

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GRAFİT VE VAKS KATKILI POLİAMİD 6 KOMPOZİTLERİN
MEKANİK, DİELEKTRİK VE İLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra AKBAŞ

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ali ÇORUH

Haziran 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GRAFİT VE VAKS KATKILI POLİAMİD 6 KOMPOZİTLERİN
MEKANİK, DİELEKTRİK VE İLETKENLİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kübra AKBAŞ

Enstitü Anabilim Dalı

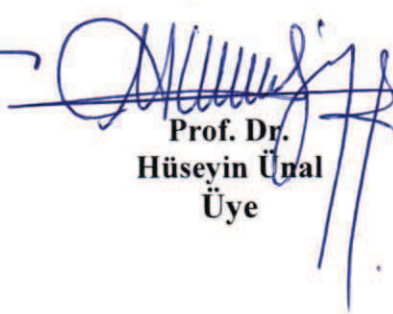
:

FİZİK

Bu tez 24/06//2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.



**Doç. Dr.
Ali ÇORUH
Jüri Başkanı**



**Prof. Dr.
Hüseyin Ünal
Üye**



**Doç. Dr.
Sadık BAĞCI
Üye**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Kübra AKBAŞ

24.06.2019



TEŞEKKÜR

Tez danışmanım sayın Doç. Dr. Ali ÇORUH'a teşekkür ederim.

Numunelerin temini için Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Hüseyin ÜNAL'a teşekkür ederim.

Numunelerin XRD ve SEM görüntülerini almak için cihazlarını kullandığımız Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Hatem AKBULUT'a teşekkür ederim.

Numunelerin çekme ve koparma deneylerinin yapılmasına müsaade eden Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünden Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e ve numunelerimizin ölçümlerini alan Murat Cihan ÇALIŞKAN'a teşekkür ederim.

Tüm eğitim ve öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her daim ellerini üzerimde hissettiğim annem Semahat AKBAŞ, babam Dursun AKBAŞ, abim Yusuf AKBAŞ, ablam Elif KOÇ'a, Fidan Akbaş ve Talip Koç'a teşekkür ederim.

Ayrıca her yorulduğumda bütün kalpleriyle bana güç veren yeğenlerim Tunahan, Zişan, Kerem Taha ve Ali Eren'e de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY	xiii
 BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
 BÖLÜM 2.	
TEORİK BİLGİLER	4
2.1. Kompozit Malzemeler	4
2.1.1. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması	5
2.1.1.1. Seramik matrisli kompozitler	5
2.1.1.2. Metal matrisli kompozitler	5
2.1.1.3. Polimerik matrisli kompozitler	5
2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması	6
2.1.2.1. Elyafli kompozitler	6
2.1.2.2. Tabakalı kompozitler	7
2.1.2.3. Parçacıklı kompozitler	7
2.1.2.4. Karma (hibrit) kompozitler	8
2.1.2.5. Fiber esaslı kompozitler	8
2.1.3. Kompozit malzemelerin genel özellikleri	8
2.1.4. Kompozitlerin kullanım alanları	9
2.1.5 İletken kompozit malzemeler	9

2.1.6. İletken dolgular	11
2.1.6.1. Karbon elyaf	11
2.1.6.2. Karbon siyahı	12
2.1.6.3. Grafit	13
2.1.7. Poliamid 6 (PA6)	15
2.2. Dielektrik Malzemeler	15
2.2.1. Dielektrik davranış	16
2.2.2. Alan vektörleri ve polarizasyon	18
2.2.3. Polarizasyon türleri	21
2.2.3.1. Elektronik polarizasyon	21
2.2.3.2. İyonik polarizasyon	22
2.2.3.3. Yönsel polarizasyon (polar molekül)	22
2.2.4. Dielektrik sabitinin frekansla değişimi	23
2.2.5. Dielektrik sonuçlarının analizi için önerilen modeller ve mekanizmalar	24
2.2.5.1. Debye modeli	25
2.2.5.2. Cole-Cole modeli	28
2.2.5.3. Cole-Davidson modeli	31

BÖLÜM 3.

NUMUNELERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ	34
3.1. Poliamid 6'nın (PA6) Sentezi	34
3.2. Karakterizasyon Yöntemleri	34
3.2.1. X ışını kırınımı (XRD)	34
3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	36
3.2.3. Dielektrik ve iletkenlik analizleri	37

BÖLÜM 4.

DENEYSEL BULGULAR	40
4.1. Mikro Yapı Özellikleri	40
4.1.1. XRD analiz sonuçları	40

4.1.2. Sem analiz sonuçları	43
4.1.3. EDS analiz sonuçları	44
4.2. Mekanik Özellikler	48
4.3. Dielektrik Ölçüm Sonuçları	51
4.3.1. Kapasitans-frekans ölçümleri	51
4.3.2. Sanal dielektrik sabiti-frekans hesaplamaları	54
4.3.3. Gerçek dielektrik sabiti-frekans hesaplamaları	56
4.3.4. Öz iletkenlik-frekans hesaplamaları	59
4.3.5. Kayıp faktörü-frekans hesaplamaları	61
4.3.6. Sanal dielektrik sabiti-sıcaklık hesaplamaları	64
4.3.6. Gerçek dielektrik sabiti-sıcaklık hesaplamaları	66
 BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	69
 KAYNAKLAR	
ÖZGEÇMİŞ	72
	76

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ε'	: Dielektrik sabitinin gerçek kısmı
ε''	: Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ε_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ε_∞	: Yüksek frekanslardaki dielektrik sabiti
ε_r	: Bağlı geçirgenlik katsayısı
ε_s	: Düşük frekanslardaki dielektrik sabiti
A	: Numunenin alanı
ac	: Alternatif akım
C	: Karbon
d	: Numunenin kalınlığı
dc	: Doğrusal akım
E	: Elektrik alan
F	: Farad
G	: Grafit
H	: Hidrojen
H ₂ SO ₄	: Sülfirik asit
HBr	: Hidrojen bromür
HCl	: Hidroklorik asit
HF	: Hidroflorik asit
I	: Elektrik Akımı
kHz	: kilohertz
MHz	: Megahertz
MPa	: Megapascal
N	: Azot
O	: Oksijen
P	: Polarizasyon

P_0	: Yönsel polarizasyon
PA6	: Poliamid 6
PAN	: Poliakrilonitril
P_e	: Elektronik polarizasyon
P_i	: İyonik polarizasyon
Q	: Yük
q	: Yük
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
THz	: Terahertz
UV	: Ultraviyole
V	: Elektrik potansiyel
XRD	: X ışınları kırınımı
C	: Kapasitans
D	: Dipollerin yük yoğunluğu
G	: Kondüktans
P	: Dipol moment
f	: Frekans
$\tan\delta$	: Dielektrik kayıp faktörü
ε	: Ortamın dielektrik geçirgenliği
θ	: Işığın gelme açısı
λ	: Gelen ışığın dalga boyu
σ	: Öz iletkenlik
τ	: Durulma zamanı
ω	: Açısal frekans

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Grafitin kristal yapısı	13
Şekil 2.2. Paralel bağlı levhalar arasındaki kapasitördeki vakumun bulunması	17
Şekil 2.3. Paralel bağlı levhalar arasındaki kapasitördeki dielektrik malzemesinin bulunması	18
Şekil 2.4. Aralarında d mesafesi bulunan iki elektrik yük (q büyüklüğünde) tarafından üretilen bir elektrik dipolü	19
Şekil 2.5. (a) Elektrik alan tarafından bir dipole etkiyen kuvvetler (b) Uygulanan alan sonucu oluşan dipol düzeni	19
Şekil 2.6. Elektrik alan etkisindeki bir atomda, elektron bulutunun çarpılmasıyla meydana gelen elektronik polarizasyon	21
Şekil 2.7. Elektrik alan etkisinde iyonların bağlı olarak ötelenmesiyle meydana gelen iyonik polarizasyon	22
Şekil 2.8. Uygulanan elektrik alan etkisinde, iyonların etkisinde kalıcı dipollerin yönü (oklar) ve yönsel polarizasyon oluşumu	23
Şekil 2.9. Bir p-n doğrultma birleşimine ait voltaj zaman ilişkisi	23
Şekil 2.10. Bir alternatif elektrik alanın etkisinde, dielektrik sabitinin frekansla değişimi. Dielektrik sabitine elektronik, iyonik ve yönsel polarizasyonun katkısı	24
Şekil 2.11. Debye modeline göre dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmının frekansa bağlılığı	26
Şekil 2.12. Dielektrik sabitinin Debye modeline göre sanal kısmının gerçek kısmına bağlılığı	28
Şekil 2.13. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin gerçek kısmının frekansla değişimi	29
Şekil 2.14. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi	30

Şekil 2.15. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına bağlılığı	30
Şekil 2.16. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin gerçek kısmının frekansla değişimi	32
Şekil 2.17. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi	32
Şekil 2.18. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına bağlılığı	32
Şekil 3.1. Bragg kırınımı	35
Şekil 3.2. XRD cihazı	36
Şekil 3.3. SEM cihazı	37
Şekil 3.4. Dielektrik ve iletkenlik ölçümleri için kullanılan LCR-metre	39
Şekil 4.1. PA6 + %5G numunesine ait XRD grafiği	40
Şekil 4.2. PA6 + %5G +%2 vaks numunesine ait XRD grafiği	41
Şekil 4.3. PA6 + %5G +%4 vaks numunesine ait XRD grafiği	41
Şekil 4.4. PA6 + %5G +%6 vaks numunesine ait XRD grafiği	42
Şekil 4.5. Tüm numunelerin x500 büyütmedeki SEM görüntüleri (a) PA6 + %5G (b) PA6 + %5G +%2 vaks (c) PA6 + %5G +%4 vaks (d) PA6 + %5G +%6 vaks	43
Şekil 4.6. PA6 +%5G +%4 vaks numunesinin x1000 büyütmedeki EDS görüntüsü	44
Şekil 4.7. PA6 + %5G + numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi	48
Şekil 4.8. PA6 + %5 + %2 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi	48
Şekil 4.9. PA6 +%5G +%4 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi	49
Şekil 4.10. PA6 + %5G +%6 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi	49
Şekil 4.11. PA6 + %5G numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	51
Şekil 4.12. PA6 + %5G +%2 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	52

Şekil 4.13. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	52
Şekil 4.14. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	53
Şekil 4.15. PA6 + %5G numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	54
Şekil 4.16. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi.....	54
Şekil 4.17. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	55
Şekil 4.18. PA6 +%5G + %6 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi.	55
Şekil 4.19. PA6 + %5G numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	56
Şekil 4.20. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	57
Şekil 4.21. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	57
Şekil 4.22. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitnin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	58
Şekil 4.23. PA6 + %5G numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	59
Şekil 4.24. PA6 +%5G + %2 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi.....	59
Şekil 4.25. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	60
Şekil 4.26. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	60
Şekil 4.27. PA6 +%5G numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	61
Şekil 4.28. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	62

Şekil 4.29. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	62
Şekil 4.30. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi	63
Şekil 4.31. PA6 + %5G içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	64
Şekil 4.32. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi.....	64
Şekil 4.33. PA6 + %5G + %4 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	65
Şekil 4.34. PA6 + %5G + %6 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	65
Şekil 4.35. PA6 + %5G içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi.....	66
Şekil 4.36. PA6 + %5G + %2 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	67
Şekil 4.37. PA6 + %5G + %4 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	67
Şekil 4.38. PA6 + %5G + %6 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi	68

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Bazı polimerlerin elektriksel iletkenlik değerleri.....	10
Tablo 2.2. Farklı seramik ve polimer malzemelerin, 60 Hz ve 1 MHz'deki dielektrik sabiti değerleri	16
Tablo 2.3. Bazı elektrik değişkenleri ve alan vektörleri için ana ve türetilmiş birimler	20
Tablo 4.1. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait 1. bölgedeki EDS analiz değerleri	45
Tablo 4.2. PA6 + %5G + +4 vaks numunesine ait 2. bölgedeki EDS analiz değerleri	46
Tablo 4.3. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait 3. bölgedeki EDS analiz değerleri	47
Tablo 4.4. Tüm numunelerin mekanik özellik değerleri	50

ÖZET

Anahtar kelimeler: Poliamid 6, grafit, vaks, mekanik özellikler, dielektrik özellikler

Bu tez çalışmasında %5 grafit ile katkılandırılmış Poliamid 6 polimer kompozitine %2, %4 ve %6 oranlarında vaks malzeme katılarak vaks katkısının kompozitin yapısal ve dielektrik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Üretilip kalıba enjekte edilen polimer kompozitler çekme işlemine tabi tutularak gerilme direnci ve elastiklik özellikleri ölçülmüştür. Koparılarak elde edilen bölge için SEM ve XRD çekilerek amorf yapının yapısal özellikleri incelenmiş ve açıklanmıştır.

Numunenin düzgün dikdörtgen prizma şeklinde düzenlenmiş parçası iki paralel yanından gümüş ile kaplanarak 20Hz-10MHz frekans aralığında ölçüm yapan LCR metre ile sığaları (kapasite) frekansa bağlı olmak üzere 25 °C - 100 °C sıcaklık aralığında kaydedilmiştir. Ayrıca empedansları da kaydedilmiştir.

Kaydedilen sığalar kullanılarak gerçek dielektrik sabiti (ϵ'), sanal dielektrik sabiti (ϵ'') ve ek olarak kayıp faktörleri ($\tan\theta$) hesaplanmıştır. Sonuçlar yorumlanarak malzemenin dielektrik ve iletkenlik özellikleri açıklanmıştır.

INVESTIGATION OF MECHANICAL, DIELECTRIC AND CONDUCTIVITY PROPERTIES OF POLYAMIDE 6 WITH GRAPHITE AND WAX ADDITIVES

SUMMARY

Keywords: Polyamide 6, graphite, wax, mechanical properties, dielectric properties

In this thesis, the effect of 2%, 4% and 6% wax addition to the structural and dielectric properties of the composite polyamide-6 polymer, doped with 5% graphite, is investigated.

The samples produced in an injection device and subjected to an extraction process. Strain resistivity and elastic properties were measured. Tensile parts subjected to SEM and XRD images and the results have been discussed, then, the structure was identified.

A rectangular shaped part of a sample coated by silver from two parallel sides. This coated sample mounted on a furnace monitored by a time dependent heat controller. Frequency and temperature dependent capacitances (C), impedances (Z) and loss factors ($\tan\theta$) have been evaluated by a high frequency LCR meter, between 20Hz-10MHz.

By using capacitances, real dielectric constants (ϵ') and imaginary dielectric constants (ϵ'') have been calculated. Results have been discussed and dielectric properties of material have been identified.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Polimer malzemeler, son yüzyılın teknolojisinde vazgeçilmez bir alan işgal etmişlerdir. Sert plastikler ve yumuşak plastikler yerine göre metallerin kullanılacağı alanlarda onların yerine tercih edilir olmuşlardır. Çok sert, saydam veya düşük sürtünmeli plastik malzemelerin özelliklerine hafiflikleri, ucuz olmaları da eklenince neden bu kadar tercih edildiklerini anlamak zor olmamaktadır.

Naylon, plastik gibi polimer malzemeler elde edilmiş şekillerine göre ve molekül yapılarına bağlı olarak nispeten yeterince yüksek erime sıcaklıklarına ulaşmaktadırlar.

Yüksek sertlik dereceleri, çekme ve aşınma dayanıklılıklarını ve nispeten yüksek sıcaklıklarda deforme olmamaları nedeniyle poliamidler üstün performans termoplastik malzemeler kategorisinde sınıflandırılmaktadırlar [1].

Bu nedenle yüksek sıcaklık teknolojisinde örneğin otomotiv sanayisinde ve elektrik endüstrisinde polimer malzemeler çokça kullanılır [2].

Poliamid ve türevleri elektrik yalıtım endüstrisinde geniş alanlarda, bobin tellerinin yalıtılmasında, şartel kontaklarında vb. yerlerde yalıtım amaçlı kullanılırlar [3].

Steeman ve Maurer, Poliamid-4,6'nın dielektrik özelliklerini frekansın, sıcaklığın ve nemin fonksiyonları olarak çalışmış, sıcaklığın artışıyla iletkenliğin keskin yükselme gösterdiğini tespit etmiştir [4].

Sıcaklık artışının elektrot polarizasyonuna sebep olduğunu ve bunun malzeme içinde dielektrik etkilerini kamufle ettiğini açıklamıştır.

A Gupta, polikarbonat/genişletilmiş grafit nanokompozitleri çalışmış, dc ve ac elektrik iletkenliğinin genişletilmiş grafit eklenmesiyle arttığını, örneğin malzemeye %10 grafit eklendiğinde 1MHz frekansta iletkenliğin 137 kat arttığını tespit etmiştir [5].

Koroliov ve arkadaşları “Polimer Matris İçerisine Gömülü Grafen Nanolevhaların Terahertz Zaman Bağımlı Spektroskopilerini” çalışarak sanal iletkenlik analiz sonuçlarının makroskobik özelliklerini anlamada ne kadar önemli olduğunu göstermişlerdir [6].

Fedulova ve diğerleri de on altı polimerin soğurma spektrumunu terahertz (THz) zaman aralıklı spektroskopisini kullanarak (0,1-3,0 THz) aralığında incelemişler. Böylece polimerlerin elektromanyetik dalga soğurma veya geçirgenlik özelliğini THz bölgesinde araştırmışlardır. Ayrıca dielektrik özelliklerini inceleyerek soğurma mekanizmasının 3 THz’den düşük bölgede gevşeme zamanı ile ve polimerin amorf durumu ile ilgili ilişkili olduğu göstermişlerdir [7].

Jin Y. S. ve diğerleri de “Polimerlerin Terahertz Dielektrik Özellikleri” adlı makalelerinde yine (0,2- 3,0 THz) bölgesinde farklı polimerlerin soğurma spektrumu, kırıcılık indisi ve dielektrik fonksiyonlarını incelediler. Dielektrik özelliklerin çok farklılık gösterdiğini belirlediler [8].

Poliamid 6 ve diğer polimerler farklı katkılayıcılarla katkılanarak gerilme, kopma, elastiklik, sertlik vb. fiziksel ve mekanik özellikleri yanı sıra iletkenlik, yalıtkanlık ve dielektrik gibi elektriksel özellikleri de amaca göre kontrol edilebilmektedir.

Ünal ve arkadaşları “ Vaks Katkısının Poliamid 6/ Grafit’in Elektriksel, Isısal ve Mekanik özelliklerini” araştırdılar [10]. PA6 + %5G ile %2, %4, %6 vaks eklenmesinin sürtünmeyi azalttığını, dielektrik ve elektriksel özelliklerini değiştirdiğini gözlemlediler [9].

Pathah ve diğerkleri grafen oksit ile güçlendirilmiş polianilin ile türevlerinin termomekanik ve elektrik özelliklerini çalıştıklarını makalelerinde %3 grafen oksit eklenmesiyle germe direncinin % 153- %32 aralığında arttığını maksimum elektrik iletkenliğinin 0,301s/cm olduğunu göstermişlerdir [10].

Yukarıda da görüldüğü gibi genelde polimer malzemelerin özelde ise PA6/Grafit katkılanırılmış türevlerinin mekanik, termodinamik ve elektrik, dielektrik özellikleri hakkında özellikle son yıllarda birçok çalışma yapılmış ve yapılmaya hala devam edilmektedir. Bu konunun bilim ve özellikle teknoloji dünyasına birçok katkıda bulunacağı açıktır.

Bu tez çalışmasında PA6 + %5 grafit üzerine %2, %4 ve %6 oranlarında vaks eklenerek sertlik, uzama, esneklik, öz iletkenlik, yalıtkanlık gibi dielektrik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Bu konunun seçilme sebebi daha iyi elektrik ve mekanik özelliklere sahip bir polimer malzeme üretme amacının yanı sıra özellikle otomotiv sanayinde kullanılmakta olan bu malzemenin daha yakından tanınmasını sağlamaktır.

BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Kompozit Malzemeler

Farklı veya aynı ve en az iki tür malzeme bulundurmak koşulu ile kendi özelliklerinin en iyilerini bir araya toplayarak veyahut yeni bir özellik ortaya çıkarmak suretiyle ortaya çıkan malzemeye ‘kompozit malzeme’ denir. Yaygın olarak kompozit malzemeler (polimer, seramik, metal...) ilave edilen (elyaf, parçacık, dolgu maddeleri...) eklenerek oluşturulmuştur.

Bir araya gelen malzemeler kimyasal ve fiziksel özelliklerini koruyarak daha iyi bir özellik sergilerler. Kompozitler incelendiğinde malzemenin özelliklerinin kendisine göre ileri düzeyde oldukları da gözlemlenir [11,12,13].

Kompozit malzemeleri elyaf ve plastiklerin birleşimi olarak adlandırsak da kompozit malzemeler metallere nazaran daha kolay şekil alması ve metallere nazaran daha az bir yoğunluğa sahip olması birçok çalışmalara sebep olmuştur ve çalışmalar sonunda ‘polimer esaslı kompozit malzemeler’ elde edilmiştir.

Polimer esaslı kompozit malzemeler cam, seramik ve metallere oranla daha hafif oluş sebebiyle ilerleyen teknolojiyle birlikte havacılık, otomotiv, kimya ve makine endüstrisinde materyallerin yerini almışlardır [14,15].

Kompozit malzemeler yapısal özellikleri göz önüne alındığında matris malzemesi ve katkı (takviye edici) malzemesine göre 2 grupta incelenir.

2.1.1. Kompozit malzemelerin matris malzemesine göre sınıflandırılması

2.1.1.1. Seramik matrisli kompozitler

Metal ve inorganik maddelerden oluşan maddelere seramik denir. Sert ve kırılgan yapıdaki seramikler yüksek sıcaklığa karşı iyi derecede dayanıklılık gösteriler. Kırılgan oluşları sebebiyle de kırılmaya karşı dirençleri düşüktür, dolayısıyla şekil verme durumu sınırlıdır. Uygun liflerin ve elyafların eklenmesiyle şekil verme durumu artırılabilir [16,17].

2.1.1.2. Metal matrisli kompozitler

Metal kompozitler metal alaşım ve takviye (metalik elyaf) kullanılmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Metal kompozitler yüksek sıcaklıklarda yüksek dayanıklılık göstermesi ve hafif oluşları sebebiyle ilerleyen teknoloji ile birlikte otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılmaya başlanmıştır [16,17].

Metal matrisli kompozitler yüksek sıcaklıklarda dayanıklılık gösterebilirler dahi kırılgan yapıdadırlar [16,17].

Metal matrisli kompozitlerin farklı çalışma alanları bulunmaktadır, yüksek dayanıklılık, düşük dayanıklılık ve iyi derecede termal özellik gösterme sebebiyle magnezyum katkılı olanları son yıllarda yaygınlaşan çalışmalardandır [16,17].

2.1.1.3. Polimerik matrisli kompozitler

Kompozitler arasında en yaygın olanlar polimer matrisli kompozitlerdir. Bunun sebebi kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerinin dikkat çekmesidir. Organik ve mineral maddeler ile katkılanırlmaları da oldukça yaygındır. Bu kompozitler yüksek kimyasal dayanıklılık ve yüksek dayanıklılığa sahip olmanın yanında yüksek elektrik iletkenliğe de sahiptirler. Hafif olmaları da diğer avantajlarındandır [17].

Polimerik kompozitler uçak, otomotiv ve uzay endüstrisinde yaygın olarak tercih edilirler. Bunun sebebi polimerik kompozitlerin metal kompozitlere nazaran daha ucuz ve kolay çalışabilecek malzemeler olmalarıdır.

Bir malzemenin dezavantajlarını ortadan kaldırmak için iki veya daha fazla malzeme karıştırılarak elde edilen polimer matrisli malzemeler son yıllarda yaygınlaşmıştır. Yapılan araştırmalara göre kompozit malzemelere takviye malzemesi olarak grafen ve grafen oksit gibi malzemeler yaygın olarak kullanılmıştır.

2.1.2. Kompozit malzemelerin takviye malzemesine göre sınıflandırılması

2.1.2.1. Elyafli kompozitler

Elyafli kompozitler, matrislerin içerisinde yükü taşıyacak dayanıklılığı artıracak elyafların yer almasıyla oluşmuş bir yapıdır. Elyafların matris içindeki sıralanışı kompozit malzemenin dayanıklılığını etkileyecek bir faktördür. Matris içerisindeki uzun elyaflar paralel olacak şekilde sıralandığında yüksek dayanıklılık sağlanırken elyaflar dik bir şekilde sıralandığında düşük dayanıklılık elde edilir. İki boyutlu sıralanmış olanlarda ise eşit mukavemet sağlanır. Elyafların dayanıklılığı kompozit malzemelerin dayanıklılığı açısından da önemlidir. Çünkü elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilecek yük miktarı artacaktır [12].

Elyaf demetler halinde kullanıldığında, katkısız polimer kompozitlere nazaran oldukça dayanıklıdır. Elyaf demetlerine bir etki yapıldığında demet halinde bulunan elyafların bir kısmı kopabilir, bir kısmı çizilebilir ya da yüzeylerinde çatlama meydana gelebilir. Elyaf demetlerine uygulanan bu etken karşısında oluşturduğu zarar sadece etki edilen elyaf üzerindedir diğerlerine iletmez. Kümelenmiş halde bulunan polimer malzemenin bir kısmında oluşmuş bu kusur malzeme içerisinde ilerleyerek malzemeyi kullanılmaz duruma getirebilir bu özellik de takviyeli kompozitler için bir dezavantaj durumudur [18].

Elyaf takviyeli kompozitler, uzay, havacılık ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Yüksek mekanik özellik ve hafif oluşları sebebiyle alüminyum alaşımları ile hazırlanmış olan kompozitler uçak sektöründe yaygın olarak kullanılır.

2.1.2.2. Tabakalı kompozitler

Birbirinden farklı olan malzemelerin üst üste dizilmesiyle tabakalı kompozitler elde edilir. Bu dizilimlerde polimerler, seramikler ve metaller yer alır [17].

Bilindiği üzere en yaygın olarak kullanılan tip tabakalı kompozitlerdir. Elyafların farklı dizilimleri ile oluşan tabakalar çok yüksek dayanıklılık elde edilir. Bu yapılar ısıya ve neme karşı dirençlidir. Metallere nazaran çok daha hafif ve dayanıklıdır [12].

Uçak yapımında yaygın olarak kullanılan tabakalı kompozit malzemeye örnek olarak da sandviç yapılar örnek verilebilir. Sandviç yapılar yük taşımazlar, izolasyon özelliğine sahip olma sebebiyle düşük yoğunluklu malzemenin yüzeylerine levhaların yapıştırılması ile elde edilir [12].

Tabakalı kompozitler, uçak yapımında kanat ve kuyruk kısmında kullanılırlar.

2.1.2.3. Parçacıklı kompozitler

Parçacıklı kompozitler matris malzemesi metal, seramik ve polimer olan malzemelerin içerisinde katkı malzemesinin parçacıklar halinde bulunması ile oluşmuş yapılardır. Malzemenin dayanıklılığı içinde bulundurduğu parçacığın sertliğine bağlıdır. Metal parçacıklı kompozitler ısı ve iletkenlik özellik gösterdiğinden, yaygın olarak kullanılan kompozit polimer matris içerisinde kullanılan metal parçacıklı kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitlerin içinde seramik parçacıklar bulunduran malzemelerin sıcaklık dayanıklılığı yüksek olduğundan uçakların motor parçalarının üretiminde kullanılırlar [12].

