İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SODYUM METABORAT DEKAHİDRAT (BORAKS) KATKILI PMMA POLİMER KOMPOZİTLERİN MİKRODALGA ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fuat Berke GÜL

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

SODYUM METABORAT DEKAHİDRAT (BORAKS) KATKILI PMMA POLİMER KOMPOZİTLERİN MİKRODALGA ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fuat Berke GÜL
(301181014)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN

HAZİRAN 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301181014 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Fuat Berke GÜL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "SODYUM METABORAT DEKAHİDRAT (BORAKS) KATKILI PMMA POLİMER KOMPOZİTLERİN MİKRODALGA ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Cüneyt ARSLAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Selcan KARAKUŞ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa	.....

Teslim Tarihi : 15 Mayıs 2021
Savunma Tarihi : 09 Haziran 2021

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını gerçekleştirmemde desteğini benden hiçbir zaman esirgemeyen İTÜ Enerji Enstitüsü Öğretim Üyesi ve aynı zamanda danışmanım olan Prof. Dr. Nilgün BAYDOĞAN'a en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim. Bu tezin odak noktasını oluşturan Mikrodalgalar ve Radyodalgaları testlerini uygulamak amacıyla beni ağırlayan ve yorumlanabilir verilerin ortaya çıkmasına yardımcı olan TÜBİTAK UME mensubu Dr. Erkan DANACI'ya şükranlarımı sunmak istiyorum. Karakteristik özelliklerin belirlenmesi için gerçekleştirilen analizlerde verdikleri destekler ve emekler ile harcadıkları zamanlar için İTÜ Mem-Tek mensubu Arş. Gör. Sevde KORKUT'a, Koç Üniversitesi mensubu Dr. Barış YAĞCI'ya ve İTÜ ATUM mensubu Dr. Hasan GÖKÇE'ye teşekkürlerimi sunarım. Sentezlenen örneklerin üretim aşamasından sağladığı yardımlar ve olumlu yaklaşımları nedeniyle Emre DOĞAN'a ve gerek testlerin eksiksiz bir şekilde tamamlanması gerekse testler için hazırlanan numunelerin uygunluğu konularında elinden gelen tüm desteği gösteren İTÜ-Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü mensubu Öğr.Gör. Faiz MUHAFFEL'e en içten şükranlarımı sunmak istiyorum.

Haziran 2021

Fuat Berke GÜL
(Araştırma Görevlisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Polimerler 2
1.1.1 Polimer türleri 3
1.1.1.1 Termoplastikler 3
1.1.1.2 Termosetler 4
1.1.1.3 Elastomerler 4
1.1.2 Polimerlerin moleküler yapıları 5
1.1.2.1 Lineer polimerler 5
1.1.2.2 Dallanmış polimerler 6
1.1.2.3 Çapraz bağlı polimerler 6
1.1.2.4 Ağ yapılı polimerler 6
1.2 Polimerizasyon Yöntemleri 7
1.2.1 Adımlı büyütme polimerizasyonu 7
1.2.2 Zincir büyütme polimerizasyonu 8
1.2.2.1 Serbest radikal zincir polimerizasyonu 8
1.2.2.2 İyonik zincir polimerizasyonu 9
1.2.2.3 Koordinasyon polimerizasyonu 9
1.2.2.4 Halka açma polimerizasyonu 9
1.2.2.5 Kontrollü/Canlı polimerizasyon 10
1.3 Polimer Kompozitleri 10
1.4 Bor Elementi ve Bor Bileşikleri 11
2. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER **13**
2.1 Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu (ATRP) 13
2.1.1 Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu ile sentez 13
2.2 Poli(metil metakrilat) 15
2.2.1 Mekanik özellikler 16
2.2.2 Radyasyon zırhlama özellikleri 16
2.2.3 Optik özellikler 17
2.2.4 Isıl özellikler 17
2.2.5 Manyetik özellikler 17
2.2.6 Elektriksel özellikler 18
2.3 Elektromanyetik Teori 18
2.3.1 Elektromanyetik spektrum 19

2.3.2 Elektromanyetik dalgalar 20
2.3.2.1 Gama ışınları 20
2.3.2.2 X-ışınları 21
2.3.2.3 Mor ötesi ışınları 21
2.3.2.4 Görünür ışık 22
2.3.2.5 Kızıl ötesi ışınlar 22
2.3.2.6 Mikrodalgalar 22
2.3.2.7 Radyo dalgaları ışınları 23
2.4 Radar Teknolojisi ve Radyo Dalgaları 24
2.4.1 Radyo frekans (RF) bantları ve Radar teknolojisi 26
2.5 Radar Soğurucu Malzemeler 29
2.5.1 Radar dalgalarının soğurulması 30
2.5.2 Polimer yapıların Radar soğurma özelliklerinin geliştirilmesi 31
2.6 Boraks Dekahidrat'ın Özellikleri ve Kullanım Alanları 32
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR 35
3.1 PMMA/Boraks Kompozitlerinin Oluşturulması 35
3.2 PMMA/Boraks Polimer Kompozitin ATRP Metodu ile Sentezi 36
3.3 X-ışını Kırınım (X-Ray Diffraction) (XRD) Analizi 38
3.3.1 Bragg yasası 38
3.3.2 Kristalit boyutu 39
3.4 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (Fourier Transform Infrared) (FTIR) Analizi 40
3.5 Raman Analizi 40
3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) (SEM) Analizi 41
3.7 Temas Açısı Ölçümü 42
3.8 Shore-D Sertlik Testi 44
3.9 Stereomikroskop Görüntüleri 45
3.10 Ultrasonik Test (UT) 46
3.11 Termogravimetrik Analiz (TGA) 49
3.12 Diferansitel Taramalı Kalorimetri (Differential Scanning Calorimeter) (DSC) Analizi 50
3.13 X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) (XPS) 50
3.14 Mikrodalga Testleri 53
3.14.1 Dielektrik değerlerin tespiti 53
3.14.2 S-Parametreleri ve X- bandındaki Geçirgenlik (%), Yansıtma (%) ve Soğurma (%) Tespiti 54
4. BULGULAR 59
4.1 Sentezlenen Örneklerin XRD Analizi Sonuçları 59
4.2 SEM Analizi ile Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi 60
4.3 Stereomikroskop Görüntüleri 62
4.4 FTIR Analizi 63
4.5 Raman Analizi 64
4.6 Temas Açısı Ölçüm Analizi 65
4.7 Sertlik Testi Analizi 66
4.8 Ultrasonik Test Yöntemi ile Elastik Özelliklerin Belirlenmesi 67
4.9 TGA ve DSC Analizi 70
4.10 XPS Analizi 72
4.11 Dielektrik Değer Analizi 79
4.12 Mikrodalga Testi Analizi 86

5. TARTIŞMA 95
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR 113
ÖZGEÇMİŞ 129

KISALTMALAR

PMMA : Poli (metil metakrilat)

ATRP : Atom Transfer Radikal Polimerizasyon

UV : Ultra Viyole (Mor Ötesi)

RADAR : Radyo Dalgaları Algılama ve Menzil Tayini

RAM : Radar (Radyo dalgaları) Emici Malzeme

MMA : Metil Metakrilat

RCS : Radar Kesit Alanı

Hz : Hertz

dB : Desibel

FTIR : Fourier Dönüşümlü Infrared

DSC : Diferansiyel Taramalı Kalorimetri

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

XRD : X-ışını Kırınımı

XPS : X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi

TGA : Termogravimetrik Analiz

VNA : Vektör Ağ Analizcisi

Pa : Pascal

SEMBOLLER

C	**:** Kapasitans
Ω	**:** Direnç (Ohm)
D	**:** Kristal Boyutu
λ	**:** Dalga Boyu
V	**:** Hız
t	**:** Zaman
f	**:** Frekans
ν	**:** Frekans
h	**:** Planck Sabiti
$\mathbf{E_B}$	**:** Bağlanma Enerjisi
$\mathbf{E_K}$	**:** Kinetik Enerji
W	**:** İş Fonksiyonu
E	**:** Young (Elastisite) Modülü
G	**:** Kayma (Shear) Modülü
K	**:** Hacim Modülü
ρ	**:** Yoğunluk
ν	**:** Poisson Oranı
H	**:** Mikrosertlik
μm	**:** Mikrometre
d	**:** Uzunluk
$\mathbf{\theta_B}$	**:** Bragg Açısı
ε	**:** Dielektrik Katsayısı
$\mathbf{\varepsilon_0}$	**:** Serbest Uzayın Dielektrik Katsayısı
$\mathbf{\varepsilon_r}$	**:** Bağıl Dielektrik Katsayısı
μ	**:** Manyetik Geçirgenlik
$\mathbf{\mu_0}$	**:** Serbest Uzayın Manyetik Geçirgenlik
$\mathbf{\mu_r}$	**:** Bağıl Manyetik Geçirgenlik
$\mathbf{\theta_B}$	**:** Bragg Açısı

V_P **:** Enine Dalga Hızı

V_S **:** Boyuna Dalga Hızı

°C **:** Santigrad Derece

ZE **:** Zırhlama Etkisi

ZE_{yan} **:** Yansıtma Zırhlama Etkisi

ZE_{abs} **:** Absorblama Zırhlama Etkisi

ZE_{top} **:** Toplam Zırhlama Etkisi

L_{ref} **:** Yansıma Kaybı

L_{ret} **:** Geri Dönüş Kaybı

η **:** Kırılma İndisi

RC **:** Yansıma Katsayısı (Γ)

Z_m **:** Malzemenin Empedansı

Z_0 **:** Serbest Uzayın Empedansı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri. 12
Çizelge 1.2 : Bor mineralleri ve kimyasal formülleri. 12
Çizelge 2.1 : PMMA'nın mekanik özellikleri. 16
Çizelge 2.2 : PMMA'nın ısıl özellikleri. 17
Çizelge 2.3 : PMMA'nın elektriksel ve manyetik özellikleri. 18
Çizelge 2.4 : Mikrodalgaların frekans aralıkları ve bant adlandırmaları. 23
Çizelge 2.5 : Radyo dalgalarının frekans aralıkları ve bant adlandırmaları. 24
Çizelge 2.6 : Sodyum Tetraborat Dekahidrat'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri. 33
Çizelge 3.1 : Shim tasarım boyutları. 55
Çizelge 4.1 : Ağırlıkça 2%, 5%, 7.5%, 10% PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın XRD analizi sonuçlarına bağlı kristalit boyutları. 60
Çizelge 4.2 : Dalga sayılarına göre moleküler yapıda oluşan FT-IR bağları. 64
Çizelge 4.3 : Katkısız PMMA ve ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA örneklerinin yoğunluk değerleri. 68
Çizelge 4.4 : Grindo Sonic ultrasonik test cihazından elde edilen ses hızları ile hesaplanan mekanik özellikler. 69
Çizelge 4.5 : Normal prob ve açılı prob ile ölçülmüş ses hızı değerleri ile hesaplanan mekanik özellikler. 69
Çizelge 4.6 : Katkısız PMMA ve %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks örneklerinin sıcaklığa bağlı yüzde kütle kaybı değerleri. 71
Çizelge 4.7 : Katkısız PMMA ve %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks örneklerinin camsı geçiş sıcaklığı ve erime noktası değerleri. 72
Çizelge 4.8 : O1s sonuçlarına göre bağ yapıları, bağlanma enerjileri ve atomik yüzde değerleri. 77
Çizelge 4.9 : C1s sonuçlarına göre bağ yapıları, bağlanma enerjileri ve atomik yüzde değerleri. 79
Çizelge 5.1 : Literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgilerin bu tez ile karşılaştırılmasına ait özet. 106

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Malzemelerin sınıflandırılması. 3
Şekil 1.2 : Lineer, dallanmış ve çapraz bağlı polimer yapıları. 5
Şekil 1.3 : Polimerizasyon yöntemleri. 7
Şekil 2.1 : ATRP yöntemi ile polimerizasyon aşamalarını şematik gösterimi. 14
Şekil 2.2 : MMA polimerinin moleküler yapısı..... 15
Şekil 2.3 : Elektromanyetik spektrum ve ışın türleri. 20
Şekil 2.4 : Radyo dalgaları ve bant aralıkları. 24
Şekil 2.5 : RADAR cihazlarının türlerine göre kullanıldıkları radyo dalgaları bant aralıkları. 26
Şekil 3.1 : PMMA/Boraks kompozitlerinin polimerizasyon şeması. 35
Şekil 3.2 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5, %10 ve %15 Boraks katkısı içeren PMMA/Boraks örnekleri. 37
Şekil 3.3 : Ağırlıkça a) %2, b) %5, d) %7,5 Boraks içeren ve c) katkısız PMMA örnekleri. 37
Şekil 3.4 : XRD analizi gerçekleştirilen Xpert Pro XRD cihazı..... 39
Şekil 3.5 : Raman analizi için kullanılan RENISHAW Class 1000 cihazı..... 41
Şekil 3.6 : SEM görüntülerinin alındığı Quanta FEG 250 cihazı 42
Şekil 3.7 : Temas Açısı Ölçümü cihazı. 44
Şekil 3.8 : Leica MZ 10 F Model Stereomikroskop. 45
Şekil 3.9 : Grindo Sonic ultrasonik test düzeneği. 48
Şekil 3.10 : Genemod uygulamasının arayüzü. 49
Şekil 3.11 : Termogravimetrik analiz cihazı. 49
Şekil 3.12 : XPS cihazının çalışma sistemi ve yapısı. 51
Şekil 3.13 : XPS analiz cihazı..... 52
Şekil 3.14 : Performans prob uygulaması. 54
Şekil 3.15 : S-Parametreleri ve malzeme yüzeyleri arasındaki ilişki. 54
Şekil 3.16 : Alüminyumdan (%99 saflıkta) hazırlanan a) Şim (Shim)'e ait görüntü ve b) Shim boyutlarını gösteren kroki. 56
Şekil 3.17 : Şim (Shim) için üretilen a) %2 b) %5 c) %10 Boraks içeren ve d) katkısız PMMA örnekleri. 56
Şekil 3.18 : Agilent Technologies markasının N5225A model cihazı ve VNA kablolarından oluşan Mikrodalga testlerinin gerçekleştirildiği sistem. 56
Şekil 3.19 : Mikrodalga testlerinde kullanılan problar. 57
Şekil 4.1 : Ağırlıkça 2%, 5%, 7.5%, 10% PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın XRD spektrası..... 59
Şekil 4.2 : SEM ve Stereomikroskop görüntüleri a) katkısız PMMA, b) %2, c) %5, d) %7.5 ve e) %10 Boraks içeren PMMA/Boraks..... 61
Şekil 4.3 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın FT-IR Spektrası. 63

Şekil 4.4 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın Raman Spektrası. 65
Şekil 4.5 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Borax ve katkısız PMMA'nın Temas Açısı Ölçümü sonuçları ve oluşan damla şekilleri. 66
Şekil 4.6 : Shore-D sertlik testi sonuçları. 67
Şekil 4.7 : Termogravimetrik Analiz sonuçları. 70
Şekil 4.8 : Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) sonuçları. 72
Şekil 4.9 : XPS Survey sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks. . .. 73
Şekil 4.10 : XPS B1s sonuçları a) %2 PMMA/Boraks, b) %5 PMMA/Boraks, c) %7.5 PMMA/Boraks ve d) %10 PMMA/Boraks. 74
Şekil 4.11 : XPS Cu2p sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks. . 74
Şekil 4.12 : XPS O1s sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks. . 76
Şekil 4.13 : XPS C1s sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks. . 77
Şekil 4.14 : Frekansa bağlı olarak dielektrik sabitinin değişimi. 80
Şekil 4.15 : Frekansa bağlı olarak kayıp eğrisi (loss tanjant). 81
Şekil 4.16 : Ağırlıkça %2, %5, %10 Boraks içeren PMMA ve katkısız PMMA örneklerinin dielektrik sabiti değerleri. 83
Şekil 4.17 : Frekansa bağlı olarak dielektrik sabiti kayıp eğrisi. 83
Şekil 4.18 : Frekansa bağlı olarak manyetik geçirgenliğin değişimi. 85
Şekil 4.19 : Ağırlıkça %2, %5, %10 Boraks içeren PMMA ve katkısız PMMA örneklerinin manyetik geçirgenlik değerleri. 85
Şekil 4.20 : Örneklerin yansıtma (reflection) oranları. 87
Şekil 4.21 : Örneklerin geçirgenlik (transmission) oranları. 88
Şekil 4.22 : Örneklerin soğurma (absorption) oranları. 88
Şekil 4.23 : Toplam elektromanyetik zırhlama etkisi. 90
Şekil 4.24 : Frekansla birlikte değişen yansıtma kaybı değerleri. 91
Şekil 4.25 : Örneklerin yansıtma katsayı değerlerinin X-bandında değişimi. 92
Şekil 4.26 : Geri dönüş kaybının frekansa bağlı olarak değişimi. 93

SODYUM METABORAT DEKAHİDRAT (BORAKS) KATKILI PMMA POLİMER KOMPOZİTLERİN MİKRODALGA ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Poli (metil metakrilat) (PMMA), yüksek mukavemet ve ısı direncine sahip, iyi mekanik özellikler gösteren ve yüksek aşınma direncine sahip bir termoplastik polimerdir. Yüksek optik geçirgenliği sayesinde camsı akrilat olarak adlandırılan PMMA, mor ötesi ışınlara ve hava koşullarına karşı da dayanıklıdır. Bu gibi özellikleri sayesinde esnek cam üretiminde, gıda sanayinde, sağlık uygulamalarında, otomotiv ve uçak sanayinde, mor ötesi ışın ve radyasyon zırhlama uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. PMMA'nın sahip olduğu olumlu özelliklerin arttırılması, daha geniş bir kullanım alanına yayılması ya da belirli alanlarda özelleştirilmiş kullanım alanına yerleştirilmesi için PMMA kompozitleri üretilmektedir. PMMA matrisine metallerin, nanomalzemelerin ya da seramiklerin eklenmesi ile bu kompozitler oluşturulabildiği gibi kaplama ve çok katmanlı tabakalar eklenerek de PMMA polimer kompozitleri ortaya çıkarılmaktadır. Bu çalışmada PMMA polimerinin avantajlı özelliklerinin arttırılması amacıyla Sodyum Metaborat Dekahidrat ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) katkısı PMMA matrisine yapılmıştır. Endüstride Tinkal olarak adlandırılan kısa adı ise Boraks olan Sodyum Metaborat Dekahidrat, sabun, dezenfektan ve deterjan üretiminde, yapışkanlık, dayanıklılık ve yumuşaklık katması amacıyla kozmetik ürünlerde, korozyon engelleyici olması sebebiyle metallerin kaplanmasında ve bakır, kurşun ve demir gibi metallerin atıklarından geri kazanılmasında kullanılmaktadır. Bu tez çalışmada bu özelliklerinin yanı sıra cam sanayinde camın sertliğini, yüzey sertliğini ve viskozitesini arttırması sebepleriyle de tercih edilmiştir. PMMA esnek cam ya da akrilik cam gibi düşünüldüğünde PMMA'nın sertliğini ve yüzey özelliklerini arttıracağı tespit edilmiştir. Ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks takviye edilmiş (%2, %5 ve %10) PMMA ile katkısız PMMA örnekleri bu tez çalışmasında üretilmiştir. Atom Transfer Radikal Polimerizasyon yöntemi kullanılarak üretilen örneklerin iç yapılarının, bağlarının ve kimyasal özelliklerinin belirlenmesi amacıyla X-ışınları Kırınım (XRD) analizi, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometre analizi, Raman analizi, X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS) analizi, Termogravimetrik Analiz (TGA) ve Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi yapılmıştır. Sentezlenen polimer kompozitlerin yüzey özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu ve Stereomikroskop görüntüleri alınmıştır. Temas açısı ölçümü testi, Ses Üstü (Ultrasonic) testi, ve Sertlik testi fizikel özellikleri hakkında bilgi edinilmesi ve Radyo dalgaları ve Mikrodalgalar testleri ise elektiksel ve manyetik özellikleri ile elektromanyetik dalgalara karşı da davranışlarının incelenmesi amaçlarıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Boraks katkısının PMMA içerisinde homojen bir şekilde dağılım gösterdiğini ve Boraks katkısı miktarının artması ile bir miktar topaklaşma ortaya çıktığını göstermektedir. Bu topaklaşmalar yüzey enerjisinin ve yüzey sertliğinin artmasına neden olarak PMMA'nın daha hidrofilik bir yüzeye sahip olmasına ve yüzeyin daha çok su tutmasına neden olmuştur.

PMMA/Boraks polimer kompozitlerinin yüzey sertliği artarken elastiklik karşıtı dayanımı da yükselmiştir. Dielektrik değerlerin tüm ölçüm aralığın çok düşük farklar ile değişmesi PMMA/Boraks polimer kompozitlerinin kapasitans (sığa) içerisinde dielektrik (yalıtkan) malzeme olarak görev almasının önünü açmaktadır. Mikrodalgalara karşı yansıtma oranı düşük ve geçirme oranı yüksek olan PMMA, X-bandı (8.2 – 12.4 GHz) içerisinde belirli bant aralıklarında kuvvetli absorblama özelliği göstermiştir. Bazı frekans değerlerinde yüksek elektromanyetik absorblama ve minimum yansıtma göstermesi katkısız PMMA ve Boraks katkılı PMMA'ların bant söndüren filtre olarak kullanılabilmelerini sağlamaktadır. Ayrıca düşük yansıma katsayısı ve yüksek geçirme katsayısı ağırlıkça farklı oranlarda Boraks içeren PMMA/Boraks malzemelerinin iletişim ve telekomünikasyon uygulamalarında rol almalarına olanak vermektedir. Geri dönüş kaybınınn genellikle 10 dB civarında olduğu örnekler 4G ve 5G teknolojilerine uyum sağlayacak şekilde uyarlanabilirler. Ayrıca uzay araçlarının iletişimi esnasında kullanılan antenler için gerekli olan yüksek ve düşük sıcaklık dayanımı, proton, nötron, beta parçacıkları ile X ve Gama ışınlarına karşı radyasyon dayanımı, yüksek mukavemet ve iyi elektromanyetik dalga geçirgenliği özelliklerinin bulunması nedeniyle PMMA/Boraks polimer kompozitleri uzay araçlarının, sondaların ve teleskopların anten ya da vericilerinde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir.

Yüksek frekans bölgesinde görev alan cihazlar üzerine gerçekleştirilen çalışmalar, teknolojik araştırmaların ilgi çekici konuları arasında yer almaktadır. Bu konudaki karşılaşılan temel zorluklardan birisi de bu cihazların telekomünikasyon enerji sistemlerinde birbirine uyum sağlayarak görev yapabilmesidir. Yüksek frekans bölgesinde çalışan, her noktada çok sayıda alıcı ve vericinin, IoT uygulamalarındaki kullanımı durumunda, sisteme tek başına bakılacak olursa, bir nebze küçük ancak, milyonlarca veya milyarlarca cihaza bakıldığında ise telekomünikasyon enerji sistemlerinin birbirine entegre olarak görev yapabilmeleri için yüksek frekans bölgesinde çeşitli dalga boylarını filtreleyebilen uygun termoplastik kompozitlerin geliştirilmesinin ihtiyacının önemi, ciddi ölçüde ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu frekans bölgesinde çalışmak zorunda olan malzemelerin kullanımında halen yapısal karakterizasyon yönünden çeşitli teknolojik zorluklar bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen bu malzeme ile sağlanan filtreleme ile daha yüksek veri hızı, daha büyük veri transferi ve veri işlemesi sağlayabilecek telekomünikasyon enerji sistemlerde kullanıma uygun bir malzeme geliştirilmeye çalışılmıştır.

THE DEVELOPMENT OF MICROWAVE PROPERTIES OF SODIUM METABORATE DECAHYDRATE (BORAX) PMMA POLYMER COMPOSITES

SUMMARY

With the development of technology, the use of electromagnetic waves has become very important and this importance continues to increase day by day. Non-ionized electromagnetic waves (radio waves, microwaves, infrared rays, and visible rays) are used by devices such as antennas, televisions, telescopes, mobile communication devices, and Radio Waves Detection and Arranging(RADAR). Radio waves and microwaves are divided into bands in certain frequency ranges for better processing. According to the generations (3G, 4G, 5G, etc.), communication networks work in different bands, while radar devices exchange data in different bands. In order for these devices and systems to be used more effectively and efficiently in current technology areas, the materials in the structure of the system or that help the system to work should be carefully selected. While the importance of transmittance and reflection in communication, image, and sound transmission, and information detection with electromagnetic waves are of great importance, the importance of absorption, ie absorption/damping of these waves, is more prominent in radar technologies. The materials used in the mentioned technologies; can be metals, polymers, and their composites. Especially in recent years, metal components added to polymer matrices or nanoparticles added to polymer matrix are composites that are frequently investigated in the production of Radio Waves Absorbing Material or Radar Absorber Material (RAM). PMMA, a thermoplastic with properties such as high mechanical strength, high optical permeability, strong resistance to wear, and good thermal resistance, was preferred as a polymer, and Borax additive was added to the PMMA matrix to investigate its properties. It was aimed to investigate the characteristic, structural, physical, and chemical properties of PMMA, also known as glassy acrylic, by adding Borax, which is known to increase the hardness and surface energies of glass surfaces. In order to examine the structural properties and bonds, X-Ray Diffraction (XRD) analysis, X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS), Fourier Transform Infrared analysis, and Raman analysis were performed. Microwave tests have been carried out to determine magnetic and electrical properties. Scanning Electron Microscope (SEM) and Stereomicroscope images were obtained in order to display surface properties. Thermal properties were determined by Thermogravimetric Analyzes (TGA) and Differential Scanning Calorimeter (DSC), while elastic properties were determined by Ultrasound Testing and Shore-D Hardness Test. Water holding capacity, surface properties, and hydrophilicity-hydrophobicity were determined by the Contact Angle Test. The results obtained with XRD, XPS, and FTIR indicate that the Borax additive spreads homogeneously in PMMA and forms bonds

and Borax is compatible with the PMMA polymer matrix. In XRD analysis, peak values found at angles of 13, 30, and 42° indicate the presence of PMMA, while peak values found indicate Borax contribution. The crystallite sizes were calculated by using these peaks in Bragg's Law. The results of the XPS analysis show the bonds formed between C, O, B, and Cu and the types of bonds (single, double, or triple bond) based on the binding energies of the atoms. Waves corresponding to the peak values revealed in FTIR and Raman analyzes indicate the bonds between C, O, and H occurring in PMMA, and the peak values occurring at wavenumbers of 985 and 810 cm^{-1} indicate the bonds between B, O, and H. The results of these analyzes indicate that the ATRP method is a suitable method for the synthesis of PMMA polymer and PMMA / Borax polymer composite and that the necessary bonds are formed and Borax shows a good distribution in the PMMA matrix. The ATRP method is one of the chain-growth polymerization techniques and it is a known polymerization method that allows the additives added to the controllable polymers to distribute and bond homogeneously with polymers. Stereomicroscope images show some agglomeration in PMMA with the increasing amount of Borax. Agglomeration increased surface roughness and caused an increase in surface energy. These results are consistent with the results obtained from Contact Angle. Contact Angle results show that the contact angle value of non-additive PMMA, which is 80.1°, decreases with the rising amount of borax and this value is 74.2° for 10% PMMA / Borax polymer composite. Thus, it has been observed that the Borax additive creates a more hydrophilic surface on PMMA and creates a surface with better water holding capacity. Shore-D hardness test shows that hardness increases with the addition of Borax to PMMA, but hardness values decrease with the increase of agglomeration on the surface. The highest hardness value was seen in the 2% Borax doped PMMA sample. However, the hardness of all samples with Borax added indicates a higher value than PMMA without additive. Density values increased as the amount of Borax in PMMA increased and PMMA / Borax composites became denser. As a result of Ultrasound Testing performed by sending transverse and longitudinal sound waves on PMMA matrix samples, Poisson ratio, Microhardness, Young Modulus, Shear Modulus, and Bulk Modulus values of non-additive PMMA and PMMA / Borax composites were found. While the Poisson ratio for PMMA without additives was 0.359, it decreased to 0.348 in the 10% PMMA / Borax sample. Elasticity (Young) Modulus increased from 5.185 GPa to 6.234 GPa, and Microhardness increased from 0.179 GPa to 0.215 GPa. The increase in borax contribution caused the Shear Module to increase from 1.907 GPa to 2.293 GPa and the Bulk Module from 6.141 GPa to 7.383 GPa. TGA and DSC results were effective in determining the thermal properties. TGA results show 5% mass loss of non-additive PMMA as 238 ° C, while mass loss has decreased to 179 ° C in 10% PMMA / Borax polymer composite. The decrease from non-additive PMMA to 10% Borax doped PMMA at 10% mass loss was from 324 ° C to 287 ° C. While 20% mass loss temperatures decreased from 365 C to 357 ° C, 30% mass loss is between 377 ° C and 372 ° C. Looking at the DSC results, the glass transition temperature slightly increased in 2% and 5% doped Borax doped PMMA samples, while it decreased slightly in 7.5% and 10% PMMA / Borax samples. The melting temperature was found close for each sample around 395 ° C. In this study, the effects of radio waves on PMMA and PMMA / Borax materials were investigated by two different methods. The first method measures the behavior of samples when exposed to frequencies in the 500 MHz - 50

GHz range. This method was carried out to find the Dielectric Constants of the samples. As a result of the tests performed in the range of 500 MHz - 50 GHz, the Dielectric Constants of the non-additive PMMA and PMMA / Borax composites have been subjected to minor changes in this frequency range. It has also stored a significant amount of energy in the 25 GHz - 50 GHz range. Thus, in a wide frequency range, PMMA and its Borax doped polymer composites can be used as dielectric materials in capacity (capacity). As the second method, the tests performed in the X-Band (8.2 - 12.4 GHz) of microwaves were also used to determine the electrical and magnetic properties of the samples produced in this study. The Relative Dielectric Constant is in the range of 2 and 3 with varying in the X band interval. Among the samples that produce unchanged dielectric constant values in certain frequency ranges in the X-band, especially the 10% PMMA / Borax samples are the material with the most stable dielectric values in this band. Considering the magnetic permeability, the 10% PMMA / Borax polymer composite with a permeability coefficient of 1 is again the sample with the most stable magnetic permeability in the X-band. The behavior of the undoped PMMA and the different amounts of Borax doped PMMA samples against microwaves, which constitute the main lines of this thesis, are discussed in terms of absorption, reflection, and transmission aspects. It has been observed that with the absorption direction, the energy of microwaves is converted into heat energy, and the waves are kept in the material. Considering the reflection, absorption, and transmission rates, it is seen that all samples reflect 0% at certain frequency ranges, although there is a difference for each sample. Samples with very high transmission rates perform 100% transmission in one part of the X-band. Absorption values show that the samples have high absorption properties at certain frequencies. Particularly, 2% by weight Borax doped PMMA sample gives 27.1% of 11.6 - 11.8 GHz range and an absorption rate of 24.3% in the range of 12.3 - 12.4 GHz. These results show that PMMA matrix containing no additive and different amounts of Borax absorbs effectively in narrowband gaps and thus it is understood that these samples can be used as a band quenching filter. Reflection loss values indicate that effective losses occur in wide ranges for all samples, while the largest impact area is in the non-additive PMMA sample, while the best reflection loss value with -40.45 dB is 10% PMMA / Borax sample. Return loss results are usually at the value of -10 dB but have reached peak values in some bands. Maximum return loss was seen in 2% PMMA / Borax polymer composite with -75.79 dB at 9.04 GHz. Samples, where the return loss is generally around 10 dB, can be adapted to accommodate 4G and 5G technologies. In addition, due to the high and low-temperature resistance required for antennas used during the communication of spacecraft, radiation resistance against protons, neutrons, beta particles, and X and Gamma rays, high strength, and good electromagnetic wave permeability, PMMA / Borax polymer composites are and it can be used as a coating material for antenna or transmitters of telescopes.

1. GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte malzeme bilimlerinde ortaya çıkan ilerlemeler son yüzyılda artan bir ivme ile hızlanmıştır. İnsanlık tarihinin ilk çağlarından itibaren başlayan malzeme bilimi çalışmaları, öncelikle taştan ürünler yapılması ile ve daha sonra ise metallerin işlenmesi ile ortaya çıkmıştır. Günümüze kadar gelen bu süreçte birçok element keşfedilmiş, bileşikler tespit edilmiş ve yeni malzeme türleri ortaya çıkmıştır (Ashby, 2008; Valiulis, 2014). Atomun keşfi ve maddenin içyapısının daha derin araştırılması sonucunda yeni malzemelerin üretimi ve keşfi özellikle 19. Yüzyılda gerçekleşmiş ve 20. Yüzyılda gittikçe hızlanarak bugünkü nihai halini almıştır (Serway ve diğ, 2006, Bölüm 6; Ford, 2013). Sahip oldukları özelliklere göre farklı sınıflara yerleştirilen malzeme türleri arasında metaller, yarı metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler bulunmaktadır (Callister ve Retwisch, 2014).

Sahip oldukları özellikler ile birlikte kullanıldıkları alanlara göre de sınıflandırılan bir takım malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri belirli alanlarda kullanılmak üzere özelleştirilmiştir. Biyomalzemeler, radyasyon zırhlama malzemeleri, cam-elyaflar, polimer-elyaflar ve piezoelektrik malzemeler bu malzemelere örnektir (Shercliff ve diğ, 2018). Özelleştirilmiş alanlarda kullanılan malzemeler çoğunlukla kompozit malzeme sınıfı içerisinde bulunmaktadır. Kompozit malzemeler, birden çok malzemenin olumlu, faydalı ve avantajlı özelliklerinin bir araya getirilerek malzemelerin yalnız başlarına sahip oldukları dezavantajlı özelliklerinin giderilmesi amacıyla üretilen karma malzemelerdir. Kompozit malzemeler metal, seramik ve polimerlerin bir araya getirilmesi ile oluşturulabilir (Smith, 2006).

Kuantum Fiziğindeki teorik gelişmelerin gündelik hayatta uygulama alanları bulması ile birlikte malzemelerin atomik boyutlarında gerçekleşen etkileşimlerin ve değişimlerin belirli koşullar altında malzemelere farklı özellikler kattığı keşfedilmiştir (Weinberg, 2003; Serway ve Jewett, 2004, Bölüm 6). Keşfedilen yeni özellikler ile birlikte ileri malzemeler adı verilen akıllı malzemeler, nanomalzemeler ve yarı iletken malzemeler ortaya çıkmıştır. Atomları içerisindeki kuantum özelliklerinin belirlediği

etkiler sayesinde bu malzemeler süper-iletkenlik, süper-akışkanlık ve süper-hafiflik gibi özellikler kazanmaktadırlar (Ford, 2013; Suskind ve Friedman, 2014). Gelişen teknolojinin gereksinimi olarak özellikle geliştirilen nanomalzemeler sağlık sektöründen enerji sektörüne, üretim endüstrisinden iletişim teknolojilerine kadar birçok alanda kendine yer bulmaktadır. Nanomalzemeler tek başlarına kullanılabileceği gibi genellikle nanokompozit malzemeler şeklinde farklı malzeme türleri ile bir arada kullanılmaktadır. İşlevselliği, uyumluluğu ve bağ yapısı gibi özellikleri ile polimerler, nanokompozitler içerisinde önemli bir yer işgal ederler ve polimer nanokompozit ismini alırlar.

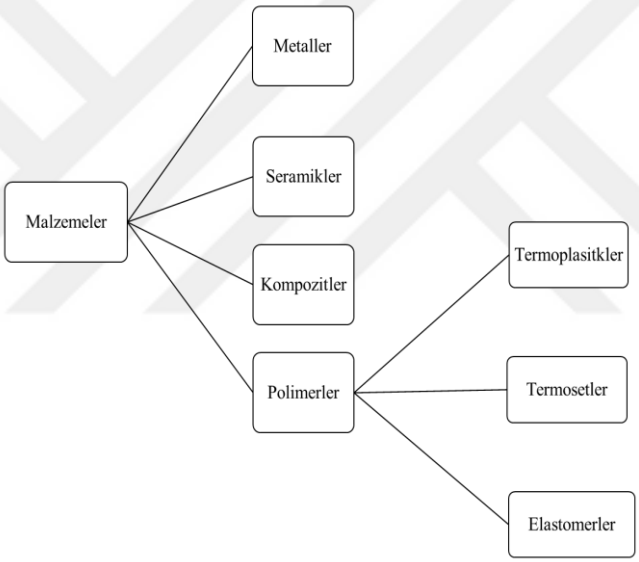
1.1 Polimerler

Polimerler, monomer adı verilen temel yapıtaşı moleküllerin tekrar ederek bir araya gelmesi ile oluşan büyük moleküllerdir (Gowariker ve diğ, 2005). Polimerlerin gösterdikleri özellikleri temel molekül olan monomere bağlı olarak değişmektedir. Polimerlerin molekülleri görece büyük boyutta oldukları için makro molekül yapısındadır ve moleküllerin içerisinde bulunan atomlar birbirlerine kovalent bağlar ile bağlanmışlardır (Callister ve Retwisch, 2014; Sharma, 2015). Polimerler yapılarında Karbon ve Hidrojen bulundurmalarının yanı sıra çoğunlukla ana zincirlerinde de Karbon ve Hidrojen yer almaktadır. Bu tür polimerlere organik polimerler adı verilir. Fakat bazı polimerlerin ana zincirlerinde Karbon atomları yerine Silisyum, Fosfor veya Sülfür atomları bulunabilir (Teegarden, 2014). Bu tür polimerler inorganik polimerlerdir ve kimyasal yapılarına göre polimerler organik ve inorganik polimerler olarak iki gruba ayrılmaktadır (Carraher, 2003; Peng ve diğ, 2020; Altıntaş, 2013). Yaşamın devamlılığı için gerekli biyolojik ve fizyolojik süreçlerde yer alan polimerler organik polimerlerdir. Proteinler, karbonhidratlar ve DNA örnek gösterilebilir. Barofan ve silikon ise inorganik polimer örnekleridir. Polimerin bileşiğinin kaynağına göre ise polimerler; doğal, sentetik ve yarı-sentetik olmak üzere üç sınıfa ayrılır (Misra, 2015; Gowariker ve diğ, 2005). Doğada hazır bir şekilde bulunabilen polimerler doğal polimerleri oluştururken insan eliyle üretilmiş polimerler yapay polimer olarak adlandırılır. Yarı-sentetik polimerler ise doğal polimerlerin modifiye edilmesi ve değiştirilmesi ile meydana gelir (Ebewele, 2000). Günlük yaşamda kullanılan polimerler çoğunlukla yapay polimerdir. Polietilen (PE), Poli(vinil klorür) (PVC), Polisitiren (PS), Polipropilen (PP) ve Poli(metil metakryilat) (PMMA)

sıkça karşılaşılan polimer çeşitlerindendir (Davis, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2014; Sharma, 2005; Gowariker ve diğ, 2005; Carraher,2003).

1.1.1 Polimer türleri

Polimerlerin baskın karakterde olan moleküler yapısı, yüksek sıcaklık ve ısı karşısında polimerin mekanik özelliklerini ve davranışını belirleyen etmendir. Endüstride kullanılan polimerlerin büyük bir kısmının sıcaklık ile etkileşim içerisinde bulunması nedeniyle polimerler yüksek sıcaklıktaki davranışlarına göre de sınıflara ayrılmışlardır. Bu sınıflar termoplastikler, termosetler ve elastomerlerden oluşmaktadır (Birley ve diğ, 1994; Gowariker ve diğ, 2005). Bu sınıflandırma Şekil 1.1'de gösterilmiştir.



Şekil 1.1 : Malzemelerin sınıflandırılması.

1.1.1.1 Termoplastikler

Termoplastikler, lineer ve esnek zincirli dallanmış bağlanma şekline sahip ve aralarındaki etkileşimi Van Der Waals kuvvetleri ile gerçekleştiren moleküllerden oluşan polimerlerdir. Amorf ya da kristal yapıda olabilen termoplastikler, sıcaklığın etkisi ile yumuşayabilir ya da sertleşebilir. Sıcaklığın arttırılması ile öncelikli olarak yumuşama gösteren termoplastikler, sıcaklık artışı devam ettiğinde ise sıvı forma dönüşür (Birley ve diğ, 1994). Sıcaklığın artışı moleküllerin hareketini hızlandırarak Van der Waals bağlarının zayıflamasına ve kopmasına neden olur. Böylece önce yumuşama ve sonra da sıvılaşma ortaya çıkar. Soğutma işlemi gerçekleştirildiği zaman

ise sertleşme özelliği gösterir. Isıtma ve soğutmanın yer aldığı süreç termoplastikler için tekrar edilebilir ve geri dönüşlüdür. Ancak çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılma işlemi devam ederse termoplastikler geri dönüşü olmayan bozulmaya maruz kalırlar. Termoplastiklerin üretilmeleri esnasında şekil verme işlemi de sıcaklık ile yumuşama özelliklerinden faydalanılarak gerçekleştirilir (Margolis, 2020). Termoplastiklere örnek olarak Polyethylen (PE), Polystiren (PS), Poly(vinyl cloride) (PVC) ve Poly(methyl metacrylate) (PMMA) gösterilebilir.(Gowariker ve diğ, 2005; Koltzenburg ve diğ, 2017).

1.1.1.2 Termosetler

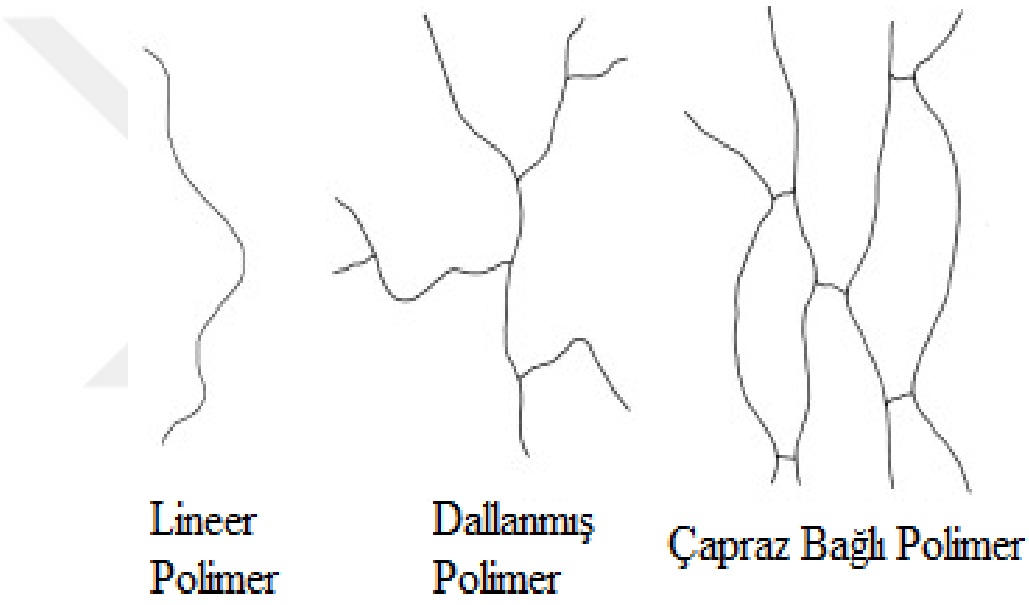
Termosetler, birbirlerine komşu olan moleküllerin çapraz bağlanması (cross-linked) ile oluşan ağ yapısına sahip polimerlerin yer aldığı sınıftır. Termoplasiklerin tam tersine, termosetler ısıtıldıkları takdirde yumuşama özelliği göstermezler. Moleküllerin sahip oldukları çapraz bağlanma şekli, sıcaklık arttırıldığı zaman molekül zincirlerinin birbirlerine kenetlenmelerine ve sabit bir şekilde kalmalarına neden olmaktadır. Böylece sıcaklık artsa bile moleküller hareket edemezler ve titreşemezler. Sıcaklık artışı devam ederek yüksek sıcaklıklara gelindiğinde bağlar zarar görür ve bozulma ortaya çıkar (Gowariker ve diğ, 2005). Termosetler üretilirken şekillendirme işleminde sertleşir ve ısıtılsa dahi yumuşama göstermezler. Termosetler çoğunlukla termoplastiklere göre daha sert yapıda ve daha dayanıklıdır. Sıcaklık toleransının olmadığı durumlarda sıkça kullanılırlar. Fenolik, bakalit ve epoksi termoset polimerlerindendir (Birley ve diğ, 1994).

1.1.1.3 Elastomerler

Elastomerler, termoplastikler ve termosetlere göre molekülleri arasında kuvvetlerin daha zayıf ve bağ enerjilerinin daha düşük olduğu polimer türüdür. Çapraz bağlanmış (cross-linked) moleküllerden oluşan elastomerlerin Elastisite (Young) Modulü düşüktür (Gowariker ve diğ, 2005; Shrivastava, 2018). Moleküller esnek zincirler oluştururlar ve böylece kuvvet uygulandığında uzama özelliği gösterirler. Uygulanan kuvvetin ortadan kalkması ile elastomerler eski hallerine geri dönerler. Elastomerler genellikle amorf bir yapı gösterirler. Darbelere karşı esneme, ilk haline geri dönebilme ve esneklik gibi özellikleri sayesinde elastomerler endüstride tercih edilen polimer türlerinden biridir. Kauçuk, en bilindik elastomer örneğidir (Koltzenburg ve diğ, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017).

1.1.2 Polimerlerin moleküler yapıları

Termoplastikler, termosetler ve elastomerlerde de görüldüğü gibi moleküllerin oluşturdukları farklı bağlanma şekilleri ve farklı zincir yapıları polimerin fiziksel özelliklerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır. Polimerler, moleküllerinin birbirlerine bağlanma şekillerine göre dört grupta incelenir. Lineer polimerler, dallanmış polimerler, çapraz bağlı polimerler ve ağ yapılı polimerler şeklinde polimerler sınıflandırılır (Şekil 1.2). Fakat polimerler genellikle yalnızca bir bağ şekline ya da bağ yapısına sahip değillerdir. Aynı polimer içerisinde biri baskın olmak üzere az miktarda da diğer polimer bağ yapılarından da bulunabilmektedir (Subramanian, 2017; Ebewele, 2000).



Şekil 1.2 : Lineer, dallanmış ve çapraz bağlı polimer yapıları.

1.1.2.1 Lineer polimerler

Monomerlerin uç uca ve tek sıra halinde eklenmesi ile oluşan molekül zincirlerinin bulunduğu polimer türü lineer polimerlerdir. Lineer polimerler içerisinde oluşan uzun zincirlerin aralarında yoğun Hidrojen bağları ve Van der Waals bağları bulunur ve bu zincirler esnektir. Doğrusal olarak yan yana sıralanan bu zincirlerin bağları sıcaklıkla birlikte zayıflar ve bu zayıflama lineer polimerlerin tekrar şekillendirilmelerinde yardımcı olur. Termoplastikler lineer polimer örneklerinden olup moleküllerin zincir özellikleri sayesinde tekrar kullanılabilme ve esneklik özellikleri kazanırlar (Subramanian, 2017; Ebewele, 2000; Daoud ve diğ, 2007; Shrivastava, 2018). Bu tez bünyesinde çalışılan PMMA da lineer polimer örneklerinden biridir.

1.1.2.2 Dallanmış polimerler

Lineer merkez zincire eklenmiş diğer zincirler ile şekil olarak bir gövdeden ve gövdeden çıkan dalları göstermesi nedeniyle bu tür polimerler dallanmış polimer ismini almışlardır. Merkez zincire eklenen ve "dal" olarak isimlendirilen diğer moleküller merkez zincirin bir parçası olarak kabul edilir. Genellikle polimerizasyon işlemi esnasında ortaya çıkan diğer reaksiyonların sonucunda oluşan bu dallar, polimerlerin yoğunluklarının azalmasına sebep olurlar. Bu durum tamamı lineer zincirlerden oluşan Yüksek Yoğunluklu Polietilen (High Density Polyethylen) (HDPE) ile kısa yan dalların bulunduğu dallanmış zincir yapısına sahip Düşük Yoğunluklu Polietilen (Low Density Polyethylen) (LDPE) arasında görülebilir (Subramanian, 2017; Ebewele, 2000; Daoud ve diğ, 2007; Shrivastava, 2018).

1.1.2.3 Çapraz bağlı polimerler

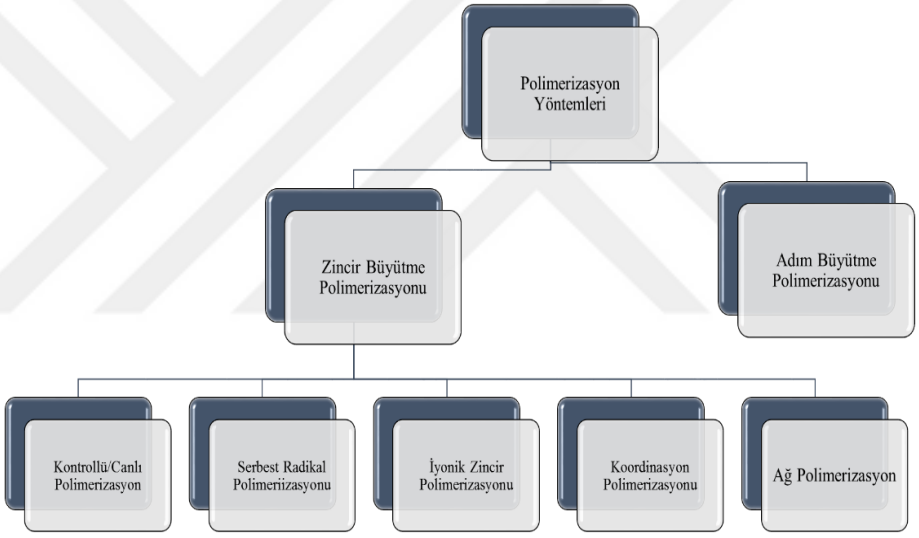
Birbirlerine komşu olan lineer zincirlerden birinin diğer zincire farklı yön ve şekilde bağlanması ile oluşan ve kovalent bağlara sahip olan polimer türü çapraz bağlanmış polimerlerdir. Çapraz bağlanmış polimerlerde ana zincir birden fazladır ve ana zincirler yan zincirler ile birbirine bağlanmaktadır. Çapraz bağlanmış zincirler polimerin sentez işlemi esnasında ortaya çıkar ve bağların kırılıp polimerin tekrar sentezlenmesi mümkün olmaz. Çapraz bağlanmış polimerler elde edilirken lineer zincirle kovalent bağ oluşturacak ilave atomlar ya da moleküller eklenir. Termoset polimerlerin temel zincir yapısını oluşturan çapraz bağlanma sıcaklık artışı ile daha sıkı bağların oluşmasına neden olarak termosetlerin yükselen sıcaklık karşısında sertliklerini korumalarını sağlar. Elastik özelliklerin artırılması amacıyla kurulması istenen çapraz bağlar, aynı zamanda elastomer polimerlerin molekülerinin bağlanma şeklidir (Ebewele, 2000; Shrivastava, 2018).

1.1.2.4 Ağ yapılı polimerler

Birden fazla fonksiyona sahip olan monomerlerin birbirinden bağımsız zincirler oluşturmak yerine çapraz bağlanmış molekül zincirleri gibi bir arada olan tüm zincirlerin ya da tüm moleküllerin katıldığı üç boyutlu bir yapıya sahip polimerler ağ yapılı polimerlerdir. Ağ yapılı polimerler ya üç boyutlu ağ oluşturacak üç ya da dört kovalent bağa ya da yüksek miktarda çapraz bağa sahiptir (Subramanian, 2017). Yüksek miktarda çapraz bağın bulunması ağ yapıları polimerlerin daha karmaşık zincirlere sahip olmalarına sebep olmaktadır.

