVA'ya uygulanan %15 kaolin katkısı dielektrik sabitini düşürmüş, dielektrik kayıpları belli oranda arttırmıştır.

Genel olarak bakıldığında, dielektrik sabiti en yüksek malzeme EVA'dır. Frekans arttıkça, dielektrik sabiti düşmektedir. Silikon ve PE'nin dielektrik sabitleri yaklaşık olarak aynıdır ve 500Hz'den sabit kalmışlardır. PVC'nin dielektrik sabiti de EVA gibi, frekans arttıkça azalmaktadır.

Dielektrik kayıplar açısından bakıldığında ise, dielektrik sabiti en düşük olan PVC'nin dielektrik kayıpları, diğerlerine göre yüksektir. Dielektrik sabiti en yüksek olan EVA'nın dielektrik kayıpları PVC'ye göre düşüktür, fakat frekans

artıkça yaklaşık olarak aynı değişimleri göstermiştir. Bu iki malzemenin  $\tan \delta$ 'nın en yüksek olduğu yer, dielektrik sabitinin en hızlı düştüğü yerdir.

Özellikle yüksek sıcaklıklarda, frekansın polysterin bağıl dielektrik sabiti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda polysterin dielektrik kayıp faktörünün frekansa bağılılığı lineer değildir.

Dielektrik kayıplar, sıcaklık yükselmesi ile artar. Alternatif bir voltaj uygulandığında, önemli miktarda ısınma olur. Açığa çıkan ısı, frekans ile artar. Bunun nedeni, uygulanan elektrik alanın değişen yönüne göre yönelecek olan dipollerin ve moleküllerin birbirine sürtünmeleridir. Bu sürtünme nedeni ile ısı açığa çıkar. Komşu moleküllerde olan sürtünmeler nedeni ile molekülün, elektrik alanın değişimini izlemesi gecikmeli olur. Atomik ve elektronik görüldüğü malzemelerde sıcaklığın dielektrik sabitine etkisi, düşük sıcaklıklarda küçüktür. Yüksek sıcaklıklarda ise iyon hareketinin fazla olmasından dolayı yüksektir. Atomik kutuplanmanın görüldüğü malzemelerde sıcaklık ve frekansın etkisi çok önemlidir. Dielektrik sabiti, belli bir sıcaklıkta keskin olarak artar ve düşük frekanslarda artan sıcaklıkla daha hızlı artar.

Dielektrik kayıpların ( $\tan \delta$ ) piklerinin pozisyonu yüksek sıcaklıklara doğru kayacaktır ki, bu durumda dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ )'de artan frekansla azalacaktır. Bu davranış diğer polimerler için de bulunmuştur [40].

İncelenen malzemelerin havacılıkta önemli kullanım alanları vardır. Bu malzemeler genellikle, hava araçlarının gövdelerinde ve özellikle radomlarında kullanılmaktadır. Genel olarak, havacılıkta kullanılan dielektrik malzemelerin kayıpları küçüktür. Havacılıkta kullanılacak dielektrik malzemelerin çok iyi mekanik dayanımlılığa sahip olmaları ve çok yüksek sıcaklığa (Yüksek hızlarda, özellikle supersonik uçaklarda) dayanıklı olmaları gerekir.

Politen, polistren gibi dielektrik malzemeler dielektrik özelliklerinin ( $\epsilon'$ ,  $\tan \delta$ ) çok iyi olmaları nedeniyle uçak sanayinde radar ve radom yapımında kullanılmaya uygundur. Teflon, silikon, naylon gibi dielektrik malzemelerde mekanik darbelerle karşı çok dayanıklı olduğundan yine çok kullanılmaktadır.

Havacılık teknolojisinin gelişimi ve yeni teknolojilerin ortaya çıkması ile incelediğimiz dielektrik malzemeler, reçine ve seramik gibi çok yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzemelerle karıştırılarak oluşturulan kompozit



malzemelerin kullanımı giderek artmıştır. Bu malzemeler uçak teknolojisinde özellikle avyonikte yüzeylere “tabakalar” halinde sürülerek kullanılmaktadır.