Parçacıklı kompozitler de katkı malzemesi ince parçacıklardan oluşmuştur. Bu parçacıklar, elyaf katkılı olan kompozitlerden daha ucuzdur.

Parçacık katkılı kompozitlerin metal ve polimer kompozitlerde kullanılması dayanıklılığın yükselmesine sebep olmaktadır [13].

2.1.2.4. Karma (hibrit) kompozitler

İki veya daha fazla elyaf çeşidinin aynı kompozit yapı içerisinde bulunma durumundaki kompozitlere hibrit kompozitler denir. Yeni çeşit kompozitlerin geliştirilmesi için uygun bir alan oluşturur hibrit kompozitler. Örnek olarak kevlar verilebilir. Kevlar; çok hafif ve karbon temelli ve çok sağlam liflerden meydana gelmiştir. Çok yüksek gerilmeye dayanan ince ipliksi bir elyaf çeşididir. Kumaş haline getirilebilir. Ayrıca savunma sanayinde de kullanılır olması sebebiyle kompozit malzemeler arasında popülerdir [12].

2.1.2.5. Fiber esaslı kompozitler

Yüksek etkinliğe sahip fiberlerin ilave edilmesiyle oluşmuş kompozitlerdir. Fiber şeklindeki malzemelerin dayanıklılığı kütle halindeki malzemelere oranla daha yüksek olma sebebiyle mühendislikte fiber esaslı kompozitler tercih edilirler.

Fiber esaslı kompozitlerin dayanıklılığının yüksek olmasının fark edilişiyle birlikte son zamanlarda ev eşyalarından savunma sanayine kadar kullanılmaya başlanmıştır. Fiber esaslı kompozitlerin mühendislik alanında kullanılmasını etkileyen unsurlar fiberlerin uzunluğu, şekli ve mekaniksel özellikleridir [19,20].

2.1.3. Kompozit malzemelerin genel özellikleri

Kompozit malzemeleri matris malzemelerine göre sınıflandırdığımız da polimer, seramik ve metal olarak olarak 3 ayrı kısımda incelemiştik. Polimer kompozit malzemeler $1,5-2 \text{ g/cm}^3$, metal kompozit malzemeler $2,5-4,5 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğuna

sahip iken seramik kompozit malzemeler bu iki kompozitler arasında bir yoğunluğa sahiptir. Genleşme katsayıları düşük oranda olduğundan sert sağlam yapıları büyük bir kararlılık gösterir. Yüksek mekanik özelliklere (basma, darbe, çekme, yorulma dayanımı) sahiptir. Kompozit malzemeler; pek çok kimyasal maddelere karşı yüksek direnç gösterme sebebiyle kimya sanayinde tercih edilen malzemedir. Kompozit malzemeler normal plastiklere nazaran ısı dayanımları oldukça yüksektir. Kompozit malzemelerin elektriksel özellikleri kullanılan malzemeye göre değişkenlik gösterilebilir.

2.1.4. Kompozitlerin kullanım alanları

Kompozit malzemelerin metal malzemelere göre daha düşük maliyet edilmesinin yanı sıra hafif oluşları, üstün mekanik özelliklere sahip oluşları ve işlenebilmeleri özellikleri sebebiyle yaygın bir kullanım alanına sahiptirler ve mühendislik alanlarında tercih edilir. Kompozit malzemeler, hasarlı yapıların güçlendirilmesi amacıyla inşaat sektöründe, helikopterlerin kanat kısımlarında kullanılmak üzere uçak ve savunma sanayinde, otomotiv üretiminde, golf sopaları ve raket gibi ve daha birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [21,22].

2.1.5 İletken kompozit malzemeler

Kovalent bağlarla bağlı atomların oluşturduğu molekül yapıya polimer denir. Polimerler yalıtkan malzeme olarak bilinirler bunun nedeni ise, iletkenlik ve değerlik bantları arasındaki enerji farkının yüksek olmasından kaynaklanır [22,23].

İletkenlik değerleri 10^{-20} Siemens/santimetre (S/cm) düzeylerinde olan ve yalıtkan olarak bilinen polimerler ticari amaçlı yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerdir. Polimer kompozitler, ticari termoplastikler olarak adlandırılır ve günlük yaşamımızda elektrik kablolarında, yalıtkanlık özelliği gösterilmesi beklenen iletken parçaların kaplanması kullanılır [20].

Tablo 2.1. Bazı polimerlerin elektriksel iletkenlik değerleri

Polimer	İletkenlik (S/cm ⁻¹)
Polietilen	10 ⁻²⁰
Polistiren	10 ⁻¹⁸
Poliamid 6,6	10 ⁻¹⁷
Poli (metil metakrilat)	10 ⁻²⁰
Poli (vinil klorür)	10 ⁻¹⁶
Poli (etilentereftalat)	10 ⁻²¹

Yüksek elektriksel iletkenliğe ve yüksek mekaniksel özelliğe sahip olan bir madde türü de metallerdir. Fakat polimer maddeler metallere nazaran daha hafif ve daha ucuzdurlar ve daha kolay şekil almaları sebebiyle metallerin yüksek elektriksel iletkenliği ve yüksek mekaniksel özelliği yapılan araştırmalar ve çalışmalar sonucunda polimer malzemelerin uygun iletken maddelere aktarılarak yeni bir malzeme ortaya çıkmıştır. Polimer malzemelere iletkenlik sağlamak amacıyla grafit, karbon siyahı ve karbon elyafı eklenmiştir.

Karbon esaslı polimer malzemelerin metallere göre daha düşük maliyet ve uzun ömürlü olmaları polimerlerin iletken malzeme olarak kullanılması için son yıllarda yaygın çalışmalar ileri sürülmüştür [11,21].

Polimer malzemelerin iletkenlik özelliğinin açığa çıkması hususunda poliasetilen, polifenilen gibi polimerler doğrudan veya bazı termoplastik, termoset polimerlerle karıştırılarak hazırlanır [24,25]. Bu hazırlanan polimerlerde iletkenlik, malzemelerin yapısındaki bağlar üzerindeki elektron taşınmasıyla sağlanır. Bunun yanında polimer malzemelerdeki iletkenliğin artırılması için polimerin yapısına elektron sağlayan asitler yüklenerek iletkenlik artırılır. Bu asitler HCl, H₂SO₄, HBr'dir. Bu asitler polimer yapıdaki malzemelere yükleme işlemi yapıldığı esnada malzemenin yapısında katyonik boşluklar oluşur. Bu boşlukların doldurulması da etrafındaki elektronların sıçraması ile kapatılır. Sıçrayan elektronların boşalttığı yerlerde ise artı

yük boşluklar tekrar açılmış olur ve bu şekilde elektriksel iletkenliğin artışı sağlanır [20].

İletken özelliğe sahip olması için polimer malzemelere karbon esaslı malzemelere eklenerek iletkenlik kazandırılmasının yanında polimer malzemelere metal tozları eklenerek de iletkenlik kazandırılır. Sonradan oluşturulmuş iletken kompozitler kendiliğinden iletken kompozitlere nazaran daha kolay hazırlanır ve daha düşük maliyete sahip olduklarından daha yaygındırlar.

Bu oluşturulan kompozit malzemenin iletkenliğinin sağlanabilmesi için iletken dolgular kullanılmaktadır. Bu iletken dolgular, demir ve nikel gibi metal toz parçaları eklenerek hazırlandığı gibi karbon elyaf ve grafit eklenerek de hazırlanabilir. Ancak bu kompozit malzemenin iletkenliği malzemeye eklenen iletken dolgunun polimer kompozit malzemenin içerisinde süreklilik oluşturması gereklidir. Bu süreklilik, malzemenin en belirgin noktadaki dolgu miktarına ulaşınca sağlanır. Bu noktanın altında iletkenlik sağlanmaz ya da çok az miktarda sağlanır, fakat bu noktanın üstündeki değerler de kompozit malzemenin iletkenliği hızla artış gösterir. Bu nokta “elektriksel perkolasyon noktası” olarak adlandırılır [26,27].

2.1.6. İletken dolgular

İletkenlik özelliği gösteren kompozit malzemeleri kullanılarak dolgularına göre ikiye ayrıldığını ifade edebiliriz. Bunlar karbon esaslı ve metal esaslı dolgulardır. Karbon esaslı dolgular içeren kompozit malzemeler metal esaslı kompozit malzemelere göre daha çok kullanılırlar. Çünkü hazırlanması şekil alması maliyeti ve polimer malzeme-dolgu yüzey etkileşimi sayesinde tercih edilmeleri yüksektir. Karbon esaslı dolgular; karbon siyahı, karbon elyaf ve grafit olarak incelenebilir.

2.1.6.1. Karbon elyaf

Hazırlık malzemesi olarak poliamid (PA), poliakrilonitril (PAN) veya ziftin yüksek sıcaklıklarda (1000-3000 °C) karbonizasyonu ile hazırlanması sonucu karbon elyaf elde edilir. Karbon elyafın sıcaklığı 1000 °C’den 3000°C ye doğru artıka

malzemenin elastikliği artarken çekme dayanımı azalır. Karbon elyaflar; yüksek termal iletkenliğe, düşük elektrik öz direnç ve düşük yoğunluğa sahip karbon çeşitleridir. İletken olmayan polimerlere elektriksel ve termal iletkenliği yüksek olan karbon elyaflar katılarak elektriksel ve termal iletkenliğe sahip iletken bir kompozit elde edilir.

Karbon elyaflar düşük termal genleşme katsayılarına sahip olduklarından, eklendikleri malzemenin de termal genleşmesini düşürürler. Karbon elyafların kullanıldıkları kompozitler son yıllarda kullanım alanları yaygınlaşarak otomotiv, inşaat ve diğer sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır [20,29].

2.1.6.2. Karbon siyahı

Karbon siyahı da bir çeşit karbondur. Kontrol edilebilen oksijen ortamında veya ısı bozunma sonucunda metan gazı, ağır ve hafif petrol yağları ve aromatik hidrokarbonların kısmi yanması sonucunda karbon siyahı elde edilir [30].

Yüksek sıcaklıkta kısmi yanmaya maruz kalan aromatik hidrokarbonların C-H bağları kopması gerçekleşir ve moleküller birbirinden ayrılır. C-H bağlarının kopması sonucunda da karbon atomları ile aromatik radikaller tabakalı hekzagonal karbon halkalarını oluşturmak üzere kristalografik yapıda tepkimeye girerler. Bunun sonucunda da oluşan kristalitlerden karbon siyahı parçacıkları meydana gelir [31].

Yaygın olarak kullanılan karbon siyahının büyük bir bölümü fırında yakma ve ısı bozunma yöntemi olarak iki yöntemle üretilir. Ve bu şekilde farklı özellikte karbon siyahları elde edilmiş olur. Karbon siyahının yaygın olarak kullanıldığı sektör kauçuk sektörüdür.

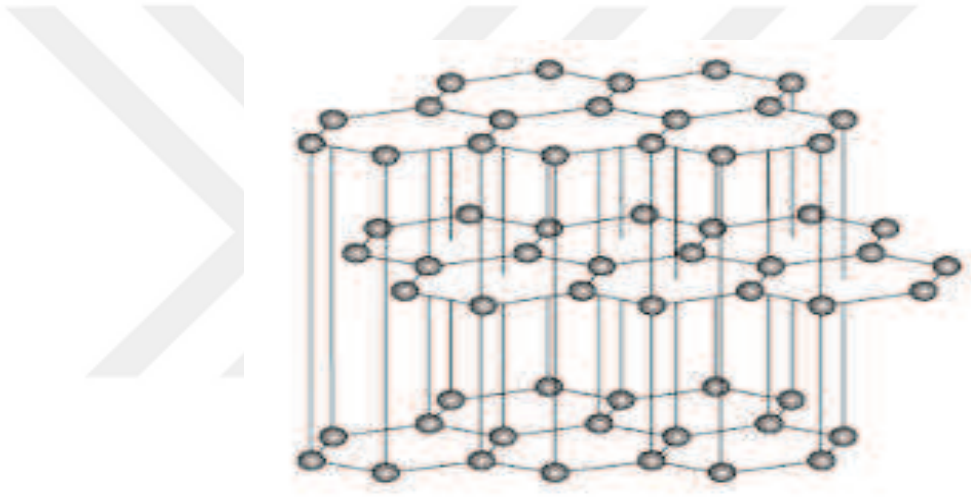
Karbon siyahı kullanıldığı kompozitlerde;

1. Boyutsal kararlılığı
2. Elektriksel ve termal iletkenliği
3. Ultraviyole (UV) ışınlarına karşı kararlılığı sağlar.

Karbon siyahı kullanılarak elde edilen polimer kompozitlerin iletkenlik değerleri, kullanılan karbon siyahının yüzey alanına, partikül büyüklüğüne, karbon siyahının yüzey özelliklerine bağlıdır. Kompozitlerin iletkenlik değerlerini artırmak için, yüksek yüzey alanına sahip ve tanecik çapı küçük karbon siyahı tercih edilir [20].

2.1.6.3. Grafit

Grafit; elmas ve kömür gibi karbonun üç ana şeklinden biridir. Bu mineralin adını alman mineralog A.G. Werner, eski yunanca da yazmak anlamına gelen “Graphein”den türeterek “Grafit” adını vermiştir [20].



Şekil 2.1. Grafitin kristal yapısı

Şekil 2.1.’de görüldüğü üzere grafitin bileşimi saf karbon olup hegzagonal örgü sistemde kristallenmektedir. Grafit, zayıf Vander Waals bağları ile aralarında kovalent bağlarla bağlanmış düzlemsel tabakalardan oluşan iki boyutlu karbon atomlardan meydana gelmiştir.

Grafitin rengi, koyu çelik grisi-siyah arasındadır. Dokunulduğunda yağsı yapısından dolayı ele kayganlık hissi verir. Grafit, ısıya karşı oldukça dayanıklıdır. Oksijenin fazla olduğu ortamlarda 620-670 °C’de yanmakta iken, 3500 °C’de erir ve 4500 °C’de ise buharlaşmaktadır [33].

Grafit, bu sıcaklıkların haricinde ortalama normal sıcaklıklarda ise kararlı bir hal sergiler ve kimyasal bozunmalara karşılık direnç gösterip kararlı bir hal sergiler.

Grafit, saf ve sentetik olmak üzere iki sınıfta incelenebilir. Saf halde bulunan grafit, asit ve bazlara karşı dirençlidir hatta HCl ve HF olan kuvvetli asitler içerisinde çözünmez. Fakat ısı ve elektrik iletkenliği yüksek olan “grafit asidi” olarak adlandırılan grafit nitrik asit içerisinde çözünerek elde edilmiştir [34,35]. Petrol ve antrasitin 4000 °C ye kadar ısıtılmasıyla oluşan grafit ise sentetik grafit olarak adlandırılır.

Saf grafit ile sentetik grafitin değişkenlik gösterilmesinin sebebi farklı işlemlere sahip olmasıdır. Saf grafitler işlenme durumlarına göre 3 farklı durumda bulunurlar.

1. Amorf grafit
2. Pulsu grafit
3. Kristal – damar tipi grafit

Amorf Grafit; yüksek sıcaklık ve basınç altındaki kömür yataklarının metamorfizması sonucu kayalar içerisinde mikrokristalin tanecikler içermesiyle oluşmuştur. Yapısı toprağımsıdır.

Pulsu Grafit; metamorfik kayalar içerisinde tabakalar halinde yığılmış ve sonra yüksek sıcaklık ve basınç altında değişikliğe uğramış bulunan organik maddelerin metamorfizması ile oluşmuştur.

Damar Tipi Grafit; metamorfik kayaların erken kaya oluşması öncesinde yapısındaki boşlukların ve çatlaklarında organik maddelerin birikmesiyle oluşmuş grafitir [36].

Grafit oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Tek başına kullanıldığı gibi başka malzemeler ile karıştırılarak da kullanılabilir.

Grafitin ağır olmayan yapısı birçok alanda kullanılmasına sebep olmuştur. Bu alanlar oldukça geniştir. Bazı uçak parçalarından spor malzemesine kadar kullanılmıştır. Ve son zamanlarda kuru pilin yapısında çokça grafit kullanılmıştır.

2.1.7. Poliamid 6 (PA6)

Poliamid 6; yüksek mol kütlesine ve kristalliğe sahip, nem aktivitesi düşük sentetik bir termoplastiktir. Poliamidlerin çeşitleri oldukça fazladır ve özellikleri çeşitlerine bağlıdır. Naylon türlerinin içinde mekanik ve fiziksel özellikleri açısından en iyi olanıdır. Düşük sürtünme katsayılarına sahiptir.

Sert yüzeyli ve çizilmeye dayanıklıdır. Kaynak edilebilir ve yapıştırılabilir. İyi mekanik özellikler gösterirler, nem aldığı ve sonradan dışarıya verdiği için. Kimyasal dirençleri iyi ve elektriksel özellik gösterirler. Poliamid 6'nın katı halden sıvı hale geçme noktası diğer Poliamidlere göre yüksektir ve katkısız Poliamid 6 için bu sıcaklık 220-225 °C' dir.

2.2. Dielektrik Malzemeler

Seramik ve polimer kompozit malzemeler yalıtkan olduklarından kapasitör olarak kullanılırlar. Cam, porselen, mika gibi seramik kompozit malzemelerin dielektrik sabiti 6 ile 10 arasında değişkenlik gösterebilir. Bu seramik kompozit malzemeler asit ve bazlara karşı yüksek kararlılık gösterirken deformasyona karşı da dayanıklılık gösterirler. Polimer kompozit malzemelerin ise dielektrik katsayısı 2 ile 5 arasında bulunabilir. (Tablo 3.1.) Polimer kompozit malzemelerin kullanım alanları oldukça geniştir. Kabloların, motorların ve kapasitörlerin yalıtımda kullanılırken, seramik kompozit malzemeler kapasitörlerin yapısında önemli yer tutar. Çünkü seramik kompozit malzemelerin dipol momentleri yüksektir ve bu özellik de seramik malzemelerin polimer malzemelerden daha yüksek dielektrik sabitine sahip olduğunu gösterir [37].

Tablo 2.2. Farklı seramik ve polimer malzemelerin, 60 Hz ve 1 MHz'deki dielektrik sabiti değerleri [37]

Dielektrik Katsayısı		
Malzemeler	60 Hz	1 MHz
Seramikler		
Mika	-	5,4-8,7
Porselen	6,0	6,0
Ergitilmiş silika	4,0	3,8
Steatit (MgO -SiO ₂)	-	5,5-7,5
Polimerler		
Fenol formaldehit	5,3	4,8
Naylon 6,6	4,0	3,6
Polisitren	2,6	2,6
Polietilen	2,3	2,3
Politetrafloretilen	2,1	2,1

2.2.1. Dielektrik davranış

Dielektrik malzeme, metal olmayan ancak elektriksel olarak yalıtkan davranan malzemeler olarak tanımlanır. Dielektrik malzemeler elektrik alan içerisinde elektrik dipole sahip olurlar ve atom veya molekül durumdaki bu dielektrik malzemelerin negatif veya pozitif yüklenmesi ile birlikte elektrik dipolleri birbirinden ayrılırlar. Elektrik alan içerisinde bu ayrılan dipoller etkileşerek artı bir yük daha kazanmış olurlar. Bunun sonucunda da dielektrik malzemeler kapasitörler kullanmıştır [37].

Kapasitans;

İki iletken paralel levhalar aynı büyüklükte fakat zıt işaretli yükler taşırlar bu şekildeki sisteme kapasitör denir. Zıt işaretli yüklerden kaynaklanan bir potansiyel fark oluşur. Kapasitörün üzerine de bir gerilim uygulandığında zıt kutuplar arasında bir elektrik alan oluşur ve bu levhaların birisi pozitif diğeri de negatif yükle yüklenmiş olur.

Kapasitans üzerinde depolanan yüke de Q ve uygulanan gerilime de V dersek kapasitansı bulabiliriz. Kapasitans ise C ile gösterilir, birimi de SI sisteminde volt başına düşen coloumb veya farad (F) olarak bulunur.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.1)$$

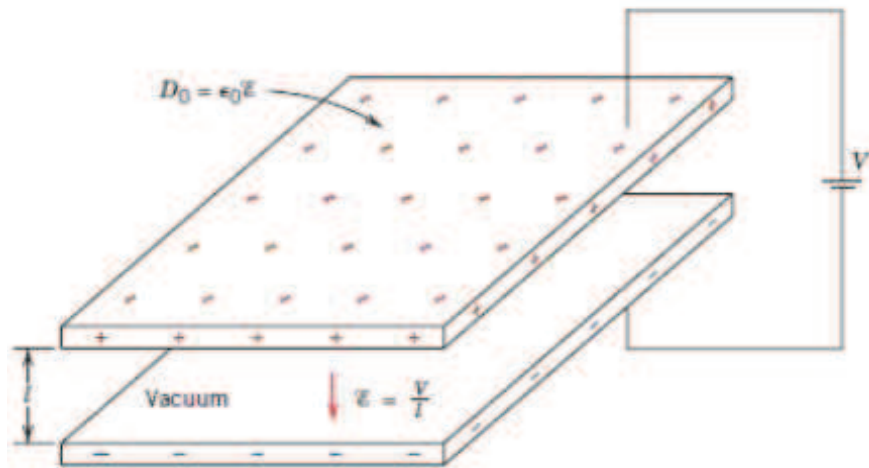
Levhalar arasında vakum bulunan kapasitörün kapasitansı ise aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.2)$$

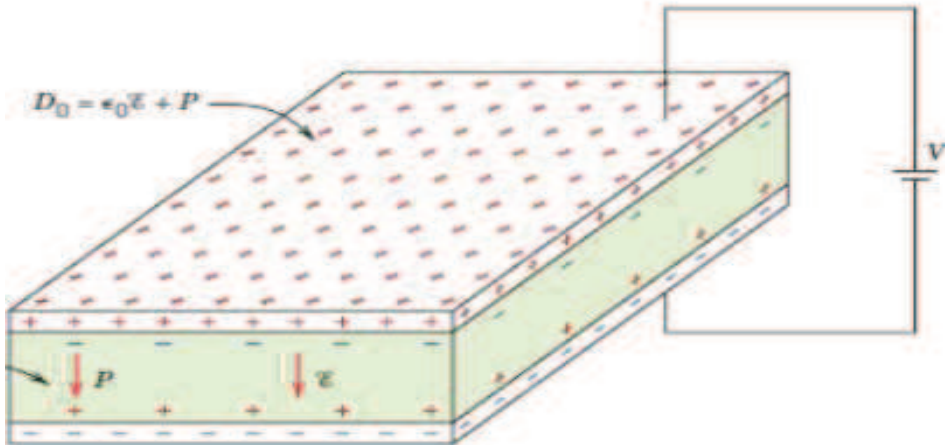
Bu denklemdeki A levhaların alanını ifade ederken d ise levhalar arasındaki mesafedir. Gene bu denklemde ifade edilen ϵ_0 ise vakuma ait geçirgenlik katsayısıdır. Sabit bir sayı olup değeri $8,85 \times 10^{-12}$ F/m'dir.

Levhalar arasına dielektrik malzeme konulduğunda ise kapasitans denkleminde ϵ_0 yerine ϵ yazılarak aşağıdaki denklem elde edilmiş olur.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.3)$$



Şekil 2.2. Paralel bağlı levhalar arasındaki kapasitördeki vakumun bulunması [37]



Şekil 2.3. Paralel bağlı levhalar arasındaki kapasitördeki dielektrik malzemesinin bulunması [37]

Şekil 2.2.'de verilen ϵ_0 vakumun geçirgenliğini ifade ederken Şekil 2.3.'de ϵ değeri ise dielektrik ortamın geçirgenliği ifade eder. Bağıl geçirgenlik ise vakumun geçirgenliği dielektrik ortamın geçirgenliğine bölerek bulabiliriz. Bağıl geçirgenlik aynı zamanda dielektrik katsayısı olarak da ifade edilebilir. ϵ_r olarak gösterilir. Dielektrik malzemelerde ϵ_r 1'den büyüktür.

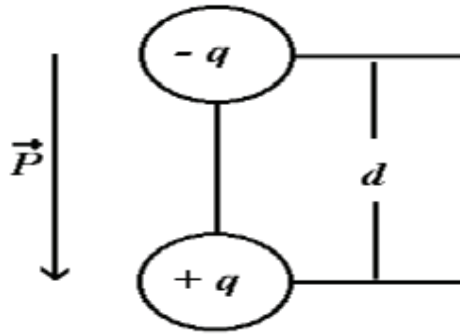
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_0}{\epsilon} \quad (2.4)$$

2.2.2. Alan vektörleri ve polarizasyon

İki paralel levha arasında depolanan yük miktarı alan vektörü ile açıklanabilir. Şekil 2.4.'de gösterildiği gibi elektrik dipollerinin pozitif ve negatif elektrik yükleri arasındaki mesafeye d dersek, buradaki elektrik dipol momenti,

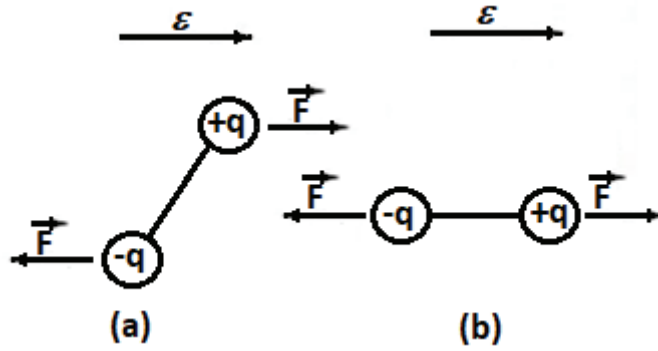
$$\vec{P} = q \cdot d \quad (2.5)$$

ile bulunabilir. Burada P dipol moment, d ise yükler arasındaki mesafedir. Dipol vektörel bir büyüklüktür ve negatif yükten pozitif yüke doğru yönelmiştir.



Şekil 2.4. Aralarında d mesafesi bulunan iki elektrik yük (q büyüklüğünde) tarafından üretilen bir elektrik dipolü

Şekil 2.5.'de gösterildiği üzere elektrik dipol, $\vec{E}$ vektörel alanı içinde dipolün alan doğrultusunda yönlendirilmesi sonucu uygulanan kuvvet doğrultusunda moment oluşur. Bu sebepten dipoller düzenlenir bu olaya “polarizasyon” denir.



Şekil 2.5. (a) Elektrik alan tarafından bir dipole etkiyen kuvvetler (b) Uygulanan alan sonucu oluşan dipol düzeni

Dipol yüzey yük yoğunluğunu $\vec{D}$ ile ifade edilirse; $\vec{D}$, birim alan başına düşen yük yoğunluğudur ve elektrik alan ile doğru orantılıdır. Levhalar arasında vakum bulunduğunda yüzeydeki yük yoğunluğu aşağıdaki denklem ile verilir.

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

bu denklemde ϵ_0 orantı sabitidir. Levhalar arasında vakum yerine dielektrik malzeme bulunduğunda ise denklem aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

Vakum durumundaki yük yoğunluğunda polarizasyondan veya dielektrik malzemeden kaynaklanan artış meydana gelir. $\vec{P}$ 'nin birimi de $\vec{D}$ 'nin birimi ile ifade edilir.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.8)$$

$\vec{P}$ polarizasyonu polarize olmuş elektrik alandır. Dielektrik malzemenin birim hacim başına düşen toplam dipol momentidir. Polarizasyon elektrik alan ile doğru orantılıdır.