1.2 Polimerizasyon Yöntemleri

Monomerlerin bir araya gelerek polimer yapılar oluşturması işlemine polimerizasyon adı verilmektedir. Polimerler sentezlenirken monomerler birbirlerine bağlanarak uzun zincirler oluştururlar (Shrivastava, 2018). Fakat polimerizasyon esnasında monomerlerin bağlanma şekli ve bağlanma yapıları farklı polimerizasyon tepkimeleri oluşmasına ve polimerlerin birbirlerinden farklı özellikler göstermelerine neden olur. Polimerizasyon yöntemleri temel olarak Adımlı Büyütme Polimerizasyonu (Step Growth Polymerization) ve Zincir Büyütme Polimerizasyonu (Chain Growth Polymerization) olarak iki sınıfa ayrılmaktadır (Davis, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2014; Subramanian, 2017; Misra, 2005). Polimerizasyon yöntemlerine ait bir şema Şekil 1.3'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 : Polimerizasyon yöntemleri.

1.2.1 Adımlı büyütme polimerizasyonu

Kondenzasyon (Condensation) Polimerizasyonu adı da verilen bu polimerizasyon yönteminde (İngilizce adı: Step Growth) iki veya daha fazla farklı monomerin katılması ile polimer oluşumu söz konusudur. Monomerler içerdikleri iki reaktif fonksiyonel grup sayesinde polimerizasyon tepkimesine girer ve bir tepkime başlatıcıya ihtiyaç duymadan sentezlenir (Gowariker ve diğ, 2005; Shrivastava, 2018). Merkez zincirlerinde ise karbonun yanında oksijen ya da azot gibi elementler de bulunmaktadır. Moleküllerin arasında gerçekleşen reaksiyon adım adım ilerler ve genellikle su ve amonia gibi küçük moleküllerin reaksiyon sonucunda yan ürün olarak çıktığı gözlemlenir (Carraher, 2003). Reaksiyona giren monomerler aynı olsa bile yine

de yan ürün oluştururlar. Reaksiyona giren monomerler birbirlerinden farklı olduğu zaman polimerizasyon sonucu ortaya çıkan polimer de monomerlerden farklı kimyasal özelliklere sahiptir. Fakat polimerin içerisinde birbirinin aynı olan zincirler hala bulunmaktadır ve lineer bağlı, çapraz bağlı ya da ağ yapılı polimerler ortaya çıkabilir (Ebewele, 2000). Monomerlerin kimyasal bileşiminden farklı fakat birbirleri ile aynı molekül zincirleri ortaya çıkarak birbirlerine bağlanırlar. Adımlı büyütme polimerizasyon yöntemi ile üretilen polimerlerden Polyester ve Poliamid endüstride sıkça karşılaşılmaktadır (Davis, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017; Subramanian, 2017; Misra, 2005; Teegarden, 2004).

1.2.2 Zincir büyütme polimerizasyonu

Eklemeli (Addition) Polimerizasyon (zincir reaksiyonu polimerizasyonu) olarak da bilenen Zincir Büyütme Polimerizasyonu (Chain Growth) yönteminde birbirleri ile aynı olan monomer lineer molekül zincirleri oluştururlar. Genellikle karbonları arasında çiftli bağ bulunan ve doymamış (Hidrojence eksik) monomerlerin sentezlenmesinde uygulanan bir yöntemdir (Beck ve Narain, 2020; Shrivastava, 2018). Polimerizasyon sonucu oluşan polimer tam olarak monomer birimlerinin bileşimi ve reaksiyona giren monomerlerin çoğaltılarak bir araya getirilmiş halidir. Zincir büyütme polimerizasyonunda oluşan polimerler merkezlerinde genellikle yalnızca karbon atomlarını içerirler. Reaksiyonun başlatılması için ise başlatıcı bir bileşene ihtiyaç duyulmaktadır. Zincir büyütme polimerizasyon yöntemi kendi içerisinde beş farklı sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar serbest radikal polimerizasyonu (free radical polymerization), iyonik polimerizasyon (ionic polymerization), koordinasyon polimerizasyonu (coordination polymerization), halka açma polimerizasyonu (ring opening polymerization) ve canlı/kontrollü polimerizasyon (living polymerization) yöntemleridir (Davis, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2014; Subramanian, 2017; Misra, 2005; Teegarden, 2004).

1.2.2.1 Serbest radikal zincir polimerizasyonu

Eşlenmemiş elektronu bulunan radikal grupların rol aldığı polimerizasyon yöntemi serbest radikal polimerizasyon yöntemidir. Serbest radikal polimerizasyon yöntemiyle bir araya gelen monomerlerde bulunan karbon atomları çift bağ oluştururlar. Polimer zincirlerinin oluşması için bir başlatıcı bileşen gerekmektedir. Başlatıcı olarak kullanılan serbest radikaller monomerleri birbirlerine hızlı ve devamlı olarak

ekleyerek uzun zincirler oluşmasını sağlarlar. Serbest radikal polimerizasyon tekniği diğer polimerizasyon tekniklerine göre üretim ve kontrol açılarından daha kolay ve daha güvenli bir polimerizasyon süreci sağlamaktadır. Polistiren (PS), poli(vinil klorit) (PVC), düşük yoğunluklu (low-density) poli etilen (LDPE) ve poli(metil metakrilat) (PMMA) serbest radikal zincir polimerizasyonu metodu ile üretilmektedir (Koltzenburg ve diğ, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017; Subramanian, 2017; Ebewele, 2000).

1.2.2.2 İyonik zincir polimerizasyonu

Polimerizasyon esnasında anyon ya da katyon durumunda bulunan radikal grupların yer aldığı polimerizasyon tekniği iyonik zincir polimerizasyon tekniğidir (Shrivastava, 2018). Polimer zincirlerinin oluşumunda merkez zincirde iyon halinde bulunan atom ya da moleküle bağlanan monomerler zincirin genişlemesine neden olurlar. Eğer merkezde aktif bulunan molekül anyon ise bu polimerizasyon işlemine anyonik, merkezde bulunan molekül katyon ise katyonik zincir polimerizasyon yöntemi denir (Koltzenburg ve diğ, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017; Subramanian, 2017; Ebewele, 2000; Carraher, 2003).

1.2.2.3 Koordinasyon polimerizasyonu

Koordinasyon polimerizasyonu yöntemi, bu yöntemi keşfeden bilim insanlarının adının da yer aldığı Ziegler-Natta katalist olarak da adlandırılır. Kordinasyon polimerizasyon yönteminde yapısında geçiş metallerinin bulunduğu monomerlerin yaptığı bağlar ile polimerizasyon süreci tamamlanır (Su, 2013). Özellikle titanyum ve alüminyumun elementlerinin sıkça kullanıldığı bu polimerizasyon yöntemi ile üretilen yüksek yoğunluklu poli etilen (HDPE) ve izotaktik poli propilen yaygın kullanım alanına sahip polimerlerdir (Koltzenburg ve diğ, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017; Subramanian, 2017; Ebewele, 2000; Carraher, 2003; Kuran, 2001).

1.2.2.4 Halka-Açma polimerizasyonu

Halka bağlanma şekline sahip monomerlerin bir araya gelmesi ile oluşan ve halka yapısından çizgisel yapıya dönüşerek zincirler oluşturan monomerlerden meydana gelen polimerler halka-açma (ring-opening) polimerizasyon yöntemi ile üretilir. Adımlı büyütme polimerizasyon yöntemi ile ortaya çıkan ürünler açısından benzerlik gösterse de zincir büyüme işlemlerinin de görülmesi nedeniyle zincir büyütme

polimerizasyonu metodu içerisinde yer alır (Koltzenburg ve diğ, 2014; Koltzenburg ve diğ, 2017; Subramanian, 2017; Ebewele, 2000; Carraher, 2003; Shrivastava, 2018).

1.2.2.5 Kontrollü/Canlı polimerizasyon

Kontrollü/Canlı polimerizasyon yöntemi, sentez reaksiyonunu devre dışı bırakacak herhangi bir etkinin ya da maddenin olmaması sebebiyle polimerizasyon işleminin durmaması sonucu ortaya çıkan ve polimerizasyonun istenilen anda kontrol edilmesine olanak veren yöntemdir. Zincir oluşumu başladıktan sonra molekül zincirleri eşit olarak büyüme gösterir ve monomer miktarı arttırıldıkça ya da yeni monomerler eklendikçe polimerizasyon işlemi devam eder. Polimerizasyonun devam etmesinin asıl sebebi zincir ucunun aktif merkezini sürekli koruması ve reaksiyona hazır olmasıdır. Bu nedenle bu polimerizasyon yöntemine canlı polimerizasyon adı verilir. Kontrollü polimerizasyon işleminde ise canlı polimerlerin sürekli büyüyen zincirlerini belirli bir noktada durdurmak ya da sonlandırmak amaçlanmaktadır (Davis, 2014; Teegarden, 2004).

1.3 Polimer Kompozitleri

Kompozit malzemeler, birden fazla farklı malzeme türünün bir araya getirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan farklı malzemelerin avantajlı yönlerini alır ve bu malzemelerden daha iyi özellikler gösteren yeni malzemeler haline gelirler (Callister ve Retwisch, 2014). Kompozitlerin çok uzun bir süredir insan yaşamına etkide bulunmalarına rağmen kompozit malzemelerin tanımlanması ve kullanım alanlarının artması son yüzyıl içerisinde gerçekleşmiştir. Günümüzde ise kompozit malzemeler, uçak ve uzay sanayisi, enerji sektörü, ulaşım teknolojileri ve otomobiller, tekstil, üretim endüstrisi, bilişim ve iletişim teknolojileri gibi alanlarda sıkça kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin ortaya çıkışı malzeme biliminde önemli bir dönüm noktası olmuş ve polimerlerin, seramiklerin ve metallerin belirli oranlarda ve belirli şartlarda bir araya getirilmesiyle yeni nesil malzemeler üretilmiştir. Sıra dışı özelliklere sahip, uç koşullarda ve birçok alanda aynı anda kullanılabilen malzemelerin ortaya çıkması sağlanmıştır. Özellikle enerji ve uzay teknolojileri kompozit malzemelerin gelişimiyle hem verimliliğin yükselmesi mümkün olmuş hem de bu teknolojilerdeki gelişim bir hayli hızlanmıştır (Mittal ve

diğ, 2016). Kompozit malzemeler temelde üç ana grupta incelenebilir. Bu gruplar, parçacık takviyeli, yapısal ve elyaf takviyeli şeklindedir.

Polimer kompozitleri ise polimer-metal ya da polimer-seramik şeklinde bulunabilen, polimer matris içerisine parçacık veya elyaf eklenmesi ya da direkt olarak polimer ile yapısal birleştirme yoluyla üretilen kompozitlerdir. Polimerlerin sahip olduğu özelliklere ek yeni özellikler eklenmesi amacıyla metal ya da yarı metallerin eklenmesi veya seramikler ile bir araya getirilmesi söz konusudur. Örneğin elyaf takviyeli polimerler, polimer matris içerisine cam ve karbon gibi elyafların eklenmesi ile oluşur. Dayanımı artırmak, hafiflik sağlamak, kolay ve düşük maliyetli üretim gerçekleştirmek gibi amaçlarla polimer elyaflar üretilir (Balakrishnan, 2016). Karbonfiber-reçine ve fiberglass endüstride sıkça kullanılan örneklerdir. Bu tezin konusu olarak üretilen örnekler polimer matrise sahip parçacık takviyeli bir polimer kompozittir (Bethi ve Sonawane, 2018; Hore ve diğ, 2019).

1.4 Bor Elementi ve Bor Bileşikleri

Bor elementi, periyodik tablonun 3A grubunda bulunan beş elektoruna sahip atom numarası beş olan bir yarı-metaldir. 10.81 akb atom ağırlığına sahip olan bor elementi B simgesi ile gösterilir ve doğada B-10 ve B-11 olmak üzere iki farklı izotop halinde bulunur. Doğada serbest halde bulunmadığı için karşımıza metal ve ametaller ile yaptığı bileşikler şeklinde çıkan Bor elementi bileşik oluştururken bazen metal bazen de ametal özellikler gösterebilir. Yarı-iletken özellikleri taşıması ile birlikte kristal halinde iken görünüm elmas kristaline benzer ve sertliği elmasın sertliğine yakındır (Woods, 1994). Isı dayanımı ve kaynama noktası yüksek olan bor aynı zamanda yüksek elastik modüle de sahiptir. Bu da rijitliğinin ve esnemeye karşı direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Çizelge 1.1 Bor elementinin özelliklerini göstermektedir.

Borun sahip olduğu özellikler sayesinde Bor içeren bileşiklerin kullanım alanları oldukça geniştir. Bor Hidrürler enerji alanında yakıt ve hidrojen depolayıcı olarak kullanılırken uzay ve havacılık çalışmalarında da kaplama ve yakıt olarak kullanılmaktadır (Ojha ve Karmakar, 2018; Kaya ve diğ, 2017). Aynı zamanda bor bileşikleri yakma geciktirme, korozyona karşı koruma, temizleme ve beyazlatma, yapışkanlık artırma ve nötron zırhlama gibi işlemlerde yer almaktadır. Bor elementinin oluşturduğu bileşiklerin bir kısmı doğada hazır halde bulunan ve madenler aracılığı ile

çıkarılarak işlenen bor minerallerinden oluşmaktadır. Bu mineraller Bor elementinin Kalsiyum, Sodyum, Magnezyum, Silisyum, Klor ve Oksijen gibi elementler ile bir araya gelmesi sonucu oluşan ve yapılarında su molekülleri bulunduran bileşiklerden meydana gelir.

Çizelge 1.1 : Bor elementinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Bor Elementi Özellikleri	Element Özellikleri
Atom Çapı	1,17 Å
Proton Sayısı	5
Nötron Sayısı	6
Atom Numarası	5
Elektron Sayısı	5
Elektron Dizilimi	$1s^2/2s^2/2p^1$
Atom Hacmi	4,6 cm^3/mol
Kristalik Yapı	Rombohedral
Atom Ağırlığı	10,811 akb
Kaynama Noktası	4000 °C
Yoğunluk	2,34 g/cm^3
Erime Noktası	2300 °C

Endüstrinin birçok alanında kullanıma sahip olan bor mineralleri, kozmetik, uzay ve havacılık, enerji, nükleer uygulamalar, tarım, savunma sanayi, cam ve seramik üretimi gibi alanlarda kullanılmaktadır (Sayan ve diğ, 2010).

Çizelge 1.2 Bor mineralleri ve kimyasal formülleri.

Bor Minerali	Kimyasal Formül
Kernit	$Na_2B_4O_7.4H_2O$
Tinkalkonit	$Na_2B_4O_7.5H_2O$
Tinkal	$Na_2B_4O_7.10H_2O$
Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$
Hidroborasit	$CaMgB_6O_{11}.6H_2O$
Borasit	$Mg_3O_7B_{13}Cl$

Endüstride bolca yer alan Bor minerallerine Tinkal (Boraks Dekahidrat) ($Na_2B_4O_7.10H_2O$), Kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) ve Üleksit ($NaCaB_5O_9.8H_2O$) örnek olarak gösterilebilir (Çizelge 1.2).Özellikle malzeme bilimleri açısından büyük önem taşıyan kompozit malzemelerin kullanım alanının artması ile bor minerallerinin polimer matrisler içerisine ilave edilmesi düşünülmüş ve bor içeren polimer kompozitlerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu tezde PMMA polimerine Tinkal (Boraks Dekahidrat) takviyesi yapılarak bor minerali ile polimer bir araya getirilerek polimer kompozit oluşturulmuştur (Sayan ve diğ, 2010).

2. LİTERATÜR TARAMASI VE GENEL BİLGİLER

2.1 Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu

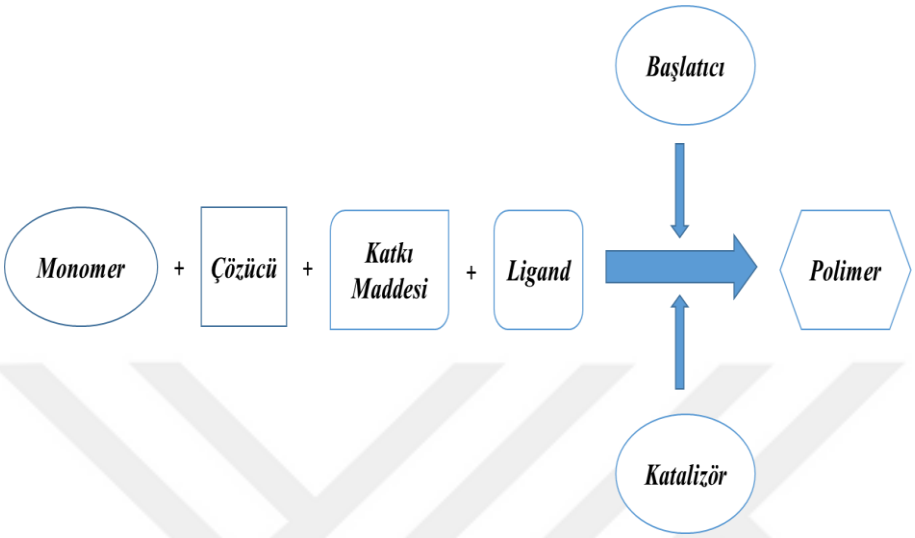
Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP) yöntemi, zincir büyütme polimerizasyonu yöntemlerinden biri olan canlı polimerizasyon türlerinden biridir. Halojen grupları içeren radikallerin geçiş metali olan katalizörler ile aralarındaki elektron alışverişi ile polimerizasyon işlemi gerçekleşmektedir. Monomerler içerisindeki Halojen gruplarına hareketsiz türler eşlik etmektedir. Diğer polimerizasyon işlemlerine göre daha kolay ve daha kontrollü polimerizasyon işlemi sağlamaktadır. Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu (ATRP) iyi tanımlanmış polimerlerin oluşmasını sağlamaktadır. ATRP'nin fonksiyonel grupları çoğu zaman iyonik polimerizasyon yönteminden daha yüksek adapte olma özelliğine sahiptir. ATRP yönteminde polimerizasyon işleminin kontrolü düşük bir radikal miktarının korunması ile gerçekleşir. Polimer zincirinin reaksiyon boyunca aktif ya da deaktif olmasını bir geçiş metali sağlar. PMMA/Boraks örnekleri ATRP yöntemi kullanılarak üretilmiştir (Saldivar-Guerra ve Vivaldo-Lima, 2013; Braun ve diğ, 2013).

2.1.1 Atom Transfer Radikal Polimerizasyonu ile Sentez

ATRP metodu ile polimer sentezleyebilmek için bir takım bileşenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bileşenler monomer, katalizör, başlatıcı, ligand, çözücü, sıcaklık ve zamandır. Polimer zincirlerinin oluşumu için öncelikle monomerlere ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2.1). ATRP yöntemiyle polimer üretebilmek için karbonlu radikaller ile birlikte fenil ya da karbonil gibi dengeleyici özelliğe sahip grupların bulunduğu monomerler gerekmektedir. Akrilatlar ve akrilamidler ATRP sentezine uygundurlar (Gül ve Baydoğan, 2020). Bu tezde üretilen malzemelerin monomeri olarak Metil Metakrilat (MMA) kullanılmıştır.

Katalizör, bir reaksiyonun başlaması ya da devamlılığı için gerekli olan enerji miktarının azalmasına yardımcı olan bileşendir. ATRP yöntemiyle sentezlenen polimerlerde de polimerizasyonun sürekliliği ve zincir oluşumunun devamlılığı için

katalizörler kullanılmaktadır. Bu yöntemde geçiş metalleri katalizör olarak görev alırken Ti, Fe, Ru, Co, Pd, Ni ve Cu polimerizasyonda karşılaşılan bileşenlerdir. Özellikle Cu, ATRP yönteminde en çok kullanılan katalizör türüdür (Braun ve diğ, 2013; Beck ve Narain, 2020).



Şekil 2.1 : ATRP yöntemi ile polimerizasyon aşamalarını şematik gösterimi.

Doğada bazı reaksiyonlar kendiliğinden ve dış bir etkiye gerek duymadan gerçekleşirken bazı tepkimeler ise bir başlatıcıya ihtiyaç duymaktadırlar. Başlatıcı molekül ya da bileşen reaksiyonun gerçekleşmesi için ilk emri veren yapıdır. Bu sebeple başlatıcı miktarı ne kadar fazla ise reaksiyon o kadar çok gerçekleşir. ATRP yöntemi de başlatıcı etkiye ihtiyaç duyan polimerizasyon yöntemlerindendir. Reaksiyon sürecinde oluşan ve büyüyen polimer zincirlerinin sayısı başlatıcı miktarına bağlı olarak değişir. Bununla birlikte başlatıcı miktarından sonra azalan önemle reaksiyon sırasında monomerden ayrılan grubun yapısı, dengeleyici radikallerin türü ve ortam koşulları (sıcaklık, basınç ve asitlik – bazlık seviyesi) başlatıcının aktif olma hızını etkilemektedir (Braun ve diğ, 2013; Beck ve Narain, 2020).

Polimerizasyon işleminde katalizörü destekleyen ve denetleyen bir bileşen olarak ligand bulunmaktadır. Katalizörün çözünürlüğünün, kararlılığının ve aktifliğinin ayarlanması ligand yardımıyla mümkün olur.

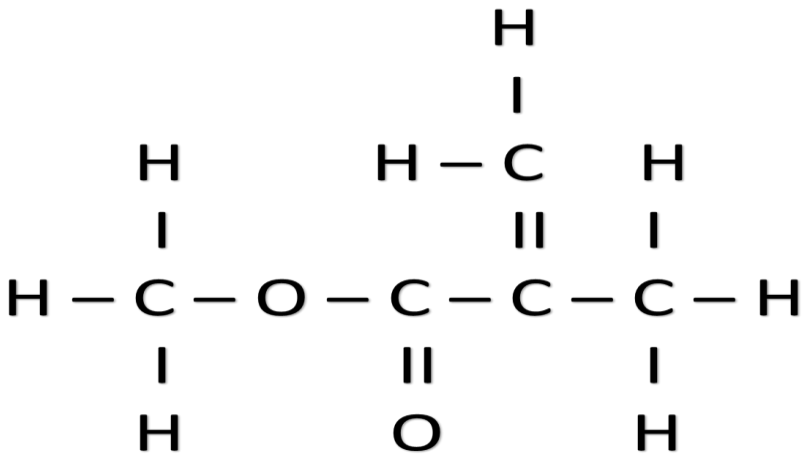
Reaksiyonun hızını arttırmak ve daha çok monomeri reaksiyona sokmak için solvent ATRP yöntemi ile üretilen polimerlerde kullanılır. Solvent katalizörün karışma etkisini artırarak polimer sentezinin ve zincir oluşumunun daha kolay bir şekilde gerçekleşmesini sağlar. Bir polimerizasyon için solventin özellikleri, katalizörü

zehirlememek, polimer reaksiyonunu olumsuz etkileyecek etkilerde bulunmamak ve zincir transferine karşı etkisiz ve inert olmaktır (Braun ve diğ, 2013; Beck ve Narain, 2020).

Reaksiyonun tam verimle gerçekleşmesi ve polimerleşmenin maksimum düzeyde olması için reaksiyon sıcaklığı en uygun seviyede olmalı ve polimerleşme sürecinin süresine dikkat edilmelidir. Sıcaklık polimerizasyon işleminde bağların doğru bir şekilde oluşması ve monomerlerin istenilen şekilde bir araya gelmesi için çok önemlidir (Braun ve diğ, 2013; Beck ve Narain, 2020).

2.2 Poli(metil metakrilat)

Poli(metil metakrilat) (PMMA), metil metakrilat monomerinin polimerizasyonu ile sentezlenen termoplastik bir polimerdir (Shrivastava, 2018). İyi mekanik özelliklere sahip, kuvvet altında yüksek dayanımlı, ısıya karşı dirençli ve sürtünmeye karşı kolay aşınmayan ve zarar görmeyen özelliklere sahiptir. Camın sahip olduğu geçirgenlik değerine yakın değerler gösteren PMMA camsı akrilatlardan biridir (Pawar, 2016). Mor ötesi ışınlara ve hava koşullarına karşı dayanıklı olduğu yapılan çalışmalar ile tespit edilmiştir. Uzun süre sağlamlığını koruyup hizmet vermesi sebebiyle endüstrinin birçok alanında sıkça kullanılmaktadır (Sundararajan, 2007). Yüksek yüzey sertliğine sahip olmasının yanında bir termoplastik olması sebebiyle de ısı uygulandığında kolayca şekillendirilebilir. $(C_5H_8O_2)_n$ şeklinde formüle edilen PMMA'nın erime sıcaklığı 160 °C ve kaynama sıcaklığı 200 °C şeklindedir (Wypych, 2016).



Şekil 2.2 : MMA polimerinin moleküler yapısı (Gül ve Baydoğan,2020).

PMMA ve modifiye edilmiş hallerinin kullanım alanları çok geniş olmakla beraber, gıda sanayinde, darbe emiciliği gerektiren sanayi uygulamalarında, sağlık alanında, otomobil ve uçak camlarında, radyasyon zırh malzemesi olarak nükleer işlemlerde kullanılmaktadır (Ali ve diğ, 2015; Kalakonda ve Banne, 2017; Pawar, 2016; Ura ve diğ, 2019). MMA'nın molekürler yapısına ait bir gösterim Şekil 2.2'de bulunmaktadır.

2.2.1 Mekanik özellikler

PMMA, mekanik özellikler bakımından dayanıklı fakat kırılgan bir polimerdir. Yüksek Young (Elastisite) Modülüne sahiptir ve bu da PMMA'nın esnemeye karşı yüksek direnci sahip olduğunu göstermektedir (Ali ve diğ, 2015, Kaddouri ve diğ, 2020). Yoğunluğunun suyun yoğunluğuna yakın bir değerde olması PMMA'nın kaplama olarak ya da zırh malzemesi olarak kullanılması esnasında hafiflik sağlamaktadır. PMMA'ya ait mekanik özelliklerin değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : PMMA'nın mekanik özellikleri (Wypych, 2016).

Mekanik Özellikler	Değerler
Young Modülü	2855 MPa
Poisson Oranı	0.35 – 0.4
Basma Dayanımı	117.5 MPa
Gerilme Dayanımı	75 MPa
Eğilme Dayanımı	110 MPa
Uzama Miktarı	% 4.5
Sertlik	90 Rockwell
Yoğunluk	1185 kg/m3

2.2.2 Radyasyon zırhlama özellikleri

Ultra-Viyole (Mor ötesi) ışınlara karşı koruma özelliği bulunan PMMA, UV-B ve UV-C ışınlarına maruz kaldığında mekanik ve optik özelliklerinde ufak bir miktar değişiklik gözlenir. Beta ve alfa parçacıklarına karşı zırhlama özelliği olmasına karşın X-ışınlarına maruz kaldığında PMMA'nın molekül zincirlerinde değişiklikler olmaya başlar ve yapısal özellikleri bozulmaya başlar (Beetz ve Jacobsen, 2002). X-ışınlarının PMMA'nın içyapısında değişiklikler meydana getirmesinin bir sebebi de PMMA'nın serbest radikal polimerizasyon yöntemi ile (ATRP yöntemi de bir serbest radikal polimerizasyon yöntemidir) sentezlenmesinden dolayıdır. Nötron parçacıklarına ve gama ışınlarına karşı düşük dayanıma sahiptir. PMMA'nın radyasyon zırhlaması olarak kullanılması amacıyla PMMA'ya farklı türde katkı maddeleri eklenmekte ve polimer kompozitler üretilmektedir. Bu katkı maddeleri arasında Karbon Nanotüpler

ve Grafen Nanoplateler gibi nanomalzemeler, Neodimiyum oksit, grafen oksit ve ZnO sayılabilir (Cao ve diğ, 2020, Che ve diğ, 2014).

2.2.3 Optik özellikler

Optik geçirgenliği yüksek bir polimer olan PMMA görünür ışık (400-780 nm) dalgalarına karşı yaklaşık olarak % 92 – 93 oranında geçirgenlik göstermektedir. PMMA cama yakın optik özellikler göstermekte ve camsı akrilat olarak adlandırılmaktadır. 380 – 400 nm aralığındaki görünür ışıkta ve yakın kızılötesi (near infrared) ışıkta ise ışınların artan dalga boyu nedeniyle geçirgenlik bir miktar azalmaktadır. Yüksek ışık geçirgenliği, hafifliği ve mekanik avantajları nedeniyle PMMA, cama alternatif olarak bazı kullanım alanlarına sahiptir (Afaf ve diğ, 2020).

2.2.4 Isıl özellikler

PMMA, artan sıcaklık ile birlikte yumuşama özelliği gösteren bir termoplastiktir. 95 – 100 °C aralığında deformasyona uğrarken, camsı geçiş sıcaklık değeri 110 °C civarındadır (Plazek ve Ngai, 2007). Düşük ısı iletkenliğine sahip olan PMMA diğer polimerler türlerine göre ise ortalama bir ısı iletkenliğine sahiptir (Sundararajan, 2007; Yang, 2007). Polimerlerin korozyon direnci, düşük maliyet ve kolay üretim gibi avantajlı özelliklerinin yanında ısıl iletkenliği özelliğinin de yükseltilmesi için katkı ve dolgu maddeleri kullanılmaktadır. Maksimum çalışma sıcaklığı 90 °C'dir ve bu sıcaklıktan daha yüksek sıcaklıklarda işlevini kaybetmeye başlamaktadır (Ali ve diğ, 2015). PMMA'nın termal özellikler Çizelge 2.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2 : PMMA'nın ısıl özellikleri (Ali ve diğ, 2015).

Isıl Özellikler	Değerler
Özgül Isı	1,5 J/g°C
En Yüksek Çalışma Sıcaklığı	90 °C
En Düşük Çalışma Sıcaklığı	40 °C
Camsı Geçiş Sıcaklığı	110 °C
Isıl İletkenlik	0,17 - 0,19 $W/m^{-1}K^{-1}$

2.2.5 Manyetik özellikler

PMMA, ATRP yöntemi ile polimerleşmesi esnasında kullanılan başlatıcı (initiator) ve liganddan Bakır, Brom ve Azot atomları alarak yapısına katar ve bu elementlerin sahip olduğu diamanyetik özellikler kendilerini PMMA içerisinde de gösterir. Aynı zamanda PMMA içerisinde bulunan çiftlenmemiş (unpair) elektrona sahip Oksijen

atomları aracılığıyla paramanyetik özellikler kazanır. Fakat diamanyetiklik paramanyetikliğe bir hayli baskındır ve PMMA dışsal bir manyetik alana maruz kaldığında diamanyetik özellikler gösterecektir. Dışsal manyetik alana ters yönde mıknatıslanmasına rağmen PMMA'nın manyetik alanı ve kuvveti oldukça düşüktür (Bel ve diğ, 2018).

2.2.6 Elektriksel özellikler

PMMA, endüstride yalıtkan özellikleri ile ön plana çıkar ve yüksek dielektrik sabiti değerine sahiptir. Aynı zamanda yüksek yüzey ve hacim direnci özellikleri vardır. PMMA'ya ait elektriksel ve manyetik özellikler Çizelge 2.3'te gösterilmiştir. PMMA'nın elektriksel iletkenliğinin artırılması için PMMA'ya katkı malzemeleri eklenerek polimer kompozitler oluşturulmaktadır. Yüksek iletkenlik veya süper-iletkenlik özelliklerine sahip bu katkı malzemeleri arasında grafen nanoplateler (GNP), karbon nanotüpler (CNT), titanyum dioksit (TiO_2) nanoküreler ve gümüş (Ag) nanoparçacıklar gösterilebilir (Che ve diğ, 2014; Kalakonda ve Banne, 2017). Ayrıca yine karbon temelli olarak günümüzde sıkça kullanılan ve bulunması kolay olan grafit tabanlı nanoyapılar iletkenlik değerlerinin arttırılması için tercih edilmektedir (Chen ve diğ, 2003). Özellikle kimyasal sensörlerin üretimi için de PMMA/CNT polimer nanokompozitleri üzerine çalışmalar devam etmektedir. Çizelge 2.3 PMMA'nın elektriksel ve manyetik özellikleri ile ilgili bilgiler içermektedir.

Çizelge 2.3 : PMMA'nın elektriksel ve manyetik özellikleri (Url-1).

Elektriksel ve Manyetik Özellikler	
Yüzey Direnci	10^{16} Ω
Hacimsel Direnç	2-14 x 10^{13} Ωm
Dielektrik Sabiti (4 kV/s)	3,7
Dielektrik Sabiti (1 MHz)	2,6
Dielektrik Gücü (60 Hz)	20 MV/m
Dielektrik Gücü	15

2.3 Elektromanyetik Teori

Eski çağlardan beri elektrik oluşumu ve mıknatıslanma rast gelinen olgulardı fakat bu olgulara tam olarak açıklama getirilememiştir. 18. Yüzyıla gelindiğinde insanlar elektriği kontrol etmeye ve yapay manyetik alanlar oluşturmaya başladılar. Orsted'in elektrik akımı ile pusula iğnesini mıknatıslandırarak saptırması ve Ampere'in yüklerin

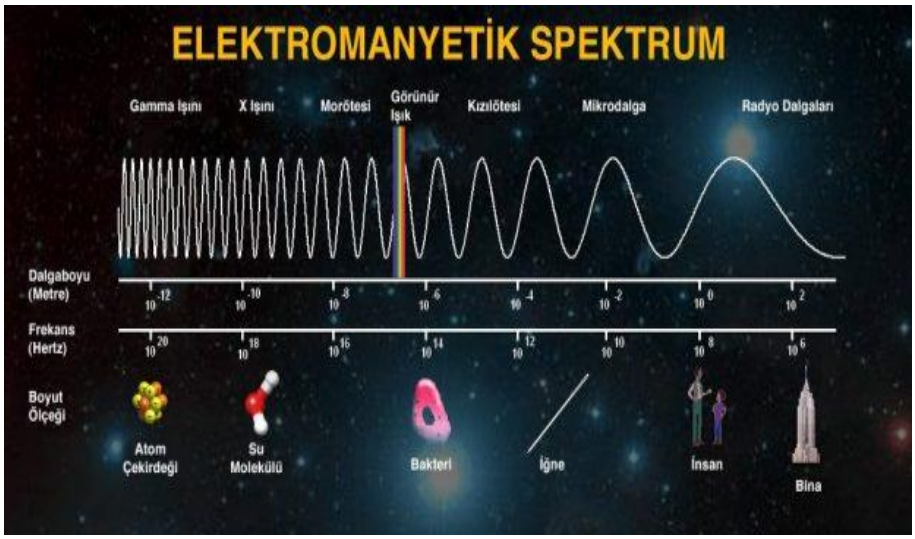
hareketini manyetik olaylarla ile ilişkilendirmesi elektriğin ve manyetizmanın benzer şeyler olabileceği üzerinde düşünceler ortaya çıkmasına neden oldu. Daha sonra Faraday'ın hareketli mıknatıs yardımı ile elektrik akımları üretmesi ve Maxwell ile Lorentz'in çalışmaları elektriği ve manyetizmayı bir araya getirerek elektromanyetizmanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Elektrik alanın ve manyetik alanın birbirine dönüşebildiği ve birbirlerinin aynadaki görüntüleri gibi oldukları tespit edilmiştir (Collin, 1992; Gürdal, 2017).

Elektron'un öncelikle kütlesi tespit edilmiş ve bir parçacık olduğu düşünülmüştür fakat elektronların hareketlerindeki değişimler elektrik alanda ve manyetik alanda değişiklikler ortaya çıkmasına ve elektromanyetik dalgalar oluşmasına neden olmuştu. Young'ın ışık için yapmış olduğu çift yarık deneyini elektronlar için modifiye eden Clauss Jönsson, elektronların da aynı ışık gibi dalga özelliği gösterdiğini ortaya çıkarmıştır. Böylelikle hem elektronlar için hem de ışık için dalga-parçacık ikiliği bulunduğu tespit edilmiştir. Elektronların hareketi sonrasında değişen alanların sebep olduğu dalgalar elektromanyetik dalgalar olarak adlandırılır. Elektromanyetik dalgalar farklı enerji miktarına, frekansa ve dalga boyuna sahip olan ışınımlardan oluşurlar. Bu ışınımlardan biri de ışıktır. Işık, insan gözünün algılayabileceği dalga boyu aralığında (380-720 nm) dalga boyuna sahip ışınımlara verilen addır. Elektromanyetik dalgaların frekans ve dalga boylarına göre farklı gruplara ayrıldığı gösterim şekline elektromanyetik spektrum denilmektedir (Collin, 1992; Gürdal, 2017; Zohuri, 2020).

2.3.1 Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik dalgaların sahip oldukları özelliklere göre sınıflandırıldığı ve frekans değerlerine göre adlandırıldığı şema elektromanyetik spektrumdur (Şekil 2.3). Elektromanyetik spektrum farklı ışınımlardan oluşmaktadır ve ışınım ise elektromanyetik dalgaların veya parçacıkların bir madde ya da ortamdan yayınlanmasıdır.

Işınımlar uzayda ya da vakum ortamında ışık hızıyla hareket eden enerji taşıyıcılarıdır ve kütlesizlerdir. Fakat ortam değiştiğinde (daha çok yoğun ya da daha az yoğun) hızları ve enerjileri değişebilir. Elektrik ve manyetik alanın değişimleri neticesinde ışınımlar oluşurlar (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 3; Collin, 1992; Sebastian, 2008, Bölüm 1; Herter, 1985; Zohuri 2020).



Şekil 2.3 : Elektromanyetik spektrum ve ışın türleri (Url-2).

2.3.2 Elektromanyetik dalgalar

Elektromanyetik spektrum, elektromanyetik dalgaların birbirlerinden ayrı olarak incelenmesinde yol gösterir. Elektromanyetik dalgalar, frekansı en az olandan en çok olana doğru sırasıyla radyo dalgaları, mikro dalgalar, infrared (kızıl ötesi), görünür ışık, ultraviyolet (mor ötesi), X-ışınları ve Gama ışınlarından oluşmaktadır. Tüm bu dalgaların bir araya gelmesi elektromanyetik spektrumu oluşturur. Elektromanyetik dalgalar iyonize radyasyon ve iyonize olmayan (non-iyonize) radyasyon olarak da iki grupta incelenebilir. İyonize radyasyon, gama ışınları, x-ışınları ve ultraviyolet ışınlardan oluşurken non-iyonize radyasyon, görünür ışık, infrared, mikrodalgalar ve radyo dalgalarından oluşmaktadır. İyonize radyasyon, uygulandığı madde, cisim ya da yapıdan elektron koparark o yapıyı iyon haline getiren ışımadır (Collin, 1992; Sebastian, 2008, Bölüm 1; Herter; 1985).

2.3.2.1 Gama ışınları

Gamma ışınları en yüksek frekans değerine ve en düşük dalga boyu değerine sahip ışınlardır. Enerjisi en yüksek ışınlar olan gamma ışınları iyonize radyasyon türlerinden biridir ve bir cisme uygulandığı takdirde etkisini en fazla gösteren ışın türüdür. Nükleer tepkimeler sonrasında ortaya çıkan bu ışın güneş patlamalarında, astronomik çarpışmalarda ve nükleer santrallerde ortaya çıkabilmektedir. Radyoaktif izotoplardan olan Co-60 ve Cs-137 gama ışıması yapan bazı örneklerdir. Gama ışınları sağlık alanında ve malzeme biliminde kusur tespiti için kullanılmaktadır. Gama ışınlarına maruz kalan cismin hemen hemen her molekülü gama ışınlarından etkilenir ve

elektronlarını kaybeder. Gamma ışınlarından korunma için ise kalın beton duvarlar ya da kalın çelik ve kurşun yapılar kullanılmaktadır.

2.3.2.2 X-ışınları

Gama ışınlarının ardından ikinci sırada en yüksek enerjiye ve frekansa sahip X-ışınları bulunmaktadır. Wilhelm Röntgen tarafından keşfedilen ve tanımlanamadığı için X adı verilen bu ışınlar iyonize radyasyon türlerinden biridir. X-ışınları, nükleer tepkimelerde elde edilebileceği gibi aynı zamanda hızlı hareket eden elektronlara bağlı olarak da elde edilebilir. X-ışınlarının elektronlar ile elde edilmesinde iki yöntem bulunmaktadır. Birinci yöntem bir elektronun bir atoma bombardıman edilmesi sonucunda fırlatılan elektronun atoma ait elektronlardan biri ile çarpışması ve o elektronun yörüngesini ya da enerji düzeyini değiştirmesidir. Atomdan kopamayarak daha yüksek enerji seviyesine çıkan elektron eski ve daha düşük enerji seviyesine dönmek ister ve bu dönüş esnasında fazla enerjisini X-ışını olarak yayınlar. Bu durum karakteristik X-ışını oluşmasına sebep olur. Bir diğer yöntem ise bombardıman edilen elektronun başka bir elektron ile etkileşmeyerek atomun içerisinden geçmesi ve bu geçiş esnasında enerjisini kaybetmesi ile oluşur. Atom içerisinden geçerken yavaşlayan ve enerjisi azalan elektron, bu enerji farkını x-ışını olarak öder ve x-ışını yayınlar. Bu X-ışınına ise Almanca dilinde frenleme ışıması anlamına gelen Bremsstrahlung adı verilmektedir. X-ışınları elementlerin tespitinde kullanıldığı gibi, malzeme kusurlarının belirlenmesinde ve sağlık alanında kırıkların tespitinde de kullanılır. Gök cisimlerinde gerçekleşen reaksiyonlar sonucunda da oluşabilen X-ışınları gama ışınları ile beraber kozmik ışınların bir kısmını oluştururlar.

2.3.2.3 Mor ötesi ışınlar

Mor ötesi ışınlar, iyonize radyasyon türlerinden biri olup iyonize radyasyon grubunun en az enerjiye sahip olanıdır. Yıldızlardan yayınlanan elektromanyetik spektrumun özel bir bölümü olan ultraviyole (mor ötesi) ışınlar, Dünya atmosferine doğal yollar ile giriş yapan tek iyonize radyasyondur. Görünür ışık aralığından daha yüksek frekans ve enerjiye, daha kısa da dalga boyuna sahiptir. Gamma ve X-ışınlarının yeryüzüne ulaşmasına dünya atmosferinin katmanları izin vermezken, ultraviyole ışının UV-A, UV-B ve UV-C olarak adlandırılan üç alt dalga boyu/frekans aralığı yeryüzüne ulaşabilir. UVC 200 – 290 nm dalga boyu aralığında bulunarak aralarında en yüksek enerjiye değerine sahiptir. Tamamına yakını Stratosferde soğurulmasına rağmen

nadiren de olsa yüzeye ulaşma ihtimali vardır. 290 – 320 nm dalga boyu aralığında bulunan UVB ise özellikle uzun süreli maruz kalma sonrasında cilt kanseri riski oluşturması bakımından önemlidir. Aynı zamanda insan vücudu için gerekli D vitamini sentezinde de rol oynamaktadır. Aralarında en az enerjiye sahip ve 320 – 400 nm dalga boyu aralığında bulunan UVA ise insan cildinin ten renginin değişimde deri hücrelerine yapmış olduğu etkiyle bilinir. UV ışınları özellikle güneş enerjisi teknolojileri için son derece önemlidir (Mairinger, 2004).

2.3.2.4 Görünür ışık

Görünür ışık, insan gözünün algılayabileceği ve işlem yapabileceği bir aralık olan 380 – 760 nm dalga boyu aralığındaki elektromanyetik dalgalardır. Mor ışık başta olmak üzere barındırdığı enerji azalarak kırmızı ışığa kadar devam etmektedir. Elektromanyetik spektrumun nispeten dar bir aralığını oluşturmaktadır ve iyonize etmeyen ışın türlerinden biridir (Mairinger, 2004).

2.3.2.5 Kızılötesi ışınlar

Görünür ışıktan daha az frekans ve enerjiye sahip olan infrared (kızılötesi) ışınlar, 0.7 – 300 mikrometre (μm) aralığındaki dalga boylarına sahiptir. Infrared ışınlar etki ettikleri malzeme ya da yapıdan elektron koparamazken elektronların titreşim enerjilerini arttırırlar böylece molekülün ya da cismin ısısını ve sıcaklığını arttırırlar. Bu durumun tersi de mümkündür. Infrared ışınlar sıcaklığa sahip olan her cisimden yayınlanırlar. Infrared ışınlar çoğunlukla yakın ve uzak infrared olarak sınıflandırılır ve bunlar arasında kısa dalga boylu, orta dalga boylu ve uzun dalga boylu infrared ışınları bulunmaktadır. Infrared ışınlar sıcaklık farklarının belirlenebildiği birçok teknolojide kullanılmaktadır. Hedef tespit sistemleri, ısı güdüm sistemleri ve takip sistemleri gibi sistemler ile askeri uygulamalarda, termal görüntü alma ve termal analiz işlemleri ile sağlık sektöründe, hava durumu tahmini için meteorolojide, kablosuz iletişimde ve teleskopların görüntü alabilmesi yoluyla astronomide kullanılmaktadır (Mairinger, 2004).

2.3.2.6 Mikrodalgalar

Mikrodalgalar, radyo dalgalarının belirli bir kısmını oluşturan ve 300 MHz ile 40 GHz frekans aralığında titreşime sahip olan dalgalardır. 1 mm ile 1 m aralığında dalga boylarına sahip olabilen mikro dalgalar uygulandıkları maddenin atomlarının ya da

moleküllerinin titreşmelerine neden olarak sıcaklıklarının artmasını sağlarlar (Pastorini, 2010). Mikrodalgalar iyonize etmeyen ışın türlerindendir ve radyo dalgalarının yüksek frekanslı ucunda bulunurlar (Chauhan, 2008; Munir, 2015). Günümüzde teknolojinin birçok alanında bulunan mikrodalgalar özellikle iletişim sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Aktarım esnasında uzun mesafeler boyunca çok fazla etkileşime girmeyen mikrodalgalar GPS sistemlerinde, uydu iletişimlerinde, meteorolojik olayların tahmininde, mobil ve elektronik cihazların iletişiminde kullanılır. Uzaktan algılama sistemlerinde, Radar ve LİDAR gibi teknolojilerde kendine yer bulan mikrodalgalar aynı zamanda Wi-Fi, WLAN, Bluetooth gibi internet ve dosya paylaşım uygulamalarında da bulunmaktadır (Kumari ve Choudhury, 2020). Sahip oldukları enerji ile atomların titreşimlerini ve hareketlerini artırmaları nedeniyle sıcaklığın yükseltilmesinin istendiği bir takım uygulamalarda da mikrodalgalar kullanılır. İsmini bu uygulamadan alan mikrodalga fırınları buna örnek olarak gösterilebilir (Meek, 1992). Mikrodalgalar frekans değerlerine göre sekiz farklı bant aralığında incelenmektedir (Collin, 1992). Bu bantlar Ka, K, Ku, X, C, S, L ve P bantları olmak üzere frekansı en yüksekten en düşüğe doğru sıralanmaktadır (Çizelge 2.4) (Herter, 1985).

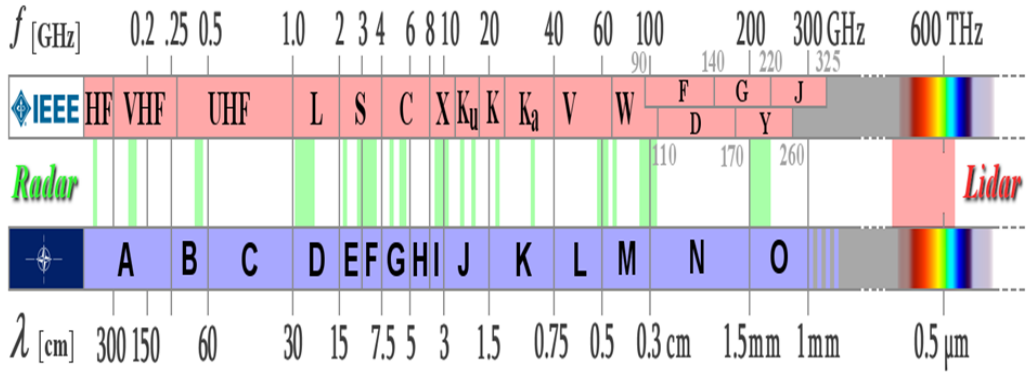
Çizelge 2.4 : Mikrodalgaların frekans aralıkları ve bant adlandırmaları (Collin, 1992).

Frekans	Bant
0,5 - 1 GHz	VHF
1 - 2 GHz	L
2 - 4 GHz	S
4 - 6 GHz	G
6 - 8 GHz	C
8 - 12,4 GHz	X
12,4 - 18 GHz	Ku
18 - 26,5 GHz	K
26,5 - 40 GHz	Ka

2.3.2.7 Radyo dalgaları ışınları

Radyo dalgaları uzunlukları santimetre uzunluğundan kilometre uzunluğuna kadar varan dalga boylarına sahip dalgalardır. 10 cm ve 10 km arasında dalga boyu uzunluklarına sahip olabilen radyo dalgaları 300 GHz ve 30 KHz arası frekans değerlerinde titreşir (Şekil 2.4) (Sebastian, 2008). Uzun mesafeleri etkileşime girmeden kat edebilen radyo dalgaları mikrodalgaları da kapsayan bir bant aralığında

bulunmaktadır. Radyo iletişimi ve Radar teknolojisinde doğrudan yer bulan radyo dalgaları iletişim ve bilgi teknolojileri için büyük önem arz etmektedir (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 3; Collin, 1992; Herter, 1985).



Şekil 2.4 : Radyo dalgaları ve bant aralıkları (Zohuri, 2020; Url-3).

2.4 Radar Teknolojisi ve Radyo Dalgaları

Elektromanyetik spektrumun en uzun dalga boylarına sahip bölümü olan radyo dalgaları uzun mesafeler kat ederken bozulmaya uğramamaları sebebiyle radyo haberleşme sistemlerinin iletişiminde kullanılmaktadır. Spektrumun büyük bir kısmını kaplayan radyo dalgaları, mikrodalgaları da bünyesinde barındırır. Radyo dalgaları frekans değerlerine göre Aşırı Yüksek (Extreme high), Süper Yüksek (Super high), Ultra Yüksek (ultra high), Çok Yüksek (very high), Yüksek (high), Orta (medium), Düşük (low) ve Çok düşük (very low) frekans olarak sınıflandırılır. Bu sınıflandırma Çizelge 2.5'te verilmiştir. Frekans değerlerine göre kullanıldıkları teknolojiler de değişen radyo dalgaları genellikle iletişim amacıyla uydularda, mobil cihazlarda ve Radarlarda uygulama alanı bulur (Zohuri, 2020).

Çizelge 2.5 : Radyo dalgalarının frekans aralıkları ve bant adlandırmaları (Herter, 1985; Zohuri, 2020).