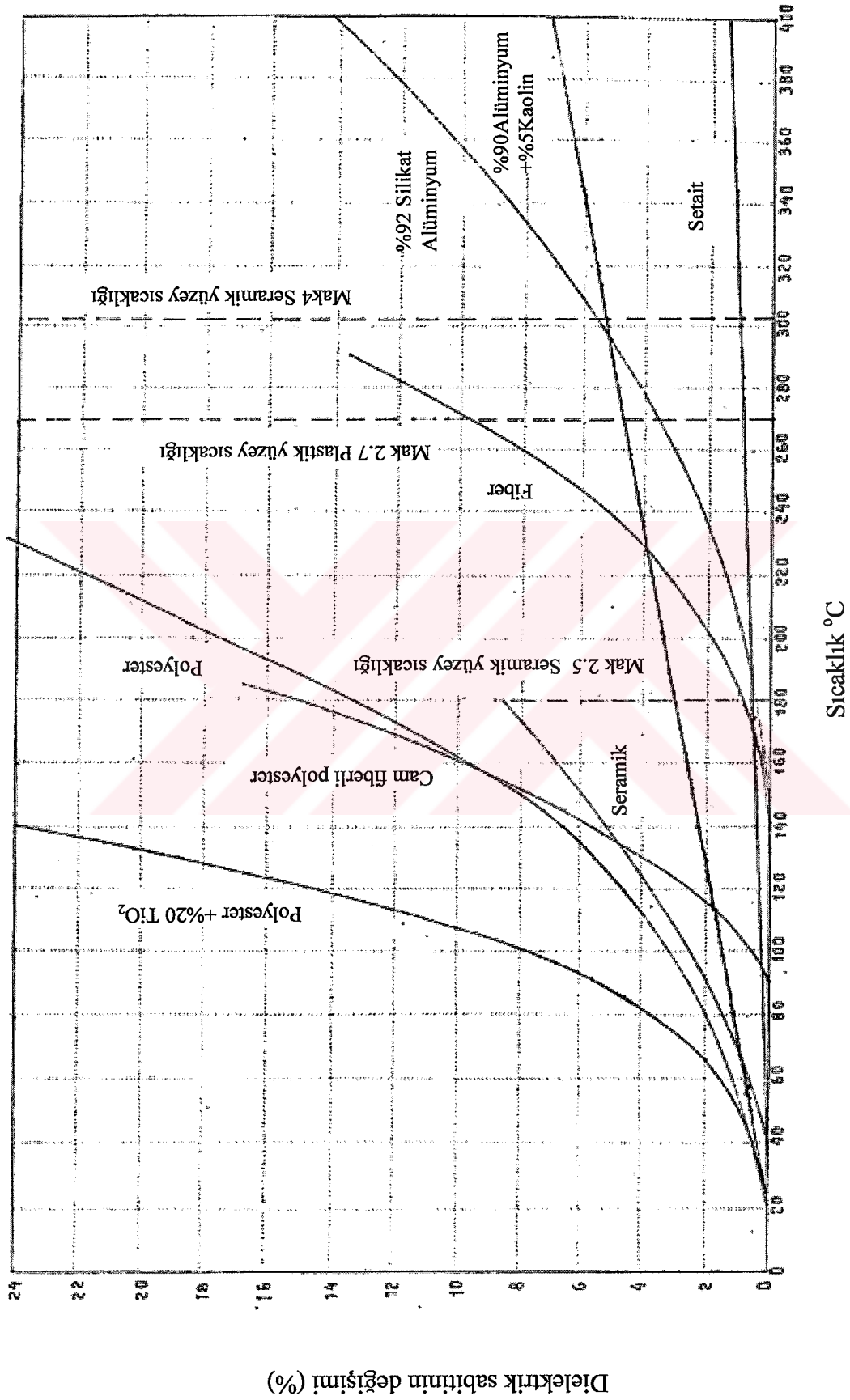
Yüksek sıcaklıklarda, dielektrik sabiti ve kayıp faktörünün sıcaklıkla değişimi önemli olmaktadır. Buna karşılık mekanik dayanıklılık azalmaktadır. Havacılık endüstrisinde kullanılan bazı dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) parametreleri çizelge 6.1’de verilmiştir. Özellikle radar ve radom teknolojisinde çok kullanılan dielektrik malzemelerin dielektrik sabitlerinin sıcaklıkla değişimi şekil 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Havacılık endüstrisinde kullanılan bazı dielektrik malzemelerin dielektrik sabiti ( $\epsilon'$ ) ve kayıp tanjantı ( $\tan\delta$ ) parametreleri [57].