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da verilen ϵ_r elektrik alanın büyüklüğünden bağımsızdır. Tablo 2.3.'de bazı dielektrik değişkenlerin birimleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Bazı elektrik değişkenleri ve alan vektörleri için ana ve türetilmiş birimler [37]

Değişkenler	Sembolü	Türetilmiş Birim	Ana Birim
Elektirsel Potansiyel	V	Volt	kg.m ² /s ² .C
Elektrik Akımı	I	Amper	C/s
Elektrik Alan Şiddeti	$\vec{E}$	Volt/metre	kg.m/s ² .C
Direnç	R	Ohm	kg.m ² /s.C ²
Özdirenç	P	Ohm.metre	kg.m ³ /s.C ²
İletkenlik	Σ	(ohm.metre) ⁻¹	s.C ² /kg.m ³
Elektrik Yüğü	Q	Kulon	C
Kapasitans	C	Farad	s ² .C ² /kg.m ²
Geçirgenlik	ϵ	Farad/metre	s ² .C ² /kg.m ³
Dielektrik Sabiti	ϵ_0	Boyutsuz	Boyutsuz
Dielektrik Öteleme	D	Farad.volt/m ²	C/m ²
Elektrik Polarizasyon	P	Farad.volt/m ²	C/m ²

2.2.3. Polarizasyon türleri

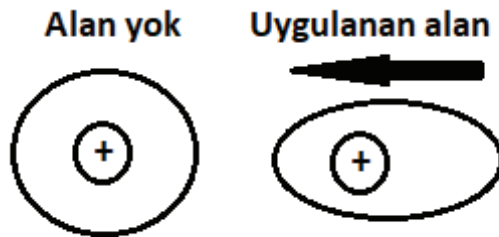
Kalıcı ya da uyarılmış atomik ya da moleküler dipol momentlerin dışarıdan uygulanmış elektrik alan etkisi ile alan yönünde yönelmesine polarizasyon denir. 3 çeşit polarizasyon türü vardır bunlar;

1. Elektronik Polarizasyon
2. İyonik Polarizasyon
3. Yönsel (polar) Polarizasyon

Dielektrik malzemeler, dışarıdan uygulanan elektrik alana ve malzemenin cinsine bağlı olarak bu 3 çeşit polarizasyon türlerinden biri ile gösterilir [37].

2.2.3.1. Elektronik polarizasyon

Dışarıdan uygulanan elektrik alan sebebiyle atomdaki negatif yüklü elektron kümesi pozitif çekirdeğe göre ötelenmesi sonucu elektronik polarizasyon oluşur. Bütün atomlarda elektronik polarizasyon meydana gelebilir, ancak bu bütün atomların farklı mertebelerinde oluşur. Dielektrik malzemelerde bulunan polarizasyon oluşumu dışarıdan uygulanmış elektrik alan sebebiyle olduğundan elektrik alanının varlığına bağlıdır [37].



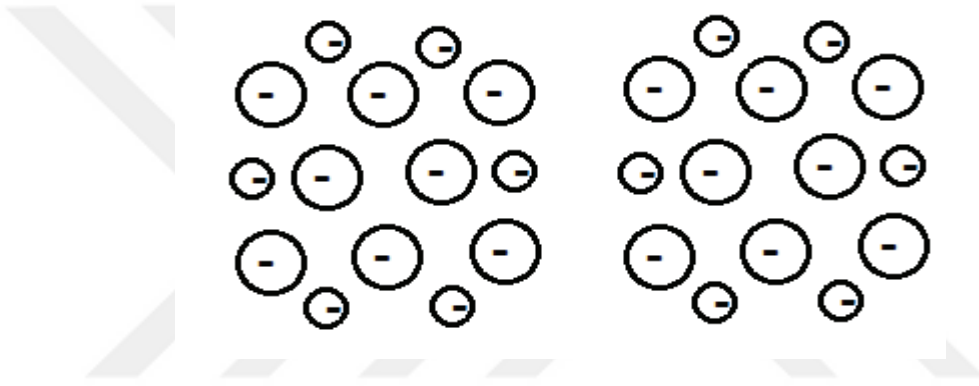
Şekil 2.6. Elektrik alan etkisindeki bir atomda, elektron bulutunun çarpılmasıyla meydana gelen elektronik polarizasyon

2.2.3.2. İyonik polarizasyon

Dışarıdan uygulanmış bir elektrik alan içerisinde iyonik malzemenin katyonları bir yöne ötelenirken, anyonları da tersi yöne ötelenir ve bu şekilde açık bir dipol momenti oluşur. İyonik polarizasyon sadece iyonik malzemelerde gözlemlenir.

İyon çiftlerinin dipol momentinin büyüklüğü bağlı öteleme ve iyon yükünün çarpımı ile bulunur [37].

$$p_i = qd_i \quad (2.10)$$



Şekil 2.7. Elektrik alan etkisinde iyonların bağlı olarak ötelenmesiyle meydana gelen iyonik polarizasyon

2.2.3.3. Yönsel polarizasyon (polar molekülü)

Geçici olmayan kalıcı dipol momente sahip maddelerde yönsel polarizasyon (polar molekülü) oluşur. Yönsel polarizasyon, uygulanan alan doğrultsun da momentlerin kalıcı olarak dönmesidir. Bu dönme; atomların yaydığı ısı titreşimi tarafından kısıtlanır. Ve bu sebepten sıcaklığın artmasıyla polarizasyon azalır [37].

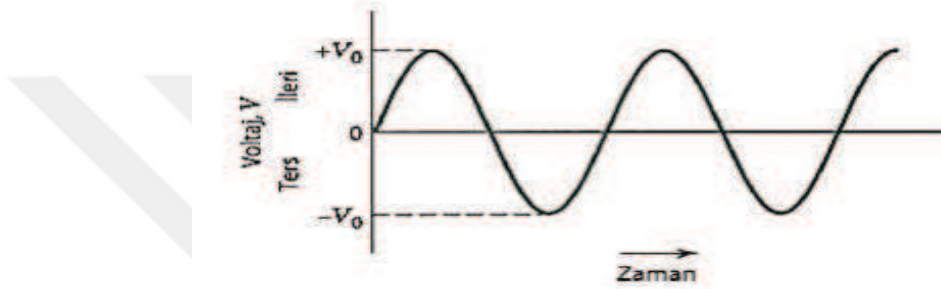
$$\vec{P} = \vec{P}_e + \vec{P}_i + \vec{P}_o \quad (2.11)$$

Denklem 2.11.'de de ifade edildiği üzere toplam polarizasyon; elektronik polarizasyon $\vec{P}_e$, iyonik polarizasyon $\vec{P}_i$ ve yönsel polarizasyonun $\vec{P}_o$ 'nun toplamına eşittir.



Şekil 2.8. Uygulanan elektrik alan etkisinde, iyonların etkisinde kalıcı dipollerin yönü (oklar) ve yönsel polarizasyon oluşumu

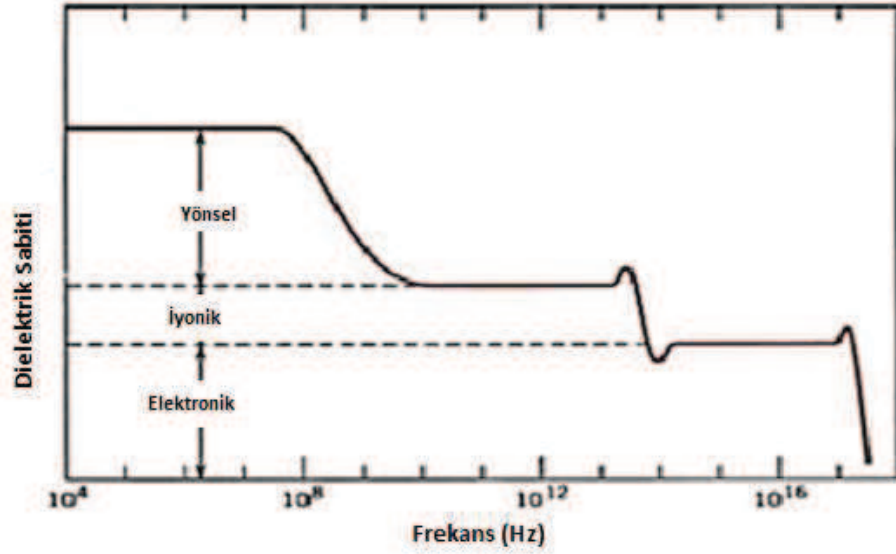
2.2.4. Dielektrik sabitinin frekansla değişimi



Şekil 2.9. Bir p-n doğrultma birleşimine ait voltaj zaman ilişkisi [37]

Şekil 2.9.'da gösterildiği üzere uygulanmış olan voltaj zaman ile yön değiştirir. Buradaki akım alternatif akım (ac) cinsindendir. Herhangi bir dielektrik malzemenin alternatif akım (ac) altında polarize edildiğini düşündüğümüzde Şekil 2.9.'de görülebileceği gibi yön değişiminde, dipoller uygulanan elektrik alan veya voltajla tekrardan yönlenme durumunu sergiler. Bu yönlenme belirli bir süre içerisinde gerçekleşecektir. Herhangi bir polarizasyon çeşidi için dipollerin düzenlenme durumuna bağlı olarak minimum yönlenme süresi vardır. Buradaki durulma frekansı minimum yönlenme süresinin tersi olarak ifade edilir [37].

Uygulanmış elektrik alandaki dipolün frekansı, gevşeme frekansının üzerine çıktığında dipol yönlenme doğrultusundaki ötelenme miktarını korumadığında dielektrik sabitinde değişiklik meydana getiremeyecektir. Dielektrik ortamda elektronik, iyonik ve yönsel polarizasyon 3 türü için de dielektrik sabitinin ϵ_r frekansa ait grafiği Şekil 2.10.'de gösterilmiştir ve bu grafikteki frekans logaritmiktir.



Şekil 2.10. Bir alternatif elektrik alanının etkisinde, dielektrik sabitinin frekansla değişimi. Dielektrik sabitine elektronik, iyonik ve yönsel polarizasyonun katkısı [37]

Uygulanmış elektrik alanının içerisindeki herhangi bir dielektrik malzemenin soğurduğu elektrik enerjisine “dielektrik kayıp” denir.

Elektrik alan etkisindeki dielektrik malzemenin gevşeme frekansına yakın frekans değerlerinde herhangi bir dipol çeşidi için bu dielektrik kaybının düşük olması istenilir [37].

2.2.5. Dielektrik sonuçlarının analizi için önerilen modeller ve mekanizmalar

Deneyisel çalışmaları analiz edip, sonuçları yorumlayabilmek için teorik modellerle karşılaştırmak için bazı modeller kullanılmıştır. Bunlar;

1. Debye modeli
2. Cole-Cole modeli
3. Cole-Davidson modeli

2.2.5.1. Debye modeli

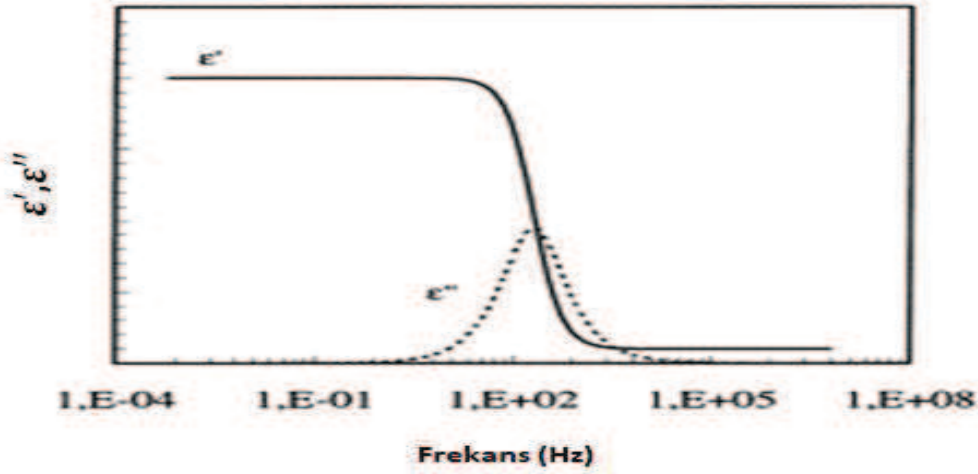
Dielektrik malzemenin dielektrik davranışlarını açıklamak için Debye modeli kullanılır. Debye modeli ile malzemelerin ölçümleri geniş frekans ve geniş sıcaklık aralığında alınır. Ve ölçümleri alınan dielektrik malzemelerin durulma zamanlarının dağılımı kullanılır.

Alternatif akım uygulanarak malzemelerin dielektrik davranışlarının incelenmesi birçok makalenin konusu olmuştur. Jonscher, bu konuda en detaylı çalışmaları yayınlayan araştırmacılardan biridir ve dielektrik spektroskopi için bir model geliştirmiştir. Bu modele göre bireysel dipoller ile dar yarı dolgulu bant oluşturan sistemlerin etkileşmesini açıklamıştır. Bu yöntemde dipol yönelim tercihleri iki potansiyel kuyusu ile temsil edilmiştir. Kuyuların tam dolu olması tam polarizasyonu temsil eder. Dış alan uygulanınca oluşan durum, dipol kuyuları arası geçişler ile ifade edilir. Üç tür geçiş tarif edilmiştir. Debye geçişinde parçacık bir kuyudan bir diğer kuyuya klasik yani termal geçiş yapar. Bu modelin sonuçları deneysel sonuçlarla uyumludur. Depolarizasyon akımının mevcut olduğu deneysel gözlem, evrensel yasaya benzer bir ifade verir. Depolarizasyon akımının zamana bağlı denklemi şu şekilde ifade edilir [42];

$$i(t) \approx t^{-n} \quad (2.12)$$

Kayıp pik frekansı yanında modelin Debye benzeri bir davranış göstermesi de önemlidir. Bununla birlikte, ideal Debye modelinin, malzemelerin çoğunluğunun dielektrik tepkisini tarif etmediği ve bu modele, yani dipollerin gevşeme zamanlarının dağılımına sahip olduğu varsayımına diğer yaklaşımların yapıldığı iyi bilinmektedir [42].

Herhangi bir malzemenin karmaşık bağıl geçirgenliğinin, gerçek ϵ' ve sanal ϵ'' kısımlarının frekansa göre değişimi şekil 2.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Debye modeline göre dielektrik sabitinin gerçek ve sanal kısmının frekansa bağlılığı

Frekansın yüksek olduğu bölgede ε_{∞} , boş alan katkısından ve malzemede bulunan tüm dielektrik duyarlılıkların toplamından oluşur. Frekansın düşük olduğu ε_s bölgelerde ise ε_{∞} , kayıp pik bölgesine karşılık gelen durulma durumuna karşılık gelir. Bu durum denklem 2.12. ile ifade edilir.

$$\varepsilon(w) = \varepsilon_{\infty} + f(w) \quad (2.13)$$

$w = 0$ için $f(0) = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}$ olur.

Kapalı sabit bir alanda Debye'yi takiben polarizasyon, τ zaman sabiti ile karakteristik durulma zamanı üssel olarak azalır ve Denklem 2.14 ile ifade edilir.

$$P(t) = P_0 e^{-t/\tau} \quad (2.14)$$

Laplace dönüşümleri kullanılarak frekans elde edilir.

$$f(w) = \int_0^{\infty} P(t) e^{iwt} dt$$

$$f(w) = \frac{P_0}{-iwt + 1/\tau} \quad (2.15)$$

$w = 0$ için $f(w)$ kullanılarak Debye eşitliği elde edilir.

$$\varepsilon(w) = \varepsilon_0 + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{-i w \tau + 1} \quad (2.16)$$

Gerçek ve sanal kısımları ise denklem 2.17 ve 2.18 yazılabilir.

$$\varepsilon(w)' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (w\tau)^2} \quad (2.17)$$

$$\varepsilon(w)'' = \frac{w\tau(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)}{1 + (w\tau)^2} \quad (2.18)$$

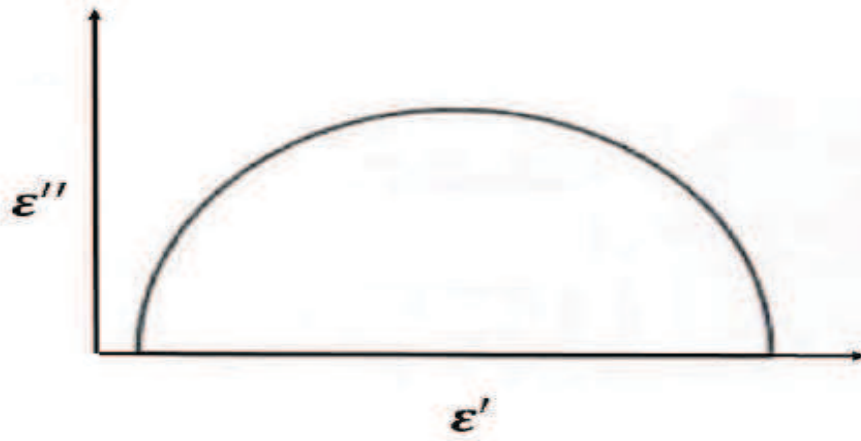
Birçok malzemenin dielektrik tepkisini Debye modeli tarif edemeyebilir, dipollerin bir durulma zamanı dağılımına sahip olduğu bilindiğinden de başka yaklaşımlar yapılır [38].

Durulma olayının gerçekleştiği frekans aralığı, dielektrik kaybın maksimum olduğu aralıktır. Sanal kısmın türevi durulma zamanını sayısal olarak ifade eder [39].

$$\frac{\partial \varepsilon''}{\partial w} [w = w_{max}] = 0 \quad (2.19)$$

$$w_{max} = \frac{1}{\tau} \quad (2.20)$$

τ durulma zamanı olarak ifade edilir. Elektrik alanının değişim yapması sonucu dipolün yönelmesi için geçtiği süredir. Küçük frekansa sahip elektrik alanlarda kutuplanma oluşur ve kayıplar göz ardı edilir. Durulma bölgesine kadar frekans artırdığında kutuplanma, elektrik alana uymakta güçleşir ve kayıplar göz ardı edilemez. Frekans daha da artırıldıkça artık kutuplaşma oluşmaz ve bu sebepten dielektrik sabiti de hızlıca azalır. Ve kutuplanma olmadığından dielektrik kayıp da olmayacaktır. Dipoller elektrik alandan $w \gg w_{max}$ olduğunda etkilenmez ve elektrik alan içinde serbest yük gibi davrandığında iletkenliğe fayda sağlarlar [40].



Şekil 2.12. Dielektrik sabitinin Debye modeline göre sanal kısmının gerçek kısmına bağlılığı [40]

Şekil 2.12.'de ki yarım daire, Debye modeline göre reel ve sanal dielektrik sabitinin birbirlerine olan davranışdır. Gerçek eksen üzerinde dairenin merkezi bulunmaktadır.

Kayıp faktör tanımı, dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına oranı olarak ifade edilir. Debye modeline göre kayıp faktör

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon(\omega)''}{\varepsilon(\omega)'} = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty(\omega\tau)^2} \quad (2.21)$$

dir.

2.2.5.2. Cole-Cole modeli

Dielektrik malzemelerin davranışını açıklamak için bir önceki bölümde Debye modelini ele aldık ancak dipollerin kendi aralarında etkileşimi ihmal edilebileceğinden Debye modeli her zaman yeterli olmamıştır ve geliştirilen çalışmalar sonrası deneysel davranışlarını belirtmek adına yeni modeller geliştirilmiştir. Bunlardan birisi de Cole-Cole modelidir [40].

Cole-Cole modeli ile dielektrik sabiti aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

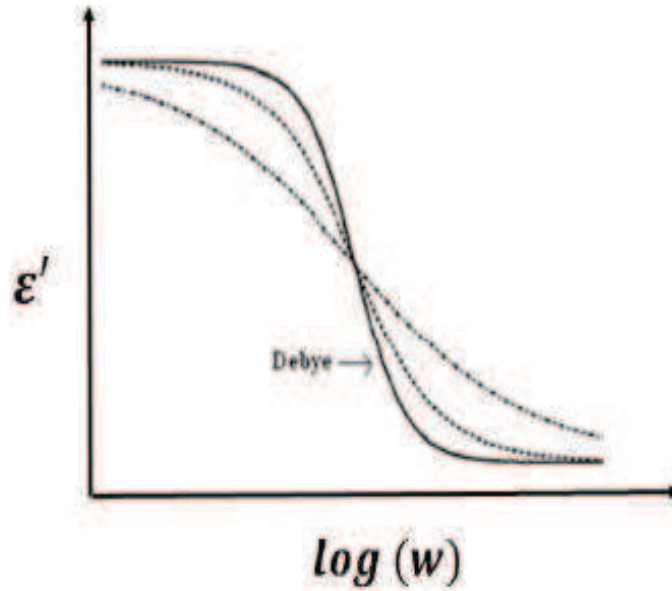
$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{\beta}} \quad (2.22)$$

Bu denklemde β parametresi kullanılmıştır. $0 < \beta \leq 1$ aralığında değer alan β parametresi durulma piklerin simetrik genişletilmesini ifade eder. Karmaşık dielektrik sabitini gerçekte ve sanal kısımlarına ayırırsak aşağıdaki denklemler bulunmuştur.

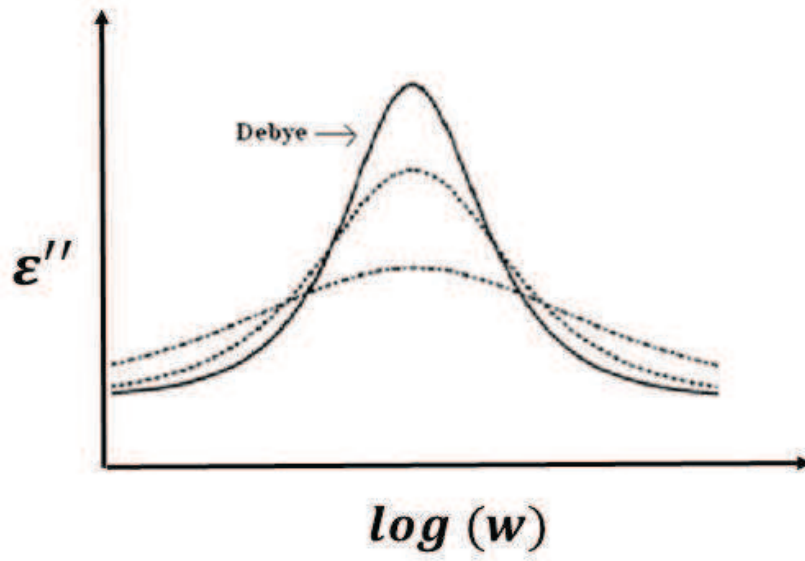
$$\varepsilon(\omega)' = \varepsilon_s + (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{1 + (\omega\tau)^{\beta} \cos(\frac{\beta\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau)^{\beta} \cos(\frac{\beta\pi}{2}) + (\omega\tau)^{2\beta}} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon(\omega)'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{(\omega\tau)^{\beta} \sin(\frac{\beta\pi}{2})}{1 + 2(\omega\tau)^{\beta} \cos(\frac{\beta\pi}{2}) + (\omega\tau)^{2\beta}} \quad (2.24)$$

Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin gerçekte ve sanal kısmının frekansa bağlı grafikleri Şekil 2.13. ve Şekil 2.14. de gösterilmiştir.



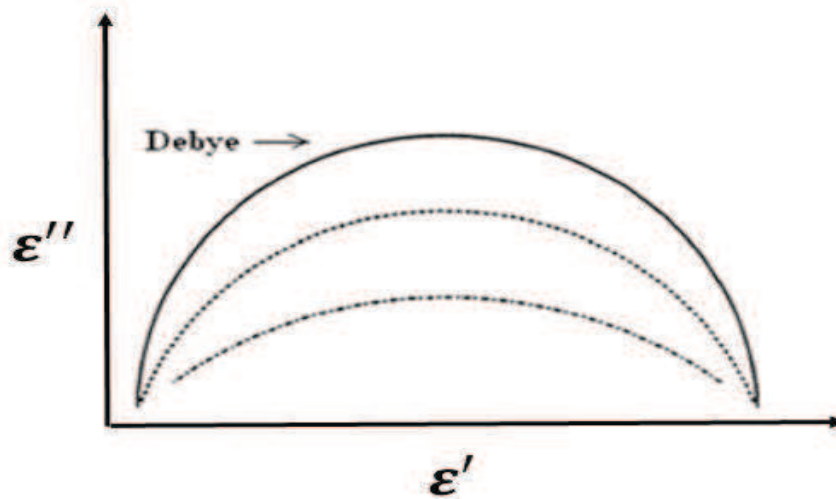
Şekil 2.13. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin gerçekte kısmının frekansla değişimi [40]



Şekil 2.14. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi [40]

Aynı frekans değerinde dielektrik sabitinin, gerçek kısmının ve sanal kısmının birbirlerine olan değişimleri ise Şekil 2.15.'da gösterilmiştir.

Şekil 2.15.'da Debye eğrisinin hemen altında kalan kesikli çizgiler ile ifade edilen eğriler, Cole-Cole modeline β 'nin farklı değerler aldığındaki eğrileridir.



Şekil 2.15. Cole-Cole modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına bağlılığı [40]

Dielektrik sabitinin gerç k kısmının sanal kısmına oranı dielektrik kayıp faktör olarak tanımlanır. Cole-Cole modeli için dielektrik kayıp faktör denklem 2.25.'de verilmiştir.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon(w)''}{\varepsilon(w)'} = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(w\tau)^\beta \sin\left(\frac{\beta\pi}{2}\right)}{\varepsilon_\infty \left(2(w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right) + (w\tau)^{2\beta}\right) + \varepsilon_0(1 + (w\tau)^\beta \cos\left(\frac{\beta\pi}{2}\right))} \quad (2.25)$$

2.2.5.3. Cole-Davidson modeli

Cole-Cole modeline göre $\frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_\infty}{2}$ noktasında  zilen  ğriler bütün dielektrikler için simetrik değildir. Bazı dielektrik malzemelerin sanal kısmının gerç k kısmına göre çizimleri incelendiğinde asimetrik olduğu g r lm ştir. Yapılan deneysel  alışmalar Cole-Cole modeline alternatif olmasına adına Cole-Davidson modeli  ne s r lm ştir [39].

Cole-Davidson modeline göre aşağıdaki denklem ifade edilmiştir.

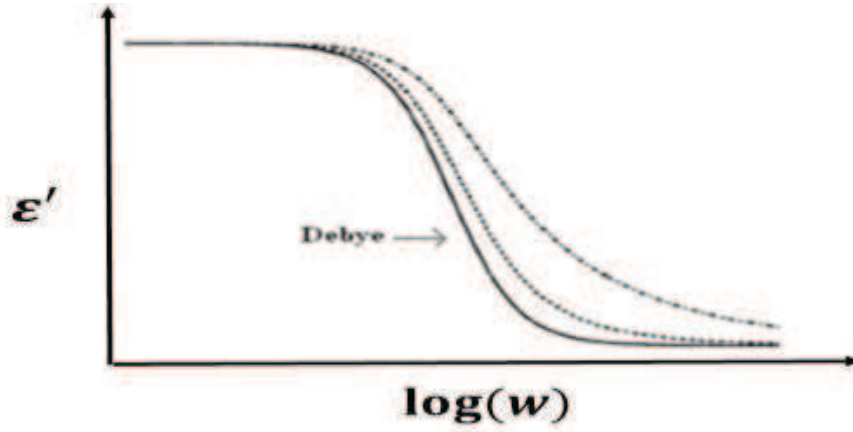
$$\varepsilon(w) = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{1}{(1 + i w \tau^\beta)^\alpha} \quad (2.26)$$

Cole-Davidson modeline göre $\beta = 1$ iken α ise $0 < \alpha < 1$ aralığında değerler alır. Dielektrik sabiti ifadesinden yola çıkararak Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımları aşağıdaki denklemler gibi ifade edilir.