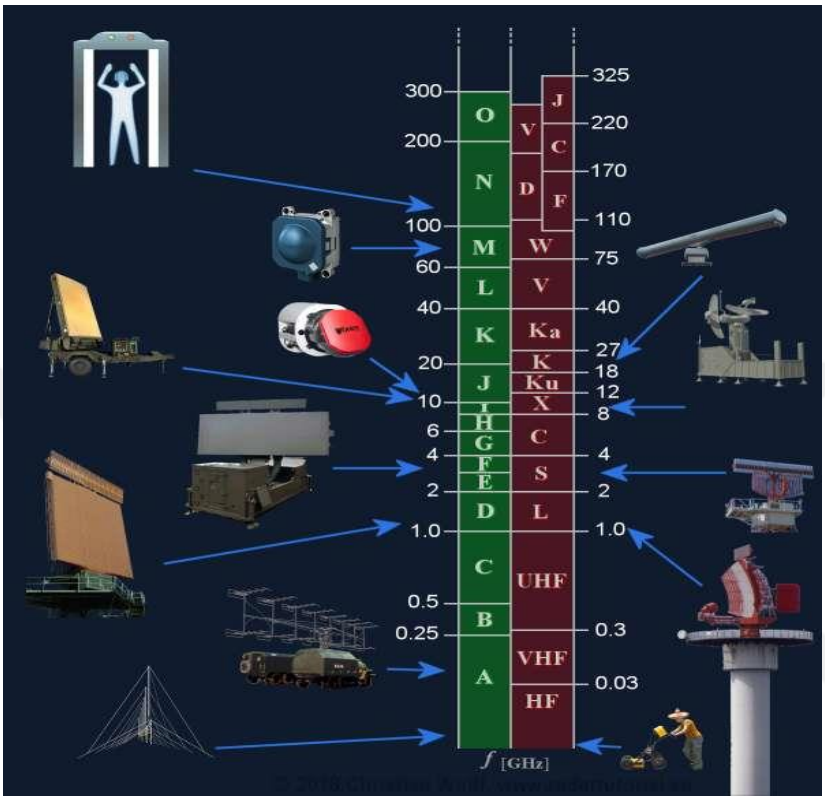
Frekans	Bant
3 - 30 kHz	Çok Düşük Frekans (VLF)
30 - 300 kHz	Düşük Frekans (LF)
300 - 3000 kHz	Orta Frekans (MF)
3 - 30 MHz	Yüksek Frekans (HF)
30 - 300 MHz	Çok Yüksek Frekans (VHF)
300 - 3000 MHz	Ultra Yüksek Frekans (UHF)
3 - 30 GHz	Süper Yüksek Frekans (SHF)
30 - 300 GHz	Aşırı Yüksek Frekans (EHF)

Radar teknolojisi ismini Radyo Hedef Algılama ve Menzil Tayini'nin (Radio Aim Detecting and Ranging) kısaltılmış halinden alır (Ramya, 2013; Zohuri, 2020). Radar teknolojisinde radyo dalgalarının bir hedefi tespit etmesi ve uzaklığını belirlemesi amacı vardır. Radarların teorik temelinde elektromanyetik dalgaların doğrusal ve sabit hızla yayılımı ve yansıması bulunmaktadır. Bu temeller sayesinde hareketli ya da durağan bir cismin konumu, hızı, uzaklığı ve belirli bir süre sonra varacağı hedefi belirlenebilir. Radarlar bir radyo dalgası kaynağından belirli bir hedefe gönderilen radyo dalgalarının o hedeften yansıması sonucunda geri dönen ışınların toplanması mantığı ile çalışırlar. Işının kaynaktan çıkması ve kaynağa geri dönmesi arasında geçen sürenin hesaplanması ile hedefin hareketi hakkında bilgi edinilir (Chauhan, 2008; Folgueras ve Rezende, 2008; Zohuri, 2020).

Maxwell'in elektromanyetik teoriyi açıklaması ve elektromanyetik dalgalar düşüncesini ortaya atmasının ardından bu alanda gerçekleşen ilerlemeler Tesla'nın elektromanyetik dalgalar ile hareketli cisimlerin tespit edilebileceği fikrini oluşturmasını sağladı. Marconi'nin elektromanyetik dalgaları uzun mesafeler arasında aktarabilmesi ve anten yardımı ile telsiz iletişimini sağlaması Tesla'nın fikrini desteklemektedir (Gürdal, 2017; Pastorini, 2010). 20. Yüzyılın ilk çeyreğinde Almanya ve ABD'de yapılan çalışmalar gemilerin yerlerinin tespit edilmesinde elektromanyetik dalgalar kullanan cihazların gelişmesine yol açtı. 2. Dünya Savaşı'na kadar geçen süreçte ise birçok sistem ve cihaz geliştirilmiş, 2. Dünya Savaşı döneminde ise mikrodalgaların ve radyo dalgalarının kullanıldığı Radar sistemleri üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde askeri teknolojilerde, havacılık ve taşımacılık sektöründe ve bilimsel araştırmalarda hemen hemen her bilim dalında kullanılmaktadır (Chin ve Lee, 2007; Saville 2005; Jayalakshmi ve diğ, 2018; Bhavya ve diğ, 2020).

Radar aygıtları yapılarında; gönderici olarak görev yapan radyo dalgası kaynağından, dalgaların gönderilmesi ve alınmasında temel rol oynayan antenden, alınan radyo dalgalarını işleyen alıcıdan ve elektromanyetik dalgadan oluşmaktadır. Gönderici olarak görev yapan kaynakta üretilen dalgalar, antene iletilir ve anten bu dalgaları hedefe yönlendirir. Hedeften yansıyan ışınlar tekrar antende toplanarak alıcıya yönlendirilir ve böylece Radar ekranında hedefin yerinin gösterildiği bir görüntü oluşur. Radarlar özelliklerine göre, kullanım amacına göre ve çalıştığı frekans aralıklarına göre sınıflandırılmaktadır (Zohuri, 2020). Şekil 2.5 eski sınıflandırma ve yeni sınıflandırma sonrasında ortaya çıkan bant aralıklarına bağlı olarak hangi Radar

sisteminin hangi bant aralığında kullanıldığına dair bir şema içermektedir. Bu tez çalışmasında özel olarak çalışılan X-bandı içerisindeki frekans bandı bölgelerin Savaş Alanı Radarları, Kara Taşıtları Hız Tespit Radarları ve Hava Taşıtları Konum Belirleme Radarları kullanılmaktadır



Şekil 2.5 : Radar cihazlarının türlerine göre kullanıldıkları radyo dalgaları bant aralıkları (Url-4).

2.4.1 Radyo frekans (RF) bantları ve Radar teknolojisi

Radarlar ilk üretildikleri dönemden beri kullanım amacına ve özelliklerine göre çok çeşitli ve farklı türlerde üretilmişler ve zamanla belirli alanlarda özelleşmişlerdir. Genel hatlarıyla kullanım amacına göre Radar aygıtları askeri ve sivil olarak iki gruba ayrılabilir (Pinho ve diğ, 2002; Ramya, 2013; Zohuri, 2020). Askeri amaçlı olarak hava savunma ve savaş alanı gözetimi, sivil amaçlı olarak ise muhtelif ve kontrol şeklinde gruplandırılırlar. Askeri amaçlı Radar aygıtları arasında devriye uçağı Radarı ve savaş alanı gözetim Radarı bulunurken sivil Radar aygıtlarında ise meteoroloji ve hız ölçüm Radarları bulunmaktadır. Özelliklerine göre Radarlar ise birincil ve ikincil Radarlar olarak iki sınıfta incelenmektedir (Chauhan, 2008; Yao, 2009; Zohuri, 2020).

Radar aygıtlarında kullanılan radyo dalgaları geniş bir bant aralığındaki bant sınıflarından oluşmaktadır. Bu bant aralıkları frekans değerlerine göre oluşturulmuş ve

yüksek (HF), çok yüksek (VHF), ultra yüksek (UHF) frekans aralıkları ile L, S, C, X, Ku, K ve Ka bantlarını içermektedir (Chauhan, 2008; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

HF, 3 – 30 MHz frekans değerleri arasında ve VHF ise 30 – 300 MHz frekans değerleri arasında titreşime sahiplerdir. HF, telefon, telgraf, amatör radyo ve kısa mesafeli yayınlarda VHF ise mobil radyo, televizyon, FM yayınlarda kullanılırlar. Radar teknolojilerinde ise ilk üretim Radarlarda (1940 ve öncesi) o dönemin teknolojisine bağlı olarak HF ve VHF radyo frekansları bulunmaktadır. Uzun dalga boyu sebebiyle yüksek menzile sahip olan bu dalgalar daha sonra Ufuk Ötesi Radarlarda yer almıştır. Antenlerinin çok büyük olması, hassasiyetin düşük olması ve dalgalarda sapmalar ile anormalliklerin daha fazla bulunmasına rağmen yüksek menzilinden dolayı bu antenler halen özellikle bilimsel çalışmalar için tercih edilmektedir (Herter, 1985; Jayalakshmi ve diğ, 2018; Zohuri, 2020).

UHF ise 300 MHz ile 1 GHz arasında frekans değerinde bulunan radyo dalgalarıdır. Uydu haberleşmelerin, televizyonlarda, radyo sondalarda ve gözetleme Radarlarında görev almaktadır (Herter, 1985; Jayalakshmi ve diğ, 2018). Hava savunma sistemlerinin erken uyarı mekanizmalarında ve meteorolojide rüzgâr potansiyeli tespiti için özelleşmiş Radarların yapısında da bulunmaktadır. Hava koşullarından etkilenmeyen bu dalgalar uzun mesafeler boyunca iletim sağlayabilir. Malzeme bilimi araştırmalarında ve arkeolojide de kendilerine yer bulmaları söz konusudur (Zohuri, 2020).

L bandı, radyo dalgalarının mikrodalgalar bölümünü oluşturan ilk dalga sınıfı olup mikrodalgaların en yüksek dalga boyuna ve en düşük frekans değerine sahip dalgasıdır. 1 – 2 GHz frekansa ve 30 – 100 cm dalga boyuna sahip bu dalgalar, hava rotası ve araç trafik gözetim Radarlarında kullanım alanı bulmaktadır. L bandı ikinci nesil iletişim teknolojilerinde (2G) de kullanılan dalga bant aralığıdır (Eluwole ve diğ, 2018; Jayalakshmi ve diğ, 2018; Meril ve diğ, 2019).

S bandı ise 2 – 4 GHz frekans aralığında bulunan hava sahası arama ve hava gözetim Radarlarında kullanılan banttır. Havaalanlarında uçakların konumunun ve havaalanı çevresindeki meteorolojik olayların incelenmesinde faydalıdır. Ayrıca üçüncü nesil iletişim teknolojileri (3G) ile birlikte de kullanılan bant S bandıdır (Eluwole ve diğ, 2018; Jayalakshmi ve diğ, 2018; Meril ve diğ, 2019). Bazı yörünge araçlarında

kullanılmakla birlikte yerini X, Ku ve K bandına bırakacak şekilde teknolojinin gelişimi ile değişime uğramıştır.

C bandı, 4 – 8 GHz aralığında frekans değerlerini içerisinde barındıran C bandı, mobil askeri savaş Radarlarının kısa ve orta menzilli olanlarında bulunmaktadır. C bandında diğer bantlara göre frekans değerinin yükselmesi hava koşullarından etkilenme ihtimalini de artırır. Bu durum mobil askeri Radar sistemlerin menzilini azaltsa da daha küçük bir anten taşınmasını sağladığı için hafiflik kazandırır ve ayrıca yağmurun yağma durumu ve ihtimalinin tespit edilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. 4G teknolojisinin veri gönderimi ve alımında kullandığı frekans aralığının (2 – 8 GHz) büyük bir kısmını ise kaplamaktadır (Batshikodi ve Faizabadi, 2019; Eluwole ve diğ, 2018; Docomo, 2020; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

X bandı, 8 GHz ile 12.5 GHz arasında frekans değerlerinde bulunan banttır (Moeini ve diğ, 2014, Chin ve Lee, 2007). Dünya dışı uzay araçlarının büyük bir kısmı X bandında bulunan radyo dalgaları ile iletişim sağlamıştır. Bunlar arasında ExoMars, Viking Mass, Voyager ve New Horizons görevlerinde kullanılan araçlar bulunmaktadır. Askeri uygulamalarda uçaklara yerleştirilen Radarların ve uçakların inişi esnasında faydalı olan Hassas Yaklaşım Radarlarında X bant aralığındaki dalgalar bulunmaktadır (Franchitto ve diğ, 2001; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

Ku bandı ise 12.5 – 18 GHz aralığında titreşim yapan dalgaları barındırmaktadır. Ku bandı da aynı X bandı gibi uzay araştırmalarında kullanılan bir frekans aralığıdır. Uluslararası Uzay İstasyonu bilimsel verilerinin aktarımını bu bant aralığında yapmaktadır ve aynı zamanda dünya okyanusları ve denizlerini inceleyen Oceansat-2 uydusu da Ku bandını iletişim amacıyla kullanmaktadır (Pinho ve diğ, 2002; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

18 - 26.5 GHz aralığındaki K bandı, Yüzey Hareket Radarlarında ve Havaalanı Yüzey Algılama Radarlarında geçerli olan bant aralığıdır. Ka bandı ise mikrodalga bantları arasında en yüksek frekansa ve en düşük dalga boyuna sahip olan bant aralığıdır. X bandı ile birlikte Radarların sık kullanıldığı bir bant türünü oluşturmaktadır. Yeni nesil Radarların özellikle X, K, Ku ve Ka bantlarında çalıştıkları görülmektedir.

26.5 – 40 GHz arasında frekans değerleriyle ilerleyen bu dalgalar Radar sistemlerinde mesafenin azaldığı fakat keskinlik ve hassasiyetin arttığı uygulamalarda kullanılabilir (Vohra ve El-Shenawee, 2021). Kepler Uzay Teleskobunda kullanılan ve James Webb

Uzay Teleskobunda da kullanılacak olan Ka bandı görüntülerin daha yüksek çözünürlükle elde edilmesinde rol almaktadır (Jayalakshmi ve diğ, 2018).

2.5 Radar Soğurucu Malzemeler

Mikrodalgaları soğurucu malzeme–olarak da bilinen radar dalgalarını soğurucu malzeme (Radar Absorbing Material - RAM), radyo frekansı dalgalarının tamamını ya da önemli bir kısmı hapseden ve yansıtmayan malzemelerdir (Zohuri, 2020). Her yönden ve etkili bir şekilde absorbsiyonun hedeflendiği bu malzemeler Radar teknolojisi ile tespit edilebilecek cihazların ya da teçhizatların görünmezliğini sağlamak için üretilir (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 4; Folgueras ve Rezende, 2008). Özellikle askeri teknolojilerde önemli olan Radar tespiti ve izleme durumlarından kaçınabilmek adına RAM'ler çok büyük avantaj sağlar. Radar aygıtlarından yönlendirilen radyo dalgalarının enerjisini kimyasal yapıları içerisinde minimize eden ya da tamamen absorbe eden RAM'ler Radarların antenlerine elektromanyetik dalgaların geri dönmesini engeller veya çok düşük sinyal alınmasına neden olur. RAM'ler manyetik, dielektrik ve hibrit yapıda olabilirler. (Folgueras ve Rezende, 2008). Malzemeye uygulanan mikrodalgalar RAM tarafından ısıya dönüştürülür. Bu nedenle RAM'lerin ısı iletkenliği önem kazanmaktadır. RAM'ler metal alaşımlarından, polimer metal kompozitlerinden ya da polimer nanokompozitlerden oluşabilirler (Shashkeev ve diğ, 2018, Celozzi ve diğ, 2008). Radar aygıtları tarafından tespit edilmemesi istenen materyal ya da cisim RAM ile kaplanabilir veya boyanabilir. Üretim yöntemlerinin uygunluğuna göre ise cisim tamamen RAM'den yapılabilir (Zohuri, 2020). RAM üretimi esnasında farklı yaklaşımlar ve metotlar kullanılmaktadır. Bunların temel amacı malzemenin yansıtma oranını azaltmaktır ve bulunduğu ortama göre malzemenin yansıtma katsayısını ortamın yansıtma katsayısına eşitlemektir (Munir, 2015; Winson ve diğ, 2020). Böylelikle Radar cihazlarının aradaki farkı tespit edememesi istenmektedir. RAM'lerde yüzey şekli de yansıtma özellikleri açısından oldukça önemlidir. Bununla birlikte Radar Kesit Alanı'nı (Radar Cross-Section) (RCS) azaltmak amacıyla RAM'lerin yüzeylerinde değişiklikler yapılarak yansıtma katsayıları azaltılır (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 4; Franchitto ve diğ, 2001; Jayalakshmi ve diğ, 2018). RAM malzemeler çoğunlukla askeri alanda gizlenme amacıyla üretildiği için, çoğunlukla saldırı ve gözlem uçaklarında kullanılmaktadır (Lal ve diğ, 2017; Edwards,

2000) . F-117A Nighthawk, B-2, F-22 Raptor ve F-35 Lightning II gibi uçaklarda radar emici malzemelere rastlanmaktadır (Mouritz, 2012; Folgueras ve Rezende, 2008; Zohuri, 2020).

2.5.1 Radar dalgalarının soğurulması

Radar dalgalarını soğurucu malzemeler (RAM) öncelikli olarak üzerine etkiyen radyo dalgalarının ya da mikrodalgaların enerjisini ısı enerjisine çeviren malzemelerdir. Bu sebeple dalgaların absorbe edilmesi için soğurulma işleminin en yüksek performans ile gerçekleştirilmesi gerekir (Munir, 2015; Jayalakshmi ve diğ, 2018). Dalgaların soğurulmasıyla beraber yansıtmanın da minimum düzeyde tutulması elzemdir. Bu sebepler ile Radar Kesit Alanı'nın azaltılması ve yansıtma katsayısının düşürülmesi amacıyla Radar absorblayan malzemelerin yüzeylerinde bir takım değişiklik yapılmaktadır (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 3; Gaylor 1989; Jang ve diğ, 2010). Bu değişikliklere bağlı olarak RAM malzemeler iki sınıfta incelenebilir. Bu sınıflar tınlaşım (rezonans) absorblayıcı RAM'ler (Lal ve diğ, 2017) ile empedans eşlenmeli RAM'ler olarak ayrılır. Empedans eşlemeleri RAM'lerin üretiminde, malzemenin bulunacağı ortamın empedans değeri ile malzemeye ait empedans değeri arasındaki fark azaltılır ve değerler eşitlenmeye çalışılır (Chauhan, 2008, Gaylor 1989). Empedans değeri, elektrik alan vektörü ile manyetik alan vektörünün birbirine oranı şeklindedir ve boş uzay için bu değer yaklaşık olarak 377 Ω kadardır. Eğer bir cisim için empedans değeri 377 Ω ise bu cisim boş uzayda üzerine genel mikrodalgaları yansıtmayacak ve Radarlar tarafından tespit edilemeyecektir (Magisetty ve diğ, 2018; Markevich ve diğ, 2019). Empedans eşlenmeli RAM'ler piramitsel absorblayıcılar, konik yükleme (tapered loading) absorblayıcıları ve eşlenmeli katman/tabaka absorblayıcılarından oluşmaktadır (Saville, 2005; Lederer, 1986). Piramitsel absorblayıcılar, RAM üzerinde piramit ya da koni şeklinde bulunan çıkıntılardan oluşmaktadır. Bu çıkıntılar gelen mikrodalgalarının malzemenin iç yüzeyine doğru aktarılmasını sağlayarak yansıtıcılığı azaltır. İstenilen frekans aralığına ya da banda göre uzunlukları ve genişlikleri ayarlanabilen bu piramitler ya da koniler, uygun boyutlarda kullanıldıklarında geniş bir bant aralığını absorbe edebilirler (Silva ve Kretly, 2011). Piramitsel absorblayıcılar, radyo dalgalarını iyi absorbe etmeseler de kalın ve kırılgan olmaları dezavantaj oluşturmaktadır. Konik Yükleme absorblayıcıları yansıtıcı bir yüzeye daha düşük yansıtıcılığa sahip bir kaplamanın yapılması ile üretilmektedir (Saville, 2005; Yüzçelik, 2003; Zohuri, 2020).

İnce bir tabakaya sahip ve hafif olmasına rağmen piramitsel absorblayıcılara göre yansıtıcılığı daha yüksek olmaktadır. Ayrıca daha düşük dalga boyu ve bant aralığında absorbsiyon yapmaktadır. Eşlenmeli katman absorblayıcıları ise materyal ile ortam arasında bulunacak şekilde materyale bir katman eklenmesi şeklinde oluşturulmaktadır (Celozzi ve diğ, 2008; Dong ve diğ, 2021). Burada amaç eklenen katmanın empedansının ortamın empedansına eşit olmasıdır. Rezonans absorblayıcıları ise Dallenbach ve Jaumann katmanları ile Salisbury ekranını içeren ve ince malzemelerden oluşan bir katman söz konusudur (Chin ve Lee, 2007; Yüzçelik, 2003; Lederer, 1986; Vinoy ve Jha, 1994; Wang, 2008). Empedans eşlenmesi bulunmayan bu malzemelerde radyo dalgalarının enerjisinin tamamı absorbe edilmez. Uygulanan dalganın bir kısmı soğurucu ortamdan geçerek katmanın arkasında bulunan metalden geri yansır ve soğurucu ortamdan tekrar geçerken faz değiştiren dalganın yeni gelen dalga ile birbirlerini sönümleyerek yıkıcı etki oluşturması beklenir. Dalgaların birbirini sönümlemesi halinde yansıyan herhangi bir dalga olmayacak ve malzeme Radarlar tarafından tespit edilemeyecektir (Yüzçelik, 2003; Saville, 2005; Lederer, 1986).

Mikrodalgaların soğurulması için empedans özelliğinin yanında malzemelerin dielektrik (yalıtkanlık) özelliğinin de büyük önemi bulunmaktadır. Dielektrik katsayısı bir maddenin iletkenlik – yalıtkanlık özelliği ile ilgili bilgi verirken aynı zamanda enerji depolama kapasitesini de göstermektedir. Dielektrik değeri yüksek olan cisimler bünyelerinde daha çok enerji depolayabilirler (Blythe ve Bloor, 2008; Saville, 2005; Yüzçelik, 2003; Wang, 2008). Yüksek iletkenlik özellikleri olan metaller gibi cisimler düşük enerji kapasitesine sahiptir ve dielektrik kayıpları fazladır. Böyle bir durumda, cisme uygulanan elektromanyetik dalgaların girişimi düşük olurken cisim yansıtıcı özellikler gösterir. Tam aksine dielektrik katsayısı yüksek ve kaybı düşük olan malzemelerde elektromanyetik dalgalar daha yüksek girişim göstererek enerjilerinin tamamını ya da büyük bir kısmını malzemeye bırakırlar. Malzeme tarafından bu dalgalar absorblanmış olur (Geyer, 1990; Chauhan,2008).

2.5.2 Polimer yapıların Radar soğurma özelliklerinin geliştirilmesi

Radar absorbing malzeme olarak kullanılan materyallerden bir kısmı da polimerlerdir. Hafiflik, mekanik dayanım ve termal direnç gibi özelliklerinin yanında mikrodalgaları absorbe edici özelliklerin kazandırılması amacıyla polimerlere karbon tabanlı

nanotüpler, karbon köpük (foam), grafen nanoplateler ve nanografitler ilave edilmektedir (Shashkeev ve diğ, 2018, Kondrashov ve diğ, 2017; Kondrashov ve diğ, 2015, Micheli ve diğ, 2011; Kim ve Kim, 2018; Munir, 2015; Teli ve Valia, 2019). Polimerlerin yüksek dielektrik özelliklere sahip olmaları için genellikle ferromanyetik özellikte bulunan parçacıkların eklenmesi ile polimer tabanlı RAM malzemeler elde edilmektedir. Epoksi polimerler RAM elde edilmesinde sıkça kullanılan polimerler olup Karbon fiber – Epoksi kompozitleri ve epoksi tabanlı boyalara metal kaplı küreler eklenmesi ile oluşan iron ball boyalar, epoksi tabanlı RAM'lere örnektir (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 3; Che ve diğ, 2014; Balakrishnan ve diğ, 2016; Wang ve diğ, 2011). Aynı zamanda polimerlerin kaplanması ile empedans eşlemeleri RAM malzemeler ile yüzeylerinden bir araya getirilmiş kompozitler üretilmektedir. PMMA ise sahip olduğu özelliklerin kalıcılığının sağlanması ve mikrodalgalara karşı absorbsiyonunun arttırılması için demir, kobalt, nikel, bakır ve gümüş gibi metal nanoparçacıkalar ve SiC gibi seramikler eklenmektedir. Böylece iletken polimerler elde edilerek RAM olarak kullanılabilmektedir (Kumari ve Choudhury, 2020, Bölüm 3; Gao ve Li, 2010; Sharma ve diğ, 2019). Bazı durumlarda farklı türden polimerlerin de bir araya getirilerek RAM üretimi gerçekleştirilmesinin hedeflendiği görülmüştür (Rajendran ve Uma, 1999; Jayalakshmi ve diğ, 2018). Son çalışmalarda, PMMA içerisinde Bor tabanlı bileşenlerin sıkça kullanıldığı ve mekanik, termal, elektrik ve manyetik özelliklerin geliştirildiği ve ayrıca hafifliğin de sağlandığı tespit edilmiştir. Hekzagonal Boron Nitrit, Hekzagonal Boron Karbür Nitrit ve Baryum Heksaferrit ilavesi ile RAM malzeme üretimi çalışmaları devam etmektedir (Micheli ve diğ, 2011; Mittal ve diğ, 2016; Pullanchiyodan ve diğ, 2017; Qin ve diğ, 2015; Atay ve Çelik, 2014; Sasria ve diğ, 2016; Sharma ve diğ, 2019; Tang ve diğ, 2020). Bu tezde ise PMMA polimer matriks içerisine eklenen Boraks Dekahidrat katkısıyla üretilen PMMA/Boraks polimer kompozitlerin mikrodalgaları da içeren radyo dalgalarının geniş bir aralığına karşı davranışı ve performansı incelenmiştir.

2.6 Boraks Dekahidrat'ın Özellikleri ve Kullanım Alanları

Boraks Dekahidrat, kimyasal formülü $Na_2B_4O_7.10H_2O$ olan ve IUPAC ismi Sodyum Tetraborat Dekahidrat ya da Disodyum Tetraborat Dekahidrat olarak da bilinen kimyasal bileşendir. Tinkal cevherinden toz veya kristal halinde rafine edilerek elde edilen Boraks Dekahidrat beyaz bir renge ve yumuşak bir yapıya sahiptir. Yapısındaki Na atomları sayesinde alkali bir tuz özelliği kazanan Boraks akma ve tamponlama

özellikleri açısından yüksek performanslıdır. (Waclawska, 1995). Alkali bir tuz olması sebebiyle sulu çözeltileri bazik özellik gösterir ve asitlerin nötürlenmesinde kullanılabilir. Bazik özelliği Boraks'ın sabun ve deterjan yapımı için kozmetik sektöründe etkin bir rol almasına sağlar. Cam, seramik, metal gibi malzemelerin yüzeylerinin temizliğinde kullanılan temizlik ürünlerinin de yapısında bulunan Boraks el dezenfektanları ve çamaşır deterjanları gibi insanlar tarafından kullanılan temizleyicilerin yapısında da bulunur. Kişisel bakım ürünlerinde ise yapışkanlık, dayanıklılık ve yumuşaklık gibi kazandırdığı özellikler sayesinde ve parafin tabanlı bileşenlerin bağlayıcılığını üstlenmesi sebebiyle Boraks tercih edilmektedir. Metalürjide de önemli bir rol oynayan Boraks, bir kaplama olarak korozyon ve oksitlenmenin engellenmesinde ve iyi bir metal çözücü olarak kurşun, bakır, demir gibi metallerin atıklarının geri kazanımında görevler alır. Ek olarak daha etkili gübrelerin hazırlanması, daha kaliteli ürün alınması ve daha verimli tarım uygulamalarının ortaya çıkması amaçlarıyla da kullanılmaktadır. Cam sanayinde ise camın sertliğini, viskozitesini ve yüzey sertliğini arttırmak için ısı yalıtım camlarının yapısına katılmaktadır (Peng ve diğ, 2014; Sayan ve diğ, 2010). Boraksın fiziksel özellikleri Çizelge 2.6'da verilmiştir.

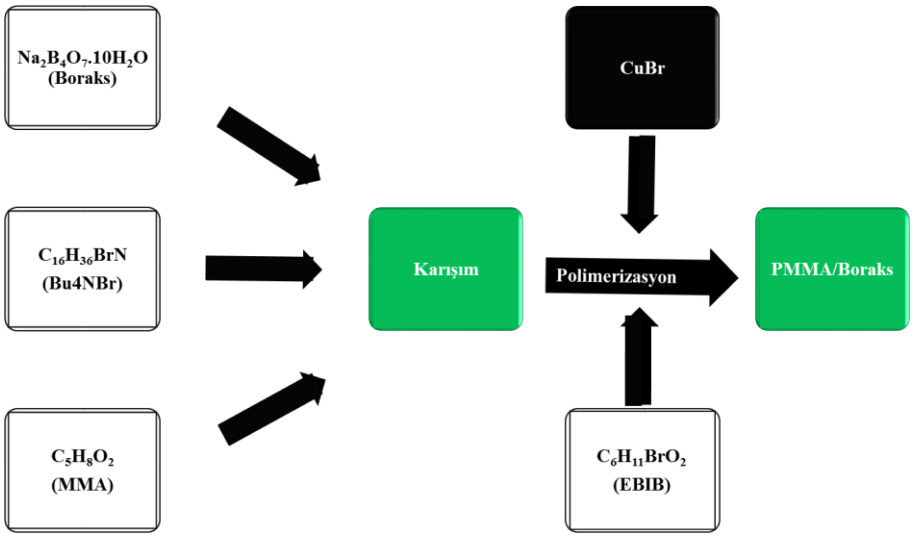
Çizelge 2.6 : Sodyum Tetraborat Dekahidrat'ın fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Boraks Minerali	Fiziksel Özellikler
Kimyasal Formül	$Na_2B_4O_7.10H_2O$
Yoğunluk	1.73 g/cm^3
Kaynama Noktası (Kuru)	1575 °C
Erime Noktası (Sulu)	75 °C
Erime Noktası (Kuru)	741 °C
Molekül Ağırlığı	381.37 g/mol
Isı Kapasitesi	4 J/g°C
Isıl İletkenlik	0.74 W/mK

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez bünyesinde ATRP yöntemi ile üretilen ağırlıkça farklı miktarlarda (%2, %5, %7.5 ve %10) Boraks Dekahidrat içeren PMMA/Boraks polimer kompozitlerin ve katkısız PMMA'nın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin tespit edilebilmesi için deneyler gerçekleştirilmiştir. PMMA'nın içyapısı, iç bağları ve kimyasal özelliklerini belirlemek amacıyla XRD, FT-IR, RAMAN ve XPS testleri uygulanmıştır. Mekanik ve termal özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla Shore-D testi, yoğunluk ölçümü, Ultrasonic Dayanım Testi, temas açısı ölçümü, TGA ve DSC testleri gerçekleştirilmiştir. Elektriksel özellikler için empedans ve dielektrik ölçümleri mikrodalga ışınım yöntemiyle elde edilmiş ve manyetik özelliklerin ölçümleri tamamlanmıştır. Üretilen örneklerinin içyapılarının 3D görüntülerinin elde edilmesinde SEM analizi ve yüzeylerin 3D görüntülerinin elde edilmesinde ise Stereomikroskop kullanılmıştır. Radyo dalgaları absorbsiyon (sönümleme), geçirgenlik ve yansıtma değerlerinin tespiti ve radar absorbent malzeme özelliklerinin belirlenmesi amacıyla S-Parametreleri Ölçüm Sistemi kullanılmıştır. Malzemelerin yalıtkanlıklarının belirlenmesi amacıyla dielektrik sabitleri belirlenmiştir.

3.1 PMMA/Boraks Kompozitlerinin Oluşturulması



Şekil 3.1 : PMMA/Boraks kompozitlerinin polimerizasyon şeması.

PMMA/Boraks polimer kompozitleri ATRP yönteminin bileşenlerinden oluşmaktadır. Katkı maddesi olarak Boraks ($Na_2B_4O_7$) kullanılarak monomer olan MMA ve çözücü olarak Bu4NBr bir araya getirilerek karışım elde edilmiş ve bu karışıma CuBr ve EBIB eklenmiştir. PMMA/Boraks kompozitlerinin oluşum şeması Şekil 3.1'de verilmiştir. Ayrıntılı olarak ise Bölüm 3.2'de üretim yöntemi açıklanmıştır.

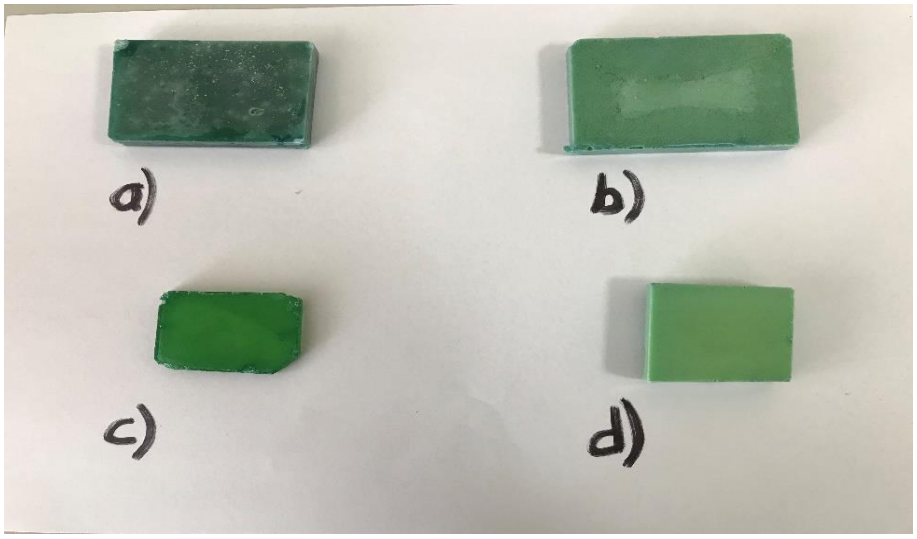
3.2 PMMA/Boraks Polimer Kompozitin ATRP Metodu ile Sentezi

Kullanılan kimyasallar, monomer olarak $C_5H_8O_2$ Metil Metakrilat (MMA), katalizör olarak CuBr Bakır Bromür, çözücü olarak $C_{16}H_{36}BrN$ Tetra-n-butilamonyum Bromür (Bu_4NBr), başlatıcı olarak $C_6H_{11}BrO_2$ Etil 2-bromoizobütirat (EBIB), $C_9H_{23}N_3$ 1,1,4,7,7- Ligand olarak Pentametildietilentriamin (PMDETA) ve katkı malzemesi olarak Boraks Dekahidrat ($Na_2B_4O_7.10H_2O$) şeklindedir. Kimyasallar üretim için hazırlandıktan sonra ve iki elli bir Atmos-Bag, Argon gazı ile doldurulmuştur. Atmos-Bag içerisinde bir adet hassas tartı bulunmaktaydı ve tüm kimyasallar iki elli Atmos-Bag'de bulunan hassas tartı da ayrı ayrı tartıldı. Daha sonra, çözücü Bu_4NBr ve katalizör CuBr, %2, %5, %7.5 ve %10 gibi ağırlıkça farklı miktarda Boraks Dekahidrat ile MMA monomerine ilave edildi. Katkısız PMMA üretilirken Boraks ekleme adımı atlandı. Tüm bu kimyasallar katı formdaydı ve iki elli Atmos-Bag'de karıştırıldı. Boraks Dekahidrat eklendikten sonra, bu karışım Atmos-Bag'den çıkarıldı ve başka bir Atmos-Bag'e aktarıldı. Bu Atmos-Bag ayrıca Argon gazı ile doldurulmuştu. Bundan sonra, katı kimyasallar karışımına Metil Metakrilat (MMA) ilave edildi. Daha sonra karışıma Pentametildietilentriamin (PMDETA) ilave edildi ve karışım vakum pompası yardımıyla degaz edildi. Gaz geçirmez şırınga 30 dakika boyunca gazdan arındırma işlemini gerçekleştirmek için kullanıldı. Daha sonra bu karışıma Etil 2-bromoizobutirat (EBIB) ilave edildi. Tüplere EBIB ilave edildikten sonra polimerizasyon işlemi başladı. Daha iyi karıştırma koşulları sağlamak için silikon banyolu manyetik bir karıştırıcı kullanıldı. Manyetik karıştırıcının daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi için karışımın bulunduğu kaba manyetik karışıtırıcı balık (bar) eklenmiştir. Karışım Atmos-Bag'den çıkarıldı ve bu karıştırıcıya yerleştirildi. Bu manyetik karıştırıcı, sıcaklık özelliklerini kontrol altında tutarak sıcaklığın manuel olarak ayarlanmasına izin vermesi sebebiyle tercih edilmiştir. Bu karıştırma, polimerizasyon tamamlanana kadar sürdü. Polimerizasyondan sonra numune manyetik karıştırıcıdan alındı ve desikatöre yerleştirildi.



Şekil 3.2 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5, %10 ve %15 Boraks katkısı içeren PMMA/Boraks örnekleri.

Şekil 3.2'de ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA polimer kompozitlerine ait görsel bulunmaktadır. Şekil 3.3'te ise kristal yapıdaki ve toz yapıdaki Bu_4NBr kullanımı ile üretilen PMMA/Boraks örnekleri gösterilmektedir. Toz halinde kullanılan Bu4NBr daha az ışık geçirgenliğine sahip daha açık renkte ve mat örnekler üretilmesine neden olmuştur. Bu çalışmada gerçekleştirilen tüm uygulamalar kristal yapıdaki Bu_4NBr kullanılarak üretilen PMMA/Boraks örneklerini içermektedir. Bu4NBr'nin çözücü olarak görev alması sebebiyle toz ya da kristal yapıda olması MMA'nın polimerizasyonu sürecinde sentezlenen PMMA/Boraks kompozitlerinin yüzey özelliklerinde farklılıklar oluşturmuştur.



Şekil 3.3 : Ağırlıkça a) %2, b) %5, d) %7,5 Boraks içeren ve c) katkısız PMMA örnekleri.

3.3 X-ışını Kırınım (X-Ray Diffraction) (XRD) Analizi

Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 Borax içeren PMMA/Boraks ve katkısız PMMA örneklerinin krisal yapısı ve karakteristik özellikleri hakkında bilgi sahibi olabilmek amacıyla X-Ray Diffraction (XRD) testi yapılmıştır. Üretilen katı haldeki örneklerin bir kısmı toz haline getirilmiştir ve Xpert Pro cihazında X-ışınlarına maruz bırakılmıştır. Bu analizde XRD cihazı Xpert Pro 2°/dk tarama hızıyla 40 kV gerilim ve 40 mA akım değerlerinde çalışmıştır. X ışınları 40 kV ve 40 mA değerlerinin oluşturduğu elektromanyetik kuvvet altında 10° ve 90° arasında uygulanmıştır. XRD analizinde hedef malzeme olarak bu deneyde tek kristal kırınımı olan Cu (Bakır) kullanılmıştır. Cu, CuKα radyasyonu yayar ve CuKα'nın dalga boyu 1.5418 A° 'dur (Janssen, 2004). XRD cihazı, dalga boyu λ olan bir monokromatik X ışın demetinin belirli θ açısıyla malzemeye gönderilmesi ve X ışınlarının bu malzeme üzerinde kırınıma uğraması prensibi üzerine çalışır (Mishra ve diğ, 2017). X ışının malzeme üzerinde ne kadar kırınıma uğradığı malzemenin türünün ve kristal yapısının belirlenmesinde çok önemlidir (Ersöz ve diğ, 2018; Reddy ve diğ, 2016; Valerio ve Morelhao, 2019; Hubin ve Terryn, 2004). X ışınlarının kırınımı ve yansıması Bragg Yasasında açıklanmıştır. %2, %5, %7,5 ve %10 Borax içeren PMMA/Borax polimer kompozitlerinin ve katkısız PMMA'nın XRD sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.

3.3.1 Bragg yasası

Kristallerin düzenli bir şekilde dizilmiş atomlardan oluştuğu düşüncesinden yola çıkılarak X ışınlarının dalga boyları 1-10 A° arasında ise bu X ışınları bir cisme uygulandığında bu cismin kristalleri tarafından kırınıma uğradığı görülmüştür (Iwashita, 2016; Mairinger, 2004; Janssen, 2004). Bragg kendinden önce yapılan çalışmaları düzenleyerek daha basit bir forma dönüştürmüş ve Bragg Yasasını ortaya koymuştur. Birbiriyle paralel ve aralarında d mesafesi olan iki düzlem üzerinde atomların düzenli bir şekilde dizildiğini ve λ dalga boylu monokromatik olan birbirlerine paralel şekilde yayılan X ışınlarının θ açısıyla gönderildiğini kabul edelim. Malzeme ile etkileşime geçen X ışınlarının tamamı saçılacaktır fakat bir kısmı aynı fazda bir kısmı ise farklı fazda olacaktır. Aynı fazda yapıcı girişim oluşurken X ışınlarının dalga boyu ile bu ışınların yol farkları arasındaki bağıntı Bragg Denklemi ile sağlanmaktadır (Choudhary ve diğ, 2019; Ermurat, 2021; Holder ve Schaak, 2019). Bragg Denklemi, denklem 3.1'de gösterilmiştir.

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

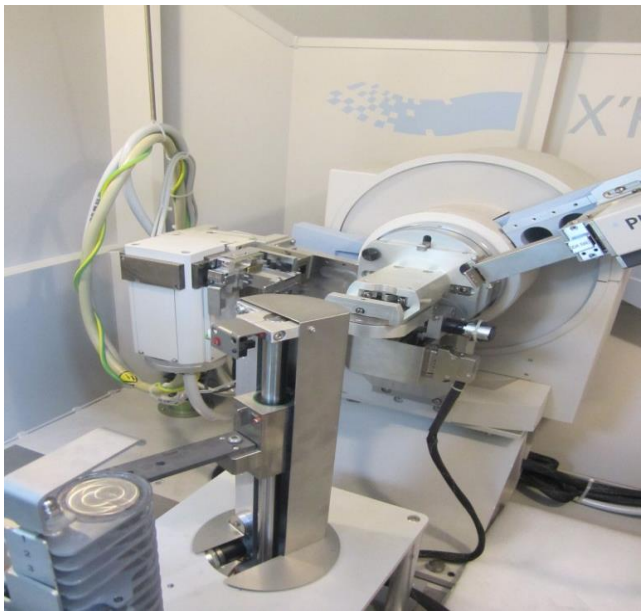
Bu denklemde d düzlemler arası mesafeyi , θ düzlem ile X ışınları arasındaki açıyı, n dalgaboyu sayısını ve λ X ışınlarının dalga boyunu göstermektedir.

3.3.2 Kristalit boyutu

XRD sonuçlarına göre, PMMA/Borax numunelerinde bulunan Boraks kristalinin kristalit boyutu Scherrer Formulü kullanılarak hesaplanmıştır. X ışını kırınımı (XRD) ve kristalografisinde temel olarak kullanılan Scherrer Denklemi, katı formdaki bir malzemenin mikrometre boyutunun altındaki kristalit boyutlarının hesaplanmasını sağlar ve kırınım modelinin içerisindeki tepe noktalarının genişlemesi ile kristalit büyüklüğü arasında bağlantı kurar (Iwashita, 2016; Valerio ve Morelhao, 2019; Holder ve Schaak, 2019; Ermurat, 2021; Banerjee, 2021). Scherrer Denklemi, denklem 3.2'de gösterilmiştir.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta cos(\theta_B)} \quad (3.2)$$

Bu denklemde, D ortalama kristalit boyutudur, K şekil faktörüdür (bu çalışmada 0.94'e eşittir), λ X-Işınlarının dalga boyudur, β FWHM (Full Width of Half Maximum)'dir (Yarı Maksimumda Tam Genişlik) ve θ_B Bragg kırınım açısıdır (Acharya ve diğ, 2018, Yao, 2009; Holder ve Schaak, 2019; Ermurat, 2021). Şekil 3.4 XRD analizinin gerçekleştirildiği cihazı göstermektedir. Bulgular bölümünde 2θ° açı değerlerine karşılık gelen kristalit boyutları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : XRD analizi gerçekleştirilen Xpert Pro XRD cihazı (Url-5).

3.4 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (Fourier Transform Infrared) (FTIR) Analizi

Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) Spektroskopisi, bir malzemeye uygulanan kızılötesi ışınların malzeme içerisindeki moleküllerin bağları tarafından soğurulması ve titreşim ya da dönme hareketi oluşturması prensibine dayanır (Mairinger, 2004). FTIR analizi molekül içerisinde bulunan bağların hangi atomlar arasında oluştuğunu ve bağların hangi sınıfa ait olduğunu belirlemek amacıyla gerçekleştirilir. Ayrıca molekülün yapısının belirlenmesi ve molekül içerisindeki fonksiyonel grupların tespit edilmesinde de FTIR Spektroskopisinden faydalanılır (Ersöz ve diğ, 2018). Kızılötesi ışınların soğurulabilmesi için dipol momente sahip ve polar yapıdaki bağların malzeme içerisinde bulunması gerekir. Polimerlerin içerisinde ise radikal grupların ve birbirlerinden farklı zincir dallarının bulunması sebebiyle hem dipol momente sahip hem de polar yapıda olan bağların sayısı çoktur (Ebnesajjad, 2014). Bu tez bünyesinde üretilen örneklere dalga sayısı 4000 ile 650 cm^{-1} arasında olan kızılötesi elektromanyetik dalgalar uygulanmıştır ve yüzde yüz geçirgenlik oranından başlamak üzere 4000 cm^{-1} dalga sayısından 650 cm^{-1} dalga sayısına kadar analiz devam ettirilmiştir. Bazı dalga sayısı değerlerinde geçirgenlik oranının azaldığı görülmüştür ve böylece titreşim ya da dönmenin olduğu yerler tespit edilmiştir. Dönme ve titreşimin göründüğü değerlere karşılık olarak gelen bağların türü ve dönme veya titreşim özelliği belirlenmiştir (Ramesh ve diğ, 2007; Reddy ve diğ, 2016). FTIR analizi Bruker Alpha Spektrometre Cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3.5 Raman Analizi

Hint fizikçi Chandrasekhara V. Raman'ın Nobel ödülü aldığı Raman Saçılması ya da Raman etkisi prensibine dayanan Raman Spektroskopisi, FTIR Spektroskopisi ile benzer bir analiz yöntemidir. Raman, ışığın saydam bir malzemeden geçerken kırınıma uğradığı esnada dalga boyunda değişim olduğunu keşfetmiş ve ışınlar saçılıma uğradığında ise saçılan ışınların gelen ışından farklı bir dalga boyuna sahip olduğunu fark etmiştir. Dalga boyunda meydana gelen değişimler elektromanyetik spektrumda dalga kaymalarını da işaret etmektedir (Ebnesajjad, 2014). Raman oluşan bu kaymaların malzemelerin moleküler yapısı ile ilgili olduğunu ve kayma miktarının moleküller arasında oluşan bağ türünü bulmak için faydalı olduğunu gördü. Raman analizi ise monokromatik yoğun lazer ışınlarının uygulanması sonucunda malzemeden saçılan ışınların dalga boylarının ölçülmesi yöntemiyle yapılır (Ersöz ve diğ, 2018;

Skoog ve West, 1981). Yansıyan ışınların dalga boyları lazer ışınlarının dalga boyundan fazla ise Raman saçılımı gerçekleşmiş demektir. Raman saçılımı elastik olmayan bir saçılma olarak adlandırılır ve bu saçılmalar Raman kaymalarına neden olur. Saçılan ışınlarının dalga boylarının artması gelen ışınların bir miktar enerji kaybettiklerini gösterir ve bu enerji molekül tarafından absorblanmıştır. Absorblanan enerji molekülün titreşim hareketini değiştirir. FTIR analizinde olduğu Raman analizinde de kızıl ötesi ışınlar kullanılarak moleküllerin titreşmesi ile molekülün bağ yapısı hakkında bilgi sahibi olunur (Loridant, 2018). Raman analizi ve FTIR analizi birbirini tamamlayan iki analiz türü olarak birbirlerine yakın veya aynı olan değerlerde pik oluştururlar. Bu tez çalışmasında Raman Analizi 100 – 3500 cm^{-1} Raman kayması aralığında RENISHAW Class 1000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Raman analizi için kullanılan RENISHAW Class 1000 cihazı (Url-6).

3.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope) (SEM) Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), bir cismin, yapının ya da malzemenin üç boyutlu yüzey görüntüsünün alınmasında kullanılan mikroskoptur. Odaklanmış elektronların kullanıldığı SEM örneğin tüm yüzeyini tarayarak görüntü oluşturur. Elektron demeti yüzey görüntüsü alınmak istenen numunenin atomları ile etkileşime geçerek numunenin yüzey morfolojisi ve topolojisi hakkında bilgiler verir. Optik mikroskoplara nazaran daha yüksek büyütme seviyesinde çalışan elektron mikroskopları nanometre boyutunda örneklerin görüntülenmesini sağlar (Ebnesajjad, 2014; Reddy ve diğ, 2016). SEM'de elektronların atomlar ile etkileşimleri sonrasında

atomun içerisinde enerji kazanarak bir üst enerji seviyesine çıkan elektronların eski enerji seviyelerine dönerken yaydıkları X-ışınları, atomdan kopan ve düşük enerjiye sahip olan elektronlar (ikincil elektronlar) ve atoma çarptıktan sonra saçılan elektronlar bir sintilatör tarafından toplanarak yüzey görüntüleri oluşturulur. X-ışınları, ikincil ve saçılan elektronlardan alınan farklı enerjideki sinyaller yüzeyin tam bir topografyasının oluşmasını sağlar (Ersöz ve diğ, 2018; Mayeen ve diğ, 2018). QUANTA FEG 250 SEM cihazı (Şekil 3.6) kullanılarak üretilen örneklerin yüzey özellikleri ile ilgili bilgiler edinilmiş ve SEM analizi ile birlikte üç boyutlu görüntüleri alınmıştır.



Şekil 3.6 : SEM görüntülerinin alındığı Quanta FEG 250 cihazı.

3.7 Temas Açısı Ölçümü

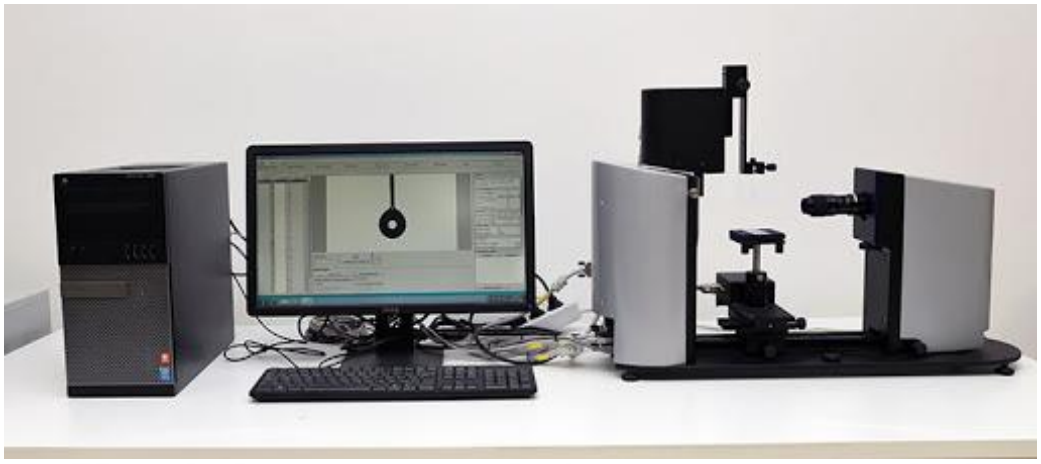
Örneklerin üzerine damlatılan sıvı damlacıklarının örneklerin yüzeyi ile yaptığı açıyı ölçmeye yarayan temas açısı ölçümü, yüzeylerin sıvı tutma kapasiteleri, ıslanabilirlikleri ve hidrofilik-hidrofobiklik özellikleri hakkında bilgiler vermektedir. Düz ve paralel yüzeye sahip örneklere bir sıvı damlası uygulanması prensibi ile çalışan temas açısı ölçüm cihazı aynı zamanda damlaların yüzey ile teması sırasındaki görüntülerini de alabilmektedir. Yüzey serbest enerjisi, adezyon kuvvetleri ve

kohezyon kuvvetleri ile ilgili fikir elde edebilmek temas açısı ölçümü ile mümkündür (Giridhar ve diğ, 2017).