Dielektrik Malzeme	Karışım	Dielektrik sabiti $\epsilon_r$			$\tan\delta \times 10^4$			maksimum sıcaklık(°C)
		300 MHz	3 kHz	10 kHz	300 MHz	3 kHz	10 kHz	
Metakrilat	Pleksiglas	2,66	2,6	2,59	67	57	67	80
	Lusit	2,66	2,6	2,59	67	57	67	80
	Perspeks	2,66	2,6	2,59	67	57	57	80
Polistren	mustron	2,55	2,55	2,54	3	4	4,8	65
	Stiron	2,55	2,55	2,54	3	4	4,8	65
	Kaolin	2,55	2,55	2,54	3	4	4,8	65
Politen	Alkaten	2,25	2,25	2,25	2,5	3,1	3,6	55
	Teflon	2,08	2,08	2,07	1,5	1,5	3,8	55
	Kel F	2,35	2,34	2,33	51	66	59	55
	Naylon		3,03			128		55

Uçakların yüzeylerinde kullanılan malzemelerin genellikle üç sıcaklık bölgesinde incelenmesini önermekteyiz. I. Bölge 60-180°C (Bu tez çalışmasının konusu), II.bölge 180-300°C ve III.bölge (süpersonik uçaklar) 300°C üzerini kapsamaktadır.

Bu tez çalışmasında incelenen malzemeler, 80-160 °C’yi kapsamaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda (250°C ve üstü), bu malzemelerin kullanılması uygun değildir. Bu bölgelerde fiber cam, silikat gibi malzemeler kullanılmalıdır. 350 °C ve üstünde ise setait, %90 alümiyum-%5 kaolin gibi malzemeler kullanılmalıdır.



Şekil. 6.1. Havacılıkta kullanılan bazı dielektrik malzemelerin, dielektrik sabitlerinin ( $\epsilon$ ) sıcaklıkla değişimi [57].

## KAYNAKLAR

1. Çeviri Editörleri : KILIÇ E., KÖSEOĞLU F.; YILMAZ H., *Temel Kimya, Moleküller, Maddeler ve Değişimler*, Ankara, C.1, (1998).
2. ERDİK E., *Temel Üniversite Kimyası*, 5. baskı, Ankara (1991).
3. BAYSAL B., *Polimer Kimyası*, ODTÜ., Ankara, (1981).
4. BASAN S., *Polimer Kimyası, Cumhuriyet Üniversitesi*, Sivas, (2001).
5. SMYTHC.P., *Dielectric Behaviour and Structure*, Princeton University, ABD, (1955).
6. HIPPEL Arthur R. Von, *Dielektrik Materials and Applications*, The Massachusetts Institute of Technology, (1954).
7. <http://www.psrc.usm.edu/macrog/pe.htm>
8. <http://www.psrc.usm.edu/macrog/pvc.htm>
9. <http://www.azo.com/details.asp?ArticleID=412>
10. YILMAZ G.ve KALENDERLİ Ö., *İnce Yalıtkan Tabakaların Elektriksel Dayanımının Belirlenmesinde Deney Koşullarının Etkisi*, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 8. Ulusal Kongresi, Gaziantep, 6-12 Eylül (1999).
11. HILL E., VAUGHAN Worth E., PRICE A.H. ve DAVIES M., *Dielectric Properties and Molecular Behaviour*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, (1969).
12. ROSSOW U., ASPNES D.E., FROTSCHER U. ve PIETRYGA C., *Interpretation of The Dielectric Function of Porous Silicon Layers*, <http://www.sciencedirect.com>, (1999).
13. AKYEL C.ve HUA Y., *A Mixture Approach With Perturbation Technique for Microwave Characterization of Conducting Polymers*, CCECE/CCGEI, (1995).
14. SEYAM M.A.M., *Dielectric Relaxation in Polycrystalline Thin Films of In<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>*, <http://www.sciencedirect.com>, (2001).
15. BIZET A., NAKAMURA N., TERAMOTO Y. ve HATAKEYAMA T., *Measurement of Dielectric Properties of Polymers Using Fourier Analysis*, <http://www.sciencedirect.com>, 2001