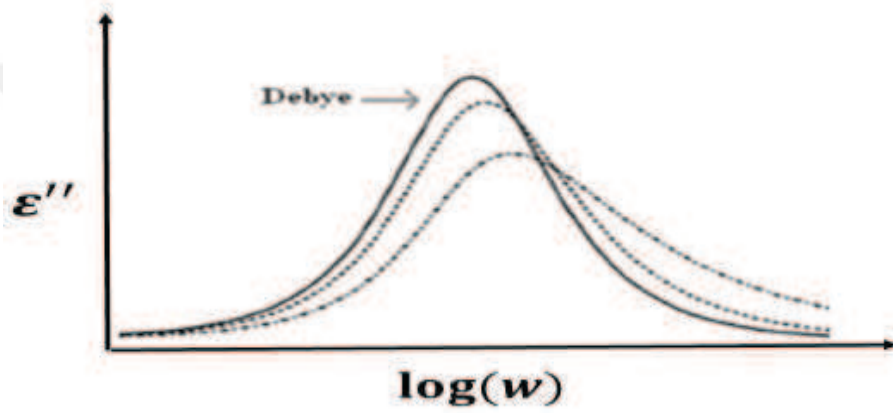
$$\varepsilon(w)' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \cos\phi^\alpha \cos\alpha\phi \quad (2.27)$$

$$\varepsilon(w)'' = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) (\cos\phi)^\alpha \sin\alpha\phi \quad (2.28)$$

Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin gerç k ve sanal kısmının frekansa bağlı grafikleri şekil 2.16. ve şekil 2.17.'de gösterilmiştir.

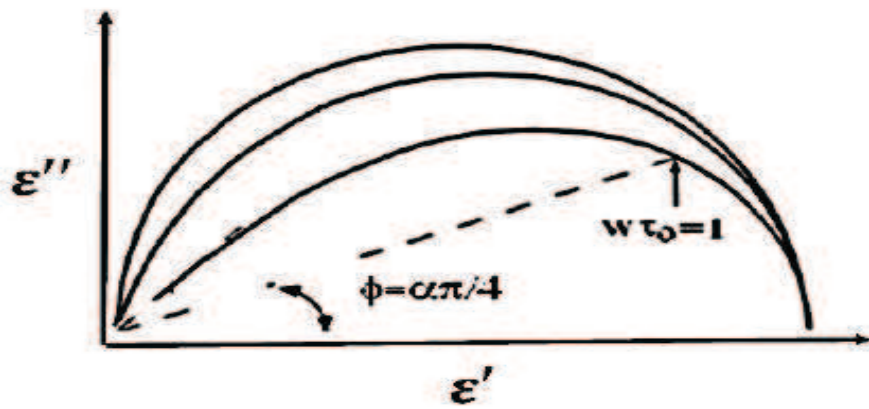


Şekil 2.16. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin gerçek kısmının frekansla değişimi [40]



Şekil 2.17. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının frekansla değişimi [40]

Dielektrik sabitinin gerçek kısmının sanal kısmına göre bağımlılığı Şekil 2.18.'da verilmiştir.



Şekil 2.18. Cole-Davidson modeline göre dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına bağımlılığı [40]

Şekil 2.18.'da gösterilen içteki eğriler Cole-Davidson modelini ifade eder. Ve bu eğriler α 'nın farklı değerlerine göre çizilmiştir. Grafikte ki τ_0 durulma zamanı w ise maksimum frekanstır.

Cole-Davidson model için kayıp faktörü denklem 2.29 ile aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon(w)''}{\varepsilon(w)'} = \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(\cos\phi)^\alpha \sin\alpha\phi}{\varepsilon_\infty + (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty)(\cos\phi)^\alpha \sin\alpha\phi} \quad (2.29)$$

BÖLÜM 3. NUMUNELERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

3.1. Poliamid 6'nın (PA6) Sentezi

Kompozit malzemelerin hazırlanmasında temel malzeme olarak Poliamid 6 (PA6) kullanıldı. Katkı malzemesi olarak ise % 5 oranında grafit kullanılmıştır ve daha sonra bu karışıma % 2, % 4 ve % 6 oranlarında vaks ilave edilerek PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks olmak üzere 4 farklı malzeme hazırlanmıştır. Karışım hazırlanma sürecinde önce Poliamid 6, 80°C fırında 4 saat bekletilerek içindeki rutubet buharlaştırılarak uzaklaştırıldı. Sonrasında bütün karıştırılacak malzemeler NRII-75 tip çift doğrayıcı ufalayıcı (ganülleştirici) de toz parçalar halinde karıştırıldı. Bu malzemeler karıştırılırken iç sıcaklık 220 °C-250°C arasında tutuldu. Karıştırıcı da iyice birbirine karıştırılan malzeme toz haline getirilerek eritme kalıbına (ERAT marka) enjekte edildi ve kalıp olarak dışarı alındı [41].

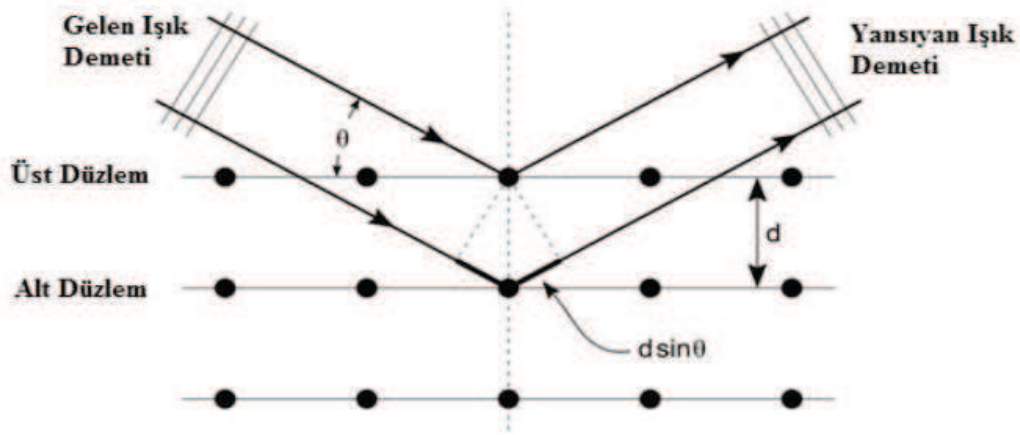
3.2. Karakterizasyon yöntemleri

3.2.1. X ışını kırınımı (XRD)

Bir kristalin atomik ve moleküler yapısını incelemek için X-ışını difraksiyonu (kristalografisi) kullanılır. X-ışını demetindeki ışınların kristalleşmiş atomlara çeşitli yönlerde kırınımına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem ile kristalin; doğrultusu, fazın saflığı, yapısı, örgü sabitleri, yapısındaki düzensizlik ve atomların kristal yapıdaki ortalama konumları tespit edilebilir [42].

Ayrıca katıların kristal yapılarını incelemek için kullanılan bu X ışını kırınımı yöntemi, ince film analizi için uygun bir yöntemdir. Bunun nedeni incelenen numunenin yapısını değiştirmez.

X ışınları kristal bir yapı üzerine geldiğinde, ışınlar tam yansımaya uğrar ve ışınlar kristaldeki atomların paralel düzlemleri tarafından saçılırlar. Kristalin yapısındaki bu saçılmalar kırınım olarak adlandırılır ve kırınım olayı Bragg yasası ile açıklanır.



Şekil 3.1. Bragg kırınımı

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

Denklem 3.1.'de ifade edilen d kırınım yüzeyleri arasındaki mesafe, θ ışın demetinin geliş açısı iken λ ise ışın demetinin dalga boyunu verir.

θ açısı yapacak şekilde gelen ışın demeti hem üstteki hem de alttaki atomların düzlemlerinden yansır. Ancak Şekil 3.1.'de gösteriyor ki alt yüzeyden yansıyan ışın demeti üst yüzeyden yansıyan ışın demetinden daha fazla yol alıyor. Bu iki ışın demeti arasındaki yol farkı $2d \sin \theta$ kadardır. Bu yol farkı λ dalga boyunun tam katı olduğundan bu iki ışın demeti birbirini kuvvetlendirir bu ifade ise yapıcı girişim olarak adlandırılır [42].

Bizim yapmış olduğumuz çalışmalardaki numunelerimizin XRD analizi, Şekil 3.2.'de gösterilen Sakarya Üniversitesi, Materralurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Rigaku D/MAX/2200/PC model cihaz ile ölçülmüştür.



Şekil 3.2. XRD cihazı

3.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeylerini tarayarak çok küçük cisimlerin büyük görüntülerini oluşturmak için taramalı elektron mikroskopları veya SEM (taramalı elektron mikroskobu) kullanılır. Bu taramalı elektron mikroskopları yüksek ayırma gücüne sahiptir ve katı yüzeylerin incelenmesi için geliştirilmiştir. Elektron demeti numunedeki atomlarla etkileşerek bir tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve elektron demetinin bulunduğu konum, alınan sinyaller ile eşleştirilir ve görüntü elde edilir [42].

Taramalı elektron mikroskobu ile yapılan incelemelerde numune metal tercih edildi ise, metal numuneler iletken olduğundan yüzeyinde kaplama işlemi yapılmadan ölçüm alınabilir fakat numune metal değil ise yani yalıtkan ise yüzey iletkenliğin sağlanabilmesi adına altın veya paladyum ile kaplanmalıdır [42].

Elektron tabancası ile üretilen elektron demetleri cisme gönderilerek anottan geçmesi sağlanır ve elektronlar manyetik mercekler sayesinde odaklanır. Numune ile etkileşen elektron demetleri farklı açılar ile saçılır. Saçılan bu demetler bir dedektör aracılığı ile toplanır ve elde edilen veriler taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiş olur [42].

Bizim yapmış olduğumuz çalışmalarda numunelerimiz Şekil 3.3.'de gösterilen Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan JEOL JSM-6060LV model taramalı elektron mikroskobu ile karakterize edilmiştir.



Şekil 3.3. SEM cihazı

3.2.3. Dielektrik ve iletkenlik analizleri

Çalışmadaki numunelerin dielektrik özellikler analizi Şekil 3.4.'de verilen GW-INSTEK LCR-8110G Precision LCR Metre Dc cihazı kullanılmıştır. Kullanılan malzeme 25°C - 100°C aralığında ısıtılarak 5°C de bir artırılarak 20Hz-10MHz frekans aralığında ölçüm yapılmıştır. Kullanılan malzemenin sığası (C) ölçüldü. Dielektrik sabitleri hesaplamak için de aşağıdaki yöntemler kullanıldı.

Gerçek dielektrik sabiti;

$$\varepsilon' = \frac{C.d}{A.\varepsilon_0} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2' de C sığa (kapasitans), d malzemenin kalınlığı, A alanı, ε_0 ise boşluğun elektrik geçirgenliğe direnci (dielektrik) sabiti olup $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ ile ifade edilir.

Öz iletkenlik;

$$\sigma = \frac{G.d}{A} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3' de ifade edilen G ise elektriksel iletkenlik (kondüktans) 'dır.

Sanal Dielektrik sabiti;

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (3.4)$$

Denklem 3.4' de ifade edilen f frekanstır.

Kayıp faktörü;

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (3.5)$$



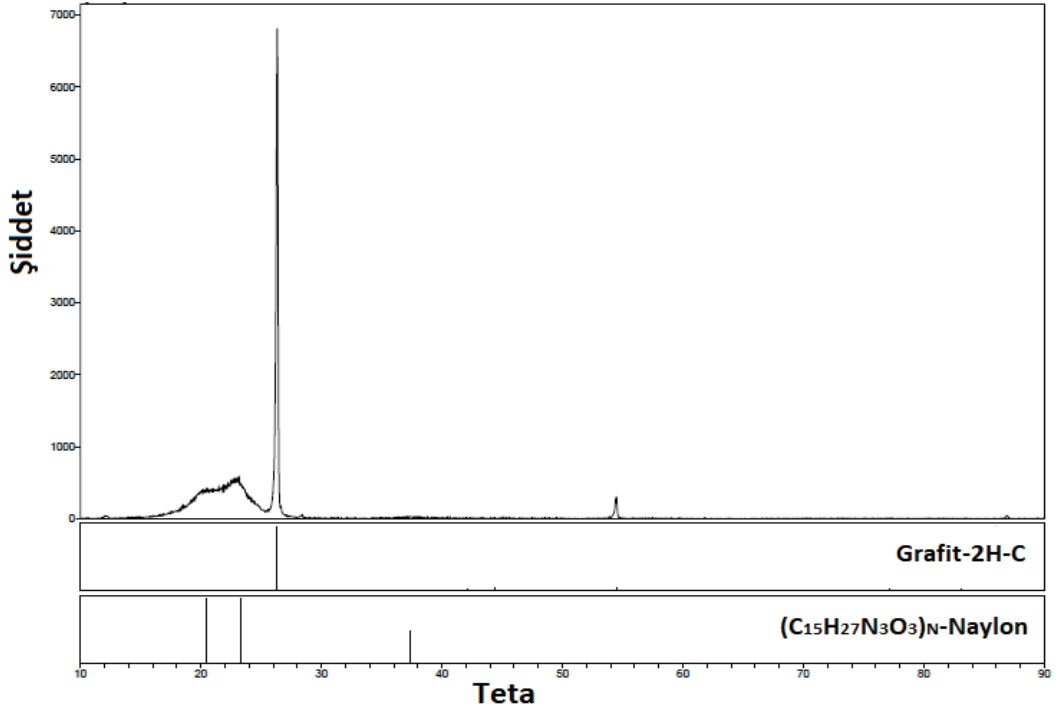
Şekil 3.4. Dielektrik ve iletkenlik ölçümleri için kullanılan LCR-metre

BÖLÜM 4. DENEYSEL BULGULAR

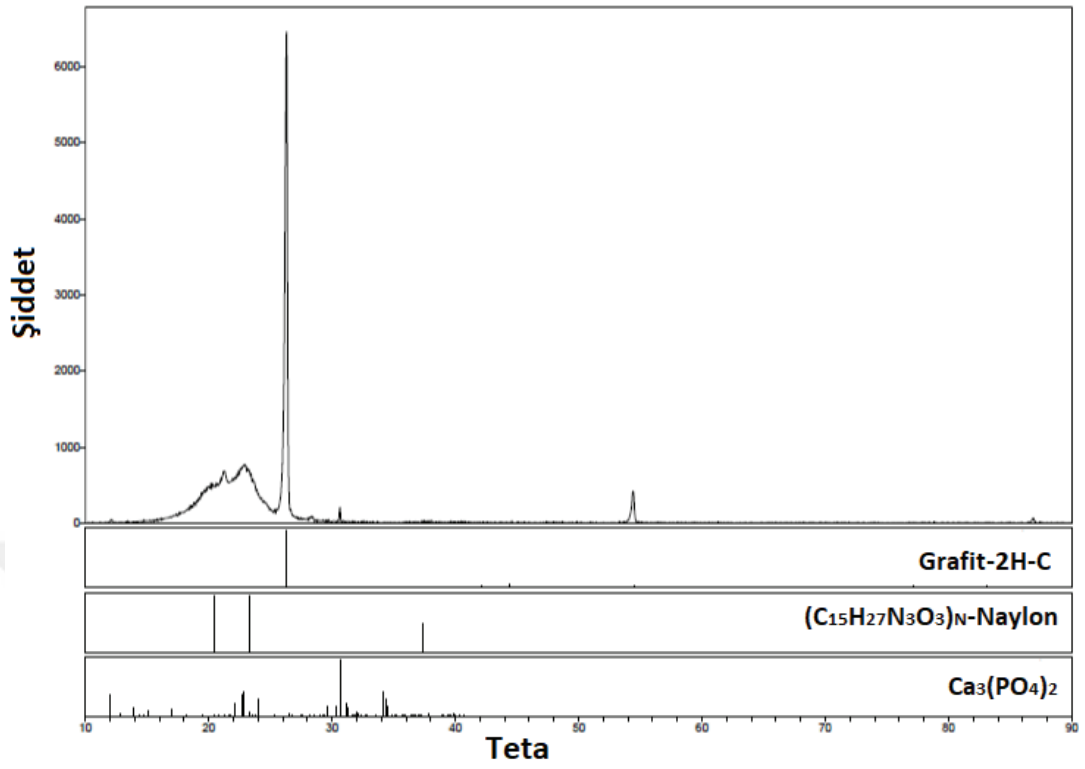
4.1. Mikro Yapı Özellikleri

4.1.1. XRD analiz sonuçlar

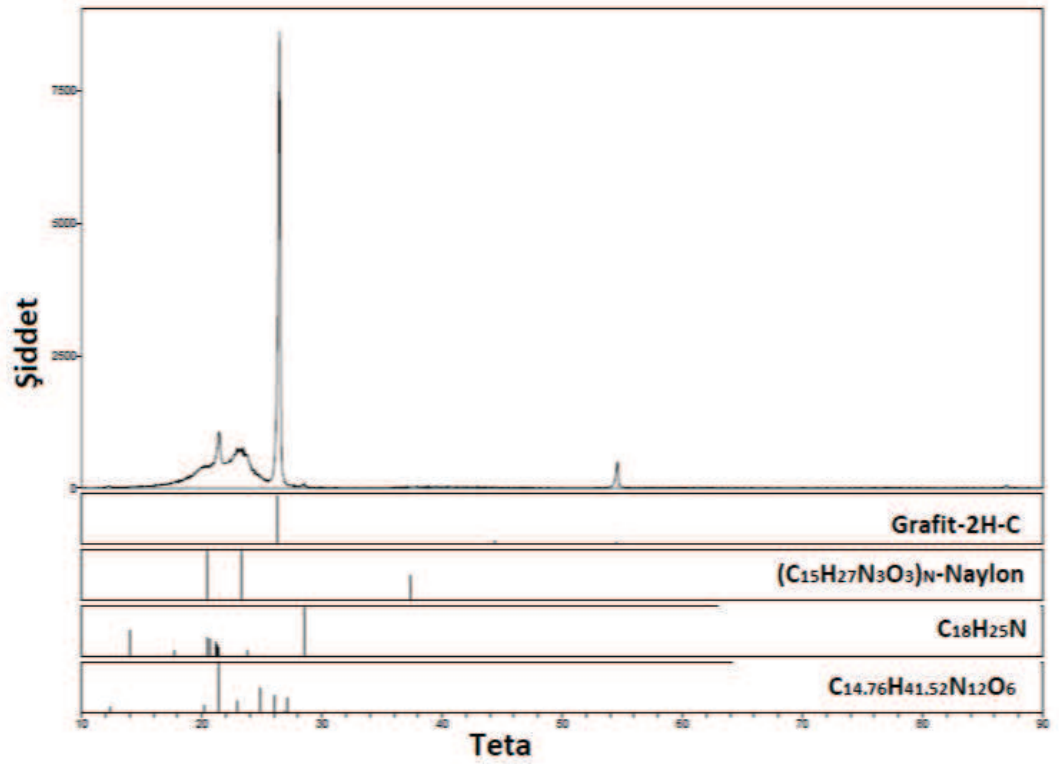
Şekil 4.1.'den Şekil 4.4.' e kadar verilen XRD grafiklerinde numunelerin içinde PA6 (Naylon 6) ve grafit saptanmıştır. Şekil 4.2., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de ise numunelerin içerisinde PA6 ve grafitte ek olarak vaks olduğu saptanarak numuneler tayin edilmiştir. Ancak kesin olmamakla beraber XRD sonuçlarına göre numunelerde eser miktarda yabancı maddeler de gözlenmiştir (bakınız Şekil 4.1.'den Şekil 4.4.'e kadar).



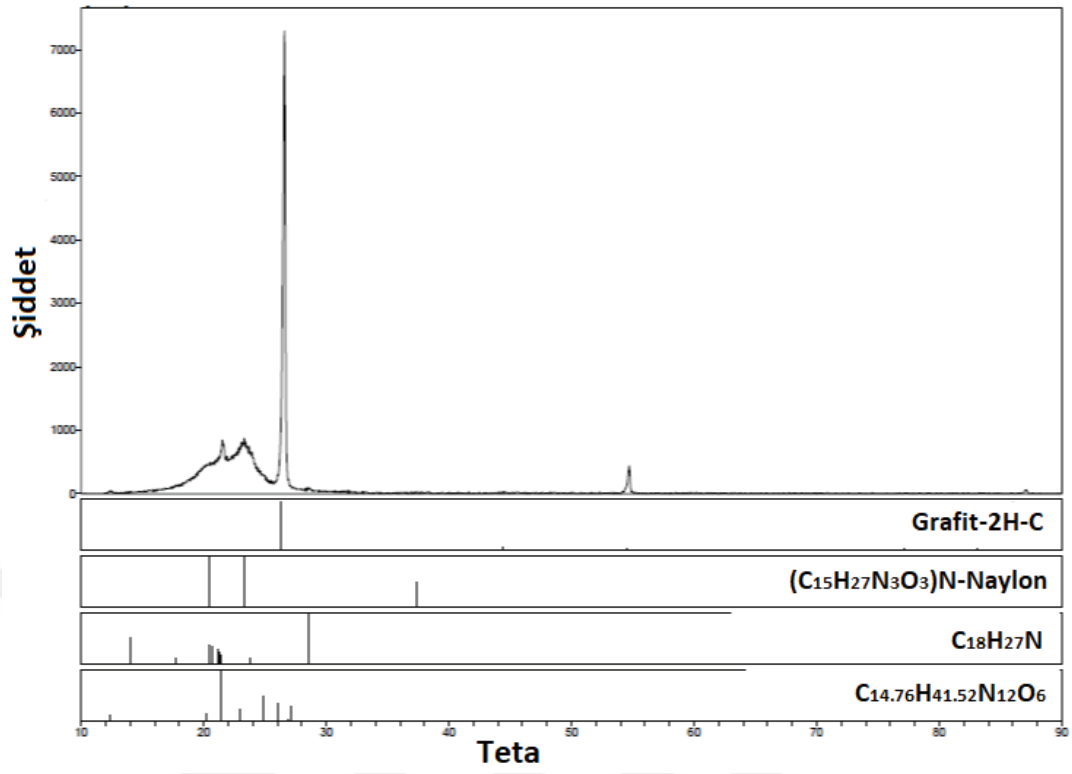
Şekil 4.1. PA6 + %5G numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.2. PA6 + %5G + %2 vaks numunesine ait XRD grafiği

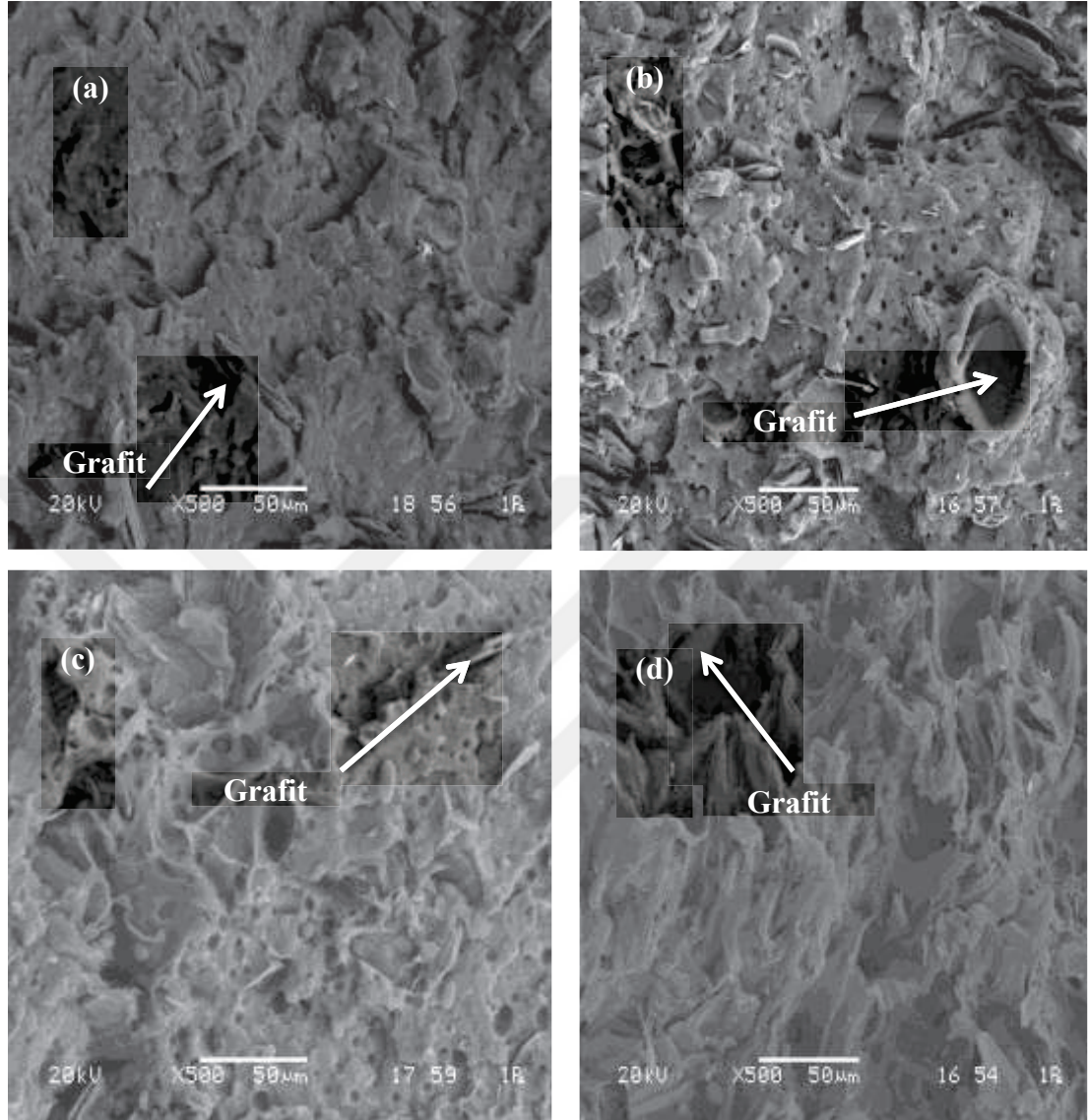


Şekil 4.3. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait XRD grafiği



Şekil 4.4. PA6 + %5G + %6 vaks numunesine ait XRD grafiği

4.1.2. Sem analiz sonuçları

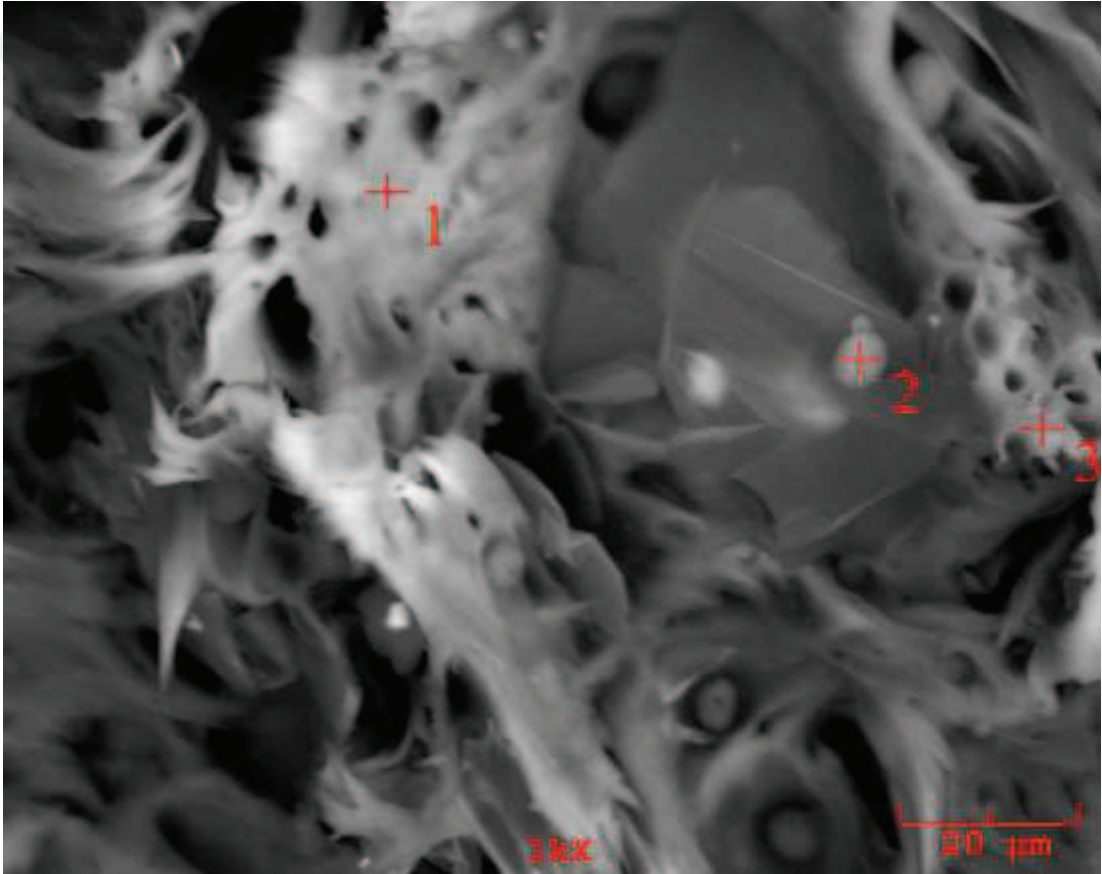


Şekil 4.5. Tüm numunelerin x500 büyütmedeki SEM görüntüleri (a) PA6 + %5G (b) PA6 + %5G + %2 vaks (c) PA6 + %5G + %4 vaks (d) PA6 + %5G + %6 vaks