Bu tez bünyesinde gerçekleştirilen temas açısı ölçümü su damlaları kullanılarak ölçüm yapan Attension KSV model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Su damlalarının yüzey ile yaptığı açı o yüzeyin hidrofilik ya da hidrofobik bir yüzey olduğu ile ilgili bilgi vermektedir. Bir yüzeye uygulanan sıva damlalarının yüzey ile yaptıkları açı 90°'den büyükse bu yüzey hidrofobik, 90°'den küçükse bu yüzey hidrofilik olarak adlandırılmaktadır. Temas açısı azaldıkça hidrofilik özellik artmakta ve 20°'nin altında temas açısına sahip olan yüzeyler süper hidrofilik, 160°'nin üstünde açıya sahip olan yüzeyler ise süper hidrofobik olarak adlandırılmaktadır (Agrawal ve diğ, 2017). Bununla birlikte temas açısı ıslanabilirlik özelliği ile de doğrudan bağlantılıdır. Bir yüzeyin hidrofilikliği arttıkça ıslanabilirlik özelliği de artmaktadır. Yüzey serbest enerjisi de kohezyon ve adezyon kuvvetleri gibi hem hidrofilikliği hem de ıslanabilirliği belirleyen bir etmendir (Giridhar ve diğ, 2017).

Sıvı yüzeyinde bulunan moleküller diğer moleküller tarafından kendilerine doğru çekilirler ve üç farklı yönden çekilen moleküller yüzeyde gerilmeye neden olarak zar benzeri bir yapı oluştururlar. Bu gerilimi yenerek sıvının bir yüzeyde yayılmasını sağlayan enerji ise yüzey serbest enerjisidir. Yüzey serbest enerjisi yüksek olan bir sıvı cismin yüzeyinde yayılabilir. Aynı şekilde düşük yüzey gerilimine sahip sıvılar da cismin yüzeyinde dağılım gösterebilirler. Temas açısı ölçümü değerleri, cismin yüzey serbest enerjisinin ve yüzey geriliminin de tespit edilmesini sağlar. Adezyon ve kohezyon kuvvetleri arasındaki ilişki de temas açısı ölçüm değerlerini etkilemektedir. Sıvı molekülleri arasındaki çekim kuvvetini ifade eden kohezyon kuvvetlerinin, sıvı molekülleri ile cismin yüzeyi arasındaki çekim kuvvetini ifade eden adezyon kuvvetlerine göre büyüklüğü arttıkça temas açısı ölçüm değeri de büyür ve cisim hidrofobik bir yüzeye sahip olur. Ayrıca yüzeyin pürüzlülüğü de su tutma kapasitesini ve ıslanabilirliği etkilemektedir (Agrawal ve diğ, 2017; Erayman ve Korkmaz, 2017). Pürüzlü yüzeyin su tutma kapasitesi artarken yüzeyle bulunan boşluklar ya da oluklar suyun tutulmasını ve ıslanabilirliğin artmasını sağlarlar. Böylece su yüzeyde daha rahat yayılma ve temas açısını düşürme imkânına sahip olur. Hidrofobik özelliklerin artması ıslanmayan kumaş ya da kir tutmayan kumaş üretiminde tekstil uygulamalarında ön plana çıkmaktadır. Hidrofilik özelliklerin artması ise kendi

temizleyen yüzeylerin ve malzemelerin üretilmesinde önem taşımaktadır. Temas açısı ölçüm cihazına ait bir görsel Şekil 3.7'de görülebilir.



Şekil 3.7 : Temas Açısı Ölçümü cihazı (Url-7).

3.8 Shore-D Sertlik Testi

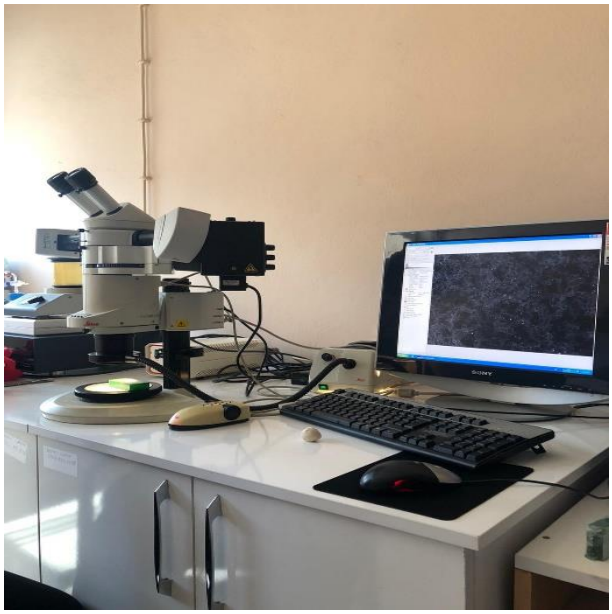
Sertlik, bir malzemenin bozulmaya ve şekil değiştirmeye karşı yapmış olduğu direnci ifade etmektedir. Malzemelerin sertlik değerleri aynı zamanda dayanımlarını da göstermektedir. Malzemelerin sertlik değerleri doğrudan bir büyüklük olarak ifade edilmek yerine bağıl bir büyüklük ifade eder. Dayanımı yüksek malzemenin görece bu malzemeye göre daha düşük dayanımdaki malzemeye uyguladığı kuvvet sonucu oluşan deformasyon, bozulma ya da değişim hesaplanarak sertlik değerleri bulunmaktadır. Malzemenin türüne göre, metal, polimer ya da seramik, farklı sertlik ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemler arasında Rockwell ve Rockwell yüzey, Vickers, Knoop, Brinell ve Shore sertlik ölçüm yöntemleri bulunmaktadır. Sertlik ölçüm yöntemleri, elmastan ya da çelikten üretilen piramit, koni ya da küre şeklindeki uçların sertliği ölçülecek malzemeye batırılması prensibiyle çalışmaktadırlar. Uçların malzemeye batma derinliği ve oluşan izin büyüklüğü sertlik değerinin hesaplanmasını ve belirlenmesini sağlamaktadır. Yumuşak malzemelerde ucun battığı derinlik daha fazla ve bıraktığı iz daha geniştir. Sert malzemelerde ise iz daha küçük ve derinlik daha azdır. Sertlik değeri arttıkça da iz ve derinlik daha az olacaktır. Rockwell sertlik ölçümü, metaller ve metal alaşımlarında sıkça kullanılır ve en çok karşımıza çıkan sertlik ölçüm türüdür. Diğer sertlik ölçümlerine nazaran daha düşük maliyetli ve basit yapıda olmasının yanında birçok sertlik yelpazesine sahip olması avantajlı yönlerindendir. Batıcı uç olarak elmas ya da çelik küre kullanılması

da tercih edilmesinin sebeplerinden biridir. Elmas bilinen en sert katı madde olduğu için bağıl sertlik değerlerinin bulunması amacıyla sertlik ölçüm yöntemlerinde sıkça tercih edilir.

Shore sertlik ölçümü ise diğer sertlik ölçümleriyle aynı prensipte çalışmaktadır. Diğer yöntemlerde olduğu gibi sertlik değerleri batıcı ucun etki ettiği derinliğin ve bıraktığı izin hesaplanmasıyla tespit edilmektedir. Diğer sertlik ölçümlerinden farkı ise daha yumuşak özellikler gösteren esnek malzemelerin ve polimerlerin sertlik ölçümlerinde kullanılmasıdır. Shore testleri ağırlığa ve batıcı ucun türüne göre sınıflandırılmaktadır. Shore-A en hafif olmak üzere B, C, D, E, M, O ve OO testleri de bulunmaktadır. Shore-D testi diğer testlere göre sertliği yüksek malzemelere uygulanmaktadır. Bu testler malzemenin türüne göre seçilmekte ve uygulanmaktadır. Bu çalışmada PMMA polimer kompozitlerin üretiminin gerçekleştirmiş olması nedeniyle Shore-D testi sertlik ölçümü olarak seçilmiştir.

3.9 Stereomikroskop Görüntüleri

Optik mikroskop türlerinden biri olan Stereomikroskop'ta bir cismin yüzeyinden yansıyan ışınların toplanması ile görüntü elde edilmesi prensibi bulunmaktadır (Mairinger, 2004). Stereomikroskop düşük büyütme düzeyinde görüntü alırken gözle tespit edilmesi zor olan yüzey pürüzlülüğü, yüzeyde oluşan çatlaklar ve değişimler ile ilgili bilgi edinilmesini sağlar.



Şekil 3.8 : Leica MZ 10 F model stereomikroskop.

Yüzey özellikleri, yüzeyin hidrofilik – hidrofobik olma durumunu, ıslanabilirliğini ve su tutma kapasitesini doğrudan etkiler. Bu nedenle temas açısı ölçümü yanında stereomikroskop görüntülerine de sahip olunması yüzeyin durumu hakkında daha detaylı inceleme yapılmasına imkân verir. Farklı açılardan yansıyan ışınlar ile alınan iki görüntü çakıştırılarak Stereomikroskopta üç boyutlu görüntü elde edilir (Ebnesajjad, 2014). Bu tezde üretilen PMMA/Boraks polimer kompozitlerin yüzeyi incelenirken Boraks kristallerinin PMMA yüzeyinde dağılımı da belirlenmiştir. Leica MZ 10 F Model Stereomikroskop kullanılarak farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA/Boraks polimer kompozitlerin üç boyutlu görüntüleri elde edilmiştir. Şekil 3.8 Leica MZ 10 F model stereomikroskobu göstermektedir.

3.10 Ultrasonik Test (UT)

Ultrasonik test olarak da adlandırılan ultrasound testi, ses dalgalarının kullanıldığı ve test edilen ürüne zarar vermeyen tahribatsız bir muayene ya da test yöntemidir. Prob adı verilen ve ses dalgaları üretme ile algılama işleminde kullanılan algılayıcılar yardımıyla ses dalgaları bir demet halinde test edilen malzemeye gönderilir ve malzemeden yansıyan ses dalgaları aynı ya da farklı bir prob tarafından toplanır (Raj ve diğ, 2002). Ses dalgalarının malzeme içerisindeki değişimi tespit edilerek malzemenin içyapısı ve karakteristik özellikleri ile ilgili bilgiler elde edilir. Malzemenin içyapısına göre dalga kırınıma uğrar ve uğradığı kırınım ise dalganın yansıma açısını değiştirir. Aynı zamanda malzemenin içyapısındaki taneciklerle karşılaşan ses dalgalarının yansıma hızları da değişmektedir (Bates ve diğ, 2000; Schabowicz, 2019). Bir dalganın hızı, frekansına ve dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. Frekans, saniye başına titreşim miktarı olup *f* ile gösterilir ve birimi Hertz olarak ifade edilir. Dalga boyu ise λ sembolü ile gösterilirken metrik birime sahiptir. Dalga boyu, frekans ve ses hızı arasındaki ilişki denklem 3.3'te gösterilmiştir (Hijazi, 2020; Blitz ve Simpson, 1996).

$$V = f . \lambda \tag{3.3}$$

Ultrasound ya da ultrasonik dalgalar ses üstü dalgalardır. İnsan kulağının algılayabileceği ses frekansı aralığından daha yüksek seviyede bulunan ses üstü dalgaların frekansları 100 kHz değerinden 25 MHz değerine kadar yükselebilmektedir (Krautkrämer ve Krautkrämer, 1990). Bir maddenin içerisinde ses dalgaları en hızlı katı formdaki maddelerde yayılır. Eğer katı madde tek düze ise ses hızı değişmeden

dalgalar madde içerisinden geçebilir. Fakat bu katı cisimde çatlaklar, boşluklar, düzensizlikler ve gözenekler var ise ses dalgalarının hızı aynı cisim içerisinde farklı değerler alır (Blitz, 1997). Aynı durum kompozitler için de geçerli olmaktadır. Katkı maddesi olarak eklenen bir bileşen var ise bileşenin homojen bir şekilde dağılım gerçekleştirememesi, topaklaşması ya da içyapıyı süreksiz hale getirmesi ses dalgalarının hızını da etkileyecektir. Böylelikle teste tabi tutulan örneklerin yapısındaki kusurlar tespit edilebilmektedir. Aynı yöntem ile bir malzemenin yapısındaki katkı maddeleri de tespit edilebilmektedir (Zoughi, 2000; Gholizadeh 2016). Ses dalgalarının hızları, onların malzeme içerisine gönderilme ve yansıma sürelerini de etkilemektedir. Bu süre miktarı ile malzemenin kalınlığı tayin edilebilir, sonar sistemleri ile cisimlerin uzaklıkları tespit edilebilir ya da tıp alanında iç organların görüntülenmesi gerçekleştirilebilir (Wright, 1996). Ayrıca malzemelerin yüzeyinde hareket eden ses dalgalarının hızları ile yüzey sertliği ölçümü yapılabilir ve içlerinde hareket eden ses dalgalarının hızları ile de Elastisite Modülü, Poisson Oranı ve Kayma Modülü gibi mekanik özelliklerin belirlenmesi sağlanabilir (Nesvijski, 2000).

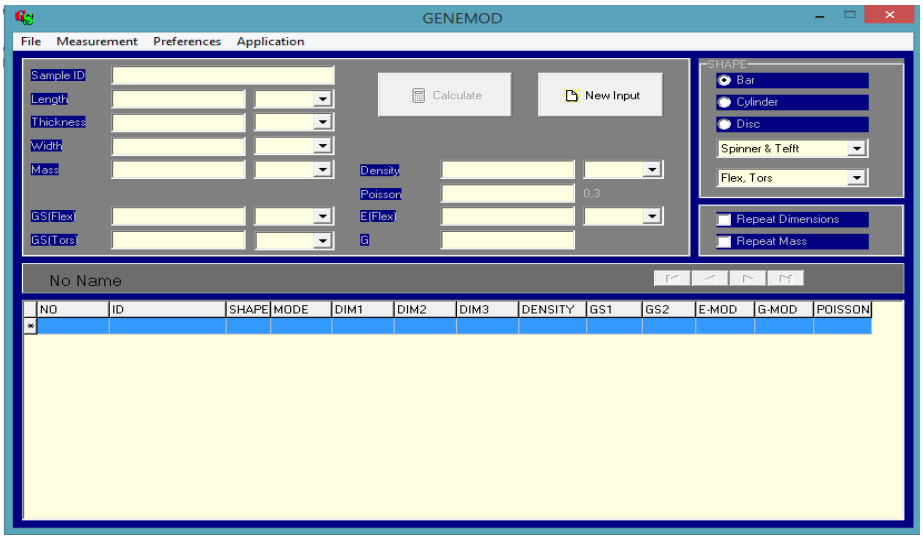
Tahribatsız muayene yöntemlerinden biri olan ultrasonik test sisteminde elektrik enerjisi problar yardımıyla titreşim enerjisine dönüştürülür ve ses dalgalarının üretimi sağlanır (Dwivedi ve diğ, 2018). Problar, içerdikleri piezoelektrik özellikteki kristaller sayesinde istenilen frekansa sahip ses dalgalarının üretiminde ana görevi oynar. Piezoelektrik özellikteki malzemeler elektrik enerjisini hareket ve titreşim enerjisine çevirebilen ve tam tersi olarak da hareket ve titreşim enerjisini de elektrik enerjisine çevirebilen malzemelerdir (Wright, 1996). Kuvartz ve lityum sülfat sıkça karşılaşılan piezoelektrik malzemelerdendir (Basu ve Aydın, 2006). Ultrasonik test sisteminde enine ve boyuna dalga hızları belirli prensipler altında ölçülebilmektedir. Enine dalga hızını ölçmek için açılı prob kullanılırken, boyuna dalga hızını ölçmek amacıyla ise normal prob kullanılmaktadır. Normal prob, yüzeye dik açı ile konur ve örneğe ses dalgaları göndermesi sağlanır. Örneğin arka yüzeyinden ya da içerisindeki kusurlardan yansıyan ses dalgaları aynı prob ile toplanır ve boyuna dalga ses hızı belirlenir. Açılı probda ise prob ile yüzey arasında belirli bir açıyla ses dalgaları gönderilir (Sharma ve Sinha, 2017). Bir gönderici ve bir de alıcının bulunduğu bu yöntemde ses dalgalarını bir probdan açılı olarak gönderilirken başka bir prob da yansıyan ses dalgalarını

algılar. Böylece örnek içerisinde hareket eden enine ses dalgalarının hızı tespit edilir (Langenberg ve diğ, 2009; Hull ve John, 1988).

Bu tez çalışmasında iki farklı ultrasonik test sistemi kullanılarak Young Modülü (Elastisite Modülü), Poisson Oranı, Kayma Modülü ve Mikrosertlik değerleri ses hızları ve frekansları vasıtasıyla hesaplanmıştır. Young Modülü, bir malzemenin elastik olmaya ya da esnemeye karşı direnci olarak ifade edilirken, deformasyona karşı direnci ise Kayma modülü ile ifade edilmektedir. Mekanik dayanımın, direncin ve esnekliğin anlaşılabilmesi amacıyla bu modül değerleri hesaplanmıştır. İlk yöntemde bir normal prob ile örneklerin içerisinden geçen ses dalgalarının boyuna dalga hızı belirlenirken iki açılı prob kullanılarak da ses dalgalarının enine dalga hızı tespit edilmiştir. Bu yöntemde ses dalgalarının üretilmesi ve toplanması problar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. İkinci yöntem ise Grindo Sonic MK5i cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnek, örneğin altına belirli mesafeler ile konulmuş destekler, bir algılayıcı prob ve farklı ağırlıkta küresel kuvvet kürelerinden oluşan bu sistem, kürelerin uyguladığı sabit kuvvet altında titreşen örneklerin oluşturduğu ses dalgalarının frekanslarının ölçülmesi prensibi ile çalışmaktadır. Belirlenen frekans değerleri ile söz konusu örneğin özelliklerinin girildiği Genemod isimli bir uygulama aracılığıyla Young Modülü ve Poisson Oranı tespit edilebilmektedir. Kalınlık, uzunluk, genişlik ve kütle değerlerinin yer aldığı bu uygulama ses dalgalarının frekansları ile modüller arasında ilişki kurmaktadır. Bu yönteme ait test düzeneği görüntüsü Şekil 3.9'da verilmiştir. Genemod uygulamasına ilişkin ara yüz ise Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Grindo Sonic ultrasonik test düzeneği.



Şekil 3.10 : Genemod uygulamasının arayüzü.

3.11 Termogravimetrik Analiz (TGA)

Malzemelerin belirli atmosfer koşullarında sıcaklıklarının kademeli olarak arttırılması ile zaman içerisinde kaybettiklerinin kütle miktarının ölçüldüğü analiz yöntemi Termogravimetrik Analiz yöntemidir (Düz, 2021). Malzemelerin yüzdece kütlesel kaybı, zamana ve sıcaklığı bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim her bir malzeme için farklı olduğundan malzemenin türünün tespiti için de TGA kullanılabilir. Analiz edilen malzemenin ısıl kararlılığı ve dayanımı ile ilgili bilgiler veren TGA testinde kütlece kaybın zamana ve sıcaklığı bağlı fonksiyonunun eğrisi, grafik halinde verilmektedir. TGA yöntemi özellikle polimer ve polimer kompozitlerin termal dayanımının saptanmasında sıkça kullanılan bir yöntemdir (Karakeçeli, 2017; Loganathan ve diğ, 2017; Abraham ve diğ, 2018; Peng ve diğ, 2020; Banerjee, 2020).



Şekil 3.11 : Termogravimetrik Analiz cihazı.

Bu çalışmada PMMA polimer kompozitlerin artan ısı ve sıcaklık karşısındaki davranışlarını incelemek amacıyla TGA testi 30 °C ile 600 °C arasında 10 °C/dk sıcaklık artış hızı ile uygulanmıştır. Toz haline getirilen örneklerin argon ile inert edilmiş fırına yerleştirilmesi sonrasında sıcaklık kontrollü bir şekilde arttırılmış ve kütle kaybı takip edilmiştir. Termogravimetrik analiz işleminin gerçekleştirildiği cihaza ait görüntü Şekil 3.11'de verilmiştir.

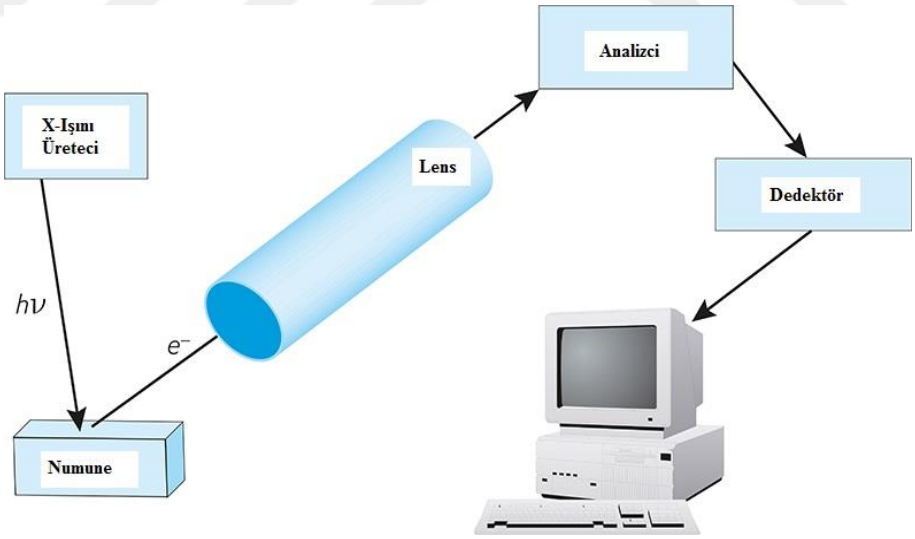
3.12 Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (Differential Scanning Calorimeter) (DSC) Analizi

TGA gibi termal analiz yöntemlerinden biri olan Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) analizi, TGA'nın kütle kaybı miktarını belirleme yetisi aksine malzemelerin enerji miktarı değişimini ve ısı akışını tespit etmek üzere gerçekleştirilir (Abraham ve diğ, 2018; Peng ve diğ, 2020; Banerjee, 2020). DSC, malzemelerin ısı sığasının sıcaklığı bağlı olarak değişiminin incelenmesine imkân vermektedir. Polimerler için camsı geçiş sıcaklığının, erime noktasının, hal ya da faz değişikliklerinin ve kür noktasının belirlenmesinin sağlanması kütle miktarı bilindiği sürece ısı kapasitesinden yola çıkılarak DSC tarafından gerçekleştirilmektedir (Koshy ve diğ, 2017; Reddy ve diğ, 2016). Bu tezde TGA ve DSC analizlerini bir arada bulunduran Eşzamanlı Diferansiyel Taramalı Kalorimetri ve Termogravimetrik Analiz (SDT) cihazı kullanılmıştır. Böylelikle 30 °C ve 600 °C arasındaki sıcaklık değerlerinde çalıştırılan ve 10 °C/dk hız ile çalışan bu cihazda analiz gerçekleştirilerek ısı akışı, kütlesel kayıp ve enerji değişim miktarları saptanmıştır. Aynı grafik içerisinde verilen eğrilerden yola çıkılarak hem DSC hem de TGA analizlerinden bulunabilecek camsı geçiş sıcaklığı, erime noktası ve kütle kaybı belirlenmiştir.

3.13 X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (X-Ray Photoelectron Spectroscopy) (XPS)

Einstein'ın 1921 yılında Nobel Ödülüne layık görüldüğü fotoelektrik olay prensibine dayanan X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi (XPS), yüzey analizi yöntemlerinden biridir (Hubin ve Terryn, 2004). Fotoelektrik olaya göre bir cisme uygulanan ışınlar yeterli enerjiye sahip iseler o cismin atomlarından elektron koparabilir ve elektronu serbest hale getirebilirler (Watts ve Wolstenholme, 2003). Böyle bir durumda gelen ışın cismin atomlarında bulunan elektronların ilgili atomun çekirdeğine bağlanma

enerjisi kadarlık bir enerjiyi elektrona aktarır ve elektronun o atomdan ayrılmasına neden olur (Beamson ve diğ, 1991; Janssen, 2004). XPS'de ise X-ışınları, sahip oldukları enerjiyi (hν) elektronlarla çarpışma esnasında elektronlara aktarır ve bu elektronları çekirdeğin yörüngesinde dolanmaktan kurtarır. Bir X-ışını kaynağından gönderilen ışınlar analiz edilmek istenen örneğin yüzeyine çarparlar ve elektron koparırlar bu elektronlar fotoelektron olarak adlandırılır (Pleul ve Simon, 2008). Fotoelektronlar bir elektron enerjisi analizcisinde toplanır ve bu fotoelektronların bağlanma enerjileri tespit edilir. XPS yöntemi ile analiz edilen örneğin yüzeyinde ya da içyapısında bulunan kimyasal bileşenler ve elementler tanımlanır ve bu bileşenlerin kimyasal durumları hakkında bilgi edinilir (Hofmann, 2013, Bölüm 8; Hubin ve Terryn, 2004; Mishra ve diğ, 2017). Her elementin atomlarından elektronlarını ayırabilecek bağlama enerjisi o elemente ait karakteristik bir özellik olduğu için bir bileşiğin ya da malzemenin içerisindeki elementleri ya da atomları tespit etmek mümkün olur. Kimyasal bağların ve valans bant yapılarının saptanabildiği XPS yöntemi ilk defa Kai Siegbahn tarafından üretilmiştir. Yüksek çözünürlüğe sahip ilk XPS spektrumu geliştiren Siegbahn daha sonrasında Nobel Ödülünü elde etmiştir (Hofmann, 2013, Bölüm 1).



Şekil 3.12 : XPS cihazının çalışma sistemi ve yapısı (Url-8).

XPS cihazı; vakum sistemi, X-ışını kaynağı, elektron enerji analizcisi, Argon iyon kaynağı, nötürleştirici, elektronik kontrol sistemi ve bilgisayardan oluşmaktadır. XPS analizinde genellikle X-ışını kaynağı olarak 1253.6 eV enerjiye sahip MgKα radyasyonu ya da 1486.6 eV enerjiye sahip AlKα radyasyonu kullanılmaktadır. 3-10 nm analiz derinliğine sahip XPS yöntemi hem elementsel hem de kimyasal seviyelerde

bilgi vermektedir ve hem inorganik hem de organik malzemelere uygulanabilir (Hofmann, 2013, Bölüm 2; Ersöz ve diğ, 2018; Mishra ve diğ, 2017). XPS analizinde elde edilen spektrum grafiğinde gönderilen X-ışınlarının sayısına göre bağlanma enerjisinin yoğunluğu bulunmaktadır. Bağlanma enerjisi gönderilen X-ışınlarının enerjisinde elektronların kinetik enerjisinin çıkarılması ile bulunmaktadır. Elektronların kinetik enerjisi, elektron enerji analizcisi tarafından belirlenir ve gönderilen X-ışını kaynağı belirli olduğu için X-ışınlarının enerjisi de sabittir. Böylelikle bağlanma enerjisi bulunarak enerji miktarına göre de element ya da bileşik türü belirlenir. Bağlanma enerjisi denklem 3.4'e göre hesaplanmaktadır (Watts ve Wolstenholme, 2003; Ebnesajjad, 2014; Janssen, 2004).

$$E_B = h\nu - E_K - W \tag{3.4}$$

Burada E_B elektronun bağlanma enerjisini, hν X-ışınının enerjisini, E_K kopan elektronların kinetik enerjisini ve W da spektrometrenin iş fonksiyonunu belirtmektedir (Watts ve Wolstenholme, 2003; Pleul ve Simon, 2008). Bu tez çalışmasında XPS analizi, ağırlıkça % 2, % 5, % 7.5 ve %10 Boraks içeren PMMA/Boraks polimer kompozitlerinin ve katkısız PMMA polimerinin yüzeylerinden yayınlanan karakteristik elektronların tespit edilmesi amacıyla yüksek yüzey hassasiyetiyle ve 5 nm tespit derinliğinde gerçekleştirilmiştir. XPS cihazlarının çalışma mantığını gösteren bir şema Şekil 3.12'de ve XPS analizinin gerçekleştirildiği Thermo K-Alpha XPS cihazı Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Bu çalışmada XPS cihazı yardımı ile sentezlenen polimer matrisli kompozitlerin içerisinde oluşan bağların ve bu bağlarda Boraks miktarı değişimi ile ortaya çıkan değişimler incelenmiştir.



Şekil 3.13 : XPS analiz cihazı.

3.14 Mikrodalga Testleri

Radyo dalgaları ve Mikrodalga testleri; örneklerin Dielektrik değerlerinin tespit edilmesi, S-Parametrelerinin belirlenmesi ve örneklerin Radyo dalgalarının bir bölümünü ifade eden Mikrodalgaların X bandında (8 GHz – 12.5 GHz aralığı) geçirgenlik, yansıtma ve absorblama oranlarının ortaya çıkarılması amaçlarıyla TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde (UME) Radyo Frekans (RF) Güç Kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.14.1 Dielektrik değerlerin tespiti

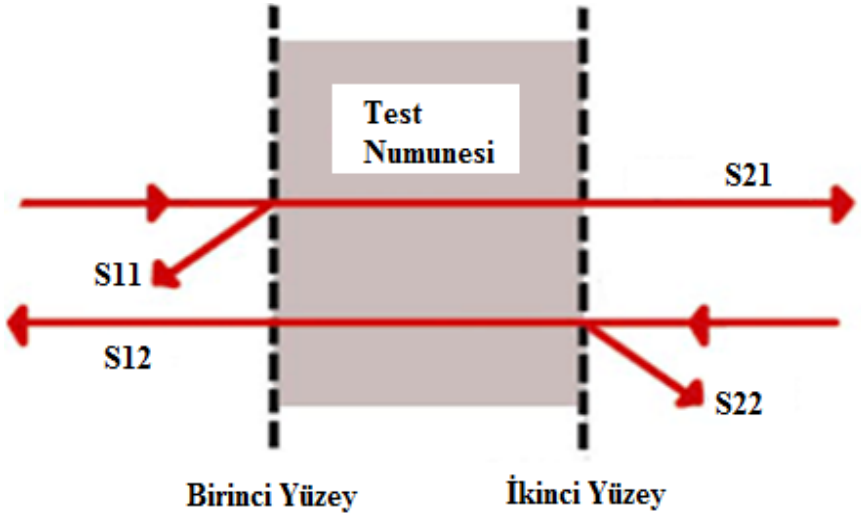
Elektriksel geçirgenlik söz konusu olduğunda Dielektrik Katsayısı'nın (ε) oldukça önemli bir yeri bulunmaktadır. Bir malzemenin, yüklerden kaynaklı enerjiyi depolayabilme kabiliyetini ifade eden Dielektrik Katsayısı aynı zamanda o malzemenin yalıtkanlığının da bir ölçüsüdür (Blythe ve Bloor, 2008). Elektromanyetik dalganın sahip olduğu elektriksel alanın malzemeye olan etkisinin veya malzemenin üzerine etkiyen elektriksel alana karşı davranışın göstergesi olarak Dielektrik özellikler ön plana çıkmaktadır. Dielektrik Katsayısı yüksek malzemeler, Radyo dalgalarını ve Mikrodalgaları absorbe etme konusunda etkin rol oynamaları sebebiyle RAM üretiminde sıkça tercih edilmektedir. Bu nedenle ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren örnekler ve katkısız PMMA örneğinin elektriksel geçirgenlik ve Dielektrik özelliklerini tespit etmek amaçlarıyla Mikrodalga testleri gerçekleştirilmiştir. İki farklı yöntem kullanılarak elde edilen Dielektrik Katsayıları öncelikli olarak 50 MHz – 50 GHz aralığında Radyo dalgaları ve Mikrodalgalar üreten 2.4 mm konektörlü Performans Probu yardımıyla elde edilmiştir. Dielektrik Katsayıların tespit edilmesinde kullanılan yöntemlerden biri de, Shim adı verilen ve iç boşluğunda belirli boyutlarda üretilen örneği barındıran, ek bir parçanın problar yardımıyla belirli frekans aralığındaki radyo dalgaları ışımalarına maruz bırakılması şeklindedir. Shim içerisine yerleştirilen örnek belirli bir Mikrodalga bandında ışına maruz bırakılır ve bir takım sapma bölgeleri oluşturur. Hem performans probu hem de shim ile yapılan testlerin sonucunda ε değerleri elde edilmiştir. Shim ile gerçekleştirilen testler Mikrodalgaların X bandında (8 – 12.5 GHz) yapılmış olup bu bant aralığında dielektrik değerlerinin değişimi incelenmiştir. Performans probunun kullanıldığı sisteme ait bir görsel Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Burada absorblayıcı yüzeyin üzerine yerleştirilen örneklere prob aracılığıyla radyo dalgaları gönderilmiş

ve yalnızca malzeme ile etkileşime geçen dalgalar tespit edilmiştir (Vohra ve El-Shenawee, 2021; Jayalakshmi ve diğ, 2018). Performans prob kullanılarak örneklerin ε' ve ε'' değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin ε''/ε' oranından kayıp eğrisi (loss tanjant) grafiği elde edilmiştir. Şekil 3.14 Performans probu ile gerçekleştirilen dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenlik testlerinin yapılması esnasında alınan bir görüntüyü belirtmektedir.



Şekil 3.14 : Performans prob uygulaması.

3.14.2 S-Parametreleri ve X- bandındaki Geçirgenlik (%), Yansıtma (%) ve Soğurma (%) Tespiti



Şekil 3.15 : S-Parametreleri ve malzeme yüzeyleri arasındaki ilişki.

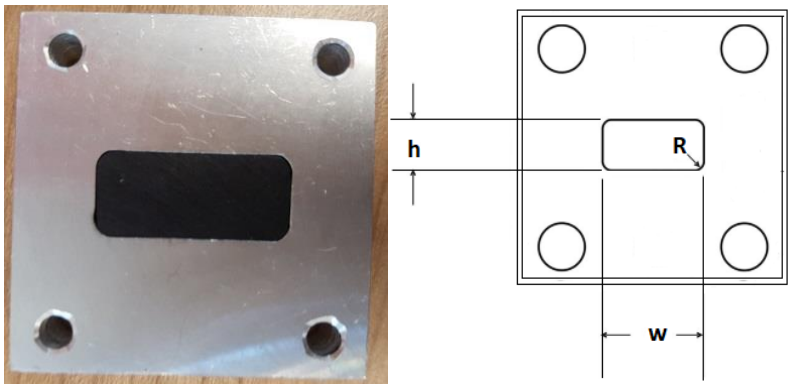
S-Parametreleri, radyo dalgalarının geçirgenlik, yansıtıcılık ve soğurma değerleri hakkında yorum yapabilmek amacıyla belirlenmiştir. Dört farklı S-Parametresi

belirlenerek malzemenin yansıtıcı mı yoksa emici mi olduğu tespit edilir. Bu S-Parametreleri S_{11}, S_{12}, S_{21} ve S_{22} olarak adlandırılırlar. S_{11} parametresinin başında bulunan 1 rakamı ilk yüzeye gelen dalgaları ifade etmekte olup S_{11} ilk yüzeyden yansıyan dalgalar hakkında bilgi vermektedir. S_{12}, ilk yüzeyden geçen dalgaları, S_{21} ikinci yüzeyden geçen dalgaları ve S_{22} ise ikinci yüzeyden yansıyan dalgaları göstermektedir. Malzemenin iki yüzeyi referans alınarak belirtilen 1 ve 2 numaralı yüzeylere ile S-Parametreleri ilişkisi Şekil 3.15'te verilmiştir.

S-Parametrelerinin belirlenmesi, X-bant aralığına uygun olarak kullanılan WR90 dalga kılavuzu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu dalga kılavuzu iki N-tipi VNA (Vektör Ağ Analizcisi) kablosu ve N-tipi WR90 adaptör arasına yerleştirilmek suretiyle bir araya getirilmiş ve WR90 dalga kılavuzunun içerisine ise örnekler konulmuştur. VNA kablolar, WR90 ve konnektörler ile oluşturulan bu sistem referans düzlemlerini 1 ve 2 olarak numaralayacak şekilde ve 8.2 - 12.4 GHz frekans aralıklarında dalgalar oluşturacak şekilde kalibre edilmiştir. Agilent Technologies markasının N5225A model cihazı kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada referans düzlemleri arasında "Transmission Line and Free Space" yöntemi uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Ölçüm modeli "Reflection/Transmission Mu and Epsilon" şeklindedir. Böylelikle 8.2 ve 12.4 GHz aralığında X-bandında gerçekleştirilen Mikrodalga Testleri örneklerin ε' ve ε'' değerleri ile μ' ve μ'' değerlerinin bulunmasını sağlamıştır. ε' ve ε'' değerleri ile μ' ve μ'' değerleri örneklerin dielektrik katsayıları ve manyetik geçirgenliklerinin sırasıyla gerçek ve sanal bölümlerini ifade eder. Böylece ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA/Boraks kompozitlerinin ve katkısız PMMA polimerinin elektriksel ve manyetik geçirgenliği hesaplanmıştır. Kısaca "Shim" adını verdiğimiz WR90 dalga kılavuzu, ¼ dalga boyu ebatlarına uygun olarak tasarlanmış Şim (Shim) ve yüksek saflıkta (%99 saflıkta) alüminyum blok parçadan frezelenerek üretilmiştir. Çizelge 3.1 Shim'in tasarım boyutlarını göstermektedir. Shim'e ait görüntü Şekil 3.16'da ve Shim için üretilen örneklere ait görüntüler ise Şekil 3.17'de verilmiştir.

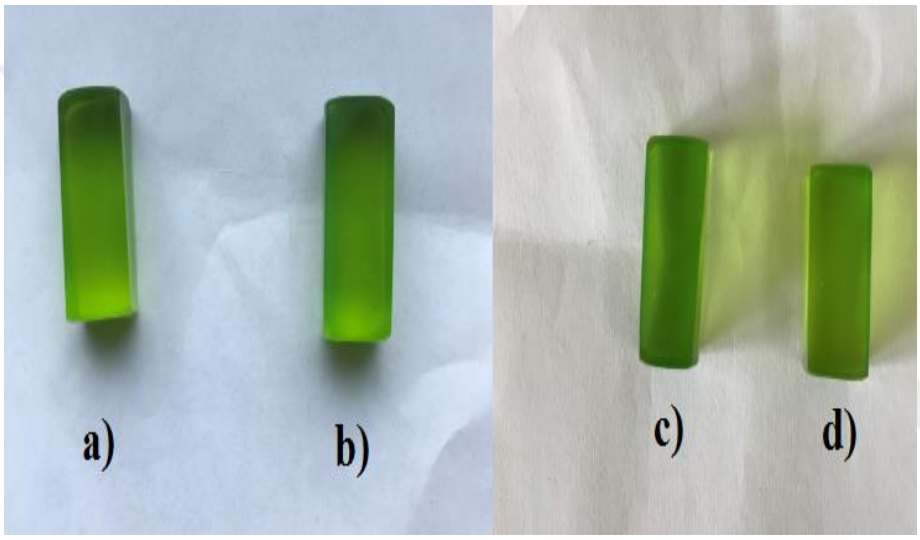
Çizelge 3.1 : Shim tasarım boyutları. (Chauhan, 2008)

Bant Aralığı	Dalga Kılavuzu	w (mm)	h (mm)	R (mm)	Kalınlık (mm)
X-Bandı 8.2 - 12.4 GHz	WR90	22.86 ± 0.01	10.16 ± 0.01	0.13	9.78 ± 0.02

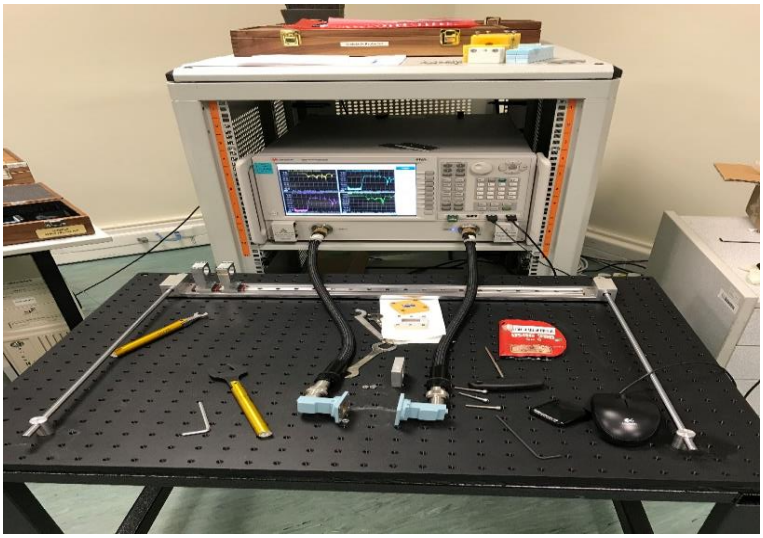


a) b)

Şekil 3.16 : Alüminyumdan (%99 saflıkta) hazırlanan a) Şim (Shim)'e ait görüntü ve b) Shim boyutlarını gösteren kroki.



Şekil 3.17 : Şim (Shim) için sentezlenen a) %2 b) %5 c) %10 Boraks içeren ve d) katkısız PMMA örnekleri.



Şekil 3.18 : Agilent Technologies markasının N5225A model cihazı ve VNA kablolarından oluşan Mikrodalga testlerinin gerçekleştirildiği sistem.

Şekil 3.18’de ise S-Parametreleri sonuçlarını elde etmek amacıyla kurulumu gerçekleştirilen sistemin bir görseli bulunmaktadır. Cihazın kendine ait bir arayüzü olması sebebiyle elde edilen sonuçlar doğrudan hesaplanabilmekte ve grafik haline getirilebilmektedir. Mikrodalga testleri gerçekleştirilirken kullanılan problar Şekil 3.19’da gösterilmiştir.

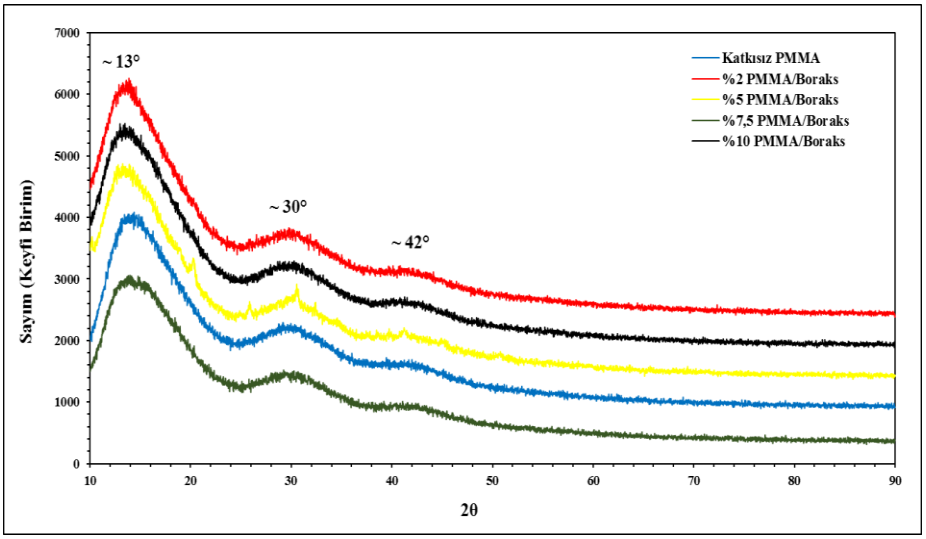


Şekil 3.19 : Mikrodalga testlerinde kullanılan problar.

4. BULGULAR

4.1. Sentezlenen Örneklerin XRD Analizi Sonuçları

XRD sonuçları üretilen örneklerin yapısal karaktrizasyonu ile ilgili bilgiler içermektedir. Malzemeye uygulanan X-ışınlarının kırınım değerleri olan 2θ açı değerleri malzemenin içerisinde bulunan bileşenlerin belirlenmesini sağlamaktadır. XRD sonuçları göz önüne alındığında, 10° - 20°, 25°- 35° 2θ açı aralıklarında ve 42° 2θ açısında oluşan tepeler PMMA polimerini belirtirken (Şekil 4.1) 19°, 22°, 25°, 31° ve 35°'de bulunan pik değerleri ise Boraks kristallerine işaret etmektedir. PMMA/Boraks kompozitlerinin ve katkısız PMMA'nın XRD grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir. 13° yakınlarında kuvvetli bir tepe, 30° civarında zayıf bir tepe ve 42° civarında daha zayıf bir tepe oluşumu söz konusudur. 13°'de oluşan tepe PMMA'yı oluşturan polimer zincirinin dağılımı ve dizilimi hakkında bilgi verirken 30°'de oluşan tepe Br^- iyonlarının oluşumuna bağlı olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.1 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5, %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın XRD spektrası.

ATRP yönteminde katalizör olarak kullanılan CuBr ve çözücü (solvent) olarak kullanılan Bu4NBr'de bulunan Br^- iyonları bu tepenin oluşmasına neden olmuştur. 42°'de ortaya çıkan tümsek ise PMMA'nın amorf yapısına işaret etmektedir. Pik

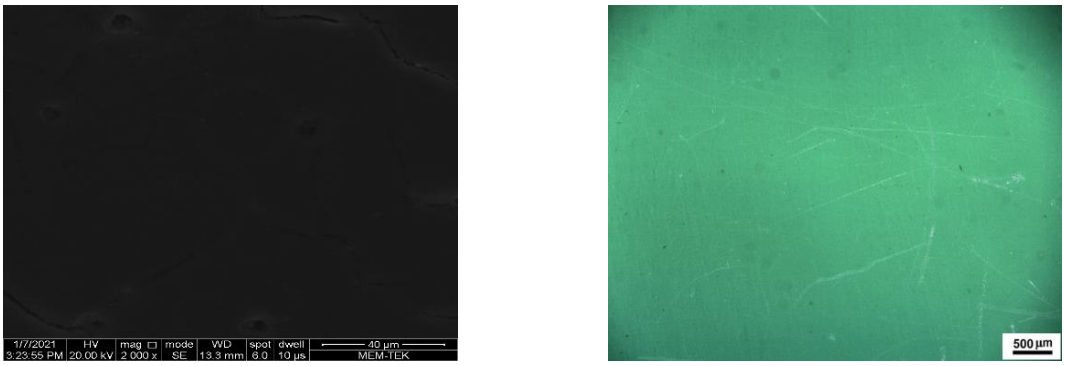
değerlerinin bulunduğu açılardan da yola çıkarak denklem 3.2'de verilen Scherrer Denklemi ile örneklerin yapısına katılmış olan Boraks kristallerinin kristal çapları hesaplanmıştır. Ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA polimer kompozitlerin kristalit boyutu ve katkısız PMMA'nın tanecik büyüklüğü Çizelge 4.1'de gösterilmiştir. Sonuçlar, PMMA'nın içerisinde bulunan Boraks miktarının artması ile kristalit çapının arttığını göstermektedir ve bu kristalit boyutları katkısız PMMA'nın tanecik boyutundan daha büyük olmaktadır. Boraks miktarının artması ile topaklaşma miktarı da artmaktadır ve Boraks kristalleri diğer Boraks kristallerini kendine yakın tutma eğilimindedir. XRD analizinden elde edilen bu sonuçlar SEM ve Stereomikroskop görüntüleriyle uyum içerisindedir.

Çizelge 4.1 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5, %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın XRD analizi sonuçlarına bağlı kristalit boyutları.

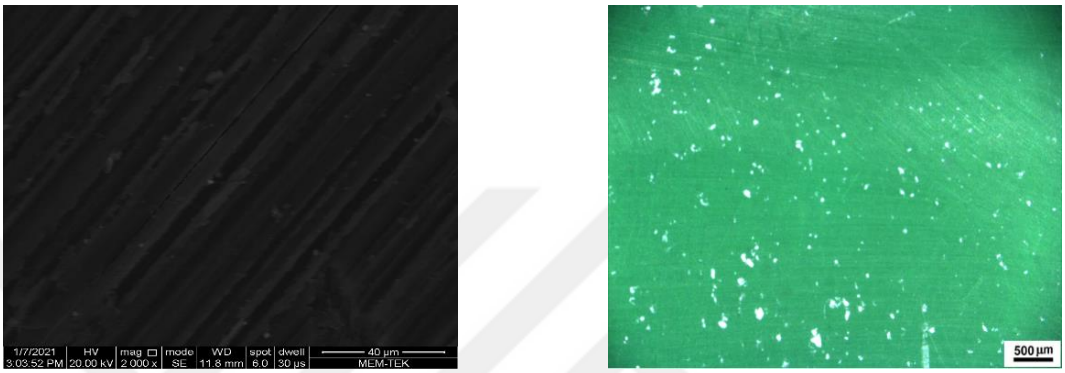
Örnek	Kristalit Boyutu (nm)	2θ°
Katkısız PMMA	320.3	22°
%2 PMMA/Boraks	486.7	35°
%5 PMMA/Boraks	514.4	25°
%7.5 PMMA/Boraks	590.2	19°
%10 PMMA/Boraks	607.1	31°

4.2 SEM Analizi ile Yüzey Morfolojisinin İncelenmesi

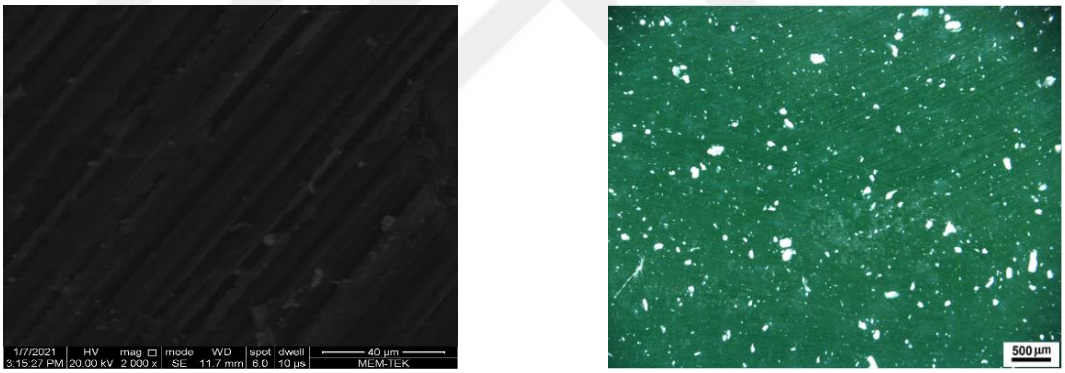
Sentezlenen örneklerin yüzey morfoloisi incelendiğinde, SEM analizinden elde edilen yüzey görüntülerinde, PMMA içerisinde Boraks partiküllerinin homojen dağılımı tespit edilmiştir. Ağırlıkça Boraks yüzdesinin artması ise çözünmeyen ve yüzeyde biriken Boraks miktarını da arttırmaktadır. Ayrıca Boraks miktarındaki artış topaklaşmayı da arttırmış ve en yüksek topaklaşma miktarı ağırlıkça %10 Boraks içeren PMMA/Boraks numunesinde görülmüştür. Ayrıca SEM görüntülerinde tespit edilen önemli noktalardan biri katkısız PMMA'ya göre Boraks miktarının artması ile Boraks katkılı PMMA kompozitlerinin yüzeylerinde meydana gelen bozulmalardır. Boraks eklenmesi katkısız PMMA'nın yüzey pürüzlülüğünü arttırmış ve ağırlıkça Boraks içeriğinin artması ile de bu yüzey bozulmaları ve yüzey pürüzlülüğü daha da belirginleşmiştir. Şekil 4.2'de görülebileceği gibi Boraks miktarı topaklaşmayı da etkilemiş ve yüzeyde oluşan topaklaşmalar yüzey pürüzlülüğüne doğrudan etkide bulunmuştur. Şekil 4.2'de ağırlıkça farklı miktarda Boraks içeren PMMA/Boraks örneklerinin SEM analizi ve Stereomikroskop görüntüleri bir arada verilmiştir.