16. BANFORD H.M., TEDFORD D.J. ve AYOUBI M., *The Dielectric Behaviour of Polymers Irradiated at 5K*, <http://www.sciencedirect.com>, (2002).
17. AXELROD E., GIVANT A., SHAPPİR J., FELDMAN Y. ve SA'AR A., *Dielectric relaxation and porosity determination of porous silicon*, <http://www.sciencedirect.com>, (2002).
18. İZCİ E., *Gördes Yöresi Doğalklinoptilolitinin Doğal ve İyon Değiştirmiş Formlarının Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2001).
19. GÖYENÇ S., *Mikrodalga Frekanslarında Malzemelerin Dielektrik Özelliklerinin Belirlenmesi*, Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, (1999).
20. GRIFFITHS J.David., *Elektromagnetik Teori*, Tükçesi Bekir Karaoğlu, ARTe Güven Yayınevi, (1996).
21. BALANIS A., *Constantine, Advanced Engineering Elektromagnetics*, Arizona State University, (1999).
22. ERDOĞAN M., *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeler*, Nobel Yayınevi, Ankara,(1997).
23. GÖVER K., *Bazı Endüstriyel Malzemelerin Mikrodalga Dielektrik Sabitinin Ölçülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Bursa, (1996).
24. CHELKOWSKI A., *Dielectric Physics, Institute of Physics*, Silesian University Katowice, Poland, (1980).
25. HIPPEL Arthur R. Von, *Dielectrics and Waves*, John Wiley & Sons Inc.,London, (1962).
26. POHL A. H., *Dielectrophoresis*, Cambridge University Press, First published, Cambridge, (1978).
27. TAREEV B., *Physics of Dielectric Materials*, Mir Publishers, Moscow, (1975).
28. SCAIFE B.K.P., *Principles of Dielectrics*, Clarendon Press, Oxford, (1989).
29. HAYT JR. William, *Engineering Electromagnetics*, Purdue University, ABD, 4th. Edition, (1981).