Şekil 4.5.'de Poliamid 6'ya (PA6) grafit katkı maddesi eklenerek oluşan kompozit malzemeye vaks ilave edilmesiyle PA6 kompozit malzemelerin çekme deneyinde elde edilen kopartılmış yüzeyin taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini göstermektedir. Şekil 4.5.'de görüldüğü gibi PA6 polimer matris malzemesine ilave edilen grafit katkısının ana matrisi bünyesinde homojen olarak dağıldığı gözlenmiştir. Bu ise Karıştırıcı (ekstruder) da karışımın iyi bir şekilde yapıldığını

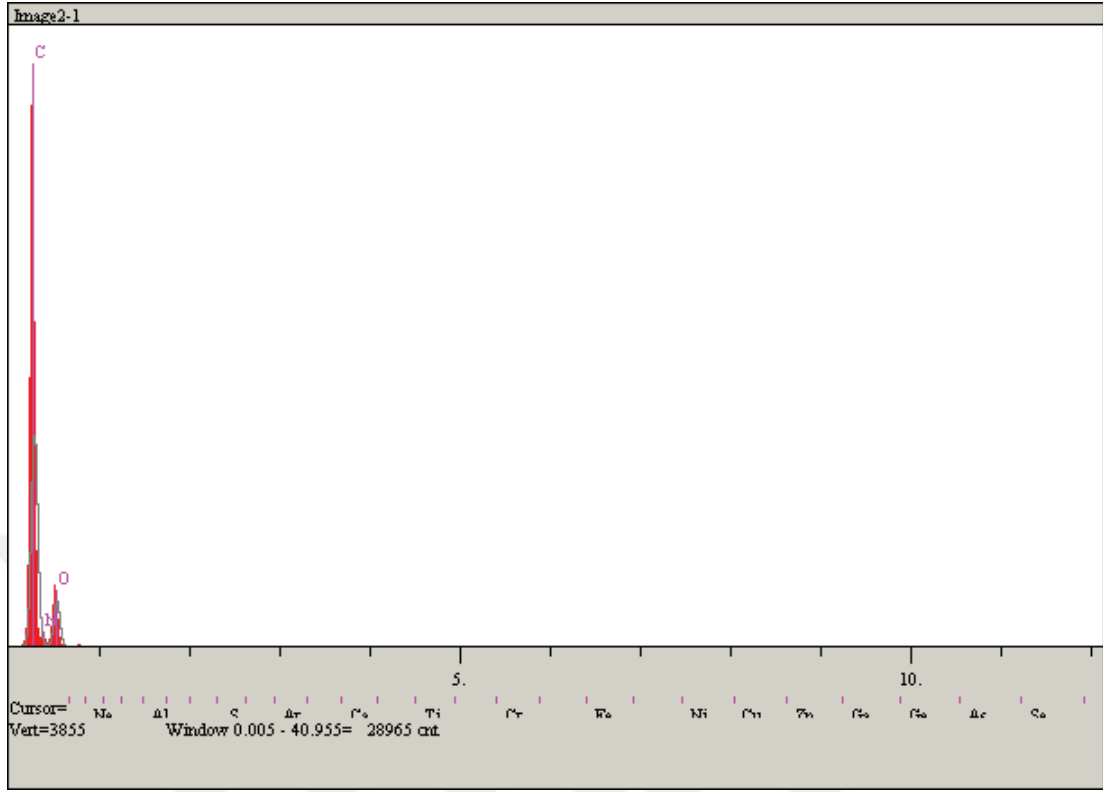
ifade etmektedir. Poliamid 6 polimerine %5 oranında grafit ilave edilmesiyle kompozit malzeme gevrekleşmiş olup koparılmış yüzey düzgün görünmektedir (bakınız Şekil 4.5.a.). %2 vaks ilavesi PA6 + %5G kompozitlerin de fazlaca bir elastik deformasyon sağlamamıştır. Ancak %4 ve %6 vaks katkılı kompozit malzemeler de plastik şekil değişiminin arttığı ve matris malzemelerin uzamalarının arttığı gözlenmiştir (bakınız Şekil 4.5.c. ve 4.5.d.). Yani PA6 + %5G kompozite %4 ve %6 oranında vaks ilavesi polimer malzemelerin yumuşamasına neden olmuştur.

4.1.3. EDS analiz sonuçları



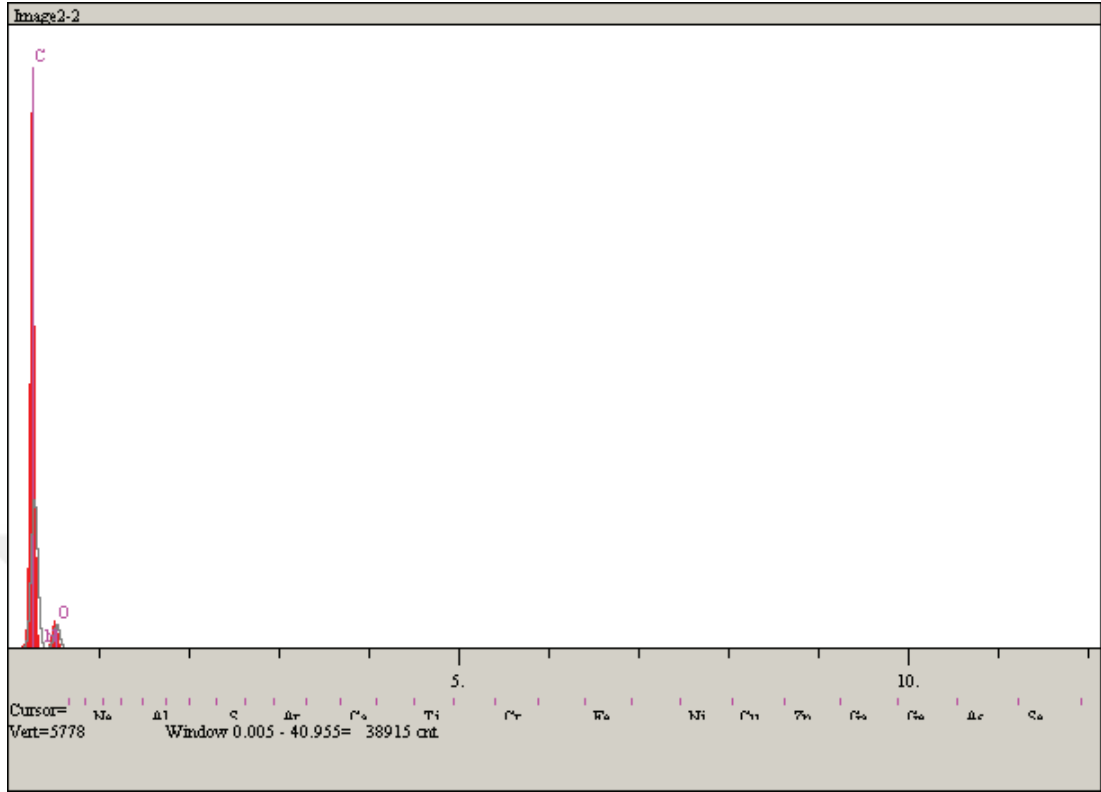
Şekil 4.6. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin x1000 büyütmedeki EDS görüntüsü

Tablo 4.1. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait 1. bölgedeki EDS analiz değerleri



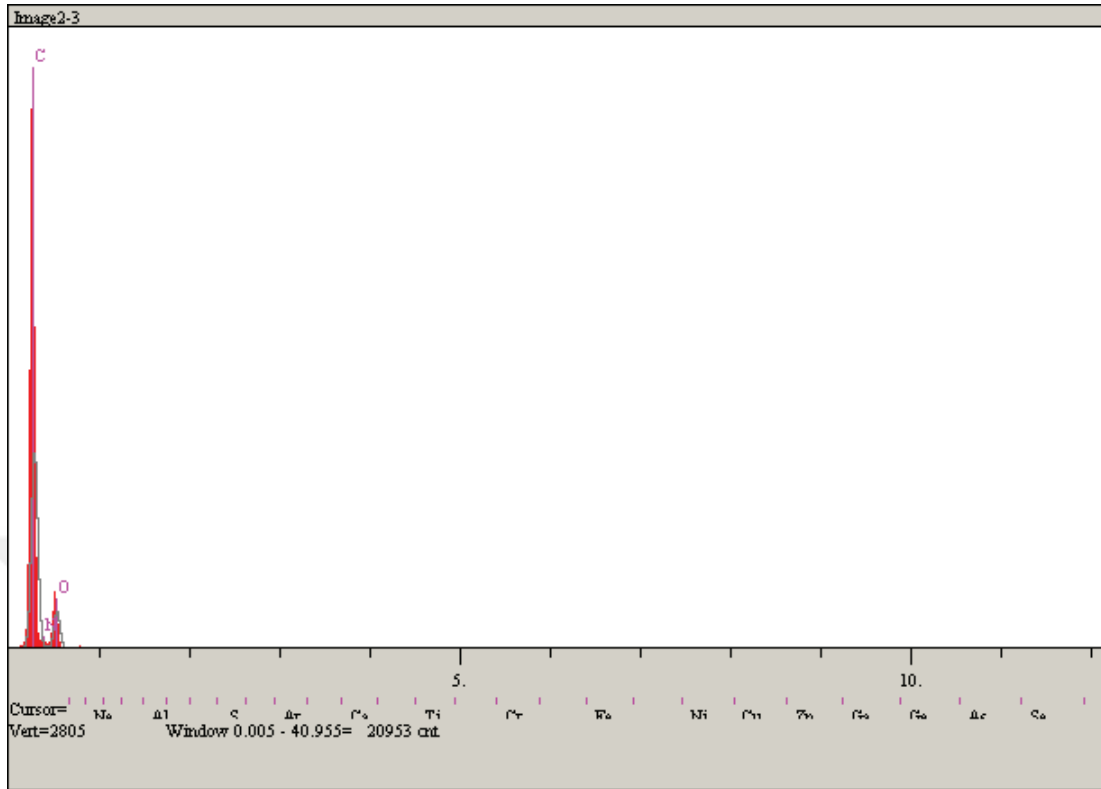
Element	Dalga Boyu	Pik Yoğunluğu	Hata	Konsantrasyon Miktarı	Ağırlıkça Miktar
H	K α	0.00	0.000	0.000	%
C	K α	1,227.24	22.151	52.988	%
N	K α	16.64	2.579	7.721	%
O	K α	249.43	9.986	39.291	%
				100.000	%

Tablo 4.2. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait 2. bölgedeki EDS analiz değerleri



Element	Dalga Boyu	Pik Yoğunluğu	Hata	Konsantrasyon Miktarı	Ağırlıkça Miktar
H	K α	0.00	0.000	0.000	%
C	K α	1,278.70	22.613	63.803	%
N	K α	0.00	0.000	0.000	%
O	K α	188.04	8.671	36.197	%
				100.000	%

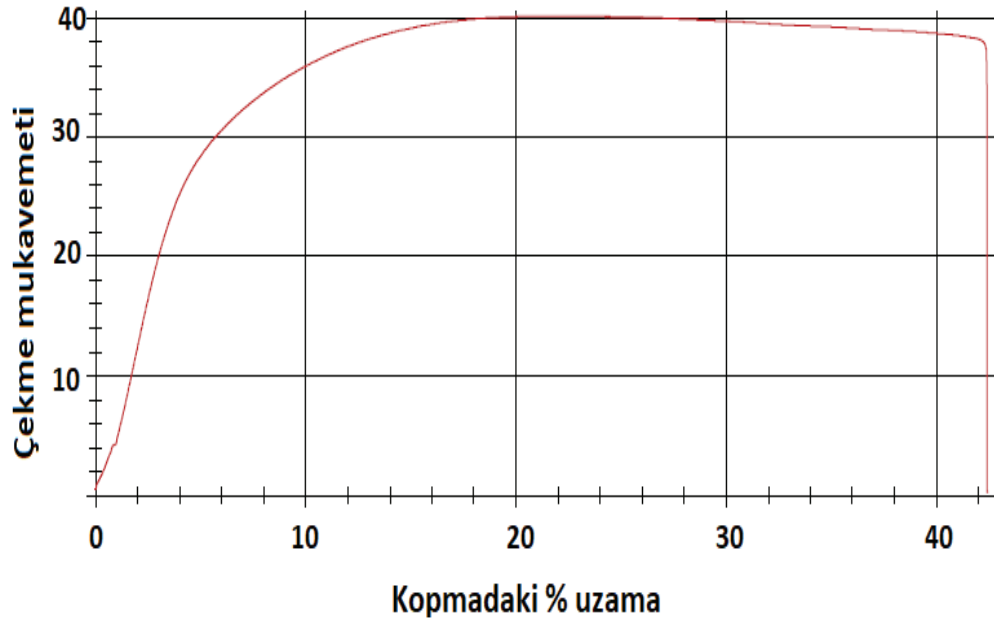
Tablo 4.3. PA6 + %5G + %4 vaks numunesine ait 3. bölgedeki EDS analiz değerleri



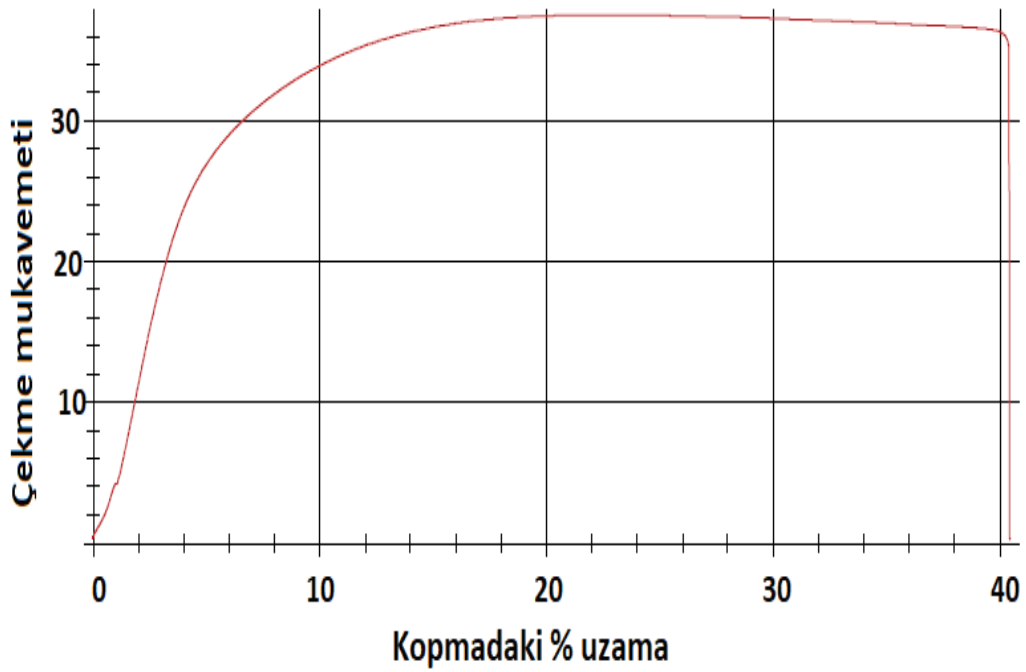
Element	Dalga Boyu	Pik Yoğunluğu	Hata	Konsantrasyon Miktarı	Ağırlıkça Miktar
H	K α	0.00	0.000	0.000	%
C	K α	817.72	18.084	57.103	%
N	K α	6.42	1.602	5.481	%
O	K α	140.63	7.499	37.417	%
				100.000	%

Şekil 4.6.'da verilen PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin farklı bölgelerinde alınan EDS (enerji dağılım spektrometresi) sonuçlarından bütün bölgelerde Karbon (C), Azot (N) ve Oksijen (O) içerdiğini çıkarılabılırız. EDS ve XRD sonuçları birleştirildiğinde malzemenin içeriği belirlenmektedir. Spektrumlarda Hidrojen (H) atomu tespit edilememiştir. Bunun nedeni Hidrojen'in tek kabuk olması nedeniyle x ışını geçişi yapamamasıdır.

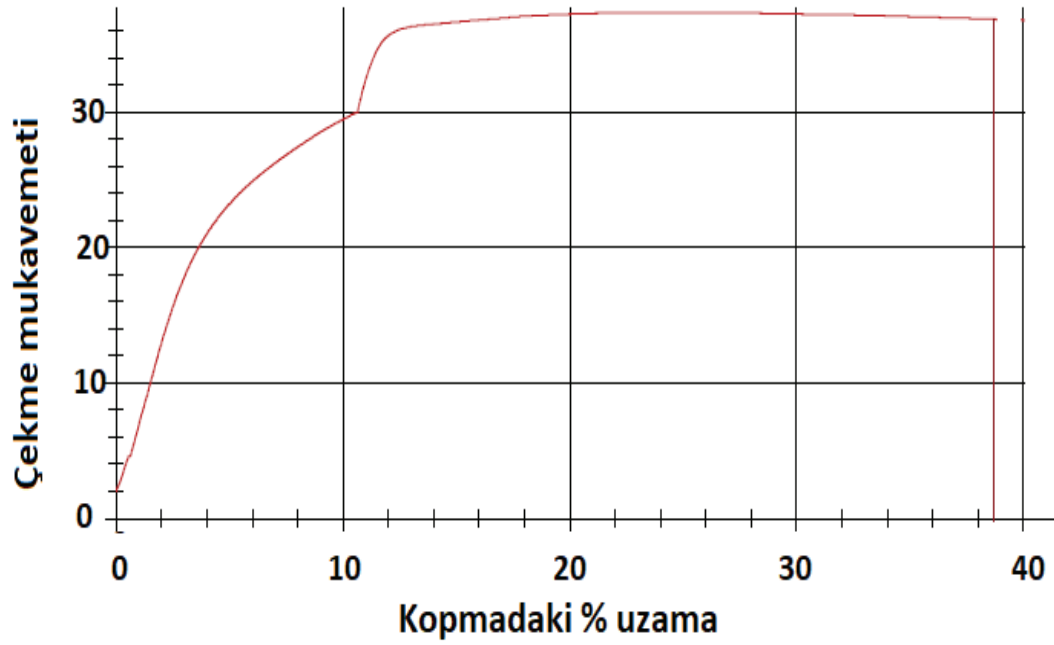
4.2. Mekanik Özellikler



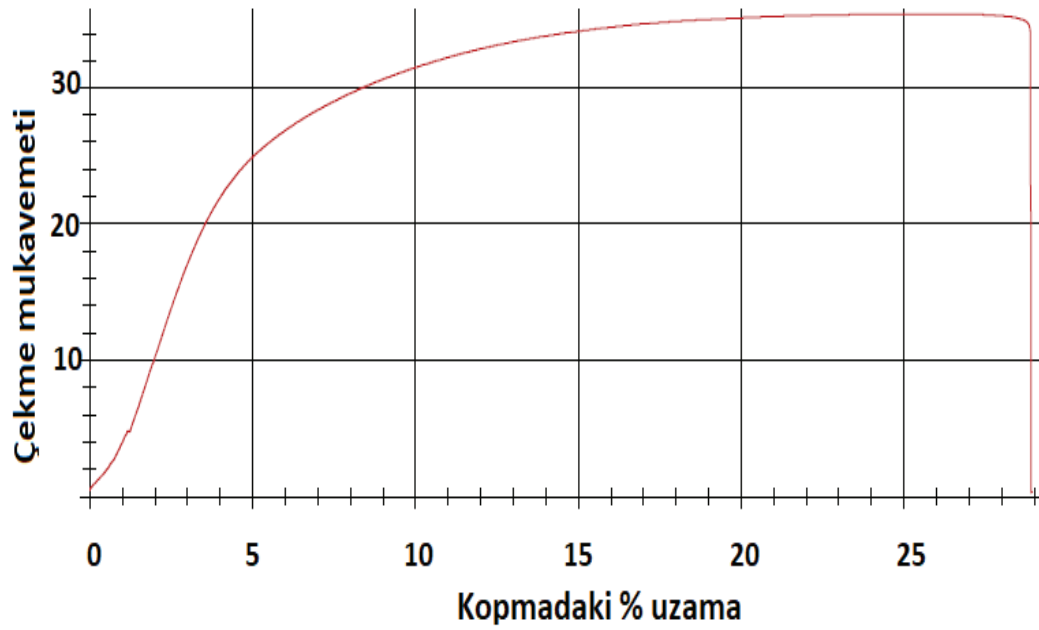
Şekil 4.7. PA6 + %5G + numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi



Şekil 4.8. PA6 + %5 + %2 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi



Şekil 4.9. PA6 +5G +4 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi



Şekil 4.10. PA6 +5G +6 vaks numunesinin çekme mukavemetinin kopmadaki % uzamaya değişimi

Şekil 4.7.'den Şekil 4.10.'a kadar ki %5G katkılı PA6 kompoziti ile PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin çekme mukavemeti ile kopmadaki % uzamaları gösterilmiştir. Deneylerde kullanılan tüm polimer kompozit malzemelerin mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 4.4.'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Tüm numunelerin mekanik özellik değerleri

Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	Elastiklik Modülü (MPa)	Kopmadaki % Uzama
PA6 + %5G	40,2	360	42
PA6 + %5G + %2 vaks	37,5	274	40
PA6 + %5G + %4 vaks	36,6	266	38
PA6 + %5G + %6 vaks	35,4	254	29

PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin çekme mukavemetleri sırasıyla 40,2 MPa, 37,5 MPa, 36,6 MPa ve 35,4 MPa olarak tespit edilmiştir.

PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin çekme mukavemet değerlerinde vaks karışımının etkisi ile azalma meydana gelmiştir. Bu azalma oranı sırasıyla %6,71, %8,95 ve %11,94 olarak kaydedilmiştir.

PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin elastik modülü sırasıyla 360 MPa, 274 MPa, 266 MPa ve 254 MPa olarak tesbit edilmiştir.

PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin elastik modülü değerlerinde vaks karışımının etkisi ile

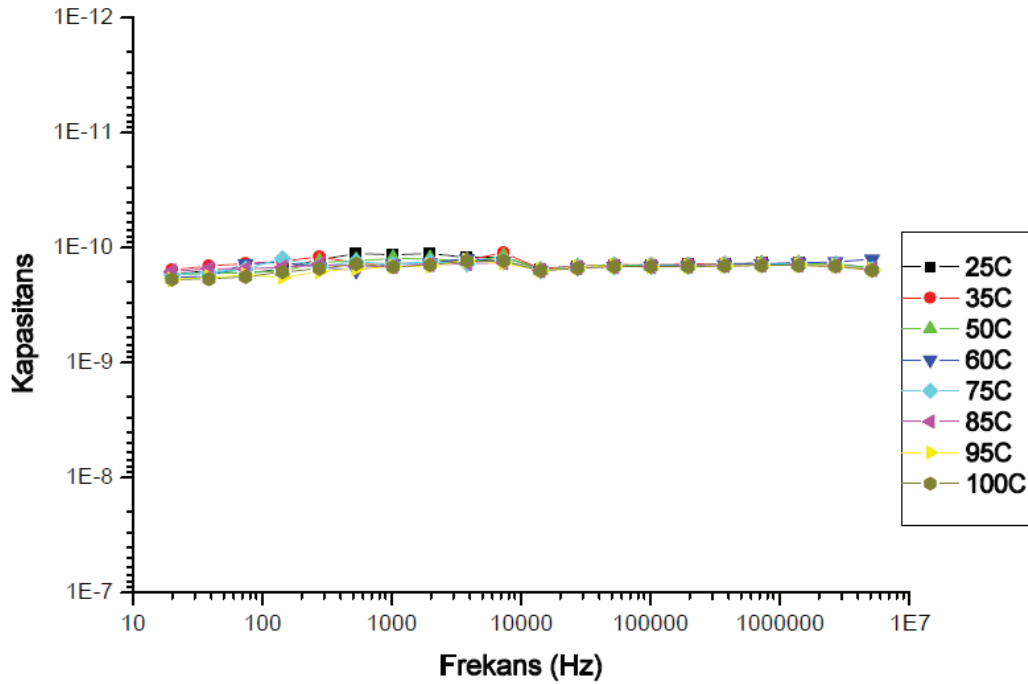
azalma meydana gelmiştir. Bu azalma oranı sırasıyla %23,88, %26,11 ve %29,44 olarak kaydedilmiştir.

PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin kopmadaki % uzama miktarları 42, 40, 38 ve 29 olarak tesbit edilmiştir.