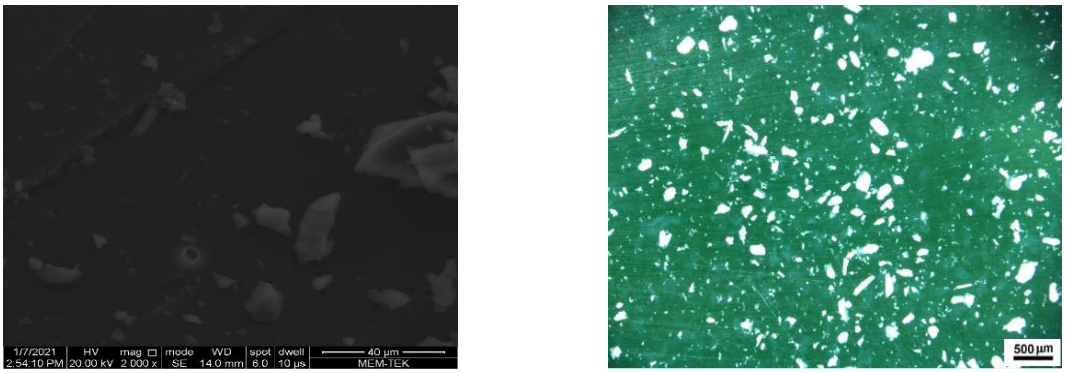
a) Katkısız PMMA



b) %2 PMMA/Boraks

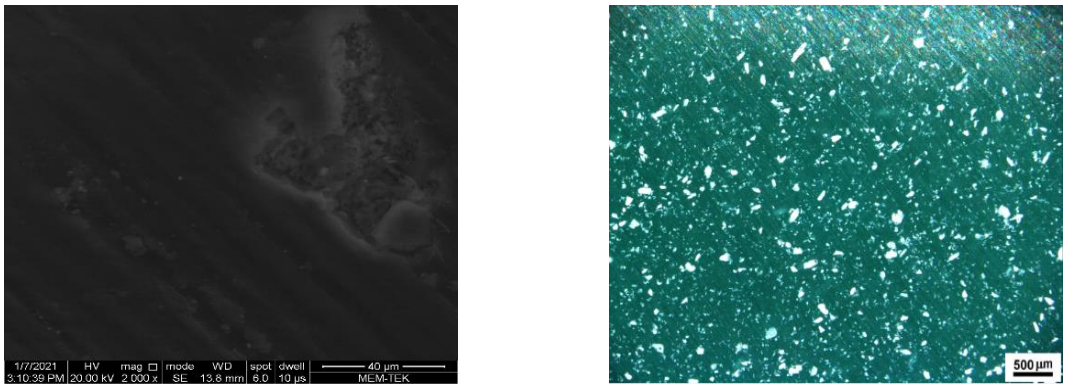


c) %5 PMMA/Boraks



d) %7.5 PMMA/Boraks

Şekil 4.2 : SEM ve Stereomikroskop görüntüleri a) katkısız PMMA, b) %2, c) %5, d) %7.5 ve e) %10 Boraks içeren PMMA/Boraks.



e) %10 PMMA/Borax

Şekil 4.2 (devam) : SEM ve Stereomikroskop görüntüleri a) katkısız PMMA, b) %2, c) %5, d) %7.5 ve e) %10 Boraks içeren PMMA/Boraks.

Yüzey pürüzlerinin çoğalması, Temas Açısı Ölçümü sonuçlarında da fark edilebileceği gibi, yüzeylerin su tutma kapasitesini ve ıslanabilirliğini arttırmıştır. Islanabilirliğin doğrudan hidrofilik-hidrofobik yüzey özellikleri ile ilgili olması sebebiyle daha hidrofilik bir yüzey geliştirilmesine ön ayak olmuştur. Temas Açısı Ölçümünden ve Stereomikroskop görüntülerinden alınan sonuçlar SEM görüntülerini destekler niteliktedir. Ayrıca Boraks ilavesi artışı, zımpara sonrasında örneklerde enine yönde daha derin çatlaklar oluşturmuştur ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. SEM görüntüleri Boraks miktarı artışı ile daha homojen bir dağılım örnekler içerisinde gerçekleştiğini göstermektedir.

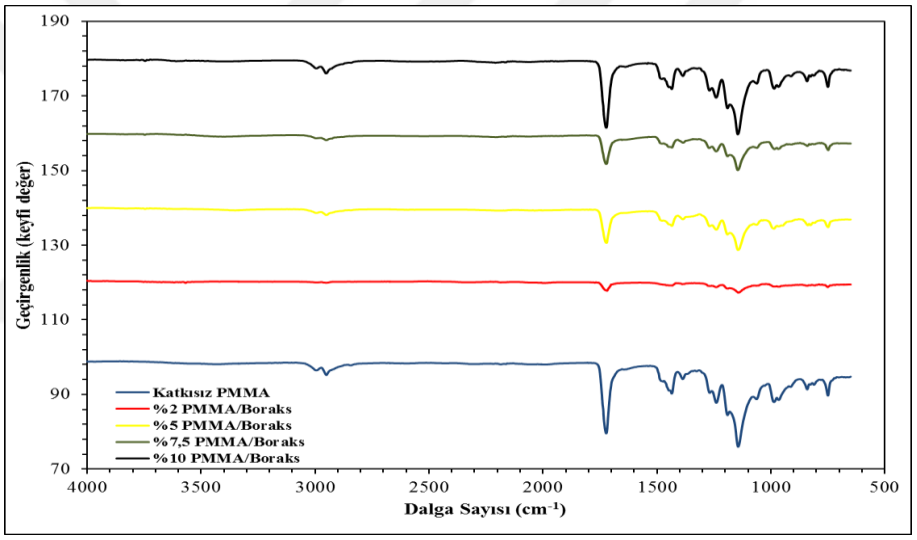
4.3 Stereomikroskop Görüntüleri

Örneklerin yüzey morfolojisini belirlemek ve yüzey ile ilgili yorum yapabilmek amaçlarıyla stereomikroskop yardımıyla numunelerin yüzeylerinden 3 boyutlu görüntüler alınmıştır. 20x büyütme ölçeğinde alınan görüntüler Şekil 4.2'de SEM görüntüleri ile birlikte sunulmuştur. Bu görüntüler Boraks bileşeninin PMMA polimerinde düzenli ve homojen bir dağılıma sahip olduğunu göstermektedir. Farklı miktarlarda Boraks içeren tüm numunelerde homojen dağılım gerçekleşmiştir. Farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA / Borax polimer kompozit numunelerinin yüzey görüntülerine bakıldığında, Boraks miktarındaki artış kompozit bileşimdeki Boraks kristallerinin topaklaşma gösterdiğini ve Boraks malzemesinin PMMA'da çözünme hızının düştüğünü göstermektedir. Stereomikroskop görüntüleri ile örnekler arasındaki topaklaşma farkı ve yüzey pürüzlülüğü değişimi açık bir şekilde görüntülenebilmiştir.

Bununla birlikte yüzeyler daha yumuşak ve aşınmaya karşı bir miktar daha dirençli bir yapıya evrilmişlerdir.

4.4 FTIR Analizi

Ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks Dekahidrat ilave edilerek üretilen numunelerde bağ yapılarını görmek ve oluşan ile ayrılan bağları belirlemek için FTIR Spektroskopisi uygulanmıştır. FTIR spektrumu, örneklerin yapılarında bulunan bilinmeyen bileşenlerin, numunelerde bulunan bağ sayısının ve malzemenin kalitesinin belirlenmesini sağlamıştır. FTIR analizi sonuçları, dalga boyuna karşı yüzde geçirgenliği gösterir ve numunelerdeki bağlar hakkında bilgi sağlar. FTIR Spektrumu Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3 :Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın FT-IR Spektrası.

Sırasıyla ~2990 cm^{-1}~ 2950 cm^{-1}, ~ 1722 cm^{-1}, ~ 1435 cm^{-1}, ~ 1240 cm^{-1}, ~ 1144 cm^{-1}, ~ 985 cm^{-1}, 841 cm^{-1}, 810 cm^{-1} ve ~ 750 cm^{-1} dalga boylarında geçirgenliğin azaldığı pik değerler görülmektedir. Bu sonuçlar dikkate alındığında, 2990 cm^{-1} dalga sayısı CH_2 grubundaki C-H asimetrik gerilme (asymmetric stretching) ve 2950 cm^{-1} dalga sayısı CH_3 radikal grubundaki C-H asimetrik gerilme (asymmetric stretching) titreşimini gösterirken 1722 cm^{-1} C=O güçlü gerilme (strong stretching) titreşimi ifade etmektedir. 1435 cm^{-1} dalga sayısında C-H bükme veya makaslama (bending or scissoring) titreşimi tespit edilirken, 1240 cm^{-1} C-O gerilme (stretching) titreşimi ve 1144 cm^{-1} C-H_2 bükme (bending) titreşimi tespit edilmiştir. 985 cm^{-1} dalga sayısında BO_3 simetrik gerilme (symmetric stretching) titreşimi ve 750 cm^{-1} dalga sayısında ise

C=O bükme (bending) titreşimi bulunmaktadır. Bu bağ özellikleri tüm örneklerde geçerli olsa da (%2, %5, %7.5 ve %10 Boraks/PMMA ve katkısız PMMA), %10 Boraks Dekahidrat içeren PMMA ve katkısız PMMA örnekleri için ~841 cm^{-1} dalga sayısında başka bir tepe değeri elde edilmiştir. Bu dalga boyunda oluşan tepe, C-H sallanma (rocking) titreşimi gösterir. FTIR analizi sonucunda 841 cm^{-1} dalga boyundaki tepe değeri literatürden farklıdır ve PMMA'ya Boraks Dekahidrat eklenerek oluşturulan güçlü C-H bağları nedeniyle ortaya çıkmıştır. Ayrıca 812 cm^{-1} dalga sayısında oluşan pik ise B-O-H kıvrılma titreşimini işaret etmektedir ve bu titreşim Boraks katkısı ile PMMA zincirine eklenen Bor atomlarının gerçekleştirdikleri bağları göstermektedir. Dalgaboylarına karşılık gelen bağ türleri Çizelge 4.2'de gösterilmektedir.

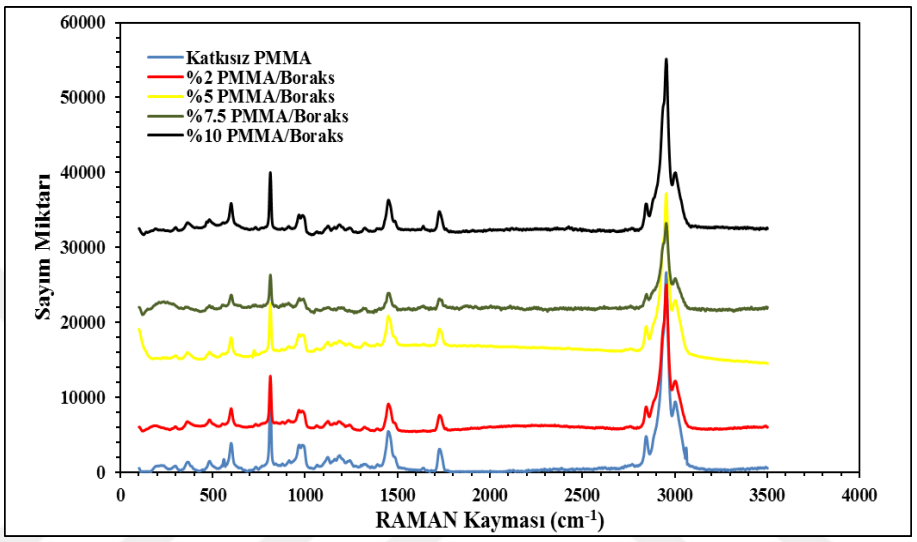
Çizelge 4.2 : Dalga sayılarına göre moleküler yapıda oluşan FT-IR bağları.

Dalga Sayısı (cm^{-1})	Bağ Türü
2990	C-H Asimetrik Gerilme ($-CH_2$)
2950	C-H Asimetrik Gerilme ($-CH_3$)
1722	C=O Güçlü Gerilme
1435	C-H Bükme veya Makaslama
1240	C-O Gerilme
1144	C-H_2 Bükme
985	BO_3 Simetrik Gerilme
841	C-H Sallanma
810	B-O-H Kıvrılma
750	C=O Bükme

4.5 Raman Analizi

FTIR ölçümleri ile Infra-Red dalga boyu aralığında elde edilen sonuçlara ek olarak, örneklerin polimer kompozitler olması nedeniyle Raman analizinin de yapılması gerektiği düşünülmüştür. Böylece her iki yöntemle de numunelerin bileşimi, yapısı ve bağlanma özellikleri birbiriyle uyumlu olacak şekilde ortaya çıkarılmıştır. Raman analizinin bağların yapısını bozan ya da değiştiren bir özelliği olmadığından moleküller üzerinde etkisi yoktur. Her bir maddeden elde edilen spektrum farklı ve o maddeye özel olduğu için numunelerde oluşan yapıları tanımlamak için Raman Spektrometresi kullanılmıştır. Raman analizi sonuçları, 2952 cm^{-1} ve 810 cm^{-1} Raman kaymalarında iki büyük pik ve 605 cm^{-1}, 980 cm^{-1}, 1455 cm^{-1} ve 1730 cm^{-1} Raman

kayması değerlerinde ise dört küçük pik göstermektedir. 2952 cm^{-1} Raman kayma değerindeki tepe C-H, asimetrik gerilme (asymmetric stretching) titreşiminin CH_3 radikalinde meydana gelen titreşimini gösterir ve 813 cm^{-1}'deki tepe değeri ise C-O-C simetrik gerilme (symmetric stretching) titreşimini gösterir. 605 cm^{-1}, 980 cm^{-1}, 1455 cm^{-1} ve 1730 cm^{-1} Raman kaymalarındaki küçük zirveler, sırasıyla O-C sallanma (rocking), O-CH_3 bükme (bending) ve C=O simetrik gerilme (symmetric stretching) titreşimlerini gösterir. Raman analizi spektrumu Şekil 4.4'te verilmiştir.

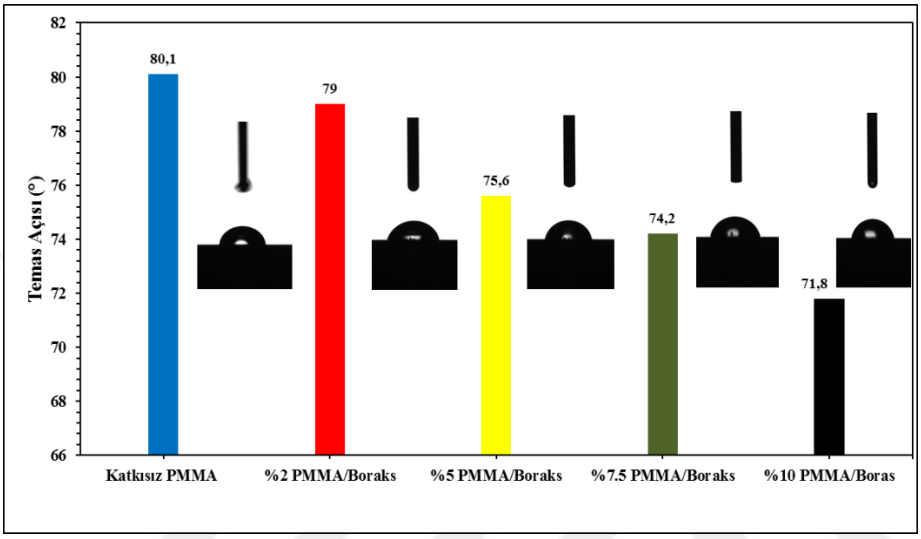


Şekil 4.4 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks ve katkısız PMMA'nın Raman Spektrası.

4.6 Temas Açısı Ölçüm Analizi

Temas Açısı Ölçümü Analizi, ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 Boraks içeren PMMA/Boraks polimer kompozitlerine ve katkısız PMMA polimerine uygulanmıştır. Temas açısı ölçümü örneklerin su tutma kapasitelerinin tespit edilmesi, ıslanabilirlik özelliklerinin belirlenmesi ve hidrofilik-hidrofobik yüzey özelliklerinin anlaşılması hedeflenerek gerçekleştirilmiştir. Katkısız PMMA polimerinin ve %2, %5, %7.5 ile %10 Boraks içeren PMMA/Boraks kompozitlerinin su damlası kullanılarak ölçülen yüzey temas açısı değerleri sırasıyla, 80.1°, 79.1°, 79°, 75.6°, ve 74.2° şeklindedir. Boraksın ağırlıkça yüzdelik değerinin yükselmesi, temas açısı ölçüm değerlerinin azalması ve daha hidrofilik yüzeyler elde edilmesine yol açmıştır. Bu sonuçlar daha önce Stereomikroskop ve SEM testlerinden alınan görüntüler yardımıyla tespit edilen topaklaşma ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarıyla tutarlıdır. Boraks katkısı PMMA'nın yüzeyindeki zincirler üzerindeki çekim kuvvetini arttırarak yüzey enerjisini olumlu

yönde etkilemiş yüzey enerjisinin artışına sebep olmuştur. Boraks kristalinin miktarında, kristal boyutunda ve topaklaşmasından meydana gelen artış hem yüzey enerjisinin hem de hidrofilikliğin artışına sebebiyet vermiştir. Boraksın yüzeyde oluşturduğu pürüzlülük ıslanabilirliği arttırarak temas açısı değerlerinin düşmesine katkı sağlamıştır. Temas açısı değerleri ve temas açısı ölçümü esnasında su damlalarının yüzeyler üzerinde tutunma şekilleri Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

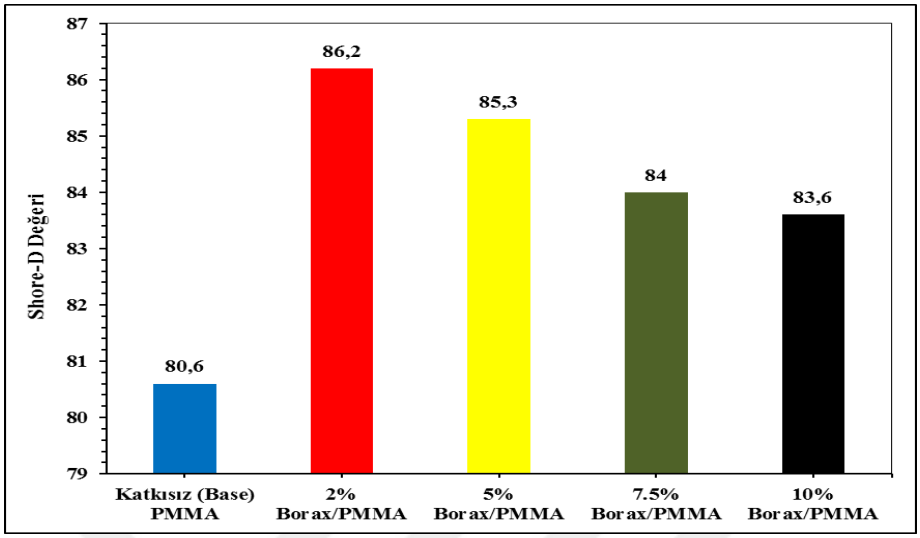


Şekil 4.5 : Ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Borax ve katkısız PMMA'nın Temas Açısı Ölçümü sonuçları ve oluşan damla şekilleri.

4.7. Sertlik Testi Analizi

Bu tez bünyesinde üretilen örneklerin mekanik dayanımlarının ve sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla Shore testinin polimerler için uygun olan D sınıfı Shore-D testi uygulanmıştır. Her bir örnek için hem her köşesinde bulunan noktalardan hem de merkezinden alınan beş farklı ölçümün ortalama değerleri üzerinden karşılaştırma yapılmıştır. Katkısız PMMA örnekleri için ortalama 80.6 olan Shore-D sertliği, ağırlıkça %2 Boraks katkılı örnekler için 86.2, %5 Boraks katkılılar için 85.3, %7.5 Boraks katkılılar için 84 ve %10 Boraks katkılı örnekler için ise 83.6 olarak ölçülmüştür. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi ağırlıkça Boraks katkısı, katkısız PMMA'ya göre katkılı polimer kompozitlerin Shore-D değerlerinin ve dayanımlarının yükselmesine neden olmuştur. Fakat ağırlıkça %5 ve %5'ten fazla Boraks içeren örneklerde gerçekleşen topaklaşma, hem ölçüm alınan yerlerdeki değerlerin farklılaşmasına hem de sertlik ve dayanım özelliklerinin düşmesine neden olmuştur. Bununla beraber sertlik halen katkısız PMMA'dan daha yüksek olup topaklaşmanın

azalması ve Boraks'ın PMMA matris içerisinde daha iyi dağılım gerçekleştirmesi tekrar sertlik ve dayanım miktarını arttıracaktır.



Şekil 4.6 : Shore-D sertlik testi sonuçları.

4.8 Ultrasonik Test Yöntemi ile Elastik Özelliklerin Belirlenmesi

Bu çalışmada problardan elde edilen boyuna ve enine dalga hızları Young Modülü, Poisson Oranı, Hacim Modülü, Mikrosertlik ve Kayma Modülü hesaplanması amacıyla kullanılmıştır. Denklem 4.1'de enine ve boyuna dalga hızlarına bağlı Young Modülü hesabı verilmiştir (Wright, 1996).

$$E = \frac{\rho V_S^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \tag{4.1}$$

Denklem 4.2'de enine ve boyuna dalga hızlarına bağlı Kayma (Shear) Modülü hesabı verilmiştir (Van Velsor ve diğ, 2011).

$$G = \rho V_s^2 \tag{4.2}$$

Denklem 4.3'te Hacim Modülü formülü bulunmaktadır.

$$K = \rho(V_p^2 - \frac{4}{3}V_s^2) \tag{4.3}$$

Denklem 4.4 ve denklem 4.5'te ise Poisson Oranı ve Mikrosertlik açıklamaktadır (Sakuda ve diğ, 2013).

$$\nu = \frac{(V_p^2 - 2V_s^2)}{2\,(V_p^2 - V_s^2)} \tag{4.4}$$

$$H = \frac{E(1-2\nu)}{6(1+\nu)} \quad (4.5)$$

Burada;

V_p: Boyuna dalga hızı [m/s]

V_s: Enine dalga hızı [m/s]

ρ: yoğunluk [kg/m^3]

E: Young (Elastisite) Modülü [GPa]

G: Kayma (Shear) Modülü [GPa]

K: Hacim (Bulk) Modülü [GPa]

ν: Poisson Oranı

H: Mikrosertlik [GPa]

Şeklinde ifade edilebilir.

Farklı miktarlarda Boraks katkısı yapılmış PMMA/Boraks polimer kompozitlerin modül değerleri bulunurken yukarıdaki denklemlerde de görülebileceği gibi yoğunluk değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneklerin toz haline getirilerek çözücü içerisinde çözündürülmesi ile elde edilen yoğunluk değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Katkısız PMMA ve ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA örneklerinin yoğunluk değerleri.

Örnek	Yoğunluk [kg/m^3]
Katkısız PMMA	1068
%2 Boraks/PMMA	1094
%5 Boraks/PMMA	1089
%7.5 Boraks/PMMA	1124
%10 Boraks/PMMA	1170

Ultrasonik Testi'nden elde edilen ses hızları ile hesaplanmış modül değerleri Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te verilmiştir. Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5.'te de görülebileceği gibi Boraks katkısının ağırlıkça artışı Young Modülü, Kesme Modülü, Hacim Modülü ve Mikrosertlik değerlerinde artışa sebep olmuş fakat Poisson Oranında düşüşe neden olmuştur. Young modülü ve Kayma modülündeki artış esnemeye ve elastik deformasyona karşı direncin artması ve hem basma hem de kesme kuvvetine karşı

dayanımın yükselmesi şeklinde ifade edilir. Aynı zamanda Kayma Modülü artışı ile polimer kompozitler daha rijit bir hal almışlardır. Shore-D sonuçlarında da görüldüğü gibi sertlikteki yükseliş enine ve boyuna dalgaların hızları kullanılarak hesaplanan mikrosertlikteki yükseliş ile tutarlıdır.

Çizelge 4.4 : Grindo Sonic ultrasonik test cihazından elde edilen ses hızları ile hesaplanan mekanik özellikler.

Örnekler	Poisson Oranı (ν)	Young Modülü (E) [GPa]	Kesme Modülü (G) [GPa]	Mikrosertlik [GPa]	Bulk (Hacim) Modülü [GPa]
Katkısız PMMA	0,359	4,625	1,701	0,159	5,478
%2 Boraks/PMMA	0,356	4,796	1,764	0,165	5,680
%5 Boraks/PMMA	0,352	4,818	1,772	0,166	5,706
%7.5 Boraks/PMMA	0,343	5,019	1,846	0,173	5,945
%10 Boraks/PMMA	0,347	5,273	1,939	0,181	6,245

Çizelge 4.5 : Normal prob ve açılı prob ile ölçülmüş ses hızı değerleri ile hesaplanan mekanik özellikler.

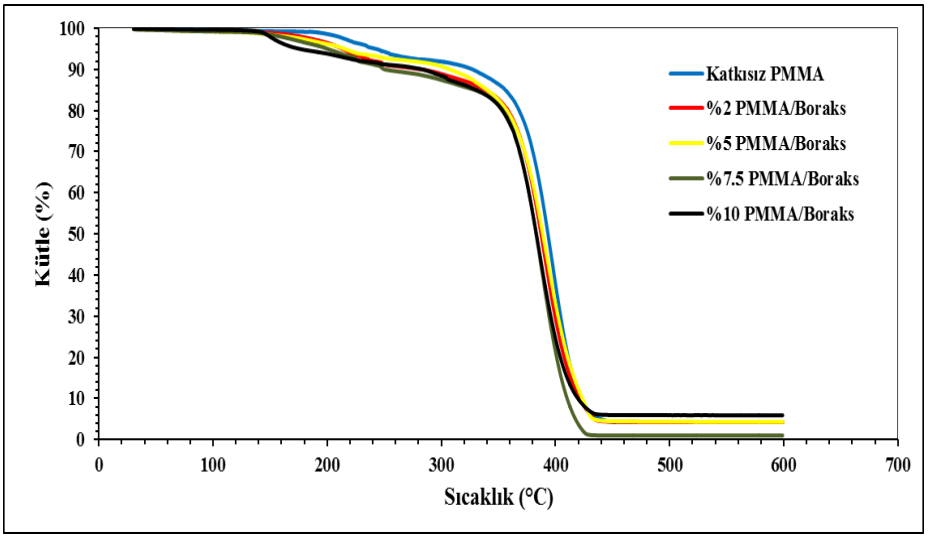
Örnekler	Poisson Oranı (ν)	Young Modülü (E) [GPa]	Kesme Modülü (G) [GPa]	Mikrosertlik [GPa]	Bulk (Hacim) Modülü [GPa]
Katkısız PMMA	0,359	5,185	1,907	0,179	6,141
%2 Boraks/PMMA	0,359	5,400	1,986	0,186	6,395
%5 Boraks/PMMA	0,358	5,585	2,054	0,193	6,615
%7.5 Boraks/PMMA	0,343	5,977	2,199	0,206	7,079
%10 Boraks/PMMA	0,348	6,234	2,293	0,215	7,383

Boraks ilavesi yüksek basınca ve kuvvete dayanımı etkin kılmıştır. Plastik deformasyona karşı direnç artmıştır. Bu sonuçlar, PMMA/Boraks polimer kompozitler içerisindeki ağırlıkça Boraks derişiminin yükselmesi ile daha dayanıklı ve daha rijit fakat daha gevrek ve aynı zamanda daha sünek malzemelerin elde edildiğini

göstermektedir. Bu sonuç polimer kompozitlerin katkısız PMMA'ya göre daha yüksek kuvvete dayandığını fakat daha ani kırılmalar yaşadığını göstermektedir.

4.9 TGA ve DSC Analizi

30 °C ile 600 °C arasında 10 °C/dk sıcaklık değişimi ve 10 mg kütleye sahip toz örnekler ile gerçekleştirilen TGA testi sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmiştir. TGA sonuçlarına göre sıcaklığa bağlı kütle kaybı çift adımlı olarak gerçekleşmiştir. Öncelikle 179 °C ile 215 °C aralığında bir miktar kütle kaybı olduktan sonra asıl kütle kaybı 380 °C ile 420 °C arasında gerçekleşmiştir. Bu sıcaklık aralıklarında tüm örnekler kütlelerinin yaklaşık %80 kadarlık kısmını kaybetmişler ve deformasyona uğramışlardır. 180 ve 210 °C arasında gerçekleşen kütle kaybı PMMA içerisine eklenmiş Boraks'ın bir miktarının bu sıcaklık aralığında PMMA'dan ayrılması sebebiyle ortaya çıkmıştır. Boraks'ın ıslak (yapısına su molekülleri bağlı) durumda olması mevcut su moleküllerinin buharlaşmasına ve kütlenin azalmasına katkıda bulunmuştur. Şekil 4.7'de de görülebileceği gibi katkısız PMMA'ya göre daha belirgin bir kayıp oluşmuş ve polimer kompozitteki Boraks miktarı arttıkça da kütle kaybı artmıştır. 380 °C'den sonra oluşan büyük kütle kaybı ise artık PMMA'nın tamamen bozunmaya başladığına işaret etmektedir. Boraks katkısı PMMA'nın sıcaklık artışına karşı dayanımını azaltsa da bu azalış en fazla 5 °C fark ile ağırlıkça %7.5 Boraks içeren PMMA matrisinde gerçekleşmiştir. PMMA bir termoplastik olarak Boraks katkısı ile yine bu özelliğini korumuştur.



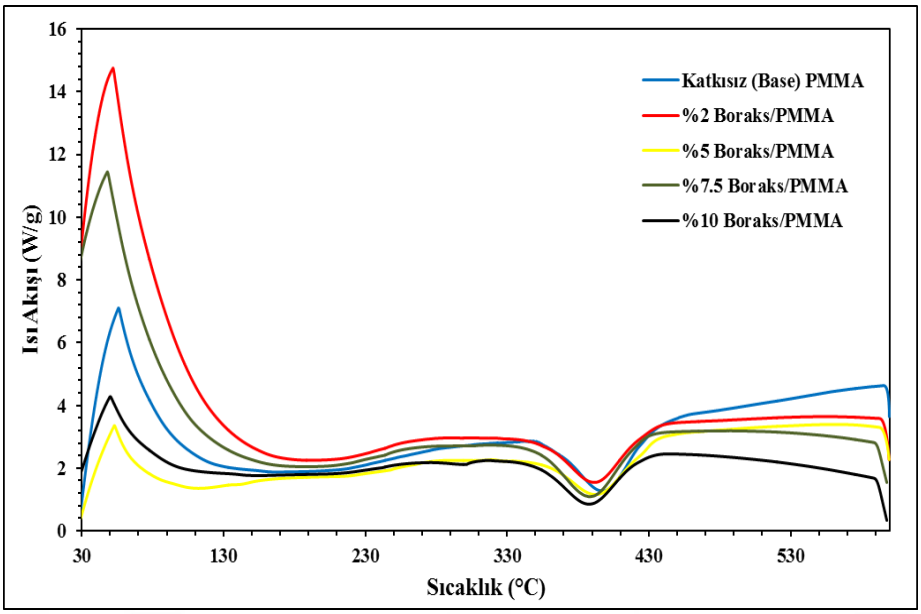
Şekil 4.7 : Termogravimetrik Analiz sonuçları.

Örneklerin tamamı 254 °C'ye kadar kütlelerinin %90'a yakınını korurken %20 oranında kütle kaybını ise 357 °C'den sonra tecrübe etmişlerdir. Çizelge 4.6'da da gösterildiği gibi Boraks kaynaklı kütle kaybı ortadan kalktıktan sonra kütle kayıplarının oranları belirli sıcaklık değerlerinde tüm örnekler için eşit olmuştur. Çizelge 4.6'da tüm örnekler için % 5, % 10, % 20 ve % 30 oranlarında kütle kayıplarının hangi sıcaklık değerlerinde ortaya çıktığı gösterilmiştir.

Çizelge 4.6 : Katkısız PMMA ve %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks örneklerinin sıcaklığa bağlı yüzde kütle kaybı değerleri.

Kütle Kaybı	Katkısız PMMA	%2 PMMA/ Boraks	%5 PMMA/ Boraks	%7.5 PMMA/ Boraks	%10 PMMA/ Boraks
%5	238 °C	213 °C	215 °C	204 °C	179 °C
%10	324 °C	282 °C	307 °C	254 °C	287 °C
%20	365 °C	358 °C	357 °C	358 °C	357 °C
%30	377 °C	372 °C	373 °C	373 °C	372 °C

DSC analizi de TGA ile aynı sistem üzerinden gerçekleşmesi sebebiyle 30 °C ile 600 °C aralığındaki sıcaklık değerlerinde işlem görmüştür. DSC sonuçlarına bakıldığında ise camsı geçiş sıcaklığının 106 °C ile 117 °C arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Erime sıcaklığının ise 395 °C ile 397 °C arasında sıcaklık değerlerinde bulunduğu tespit edilmiştir. Boraks eklenmesi ile erime noktasında katkısız PMMA'ya göre düşüş olsa da bu düşük maksimum 2°C kadar olmuştur. Fakat erime işleminin tamamlanması için yalnız ağırlıkça %2 Boraks içeren PMMA hariç diğer (%5, %7.5 ve %10 Boraks içeren PMMA/Boraks polimer kompozitler) örneklerde daha fazla enerji ve ısı akışı gerekmiştir. Şekil 4.8'de DSC termogram grafiği gösterilmiştir. Camsı geçiş sıcaklığı Boraks katkısı ile artmış olsa da Boraks miktarının ağrılıkça artışa devam etmesi camsı geçiş sıcaklığını olumsuz etkilemiştir. Her ne kadar camsı geçiş sıcaklığında bir miktar azalma olsa da bu azalma kayda değer farklar ortaya koymamaktadır. Çizelge 4.7'de DSC analiz sonuçlarına göre katkısız PMMA ve ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 Boraks içeren PMMA polimer kompozitlerin camsı geçiş ve erime sıcaklıkları verilmiştir. TGA ve DSC sonuçları göze alındığında Boraks katkısının PMMA matrisin ısıl özellikleri üzerinde büyük değişikliklere neden olmadığı tespit edilmiş ve PMMA Boraks'ın diğer özelliklerine yapmış olduğu olumlu katkıların yanında termal özelliklerini korumaya devam ettiği görülmüştür.



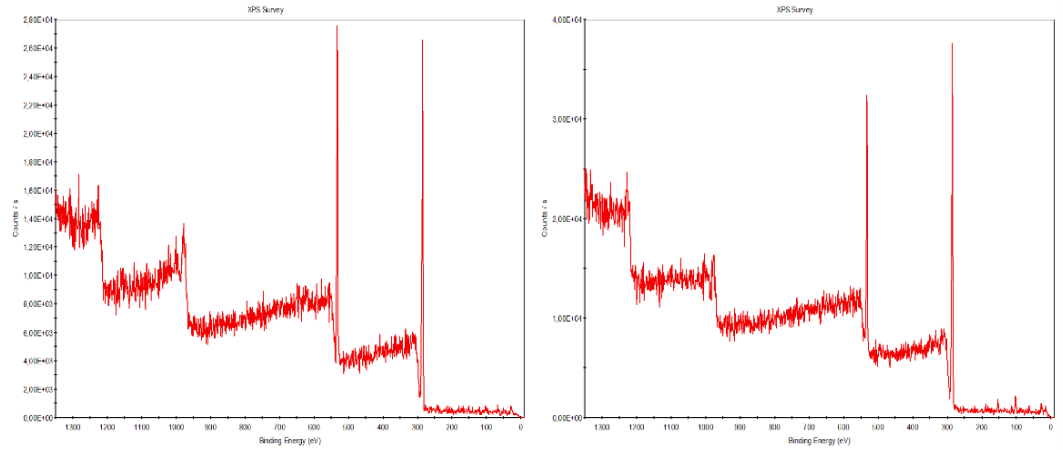
Şekil 4.8 : Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) sonuçları.

Çizelge 4.7 : Katkısız PMMA ve %2, %5, %7.5 ve %10 PMMA/Boraks örneklerinin camsı geçiş sıcaklığı ve erime noktası değerleri.

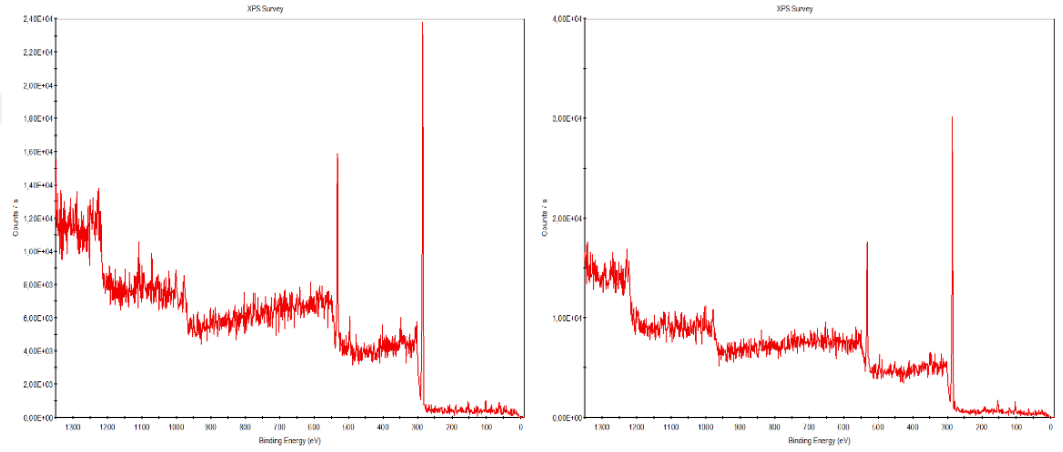
	Katkısız PMMA	%2 Boraks/PMMA	%5 Boraks/PMMA	%7.5 Boraks/PMMA	%10 Boraks/PMMA
Camsı Geçiş Sıcaklığı	112 °C	117 °C	115 °C	111 °C	106 °C
Erime Sıcaklığı	397 °C	394 °C	396 °C	395 °C	395 °C

4.10 XPS Analizi

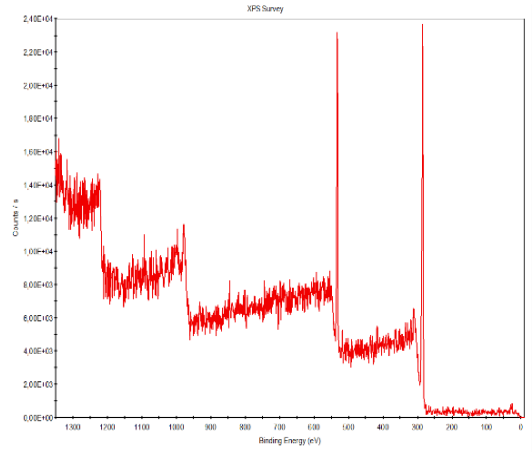
XPS analizi, XRD analizi gibi X-ışınlarının kullanımı ile bir malzemenin içyapısının tespitini sağlarken XRD analizinden farklı olarak X-ışınlarının kırınım açılarının değil yansıyan ışınların enerji miktarlarını kullanmaktadır. Ölçülen enerji değerleri hangi elementlerin ve bileşenlerin malzemenin yapısında bulunduğu ve malzemenin hangi tür bağları içerdiğini göstermektedir. Bu tez çalışmasında katkısız PMMA ve ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 Boraks içeren PMMA/Boraks polimer kompozit örneklerinin XPS Analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.9'da da gösterildiği gibi XPS Survey grafiklerinde dört farklı pik değeri tüm örnekler için ortaya çıkmıştır. Bu pikler bor, karbon, oksijen ve bakır elementlerini işaret etmektedir. 185-190 eV bağlanma enerjisi aralığında Bor elementini ve 284-288 eV aralığı ise Karbon elementini işaret etmektedir. 529-535 eV aralığı Oksijen elementi ve bileşenlerini gösterirken 933-935 eV bölgesi ise Bakır elementi ve Bakır Oksitleri göstermektedir.



a) b)



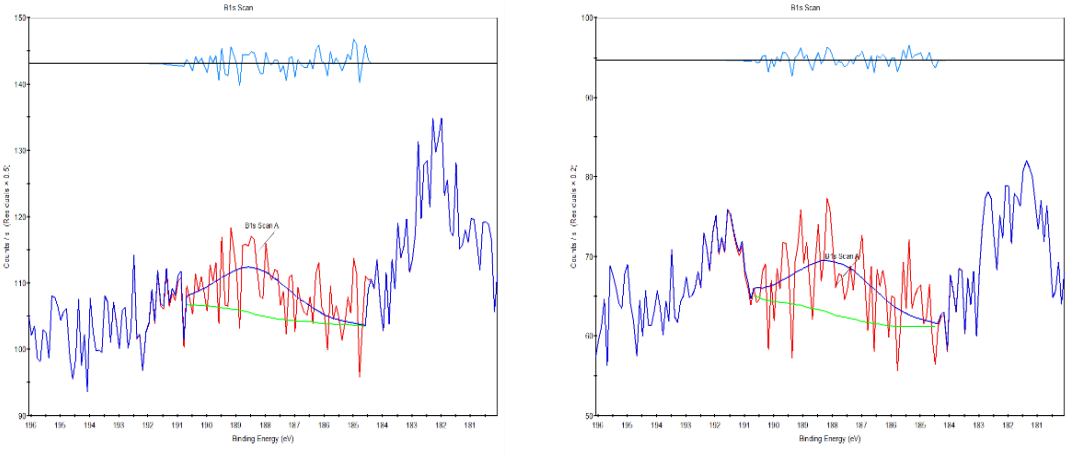
c) d)



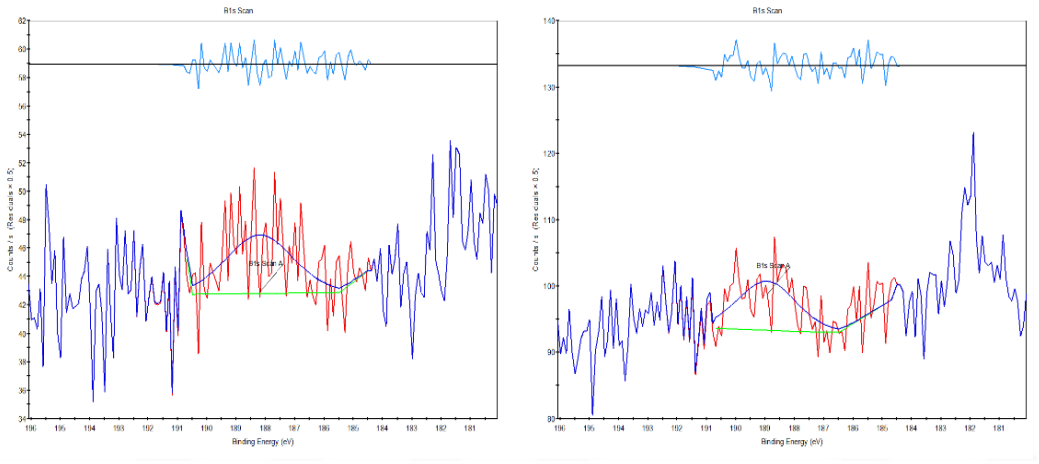
e)

Şekil 4.9 : XPS Survey sonuçları a) katkısız PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks

Aşağıda verilmiş olan Şekil 4.10.a, 4.10.b, 4.10.c, 4.10.d ve 4.10.e XRD Survey grafiklerinde oluşan pik bölgelerinin yakınlaştırılması ile elde edilmiş grafikleridir. Şekiller sırasıyla B1s, Cu2p, O1s ve C1s grafiklerinden oluşmaktadır.

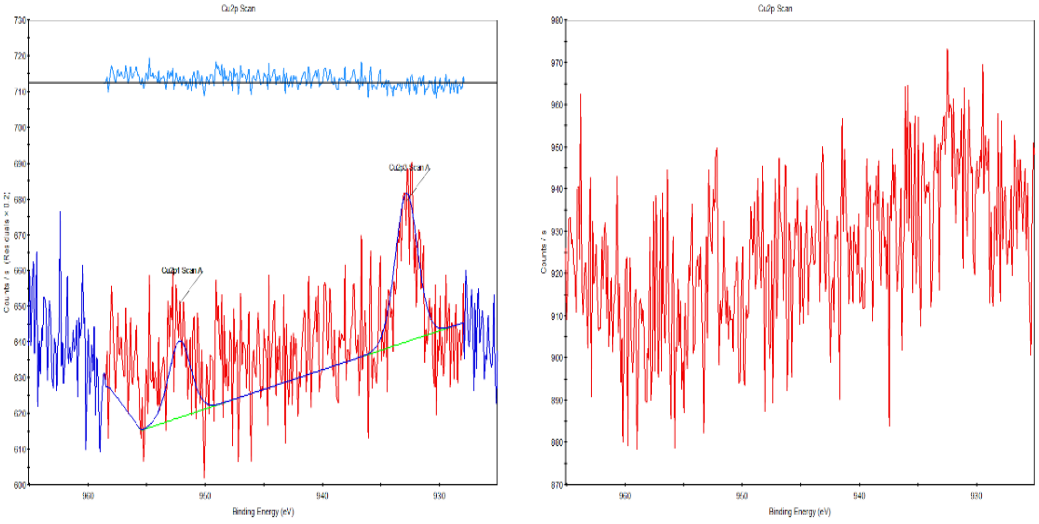


a) b)



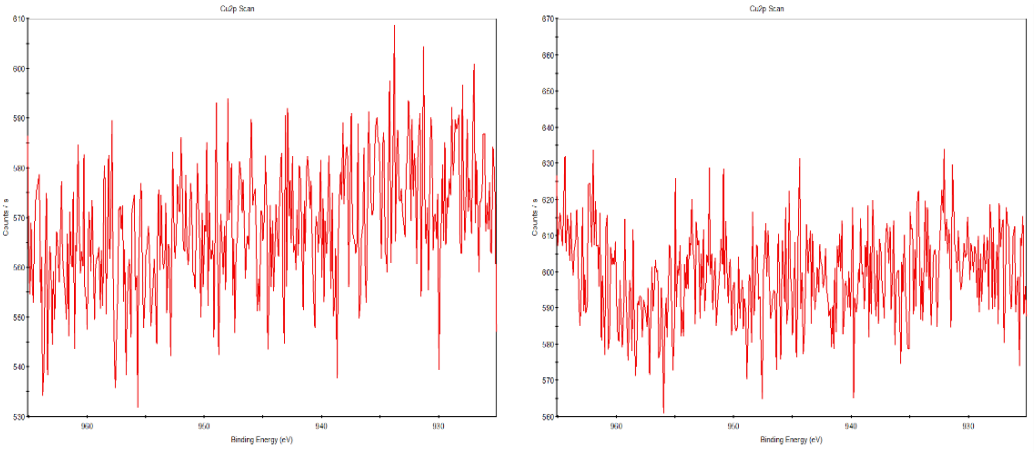
c) d)

Şekil 4.10 : XPS B1s sonuçları a) %2 PMMA/Boraks, b) %5 PMMA/Boraks, c) %7.5 PMMA/Boraks ve d) %10 PMMA/Boraks.



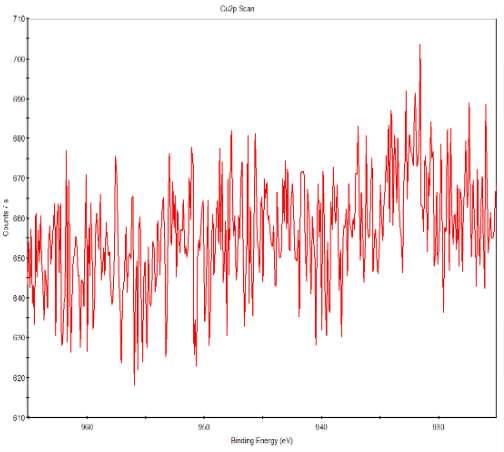
a) b)

Şekil 4.11 : XPS Cu2p sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks.



c)

d)



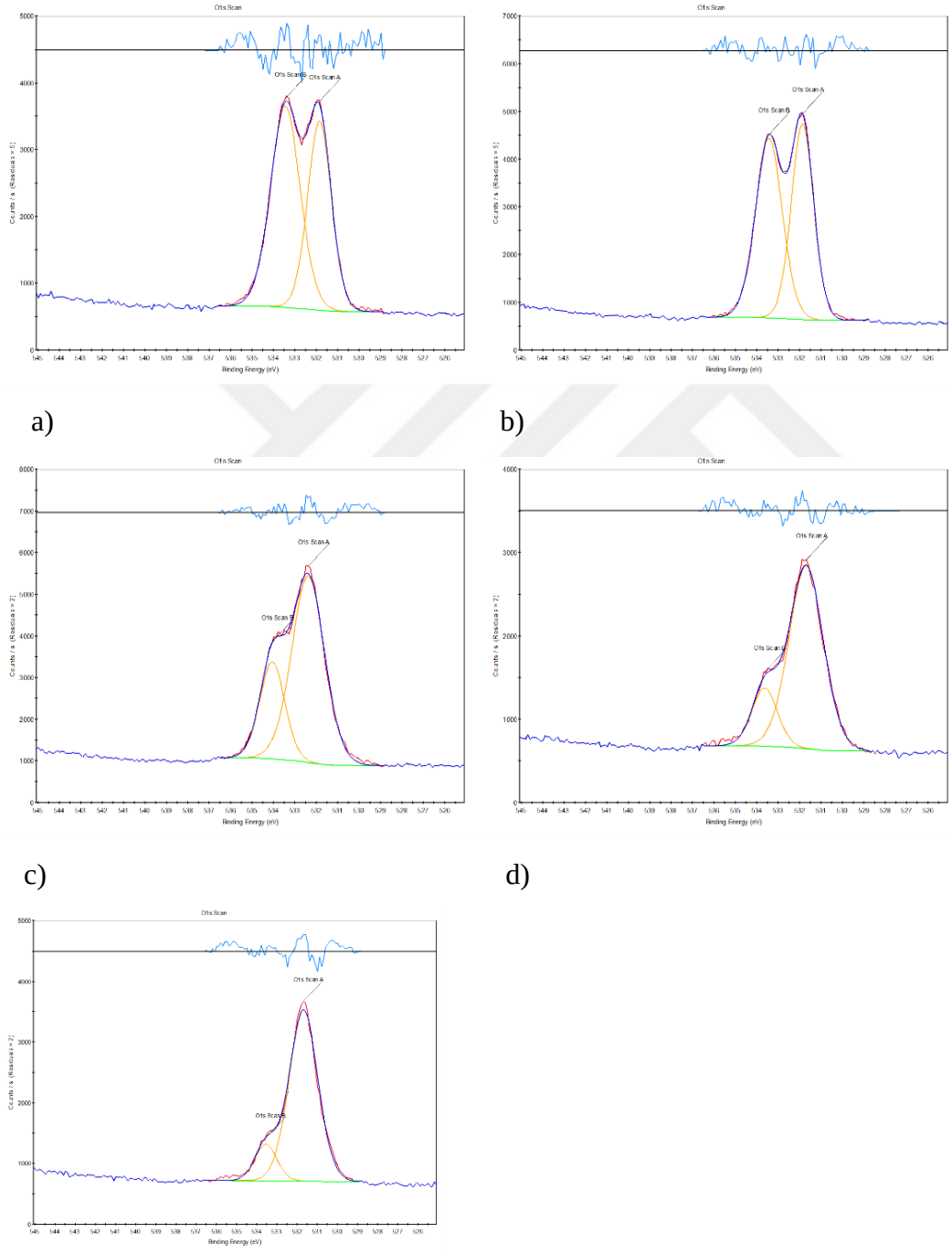
e)

Şekil 4.11 (devam) : XPS Cu2p sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks.