30. BOTTCHEER C.J.F. ve BORDEWIJK P., *Theory of Electric Polarization*, Elsevier Science, New York, (1973).
31. SADIKU Matthew N.O., *Elektromagnetics*, Temple University, Philadelphia, (1989).
32. CHENG David K., *Field and Wave electromagnetics*, Addison-Wesley Publishing Company, (1989).
33. McCONNEL J., *Rotational Brownian Motion and Dielectric Theory*, Academic Press Inc., Oxford, London, (1980).
34. LOVELL M.C., AVERY A.J. ve VERNON M.W., *Physical Properties of Materials*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, (1981).
35. ANDERSON J.C., *Dielectrics*, Chapman and Hall Ltd., London, (1964).
36. SOLYMAR L. ve WALSH D., *Lectures on the Electrical Properties of Materials*, 5th. Edition, Oxford Science, London, (1993).
37. BUNGED Ion ve POPESCU M., *Physics of Solid Dielectrics*, Elsevier Science, Publishers, Amsterdam, (1984).
38. PALTA A., *Kısa Devre Yöntemi ile Dielektrik Malzemelerin Dielektrik Sabitlerinin Bulunması*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2002).
39. ÜNALDI T., *Karışımların Dielektrik Sabiti*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1989).
40. REICHA F.M., ISHRA M. ve GABR M., *On the Physical and Electrical Properties of Poly-propanal Prepared by Electropolymerization Technique*, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), (2002).
41. LENGALOVA A., PAVLINEK V., SAHA P., STEJKAL J., KITANO T. ve QUADRA O., *The Effect of Dielectric Properties on the Electrorheology of Suspensions of Silica Particles Coated With Polyaniline*, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com), (2002).
42. ORHUN Ö., *Amonyumhidrojensülfatın Dielektrik Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Eskişehir DMMA, Makina Fakültesi, Eskişehir, (1981).
43. ZHAO Y.L., PAN G.W., BEN Q.B., CAO Y.G., FENG L.X. ve JIAO Z.K., *High Dielectric Constant in  $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  Thin Film Prepared by Pulsed Laser Deposition*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).

44. CAMBON O., YOT P., RUL S., HAINES J. ve PHILIPPOT E., *Growth and Dielectric Characterization of Large Single Crystals of GaAsO<sub>4</sub>, a Novel Piezoelectric Material*, , <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
45. CHATTERJE S., MAHAPATRA P.K., SINGH A.K. ve CHOUDHARY R.N.P., *Structural, Electrical and Dielectric Properties of Na<sub>2</sub>W<sub>3</sub>O<sub>10</sub> Ceramic*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
46. K. GESHI. J., *Phys. Soc. Jpn.* **53** (1984), p. 385.
47. MOCHIDA T., SUZUKI S., TAKASU I. ve SUGAWARA T., *Dielectric Properties and Relaxation of SrBi<sub>2</sub>(Nb<sub>0.25</sub>Ta<sub>0.75</sub>)<sub>2</sub>O<sub>9</sub> Ceramic at RF Frequency*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
48. DERVOS C.T., THIRIOS E., NOVACOVICH J., VASSILIOU P. ve SKAFIDAS P., *Permittivity properties of thermally treated TiO<sub>2</sub>*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
49. KUMAR D.S. ve YOSHIDA Y., *Dielectric Properties of Plasma Polymerized Pyrrole thin Film Capacitors*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
50. JAYALEKSHMI S. ve PILLAI M.G.K., *Thin Solid Films* 122, p. 197, (1984).
51. HOWARD W., WEATHER J.R.S. ve AVAKIAN P., *J. Poly. Sci. Part B: Polym. Phys.* **30**, p. 637, (1992).
52. ZIDAN H.M, TAWANSI A. ve ABU-ELNADER M., *Miscibility, Optical and Dielectric properties of UV-Irradiated Poly(vinylacetate) / Poly(methylmethacrylate) Blends*, <http://www.sciencedirect.com>, (2003).
53. YILMAZ G. ve KALENDERLİ Ö., *Dielectric Behavior and Electric Strength of Polymer Films in Varying Thermal Conditions for 50Hz to 1 MHz Frequency Range*, IEEE-Electrical Insulation Conference, USA, Illinois, Sept.22-25, pp.269-271, (1997).
54. YILMAZ G. ve KALENDERLİ Ö., *Dielectric Properties of Aged Polyester Films*, IEEE- Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, USA, Minneapolis, Oct.19-22, (1997).

55. YILMAZ G. ve KAZANCI B., *Haberleşme Kablolarında Kullanılan PVC'nin Elektriksel özelliklerinin İncelenmesi*, XIV. Fizik Kongresi, (1993).
56. PARRAS G.C., MANOLAKAKI E. ve TSANGARIS G.M., *Dielectric Dispersion and Ac Conductivity in -Iron Particles Loaded-Polymer Composites*, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) , (2003).
57. THOUREL L., *Radomes*, ENSAE, Toulouse (France), (1965).