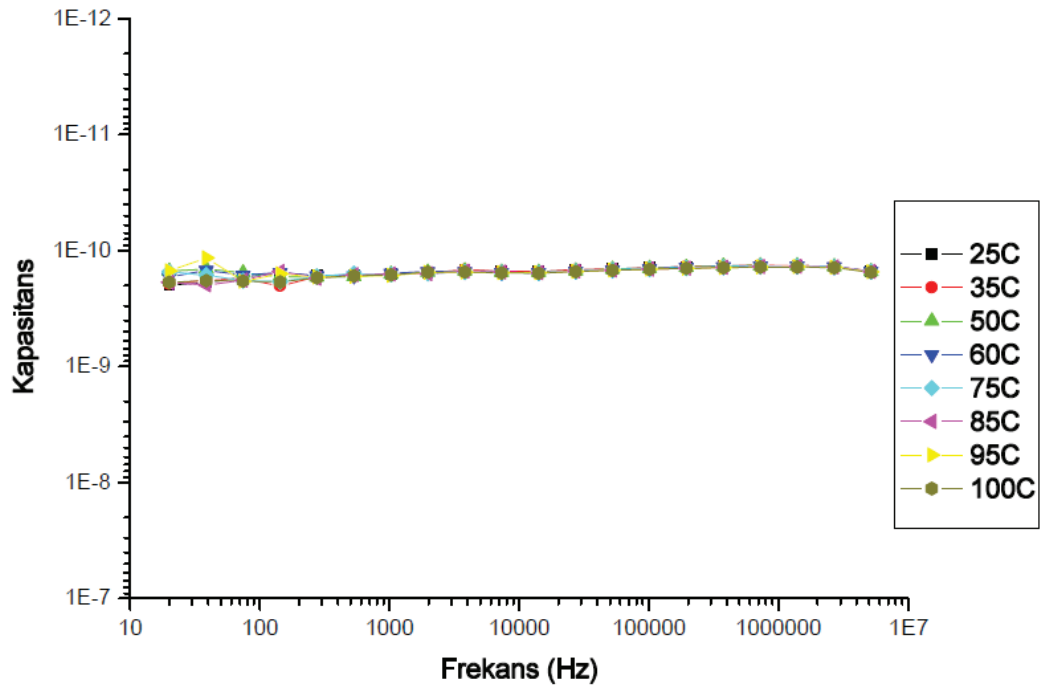
PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks katkılı kompozitlerin kopmadaki % uzama değerlerinde vaks karışımının etkisi ile azalma meydana gelmiştir. Bu azalma oranı sırasıyla %4,76, %9,52 ve % 30,95 olarak kaydedilmiştir.

4.3. Dielektrik Ölçüm Sonuçları

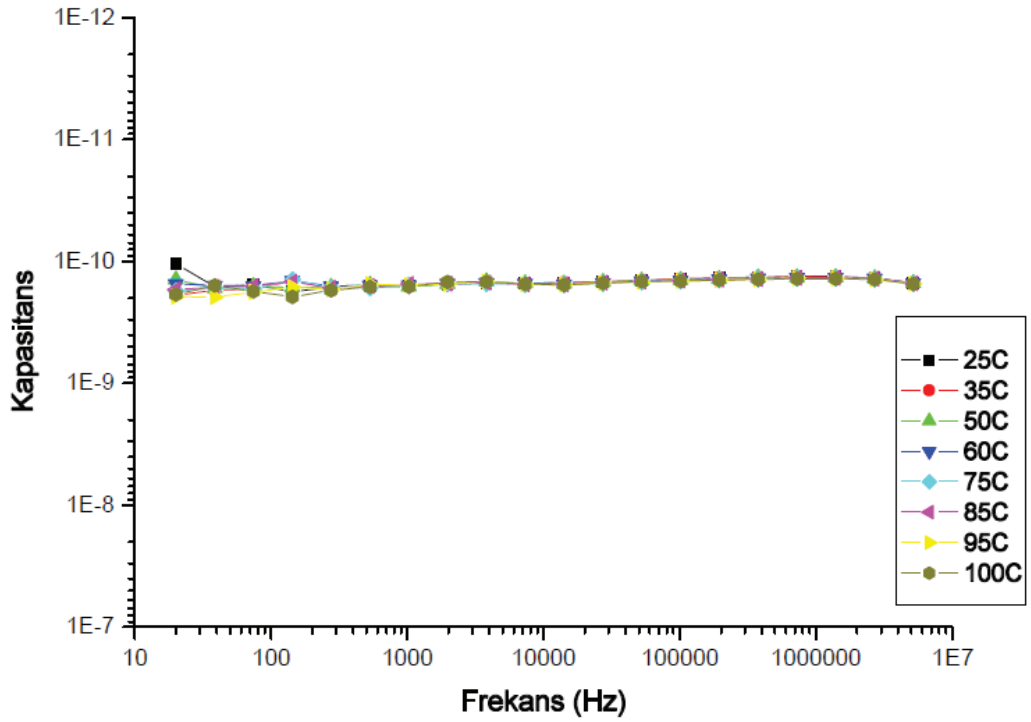
4.3.1. Kapasitans-frekans ölçümleri



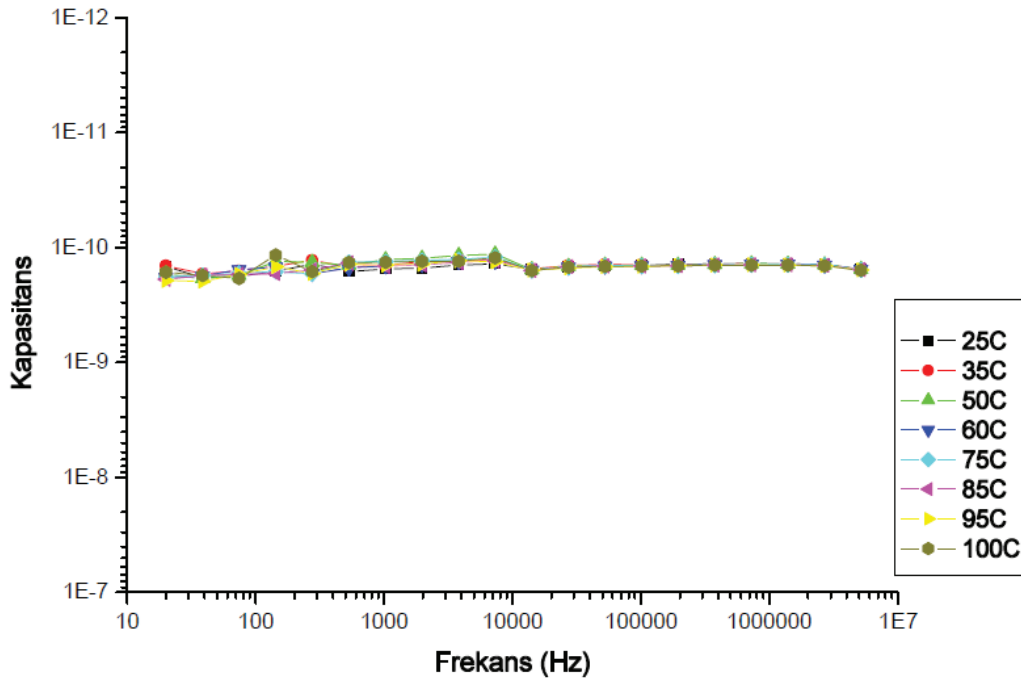
Şekil 4.11. PA6 + %5G numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.12. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



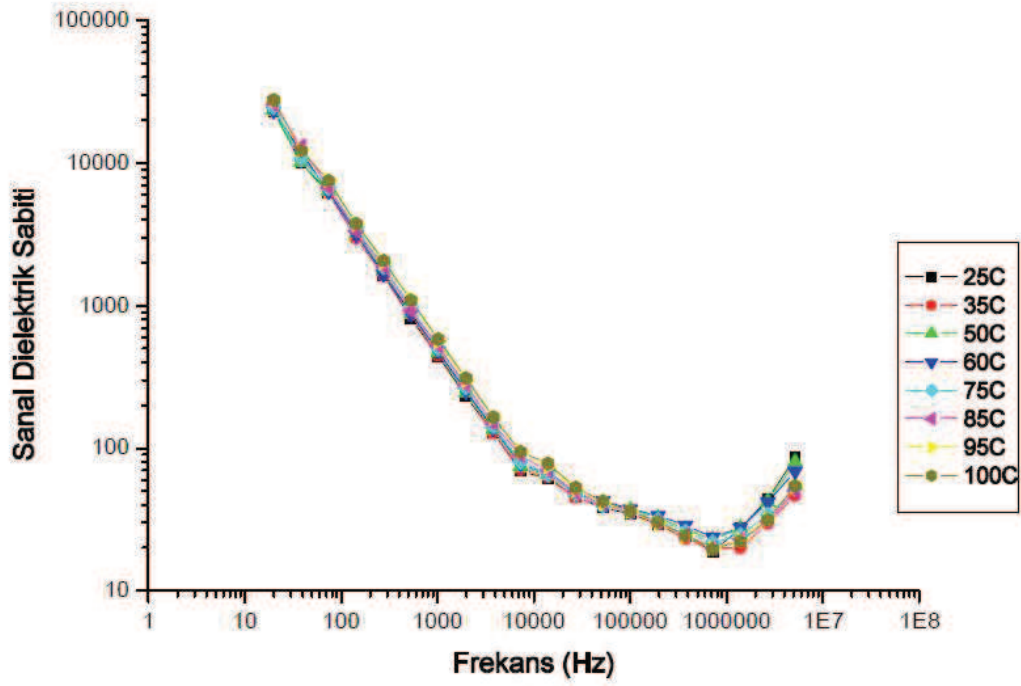
Şekil 4.13. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



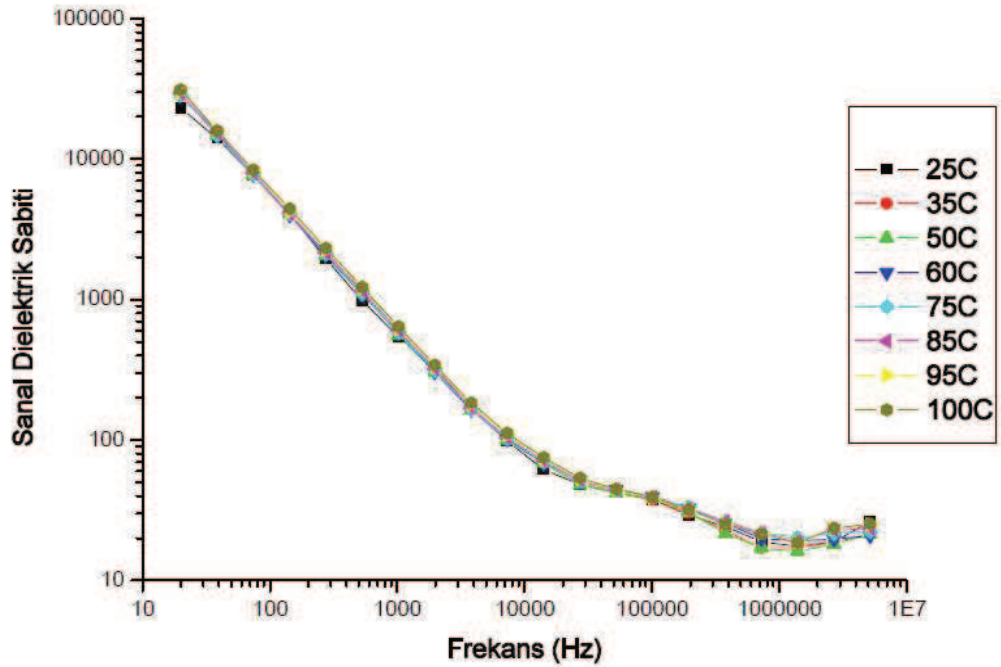
Şekil 4.14. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin kapasitansının farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi

Şekil 4.11.'den Şekil 4.14.'e kadar verilen grafikler incelendiğinde kapasitans ölçümleri yapılırken PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks olmak üzere 4 ayrı numune kullanılmıştır. Poliamid 6 ve grafitten oluşmuş kompozit malzemeye vaks eklenmesiyle kapasitansın frekansla değişimi incelenmiştir. Ölçülen değerler frekansa bağlı olarak grafik olarak çizdirilmiş ve logaritmik skala ile gösterilmiştir. Bu 4 ayrı numunenin frekansa bağlı kapasitansları karşılaştırıldığında vaks etkisinin kapasitansı değiştirme miktarı küçük bir aralıkta kalmıştır ve logaritmik skala da bu aralık çok detaylı bir biçimde görülmemektedir. Sanki kapasitansa frekans etkisi yok gibidir. Halbuki detaylı olarak bakıldığında PA6 + %5G numunesinde 10KHz civarında kapasitans frekans grafiğinde bir düşme kırılması görülmektedir. Daha sonra düz bir eğri olarak devam etmiştir. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinde ise 10KHz'deki geçiş çok daha zayıftır. Ayrıca burada farklı sıcaklıklardaki kapasitans eğrileri birbiriyle çok fazla örtüşmektedir. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinde 10KHz'de frekans kayması çok belirsiz görülmekle beraber geçiş frekansı olduğu belli olmamaktadır. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin ise 10KHz civarında daha belirgin geçiş vardır. Bu numunede de kapasitansın frekansa bağlı geçiş noktası dışında grafik sabit kalmıştır.

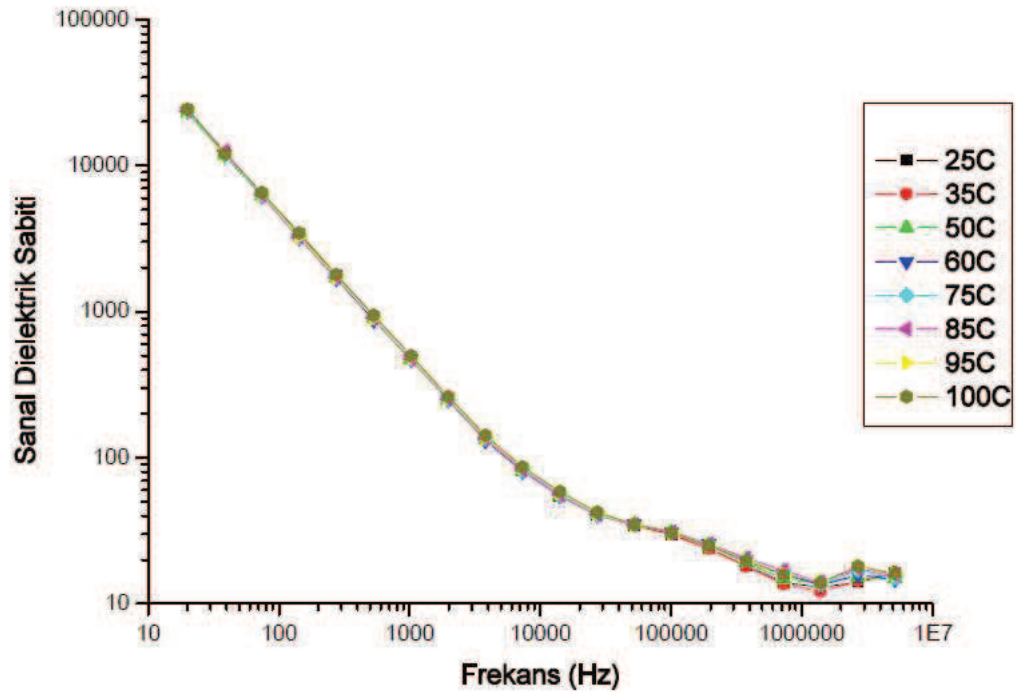
4.3.2. Sanal dielektrik sabiti-frekans hesaplamaları



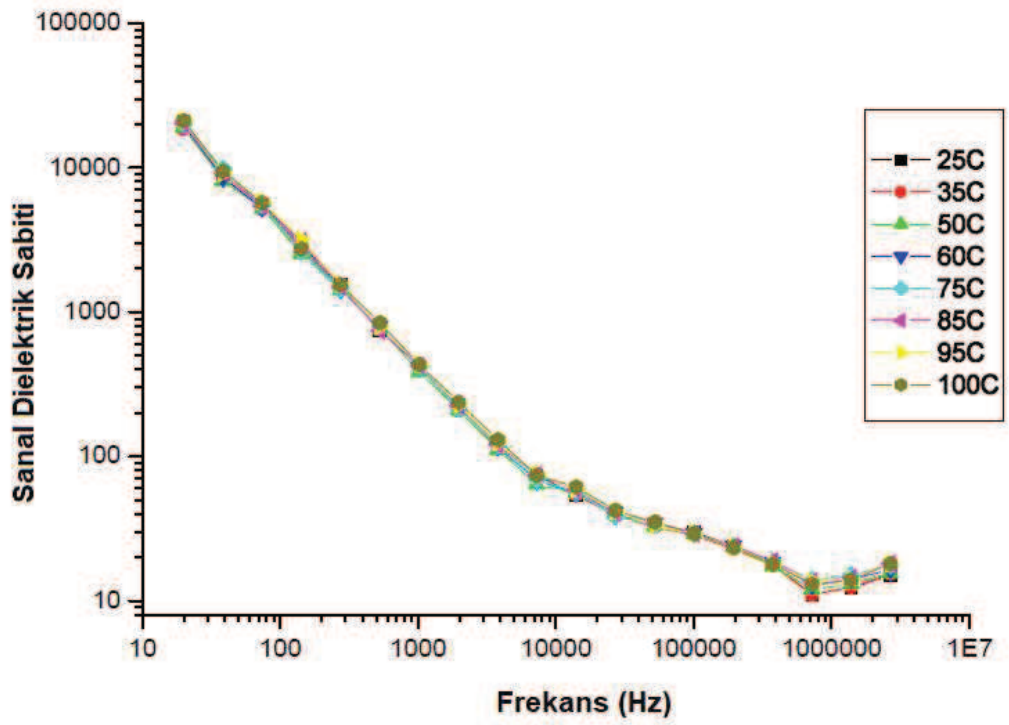
Şekil 4.15. PA6 + %5G numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.16. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



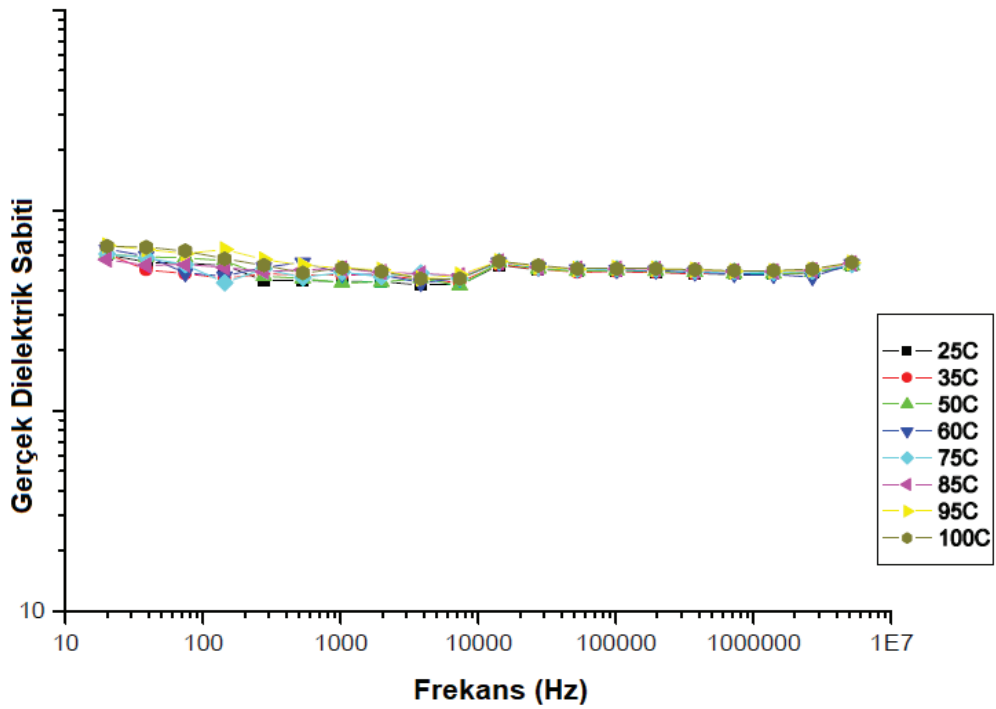
Şekil 4.17. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



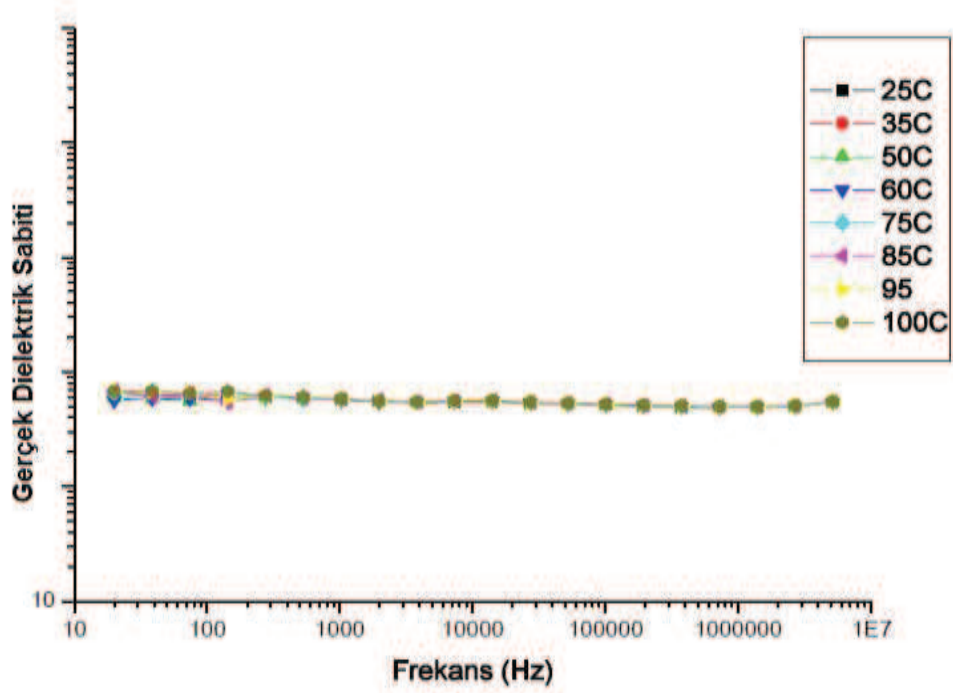
Şekil 4.18. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin sanal dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre Değişim

Şekil 4.15.'den Şekil 4.18.'e kadar verilen grafikler incelendiğinde PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks numunelerinin sanal dielektrik sabiti frekans grafiklerinde benzer bir durum gözlenmiştir. Sanal dielektrik sabiti 10MHz seviyesine kadar azalmıştır. Ancak 10MHz frekans değerinden sonra ise sanal dielektrik sabitinde artma görülmektedir.

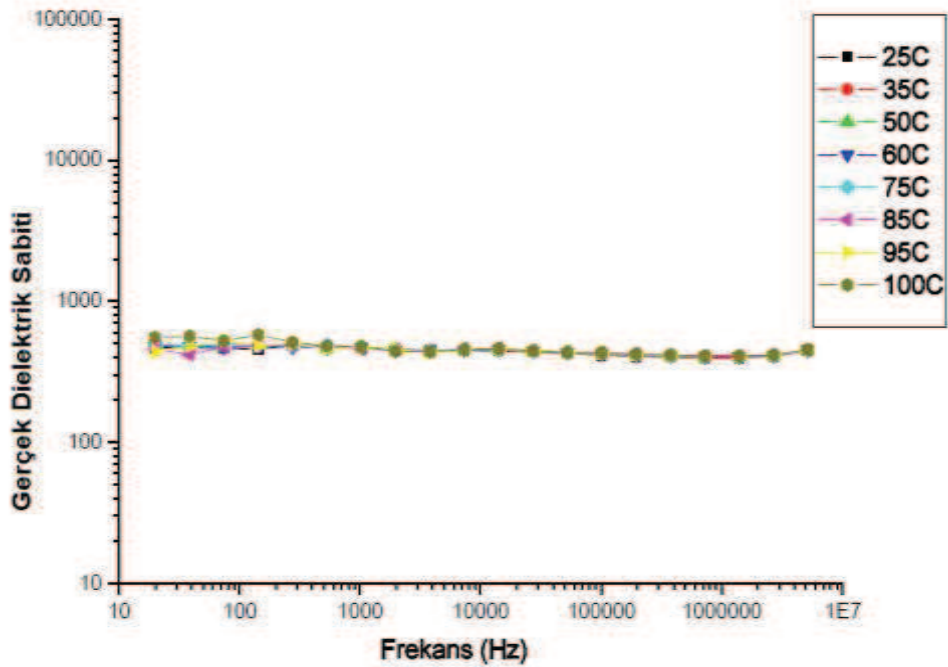
4.3.3. Gerçek dielektrik sabiti-frekans hesaplamaları



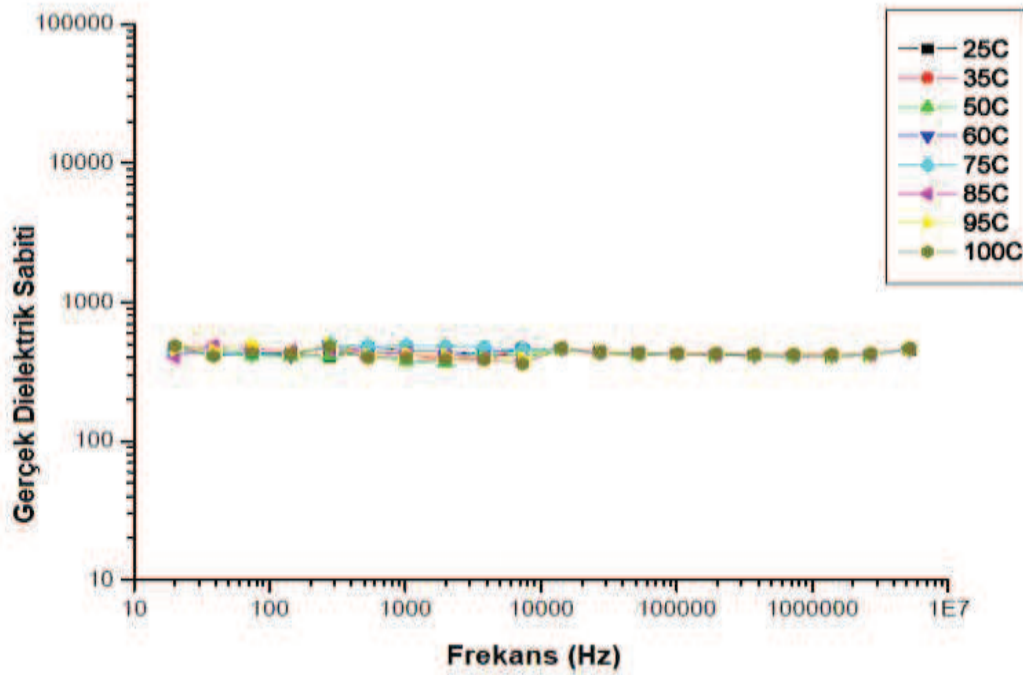
Şekil 4.19. PA6 + %5G numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.20. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