XPS analizi grafiklerinden bor elementi ve bileşenlerini temsil eden B1s grafiğini bakıldığında PMMA matrise Boraks eklenmesi ile alakalı olarak 187-188 eV civarlarında bağlanma enerjisi pikleri görülmektedir. Şekil 4.10'da da görülebileceği gibi hem ağırlıkça hem de atomik olarak az miktarda Boraks katkısı yapıldığı için katkı miktarının artması farklı bir bağın oluşuma sebep olmamış ve bileşen içerisinde yalnızca Bor elementinin varlığı saptanmıştır.

XPS analizinde Bakır (Cu) tespitine odaklanıldığında (Şekil 4.11) yalnızca Şekil 4.11.a'da bakır elementine ait 933 ve 953 eV bağlanma enerjisi değerlerinde pikler oluştuğu görülmektedir. Sadece katkısız PMMA örneğinde ortaya çıkan bakır piklerinin bakır (Cu) elementi ve Bakır (I) Oksit (Cu_2O) bileşiğini göstermektedir. Bu örnek içerisinde bakır oluşumunun sebebi olarak polimerizasyon esnasında katalizör

olarak kullanılan CuBr bileşeninin oksijen molekülü ile temas ederek Bakır (I) Oksit bileşiğini oluşturmasıdır. Şekil 4.11'de gösterildiği gibi Bakır (I) Oksit oluşumu atomik olarak % 0.05 gibi bir oranda bulunmakta olup yüzeyde çok az miktarda biriktiği tespit edilmiştir. Diğer örneklerin XPS analizinde Bakır tespit edilmemesi örneklerin tamamen oksijenden arındırılmış ve inert bir ortamda polimerizasyon süreci geçirdiklerini işaret etmektedir.

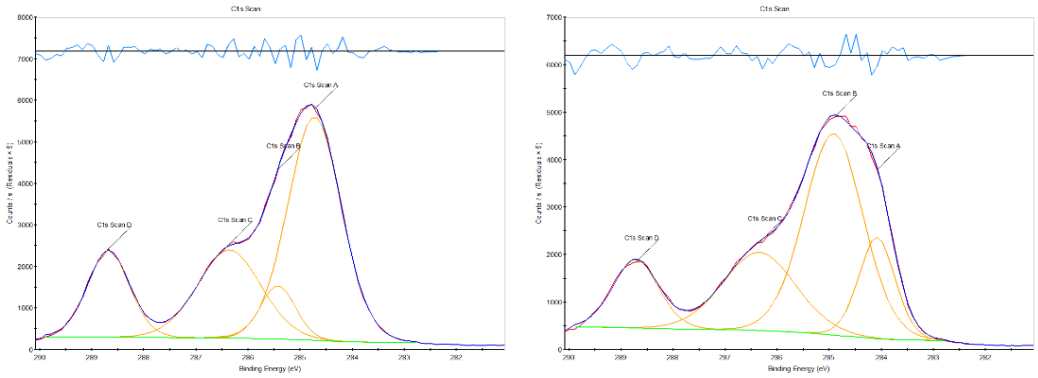


Şekil 4.12 : XPS O1s sonuçları a) base PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks

Oksijen elementi ve bileşenlerinin tespitine bakıldığında tüm örnekler için pik yüksekliği değişmek ile birlikte ard arda iki adet pik oluştuğu görülmektedir. Bu pikler 531.5 ve 533 eV bağlanma enerjisi değerlerindedirler. 531.5 eV pik değerinin tüm örnekler için ortak olduğu fakat 533 eV pik değerinin örnekler içerisindeki ağırlıkça Boraks miktarının artması ile sayım miktarının yani pik yükseltisinin azaldığı görülmektedir (Şekil 4.12). 531.5 eV bağlanma enerjisi organik bileşiklerde bulunan karbon ve oksijen arasındaki çiftli bağı (C=O) temsil ederken 533 eV bağlanma enerjisi yine organik bileşiklerde görülen Karbon ve Oksijen arasındaki tekli bağı (C-O) ifade etmektedir. Çizelge 4.8'de atom içerisinde yüzde bulunma oranı olarak tekli bağın azaldığı görülmektedir. Eklenen Boraks katkısı yüzeyde C-O tekli bağlarının miktarının azalmasına ve farklı bağlanma şekillerinin oluşmasına neden olmuştur.

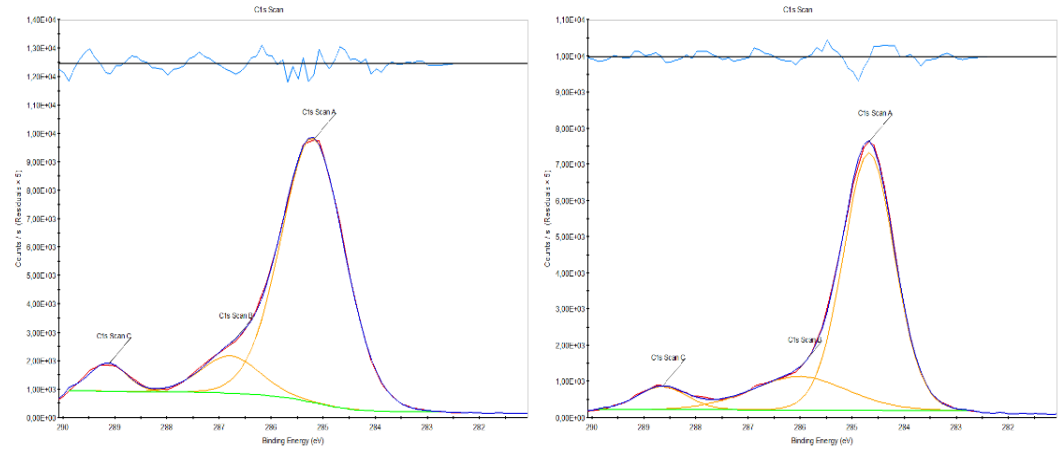
Çizelge 4.8 : O1s sonuçlarına göre bağ yapıları, bağlanma enerjileri ve atomik yüzde değerleri.

O1s				
Örnek	Bağ Yapısı	Pik Bağlanma Enerjisi (eV)	FWHM eV	Atomik %
Katkısız PMMA	C=O	531.86	1.22	12.13
	C-O	533.43	1.46	13.30
%2 PMMA/Boraks	C=O	531.85	1.30	10.04
	C-O	533.44	1.62	13.31
%5 PMMA/Boraks	C=O	532.37	1.79	15.70
	C-O	534.05	1.36	6.23
% 7.5 PMMA/Boraks	C=O	531.69	1.87	12.85
	C-O	533.63	1.39	3.04
%10 PMMA/Boraks	C=O	531.68	1.67	13.61
	C-O	533.55	1.27	2.22

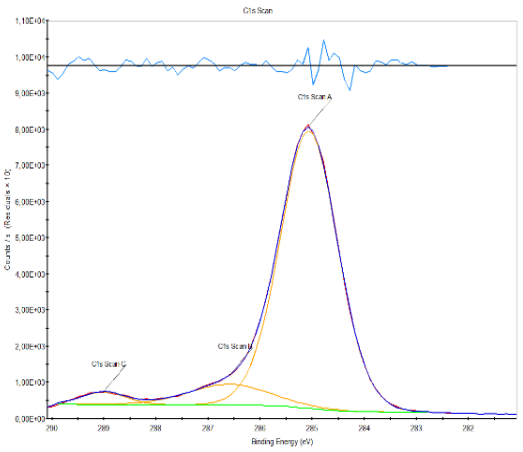


a) b)

Şekil 4.13 : XPS C1s sonuçları a) katkısız PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks.



c) d)



e)

Şekil 4.13 (devam) : XPS C1s sonuçları a) katkısız PMMA, b) %2 PMMA/Boraks, c) %5 PMMA/Boraks, d) %7.5 PMMA/Boraks ve e) %10 PMMA/Boraks.

Karbon elementinin varlığı ve bağlarının yapısına göz atıldığında ise katkısız PMMA ve ağırlıkça %2 Boraks içeren örneklerde dört farklı pik ortaya çıkmışken Boraks miktarının artması ile bir pik değerinin önemli oranda azaldığı görülmektedir (Şekil 4.13). Katkısız PMMA ve ağırlıkça %2 Boraks içeren örneklerin XPS analizinde oluşan pik değerleri 284.8, 285.4, 286.5 ve 288 eV bağlanma enerjilerindedir. Ağırlıkça %5, %7.5 ve %10 Boraks içeren örneklerde ise 285, 286.5 ve 289 eV değerlerinde pikler ortaya çıkmıştır. 284.8 ve 285 eV bağlanma enerjisi değerleri karbonlar arası tekli bağı (C-C) belirtirken 285.4 eV değeri ise β-kaymalı karbon (β-shifted C) bağını ifade etmektedir. 265.5 ve 288-289 eV bağlanma enerjileri ise sırasıyla karbon oksijen tekli bağını (C-O) ve karbon oksijen çiftli bağını (C=O) göstermektedir. O1s-Oksijen elementi analizinde de olduğu gibi Boraks miktarında gerçekleşen artış C-O tekli bağının azalmasına neden olmuştur (Çizelge 4.9). Ayrıca

burada farklı olarak Boraks katkısının β-kaymalı Karbon bağını da azaltarak ortadan kaldırdığı görülmektedir.

Çizelge 4.9 : C1s sonuçlarına göre bağ yapıları, bağlanma enerjileri ve atomik yüzde değerleri.

C1s				
Örnek	Bağ Yapısı	Pik Bağlanma Enerjisi (eV)	FWHM (eV)	Atomik %
Katkısız PMMA	C-C	284.72	1.21	38.03
	β-kaymalı C	285.43	0.79	5.98
	C-O	286.36	1.43	17.72
	C=O	288.68	0.94	11.49
%2 PMMA/Boraks	C-C	284.08	0.83	61.62
	C-O	286.34	1.64	17.79
	C=O	288.71	1.03	9.78
%5 PMMA/Boraks	C-C	285.20	1.43	63.06
	C-O	286.79	1.32	8.22
	C=O	289.13	0.83	3.93
% 7.5 PMMA/Boraks	C-C	284.68	1.16	61.96
	C-O	286.02	2.17	14.95
	C=O	288.65	1.11	5.33
%10 PMMA/Boraks	C-C	285.06	1.30	69.73
	C-O	286.59	1.83	7.31
	C=O	289.01	0.98	2.36

4.11. Dielektrik Değer Analizi

Performans Prob ile gerçekleştirilen Dielektrik analizinde 500 MHz – 50 GHz aralığında radyo dalgaları örnekler üzerine uygulanmış ve bu örneklerin elektriksel depolama özelliğini belirten ε' ve ε'' değerleri elde edilmiştir. Dielektrik katsayısının gerçek (reel) kısmını ifade eden ε' ile sanal (imajiner) kısmını ifade eden ε'' değerlerinin büyüklüğü (magnitude) bulunarak ε_r değeri elde edilmiştir (denklem 4.6) ve ε_r bağıl geçirgenlik (relative permittivity) ile ε_0 serbest uzayın dielektrik sabitinin çarpımı Dielektrik Sabitini (ε) vermektedir (Blythe ve Bloor, 2008). Bahsi geçen işlemler denklem 4.7 ve denklem 4.8'de gösterilmiştir. Burada ε_0 8.854x10^{-12} F/m değerindedir (Jayalakshmi ve diğ, 2018).

$$\varepsilon_r = \varepsilon' + j\varepsilon'' \tag{4.6}$$

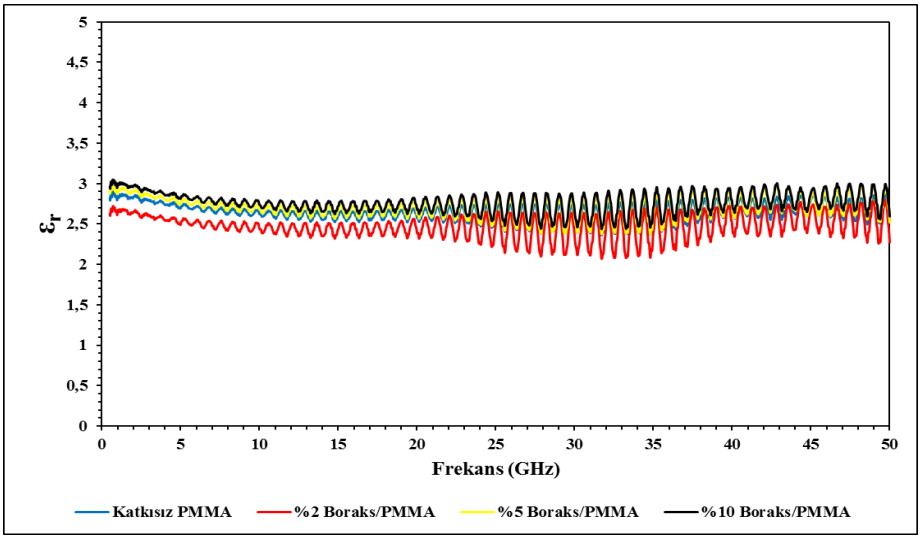
$$\|\varepsilon_r\| = \sqrt{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} \tag{4.7}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0 \tag{4.8}$$

Ayrıca Performans Prob ile elde edilen bir diğer sonuç elektriksel kayıp eğrisidir (electrical loss tangent). Kayıp eğrisi malzeme içerisinde dalgalarla taşınan elektrik alanda meydana gelen değişimi belirtir. Kayıp eğrisinde ortaya çıkan tınlaşım (rezonans) değerlerinin büyük olması malzemenin dielektrik bir malzeme olduğunu gösterir. Bu analizde kayıp eğrisi denklem 4.9'da verildiği şekilde elde edilmiştir (Sebastian, 2008, Bölüm 2; Kim ve Kim, 2018; Vinoy ve Jha, 1994; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

$$tan\delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{4.9}$$

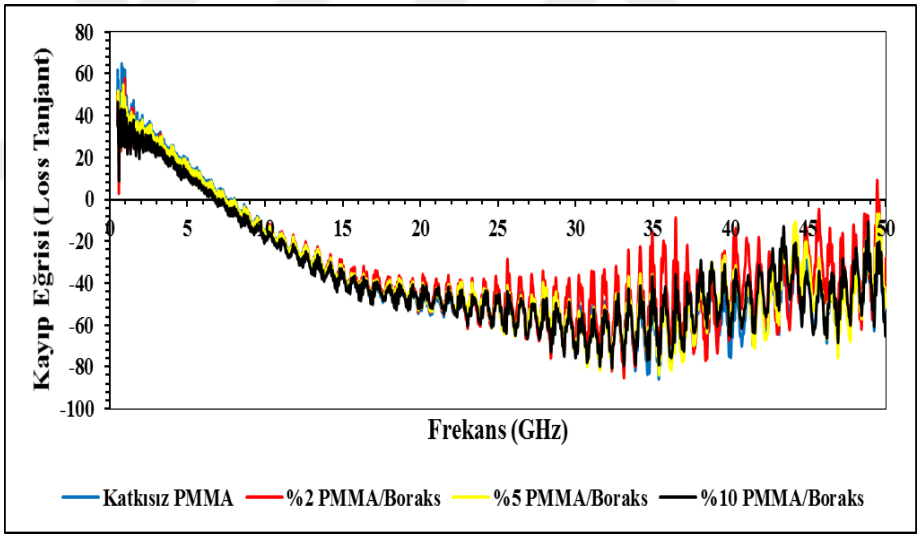
Performans probdan elde edilen sonuçlara göre farkların en çok olduğu bölge daha çok elektriksel alan emilimi gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar örneklerin birbirlerine yakın dielektrik katsayılarına sahip olduklarını ve kapasitans (sığa) uygulamalarında istenildiği gibi bütün bir bant boyunca dielektrik değerinde önemli bir değişiklik olmadığını ve yaklaşık bir düz grafik verdiğini göstermektedir. Şekil 4.14'te frekans değerlerine bağlı olarak dielektrik sabitinin değişimi gösterilmiştir. Dielektrik sabiti, bağıl dielektrik sabitinin tam bir katı (denklem 4.8) olduğu için bağıl dielektrik sabiti ve dielektrik sabitlerinin grafikleri aynı olmaktadır. 500 MHz – 50 GHz aralığında radyo dalgalarına maruz kalan örnekler göz önüne katıldığında Boraks katkısı PMMA matrisinin dielektrik katsayısında büyük bir değişime neden olmamıştır. Bununla birlikte tüm frekans değerleri boyunca dielektrik değer korunmuşur.



Şekil 4.14 : Frekansa bağlı olarak Dielektrik sabitinin değişimi.

Şekil 4.14'te de görüldüğü gibi Dielektrik sabiti değerleri göz önüne alındığında 25 - 40 GHz aralığında daha kuvvetli değişimlerin olduğu belirlenmiştir. Benzer durum

kayıp eğrisinde de görülmüştür ve tüm örnekler için geçerlidir. Bu durum elektriksel enerjinin bu frekans aralığında daha fazla depolandığını göstermektedir. 25 GHz ve 40 GHz arasında çalışan sistemler için Boraks katkılı PMMA polimer kompozitleri absorblama açısından daha iyi performans göstermektedirler. Ka bandının frekans aralığına denk gelen bu bölge, bu tez çalışması bünyesinde üretilen örneklerin Ka bandında hem kararlı birer kapasitans malzemesi olduklarını hem de daha enerji emici özellikli yapıda olduklarını belirtmektedir. Boraks katkısı kayıp eğrisinde de önemli bir değişiklik oluşturmamakla birlikte PMMA'nın elektriksel absorblayıcı özelliğinin kararlı halde kalmasında önemli rol oynamıştır. Performans Prob yardımıyla elde edilen sonuçlar PMMA polimerinin ve Boraks katkılı PMMA polimer kompozitlerin bağıl dielektrik sabitinin 2.5 – 3 ve dielektrik sabitinin $22.13x10^{-12}$ - $26.56x10^{-12}$ aralığında değiştiğini göstermektedir. Yalnızca ağırlıkça %2 Boraks katkılı PMMA'nın bağıl dielektrik sabiti 25 – 40 GHz aralığında 2 – 3 olacak şekilde değişmektedir.

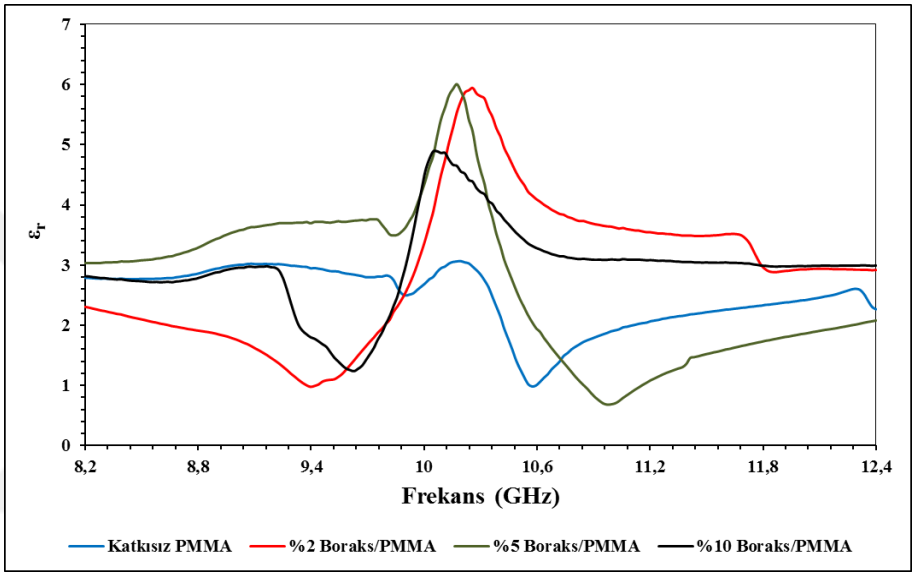


Şekil 4.15 : Frekansa bağlı olarak kayıp eğrisi (loss tanjant).

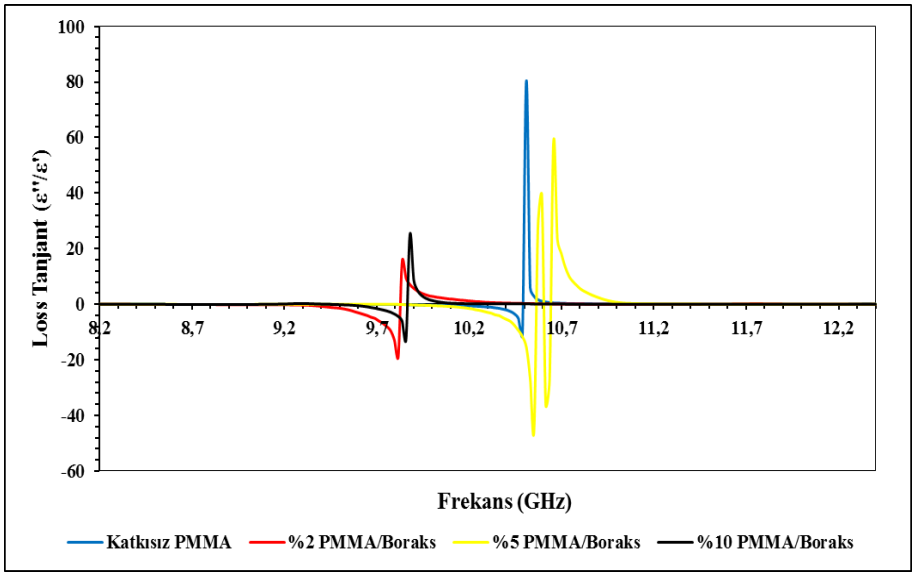
Kayıp eğrisi (loss tanjant) ise hangi frekans değerinde ya da aralığında elektriksel yükün ya da enerjinin malzeme tarafından absorbe edildiğini göstermektedir. Elektromanyetik dalganın enerjisini kaybetmesine neden olan malzemelerin loss tanjant değerleri negatif olarak daha yüksek değerler almaktadırlar. Şekil 4.15'e göre 5 GHz frekans değerinden sonra örnekler elektromanyetik dalgaların enerjilerini hapsetmeye başlamışlardır. Bağıl dielektrik sabitlerinin bulunmasında kullanılan bir diğer yöntem ise Shim'in yer aldığı X-bandı ölçümleridir. 8.2 – 12.4 GHz aralığında X-bandı Mikrodalgaların uygulandığı bu işlemde örneklerin bahsi geçen frekans

aralığındaki dielektrik davranışları ve sabitleri elde edilmiştir. Şekil 4.16'da 8.2 – 12.4 GHz frekans aralığında dielektrik sabiti değerlerinin değişimleri gösterilmektedir. Dielektrik değerleri ne kadar sabitse ve grafiksel olarak düz bir çizgi oluşturuyorsa kapasite (sığa) değeri de o kadar sabit ve kararlı olmaktadır. Katkısız PMMA 8.2 ve 9.8 GHz frekans aralığı ile 11.2 ve 12.4 aralığında sabit Dielektrik sabitine sahip olmuştur. Bu frekans aralıklarında katkısız PMMA'nın elektronikte kapasite üretiminde kararlı bir malzeme görevi görmektedir. 8.2 – 12.4 GHz frekans aralığında ağırlıkça %2 Boraks katkılı PMMA örneği değişken sonuçlar vermişken 11.2 – 11.7 GHz aralığında 3.5 değerinde bağıl dielektrik sabitine sahip olacak şekilde kararlı bir bölge oluşturmuştur. 11.9 ve 12.4 GHz aralığında 3 değerinde sonuçlar veren %2 Boraks katkılı PMMA örnekleri belirli frekans aralıklarında (11.2 – 11.7 GHz ve 11.9 – 12.4 GHz) kullanılan cihazlar ve sistemler için %2 PMMA/Boraks malzemesi dielektrik malzeme olarak kullanılabilir. Aynı zamanda kısa ve farklı bant aralıklarında kararlı olmaları sebebiyle bant söndüren filtre olarak da kullanılabilirler. %5 Boraks içeren PMMA örneklerine bakıldığında ise 9 – 10 GHz aralığında bağıl dielektrik sabitinin 3.6 civarında olduğu görülmektedir. Bu frekans aralığında işlev gören yapılar için kararlı dielektrik özellik gösteren %5 PMMA/Boraks ürünü uygun bir malzeme örneğidir. Dielektrik sabiti kararlılığı açısından en iyi performansı gösteren ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örnekleri ise 8.2 – 9.2 GHz aralığında 2.9 bağıl dielektrik sabiti değerinde ve 10.5 – 12.4 GHz aralığında ise 3 bağıl dielektrik sabiti değerinde kararlı sonuçlar vermiştir. Tüm örnekler birbirleri ile karşılaştırıldığında belirli frekans aralıklarında zayıflatma işlemi gerçekleştirdikleri görülmüştür. X-bandının tamamının zayıflatılmasına en yakın örneğin %10 PMMA/Boraks olduğu tespit edilmiştir. Bu özelliği ile X-bandı frekans aralığındaki ışımalara maruz kalan sistemlerde dielektrik malzeme olarak kapasite yapımında kullanılabilir. 500 MHz ile 50 GHz aralığındaki tüm bir frekans bölgesi söz konusu olduğunda ise özellikle 25 GHz ve sonrasında dielektrik sabitlerin önemli miktarda değişimler gösterdiği görülmektedir ve bu durum malzemelerin daha yüksek miktarda enerji depoladıklarını göstermektedir. Ku, K, V bantlarının bir kısmını ve Ka bandının da tamamını kapsayan bu bölümde (25 GHz – 50 GHz) örnekler daha fazla enerji deplaması gerçekleştirmiş ve bu frekans aralığındaki mikrodalgaların enerjisini dahi yüksek miktarda sönümlemişlerdir. Frekans değerlerinin yükselmesi, bu çalışmada üretilen kompozitlerin yük ve enerji depolama performans arttırarak özellikle Ka bandına odaklanan deneylerin yapılması için motivasyon oluşturmaktadır.

Shim (dalga kılavuzu WR90) yardımı ile elde edilen sonuçların kayıp eğrisi (loss tanjant (ε''/ε')) göz önüne alındığında dielektrik sabitlerdeki kararsızlık ve değişimler ile kayıp eğrisi grafiğinde piklerin oluştuğu frekans aralıklarının birbirleri ile uyuştukları görülmektedir. En fazla pik miktarının meydana geldiği %5 PMMA/Boraks örneğinin dielektrik kararlılıkta en dar ve parçalı frekans aralığına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bununla beraber pik sayısının en az olduğu ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örneği ise X-bandı içerisinde en geniş kararlılığa sahip malzemedir. Bu sonuçlar Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.16 : Ağırlıkça %2, %5, %10 Boraks içeren PMMA ve katkısız PMMA örneklerinin dielektrik sabiti değerleri.



Şekil 4.17 : Frekansa bağlı olarak dielektrik sabiti kayıp eğrisi.

Dielektrik Sabiti'nin analizi ile beraber X-bandında 8.2 – 12.4 GHz frekansa sahip radyo dalgalarına maruz kalan örneklerin bağıl manyetik geçirgenlik (relative magnetic permeability) değerleri de tespit edilmiştir. Dielektrik Sabitin bulunmasına benzer yollar ile hesaplanan bağıl manyetik geçirgenlik, gerçek ve sanal kısımlara sahip vektörel bir büyüklüktür (denklem 4.10). Manyetik geçirgenliğin gerçek kısmını ifade eden μ' ve sanal kısmını ifade eden μ'' karelerinin toplamının karekökü alınarak (denklem 4.11'de gösterildiği gibi) bağıl manyetik geçirgenlik μ_r bulunur. Manyetik geçirgenlik sabiti (μ) ise bağıl geçirgenlik (μ_r) ve serbest uzayın manyetik geçirgenliğinin (μ_0) çarpımıyla elde edilmektedir (denklem 4.12). Serbest uzayın geçirgenliği olan μ_0, $4\pi x10^{-7}$ değerine eşittir (Vinoy ve Jha, 1994; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

$$\mu_r = \mu' + j\mu'' \tag{4.10}$$

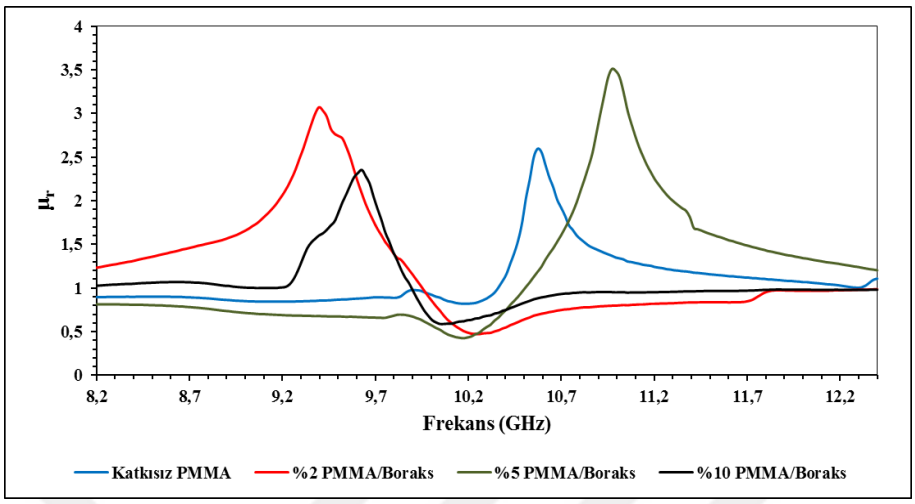
$$\|\mu_r\| = \sqrt{(\mu')^2 + (\mu'')^2} \tag{4.11}$$

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \tag{4.12}$$

Bağıl manyetik geçirgenlik sonuçları, katkısız PMMA'nın 0.9 olan bağıl manyetik geçirgenlik değerini 8.2 GHz – 10.2 GHz aralığında koruduğunu göstermektedir. Aynı şekilde %5 PMMA/Boraks örneği de 0.75 olan bağıl manyetik geçirgenlik değerini 8.2 – 10 GHz aralığında korumayı başarmıştır. Ağırlıkça %2 Boraks katkılı PMMA örnekleri 10.7 – 11.7 GHz aralığında 0.8 bağıl manyetik geçirgenlikte istikrarlı kalmış ve 11.9 ve 12.2 GHz frekans değerleri arasında da 0.98 değerinde bağıl manyetik geçirgenliği sahip olmuştur. Ağırlıkça %10 Boraks ilave edilmiş PMMA örneğine bakıldığında ise en kararlı manyetik geçirgenlik sabitinin bu örnek üzerinde meydana geldiği görülmüştür. Bağıl manyetik geçirgenliği 8.2 – 9.2 GHz frekans aralığında 1 ve 10.7 – 12.2 GHz frekans aralığında 0.95 – 1 değerlerinde olan %10 PMMA/Boraks örneği, örnekler arasında en geniş manyetik geçirgenlik aralığına X-bandı söz konusu iken sahip olmuştur. Örneklerin frekansa bağlı olarak değişen bağıl manyetik geçirgenlik değerleri Şekil 4.18'de gösterilmektedir.

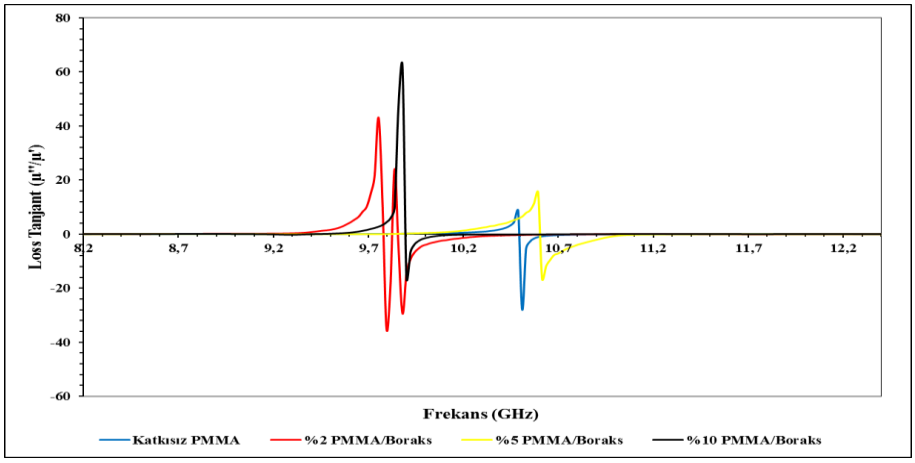
Yüksek frekansa sahip elektromanyetik dalgalar söz konusu olduğunda kompleks geçirgenlik hesaba katılmalıdır. Kompleks geçirgenlik manyetik özelliklerin frekanstaki değişim ile farklılık gösterdiği malzemelerde ortaya çıkmaktadır. Bağıl manyetik geçirgenliğin birden küçük değerler aldığı malzemeler diamanyetik, bire

yakın değerler aldığı malzemeler paramanyetik ve birden büyük değerler aldığı malzemeler ise ferromanyetik malzeme olarak adlandırılır.



Şekil 4.18 : Frekansa bağlı olarak manyetik geçirgenliğin değişimi.

8.2 – 12.4 GHz frekans aralığında Boraks katkılı PMMA örneklerinde diamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik özellikler arasında geçişler yer almıştır. Tüm örneklerde görülen bu durum her örnek için farklı olacak şekilde belirli frekans aralıklarında gerçekleşmiştir. Bu sonuçlara göre örneklerin manyetik geçirgenlikleri $5x10^{-7}$ H/m ile $4.4x10^{-6}$ H/m aralığında bulunmaktadır. X-bandı için stabil olan değerler ise $9.42x10^{-7}$ – $1.25\ 10^{-6}$ arasındadır. Bağıl manyetik geçirgenlikte meydana gelen kayıplar (Şekil 4.19) bağıl manyetik geçirgenlik eğrileri ile uyuşan sonuçlar vermektedir. Bağıl manyetik geçirgenliğin kararlılığının bozulduğu frekans aralıkları aynı zamanda kayıp piklerinin meydana geldiği frekans değerleri ile aynı ya da yakındır.



Şekil 4.19 : Ağırlıkça %2, %5, %10 Boraks içeren PMMA ve katkısız PMMA örneklerinin manyetik geçirgenlik değerleri.

Shim ve Performans Prob ile yapılan çalışmalar sonucunda ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA örneklerinin dielektrik sabitleri hem 500 MHz – 50 GHz aralığı için hem de X bandı (8.2 – 12.4 GHz) için hesaplanmıştır. Her iki sonuç da göz önüne alındığında PMMA'nın dielektrik değerlerinde bir miktar artış gözlenmiştir. Özellikle %10 Boraks katkılı PMMA örneği, Performans Prob ve Shim ile yapılan bağıl dielektrik sabiti ölçümlerinde %2 ve %5 Boraks katkılı ve katkısız PMMA örneklerine göre daha kararlı ve daha yüksek performans göstermiştir. Bu sonuçlar dielektrik sönümleme açısından %10 Boraks katkılı PMMA'nın diğer örneklerden daha üstün bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

4.12. Mikrodalga Testi Analizi

Mikrodalga test analizleri, dielektrik değerlerin tespit edilmesinde olduğu gibi Shim (dalga kılavuzu) WR90 kullanılarak X-bandında ve 8.2 – 12.4 GHz aralığında radyo dalgalarının (özelleşmiş olarak bu bölge için mikrodalgalar) örnekler üzerine uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Örneklerin X-bandında gerçekleştirdiği soğurma (absorption), geçirgenlik (transmission) ve yansıtma (reflection) özellikleri ve oranları, yansıtma kaybı (reflection loss) ve yansıma katsayısı değerleri bu uygulama ile elde edilmiştir. Ayrıca örneklerin empedans ve kırılma indeksi değerlerinin de hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Cihaz tarafından ölçülmüş olan S-Parametreleri gerçek ve sanal kısımdan oluşmak üzere büyüklükleri (magnitude) bulunmak suretiyle hesaplanmıştır. Bulunan S-Parametrelerinden S_{11} kullanılarak yansıtma oranı ve S_{21} kullanılarak geçirgenlik oranı bulunmuştur. Bu oranların birden (yüzde olarak istenirse yüzden) çıkarılması işlemi ile de soğurma/absorblama oranı hesaplanmıştır (Acharya ve diğ, 2018). Bu işlem sırasıyla denklem 4.13, 4.14 ve 4.15'da verilmiştir. S-Parametrelerinin (S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}) bulunması ile hesaplanan yansıtma oranı Şekil 4.20'de, geçirgenlik oranı Şekil 4.21'de ve soğurma oranı ise Şekil 4.22'de gösterilmiştir.

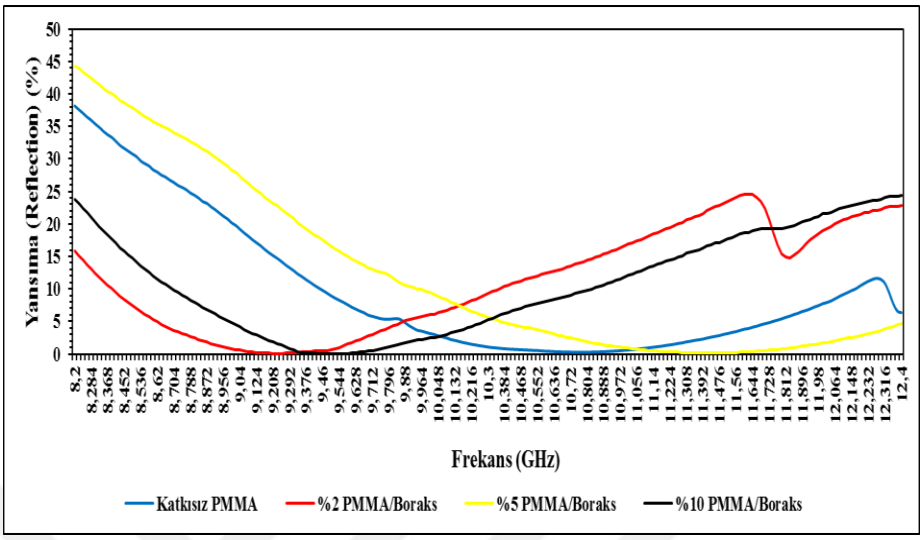
Yansıtma (Reflection); $$R\ (\%) = |S_{11}|^2\ x\ 100 \quad (4.13)$$

Geçirgenlik (Transmission); $$T\ (\%) = |S_{21}|^2\ x\ 100 \quad (4.14)$$

Soğurma (Absoption); $$A\ (\%) = 1 - R(\%) - T(\%) \quad (4.15)$$

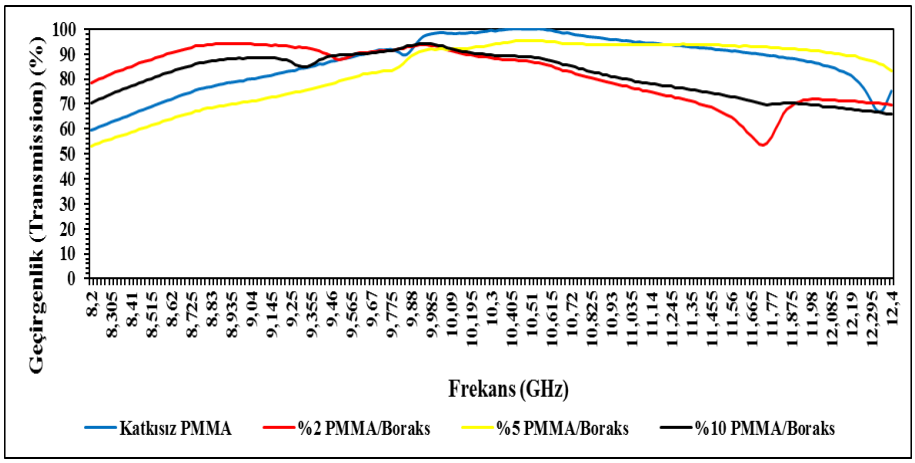
Burada S11 ve S21 parametreleri hem yansıtma hem geçirgenlik hem de absorblama için büyük önem arz etmektedir. S11 parametresi ne kadar düşük olursa yansıtma o

kadar az olmakta ve geçirgenlik ne kadar yüksek olursa malzemeye ulaşan ışınım o kadar yüksek olmaktadır. Bununla birlikte bu tezde asıl odaklanılan nokta absorblamanın yüksek, yansıtmanın düşük olmasıdır.



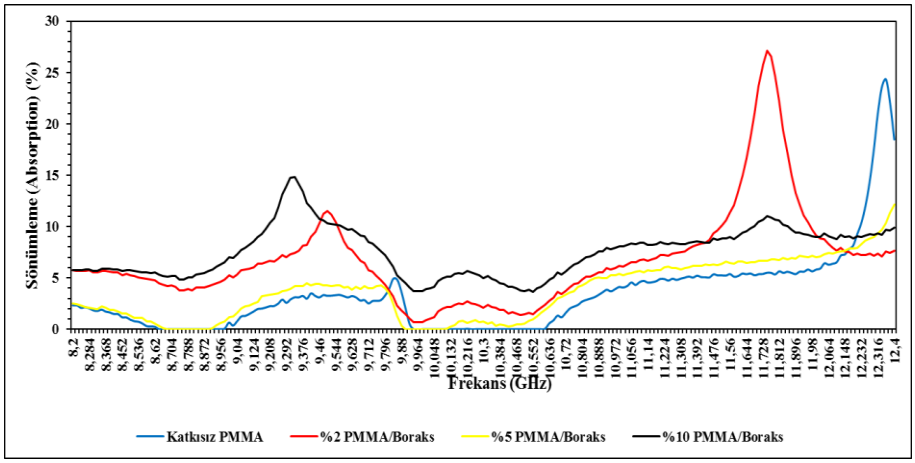
Şekil 4.20 : Örneklerin yansıtma (reflection) oranları.

Yansıtma oranları söz konusu olduğunda, örneklerin farklı frekans aralıklarında yansıtmayan yüzeylere sahip olduğu görülmektedir. Katkısız PMMA örneği, X-bandı içerisinden 10 – 11.7 GHz aralığında %5 oranından daha az yansıtıcılık gösterirken 8.2 – 9 GHz aralığında %37.6'dan %20'ye kadar azalan yansıtıcılık değerlerine sahip olmuştur. Ağırlıkça %2 Boraks katkılı PMMA örneği ise 8.6 – 9.88 GHz aralığında %5'den düşük yansıtma oranına sahipken 11.3 GHz frekansın üzerinde %20'den fazla yansıtıcılık göstermektedir. 10.36 GHz ile 12.4 GHz aralığında yansıtıcılığı %5 oranından daha az olan %5 PMMA/Boraks örneğinin 8.2 GHz ve 9.35 GHz frekans aralığında yansıtıcılığı %20 - %45 arasında oluşmuştur. Ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örneği ise 9 – 10.3 GHz frekans aralığında %5'den az ve 11.9 – 12.4 GHz frekans aralığında ise %20'den fazla yansıtma oranı göstermiştir. Her bir örneğin farklı frekans aralıklarında olmak üzere yansıtma oranı vermediği (%0) yani yansıtma yapmadığı ya da %1'den az yansıtma gösterdiği değerler bulunmaktadır. Bunlar; katkısız PMMA için 10.3 – 11.4 GHz aralığı iken %2 PMMA/Boraks için 8.95 – 9.54 GHz, %5 PMMA/Boraks için 10.97 – 11.87 GHz, %10 PMMA/Boraks için ise 9.27 – 9.79 GHz aralığındadır. Yansıtma oranlarından elde edilen bu sonuçlar X-bandının tamamı için olmasa da belirli bant aralıklarında yüksek frekanslı dalgalar için bu örneklerin gelen ışınları yansıtmayacak şekilde davranış gösterdikleri belirlenmiştir.



Şekil 4.21 : Örneklerin geçirgenlik (transmission) oranları.

X-bandında yer alan ışınları geçirgenlik oranlarına baktığımızda ise yine her bir örnek farklı frekans değerlerinde maksimum geçirgenlik oranına sahip olmuştur. Geçirgenlik oranları göz önüne alındığında tüm bant boyunca ortalaması %86.91 olacak şekilde %60 ve %100 arasında geçirgenlik oranına sahip olan katkısız PMMA örneği 10 – 11 GHz aralığında en yüksek geçirgenlik oranına sahip olmuştur. Ortalama geçirgenlik oranı %82.13 olan %2 PMMA/Boraks örneği ise en yüksek geçirgenlik oranlarını 8.8 ve 9.4 GHz frekans aralıklarında almış ve %50 - %94 geçirgenlik oranları arasında değerler sunmuştur. %5 PMMA/Boraks örneğine bakıldığında ise %83.81 geçirgenlik oranı ile ortalama değerini oluşturmuş ve %50 - %95 geçirgenlik oranları vermiştir. Maksimum geçirgenlik oranını ise 10.5 – 11.9 GHz aralığında almıştır. %70 – %94 oranlarında değerler alan ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örneği ise ortalama %81.86 geçirgenlik oranına sahiptir. En fazla geçirgenlik oran gösterdiği frekans aralığı ise 9.81 – 10.09 GHz'dir.



Şekil 4.22 : Örneklerin soğurma (absorption) oranları.

Absorblama oranlarına göz atıldığında ise X-bandının tamamı için en iyi performansı ağırlıkça %10 Boraks ilavesi yapılmış PMMA/Boraks polimer kompoziti gerçekleştirmiştir. Öte yandan katkısız PMMA ve %2 PMMA/Boraks örnekleri belirli frekans aralıklarında pik değerleri oluşturmuşlardır. 12.3 – 12.4 GHz arasında %24.31 absorblama oranına yükselen katkısız PMMA ve 11.6 – 11.8 GHz aralığında ise %27.12 absorblama oranına yükselen %2 PMMA/Boraks malzemeleri bant söndüren filtre işlemlerinde kullanılmak üzere özelleştirilebilir. Yukarıda belirtilen dar frekans aralıklarında çalışan sistemler için katkısız PMMA ve %2 PMMA/Boraks malzemelerinin kullanımları elektromanyetik dalgaların sönümlenmesi açısından elverişlidir. Ayrıca %10 PMMA/Boraks malzemesi ise %14.82 absorblama oranına sahip olduğu 9.25 – 9.44 GHz frekans aralığında aynı zamanda %0.05 - %1.3 arasında değişen yansıtma oranları barındırmaktadır. Düşük yansıtma ve yüksek absorbsiyonun bulunduğu bu bantta radar absorblayıcı malzeme (RAM) olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada geçirgenlik (transmission) oranının önemi doğrudan absorblama oranı ile ilişki olmasından gelmektedir. Yansıyan ışınların geri dönmesinin ardından malzeme içerisine aktarılan ışınların iki yolu bulunmaktadır. Ya malzeme içerisinden geçip gideceklerdir ya da malzeme tarafından absorbe edileceklerdir. Geçirgenlik oranının azalması yahut düşük olması aynı şekilde soğurma oranının artması ya da yüksek olması anlamına gelmektedir. Bu sebeple geçirgenlik oranı sonuçları incelenerek absorblama oranı ile arasındaki uyum ve farklar belirlenmiştir.

Yansıtma, geçirgenlik ve soğurma oranlarından elde edilen bir diğer sonuç ise Elektromanyetik Zırhlama Etkisi (ZE) özelliğidir (Perumalraj ve diğ, 2009; Roh ve diğ, 2008). Toplam Zırhlama Etkisinin (ZE_{top}) bulunabilmesi için Yansıtma Zırhlama Etkisi (ZE_{yan}), Absorblama Zırhlama Etkisi (ZE_{abs}) bir araya getirilmelidir (Wilson ve diğ, 1988; Yuping ve diğ, 2005). Bu iki etkinin toplamı sonucunda elektromanyetik dalgaların zırhlanması ile ilgili bilgi elde edilir (Munalli ve diğ, 2019). ZE_{yan}, ZE_{abs} ve ZE_{top} değerlerinin hesaplama yöntemi denklem 4.16, 4.17 ve 4.18'de gösterilmiştir. Zırhlama etkileri desibel (dB) cinsinden sönümleme olarak verilmiştir (Pande ve diğ, 2009; Song ve diğ, 2014).

$$ZE_{yan} = -10\log(1-R)\,(dB) \tag{4.16}$$

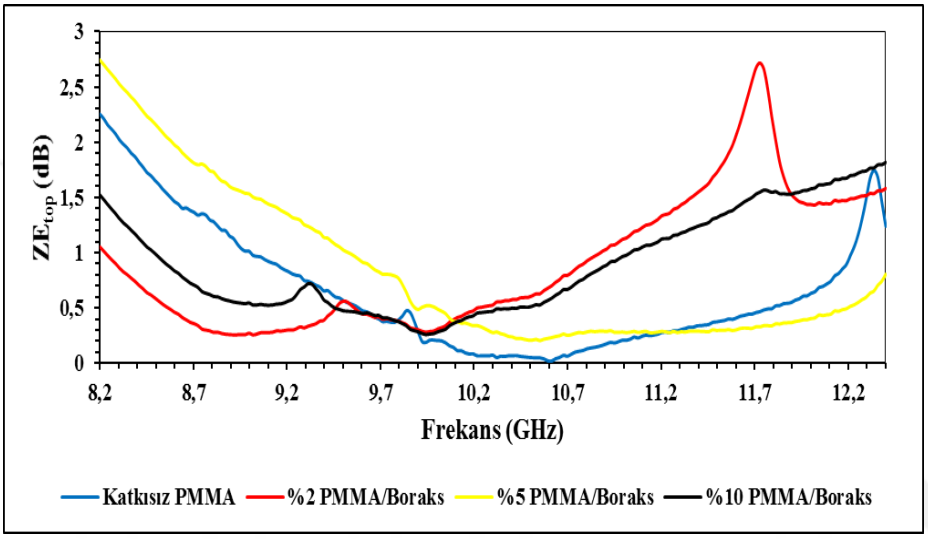
$$ZE_{abs} = -10\log\left(\frac{T}{1-R}\right)(dB) \tag{4.17}$$

$$ZE_{top} = ZE_{yan} + ZE_{abs}\,(dB) \tag{4.18}$$

Denklem 4.16 ve 4.17, denklem 4.18'i verecek şekilde toplanırsa, logaritmanın toplama kuralları nedeniyle denklem 4.19'daki sonuç ortaya çıkar (Vohra ve El-Shenawee, 2021; Klinkenbusch, 2005);

$$ZE_{top} = -10\log(T) \tag{4.19}$$

Şekil 4.23'te toplam elektromanyetik zırhlama etkileri Desibel (dB) cinsinden gösterilmiştir. Absorblama oranları yakın sonuçlar veren zırhlama etkisi belirli frekans aralıklarında pik değerleri oluşturacak şekilde bir eğilim göstermektedir.



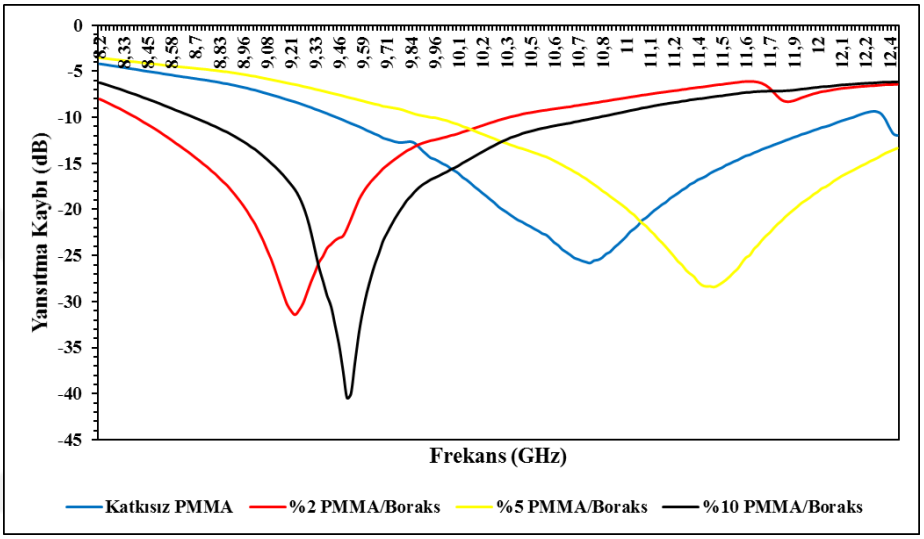
Şekil 4.23 : Toplam elektromanyetik zırhlama etkisi.

Yansıtma kaybı (reflection loss) malzemeye gelen ışının, malzeme tarafından yansıtılmayan ve yansıma yoluyla geri dönemeyen kısmını ifade etmektedir (Jayalakshmi ve diğ, 2018). Yansıtma kaybı bulunurken S_{11} parametresinden yararlanılır. Testin gerçekleştiği 8.2 – 12.4 GHz aralığında (X-bandı) örneklerin absorblama özelliğinin tanımlanabilmesi için yansımanın ne kadar engellendiği veya zayıflatıldığı bilinmelidir. Absorblayıcı malzemelerde yansıtma kaybının yüksek olması istenir. Fakat özellikle antenler gibi radyo dalgaları ve mikrodalgaların aktarımın önemli olduğu yerlerde kayıpların minimum olması istenmektedir. Yansıtma kaybı (L_{ref}) S_{11} parametresi kullanılarak denklem 4.20'deki gibi hesaplanır.

$$L_{ref} = 20log|S_{11}| \tag{4.20}$$

Yanstıma kaybı sonuçları, örneklerin ayrı ayrı olmak üzere farklı frekans değerlerinde maksimum yansıtma kaybına ulaştıklarını göstermektedir. Katkısız PMMA örneği diğer örneklere göre daha geniş bir frekans aralığında (10.4 – 11.2 GHz) maksimum

25.81 dB yansıtma kaybına uğratırken %2 PMMA/Boraks örneği maksimum 32.42 dB kayıp olacak şekilde 9.1 ve 9.36 GHz aralığında daha etkin sonuçlar vermiştir. %5 Boraks katkılı PMMA örneği ise en fazla 28.42 kayıp dB oluştururken daha dar bir bant aralığında %10 PMMA/Boraks örneği 40.45 dB yansıtma kaybı ortaya çıkarmıştır. Sonuçlar incelendiğinde X-bandının önemli bir kısmında zayıflatma gerçekleştiren örnekler tekil bantlarda maksimum değerlerini alarak yüksek zayıflatma miktarına sahip olmuşlardır. Şekil 4.24'te yansıtma kaybının X-bandında değişimi gösterilmektedir.



Şekil 4.24 : Frekansla birlikte değişen yansıtma kaybı değerleri.

Mikrodalgaları ya da radyo dalgalarını absorbe etmek için kullanılan bir yöntem de ışının ve malzemenin empedans değerlerini eşitlemektir. Empedans eşleşmeli RAM olarak adlandırılan bu malzemelere bir örnek teşkil etmesi açısından bu tez çalışmasında üretilen örneklerin empedans değerleri hesaplanarak yansıma katsayıları (reflection coefficient) elde edilmiştir. Malzemenin empedans değeri, maruz kaldığı ışımanın empedans değerine eşit olduğunda bu ışıma malzeme yüzeyinden hiç yansımaz ve malzeme tarafından ışın emilir. Bu çalışmada Shim ile yapılan ölçümler sonucunda elde edilen bağıl dielektrik sabiti ve bağıl manyetik geçirgenlik değerleri kullanılarak kırılma indisi (refractive index) hesaplanmıştır. Kırılma indisi ortam değiştiren ışımanın maruz kaldığı kırınımı ve ortam içerisindeki hızını temsil etmektedir. Kırılma indisi, 100 GHz'in altında frekansa sahip dalgalar için eğer malzeme manyetik geçirgenliğe sahip ise bağıl manyetik geçirgenlik ve bağıl dielektrik sabiti aracılığı ile hesaplanabilir. Kırılma indisi değerleri serbest uzayın (free space) empedans değeri (~377 Ω) ile çarpılırsa bahsi geçen malzemenin empedansı

hesaplanır (Markevich ve diğ, 2019; Kim ve Kim, 2018). Malzemenin empedans değeri ile serbest uzayın empedans değerinden yola çıkılarak o malzemenin yansıma katsayısı belirlenir. Malzemenin yansıma katsayısının desibel (dB) cinsinden kayıp değeri ise geri dönüş kaybını (return loss) ifade etmektedir. Yukarıda bahsi geçen işlemler denklem 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24'te sırasıyla gösterilmektedir. Burada η kırılma indisini, Z_m malzemenin empedansını, Z_0 serbest uzayın empedansını, RC yansıma katsayını ve L_{ret} geri dönüş kaybını ifade etmektedir (Magisetty ve diğ, 2018; Vinoy ve Jha, 1994; Silva ve Kretly, 2011; Vohra ve El-Shenawee, 2021; Don ve diğ, 2020; Jayalakshmi ve diğ, 2018).

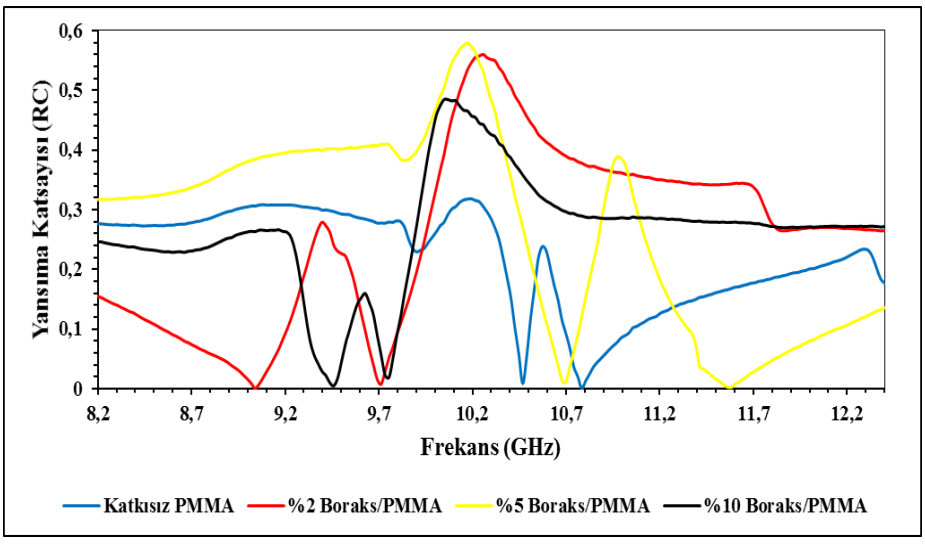
$$\eta = (\mu_r/\varepsilon_r)^{1/2} \tag{4.21}$$

$$Z_m = \eta . Z_0 \tag{4.22}$$

$$RC = \Gamma = \frac{Z_m - Z_0}{Z_m + Z_0} \tag{4.23}$$

$$L_{ret} = 20log_{10}[(Z_m - Z_0)/(Z_m + Z_0)] = 20log_{10}[\Gamma] \tag{4.24}$$

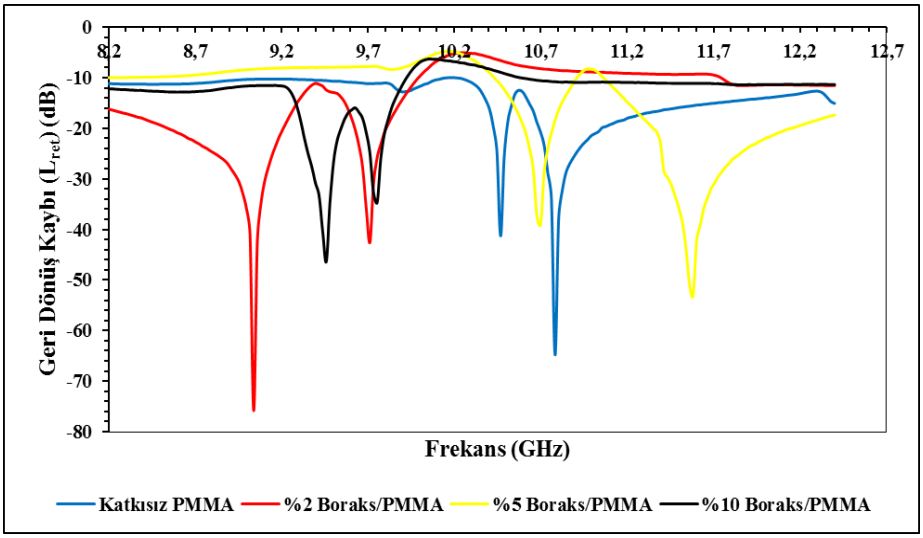
Denklem 4.22, 4.23 ve 4.24'ün kullanılması ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.25'te verilmiştir. En yüksek yansıma katsayılarının görüldüğü örnek olan %5 PMMA/Boraks örneği 10.7 GHz ve 11.6 GHz aralıklarında sıfıra yakın yansıtma katsayısı değerine sahip olmuş ve 0 – 0.58 arasında yansıtma katsayısı değerleri üretmiştir. En düşük yansıtma katsayıları katkısız PMMA örneğinde görülmüş olup 0 – 0.29 değerler aralığını almış ve 10.7 – 11 GHz bölümünde 0.1'den daha az sıfıra çok yakın yansıtma katsayısı değerleri bu örnek için görülmüştür.



Şekil 4.25 : Örneklerin yansıtma katsayı değerlerinin X-bandında değişimi.

Geri dönüş kaybı (return loss) sonuçları incelendiğinde ise her örnek farklı frekans değerlerinde iki büyük pik oluşturmuştur. Elektronik çalışmalarında maksimum 10 dB kayıp olması istenirken RAM malzemeler için geri dönüş kaybının yüksek olması beklenmektedir (Chin ve Lee, 2007; Lee ve diğ, 2017, Magisetty ve diğ, 2018). Şekil 4.26'da verilmiş olan geri dönüş kaybı grafiğinde de görülebileceği gibi örnekler tek frekans değeri yani tek bant için en yüksek değerlerine ulaşmışlardır. Katkısız PMMA için bu kayıp değeri 10.78 GHz frekansta -64.77 dB iken %2 PMMA/Boraks örneği için 9.04 GHz frekansta -75.79 dB'dir. Ağırlıkça %5 Boraks katkılı PMMA polimer kompoziti en yüksek geri dönüş kaybı 11.58 GHz frekans bandında -53.12 dB olarak bulumuşken %10 PMMA/Boraks malzemesinin minimum değeri 9.46 GHz frekansta -46.33 dB olarak tespit edilmiştir. Kayıp olması sebebiyle tüm sonuçlar eksi (negatif) işaret ile gösterilmiştir.

Performans Prob ve Shim kullanılarak elde edilen dielektrik analizi ve mikrodalga (X-bandı) testleri analizlerinin sonuçları ağırlık farklı miktarlarda Boraks ilavesi yapılmış PMMA matrisinin ve katkısız PMMA'nın birbirlerinden farklı frekans aralıkları için bant söndüren filtre olarak rol alması mümkün görünmektedir. Ayrıca kaplama amacıyla veya birden çok katmanlı malzemelerin bir katmanı/yüzeyi olarak kullanılan Salisbury screen, hibrit RAM ya da Jaumann ve Dallenbach katmanı absorblayıcı malzemeleri gibi RAM üretiminde PMMA/Boraks kompozitleri kullanılabilir.



Şekil 4.26 : Geri dönüş kaybının frekansa bağlı olarak değişimi.

5. TARTIŞMA

Ramya ve diğ. (2019), indirgenmiş Grafen Oksit ekleyerek PMMA/Grafen Oksit ürettikleri çalışmalarında XRD analizi sonucunda 10°-20° ile yaklaşık 2ϑ° = 30° arasında tümsekler bulmuşlar ve bu tepe değerlerinin oluşma nedenini ürettikleri PMMA'nın amorf fazda olması şeklinde belirtmişlerdir. Bu çalışmada bulunan XRD grafiğinde orta çıkan tepelerin açı değerleri Ramya ve diğerlerinin çalışmaları ile tutarlıdır. Ayrıca Ramya ve arkadaşlarının çalışmasında yapılan temas açısı ölçüm sonuçları 63 ° ile 77 ° arasında bulunmuş ve katkı miktarı arttıkça temas açısı değerleri artmıştır. Bu çalışmada, katkısız PMMA için temas açısı değeri 80.1° olmasına rağmen, katkı miktarı arttıkça temas açısı değerleri azalmıştır. Her iki çalışmada da numunelerin hidrofilik yüzeyleri vardır (Ramya ve diğ, 2019).

Bel ve diğ. 2019 yılında gerçekleştirdikleri çalışmalarında PMMA matrisine Kolemanit katkısı yapmışlardır. XRD sonuçlarına göre 10°-20° aralığında ve ~30°'de birer tepe tespit etmişler ve 2ϑ° = 15°, 28°, 31° ve 51° olacak şekilde pikler bulmuşlardır. Bu tez çalışmasında katkısız PMMA için bulunan 2ϑ° = 15° ve 31° pikleri Bel ve arkadaşlarının üretmiş oldukları örnekler ile uyum gösterirken diğer pik değerleri PMMA matrise farklı katkı maddeleri ilave edilmesi sebebiyle ortaya çıkmıştır. FTIR analizi sonucunda 2951, 1725, 1440, 987 ve 752 cm^{-1} dalga sayısında bulunan pikler katkısız PMMA'yı her iki çalışma için de ifade etmektedir. Bu çalışmada kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) içerisinde bulunan Bor atomlarının PMMA ile yaptığı bağların göstergesi olarak 812 cm^{-1} dalga sayısında bir pik oluşmuştur. Bu tez çalışmasında Boraks katkısı ile yakın bir dalga sayısında aynı bağ türü görülmüştür (Bel ve diğ, 2019)

Silanize Bor Nitrür ilavesi ile sentezledikleri PMMA/BN polimer kompozit örneklerine Oh ve Kim (2019) XRD analizi uygulamışlardır. PMMA/BN kompozitlerinin XRD sonuçları, bu tez çalışmasında üretilen PMMA/Boraks örneklerinin XRD sonuçları gibi yine PMMA'ya özgü 10°-20° aralığında bir kuvvetli tümsek ve 30° civarında ise zayıf bir tümsek göstermektedir. Bu tezde 2ϑ° = 42°'de bulunan tepe değeri de PMMA/BN örneklerinin bulunduğu bahsi geçen çalışmada da

görülmüştür ve bu tepe bor kaynaklı PMMA amorf yapısına işaret etmektedir. Boraks katkısının artması ile birlikte ortaya çıkan kristalit boyutunun ve pik kuvvetinin artması, ilgili çalışmada BN katkısının artmasıyla birlikte de gözlemlenmiştir. Aynı çalışma içerisinde TGA ve DSC analizlerine de yer veren Oh ve Kim'in ürettikleri katkısız PMMA örneklerinin camsı geçiş sıcaklığının(T_g) DSC analizi sonucunda 108.2 °C olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada yaklaşık olarak 112 °C olarak bulunan T_g değeriyle yakınlık göstermektedir. TGA analizi sonucunda üç kademeli kütle kaybına maruz kaldığı görülen katkısız PMMA polimerinin bu çalışmada görülen tek kademeli kütle kaybına maruz kalan katkısız PMMA'dan farkı polimerizasyon sürecinin ve polimerizasyon için gerekli bileşenlerin farklı olmasıdır (Oh ve Kim, 2019).

Razali ve diğ. (2018) ise kollajen kaplı ve kaplamasız PMMA nanofiber örnekleri üreterek gerçekleştirdikleri deneylerinde kollajen kaplaması olmayan PMMA nanofiber örnekleri için XRD sonuçlarında bu tez çalışmasında görülen ile aynı tümsek değerlerini (2ϑ = 10°-20° aralığı ve 2ϑ = 30°) tespit etmişlerdir. Ayrıca 2ϑ = 15°'de pik değerine de rastlamışlardır. XPS analizi sonrasında elde ettikleri bağlanma enerjilerinin pik değerleri 531.8, 533.4, 285, 285.6 ve 288.7 olacak şekilde yine bu tezdeki XPS sonuçları ile uyumludur. Bu çalışmada hem O1s hem de C1s pik değerleri için tespit edilen bağ türleri gerçekleştirdiğimiz tez ile aynı sonuçları vermektedir. PMMA'nın nanofiber halinde bulunması yüzey özelliklerinde ve içyapısında herhangi bir değişime sebebiyet vermemiştir. Ek olarak yine bahsi geçen çalışmada gerçekleştirilen FTIR analizi sonuçları 2990, 1730, 1450, 1260, 960 ve 754 cm^{-1} şeklindedir. Burada birbirine çok yakın dalga sayısı değerlerinde aynı bağ titreşimini gösterecek şekilde sonuçlar bulunmuştur. Bu çalışmadaki kaplamasız PMMA örneklerinin FTIR sonuçları tez içerisinde üretilen katkısız PMMA'lar ile yakın benzerlik belirtmektedir (Razali ve diğ, 2018).

Agarwal ve Saraswat (2014), yaptıkları çalışmalarında farklı miktarlarda TiO_2 nanoparçacıkları eklenmiş PMMA üretimi gerçekleştirmişlerdir. PMMA/TiO_2 nanokompozitlerinin XRD ve DSC sonuçlarını inceleyen araştırmacılar, XRD grafiğinde 2ϑ° = 30° ve 42° olacak şekilde iki tümsek tespit etmişler ve bu tümsekleri PMMA'nın amorf yapısına bağlamışlardır. Agarwal ve Saraswat'ın bu çalışmalarında buldukları XRD sonuçları tez bünyesinde bulduğumuz sonuçlar ile aynıdır. DSC analizinden bahsedildiğinde ise farklı miktarlardaki TiO_2 katkıları için farklı ısıtma hızlarında (5, 10, 15 ve 20 °C/dk) test gerçekleştirmişlerdir. DSC analizi konusunda

bu tez ile de ortak olan 10 °C/dk ısıtma hızında katkısız PMMA için 108.9, %1 TiO_2 katkılı PMMA için 110, %2 TiO_2 katkılı için 112.2 ve %3 TiO_2 katkılı PMMA için ise 116.3 °C T_g değeri bulmuşlardır. Tez bünyesinde tespit edilen T_g sıcaklık değerleri de 106 - 117 °C aralığındadır ve Boraks ve TiO_2 katkısı camsı geçiş sıcaklığı açısından benzer etkiler yapmışlardır. Fakat erime sıcaklığına bakıldığında aynı ısıtma hızı değeri için Agarwal ve Saraswat'ın çalışmalarında 378.9 ile 381.1 arasında iken bu tezde değerler 395 – 397 °C aralığındadır. Bu sonuçlar Boraks ve TiO_2 katkısının katkısız PMMA'nın camsı geçiş sıcaklığını ve erime sıcaklığını arttırdığını gösterirken Boraks ilavesinin PMMA'nın termal dayanım özelliklerini TiO_2'ye göre daha fazla geliştirdiğini belirtmektedir (Agarwal ve Saraswat, 2014).

Oh ve diğ. (2019), grafen ve epoksi kompozitleri ile kaplanmış PMMA ve kaplamasız PMMA üzerinde yaptıkları incelemeler XRD, FTIR ve TGA analizleri sonuçlarıdır. XRD sonuçlarına göre katkısız PMMA 2ϑ = 14 ve 30° olacak şekilde tümsekler oluşmuştur ve bu sonuçlar bu tez çalışması ile uyumludur. FTIR spektrasına bakıldığında 2993, 2946, 1432 cm^{-1}'de küçük pikler 1730 ve 1148 cm^{-1} dalga sayılarında ise büyük pikler oluşmuştur. FTIR spektrasından elde edilen sonuçlar da tez ile benzerlik göstermektedir. TGA sonuçları söz konusu olduğunda grafen/epoksi kaplamaları PMMA'nın termal dayanımında önemli bir değişiklik yapmaz iken asıl değişim PMMA'nın termal iletkenliğinde meydana gelmiştir (Oh ve diğ, 2019).

Pawde ve Desmukh (2009), PMMA, PVDF (Poli(viniliden florit)) ve bunların belirli oranlarda bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemeler üzerine gerçekleştirdikleri çalışmalarda FTIR, XRD, DSC, temas açısı ve mekanik analizler uygulamışlar ve sonuçlarını yayınlamışlardır. FTIR sonuçları 2993, 2946, 1730, 1432, 1220 ve 1148 cm^{-1} dalga sayılarında pikler göstermiş olup bu pik değerleri C-H (-CH_2 ve -CH_3 içerisinde), C=O, C-H_2 ve C-O bağlarını işaret etmektedir. Bu sonuçlar tez içerisinde üretilen numunelerin sonuçları ile uyuşmaktadır. DSC sonuçları göz önüne alındığında PMMA için 109 °C olarak bulunan T_g değeri bu tez ile uyuşmaktadır fakat erime noktası bu çalışmada 160.23 °C iken bu tez bünyesinde erime nokta 397 °C olarak saptanmıştır. Bu durum iki çalışmada da üretilen katkısız PMMA'nın sentez yöntemi, polimerizasyon şekli ve bağ yapısındaki farklılar nedeniyle ortaya çıkmıştır. Ayrıca Boraks katkısının aksine PVDF ile belirli oranlarda bir araya getirilen PMMA'nın ısıl dayanımında düşüş meydana gelmiştir. XRD sonuçları ise 2ϑ ~15° ve = 30° olacak şekilde bu çalışmada tespit edilmiştir ve sonuçlar bu tez ile uyumludur. Temas açısı

sonuçları ise Pawde ve Desmukh'un gerçekleştirdiği çalışmada su damlasının katkısız PMMA ile 80.12°'lik bir açı oluşturduğunu işaret etmektedir ve PMMA ile bir araya getirilmiş PVDF oranı arttıkça yüzeyin temas açısı 84.23°'den 96.09°'ye kadar yükselmektedir. Yüzey, boraks katkılı PMMA kompozitlerinin aksine daha hidrofobik olacak şekilde evrilmektedir. Ayrıca bu çalışmada araştırmacılar katkısız PMMA'nın Elastik (Young) Modulünü de hesaplamışlar ve 5.735 GPa bulmuşlardır. Buldukları bu değer, bu tez bünyesinde bulunan değere yakındır (Pawde ve Desmukh, 2009).

Ma ve diğ. (2007), PMMA'dan süperhidrofobik film ürettikleri çalışmalarında saf PMMA için 67.8° temas açısı ölçüm değerini bulmuşlardır. Bu çalışmada, katkısız PMMA'nın temas açısı değerini 80.1° olarak bulunmuştur. Polimerizasyon yöntemi ve koşullarındaki farklılıklar nedeniyle, temas açısı değeri farklı sonuçlar vermiştir. Her iki çalışma için üretilen PMMA polimerleri hidrofilik yüzeyler ortaya çıkarmıştır (Ma ve diğ, 2007)

Suzuki ve Ueno (2016) gerçekleştirdikleri çalışmalarında, PMMA polimer malzemesi için hem teorik hem de deneysel olarak farklı metotlar uygulayarak temas açısı değerleri tespit etmişlerdir. Pillar patern modeli, Cassey-Baxter Denkliği ve Young Denklemi gibi metotlar kullanarak 74.7° ve 107.1° arasında değişen temas açısı değerleri bulmuşlardır. Bulmuş oldukları sonuçlar bu çalışmada katkısız PMMA için bulunan sonuçlarla benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda bu çalışmada Boraks ilavesi ile örneklerin azalan temas açısı değerleri, Suzuki ve Ueno'nun PMMA için buldukları temas açısı değerlerinden çoğunlukla daha düşük değerlerdedir (Suzuki ve Ueno, 2016).

Zdziennicka ve diğ. (2017) PTFE, PE, PMMA, Nylon 6 ve Quartz gibi malzemeler üzerinde su, formamit ve diiyodometan kullanarak temas açısı ölçümü gerçekleştirmişlerdir. PMMA üzerinde su kullanarak yaptıkları temas açısı ölçümünde 74.25±1.3° sonucuna ulaşmışlardır. Bu durumu PMMA'nın yüzeyinde bulunan –CH3 ve C=O gruplarının bağlarına ve yüzey geriliminin elektron alıcı parametresinin düşük olmasına bağlamaktadırlar. Buldukları temas açısı değerleri bu çalışmayla uyumludur. Boraks eklenmesiyle azalan temas açısı değerlerinden yola çıkılarak Boraks ilavesinin yüzey geriliminin elektron alma isteğini arttırdığı ve yüzeye su molekülleri daha fazla bağladığı görülmektedir (Zdziennicka ve diğ, 2017).

Monsores ve diğ. (2019) UV-B ışınları uyguladıkları PMMA örneklerinin TGA ve FTIR sonuçlarını paylaşmışlardır. Yaptıkları çalışmada UV-B ışıması uygulanmamış PMMA örneklerinin kütle kaybındaki önemli azalışın başlangıç sıcaklığını 239.5 °C ve %50 oranında kütle kaybını ise 347.1 °C olarak tespit etmişlerdir. Bu tez çalışmasında TGA analizi yapılarak bulunan sonuçlar Monsores ve arkadaşlarının bulduğu sonuçlardan farklıdır. FTIR analizi sonuçlarında ise araştırmacılar; 2990, 2950, 1723, 1435, 1386, 1144 ve 750 cm^{-1} dalga sayılarında sırasıyla CH_2 ve CH_3 gerilme, CH_2 ve CH_3 bükme, C-O ve CH_2 gerilme ve C-C gerilme titreşimleri tespit etmişlerdir. FTIR sonuçları iki çalışma sonuçları olarak birbirleriyle uyumludur. TGA sonuçlarında ortaya çıkan önemli farklılık bu tez bünyesinde üretilen örneklerin ATRP yöntemi ile sentezlenmesinden kaynaklanmaktadır (Monsores ve diğ, 2019)

Goyal ve diğ. (2017) çalışmalarında PMMA matris içerisine Gümüş (Ag) nanoparçacıklar ilave ettiği görülmektedir. Raman analizi sonucunda elde ettikleri pikler 2957, 1729, 1450, 807 ve 600 cm^{-1} dalga sayısı değerlerindedir. 807 ve 600 cm^{-1} dalga sayıları dışında oluşan diğer pikler bu tezdeki katkısız PMMA örnekleri ile aynı bağ titreşim türlerini göstermektedir. Ex-situ sentezi ile üretilen Ag/PMMA ve katkısız PMMA içerisinde bu yöntem sebebiyle bu tezde bulunan PMMA örneklerine göre bir takım farklı bağ titreşimleri ortaya çıkmıştır (Goyal ve diğ, 2017).

He ve diğ. (2021) aniyonik polimerizasyon yöntemi ile in-situ sentezlemesi gerçekleştirdikleri Hekzagonal Bor Nitrit Nanosheet (BNNS)/PMMA polimer nanokompozitleri bazı testler ile analiz etmişlerdir. FTIR sonuçları 2952 ve 2852 cm^{-1} dalga sayılarında C-H bağları, 1730 cm^{-1}'de C=O bağı, 801 cm^{-1}'de ise B-N bağı bulunmuştur. Bu tez çalışmasında bulunanın B-O-H bağının değerine yakın olmasına rağmen B-N bağının ortaya çıkması katkının doğrudan BN olarak gerçekleştirilmesi nedeniyle olmuştur. XRD sonuçları kıyaslandığında ise C1s ve O1s için grafiklerinde tespit edilen bölgelerin ve bağların aynı olduğu fakat B1s sonucunda farklılaşma olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında B1s grafiğinde B-H bağları hakimken, He ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada B-N ve B-C bağları elde edilmiştir (He ve diğ, 2021).

Balcı ve diğ. 2002 yılında yayınladıkları çalışmalarında PMMA, PP (Polipropilen) ve PP matrisli PMMA üzerine incelemeler yapmışlardır. FTIR sonuçlarını paylaştıkları bu çalışmada 2999,2952, 1732, 1446, 1243, 1149, 966, 840 ve 751 cm^{-1} dalga sayılarında pik değerleri bulmuşlardır ve bu değerler tez çalışması ile oldukça

uyumludur. DSC termogramında ise erime noktasını 385 °C olarak tespit etmişlerdir. Erime noktası bu tezde bulunan erime noktası yakın olup 12 °C daha düşük bir sıcaklıktadır. TGA sonuçları ise iki çalışma için de birbirleri ile çok yakın olup 430 °C yakınlarında kütlelerinin %95 kadarını kaybetmişlerdir. Boraksın aksine PP ile bir araya getirilmiş PMMA'nın daha düşük sıcaklıklarda önemli derece kütle kaybına maruz kaldığı görülmüştür. Bu durum Boraks katkılı PMMA'lara oranla PP ile kopolimer sentezi sağlanan PMMA'nın daha düşük çalışma sıcaklıklarına kadar yükselebileceğini göstermektedir (Balcı ve diğ, 2002).

Cui ve diğ. (2015), çalışmaları çerçevesinde nanofiller olarak kullandıkları hekzagonal Bor Nitrür (hBN) ile güçlendirilmiş PMMA üzerinde çalışmışlardır. FTIR analizlerinin bir sonucu olarak, katkısız PMMA için tepe dalga sayısı değerleri, bu tez çalışması bünyesinde üretilen katkısız PMMA değerleri ile tutarlıdır. Ekledikleri hBN sayesinde sentezledikleri polimer kompozitte 810 cm^{-1} dalga sayısında B-N-B bağları oluşmuş ancak PMMA/Borax örneklerinde 985 cm^{-1}'de oluşan BO_3 bağları Cui ve diğerlerinin ürettikleri kompozitlerde bulunamamıştır. BO_3 bağları, polimer kompozitte daha güçlü etkileşimler ortaya çıkarmıştır (Cui ve diğ, 2015).

Haris ve diğ. (2010), PMMA ile yaptıkları çalışmalarında PMMA polimer sentezi gerçekleştirmişlerdir. Örnekler üzerinde yaptıkları FTIR ve Raman analizi çalışmalarının sonuçları, bu çalışmada bulunan FTIR ve Raman sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Bu sonuçlar, FTIR ve Raman analiz sonuçlarının literatür ile benzer olduğunu göstermektedir (Haris ve diğ, 2010).

Muhammettursun ve diğ. (2021) PMMA matrisine Grafen Nanoplate (GNP) ekleyerek elastik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında araştırmacılar, bu tez çalışmasında üretilen örneklerin de sentezlenmesinde metot olarak kullanılan ATRP yöntemini kullanmışlardır. Aynı polimerizasyon koşulları altında gerçekleştirilen çalışmada, FTIR analizi sonucunda 2992 ve 2948 cm^{-1}'de C-H gerilme, 1729 cm^{-1}'de C=O gerilme, 1434 cm^{-1}'de O-CH_3 bükme, 1238 cm^{-1}'de C-O gerilme, 1145 cm^{-1}'de CH_2 bükme ve 753 cm^{-1} C=O bükme titreşimleri elde edilmiştir. Bu titreşimler PMMA/Boraks polimer kompozit örneklerinin FTIR sonuçları ile örtüşmektedir. XRD sonuçları her iki çalışma için de üç tümsek bölgesi oluşturmuş ve bu tümsek bölgeleri 15, 30 ve 42° civarlarında meydana gelmiştir. 2ϑ = 19 ve 22°'lerde oluşan pikler GNP ve Boraks katkılı örnekler için ortak olup Boraks katkısının 31 ve 33° değerlerinde oluşturdukları pikler GNP katkısında 44 ve 54° civarlarında oluşmuştur. Ultrasound

testi ile gerçekleştirilen elastik parametre ölçümleri söz konusu olduğunda GNP katkılı örneklerin yoğunlukları 1.18 – 1.2 g/cm^3 aralığında iken Boraks katkılı örneklerin yoğunlukları 1.07 – 1.17 aralığındadır. Her iki katkı maddesi için de katkı miktarı arttıkça yoğunluk da artmaktadır. Katkısız PMMA için Poisson oranını 0.337, Kayma Modulünü 2.064 GPa, Young Modulünü 5.517 GPa ve Microsertliği 0.225 GPa bulan araştırmacılar GNP eklenmesi ile Poisson oranını 0.337 – 0.339, Kayma Modulünü 2.122 – 2.407, Young Modulünü 5.673 – 6.446 ve Mikrosertliği 0.23 – 0.259 aralıklarında tespit etmişlerdir. Bu tez çalışması ile karşılaştırıldığında ultrasound testi iki farklı yöntemle yapılmasına rağmen GNP katkılı örneklerin Young ve Kayma Modüllerinin maksimum %5 oranında bir farkla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum Boraks katkısının PMMA matrisinde GNP'ye göre daha yüksek esneklik kattığını göstermektedir. GNP katkısı Boraks katkısına nazaran daha sert fakat daha kırılgan bir yüzey yapısı oluşturmuştur ama bu sertlik ve kırılganlık özellikleri arasında pek fazla bir fark oluşmamaktadır (Muhammettursun ve diğ, 2021).

Thakur ve diğ. (2013) tarafından bulunan Raman kayması değerleri, Polidopamin ekleyerek ürettikleri PMMA örnekleri üzerindeki çalışmalarının sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Raman analizi sonucunda buldukları Raman kayması pikleri bu çalışmada üretilen PMMA/Boraks polimer kompozitlerin Raman analizi sonuçlarına benzerdir (Thakur ve diğ, 2013).

Chen ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmalarında, PMMA'dan ürettikleri ince film örneklerine Raman analizi uygulamışlardır. 2954 cm^{-1} Raman kayması değerinde C-H asimetrik gerilme titreşimi, 1730 cm^{-1} Raman kaymasında C=O simetrik gerilme titreşimi ve 1455 cm^{-1} Raman kayması değerinde ise O-CH_3 bükme titreşimi bulmuşlardır. Bu çalışmada üretilen PMMA/Boraks ve katkısız PMMA örneklerinden elde edilen sonuçlar bahsi geçen çalışma sonuçlarıyla yakın ve uyumludur (Chen ve diğ, 2019).

Valles ve diğ. (2020), katkısız PMMA, Grafen Nanotabaka (Grafen Nanoplate (GNP)) katkılı PMMA ve NH_2 ile kovalent bağlanmış GNP katkılı PMMA ürünlerini ürettikleri çalışmalarında XPS, TGA ve DSC analizleri yapmışlardır. XPS sonuçlarına göre her bir örnekte buldukları C1s spektrasında bağlanma enerjisi değerleri 284.8, 285.5 ve 286.8 ve 288 olmak üzere sırasıyla C=C, C-C, C-O ve C=O bağlarını işaret etmektedir. Bu sonuçlar ile tez çalışmasında elde edilen sonuçlar tutarlıdır. TGA sonuçları ise katkısız PMMA'nın 105.8 °C bulunan T_g değerinin GNP ve NH_2-GNP

katkılı örnekler için 10 - 15 °C arasında artış gösterdiğini belirtmektedir. %0.5, %1, %2 ve %5 ağırlıkça katkılanmış GNP ve NH_2-GNP'lerin katkı oranı arttıkça T_g değerleri de artmaktadır. Tüm örneklerin erime noktası değerlerine bakıldığında GNP ve NH_2-GNP katkısının katkısız PMMA'nın T_m değerinde kayda değer değişiklik yapmadığı ve ~390 – 395 °C sıcaklık aralığında olduğu belirlenmiştir. DSC sonuçları ise GNP/PMMA örneklerinin katkı miktarı arttıkça T_g değerlerinin 105.8 ile 116.7 °C arasına, NH_2-GNP/PMMA örneklerin de ise katkı miktarının artmasıyla T_g değerlerinin 105.8 ile 120.3 °C arasına yükseldiğini göstermektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında TGA ve DSC sonuçlarının Boraks katkılı PMMA örnekleri için benzer olduğu ve PMMA'nın termal özellikleri için benzer etkiler yaptığı görülmüştür (Valles ve diğ, 2020).

Brito ve diğ. (1991) MMA'nın deneysel ve teorik XPS analizine odaklandıkları çalışmalarında C1s ve O1s dağılımlarını elde etmişlerdir. C1s grafiğinde 295, 293 ve 291 eV bağlanma enerjilerinde pik değerleri tespit eden araştırmacılar, O1s grafiğinde ise 539 ve 537 eV enerji değerlerinde pikler elde etmişlerdir. Bu tezde XPS sonucunda tespit edilen bağlanma enerjisi değerlerinden bir kısım farklılıklar bulunsa da bu farklılık miktarları düşüktür. MMA'nın polimerizasyonu sürecinde oluşan zincirler ve ortaya çıkan kovalent bağlar PMMA içerisindeki atomların bağlanma enerjilerinin bir miktar azalmasına neden olmuştur (Brito ve diğ, 1991).

Ton-That ve diğ. (2001) PS (Polisitiren) ve PMMA karışımı ile hazırladıkları filmlerin XPS analiz sonuçlarını paylaştıkları çalışmalarında katkısız PMMA ve %50 PMMA/ %50 PS karışımının C1s spektralarını elde etmişlerdir. Katkısız PMMA için C1s spektrasında 285 eV bağlanma enerjisi değerinde C-C/C-H bağının, 285.7 eV enerji değerinde β-kaymalı C bağının, 286.8 eV enerjide C-O bağının ve 289.1 eV enerji değerinde ise O-C=O bağının meydana geldiğini saptanmıştır. Boraks katkısında olduğu gibi PS miktarının artışı da C=O bağının azalmasına neden olmuştur. Bu çalışmada katkısız PMMA için bulunan XPS analizi sonuçları ile tez bünyesinde üretilen katkısız PMMA örneklerinin XPS sonuçları birbirleriyle oldukça uyumludur (Ton-That ve diğ, 2001).

Artyushkova ve Fulghum (2001), PMMA ve PVC (Poli(vinil klorür)) karışımları ile ürettikleri ürünlere XPS uygulaması gerçekleştirmişler. 12 saatlik X-ışını uygulaması ardından edindikleri XPS grafiklerinde C1s spektrası için 289, 287, 285 ve 281 eV enerji değerlerinde pikler elde etmişlerdir. O1s spektrası için ise 539 ve 536 eV

enerjilerinde pikler elde etmişlerdir. Bu sonuçlar tez çalışmasının C1s ve O1s spektralarında görünen pikler ile aynıdır (Artyushkova ve Fulghum, 2001)

Rosencrance ve diğ. (1993) ile Louette ve diğ. (2005) gerçekleştirdikleri ayrı ayrı çalışmalarda PMMA'nın XPS spektrasına odaklanmışlardır. Rosencrance ve diğerleri 285, 286.6 ve 288.8 eV C1s spektrasında olmak üzere O1s spektrası için de 530.3 ve 531.9 eV bağlanma enerjisi değerlerini tespit etmişlerdir. Louette ve diğerleri ise 285, 285.84, 286.81 ve 289 eV bağlanma enerjilerini C1s spektrasından, 532.28 ve 533.79 eV bağlanma enerjilerini de O1s spektrasından olduğu halde elde etmişlerdir. Farklı zamanlarda ve farklı cihazlarla gerçekleştirilen bu iki çalışmada elde edilen sonuçlar ile bu çalışmada elde edilen sonuçlar daha yüksek hassaslıkta bulunmakla beraber birbirleriyle uyumludurlar (Rosencrance ve diğ, 1993; Louette ve diğ, 2005).

Kausar (2019), Grafit, Grafen Oksit ve Grafen katkılı PMMA polimer nanokompozitleri için yayınladığı inceleme (review) çalışmasında DSC analizi sonuçları paylaşmaktadır. Katkısız PMMA'nın camsı geçiş sıcaklığını (T_g) 103 - 104 °C aralığında tespit eden araştırmacı Grafen takviyeli PMMA'ların literatürdeki T_g aralığını da 110 – 115 °C olarak saptamıştır. İndirgenmiş Grafen Oksit (RGO) katkısı ile 135 – 160 °C aralığındaki (%1 RGO) sıcaklıklarda T_g değerlerine sahip olabilen örneklerin polimerizasyon yöntemine göre ısıl özellikleri de değişiklik göstermektedir. Katkısız PMMA örneklerinin DSC sonuçlarından elde edilen T_g değeri bu çalışma ile uyumlu olmakla birlikte literatürden bir miktar yüksek çıkmıştır. Grafen katkılı PMMA'lardan daha yüksek T_g değerine sahip olan Boraks katkılı PMMA'lar RGO katkılı PMMA'lara yakın T_g değerleri göstermektedir (Kausar, 2019).

Alqahtani (2020), yaptığı çalışmada Zirkonya (ZrO_2) ve hekzagonal Bor Nitrit (h-BN) eklediği PMMA kompozitlerinin mekanik özelliklerini belirlemiştir. Ağırlıkça %0.5, %1, %3 ve %5 h-BN ve ağırlıkça %1, %2, %3, %5, %7 ve %10 ZrO_2 ekleyerek PMMA kompozitleri elde etmiştir. FTIR sonuçlarında 2927 cm^{-1}'de C=H gerilme, 1735 cm^{-1}'de C-O gerilme, 1361 cm^{-1}'de C-H sallanma ve 1218 cm^{-1}'de ν(C-O) gerilme titreşimleri bulan araştırmacının sonuçları bu tez ile uyumludur. Alqahtani, katkısız PMMA'nın Young Modülünü 2.76 – 3.30 GPa, Kesme Modülünü 1.7 GPa, Poisson oranını 0.37 ve yoğunluğunu 1.18 g/cm^3 olarak literatürden elde etmiştir. 70 nm h-BN ilave ettiği PMMA'ların Young Modüllerini 1.467 ve 3.078 GPa aralığında, 800 nm h-BN eklediği PMMA'ların Young Modüllerini ise 2.043 ve 5.032 GPa aralığında bulmuştur. Aynı şekilde 20 nm kalınlığında ZrO_2 eklenmiş PMMA'ların Young

Modülünü 1.629 ve 4.590 GPa, 800 nm kalınlığında eklenmiş olanların da 1.841 ve 5.232 GPa aralığında bulmuştur. Katkısız PMMA'nın Young Modülünün 4.625 ve 5.185, Poisson Oranının ise 0.539 bulunduğu bu çalışmaya göre ortaya çıkan farklar PMMA'nın polimerizasyon yönteminin ATRP yöntemi olması nedeniyledir. ATRP yöntemi yüzeyde daha yüksek dayanıma sahip bağların oluşmasına neden olmuştur. Boraks katkılı örnekler göz önüne alındığında mekanik dayanım yönüyle ZrO_2 ve h-BN katkılı örneklere göre daha iyi performans göstermiş ve elastikliğe karşı dayanımı daha üst düzey çıkmıştır. Bu durum ZrO_2 ve h-BN ağırlıkça katkı miktarları artsa bile değişmemiştir (Alqahtani, 2020).

Zhi ve diğ. (2008), Bor Nitrit Nanotüpleri (BNNT) ekleyerek elde ettikleri PMMA/BN nanokompozitlerinin mekanik ve ısıl özelliklerini tespit etmişlerdir. Elastik Modülü sonuçları olarak katkısız PMMA için 2.07 GPa ve ağırlıkça %1 BNNT içeren örnek için ise 2.47 GPa değerlerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada sentezlenen katkısız PMMA ve Boraks katkılı PMMA'lardan daha düşük elastiklik karşıtı dirence sahip olan örnekler termal özellikler olarak da düşük performansa sahiptirler. TGA sonuçları katkısız PMMA için 82.9 °C T_g ve ağırlıkça %1 BNNT katkılı PMMA/BNNT için 85.2 °C T_g göstermektedir. BNNT katkısı T_g değerinde artış olmasına sebep olsa da bu durum Boraks katkısı kadar etkin değildir (Zhi ve diğ, 2008).

Yadav ve diğ. (2020), C^{+6} ve O^{+7} gibi hızlı ve ağır iyon ışıması gerçekleştirdikleri $CoFe_2O_4$/NG/PMMA kompozitinin 2-18 GHz mikrodalgalara karşı davranışını inceledikleri çalışmalarında PMMA'ya ait 30° ve 42° 2θ değerlerini XRD sonuçlarından elde etmişlerdir. Raman analizinde ise belirttikleri sonuçlar olan 750, 1341 ve 1590 cm^{-1} pik değerleri XRD sonuçlarından elde edilen değerler gibi bu tez çalışmasında bulunan sonuçlar ile paralellik göstermektedir. Yansıma kaybı sonuçları göz önüne alındığında ise bu çalışmada üretilen örneklerde maksimum 36.7 dB kayıp ile iyon akısı 10^{12} iyon/cm^2 olan hızlandırılmış O^{+7} ışınlaması yapılmış $CoFe_2O_4$/NG/PMMA örneğinde görülmüştür. Bu tez çalışmasında bulunan maksimum kayıp ise 40.45 dB ile ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örneğine aittir. Yansıma kaybı söz konusu olduğunda %10 PMMA/Boraks örnekleri $CoFe_2O_4$/NG/PMMA örneklerine göre daha yüksek performans göstermiştir (Yadav ve diğ, 2020).

Jang ve diğ. (2020) FeCoNi bileşimi ile kapladıkları PMMA örnekleri üzerinde mikrodalga etkilerini test etmişlerdir. Yansıma kaybının en üst düzey olduğu frekans değerini 12.2 GHz ve değerini de -37.2 dB olarak hacimce %25 FeCoNi ile kaplanmış

PMMA örneği üzerinde görmüşlerdir. Bu tez çalışmasında ise maksimum kayıp 9.3 GHz -40.45 dB değeriyle %10 PMMA/Boraks örneğinde ortaya çıkmıştır. 8 – 12 GHz aralığına bakıldığında ise hacimce %25 FeCoNi kaplı PMMA'nın belirli kayıp değerleri verdiği görülmektedir. Maksimum -27 dB kayıp oluşturan bu örnek %2 PMMA/Boraks örneği ile yakın yansıma kaybı değerlerine sahip olurken %10 PMMA/Boraks örneğinden daha düşük performans göstermiştir. (Jang ve diğ, 2020)

Bel ve diğ. (2021) Grafen Nanoplate (GNP) ekledikleri PMMA örneklerini ATRP yöntemi ile sentezlemişler ve bu örneklerin X-bandında mikrodalga davranışlarını ve termal özelliklerini incelemişlerdir. TGA sonuçlarına göre 196 °C'den GNP eklenmesi ile (%2 GNP katkısı için) 243 °C'ye yükselen %5 kütle kaybı değerleri bu tez bünyesinde 243 °C'den 179 °C'ye (%10 Boraks katkılı PMMA için) azalacak şekilde değişim göstermiştir. Mikrodalga yansıtma, absorblama ve geçirgenlik oranları göz önüne alındığında ise %2 GNP katkılı örneklere kıyasla Boraks katkılı tüm örneklerin X-bandının tamamında daha düşük yansıtma ve daha yüksek geçirgenlik oranlarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Bununla birlikte WR90 dalga kılavuzu kullanılarak gerçekleştirilen iki çalışma için %2 GNP katkılı PMMA örneğinin absorblama özelliğinin Boraks katkılı örneklerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Elektromanyetik zırhlama etkilerine bakıldığında ise bazı frekans aralıklarında küçük farklar olmakla beraber %2 GNP katkılı PMMA'nın Boraks katkılı PMMA'ya göre bir miktar daha etkili olduğu gözlemlenmiştir (Bel ve diğ, 2021).

Literatürden elde edilen bilgilere dayanarak bu tez bünyesinde üretilen örneklerden alınan sonuçların literatür ile karşılaştırılmasına ait bir özet Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Literatür araştırması sonucunda elde edilen bilgilerin bu tez ile karşılaştırılmasına ait özet.

Deney / Özellik	Katkı Maddesi	Sonuç	Referans	Bu Çalışma
Temas Açısı	Grafen Oksit	63º - 77º	Ramya ve diğ. (2019)	80.1° - 71.8°
	PVDF	84.23º - 96.09º	Pawde ve Desmukh (2009)	
	PS	67.8º- 154.3º	Ma ve diğ. (2007)	
	Katkısız	74.7º - 107.1º	Suzuki ve Ueno (2016)	
	Katkısız	74.25±1.3º	Zdziennicka ve diğ. (2017)	
Camsı Geçiş Sıcaklığı (Tg)	Silanize BN	108.2 - 119.7ºC	Oh ve Kim (2019)	106 – 117 °C
	TiO_2	108.9 - 116.3ºC	Agarwal ve Saraswat(2014)	
	PVDF	109 – 55 ºC	Pawde ve Desmukh (2009)	
	GNP	105.8 - 116.7 ºC	Valles ve diğ. (2020)	
	NH2-GNP	105.8 - 120.3 ºC	Valles ve diğ. (2020)	
	Grafit	103 - 104 ºC	Kausar (2019)	
	Grafen	110 - 115 ºC	Kausar (2019)	
	Grafen Oksit	135 - 160 ºC	Kausar (2019)	
	Katkısız	82.9 ºC	Zhi ve diğ. (2018)	
	BNNT	85.2 ºC	Zhi ve diğ. (2018)	
Elastik Modül	PVDF	5.735 GPa	Pawde ve Desmukh (2009)	5.185–6.234 GPa
	GNP	5.517 GPa	Muhammettursun ve diğ. (2021)	
	Katkısız	2.76 - 3.30 GPa	Alqahtani (2020)	
	Katkısız	2.07 GPa	Zhi ve diğ. (2018)	
Yansıma Kaybı (RL)	$CoFe2O4/NG/O^{+7}$	7.1 GHz / 36.7 dB	Yadav ve diğ. (2020)	9.5 GHz / 40.46 dB
	$CoFe2O4/NG/C^{+6}$	5.6 GHz / 29.2 dB	Yadav ve diğ. (2020)	
	FeCoNi	12.2 GHz / 37.2 dB	Jang ve diğ. (2020)	

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, monomeri Metil Metakrilat olan Poli(Metil Metakrilat) polimeri ve içerisine ağırlıkça farklı oranlarda Sodyum Metaborat Dekahidrat (Boraks) katkılanmış PMMA/Boraks polimer kompozitleri Atom Transfer Polimer Radikalizasyon (ATRP) yöntemi ile sentezlenmiştir. Katkısız PMMA ve ağırlıkça %2, %5, %7.5 ve %10 oranlarında Boraks içeren PMMA/Boraks örneklerinin kimyasal, fiziksel, yapısal, mekanik, termal ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Tez çalışmasının ana konusunu oluşturan radyo dalgaları karşısında PMMA ve PMMA/Boraks ürünlerinin davranışları belirlenmiştir. Bu çalışmada ATRP yönteminin, PMMA polimerinin ve onun kompozitlerinin sentezlenmesinde etkin ve uygun bir yöntem olduğu görülmüştür.