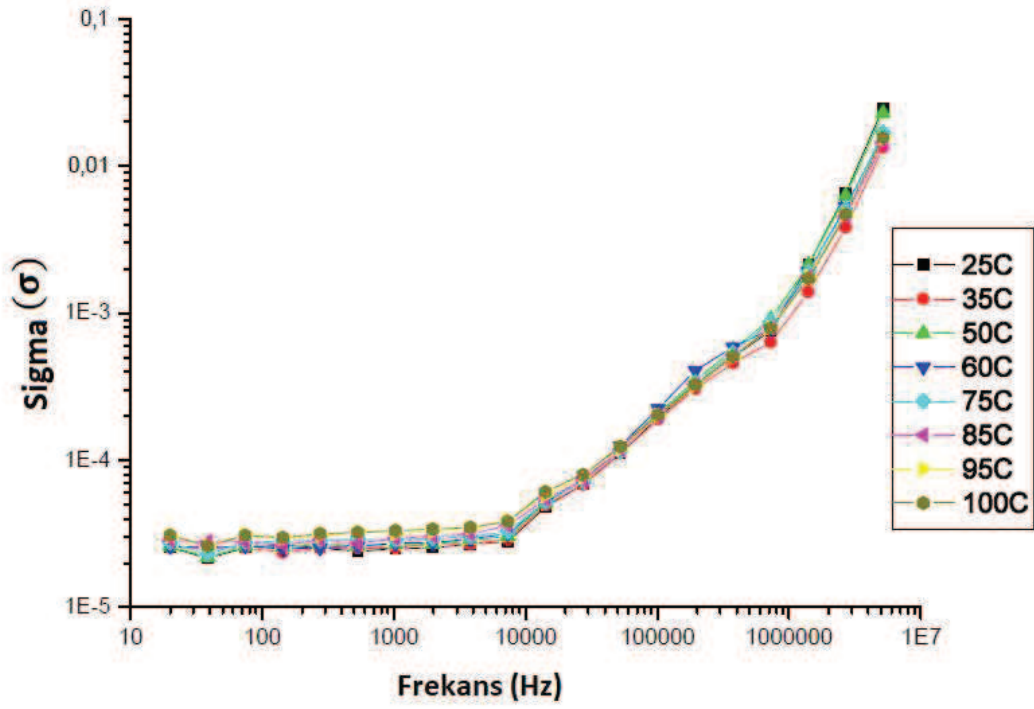
Şekil 4.21. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



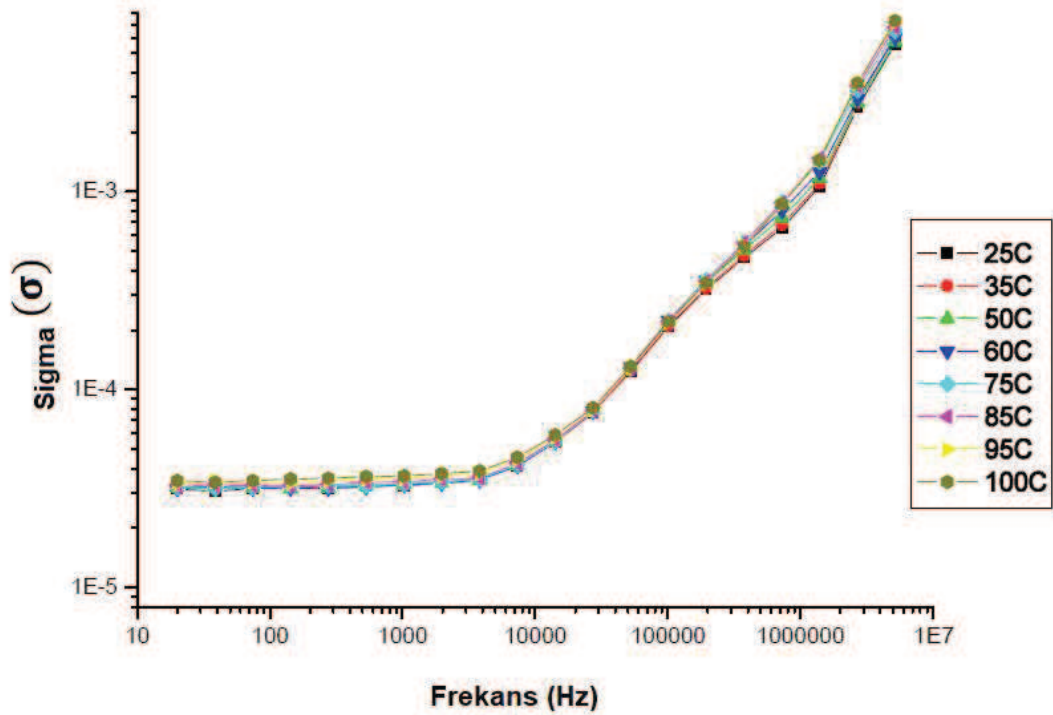
Şekil 4.22. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin gerçek dielektrik sabitinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi

Şekil 4.19.'dan Şekil 4.22.'ye kadar grafikler incelendiğinde PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks numunelerinin gerçek dielektrik sabitinin 20 Hz-10 MHz arasındaki frekans değişimi farklı sıcaklık değerleri için verilmiştir. Gerçek dielektrik sabiti farklı sıcaklıklarda frekansa bağlı olarak çizdirilmiştir. Grafikten frekans arttıkça gerçek dielektrik sabitinde 0-10MHz aralığında % 0,5 lik bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum çok az farklılıklarla beraber bütün numuneler için aynıdır. Frekans arttıkça gerçek dielektrik sabit çok zayıf bir azalma göstermektedir.

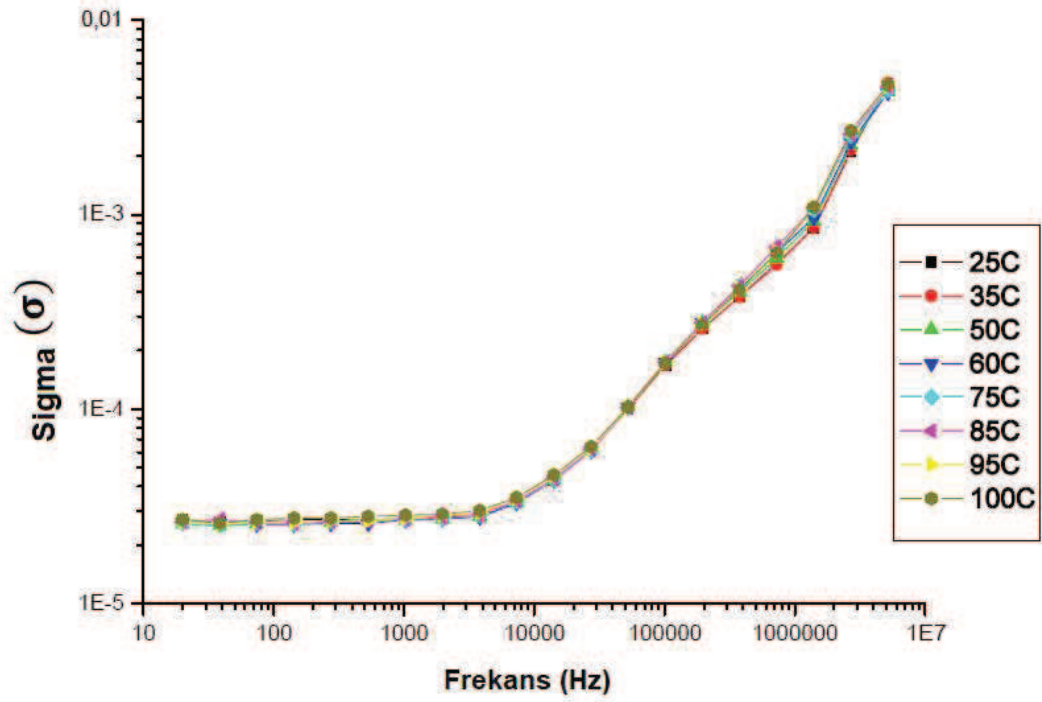
4.3.4. Öz iletkenlik-frekans hesaplamaları



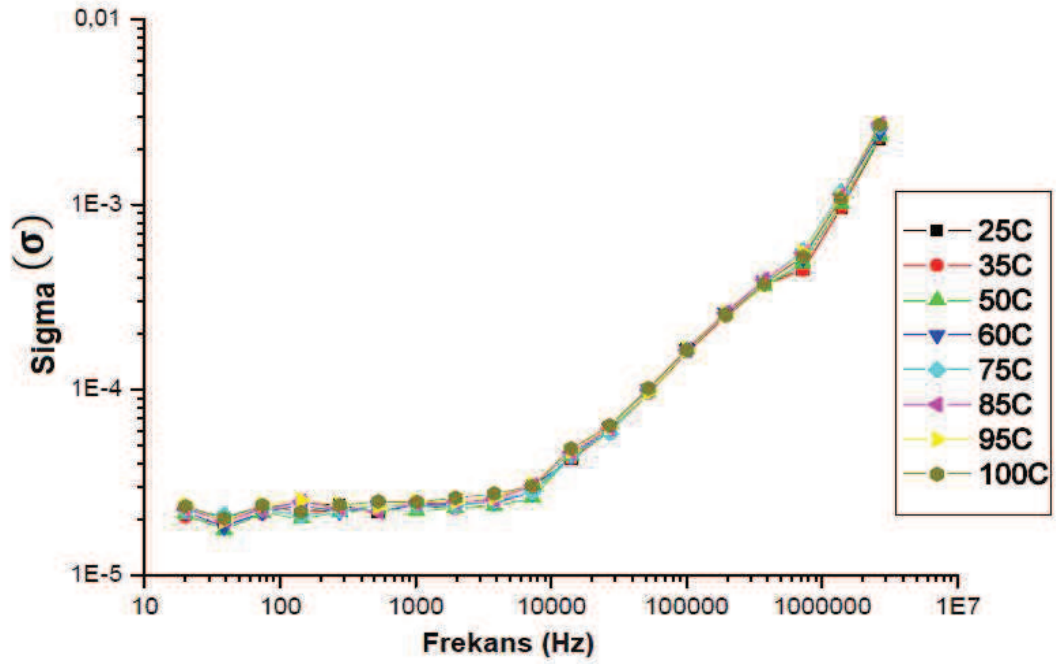
Şekil 4.23. PA6 + %5G numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.24. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



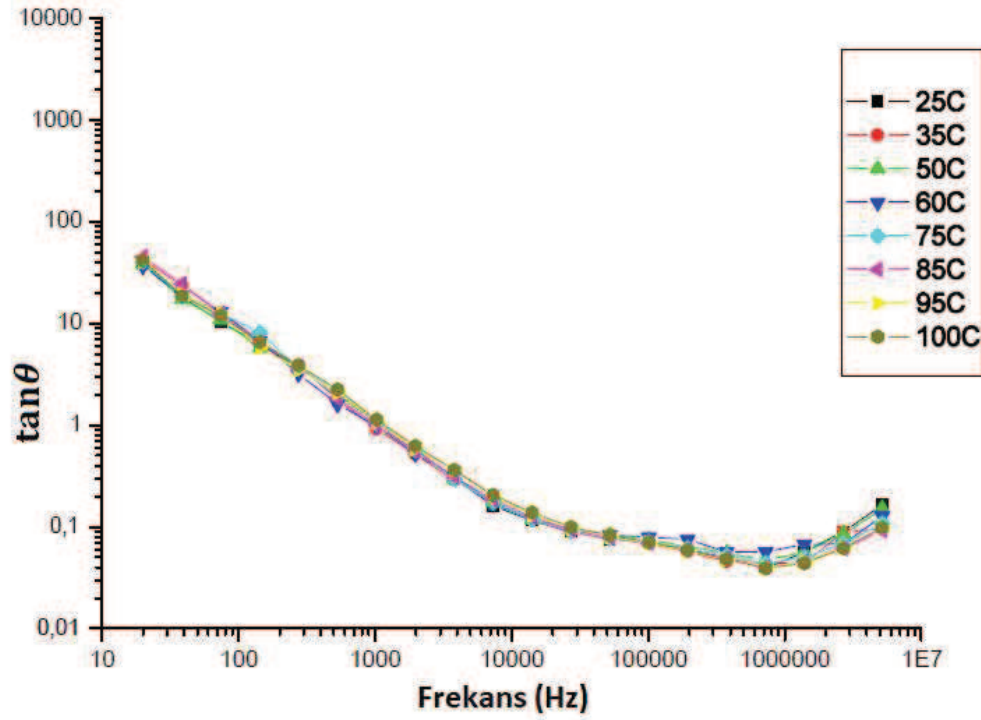
Şekil 4.25. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



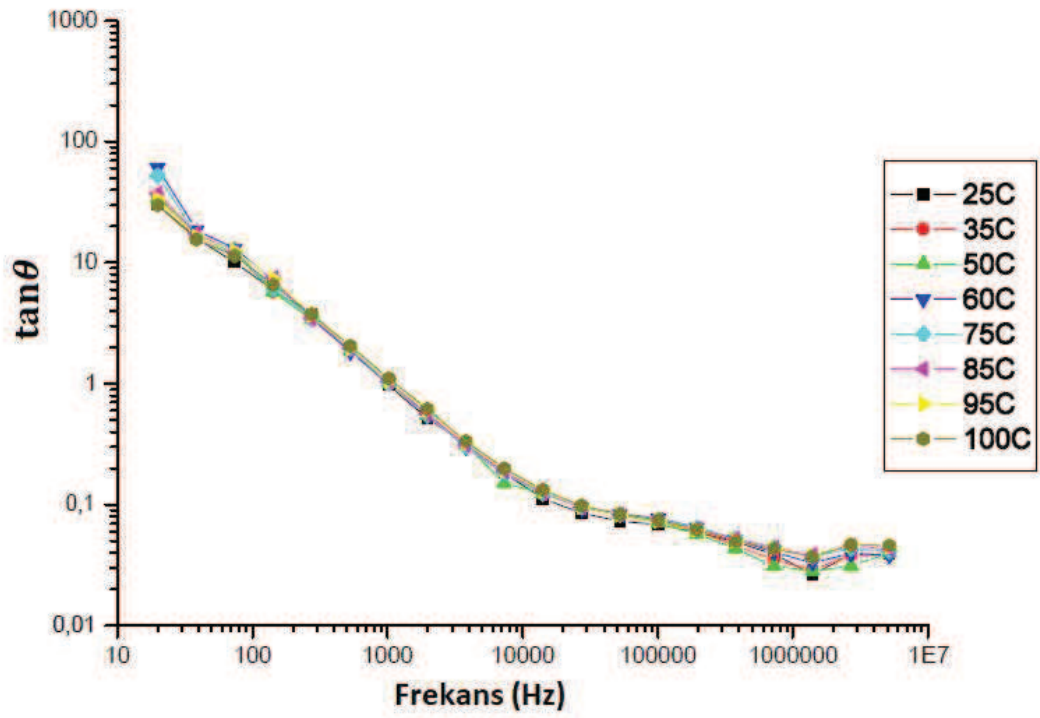
Şekil 4.26. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin öz iletkenliğinin farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi

Şekil 4.23.'den Şekil 4.26.'ya kadar verilen grafiklerde numunelerin farklı sıcaklıklardaki öz iletkenlik frekansa bağlı değişim grafikleri incelendiğinde; numuneler arasında grafiğin akışında bir değişiklik söz konusu olmamıştır. Buradan vaks ile Poliamid 6 polimer malzemesinin yapısal benzerlikleri sebebiyle çok iyi karışıkları ve yeni oluşan polimer maddenin Poliamid 6'dan belirgin bir farklılık göstermediği ve bu numunelerdeki grafit katkısının frekans artıkça öz iletkenliği artırdığı gözlemlenmiştir.

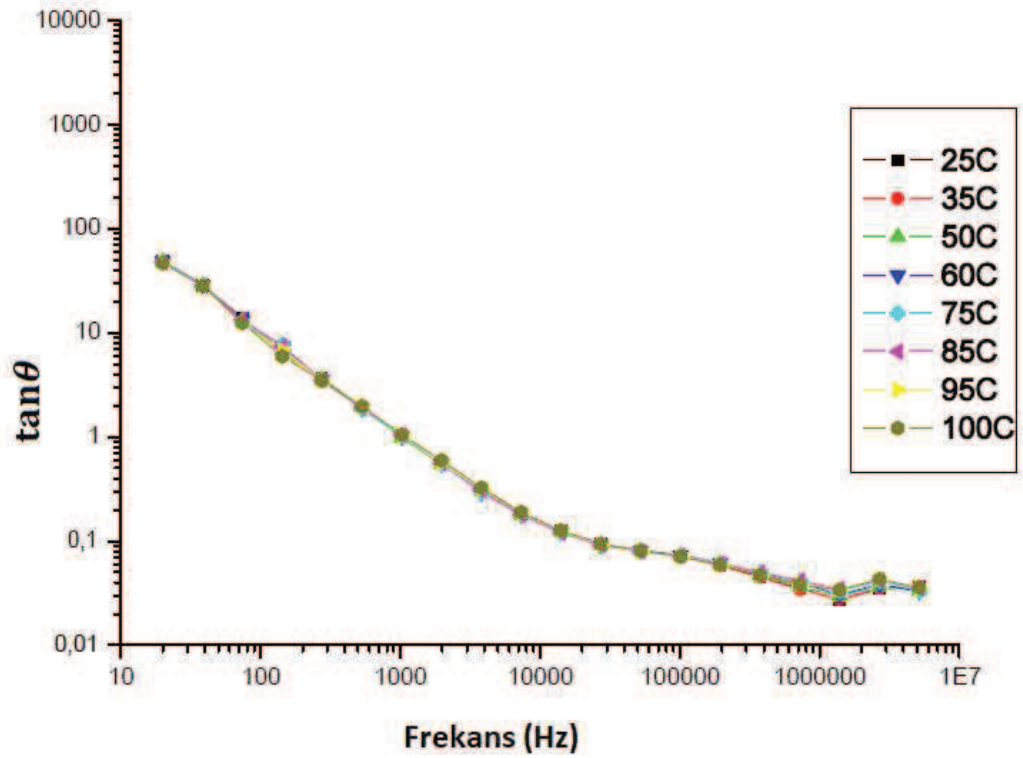
4.3.5. Kayıp faktörü-frekans hesaplamaları



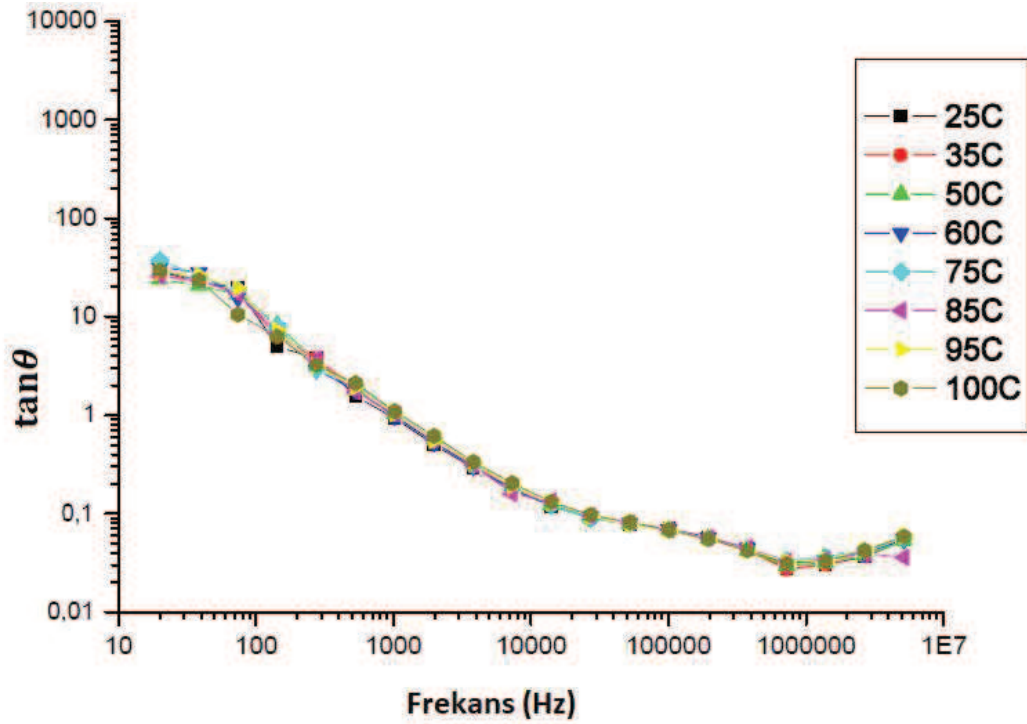
Şekil 4.27. PA6 +%5G numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.28. PA6 + %5G + %2 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi



Şekil 4.29. PA6 + %5G + %4 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi

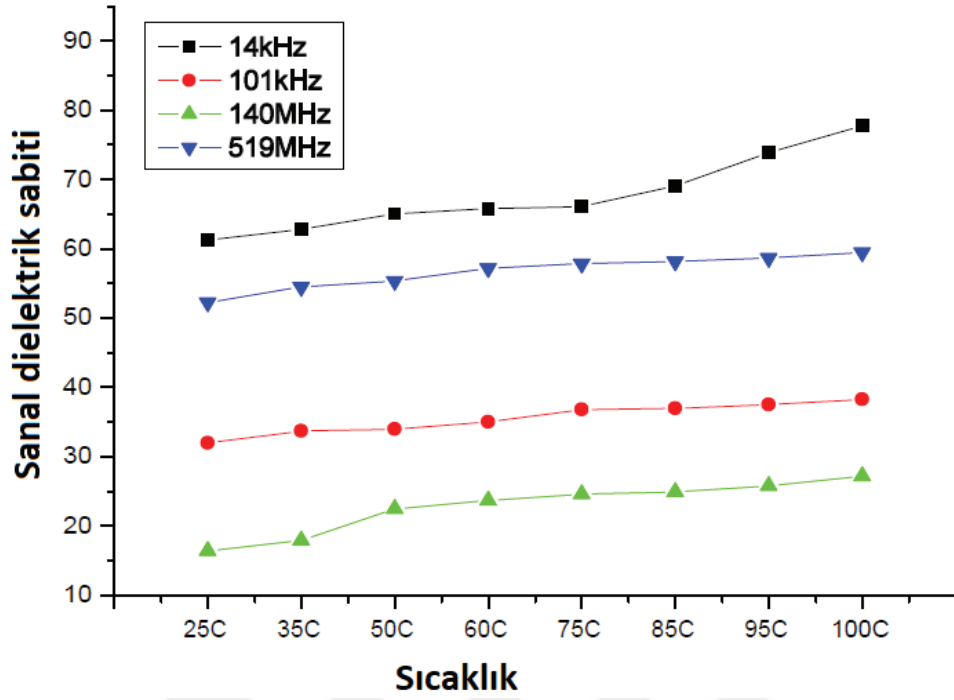


Şekil 4.30. PA6 + %5G + %6 vaks numunesinin kayıp faktörünün farklı sıcaklıklarda frekansa göre değişimi

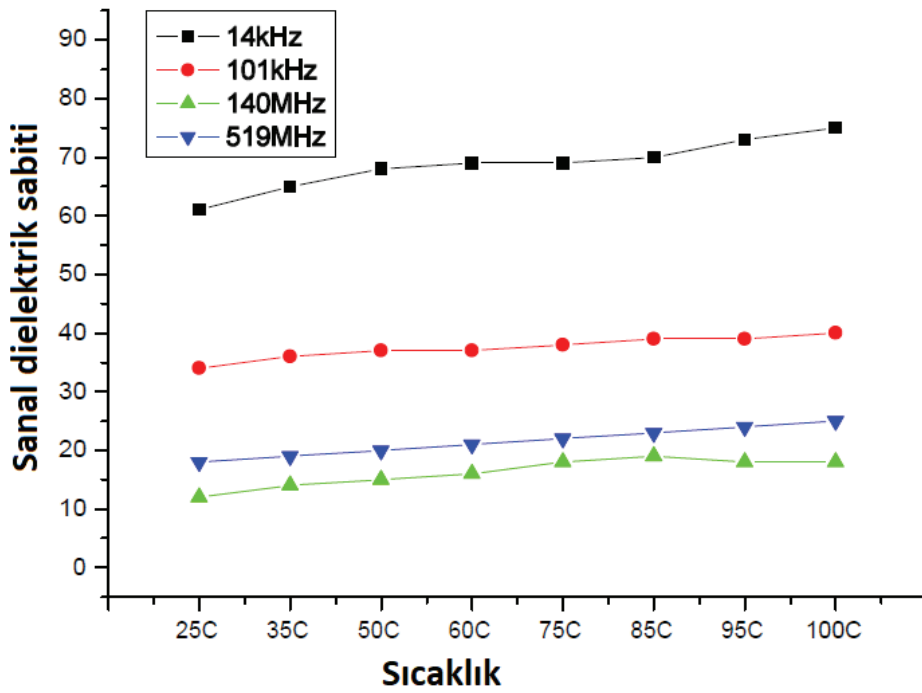
Şekil 4.27.'den Şekil 4.30.'a kadar çizilen grafiklerde bütün numunelerde frekansa bağlı olarak öz iletkenlik katsayısını arttığı için kayıp faktörü bütün numunelerde bu artışa zıt yönde azalma göstermiştir. Yani frekans arttıkça kayıp faktörü azalmıştır.

Bütün çizimler değişim aralığı çok küçük olduğu için logaritmik skala da çalışılmıştır. Bu durum kesin sayısal değerler yazmayı engellemektedir. Bu nedenle gerek dielektrik sabitlerinde gerek iletkenliklerde ve gerekse kayıp faktörlerinde değişim için belirgin bir oran verilememektedir ancak grafiklerdeki değişim izlenerek yorumlar yapılabilir.