PMMA polimeri, hem literatürde ilgi gören hem de endüstrinin birçok alanında fiziksel özelliklerinden dolayı kullanılması cazip olan bir termoplastik türüdür. Sahip olduğu özellikler sayesinde yaygın kullanım alanlarında yer alan bu malzemenin kullanım alanını daha da genişletmek amacıyla PMMA matrisli polimer kompozitler ve polimer nanokompozitler oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında, PMMA'nın avantajlı özelliklerini arttırmak amacıyla, endüstride ürünlerin kullanım alanlarındaki vizyonunu geliştiren ve farklı sistemlerinde stratejik amaçlarla daha spesifik ölçülebilir hedefler sağlamak amacıyla Boraks katkısı yapılmıştır. Boraks katkısının PMMA üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla, XRD, FTIR, Raman, SEM, XPS, TGA ve DSC analizleri yapılmış, Temas Açısı, Shore-D ve Ultrasound testleri gerçekleştirilmiş ve Stereomikroskop görüntüleri alınmıştır.

PMMA ve PMMA/Boraks örnekleri üzerinde yapılan XRD analizinde PMMA'nın literatürde de bahsi geçen PMMA'ya özgü $2\theta^{o}$ = 13, 30 ve 42^{o} tümsek bölgeleri oluşmuştur ve Boraks kaynaklı pikler ortaya çıkmıştır. Bu pikler Bragg Yasası'nda kullanılarak kristalit boyutları hesaplanmıştır. XPS analizinde ise örneklerin molekülleri içerisinde gerçekleşen bağlar belirlenmiş ve Boraks katkılı ürünlerin içerisinde Bor elementinin gerçekleştirdiği bağlar tespit edilmiştir. Bu analizlerin sonuçları ATRP yönteminin PMMA polimerinin ve PMMA/Boraks polimer

kompozitinin sentezlenmesinde uygun bir yöntem olduğunu ve gerekli bağların oluşarak Boraks'ın PMMA matrisinde iyi bir dağılım gösterdiğini belirtmektedir. FTIR ve Raman analizleri içyapıdaki bağların türlerini öğrenmek amacıyla bağ üzerinde farklı titreşim oluşmasına neden olan analizlerdir. Bağlar hakkında daha detaylı bilgi elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilen bu analizler sonucunda C-H, C-O, C=O, BO_3 ve B-O-H gibi bağlarda titreşimler meydana gelmiş ve bağ türleri belirlenmiştir. Oluşan bağların hangi molekül yapısında ya da polimer zincirinin hangi bölgesinde oluştuğu da görülmüştür. Aynı zamanda MMA içerisindeki bağların, polimerizasyon sürecinde oluşan bağların ve Boraks eklenmesiyle ortaya çıkan bağların saptanması mümkün olmuştur.

Boraks katkısı PMMA'nın yüzey yapısında bir takım değişikliklere neden olmuştur. Temas açısı sonuçları, su damlalarının PMMA yüzeyine 80.1º açı değeriyle temas ettiğini gösterirken Boraks katkısı ile bu değer 74.2º açıya kadar düşmüştür. Boraks katkısı PMMA'nın hidrofiliklik özelliklerinin ve yüzey enerjisinin artmasına neden olmuştur. Katkı miktarı arttıkça da yüzey daha hidrofilik bir yapıya bürünmüştür. Boraks miktarının ağırlıkça daha da arttırılması (bu çalışmada en fazla ağırlıkça %10 Boraks katkılandı.) yüzey enerjisinin de artmasına ve daha hidrofilik yüzeyler elde edilmesine yardımcı olacaktır. Endüstride de kullanılan PMMA'nın hacimsel boyutları düşünüldüğünde kaplama ya da ham olarak kullanılan geniş yüzeye sahip PMMA'ların Boraks katkısıyla beraber daha düşük temas açılarına ulaşacağı ön görülmektedir. Temas açısı ölçümlerinde kullanılan örneklerin yüzeylerinin görüntüleri de Steromikroskop aracılığı ile alınmıştır. Stereomikroskop görüntüleri Boraks katkısının PMMA yüzeyindeki değişimini göstermekle beraber Boraks miktarının artması ile oluşan daha büyük topakların da görülmesini sağlamaktadır. Boraks'ın ufak topaklanmalarla beraber PMMA matris içerisinde homojen dağıldığı görülmektedir. Topaklanmaların giderilmesi ve dağılımın daha homojen ve daha iyi performanslı gerçekleşmesi için sentez işlemi esnasında sıcaklığın artırılması (~85 ºC) ve manyetik karıştırıcının devirinin yükseltilmesi önerilmektedir.

Polimerler için uygun bir sertlik testi olan Shore-D testi, PMMA/Boraks polimer kompozitlerin, PMMA polimerinden basınca karşı daha dayanıklı olduğunu göstermektedir. Shore-D sonucunda sertliği 80.6 bulunan katkısız PMMA'nın sertliği Boraks ilavesi ile 86.2 sertlik değerine kadar yükselmiştir. Deformasyona karşı direncin artmasına neden olan Boraks katkısı aynı zamanda elastik şekil değiştirmeye

ve kayma şekil değiştirmesine karşı da direncin artmasına neden olmuştur. Mekanik özelliklerinin iyi olması ve yüksek aşınma direncine sahip olması nedeniyle sıkça kullanılan PMMA'ya Boraks katkısı mekanik özelliklerin daha da iyileşmesi gibi bir sonuç doğurmuştur. İki farklı yöntem ile hesaplanan elastik özellikler bulunurken ses dalgalarının enine ve boyuna dalga türlerinin malzeme içerisinde ilerleme hızları temel alınmıştır. Young (Elastisite) Modülü, Kayma Modülü, Hacim Modülü, Poisson Oranı ve Mikrosertlik değerlerinin bulunduğu bu test sonrasında Boraks katkısının tüm bu parametrelerde yükselmeye sebep olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar Boraks miktarındaki artışın basma ve kesme kuvvetlerine karşı daha dayanıklı olduğunu fakat kırılmadan önceki elastikliğin bir miktar azaldığını göstermektedir. PMMA/Boraks malzemesi, katkısız PMMA'ya nazaran kuvvet karşısında daha dayanıklı ve daha rijit fakat bir miktar daha kırılgan bir yapıya gelmiştir. Isıl özelliklerin değişimi söz konusu olduğunda TGA ve DSC analiz sonuçları detaylı bilgiler vermektedir. Termoplastik bir polimer olan PMMA'nın sıcaklık artışı ile yumuşama gösterdiği bilinmektedir. Boraks katkısının PMMA'ya ısıl anlamda etkisi camsı geçiş sıcaklığı ve erime noktası üzerinde olmuştur. Camsı geçiş sıcaklığının ve erime sıcaklığının birkaç derece düşüşüyle birlikte genel olarak PMMA, Boraks katkısı olduğu halde kendi ısıl özelliklerini korumayı başarmıştır.

Dielektrik sabitlerin belirlenmesi ile birlikte 500 MHz – 50 GHz aralığında katkısız PMMA ve Boraks katkılı PMMA'ların bütün frekans aralığı boyunca en fazla %16 sapma olacak şekilde değişim göstermiş ve bağıl dielektrik sabiti 2.5 – 3 aralığında olmuştur. Tüm bant boyunca sabit değere yakın değerlere sahip olmaları örneklerin kapasite (sığa) içerisinde dielektrik malzeme olarak kullanılmasına imkân vermektedir. X-bandı içerisinde ise belirli dar frekans bantları haricinde tüm örnekler dielektrik sabitlerini koruyarak bahsi geçen bant aralığında çalışan sistemler için de dielektrik malzeme olarak görev alabilirler. Radyo dalgalarının sahip oldukları yük ve enerji depolama konusunda iyi bir performans gösterdiği ortaya çıkan örneklerden özellikle ağırlıkça %10 Boraks katkılı PMMA örneği hem dielektrik malzeme olarak hem de yansıma önleyici malzeme olarak X-bandında yüksek performans ile kullanılabilir. Optik geçirgenlik ile benzer şekilde Mikrodalga geçirgenliği de yüksek olan örnekler yüksek transmisyon ve düşük yansıtma istenen uydu, haberleşme ve elektronik alanlarında görev alabilir. Özellikle bu bant aralıklarında çalışan antenlerin yaşadığı yüksek yansıma, geri dönüş kaybı ve düşük geçirgenlik oranlarına çözüm

olarak 8.2 – 11 GHz aralığında çalışan antenlerde %5 PMMA/Boraks polimer kompoziti yüksek yansıtma, düşük geri dönüş kaybı ve yüksek transmisyon özellikleri ile alternatif yöntem olarak kaplama yapılmak suretiyle kullanılabilir. Geri dönüş kaybının ve yansıtma kaybının düşük, elektromanyetik zırhlama özelliğinin ise yüksek olduğu %2 PMMA/Boraks malzemesi ise Salisbury screen, hibrit RAM ya da Jaumann absorblayıcı malzemeleri gibi RAM üretiminde bir ara katmak, yüzey kaplaması ya da kompozit malzeme olarak rol alabilir. Geri dönüş kaybınınn genellikle 10 dB civarında olduğu örnekler 4G ve 5G teknolojilerine uyum sağlayacak şekilde uyarlanabilirler. Absorbsiyonun yüksek olduğu belirli dar frekans aralıklarında ise tüm örnekler farklı bant genişliğinde olmak üzere bant söndüren filtre görevi görerek RAM yapısında yer alabilirler. Empedans eşlenmeli RAM üretiminde; bir tabaka ya da ara katman olarak kullanılabilecek olan örneklerin tamamı, iletişimin tek bir frekans üzerinden yapıldığı ya da Radar cihazının tek bir frekans değerinde kullanıldığı sistemlere karşı yine yüksek dalga sönümlemesi uygulamalarında yer alabilir. Ayrıca uzay araçlarının iletişimi esnasında kullanılan antenler için gerekli olan yüksek ve düşük sıcaklık dayanımı, proton, nötron, beta parçacıkları ile X ve Gama ışınlarına karşı radyasyon dayanımı, yüksek mukavemet ve iyi elektromanyetik dalga geçirgenliği özelliklerinin bulunması nedeniyle PMMA/Boraks polimer kompozitleri uzay araçlarının, sondaların ve teleskopların anten ya da vericilerinde kaplama malzemesi olarak kullanılabilir. Özellikle 8 – 10 GHz aralığında frekans değerlerinde kullanılan Savaş Alanı Radarları'ndan kaçınmak amacıyla bu frekans aralığında absorblama niteliği yüksek ve yansıtma katsayısı düşük olan %2 ve %10 Boraks katkılı PMMA polimer kompozitleri büyük bir önem arz edebilir. Mikrodalga ışınların kullanıldığı sistemler göz önüne alındığında ağırlıkça farklı miktarlarda Boraks içeren PMMA örnekleri, yüksek geçirgenlikleri sayesinde bu ışınların aktarımına yardımcı olmakla birlikte belirli bant aralıklarında gerçekleştirdikleri soğurma ile de bahsi geçen sistemlerin ısınmasına ve ısınma kaynaklı performanslarının düşmesine engel olmaktadır. Özellikle Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamalarında bilgi aktarımının, sistem sıcaklığının ve performansın bir hayli önem barındırdığı uygulamalarda hem veri aktarımında hem de ısınma probleminin indirgenmesinde bu çalışmada üretilen örneklerin kullanımı mümkündür. Akıllı enerji sistemleri söz konusu olduğunda ise mikrodalgalara maruz kalan sistemler için benzer bir etkiden söz etmek olağandır. Enerji sistemlerinin IoT ve yapay zekâ gibi uygulamalar ile birlikte kullanıldığı yapılara ilave edilebilecek malzemeler olan PMMA/Boraks kompozitleri, elektronik

aksamı mikrodalgalardan koruyabilecek nitelikte hafif ve mekanik performansı geliştirilmiş bilgi taşıyıcıları olarak yüksek performans ile rol alabilir.

KAYNAKLAR

Abraham, J., Arif, M., Kumar, A., George, S. C., & Thomas, S. (2018). Thermoanalytical Techniques of Nanomaterials. S. M. Bhagyaraj, O. S. Oluwafemi, N. Kalarikkal, & S. Thomas, *Characterization of Nanomaterials* (s. 213-236). Elsevier.

Acharya, S., Ray, J., Patro, T. U., Alegaonkar, P., & Datar, S. (2018). Microwave absorption properties of reduced graphene oxide strontium hexaferrite/poly(methyl methacrylate) composites. *Nanotechnology*.

Afaf, K., Boualem, S., Khacem, K., & Mohamed, B. (2020). Experimental Analysis of the Physical Degradation of Polymers - The Case of Polymethyl Methacrylate. *Frattura ed Integrita Struttrale*, 66-80.

Agarwal, G., Negi, Y. S., Pradhan, S., Dash, M., & Samal, S. K. (2017). Wettability and contact angle of polymeric biomaterials. M. Tanzi, & S. Fare, *Characterization of Polymeric Biomaterials* (s. 57-81). Woodhead Publishing.

Agarwal, S., & Saraswat, V. K. (2014). Synthesis and Thermal Characterization of PMMA-TiO2 Nanocomposites. *Materials Science Research India*, 168-172.

Ali, U., Karim, K. J., & Buang, N. A. (2015). A Review of the Properties and Applications of Poly(Methyl Methacrylate) (PMMA). *Polymer Reviews*, 678-705.

Alqahtani, M. (2020). Mechanical properties of enhancement of self-cured PMMA reinforced with zirconia and boron nitride nanopowders for high-performance dental materials. *Journal of Mechanical Behavior of Biomedical Materials*.

Altıntaş, A. (2013). *Organik Kimya-Polimerler*. Ankara: Organik Kimya Ders Notları.

Artyushkova, K., & Fulghum, J. E. (2001). Quantification of PVC-PMMA polymer blend compositions by XPS in the presence of x-ray degradation effects. *Surface and Interface Analysis*, 352-361.

Ashby, M. (2008). Materials-a brief history. *Philosophical Magazine Letters*, 749-755.

Atay, H. Y., & Çelik, E. (2014). Barium Hexaferrite Reinforced Polymeric Dye Composite Coatings for Radar Absorbing Applications. *Polymer Composites*, 602-610.

Bakanlığı, T. C. (2014). *Kimya Teknolojisi: Polimerleri Özelliklerine Göre Sınıflandırma.* Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.

Balakrishnan, P., John, M. J., Pothen, L., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2016). Natural fibre and polymer matrix composites and their applications in aerospace engineering. S. Rana, & R. Fangueiro, *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering* (s. 365-383). Elsevier.

Balcı, Z., Akbulut, U., Toppare, L., Alkan, S., Bakır, U., & Yağcı, Y. (2002). Immobilization of Yeast Cells in Several Conducting Polymer Matrices. *Journal of Macromolecular Science Part a Pure and Applied Chemistry* , 183-197.

Banerjee, D. (2020). *Experimental Techniques in Thermal Analysis Thermogravimetric (TG) & Differential Scanning Calorimetry (DSC).* Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur.

Banerjee, D. (2021). *X-Ray Diffraction (XRD).* Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur.

Basu, A., & Aydın, A. (2006). Evaluation of Ultrasonic Testing in Rock Material Characterization. *Geotechnical Testing Journal*, 1-9.

Bates, D., Smith, G., Lu, D., & Hewitt, J. (2000). Rapid thermal non-destructive testing of aircraft component. *Composites Part B: Engineering*, 175-185.

Beamson, G., Bunn, A., & Briggs, D. (1991). High-resolution Monochromated XPS of Poly(methyl methacrylate) Thin Films on a Conducting Substrate. *Surface and Interface Analysis*, 105-115.

Beck, S., & Narain, R. (2020). Polymer Synthesis. R. Narain, *Polymer Science and Nanotechnology* (s. 21-85). Elsevier.

Beetz, T., & Jacobsen, C. (2002). Soft X-ray radiation damage studies in PMMA using a cryo-STM. *Journal of Synchotron Radiation*, 280-283.

Bel, T., Arslan, C., & Baydoğan, N. (2019). Radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate) / colemanite composite for the use in mixed irradiation fields of neutrons and gamma rays. *Materials Chemistry and Physics*, 58-67.

Bel, T., Muhammettursun, M., Kocaçınar, E., Erman, E., Gül, F. B., Doğan, E., . . . Baydoğan, N. (2021). Improvement of thermal stability and gamma-ray absorption in microwave absobable poly(methyl methacrylate)/graphene nanoplatelets nanocomposite. *Journal of Applied Polymer Science*, 50897.

Bel, T., Yahya, N., Çimenoğlu, H., Arslan, C., & Baydoğan, N. (2018). The Examination of the Changes in the Magnetic Properties of the Poly(methyl methacrylate). *Journal of Physics: Conference Series.* IOP Publishing.

Bethi, B., & Sonawane, S. H. (2018). Nanomaterials and Its Application for Clean Environment. B. A. Bhanvase, V. B. Pawade, S. J. Dhoble, S. H. Sonawane, & M. Ashokkumar, *Nanomaterials for Green Energy* (s. 385-409). Elsevier.

Bhavya, E. V., Thakur, S. S., & Choudhury, B. (2020). Advanced Materials for Aerospace Applications. R. Kumari, & B. Choudhury, *Multiscale Modelling of Advanced Materials* (s. 39-66). Singapur: Springer.

Birley, A. W., Heath, R. J., & Scoot, M. J. (1994). *Plastic Materials: Properties and Applications 2nd Edition.* Blackie Academic and Professional.

Blitz, J. (1997). *Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing.* Chapman & Hall.

Blitz, J., & Simpson, G. (1996). *Ultrasonic Methods of Non-destructive Testing.* Chapman & Hall.

Blythe, T., & Bloor, D. (2008). *Electrical Properties of Polymers, Second Edition.* Cambridge University Press.

Braun, D., Cherdron, H., Rehahn, M., & H Ritter, B. V. (2013). *Polymer Synthesis: Theory and Practice.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Brito, A. N., Keane, M. P., Correia, N., Svensson, S., Gelius, U., & Lindberg, B. J. (1991). Experimental and Theoreticak XPS Study of Model Molecules for Poly(methyl methacrylate). *Surface and Interface Analysis* , 94-104.

Callister, W. D., & Retwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering 9th Edition.* John Wiley & Sons.

Cao, D., Yang, G., Bourham, M., & Moneghan, D. (2020). Gamma radiation shielding properties of poly(methyl methacrylate)/Bi2O3 composites. *Nuclear Engineering and Technology*, 2613-2619.

Carraher, C. E. (2003). *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry Sixth Edition.* CRC Press.

Celozzi, S., Araneo, R., & Lovat, G. (2008). *Electromagnetic Shielding.* New Jersey: John Wiley & Sons.

Chauhan, V. (2008). *Microwave and Radar Engineering.* New Delhi: University Science Press/Laxmi Publications.

Che, B. D., Nguyen, L. T., Nguyen, B. Q., Nguyen, H. T., Le, T. V., & Nguyen, N. H. (2014). Effects of Carbon Nanotube Dispersion Methods on the Radar Absorbing Properties of MWCNT/Epoxy Nanocomposites. *Macromolecular Research*, 1221-1228.

Chen, G., Weng, W., Wu, D., & Wu, C. (2003). PMMA/graphite nanosheets composite and its conducting properties. *European Polymer Journal*, 2329-2335.

Chen, J., Li, J., Xu, L., Hong, W., Yang, Y., & Chen, X. (2019). The Glass-Transition Temperature of Supported PMMA Thin Films with Hydrogen Bond/Plasmonic Interface. *Polymers*.

Chin, W. S., & Lee, D. G. (2007). Development of the composite RAS (radar absorbing structure) for the X-band frequency range . *Composite Structures* , 457-465.

Choudhary, A., Banerjee, M., Mukherjee, G. S., & Joshi, A. (2019). Magnetic and Structural Properties of Poly Methyl Methacrylate (PMMA)/Fe Film. *AIP Conference Proceedings* (s. 1-4). AIP Publishing.

Collin, R. E. (1992). *Foundations for Microwave Engineering.* New York: John Wiley & Sons.

Cui, Z., Martinez, A. P., & Adamson, D. H. (2015). PMMA functionalized boron nitride sheets as nanofillers. *Nanoscale*.

Daoud, M., Stanley, H. E., & Stauffer, D. (2007). Scaling, Exponents, and Fractal Dimensions . J. E. Mark, *Physical Properties of Polymers Handbook Second Edition* (s. 83-89). Springer Science+Business Media.

Davis, F. J. (2014). *Polymer Chemistry: A Practical Approach.* Oxford: Oxford University Press.

Docomo. (2020). *5G Evolution and 6G.* NTT DOCOMO, INC.

Dong, L., Wang, Y., Zhu, H., Wu, J., Gu, W., & Meng, Q. (2021). Multi-objective optimization design of a multilayer radar absorbing material. *IEEE*.

Düz, M. (2021). *Termal Analiz Metotları.* Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi.

Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., & Soni, A. (2018). Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Material Today: Proceedings*, 3690-3698.

Ebewele, R. O. (2020). *Polymer Science and Technology.* CRC Press.

Ebnesajjad, S. (2014). Surface and Material Characterization Techniques. S. Ebnesajjad, *Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding* (s. 39-75). Elsevier.

Edwards, M. (2000). Land-based Military Applications. A. Kelly, & C. Zweben, *Compherensive Composite Materials* (s. 1-18). Elsevier.

Eluwole, O. T., Udoh, N., Ojo, M., Okoro, C., & Akinyoade, A. J. (2018). From 1G to 5G, What Next? *International Journal of Computer Science*.

Erayman, Y., & Korkmaz, Y. (2017). Süperhidrofob Tekstil Yüzeylerin Florsuz Bileşikler Kullanılarak Sol-Jel Yöntemi ile Modifikasyonu. *Tekstil ve Mühendislik*, 41-52.

Ermurat, Y. (2021). Phenomenal Simulation Modelling of X-Ray Diffraction Patterns of Pyrite Ash Bioprocessed in Acetobacter aceti Contained Media. *Kemija u Industriji*, 29-38.

Ersöz, M., Sulak, M., Bersani, M., Işıtan, A., & Balaban, M. (2018). *Nanoteknoloji 2 Karakterizasyon ve Uygulama.* Denizli: BilalOfset.

Folgueras, L. C., & Rezende, M. C. (2008). Multilayer Radar Absorbing Material Processing by Using Polymeric Nonwoven and Conducting Polymer. *Materials Research*, 245-249.

Ford, K. W. (2013). *101 Quantum Questions.* Harvard: Harvard University Press.

Franchitto, M., Faez, R., Orlando, A. J., Rezende, M. C., & Martin, I. M. (2001). Electromagnetic Behavior of Radar Absorbing Materials Based on Conducting Polymers. *SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2001 Proceedings.* IEEE.

Gao, W., & Li, Z. (2010). Nanostructured transition metal oxides and their applications in composites. S. C. Tjong, & Y. W. Mai, *Physical Properties and Applications of Polymer Nanocomposites* (s. 723-742). Woodhead Publishing.

Gaylor, K. (1989). *Radar Absorbing Materials - Mechanism and Materials.* Victoria, Australia: DSTO Materials Research Laboratory.

Geyer, R. G. (1990). *Dielectric Characterization and Reference Materials.* Washington: U.S Goverment Printing Office.

Gholizadeh, S. (2016). A review of non-destructive testing methods of composite materials. *Procedia Structural Integrity* , 50-57.

Giridhar, G., Manepalli, R. K., & Apparao, G. (2017). Contact Angle Measurement Techniques for Nanomaterials. S. Thomas, R. Thomas, A. K. Zachariah, & R. K. Mishra, *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* (s. 173-195). Elsevier.

Gowariker, V. R., Viswanathan, N. V., & Sreedhar, J. (2005). *Polymer Science.* New Delhi: New Age International Publishers.

Goyal, A., Sharma, A., Saini, I., Chandak, N., & Sharma, P. (2017). Tailoring of optical and electrical properties of PMMA by incorporation of Ag nanoparticles. *Bulletin of Material Science*, 615-621.

Gül, F. B., Baydoğan, N. (2020). Synthesis of Poly (methyl methacrylate) with Borax Decahydrate Addition for Energy Applications. *Proceedings of International 2nd Conference on Sustainable Energy and Energy Calculations* (s. 38-44). İstanbul: Turkish-German University.

Gürdal, O. (2017). *Elektromanyetik Alan Teorisi.* Bursa: Bursa Orhangazi Üniversitesi Yayınları.

Haris, M. R., Kathiresan, S., & Mohan, S. (2010). FT-IR and FT-Raman Spectra and Normal Coordinate Analysis of Poly methyl methacrylate. *Der Pharma Chemica*, 316-323.

He, Z., Zhao, J., Li, F., Zhang, D., Guo, F., & Guo, H. (2021). In situ synthesis of polymer-modified boron nitride nanosheets via anionic polymerization. *Applied Surface Sciences* , 147966.

Herter, C. A. (1985). The Electromagnetic Spectrum: A Critical Natural Resource. *Natural Resources Journal*, 651-663.

Hijazi, A. (2020). *Introduction to Non-Destructive Testing Techniques.*

Hofmann, S. (2013). Bölüm 1. S. Hofmann, *Auger- and X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Materials Science* (s. 2). Berlin: Springer.

Hofmann, S. (2013). Bölüm 8. S. Hofmann, *Auger- and X-Ray Photoelectron Spectroscopy in Materials Science* (s. 409). Berlin: Springer.

Holder, C. F., & Schaak, R. E. (2019). Tutorial on Powder X-ray Diffraction for Characterizing Nanoscale Materials. *ACS Nano*, 7359-7365.

Hore, M. J. (2019). Polymers on Nanoparticles: Structure & Dynamics. *Soft Matter*, 1-15.

Hubin, A., & Terryn, H. (2004). X-ray photoelectron and Auger electron spectroscopy. K. Janssens, & R. V. Grieken, *Comprehensive Analytical Chemistry XLII* (s. 277-312). Elsevier.

Hull, J. B., & John, V. (1988). *Non-Destructive Testing.* Macmillan Education.

Iwashita, N. (2016). X-ray Powder Diffraction. M. Inagaki, *Materials Science and Engineering of Carbon: Characterization* (s. 7-24). Butterworth-Heinemann.

Jang, H. K., Shin, J. H., & Kim, C. G. (2010). Low RCS Patch Array Antenna with Electromagnetic Bandgap using a Conducting Polymer. *IEEE*, 140-143.

Jang, W., Mallesh, S., Lee, S. B., & Kim, K. H. (2020). Microwave absorption properties of core-shell structured FeCoNi@PMMA filled in composites. *Current Applied Physics* , 525-530.

Janssens, K. (2004). X-ray based methods of analysis. K. Janssens, & R. V. Grieken, *Comprehensive Analytical Chemistry XLII* (s. 129-226). Elsevier.

Jayalakshmi, C. G., Inamdar, A., Anand, A., & Kandasubramanian, B. (2018). Polymer matrix composites as broadband radar absorbing structures for stealth aircrafts. *Journal of Applied Polymer Science*, 47241 (1-21).

Kalakonda, P., & Banne, S. (2017). Thermomechanical properties of PMMA and modified SWCNT composites. *Nanotechnology, Science and Applications*, 45-52.

Karakeçeli, A. (2018). *Enstrümental Analiz: Termal Analizler-I.* Ankara: Ankara Üniversitesi.

Kausar, A. (2019). Poly(methyl methacrylate) nanocomposite reinforced with graphene, graphene oxide, and graphite: a review. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 821-842.

Kim, S. Y., & Kim, S. S. (2018). Design of Radar Absorbing Structures Utilizing Carbon-Based Polymer Composites. *Polymers & Polymer Composites*.

Klinkenbusch, L. (2005). On the Shielding Effectiveness Closure. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 589-601.

Koltzenburg, S., Maskos, M., & Nuyken, O. (2014). *Polymere: Synthese, Eigenschaften, und Anwendungen.* Springer Spektrum.

Koltzenburg, S., Maskos, M., & Nuyken, O. (2017). *Polymer Chemistry.* Berlin: Springer-Verlag.

Kondrashov, S. V., Gurevich, Y. M., Popkov, O. V., & Shashkeev, K. A. (2017). Broadband Radio-Absorbing Materials Based on Porous Composites with Carbon Nanotubes. *Polymer Science Series D*, 279-284.

Kondrashov, S. V., Soldatov, M. A., Gunyaeva, A. G., & Shashkeev, K. A. (2017). The use of noncovalently modified carbon nanotubes for preparation of hybrid polimeric composite materials with electrically conductive and lightning resistant properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 46108 (1-8).

Koshy, O., Subramian, L., & Thomas, S. (2017). Differential Scanning Calorimetry in Nanoscience and Nanotechnology. S. Thomas, R. Thomas, A. K. Zachariah, & R. K. Mishra, *Thermal nd Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* (s. 109-122). Elsevier.

Krautkrämer, J., & Krautkrämer H. (1990). *Ultrasonic Testing of Materials.* New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Kumari, R., & Choudhury, B. (2020). *Multiscale Modelling of Advanced Materials.* Singapur: Springer.

Kuran, W. (2001). General Features of Coordination Polymerisation. W. Kuran, *Principles of Coordination Polymerisation* (s. 9-42). John Wiley & Sons.

Lal, K., Jadaun, V. S., & Saiyed, A. (2017). Specialty Microwave (Radar) Absorbent Material (RAM) for Space, Radar/Missile Project. *Antenna Test & Measurement Society*.

Langenberg, K. J., Marklein, R., & Mayet, K. (2009). *Ultrasonic Nondestructive Testing of Materials: Theoretical Foundations.* CRC Press/Taylor & Francis Group.

Lederer, P. G. (1986). *An Introduction to Radar Absorbent Materials (RAM).* Malvern: Royal Signal and Radar Establishment.

Lee, S. B., Choi, J. R., Jung, B. M., Cho, S., & Lee, S. K. (2017). Electromagnetic Wave Absorbing Properties of Magnetic Particles and Carbon Nanomaterials Reinforced Composites. *Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (s. 32-34). Seoul: IEEE.

Lin, Y., K A Jenkins, A. V.-G., Small, J. P., Farmer, D. B., & Avouris, P. (2009). Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies. *Nano Letters*, 422-426.

Loganathan, S., Valapa, R. B., Mishra, R. K., Pugazhenthi, G., & Thomas, S. (2017). Thermogravimetric Analysis for Characterization of Nanomaterials. S. Thomas, R. Thomas, A. K. Zachariah, & R. K. Mishra, *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* (s. 67-108). Elsevier.

Loridant, S. (2018). Raman Spectroscopy of Nanomaterials: Applications to Heterogeneous Catalysis. S. M. Bhagyaraj, O. S. Oluwafemi, N. Kalarikkal, & S. Thomas, *Characterization of Nanomaterials* (s. 37-59). Elsevier.

Louette, P., Bodino, F., & Pireaux, J. J. (2005). Poly(methyl methacrylate) (PMMA) XPS Reference Core Level and Energy Loss Spectra. *Surface Science Spectra*, 69-73.

Ma, Y., Cao, X., Feng, X., Ma, Y., & Zou, H. (2007). Fabrication of super-hydrophobic film from PMMA with intrinsic water contact angle below 90°. *Polymer*, 7455-7460.

Magisetty, R., Shukla, A., & Kandasubramanian, B. (2018). Magnetodielectric Microwave Radiation Absorbent Materials and Their Polymer Composites. *Journal of Electronic Materials*, 6335-6365.

Mairinger, F. (2004). UV-, IR-, X-ray Imaging . K. Janssens, & R. V. Grieken, *Comprehensive Analytical Chemistry XLII* (s. 15-71). Elsevier.

Margolis, J. M. (2020). *Engineering Thermoplastics: Properties and Applications.* CRC Press.

Markevich, I. A., Drokin, N. A., & Selyutin, G. E. (2019). Impedance Spectroscopy Study of a Polymer Composite with Carbon Nanotubes in Contact with an Electrolyte. *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki*, 1400-1405.

Mayeen, A., Shaji, L. K., Nair, A. K., & Kalarikkal, N. (2018). Morphological Characterization of Nanomaterials. S. M. Bhagyaraj, O. S. Oluwafemi, N. Kalarikkal, & S. Thomas, *Characterization of Nanomaterials* (s. 335-364). Elsevier.

Meek, T. T. (1992). Microwave Heating of Lunar Materials. M. F. McKay, D. S. McKay, & M. B. Duke, *Space Resources: Materials* (s. 307-310). Houston, Texas: NASA.

MEGEP. (2006). *Plastik Teknolojisi: Polimerlerin Fiziksel Özellikleri 2* . Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı.

Meril, A. S., Basthikodi, M., & Faizabadi, A. R. (2019). Review: Comprehensive study of 5G and 6G Communication Network. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 715-719.

Micheli, D., Apollo, C., Pastore, R., Morles, R. B., Marchetti, M., & Gradoni, G. (2011). Electromagnetic Characterization of Composite Materials and Microwave Absorbing Modelling. B. Reddy, *Advances in Nanocomposites - Synthesis, Characterization and Industrial Applications* (s. 359-384). Rijeka: InTech.

Mishra, R. K., Cherusseri, J., Allahyari, E., Thomas, S., & Kalarikkal, N. (2017). Small-Angle Light and X-ray Scattering in Nanoscience and Nanotechnology. S. Thomas, R. Thomas, A. Zachariah, & R. K. Mishra, *Thermal and Rheological Measurement Techniques for Nanomaterials Characterization* (s. 233-269). Elsevier.

Misra, G. S. (2005). *Introductory Polymer Chemistry.* New Age International Publishers.

Mittal, G., Rhee, K. Y., & Park, S. J. (2016). Processing and Characterization of PMMA/PI Composites Reinforced with Surface Functionalized Hexagonal Boron Nitride. *Applied Surface Science*.

Moeini, M. H., Hossein, M., Famili, N., Forooraghi, K., Alkouh, M. S., & Ghahvechian, N. (2014). Numerical and Experimental Evaluation of Radar Absorbing Properties of Microcellular Thermoplastic Polyurethane Foam in X Band Frequency Ranges. *Modares Journal of Electrical Engineering*, 32-46.

Monsores, K. G., Silva, A. O., Oliviera, S. S., Rodrigues, J. G., & Weber, R. P. (2019). Influence of ultraviolet radiation on polymethylmethacrylate (PMMA). *Journal of Materials Research and Technology*, 3713-3718.

Mouritz, A. (2012). Fibre-polymer composites for aerospace structures and engines. A. Mouritz, *Introduction to Aerospace Materials* (s. 338-393). Woodhead Publishing.

Mouritz, A. (2012). Polymers for aerospace structures. A. Mouritz, *Introduction to Aerospace Materials* (s. 268-302). Woodhead Publishing.

Mouritz, A. P. (2012). *Introduction to Aerospace Materials.* Woodhead Publishing.

Muhammettursun, M., Bel, T., Kocaçınar, E., Erman, E., Gül, F. B., Augousti, A., & Baydoğan, N. (2021). Investigation of the elastic properties of poly (methyl methacrylate) reinforced with graphene nanoplatelets. *Journal of Applied Polymer Science*, 50689.

Munalli, D., Dimitrakis, G., Chronopoulos, D., Greedy, S., & Long, A. (2019). Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites. *Composites Part B*.

Munir, A. (2015). Microwave Radar Absorbing Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology*, 21617 (1-10).

Nesvijski, E. G. (2000). Some aspects of ultrasonic testing of composites. *Composite Structures*, 151-155.

Oh, H., & Kim, J. (2019). Fabrication of polymethyl methacrylate composites with silanized boron nitride by in-situ polymerization for high thermal conductivity. *Composites Science and Technology*, 153-162.

Oh, H., Kim, K., Ryu, S., & Kim, J. (2019). Enhancement of thermal conductivity of polymethyl methacrylate-coated graphene/epoxy composites using admicellar polymerization with different ionic surfactants. *Composites Part A*, 206-215.

Ohja, P. K., & Karmakar, S. (2018). Boron for liquid fuel Engines-A review on synthesis, dispersion stability in liquid fuel and combustion aspects. *Progress in Aerospace Sciences*, 18-45.

Öztürk, H., & Kaya, D. (2013). *Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi: Fotovoltaik Teknoloji.* Kocaeli: Umuttepe Yayınları.

Pande, S., Singh, B. P., Mathur, R. B., Dhami, T. L., Saini, P., & Dhawan, S. K. (2009). Improved Electromagnetic Interference Shielding Properties of MWCNT-PMMA Composites Using Layered Structures. *Nanoscale Research Letters*, 327-334.

Pastorino, M. (2010). *Microwave Imaging.* New Jersey: John Wiley & Sons.

Pawar, E. (2016). A Review Article on Acrylic PMMA. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1-4.

Pawde, S. M., & Deshmukh, K. (2009). Investigation of the Structural, Thermal, Mechanical, and Optical Properties of Poly(methyl methacrylate) and Poly(vinylidene fluoride) Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 2169-2179.

Peng, J., Dong, Y., Wang, L., Li, L., Li, W., & Feng, H. (2014). Effect of Impurities on the Solubility, Metastable, Zone Width and Nucleation Kinetics of Borax Decahydrate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 12170-12178.

Peng, Y. Y., Dussan, D. D., & Narain, R. (2020). Thermal, mechanical, and electrical properties. R. Narain, *Polymer Science and Nanotechnology* (s. 179-201). Elsevier.

Peng, Y. Y., Srinivas, S., & Narain, R. (2020). Nature and molecular structure of polymers. R. Narain, *Polymer Science and Nanotechnology* (s. 13-19). Elsevier.

Perumalraj, R., Dasaradan, B. S., Anbarasu, R., Arokiaraj, P., & Harish, S. L. (2009). Electromagnetic shielding effectiveness of copper core-woven fabrics. *The Journal of The Textile Institute*, 512-514.

Pinho, M. S., Gregori, M. L., Nunes, R. C., & Soares, B. G. (2002). Performance of radar absorbing materials by waveguide measurement for X- and Ku-band frequencies. *European Polymer Journal*, 2321-2327.

Plazek, D. J., & Ngai, K. L. (2007). The Glass Temperature. J. E. Mark, *Physical Properties of Polymer Handbook* (s. 187-216). Springer Science+Business Media.

Pleul, D., & Simon, F. (2008). X-Ray Photoelectron Spectroscopy. M. Stamm, *Polymer Surfaces and Interfaces* (s. 71-89). Springer.

Pullanchiyodan, A., Nair, K. S., & Surendran, K. P. (2017). Silver-Decorated Boron Nitride Nanosheets as an Effective Hybrid Filler in PMMA for High-Thermal-Conductivity Electronic Substrates. *ACS Omega*, 8825-8835.

Qin, L., Li, G., Hou, J., Yu, X., Ding, H., Zhang, Q., . . . Qu, X. (2015). Preparation, Characterization, and Thermal Properties of Poly (methyl methacrylate)/Boron Nitride Composites by Bulk Polymerization. *Polymer Composites*, 1675-1684.

Raj, B., Jayakumar, T., & Thavasimuthu, M. (2002). *Practical Non-destructive Testing.* Woodhead Publishing.

Rajendran, S., & Uma, T. (2000). Conductivity studies on PVC/PMMA polymer blend electrolyte. *Materials Letters*, 242-247.

Ramesh, S., Leen, K. H., Kumutha, K., & Arof, A. K. (2007). FTIR Studies of PVC/PMMA blend based polymer electrolytes. *Spectrochimica Acta Part A*, 1237-1242.

Ramya, J. R., Arul, K. T., Sathiamurthi, P., Nivethaa, E. A., & Baskar, S. (2019). Gamma irradiated poly (methyl methacrylate)-reduced graphene oxide composite thin films for multifunctional applications. *Composites Part B*, 752-760.

Ramya, K. (2013). Radar Absorbing Material. *Applied Mechanics and Materials*, 450-453.

Razali, R. A., Lokanathan, Y., Chowdhury, S. R., Saim, A., & Idrus, R. H. (2018). Physicochemical and Structural Characterization of Surface Modified Electrospun PMMA Nanofibre. *Sains Malaysiana* , 1787-1794.

Reddy, M. R., Subrahmanyam, A. R., Reddy, M. M., Kumar, J. S., Kamalaker, V., & Reddy, M. J. (2016). X-RD, SEM, FT-IR, DSC Studies of Polymer Blend Films of PMMA and PEO. *Materials Today: Proceedings*, 3713-3718.

Roh, J. S., Chi, Y. S., Kang, T. J., & Nam, S. W. (2008). Electromagnetic Shielding Effectiveness of Multifunctional Metal Composite Fabrics. *Textile Research Journal*, 825-835.

Rosencrance, S. W., Way, W. K., Winograd, N., & Shirley, D. A. (1993). Polymethylmethacrylate by XPS. *Surface Science Spectra*, 71-75.

Sakuda, A., Hayashi, A., Takigawa, Y., Higashi, K., & Tatsumisago, M. (2013). Evaluation of elastic modulus of Li2S-P2S5 glassy solid electrolyte by ultrasonic sound velocity measurement and compression test. *Journal of Ceramic Society of Japan*, 946-949.

Saldivar-Guerra, E., & Vivaldo-Lima, E. (2013). *Handbook of Polymer Synthesis, Characterization and Processing.* John Wiley & Sons.

Sasria, N., Ardyananta, H., & Fajarin, R. (2017). Synthesis and Characterization of BaFe12O19/Poly(aniline, pyrrole, ethylene terephthalate) Composites Coastings as Radar Absorbing Material (RAM). *Journal of Physics Conference Series 877* (s. 012057 (1-11)). IOP Publishing.

Saville, P. (2005). *Review of Radar Absorbing Materials.* Defence R&D Canada-Atlantic.

Sayan, P., Sargut, S. T., & Kıran, B. (2010). Effect of impurities on the microhardness of borax decahydrate. *Powder Technology*, 254-259.

Schabowicz, K. (2019). Non-Destructive Testing of Materials in Civil Engineering. *Materials*.

Sebastian, M. T. (2008). Bölüm 1. M. T. Sebastian, *Dielectric Materials for Wireless Communication* (s. 1-10). Elsevier.

Sebastian, M. T. (2008). Bölüm 2 . M. T. Sebastian, *Dielectric Materials for Wireless Communication* (s. 11-47). Elsevier.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers 6th Edition.* Thomson Brooks/Cole.

Serway, R. A., Vuille, C., & Faughn, J. S. (2009). *College Physics Eight Edition.* Brooks/Cole Cengage Learning.

Sharma, A., & Sinha, A. K. (2018). Ultrasonic Testing for Mechanical Engineering Domain: Present and Future Perspective. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 243-253.

Sharma, D. (2005). *A Handbook of Polymer Chemistry.* New Delhi: International Scientific Publishing Academy.

Sharma, S., Setia, P., Chandra, R., & Thakur, N. (2019). Experimental and molecular dynamics study of boron nitride nanotube-reinforced polymethyl methacrylate composites. *Journal of Composite Materials*.

Shashkeev, K. A., Kondrashov, S. V., Popkov, O. V., Solovianchik, L. V., & Lobanov, M. V. (2017). The effect of fluorosilicone modifiers on the carbon nanotube network in epoxy matrix. *Journal of Applied Polymer Science*, 46539 (1-10).

Shercliff, H., Ashby, M., & Cebon, D. (2018). *Materials: Engineering, Science, Processing and Desing.* Butterworth Heinemann.

Shrivastava, A. (2018). Polymerization. A. Shrivastava, *Introduction to Plastics Engineering* (s. 17-48). Elsevier.

Silva, M. W., & Kretly, L. C. (2011). A New Concept of RAM-Radiation Absorbent Material: Applying Corrugated Surfaces to Improve Reflectivity. *IEEE*, 556-560.

Skoog, D. A., & West, D. M. (1981). *Principles of Instrumantal Analysis.* Saunders College: Philadelphia.

Smith, W. F. (2006). *Foundations of Materials Science and Engineering 4e.* McGraw Hill.

Song, W. L., Cao, M. S., Lu, M. M., Bi, S., Wang, C. Y., Liu, J., . . . Fan, L. Z. (2014). Flexible graphene/polymer composite films in sandwich structures for effective electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 67-76.

Su, W. F. (2013). Coordination Polymerization. S. W. F, *Principles of Polymer Design and Synthesis* (s. 219-232). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Subramanian, M. N. (2017). *Basics of Polymer Chemistry.* River Publishers.

Sundararajan, P. R. (2007). Chain Structures. J. E. Mark, *Physical Properties of Polymers Handbook* (s. 1-24). Springer Science+Business Media.

Susskind, L., & Friedman, A. (2014). *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum.* Basic Books.

Suzuki, S., & Ueno, K. (2016). Apparent Contact Angle Calculated from a Water Repellent Model with Pinning Effect. *Langmuir*.

Tang, Y., Xiao, C., Ding, J., Hu, K., Zheng, K., & Tian, X. (2020). Synergetic enhancement of thermal conductivity in the silica-coated boron nitride (SiO2@BN)/polymethyl methacrylate (PMMA) composites. *Colloid and Polymer Science*, 385-393.

Teegarden, D. (2004). *Polymer Chemistry: Introduction to an Indispensable Science.* Arlington, Virginia: National Science Teachers Association Press.

Teli, M. D., & Valia, S. P. (2019). Graphene and CNT Based EMI Shielding Materials. M. Jaroszewski, S. Thomas, & A. V. Rane, *Advanced Materials for Electromagnetic Shielding: Fundamentals, Properties, and Applications* (s. 241-261). John Wiley & Sons.

Thakur, V. K., Vennerberg, D., Madbouly, S. A., & Kessler, M. R. (2014). Bio-inspired green surface functionalization of PMMA for multifunctional capacitors. *RSC Advances*, 6677-6684.

Ton-That, C., Shard, A. G., Teare, D. O., & Bradley, R. H. (2001). XPS and AFM surface studies of solvent-cast PS/PMMA blends. *Polymer*, 1121-1129.

Ura, D. P., Karbowniczek, J. E., Sewczyk, P. K., Metwally, S., & Kopyscianski, M. (2019). Cell Integration with Electrospun PMMA Nanofibers, Microfibers, Ribbons, and Films: A Microscopy Study. *Bioengineering*, 6,41 1-12.

Valerio, A., & Morelhao, S. L. (2019). Usage of Scherer's formula in X-ray diffraction analysis of size distribution in systems of monocrystalline nanoparticles. *arXiv*.

Valiulis, A. V. (2014). *A History of Materials and Technologies Development.* VGTU Press TECHNIKA.

Valles, C., Papageorgiou, D. G., Lin, F., Li, Z., Spencer, B. F., Young, R. J., & Kinloch, I. A. (2020). PMMA-grafted graphene nanoplatelets to reinforce the mechanical and thermal properties of PMMA composites. *Carbon*, 750-760.

Velsor, J. K., Premkumar, L., Chehab, G., & Rose, J. L. (2011). Measuring the Complex Modulus of Asphalt Concrete Using Ultrasonic Testing. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 160-168.

Vinoy, K. J., & Jha, R. M. (1995). Trends in radar absorbing materials technology. *Sadhana*, 815-850.

Vohra, N., & El-Shenawee, M. (2021). K- and W-Band Free-Space Characterizations of Highly Conductive Radar Absorbing Materials. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.

Waclawska, I. (1995). Thermal Decompositon of Borax. *Journal of Thermal Analysis*, 261-269.

Wang, Y. (2008). Research Progress on Radar Absorbing Materials. *Military Microwaves*, 36-47.

Wang, Y., Li, T., Zhao, L., Hu, Z., & Gu, Y. (2011). Research Progress on Nanostructured Radar Absorbing Materials. *Energy and Power Engineering* , 580-584.

Watts, J. F., & Wolstenholme, J. (2003). *An Introduction to Surface Analysis by XPS and AES.* Cornwall: John Wiley & Sons.

Weinberg, S. (2003). *The Discovery of Subatomic Particles Revised Edition.* Cambridge: Cambrigde University Press.

Wilson, P. F., Ma, M. T., & Adams, J. W. (1988). Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part I:-Far Field Source Simulation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 239-250.

Winson, D., Shibu, P. S., & Choudhury, B. (2020). Radar Absorber Desing using Two-Dimensional Materials. R. Kumari, & B. Choudhury, *Multiscale Modelling of Advanced Materials* (s. 67-80). Singapur: Springer.

Woods, W. G. (1994). An Introduction to Boron: History, Sources, Uses and Chemistry. *Environmental Health Perspectives*, 5-11.

Wright, W. M. (1996). *Air-Coupled Ultrasonic Testing of Materials.* Warvick: University of Warvick.

Wypych, G. (2016). *Handbook of Polymers.* Toronto: ChemTec Publishing.

Yadav, P., Rattan, S., Tripathi, A., & Kumar, S. (2020). Tailoring of complex permittivity, permeability, and microwave-absorbing properties of CoFe2O4/NG/PMMA nanocomposites through swift heavy ions irradiation. *Ceramics International*, 317-324.

Yao, J. (2009). Microwave Photonics. *Journal of Lightwave Technology*, 314-335.

Yuping, D., Shunhua, L., & Hongtao, G. (2005). Investigation of electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of polyaniline composite. *Science and Technology of Advanced Materials*, 513-518.

Yüzçelik, C. K. (2003). *Radar Absorbing Materials Design.* Monterey,California: Naval Postgraduate School.

Zdziennicka, A., Szymczyk, K., Krawczyk, J., & Janczuk, B. (2017). Some Remarks on the Solid Surface Tension Determination from Contact Angle Measurement . *Applied Surface Science*.

Zhi, C. Y., Bando, Y., Wang, W. L., Tang, C. C., Kuwahara, H., & Golberg, D. (2008). Mechanical and Thermal Properties of Polymethyl Methacrylate-BN Nanotube Composites. *Journal of Nanomaterials*.

Zohuri, B. (2020). *Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology*. Springer Nature Switzerland.

Zoughi, R. (2000). *Microwave Non-Destructive Testing and Evaluation Principles.* Kluwer Academic Publishers

Url-1 <http://www.goodfellow.com/A/Polymethylmethacrylate.html>, erişim tarihi 06.02.2021.

Url-2 <http://elektromanyetiktestblog.blogspot.com/2013/05/elektromanyetik-spektrum.html>, erişim tarihi 10.02.2021.

Url-3 <https://www.radartutorial.eu>, erişim tarihi 15.02.2021.

Url-4 < https://www.radartutorial.eu>, erişim tarihi 16.02.2021

Url-5 < https://www.atum.itu.edu.tr/tr/?page_id=309>, erişim tarihi 03.03.2021.

Url-6 < https://nano.itu.edu.tr/ekipmanlar>, erişim tarihi 04.03.2021.

Url-7 <http://www.hunitek.hacettepe.edu.tr>, erişim tarihi 05.03.2021

Url-8 <https://www.spectroscopyeurope.com/article/xps-surface-analysis-imaging-and-spectroscopy-metal-and-polymer-surfaces>, erişim tarihi 06.03.2021

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad **:** Fuat Berke GÜL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans:** 2017, İstanbul Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2020 – Günümüz. Türk-Alman Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

1. **F.B.Gul** & N.Baydogan, (2020). Synthesis of Poly (methyl methacrylate) with Borax Decahydrate Addition for Energy Applications. *Proceedings of International 2nd Conference on Sustainable Energy and Energy Calculations*, pp 38-44.
2. T.Bel, M.Muhammettursun, E.Kocacinar, E.Erman, **F.B.Gul**, E.Dogan, M.Celep, N.Baydogan, (2021). Improvement of Thermal Stability and Gamma-Ray Absorption in Microwave Absorbable Poly(methyl methacrylate)/Graphene Nanoplatelets Nanocomposite. *Journal of Applied Polymer Science*. https://doi.org/10.1002/app.50897
3. M.Muhammettursun, T.Bel E.Kocacinar, E.Erman, **F.B.Gul**, A.Augousti, M.Celep, N.Baydogan, (2021). Investigation of the Elastic Properties of Poly(methyl methacrylate) Reinforced with Graphene Nanoplatelets. *Journal of Applied Polymer Science*. https://doi.org/10.1002/app.50689