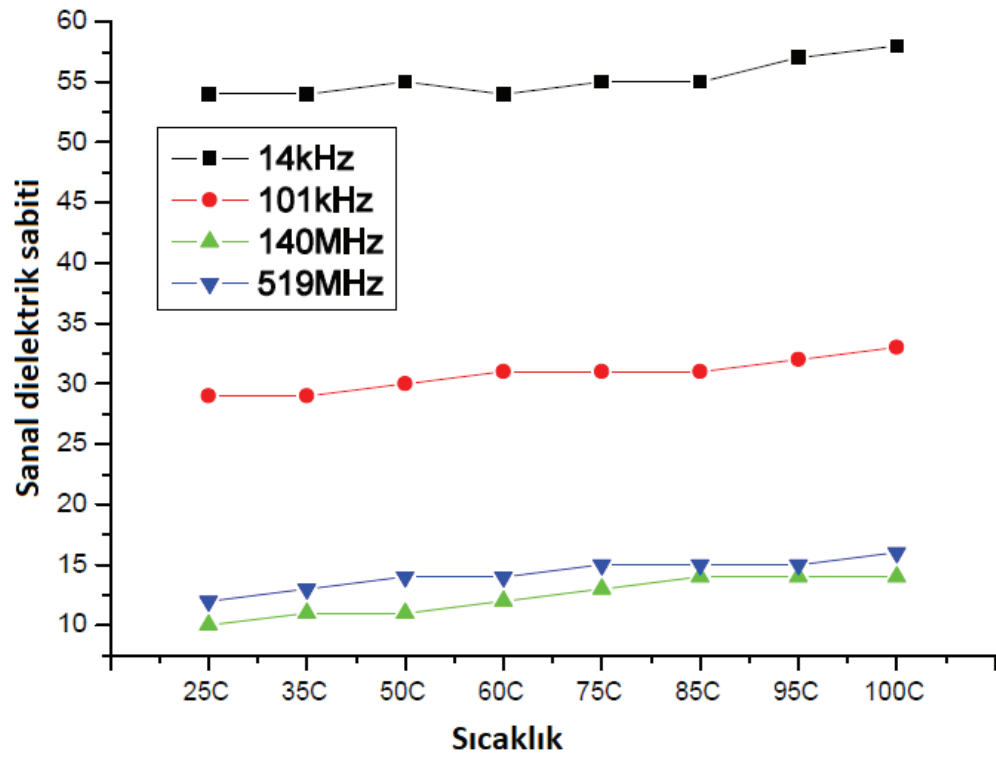
4.3.6. Sanal dielektrik sabiti-sıcaklık hesaplamaları



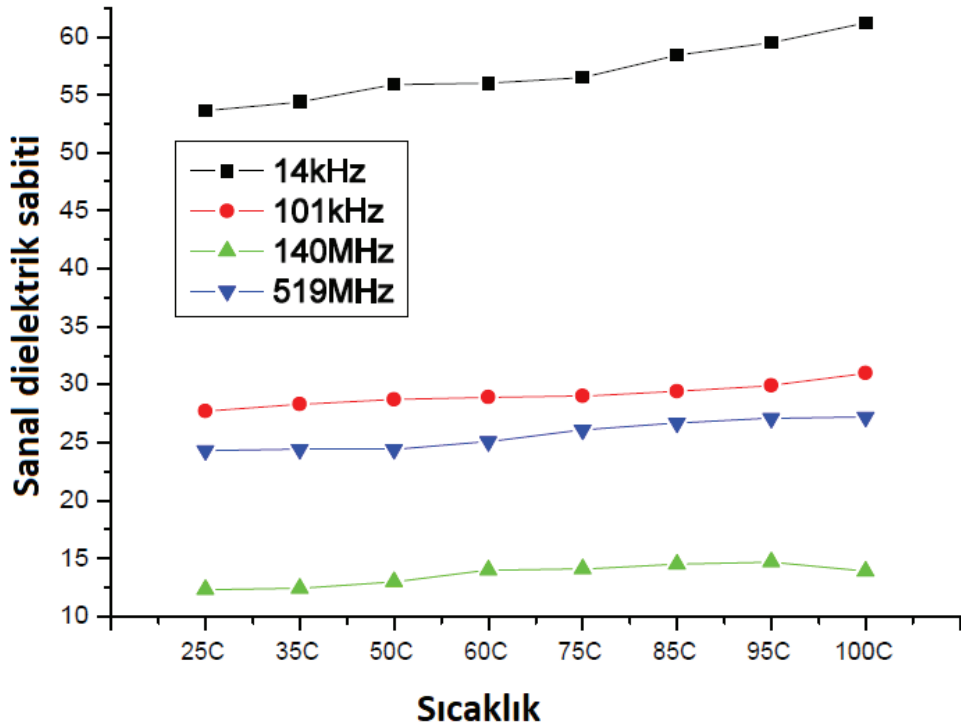
Şekil 4.31. PA6 + %5G içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 4.32. PA6 + %5G + %2 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



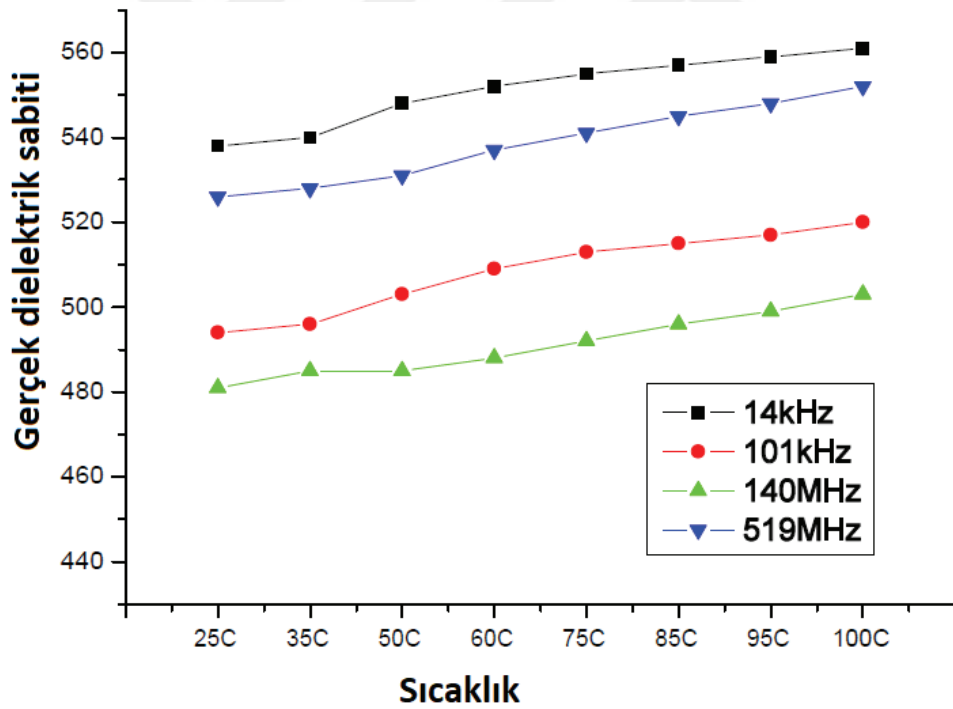
Şekil 4.33. PA6 + %5G + %4 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



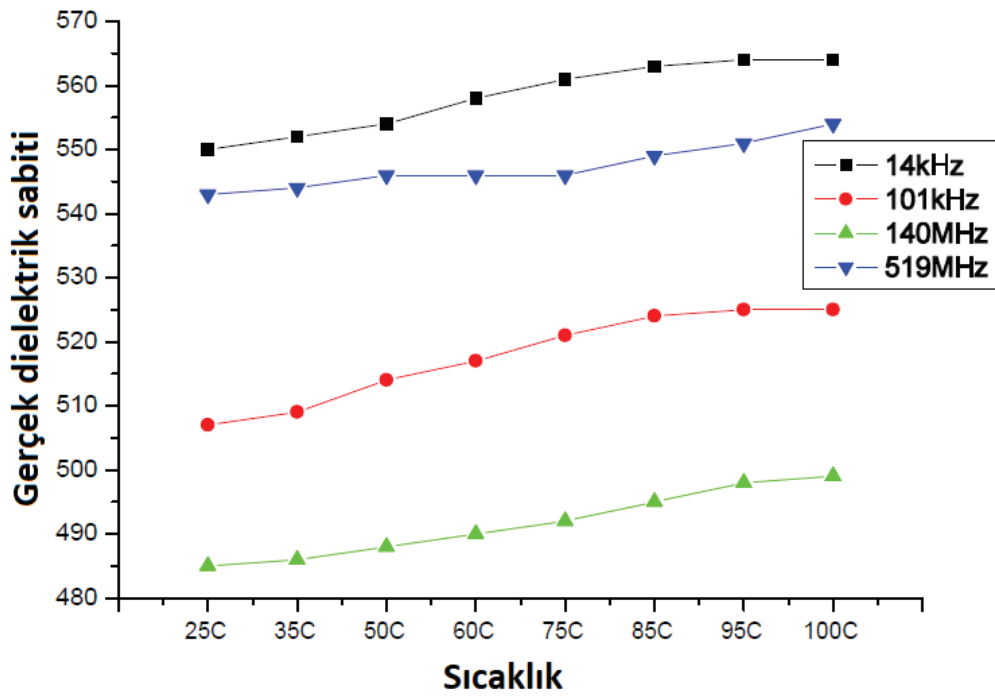
Şekil 4.34. PA6 + %5G + %6 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi

%2, %4 ve %6 vaks ile katkılanmış Poliamid 6 + %5 grafit ve katkısız Poliamide 6 + %5 grafit numunelerin gerçek dielektrik sabitleri 14 kHz, 101 kHz, 140 MHz ve 519 MHz bölgelerinde incelenmiş ve grafikleri çizilmiştir. Grafiklerde tüm numunelerde sıcaklık arttıkça dielektrik sabitinde de artma gözlenmiştir. Şekil 4.31.'den Şekil 4.34.'e kadar incelenildiğinde, 10 kHz, 101 kHz ve 140 MHz frekans bölgelerinde sanal dielektrik sabit gittikçe azalmakta fakat sıcaklık arttıkça artmaktadır. Ancak, 519 MHz bölgesinde bu sıralama değişmekte ve bu frekans bölgesinde dielektrik sabit yüksek değer alıp 400 MHz bölgelerinin üzerinde bir dielektrik sabite sahip olmaktadır. Bu durum bütün numunelerde kilohertz bölgesinde “numunenin sığasındaki” ani düşüş ile ilişkili olduğu izlenimini vermektedir. Bu bölgeden itibaren sığa tekrar frekans arttıkça artmaktadır.

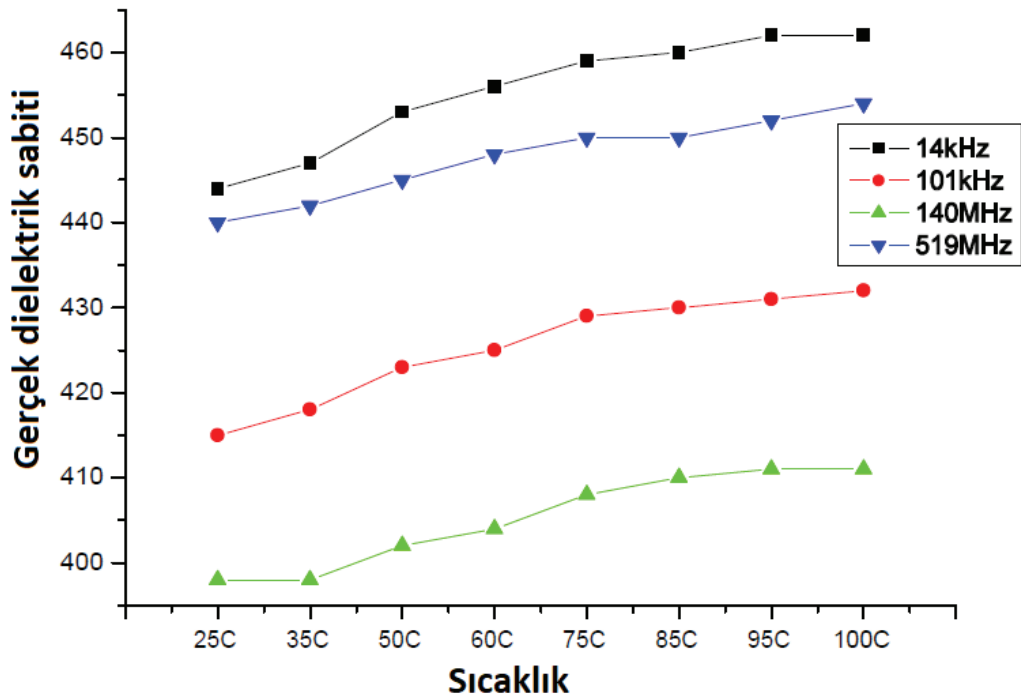
4.3.7. Gerçek dielektrik sabiti-sıcaklık hesaplamaları



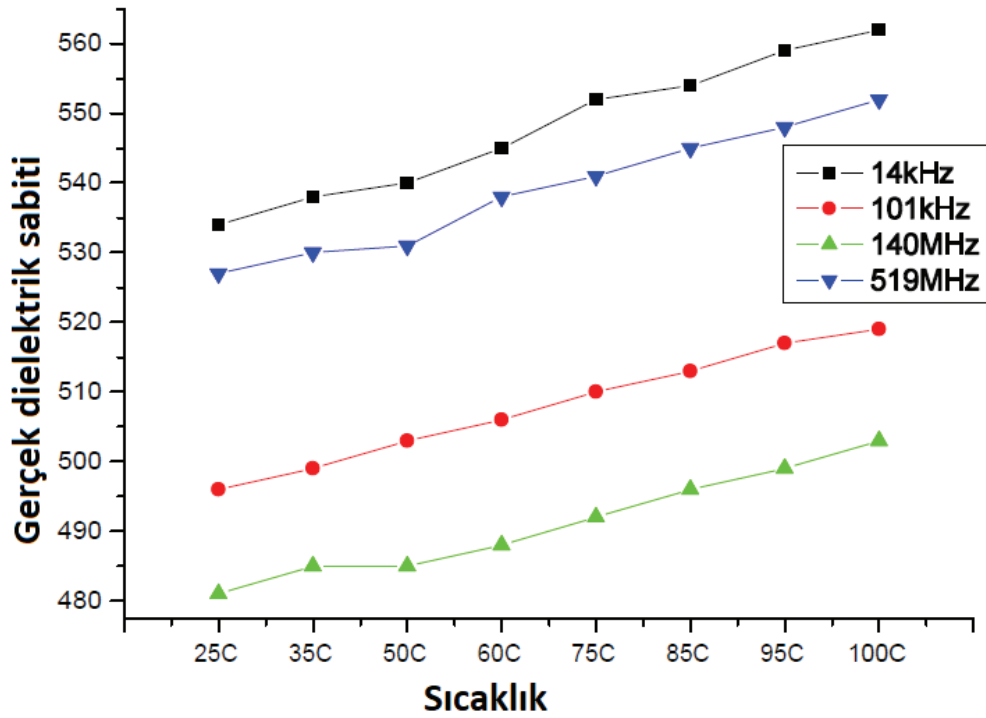
Şekil 4.35. PA6 + %5G içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 4.36. PA6 + %5G + %2 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 4.37. PA6 + %5G + %4 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 4.38. PA6 +%5G + %6 vaks içeren numunenin farklı frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabitinin sıcaklığa göre değişimi

%2, %4 ve %6 vaks ile katkılanmış Poliamid 6 + %5 grafit ve katkısız Poliamid 6 + %5 grafit numunelerin gerçek dielektrik sabitleri 14 kHz, 101 kHz, 140 MHz ve 519 MHz bölgelerinde incelenmiş ve grafikleri çizilmiştir. Grafiklerde tüm numunelerde sıcaklık arttıkça dielektrik sabitinde de artma gözlenmiştir. Şekil 4.35.'den Şekil 4.38.'e kadar incelenildiğinde 10 kHz, 101 kHz ve 140 MHz frekans bölgelerinde gerçek dielektrik sabit gittikçe azalmakta fakat sıcaklık arttıkça artmaktadır. Ancak, 519 MHz bölgesinde bu sıralama değişmekte ve bu frekans bölgesinde dielektrik sabit yüksek değer alıp 101 kHz ve 140 MHz bölgelerinin üzerinde bir dielektrik sabite sahip olup kHz bölgesinin dielektrik sabitine ulaşmaktadır. Bu durum bütün numunelerde kilohertz bölgesinde “numunenin sığasındaki” ani düşüşü açıkça göstermektedir. Bu bölgeden itibaren sığa tekrar frekans arttıkça artmaktadır.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında PA6 + %5G, PA6 + %5G + %2 vaks, PA6 + %5G + %4 vaks ve PA6 + %5G + %6 vaks polimer kompozit malzeme çalışılarak vaks katkısının PA6 + %5G' nin mekanik ve dielektrik özelliklerine etkisi incelendi. Malzeme üretildikten sonra koparma ve germe uygulandı. Böylece vaks katkısının elastiklik özellikleri ve zorlanmaya karşı direnci incelendi. Ayrıca vaks katkısının malzeme içinde nasıl yerleştiği ve karışıma ne gibi bir bağlanma ile bağlandığı anlaşılmaya çalışıldı. Yapılan araştırma SEM sonuçları ve EDS analizi incelendiğinde grafitin homojen olarak fakat kendi yapısını mikro grafit levhaları halinde koruyarak polimer içinde dağıldığını yani karbon atomlarının polimer içinde de grafit yapıyı koruyacak şekilde mikro plakalar halinde bir arada kaldıklarını göstermektedir (bakınız Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.).

Tekrardan Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'daki SEM sonuçları ve EDS analizleri incelendiğinde kopma uçlarında grafit olmayan numunede uzama olmamış, vaks içeren numunelerde ise kopma uçlarında vaks miktarı arttıkça uçlardaki uzama miktarının da arttığı görülmektedir.

Bu durum vaksın grafiti etkilemediği fakat PA6 ile karışarak yapısal değişiklikle PA6 moleküllerinin bağ yapışına etki ettiği ve malzemeyi yumuşatarak uzayan bir yapıya soktuğu görülmektedir. Yani esnekliği azaltılmış malzemeyi kolayca eğerek bükülebilir ve şekil verilebilir bir yapıya sokmuştur.

Sonuç olarak çalışmalarımızda kullandığımız PA6 +%5G vaks katkısı ile daha dayanıklı, eğilip bükülmeye daha müsait ve daha fazla kırılmadan uzama kapasitesine sahip hale gelmiştir. Ancak burada dikkati çeken diğer bir özellik vaks katkısının malzemenin sertliğini azaltma yani malzemeyi yumuşatması olmuştur.

Vaks katkısının daha da artırılması durumunda bu polimer kompozitin başlangıç özelliklerinden uzaklaşacağı ve yumuşak fakat esnekliği zayıf bir malzeme olacağı görülmektedir.

Dielektrik özelliklerinin araştırılmasında temel alınan, gerçek dielektrik geçirgenlik sabiti (ϵ') ve sanal dielektrik sabiti (ϵ'') nin yorumlanması olmuştur. Bunun ardından öz iletkenlik katsayısının ve kayıp faktörünün de frekansa bağlı değişimi yorumlanmıştır.

Frekansa bağlı kapasite ölçümleri seçilen numunenin (0,8cmx0,8cmx0,4cm) sığasının nanofarad seviyesinde olduğunu ve frekansa bağlı değişimin ancak 20 Hz-10 MHz aralığında %2 civarında kaldığını göstermektedir. PA6 + %5G numunesinde 10 kHz bölgesinde ani bir azalma olduktan sonra sığa tekrar bu seviyeden sabit devam etmektedir. 10 kHz bölgesinde ani düşüşün nedeni Debye veya Cole-Cole modeli ile açıklayabiliriz.

İletkenlik ölçümleri 10 kHz bölgesinde civarında başlayıp yüksek frekanslara doğru iletkenlik hızla artmaktadır. İletkenlikteki bu artış 10 kHz - 10MHz arası bölgede birimsiz iletken mertebesinin 10^{-6} mertebesinden 10^{-5} mertebesi gibi yüksek bir seviyeye çıkmasına neden olmaktadır. Bu durum sıcaklıkla az da olsa değişmektedir. Frekansa bağlı kesin artış kadar olmamakla birlikte sıcaklık arttıkça iletkenliğin de arttığı gözlenmiştir. 30 $^{\circ}\text{C}$ 'den 100 $^{\circ}\text{C}$ 'ye çıkıldığında iletkenlik % 10 civarında artmaktadır.

Frekansa bağlı değişim ve Debye etkisi en belirgin olarak sanal dielektrik sabitindeki azalmada kendini göstermektedir. Sanal dielektrik sabit 20Hz civarlarında 10^4 mertebesinde iken 10 MHz civarlarında 10^1 mertebelerine düşmekte ve neredeyse iletken bir metal malzemenin dielektrik sabiti seviyesine inmektedir.

Sanal dielektrik sabitindeki hızlı düşüş ile ilişkili olarak öz iletkenlik katsayısı 20 Hz'de 10^{-6} civarlarında iken 10 MHz civarlarında 10^{-1} seviyelerine çıkarak iletken bir malzemenin öz iletkenliğine yaklaşmaktadır.

Sonuç olarak; dielektrik araştırmalar bize PA6 + %5G'nin yüksek frekanslarda dielektrik malzeme olarak kullanılamayacağını fakat iletken polimer kompozit olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Vaks katkısının malzemenin kopma ve kırılmaya karşı direncini artırdığını fakat dielektrik özelliklerini çok fazla etkilemediğini, dielektrik özelliklerinde zayıflamanın veya diğerk bir deyişle iletkenliğe katkısının %1,62 civarlarında kaldığını ve sıcaklığın da 100 °C'de % 1 fazlaştırdığını göstermektedir. Bu durum vaks katkısının kimyasal yapı olarak Poliamid 6 ile olan benzerliğine bağlanmalıdır.



KAYNAKLAR

- [1] Cousin, T. Galy, J. and Dupuy, J. (2012) Molecular modelling of polyphthalamides thermal properties: Comparison between modelling and experimental results, polymer, 53(15), 3203-3210. doi:10.1016/j.polymer.2012.05.051
- [2] Iribarren, J.I. Aleman, C. Puiggali J. (2011) "Polyphthalamides" in handbook of engineering and specialty thermoplastics, volume 4, Wiley-Scrivener, New Jersey
- [3] Licari J.L. 2003 Coating materials for electronic applications: Polymers, processing, reliability, testing (Norwich: Noyes Publications/William andrew,inc.)
- [4] Steeman P. A. M, Maurer F. H. J, (1992) "Dielectric properties of poliamide- 4,6" polymer, volume 33 issue 20, pages 4236-4241
- [5] A Gupta, R.K Goyal, (2019) "Electrical properties of polycarbonate/expanded graphite nanocomposites" Journal of applied polymer science, 136 (13), 47274 Doi:10.1002/app.47274
- [6] Koroliov, Anton ve diğerleri, (2019) "Terahertz time-domain spectroscopy of graphene nanoflakes embedded in polymer matrix" applied sciences-basel, 9 (3) No: 391 doi:10.3390/app9030391
- [7] Fedulova, E.V, et al. "Studying of dielectric properties of polymers in the terahertz frequencyrange" Saratow fall meeting 2011: Optical technologies in biophysics and medicine XIII book series proceedings of
- [8] Jin Y S et al. (2006) "Terahertz dielectric properties of polymers" Journal of the korean physical society, 49(2) 513-517
- [9] Ünal H et al. 2015 " Influence of wax content on the electrical, thermal and tribological behaviour of a poliamide 6/ graphite composite" J. polym eng 2016; 36(3): 279-286 Doi 10.1515/Polyeng-2014-0361
- [10] Pathah et al. (2019) " Improved thermomechanical and electrical properties of reduced graphene oxide reinforced polyaniline- dodecyl benzenesulfonic acid/ nanocomposites

- [11] Çetin E., 2007, Anilin ve poli (etilen teraftalat) kullanarak kimyasal polimerizasyon yöntemi ile iletken kompozit lif hazırlanması ve karakterizasyonu. Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi.
- [12] Khakzad, F., 2017, Grafen katkılı cam/epoksi nanokompozit plakaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. Gazi Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [13] Friedrich K., Wear of reinforced polymers by different abrasive counterparts. In: Friedrich K, editor. Friction and wear of polymer composites, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986.
- [14] Kukureka S.N., Hooke C.J., Rao M., Liao P., Chen Y.K., The effect of fibre reinforcement on the friction and wear of polyamide 66 under dry rolling-sliding contact, Tribol Int, 32:107-16, 1999.
- [15] Aydın, Z., Karakişla, M., Saçak, M. 2009, Preparation and characterization of conducting poly (ethylene terephthalate)/polypyrrole composite fibers. Journal of thermoplastic composite materials.
- [16] Yiu-Wing Mai, Zhong-Zhen Yu, 2006, Polymer nanocomposites. Basım Yeri: Woodhead Publishing
- [17] Saylan, T., 2010, PA 6 kompozitlerinin termal, mekanik ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [18] Cardarelli, F., 2008, Materials handbook: a concise desktop reference. Basım Yeri: Springer Science & Business Media.
- [19] Kaw, A.K., 2010, Mechanics of composite materials. Basım Yeri: CRC press.
- [20] Akın, D., 2013, Karbon dolgulu siklo-olefin kopolimer (COC) kompozitlerin elektriksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [21] Aström B.T., 1997, Manufacturing of polymer composites, Chapman & Hall, ISBN: 0412819600, 9780412819605
- [22] Zaharescu T., Mart 2012, Electrical properties of polymers and polymer composites, PolyChar 20/Dubrovnik
- [23] Rıande E., Diaz-calleja R., 2004, Electrical properties of polymers, CNC Press, ISBN: 9780824753467
- [24] Bhadra S., 2009, Progress in preparation, processing and applications of polyaniline, Progress in Polymer Science 34, 783–810

- [25] Natalia V. 2007, Polyaniline and polypyrrole: A comparative study of the preparation, *European Polymer Journal* 43 ,2331–2341
- [26] Lısunova M.O., Mamunya Y.P., LEbovka N.I., Melezhyk A.V., 2007, Percolation behaviour of ultrahigh molecular weight polyethylene/multiwalled carbon nanotubes composites, *European Polymer Journal*, 43, 949-958
- [27] Costa L.C., Henry F., 2011, Dc electrical conductivity of carbon black polymer composites at low temperatures, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 1741-1744
- [28] Chung D.D.L., 1994, Carbon fiber composites, Butterworth-Heinemann, ISBN:9780750691697
- [29] Dokur M.M., 2009, Karbon fiber esaslı polimerik matrisli kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [30] Erkek S., 2007, Karbon siyahı/yağ ve karbon siyahı/dolgu maddesi oranının farklı vulkanizasyon sistemlerinde EPDM, NBR ve SBR elastomerinin fizikomekaniksel özellikleri üzerine etkisi. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [31] Huang J.C., 2002, Carbon black filled conducting polymers and polymer blends, *Advances in Polymer Technology*, 21, 299-313
- [32] Kaya Ö., 2006, Grafit zenginleştirme yöntemleri ve zenginleştirmeye etki eden parametrelerin araştırılması. Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [33] Graffin, G.D., “Graphite”, *Industrial minerals and rocks(nonmetallics other than fuels)*; Lefond, S.J., Volume 2, Fifth Edition, Society of Mining Engineers of The American Institute of mining, Metallurgical and petroleum engineers, Inc., New York, (1983), Pages 757-773
- [34] Chang, L.L.Y., “Industrial mineralogy materials, processes and uses, PrenticeHall Inc.; (2002), Pages 129-142.
- [35] Pierson, H.O., “Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes properties, processing and applications”, Noyes Publications, (1993).
- [36] Çuhadaroğlu D., Grafit: Bir genel değerlendirme, Süleyman Demirel Teknik Bilimler Dergisi, 2018.
- [37] Rethwisch D., G.Callister W. D., *Materials Science and Engineering*, 2013.
- [38] Mantas, P.Q., dielectric response of materials: extension to the debye Model, P I I : S0955-2219(98)00273–8, 1988.

- [39] İyibakanlar G., 2003, Polimerlerin dielektrik özelliklerinin sıcaklık ve frekansla değişimlerinin incelenmesi. Eskişehir Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [40] Yüksel T., 2010, Yüksek sıcaklıklarda wollastonit katkılı nr-sbr elastomer esaslı polimerlerin dielektrik spektroskopisi analizi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi.
- [41] Ünal H et al. 2012, “Mechanical, electrical and tribological properties of graphite filled polyamide-6 composite materials” J Polm Eng 2013; 33(4); 351-355 Doi 10.1515/polyeng-2013-0043
- [42] Kuru Ş. T., 2017, Al_xcd_{1-x}fe₂0₄ ferrit nanoparçacıkların üretilmesi, karakterizasyonu, dielektrik ve iletkenlik özelliklerinin incelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Doktora Tezi.



ÖZGEÇMİŞ

Kübra Akbaş, 09 Mart 1988’ de İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. Lise eğitimini 2002-2006 yılları arasında İstanbul Kadıköy Gözcübaba Lisesinde tamamladı. 2008 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünü 2012 yılında bitirdi. 2014-2015 yılları arasında ise Sakarya Üniversitesi Pedagojik Formasyon Eğitimini tamamladı. 2016 yılında Sakarya Üniversitesi Fizik bölümünde Yüksek Lisans yapmaya başladı. Bu süre içinde Üsküdar Belediyesi Gençlik ve Spor Hizmetleri Müdürlüğünde Fizik Öğretmenliği yaptı ve halen Fizik Öğretmenliğine devam etmektedir.